



Examensarbete

Byggingenjörprogrammet 180hp

Betongsstyrka och koldioxidemission i
kalla klimat: En miljöanalys

Byggteknik 15 hp

Halmstad 2025-05-09

Ali Saad & Demir Halili



HÖGSKOLAN
I HALMSTAD

Disposition

Titel	Betongstyrka och koldioxidemission i kalla klimat: En miljöanalys
Författare	Ali Saad & Demir Halili
Lärosäte	Högskolan i Halmstad
Handledare	Philip Fridèn & Yahya Ghasemi
Examinator	-
Period	VT25
Sidor	52
Nyckelord	Klimatförbättrad betong, vintergjutning, koldioxidutsläpp, hållbart byggande, hållfasthetsutveckling, värmeutveckling

Sammanfattning

Detta examensarbete undersöker möjligheterna att använda klimatförbättrad betong (KFB) med reducerad klinkerhalt under kalla väderförhållanden i jämförelse med traditionell betong med högre klinkerhalt, även kallad referensbetong. Eftersom cementtillverkningen står för cirka 5–8 % av de globala koldioxidutsläppen är det viktigt att optimera betongens sammansättning för att minska dess miljöpåverkan. Med hjälp av numeriska simuleringar i programvaran HETT22 har olika nivåer av KFB analyserats under vintertemperaturer för att utvärdera temperatur- och hållfasthetsutvecklingen. Studien har även beräknat de koldioxidutsläpp som uppstår vid uppvärmningsåtgärder under den tidiga härdningen. Trots att uppvärmning medför ökade utsläpp, ger KFB en nettominskning av totala koldioxidutsläpp jämfört med referensbetongen. Studien visar att KFB är ett hållbart alternativ även i kallt klimat, förutsatt att rätt åtgärder vidtas.

Abstract

This thesis investigates the feasibility and environmental advantages of using climate-improved concrete (CIC) with reduced clinker content in cold weather conditions, in comparison to conventional concrete with higher clinker content. Cement production accounts for approximately 5–8% of global CO₂ emissions, and optimizing concrete mixtures is essential for minimizing environmental impact. Through numerical simulations using the HETT22 software, different CIC levels were analyzed under varying winter temperatures to assess temperature and strength development. The study also quantifies CO₂ emissions associated with the heating measures required to protect the concrete during early curing stages. Results show that although CIC has slower early strength gain, appropriate heating strategies can ensure sufficient curing without compromising long-term performance. While heating increases emissions, CIC still offers a net reduction in total CO₂ emissions compared to conventional concrete. The findings highlight the potential of CIC as a sustainable alternative in cold climates, provided that appropriate measures are taken.

Förord

Detta examensarbete genomfördes vid Högskolan i Halmstad som en del av byggingenjörsprogrammet under läs-perioden VT25. Arbetet som omfattar 15 högskolepoäng, utfördes i samarbete med Heidelberg Materials Cement Sverige.

Vi önskar rikta ett erkännande till vår huvudhandledare Philip Fredén, vid Halmstad Högskola, för exceptionell handledning och stöd under hela projektets gång. Hans branschexpertis och engagemang var avgörande för arbetets kvalitet och genomförande.

Ett särskilt tack riktar vi även till vår industrihandledare Dr. Yahya Ghasemi, vid Heidelberg Materials AB, för hans värdefulla insikter, tillgång till forskningsdata och kontinuerliga rådgivning under projektets olika faser.

Vi vill även tacka Skanska, NCC och PERI för deras generösa delning av branschexpertis och praktiska råd, vilket berikade vår förståelse för industrins utmaningar och lösningar.

Detta arbete representerar en viktig del av vår yrkesförberedande utbildning och har gett oss möjlighet att tillämpa teoretiska kunskaper i en praktisk forskningskontext.

Innehållsförteckning

Termer, definitioner och förkortningar.....	8
1. Introduktionskapitel.....	10
1.1 Bakgrund.....	10
1.2 Problembeskrivning	12
1.3 Syfte och Mål.....	13
1.4 Frågeställningar	13
1.5 Avgränsningar.....	13
2. Teoretisk ramverk.....	15
2.1 Tidigare forskning.....	15
2.1.1 Introduktion till tidigare forskning.....	15
2.1.2 Hållfasthetsutveckling av betong i kallt klimat.....	15
2.1.3 Effekten av kompletterande cementbaserade material (SCM).....	15
2.1.4 Klimatpåverkan från olika strategier av härdning.....	16
2.1.5 Sammanfattning / Relevans.....	16
2.2 Betong.....	16
2.3 Cement.....	17
2.3.1 Cementtyper	17
2.4 Hållfasthetutveckling i betong	18
2.5 Faktorer som påverkar hållfasthetsutvecklingen	20
2.5.1 Vattencementtalet.....	20
2.5.2 Klimatförbättrad betong (KFB).....	21
2.6 Livscykelanalysmodullen	22
2.7 Cementhydratisering.....	23
2.7.1 Hydratiserings faser.....	24
2.7.2 Prediktion av hydratiseringsgrad.....	25
2.8 Värmeutveckling.....	25
2.9 Gjutning av betong i kall väderlek.....	26
2.9.1 Praktiska lösningar vid kall väderlek	26
3. Metod och Material	28
3.1 Metodologisk Ansats	28
3.2 KFB enligt Svensk Betong och dess egenskaper.....	28
3.3 HETT 22	29

3.3.1 Simulering av väggkonstruktion	29
3.3.2 Simulering av valvkonstruktion	30
3.3.3 Antaganden och parametrar	31
3.4 Beräkningsgång för temperaturutveckling.....	33
3.4.1 Hydratiseringsgrad	33
3.4.2 Hydratiseringsgrad för slagg	33
3.4.3 Värmeutveckling	34
3.4.4 Databas	34
3.5 Koldioxidberäkningar för valvkonstruktionen.....	34
4. Resultat	37
4.1 Betongens beteende i kall väderlek.....	37
4.2 Koldioxidberäkningar	38
5. Analys och Diskussion	40
5.1 Betongens prestanda vid gjutning i kall väderlek	40
5.2 Simuleringsbegränsningar och praktiska osäkerhetsfaktorer.....	40
5.3 Klimatpåverkan vid valvgjutning och uppvärmningsåtgärder.....	41
6. Slutsatser.....	44
7. Förslag till vidare studier.....	45
8. Referenser.....	46
9. Bilagor	50

Termer, definitioner och förkortningar

Branschreferens	Standardiserad sammansättning av betong som används som jämförelsegrund i byggbranschen
Cement	Är ett bindemedel som används i betong för att hålla samman andra material, såsom exempelvis sand och grus. När cement blandas med vatten sker en kemisk reaktion som kallar hydratisering
CO₂	Kemisk beteckning för Koldioxid
C₂S	Kemisk beteckning för Dikalciumsilikat
C₃S	Kemisk beteckning för Trikalciumsilikat
EPD	Miljöproduktdeklaration "Environmental Product Declaration"
Fabriksbetong	Betong som blandas i fabrik och levereras till byggarbetsplatsen för platsgjutning
HETT22	HETT22 är ett prognosverktyg från Heidelberg Materials som används för att beräkna värmeutveckling och temperaturfördelning i betongkonstruktioner under härdning
Hydratisering	Kemisk reaktion där vatten reagerar med ett annat ämne
Härdning	Härdning av betong är den kemiska process där cement reagerar med vatten (hydratisering) och gradvis utvecklar styrka och hållfasthet över tid
KFB/CIC	Klimatförbättrad betong/Climate- improved concrete
Klinker	Är en mellanprodukt som bildas vid tillverkning av cement. Den framställs genom att kalksten och mangelsten upphettas till cirka 1450 °C i en roterugn. Resultatet blir hårda, grå kulor som kallas cementklinker
LCA	Livscykelanalys-modul används för att utvärdera miljöpåverkan förknippad med en produkt
Prefabricerad betong	Betong som blandas och gjuts i fabrik som sedan levereras till byggarbetsplatsen för installation
SCM	Supplementary Cementitious Material eller tillsatsmaterial, är ämnen utöver vatten, cement och ballast som blandas in betongsammansättningen. Exempel på sådana material är masugnsslagg, flygaska och kalcinerad lera

vbt

Vattenbindemedelstalet

vct

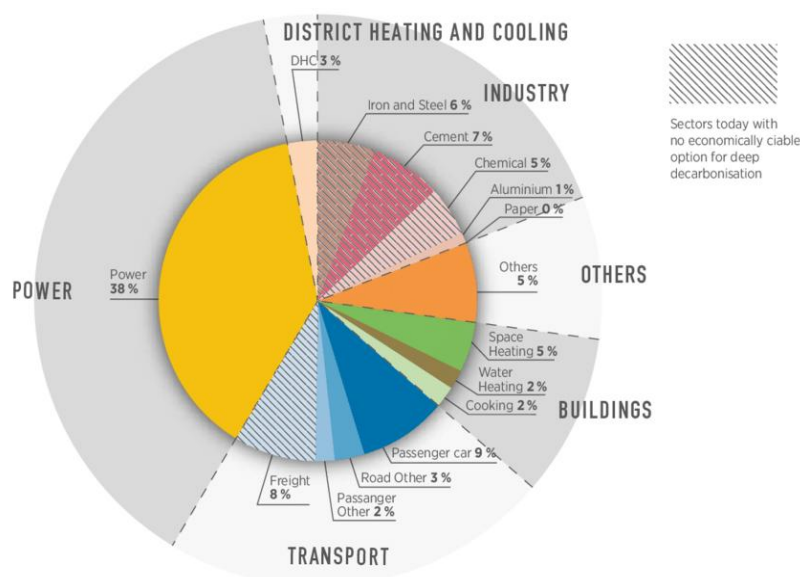
Vattencementalet

1. Introduktionskapitel

Det här inledande kapitlet presenterar examensarbetets grundläggande element. Först ges en bakgrund som sätter studien i sitt sammanhang, följt av en problembeskrivning som identifierar de centrala utmaningarna. Därefter redogörs arbetets syfte och mål, de specifika frågeställningar som ska besvaras presenteras och slutligen avslutas kapitlet med de avgränsningar som satts för att begränsa studiens omfattning.

1.1 Bakgrund

Betong är det mest använda byggmaterialet i världen på grund av dess starka hållfasthetsegenskaper och långa livslängd. Dess användning är en viktig faktor i utvecklingen av byggnadsinfrastruktur världen över, men betongindustrin idag är en av de större källorna till koldioxidutsläpp globalt. Trots omfattande ansträngningar för att minska koldioxidutsläppen från cement, som är en huvudkomponent i betong, står cementproduktionen fortfarande för 5–8 % av de globala koldioxidutsläppen. Den stora klimatpåverkan som cement utgör beror även på den massiva efterfrågan, vilket ytterligare blir en miljöpåfrestning (Farfan, Fasihi & Breyer 2019; Chen et al. 2020). Vid cementtillverkning förs blandningen in i en roterugn där kemiska reaktioner sker vid 1 450–1 500 °C, vilket resulterar i bildandet av cementklinker. Merparten av energianvändningen och koldioxidutsläppen i cementproduktionen uppstår i kalcineringsprocessen, där förkalcinationen står för cirka 60 % av energibehovet och genererar omkring 60 % av cementanläggningens totala CO₂-utsläpp (Fennell, Davis & Mohammed 2021).



Figur 1.1, Uppdelning av globala koldioxidutsläpp efter sektor år 2015 (IRENA, 2018).

Detta tyder på att till och med små förbättringar i betongens klimatavtryck kan ha framträdande globala effekter (Barcelo, Kline, Walenta & Gartner 2013). För att kunna

åstadkomma dem globala klimatmålen blir det av yttersta vikt att hitta hållbara alternativ som reducerar behovet av högcementhaltiga betongklasser (Yasien & Bassuoni 2024).

Tillsatsmaterial, även kallade *Supplementary Cementitious Materials* (SCM), är material som blandas in i betong för att reducera klinkerhalten, såsom flygaska, masugnsslagg och kalcinerad lera. Användningen av SCM minskar betongens klimatpåverkan, men medför samtidigt ytterligare utmaningar. Genom att minska klinkerhalten reduceras värmegenereringen under hydratiseringsprocessen. Detta leder i sin tur att SCM-blandad betong blir betydligt mer känslig i kalla klimat, till skillnad från betong med ren portlandscement (CEM I). Forskare hävdar att detta kan bero på att puzzolaniska reaktioner är långsammare än hydratisering av endast ren klinker (Lothenbach, Scrivener & Hooton 2011).

Betongens framtida prestationsförmågor påverkas av de tidiga härdningsförhållandena där klimatförhållandet direkt påverkar härdningsprocessen. Denna process är avgörande för betongens hållfasthetsutveckling, den saktar ned vid kallare utmohustemperaturer och upphör helt under fryspunkten. Detta resulterar i att betongen inte uppnår nödvändiga hållfasthetsegenskaper inom kritiska tidsramar och kan leda till permanenta skador i strukturen, på grund av isbildning inom porerna. Forskarna Nassif och Petrou (2013) hävdar även att betong som härdats i låga temperaturer vid kretsarna av fryspunkten, resulterar med en styrkenedsättning upp till 25 procent, men även en ökad vattenabsorption som försämrar dess frostbeständighet. Dessa negativa effekter förvärras av de termiska gradienter som uppstår under härdningen, vilket resulterar till inre spänningar och microsprickor i cementpastan, som i sin tur fördärvar konstruktionens långsiktiga egenskaper (Nassif & Petrou 2013).

En vanlig förekommande metod för att förebygga den reducerade värmeutvecklingen är att nyttja högre klinkerhalt i cement. Detta kan åstadkommas genom att öka cementhalten med bibehållen vattenhalt med samma cementtyp, som exempelvis högre dos av CEM I. Alternativt kan man använda sig utav cementtyp med högre klinker andel såsom exempelvis CEM I istället för CEM II. Denna typ av betong säkerställer snabbare temperatur- och hållfasthetsutveckling men leder däremot till betydligt högre koldioxidutsläpp och kostnader (Chen et al. 2020; Scrivener, John & Gartner 2018; SIS 2011). Detta väcker en nyfikenhet kring huruvida betong med lägre cementhalt kan användas effektivt i kalla klimat (Chen et al. 2020).

För att uppnå en optimal härdningsprocess vid låga temperaturer används ofta en kombination av olika tekniker. Enligt branschorganisationen Svensk Betong är uppvärmning med elkablar en vanlig metod. Även användning av isolerade formar och täckning av betongen förekommer frekvent. Utöver de åtgärder som vidtas i samband med själva gjutningen är uppvärmning av betongen redan på fabriken en vanlig metod (Svensk Betong, u.å.).

Betong med lägre klinkerhalt har avsevärt mycket lägre miljöpåverkan i jämförelse med högre cementhaltig betong, men implementeringen av betong med lägre klinkerhalt är starkt begränsad idag på grund av långsam hållfasthetstillväxt och med förhöjd risk för

frostskador i strukturen (Nassif & Petrou 2013; Chen et al. 2020). Genom att eventuellt införa kontrollerad uppvärmning under härdningsprocessen, kan betongens temperatur bibehållas över fryspunkten. Detta påskyndar hydratiseringen och minimerar risken för frostskador, vilket gör det möjligt att åstadkomma likartiga hållfasthetsnivåer som betong med högre klinkerhalt (Shlyakhtina, Ivankova & Popov 2021).

Forskning indikerar att betong med lägre klinkerhalt är ett ekonomiskt attraktivt alternativ, eftersom det minskar materialbehovet av cement och därmed CO₂-utsläppet (Chen et al. 2020; Lothenbach, Scrivener & Hooton 2011). Trots branschmässiga framsteg inom utvecklingen av KFB, förbättrade härdningsmetoder och en ökad förståelse för hållfasthetsutveckling i kalla klimat kvarstår flera utmaningar. Det gäller särskilt att säkerställa frostsäkerhet i de tidiga stadierna, där risken för frostskador fortfarande begränsar användningen av betong med lägre klinkerhalt.

1.2 Problembeskrivning

Betong spelar en avgörande roll inom byggindustrin, men dess produktion och användning medför flera kritiska utmaningar. Cementtillverkningen står för en betydande del av de globala koldioxidutsläppen, vilket har stärkt behovet av mer hållbara alternativ (Farfan, Fasihi & breyer 2019; Barcelo et al. 2013). Samtidigt innebär byggande i kalla klimat ytterligare tekniska hinder, detta eftersom betongen kan ha svårt att uppnå den hållfasthet som krävs för att motstå frost och mekaniska belastningar (Nassif & Petrou, 2013).

En vanlig lösning i dagens byggpraxis är att använda betong med hög cementhalt, vilket kan påskynda värmeutvecklingen men inte nödvändigtvis hållfasthetsutvecklingen vid bibehållet vattencementtal (vct). Dock leder detta till högre koldioxidutsläpp, vilket skapar en konflikt mellan tekniska krav och hållbarhetsmål (Chen et al. 2020).

KFB har lyfts fram som ett mer hållbart alternativ tack vare sin lägre cementhalt, vilket innebär en reducerad klinkerhalt. Denna minskning kompenseras genom tillsats av SCM:er vilket leder till minskade klimatpåverkan. Dock begränsas dess användning i kalla klimat på grund av långsammare tidig temperatur- och hållfasthetsutveckling (Phuyal, Sharma, Mahar, Mondal & Mashal 2023). Betongens långsammare hållfasthetsutveckling i kalla klimat innebär att den inte uppnår tillräcklig styrka i de tidiga härdningsstadierna. Detta ökar risken för frostskador eftersom vattnet i betongen inte binds tillräckligt snabbt och kan frysa. Vatten expanderar när de fryser, detta leder till sprickor och minskar betongens hållfasthet, vilket i sin tur påverkar konstruktionens säkerhet (Shlyakhtina, Ivankova & Popov 2021).

Problemet består således i att fastställa vid vilka temperaturer KFB kräver extra åtgärder för att förhindra tidig frysning, exempelvis genom uppvärmning av formen, eller uppvärmning av underliggande hus plan vid gjutning av väggar och bjälklag. En annan avgörande fråga är att beräkna hur stora CO₂-utsläpp dessa åtgärder medför. Om dessa utsläpp inkluderas i den totala klimatpåverkan, kvarstår då fortfarande en nettobesparing jämfört med referensbetongen. Det centrala blir här att avgöra om de CO₂-besparingar

som KFB möjliggör helt eller delvis motverkas av de utsläpp som krävs för att genomföra dessa åtgärder

1.3 Syfte och Mål

Syftet med detta examensarbete är att undersöka om KFB kan ersätta referensbetong på ett miljömässigt fördelaktigt sätt vid gjutning i kall väderlek. Studien fokuserar på temperatur- och hållfasthetsutveckling vid låga temperaturer samt klimatpåverkan i form av CO₂-utsläpp från uppvärmningsåtgärder under härdningen.

Målet är att identifiera vilka typer av KFB som ger tillräcklig prestanda vid vintergjutning. Vidare ska det avgöras om CO₂-utsläppen från KFB med uppvärmning från olika värmekällor fortfarande är lägre än för referensbetongen. Resultatet ska ge underlag för mer hållbara val vid betonggjutning i kalla klimat.

1.4 Frågeställningar

Frågeställningarna lyder följande:

- (i) Är det miljömässigt fördelaktigt att använda KFB i kalla klimat jämfört med traditionell betong?
- (ii) Vilka typer av KFB lämpar sig bäst för olika väderförhållanden?

1.5 Avgränsningar

För att uppnå examenarbetets syfte och säkerhetsställa en genomförbar studie har följande avgränsningar gjorts:

- (i) *Simuleringar och programvara:* Analyser utförs med hjälp av simuleringsprogrammet HETT22, och inga fysiska experiment genomförs i laboriemiljö.
- (ii) *Klimatförhållanden:* Arbetet är avgränsat till att simulera betongens prestanda vid omgivningstemperaturer mellan +5 °C och -16 °C. Temperaturer utanför detta intervall behandlas inte. I samtliga simuleringar används en konstant vindhastighet på 3,04 m/s, vilket innebär att variationer i vindförhållanden inte beaktas.
- (iii) *Geografisk avgränsning:* Norra Sverige exkluderas från studien på grund av dess avvikande klimatförhållanden i jämförelse med övriga delar av landet. Analysen baseras i stället på historiska väderdata från Stockholm, Malmö och Göteborg, där medelvärden har använts för att representera ett mer genomsnittligt svenskt klimat.
- (iv) *Ekonomisk analys:* Studien inkluderar ingen ekonomisk analys. Det innebär att inga kostnadsberäkningar genomförs, vare sig för material, uppvärmningsåtgärder, transporter eller andra relaterade faktorer.
- (v) *Tidsram:* Examensarbetet är begränsat till en tidsperiod som inte tillåter långsiktig observation av betongens prestanda. Analysen är baserad på kort och medellångsiktiga hållfasthetsutvecklingar och prognostiseras i HETT22.

- (vi) *Betongrecept:* Alla betongrecept som studeras innehåller CEM II/A- LL 42.5R.
- (vii) *Uppvärmningsmetoder:* Studien beaktar endast koldioxidutsläpp relaterade till uppvärmning av betong med eldrivna varmluftsfläktar och dieseldrivna byggtorkar. Andra typer av uppvärmningskällor ingår inte i beräkningarna.

2. Teoretisk ramverk

Detta kapitel ger en översikt av betong som byggmaterial, från dess grundläggande sammansättning till dess egenskaper och användning. Här behandlas LCA, cementtyper, hållfasthetsutvecklingen, hydratiseringsprocessen och värmeutvecklingen, samt utmaningar och lösningar vid gjutning i kalla klimat. Kapitlet inkluderar också vad tidigare studier har undersökt inom området.

2.1 Tidigare forskning

2.1.1 Introduktion till tidigare forskning

För att bygga en uppfattning om kunskapsläget i nutid, så blir det av yttersta vikt att noggrant identifiera och granska tidigare forskning. Genom att värdera den kunskap som tagits fram så kan nya studier utformas med hjälp av etablerad kunskap, men adresserar även problematiken med att undvika upprepningar av befintliga teorier och modeller som tillämpas.

De huvudområden som kommer att behandlas i detta avsnitt, där tidigare forskning presenteras och diskuteras, är hållfasthetsutvecklingen av betong i kallt klimat, effekten av SCM i betong och klimatpåverkan av olika härdningsstrategier.

2.1.2 Hållfasthetsutveckling av betong i kallt klimat

Tidigare forskning har visat att utomhustemperaturen har en avsevärd påverkan på hållfasthetsutvecklingen i betong. Forskning lyfter även fram att kallt klimat utgör en problematik för färskbetong på grund av att vattnet som är avsett för hydratiseringen har en stor risk för frysning, vilket eventuellt skapar en konstruktion med lägre hållfasthet än avsett. Detta kan skapa en farlig konstruktion som inte bör tas i bruk. För att hantera detta använder byggbranschen bland annat metoder såsom betong med högre cementhalt, värmekablar och varmbetong (Chen et al. 2020; Shlyakhtina, Ivankova & Popov 2021).

2.1.3 Effekten av kompletterande cementbaserade material (SCM)

Forskare hävdar att användningen SCM, såsom flygaska, slagg och kalcinerad lera, bidrar till att minska betongens miljöpåverkan. Samtidigt har det framkommit att ett stort utbyte av cement mot SCM kan vara problematiskt i kalla klimat. Den högre andelen SCM i betongsammansättningen leder till en reducerad värmeutveckling under hydratiseringsprocessen (Phuyal et al. 2023). Detta antas bero på att de puzzolaniska reaktionerna sker långsammare än hydratiseringen av ren portlandcement. Detta resulterar i en lägre hållfasthetsutveckling i de tidiga stadierna i hydratiseringsprocessen. Men vid goda gjutnings förhållanden så kan det gentemot förbättra det långsiktiga hållfasthetsegenskaperna (Lothenbach, Scrivener & Hooton 2011; Shi, Meyer & Behnood 2008).

2.1.4 Klimatpåverkan från olika strategier av härdning

Forskare är eniga om att åtgärder för vintergjutning är nödvändiga för att åstadkomma en konstruktion utformad för säker användning. Däremot visar forskning emellertid att olika metoder ger märkbara skillnader när det kommer till CO₂ utsläpp, samtidigt som olika metoder bör nyttjas för olika delar av betongkonstruktionen för att uppnå en konstruktion med hållbarhet i fokus.

Härdningsåtgärder som exempelvis användning av värmekablar är väldigt energikrävande och anses vara ett alternativ som bidrar till koldioxidutsläpp. En annan vanlig metod som tillämpas vid vintergjutning är betongsammansättning med hög andel cementhalt, vilket påskyndar värmeutveckling i hydratiseringen och leder till snabbare temperatur- och hållfasthetsutveckling. Men samtidigt anses detta vara ett alternativ som ger en betydligt högre klimatpåverkan i jämförelse med andra metoder.

Ytterligare en metod som är vanligt förekommande är täckning och isolering av formarna, ofta i kombination med ytterligare tekniker. Denna metod anses vara det mer miljövänliga alternativet på grund av möjligheten till återanvändning, men är dock inte lika effektiv som andra metoder när det nyttjas individuellt (Chen et al. 2020; Shlyakhtina, Ivankova & Popov 2021).

2.1.5 Sammanfattning / Relevans

Sammanfattningsvis visar forskning att kallt klimat avsevärt påverkar betongens hållfasthetsutveckling och att åtgärder som värmekablar, hög cementhalt och isolering används för att motverka detta (Chen et al. 2020; Shlyakhtina, Ivankova & Popov 2021). Användning av SCM kan minska miljöpåverkan men försvårar tidig hållfasthetsutveckling vid kallt klimat (Phuyal et al. 2023). Valet av härdningsstrategi är en faktor som tydligt påverkar klimatpåverkan. Energiträvande metoder som värmekablar eller hög cementhalt ger högre koldioxidutsläpp än till exempel isolering, som är ett mer hållbart men mindre effektivt alternativ (Chen et al. 2020).

Även ifall tidigare forskning ger en solid grund av betonggjutning och dess åtgärder i kalla klimat, finns idag stora kunskapsluckor kring åtgärder som erbjuder det mest miljövänliga alternativet.

2.2 Betong

Betong har idag blivit det mest omfattande material i mänsklig historia, endast överträffat utav vatten. Den stora mängden betong som nyttjas världen över är estimerad till tre ton per individ världen över (Gagg 2014).

Den moderna betongen som tillämpas i byggbranschen består i grunden av de tre huvudkomponenterna cement, vatten och ballast (grus, sand och sten). Utöver detta inkluderas vanligtvis tillsatsmedel för specifika önskemål. I KFB ersätts cement i varierande grad med alternativa tillsatsmedel med liknande egenskaper som cement. Valet av betong i byggnader baseras ofta på betongens unika egenskaper (Svensk Betong 2022).

2.3 Cement

Cement är ett finmalt pulver som huvudsakligen består av kalksten och märgelsten, en blandning av kalk och lera. Vid lösning i vatten genomgår det en kemisk reaktion som kallas hydratisering, där cementgelen som skapas stelnar och binder samman andra material. Detta leder till ett outhärligt bindemedel i byggindustrin (Heidelberg Materials u.å; Taylor 1997).

Vidare är cementproduktionen en komplex och krävande process som innefattar flera steg. Processen börjar med krossning samt nedbrytning av råmaterialen kalksten och märgelsten till ett fint pulver. Detta pulver värms innan det förs in i cementugnen med en värmekonstant på 1450°C, vilket resulterar till mellanprodukten kallad för klinker, när denna kyls ner blandas klinker med små mängder av sand och gips. Detta skapar det slutliga produkten cement som vi idag använder i industrin (Heidelberg Materials, u.å).

2.3.1 Cementtyper

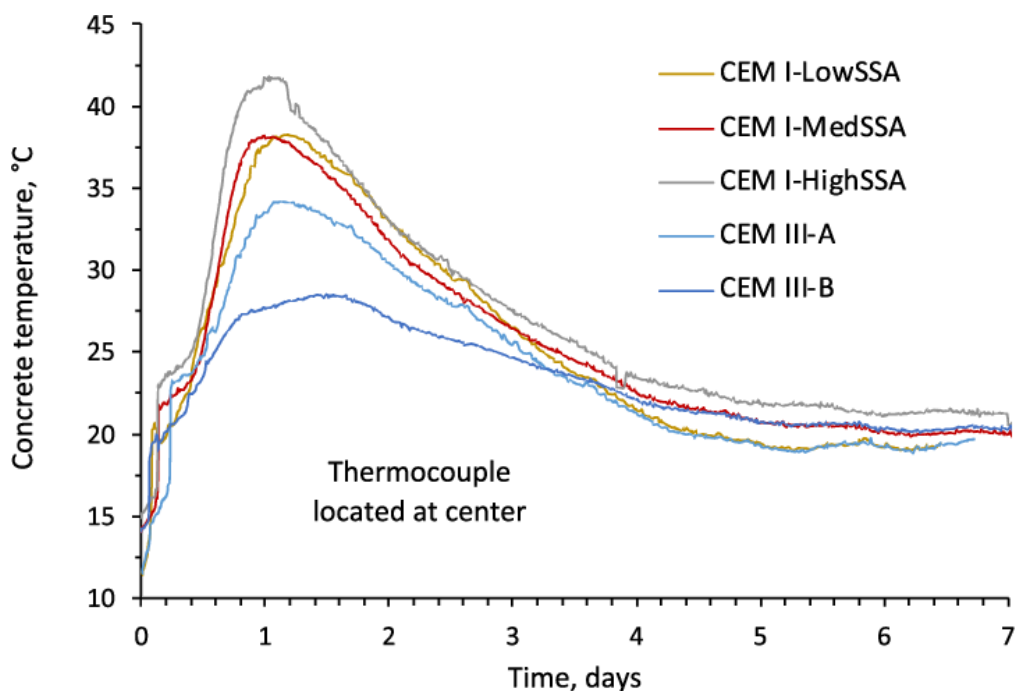
Cement kategoriseras i flera distinkta typer, som är anpassade för olika användningsområden. Enligt standarden SS-EN 197-1:2011 kategoriseras 27 olika ordinära cementtyper, inklusive sulfatresistenta varianter samt slaggcement med låg tidig hållfasthet. Dessa cementtyper varierar i sammansättning och egenskaper för att möta specifika krav i olika byggprojekt (SIS 2011).

Resultatet av (Ghafoori, Maler, Najimi, Hasnat & Gbadamosi 2025) visar att den typ av cement som används i betong har en väsentlig effekt på betongens hållfasthetsutveckling och prestanda. Valet av cementtyp varierar stort mellan olika länder och regioner, med anledning av klimat (Ghafoori et al. 2025).

Ren portlandcement benämns som CEM I och ger generellt en mer rapid temperatur- och hållfasthetsutveckling i början, detta på grund av en initialt högre klinkerandel som kan reagera med vatten. Viktigt att benämna är att detta påstående gäller för "Rapid" cement som benämns som CEM I, följt av nummer och "R" som ger en högre initial värmeutveckling vilket resulterar till en kvickare härdning. CEM I följt av nummer och "N" är även en ren portlandcement men ger normal härdningsprocess (SIS 2011). Denna skillnad beror på att CEM I R är ett mer finmalt cement som har större specifik yta som leder till en snabbare reaktion med vatten, detta fenomen är även känt som hydratiseringsprocessen, se *avsnitt 2.7*. Motsatsmässigt har CEM I N grövre cementkorn med lägre specifik yta och ger en "normal" hydratisering (SIS 2019).

Sammansatta cementtyper benämns som CEM II och innehåller tillsatser såsom flygaska, slagg eller kalksten. Detta resulterar i en något långsammare temperatur- och hållfasthetsutveckling, men kan i vissa fall leda till högre hållfasthet på längre sikt.

Slaggcement benämns som CEM III, och är en typ av cement som till skillnad från CEM I och CEM II, har en stor andel av portlandsklinkern ersatt av masugnsslagg, vilket ger en långsammare temperatur och hållfasthetsutveckling (Ghafoori et al. 2025; SIS 2011).



Figur 2.1, En jämförelse av hur olika cementtyper påverkar betongens temperaturutveckling under härdningen (El-Mir, Assaad, Nehme & El-Hassan 2022).

2.4 Hållfasthetutveckling i betong

SS-EN 206 är en europeisk standard för betong, vilket i Sverige tillämpas genom antaganden av Svenska institutet för standarder (SIS). Den definierar hållfasthetsklasser med hjälp av C-beteckningar följda av två numeriska värden. Bokstaven C avser betong, värdet efterföljt representerar cylinderhållfastheten och det påföljande värdet anger kubhållfastheten, båda uttryckta i megapascal (MPa). Standarden ställer även krav på att betongen uppfyller beständighet och konsistens baserat på ett flertal faktorer beroende på dess användningsområde (SIS 2024).

Hållfasthet hos betong mäts normenligt efter 28 dygn, detta intervall har ansetts som en standard, då den gjutna betongen efter denna tidpunkt uppnår sin slutliga styrka mätt i tryckhållfasthet. Det är dock av intresse att notera att betongens hållfasthet fortsätter att utvecklas över tid. Därför brukar det även förekomma teståldrar vid 7 dygn efter gjutning där man vanligtvis når cirka 75% av 28-dagars tryckhållfasthetstyrka. Dessutom kan det förekomma 56 och 90 dagars test, som har en tendens att nå upp till 15% högre hållfasthet än 28 dagars tryckhållfasthetstyrka (Gagg 2014; El-Mir et al. 2022).

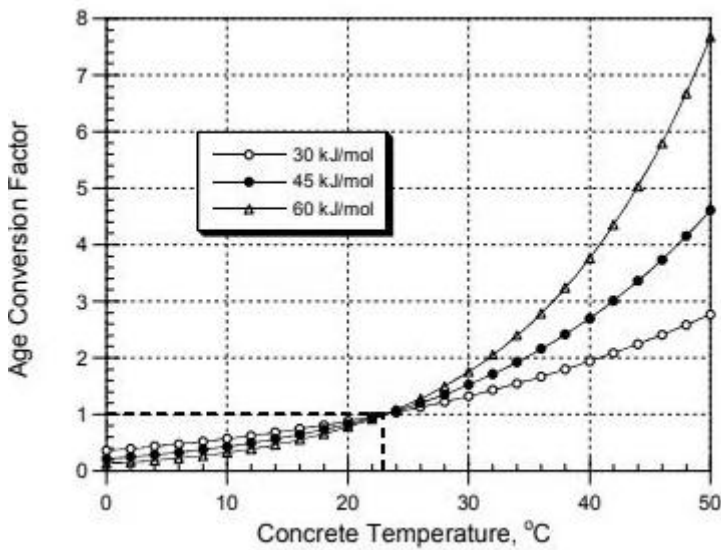
Betongens hållfasthetsutveckling kan direkt relateras till den värme som frigörs vid hydratiseringen, vilket oftast beskrivs genom mognadsfunktioner eller på engelska Maturity functions. Dessa funktioner beaktar de sammansatta effekterna av betongens temperatur och tidsförlopp. En formel som ofta nyttjas för att beräkna den ekvivalenta tiden presenteras nedan. (Raje, Deshmukh, Swamy, Patil 2019). *Formeln är anpassad för att passa de specifika förutsättningarna i studien.*

$$t_{20} = \Sigma(k_i \times t_i) \quad (\text{ekv 2.1})$$

t_{20} = Betongens ekvivalenta ålder vid 20 °C

k_i = Korrektionsfaktor för varierande temperaturer

t_i = Motsvarar faktisk ålder multiplicerat med aktuell temperatur



Figur 2.2, faktor K, Åldersomräkningsfaktor beräknad med olika energivärden, (Carino & Lew 2001).

En annan formel som är avsedd för att uppskatta hållfastheten och är baserad på Arrhenius formel presenteras nedan. Denna formel är vanligt förekommande i bland annat europeiska länder och har visat sig kunna ta hänsyn till låga temperaturer upp till -10°C (Raje et al. 2019).

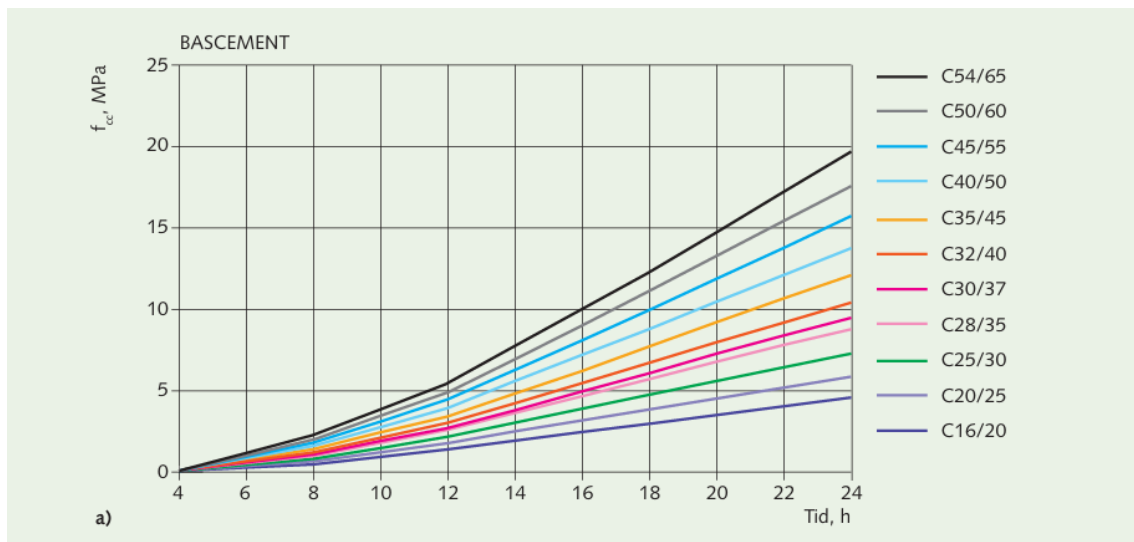
$$M(t, T) = \int_0^t k e^{\left[\frac{-E}{R \times T_K}\right]} dt \quad (\text{ekv 2.2})$$

K= Konstant

T_k = Betongens temperatur [Kelvin]

E = Aktiveringsenergi [kJ/ per mol]

R = Universella gaskonstanten



Figur 2.3, Tendenskurvor för Bascement som visar den relativa hållfasthetsutvecklingen hos olika betongklasser vid 20 °C (Heidelberg Materials, u.å).

2.5 Faktorer som påverkar hållfasthetsutvecklingen

2.5.1 Vattencementtalet

$$vct = \frac{w}{c} \quad (\text{ekv 2.3})$$

w = mängden vatten i betongblandningen ofta uttryckt i kilogram, [kg]

c = mängden cement i betongblandningen ofta uttryckt i kilogram, [kg]

Vatten-bindemedelstal som tar hänsyn till mängden tillsatsmedel och dess effektivitetsfaktor beskrivs nedan:

$$vbt = \frac{w}{C+D \times k} \quad (\text{ekv 2.4})$$

w = mängden vatten i betongblandningen ofta uttryckt i kilogram, [kg]

C = mängden cement i betongblandningen ofta uttryckt i kilogram, [kg]

D = mängden tillsatsmedel [kg/ m³]

k = effektivitetsfaktor [enhetlös]

Som framgår av ekvationerna (2.3) och (2.4) är förhållandet mellan vatten, cement och bindemedel centrala delar i betongblandningens sammansättning. Hållfastheten växer med avtagande porositet. Hur kapillärporerna bildas i cementpastan genom hydratiseringsprocessen beror på vct, alternativt vbt ifall tillsatsmaterial har använts (Westerberg 2021).

Termen vct anger relationen mellan vatten och cement i betong och är en viktig indikator på hydratiseringsgraden. Ett lågt vct värde indikerar högre hållfasthet och beständighet, samt bättre drag- och böjhållfasthet på grund av att mer cement krävs i blandningen. Detta leder till snabbare värme- och styrkeutveckling, samtidigt kan ett för

lågt vct begränsa hydratiseringen. Detta eftersom cement är ett hydrauliskt bindemedel och kräver tillräckligt med vatten för att reagera fullt ut.

Ett högt vct innebär en vattenrik blandning med relativt låg cementhalt i relation till vatten, vilket leder till långsammare härdning, reducerad värmeutveckling och försämrade långtidsprestanda hos betongen. Detta beror på att det finns mindre cement i blandningen vilket resulterar till långsammare värme- och styrkeutveckling (Pang et al. 2021; Taylor 1997).

Hydratiseringsprocessen i portlandcement är nära kopplad till klinkerfasernas kemiska reaktioner. Enligt Taylor (1997) påverkas denna process av flera faktorer, såsom exempelvis kornstorleksfördelningen och luftfuktigheten under härdningen. Därför är inte bara vct avgörande, utan även materialets egenskaper och externa förhållanden spelar en stor roll (Taylor 1997).

2.5.2 Klimatförbättrad betong (KFB)

KFB är en typ av betong som modifieras för att reducera dess koldioxidutsläpp, främst baserat på hållfasthetsklass och exponeringsklass. KFB delas in i olika nivåer baserat på hur stor andel av cementandelen som är ersatt med tillsatsmaterial. Detta gäller både fabriksbetong (betong som gjuts på byggarbetsplats) och prefabricerad betong (betong som gjuts i fabrik och transporteras till byggarbetsplatsen). KFB kan åstadkommas genom att bland annat anpassa sammansättningen i betongen genom val av bindemedel respektive tillsatsmaterial. Den mest centrala delen i att uppnå KFB är ersättningen av en del av cementklinkern med alternativa bindemedel som har lägre klimatpåverkan, såsom flygaska eller granulerad masugnsslagg. Dessa material är restprodukter från andra industriella processer och bidrar till att sänka betongens totala koldioxidavtryck (Svensk Betong 2022).

Masugnsslagg (GGBS) är en restprodukt från järnframställningen. Idag nyttjas denna form av slagg huvudsakligen på två sätt i byggbranschen. Dels genom att blanda slagg direkt i cementprodukter och dels genom att slagg tillsätts separat under blandningsfasen vid betongtillverkningen (SIS 2006; Svensk Betong 2022). Användningen av slagg i betong har en stor påverkan på hållfasthet- och temperaturutvecklingen. Studier visar att slagg under vissa förhållanden kan förbättra den långsiktiga hållfastheten, men samtidigt försämras den tidiga hållfasthetsutvecklingen, vilket är kritiskt eftersom en mindre andel cementklinker deltar i hydratiseringsprocessen. Dessutom sänker slagg den initiala temperaturutvecklingen i betongen, eftersom dess låga smältpunkt bidrar till lägre kalcineringsstemperatur för cementklinker. Detta innebär att KFB med högre nivåer, där mer cementklinker ersatts av tillsatsmedel såsom slagg, uppvisar en avsevärt sämre temperaturutveckling jämfört med traditionell betong (Shi, Meyer & Behnood, 2008; Svensk Betong 2024).

Svensk Betong tillhandahåller vägledning för miljöcertifiering av KFB i fyra nivåer, där endast stadierna A1 till A3 beaktas i livscykelanalysmodulen som omfattar produktionsfasen, inklusive råvaruhantering, transport och tillverkning. Det fyra

nivåerna av KFB beskrivs nedan och illustreras i *figur 2.4* (Svensk Betong 2022; Svensk Betong 2024).

Nivå 1: Cementklinker ersätts med alternativa bindemedel som slagg eller flygaska för en grundläggande CO₂-reduktion på cirka 10% jämfört med referensreceptet.

Nivå 2: Receptet optimeras ytterligare med hjälp av den uppdaterade standarden SS 137003:2021, vilket möjliggör en större andel alternativa bindemedel och uppnår cirka 20% CO₂-reduktion jämfört med referensreceptet.

Nivå 3 & 4: Kräver avancerad receptoptimering, processförbättringar och tidig planering för maximal klimatbesparing. Potentialen är upp till 30–40% CO₂-reduktion jämfört med referensreceptet, men nivåerna kan begränsas av regelverk och tekniska förutsättningar (Svensk Betong 2022).

Fabriksbetong Tabell 1	Exponerings- klass	Hållfasthets- klass	vct _{ekv} *	Klimatpåverkan GWP-GHG, kg CO ₂ ekv/m ³				
				Bransch- referens	Klimatförbättrad, max			
					Nivå 1	Nivå 2	Nivå 3	Nivå 4
Hus invändigt RF _{krav} < 85%, tex plastmatta och vissa fall parkett	X0, XC1	C50/60	0,32	385	345	310	265	< 230
			0,35	365	330	290	255	≤ 220
			0,40	340	305	270	240	≤ 205
RF _{krav} < 90%, tex bjälklag	X0, XC1	C35/45	0,45	305	275	245	215	≤ 185
			0,50	280	255	225	195	≤ 170
Inomhus med låg fuktighet	X0, XC1	C30/37	0,55	255	230	205	180	≤ 155
			0,60	240	215	190	170	≤ 145
			0,65	225	205	180	160	≤ 135
			0,70	205	185	165	145	≤ 125

Figur 2.4, Klimatpåverkan i faserna A1-A3 i LCA för olika betongtyper, (Svensk Betong 2024).

2.6 Livscykelanalysmodullen

Livscykelanalys-modulen (LCA) är ett system som används för att utvärdera miljöpåverkan förknippad med en viss produkt under hela cykeln, från skapandet av produkten som behandlar att naturresurser utvinns för produktens skapande och till slutskedet av produkten. LCA kan nyttjas för att värdera den totala miljöpåverkan av en byggnad och som referensmall för att skapa mer miljövänliga bostäder (Boverket 2024).

Svensk Betong (2022) hävdar att via en LCA modul kan man med god tillförlitlighet anta att 90% av koldioxidutsläppen som betong skapar kommer ifrån cementklinkern. I det allra flesta miljöproduktdeklarationer EPD:er som har redovisats, har endast stadiet A1-A3 redovisats. Detta tyder på att transport och installationsprocessen för betong faller bortom ramarna i de flesta EPD:er (Boverket 2024; Svensk Betong 2022).

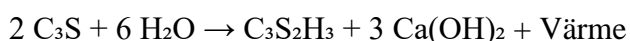
A1–5 Byggskede		
A1–3 Produktskede	A1	Råvaruförsörjning
	A2	Transport
	A3	Tillverkning
A4–5 Byggproduktionsskede	A4	Transport
	A5	Bygg- och installationsprocess
B1–7 Användningsskede	B1	Användning
	B2	Underhåll
	B3	Reparation
	B4	Utbyte
	B5	Ombyggnad
	B6	Driftsenergi
	B7	Driftens vattenanvändning
C1–4 Slutskede	C1	Demontering, rivning
	C2	Transport
	C3	Restproduktsbehandling
	C4	Bortskaffning
D Fördelar och belastningar utanför systemgränsen		

Figur 2.5, LCA för byggnader där de olika skedena har olika bokstavsbeteckningar, (Boverket 2024).

2.7 Cementshydratisering

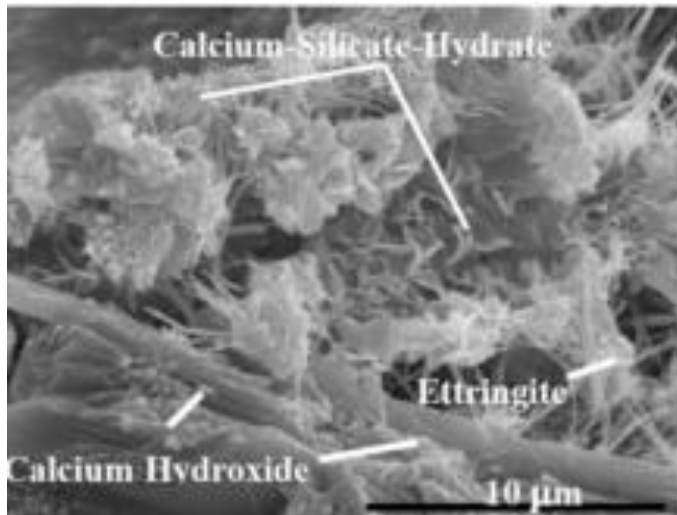
Cementshydratisering är den kemiska reaktionen som uppstår när cement blandas med vatten, vilket leder till att betongen i frågan börjar anta sin solida form och utvecklar därmed sin hållfasthet. Denna reaktion uppstår på grund av att silikater inuti cement, dikalciumsilikater (C_2S) och trikalciumsilikater (C_3S), reagerar med vatten och skapar kalciumsilikathydrat (C-S-H) samt kalciumhydroxid (CH). *Anpassade kemiska formler presenteras nedan* (Taylor 1997; Li 2011).

C_3S ansvarar för den tidiga hållfasthetsutvecklingen inom betong, reaktionen ser ut enligt följande:



C_2S (icke-stökiometrisk) bidrar till en mer långsiktig hållfasthet inom betong. Värt att notera att även denna reaktion producerar värme men inte i samma grad som reaktionen som C_3S . Reaktionen för C_2S ser ut enligt följande:

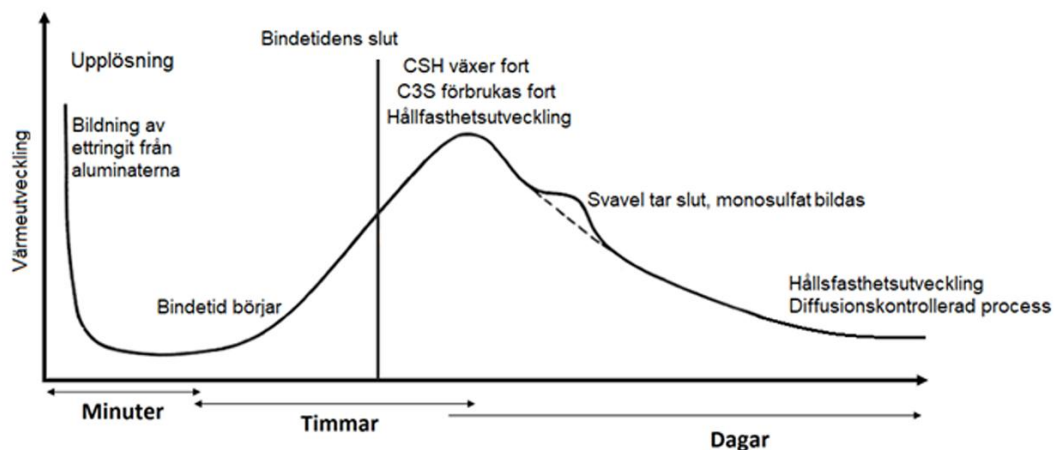




Figur 2.6, Kalciumsilikathydrat, kalciumhydroxid och ettringit, (Selander 2017), via Heidelberg Materials.

2.7.1 Hydratiserings faser

Hydratiseringsprocessen i betong sker huvudsakligen inom ramarna av fem individuella faser där tid respektive temperatur mäts i en kurva, där X-axeln representerar tid och Y-axeln representerar temperaturutveckling. Temperaturen mäts för att kunna avse den övergripande styrkan som betongen uppnår (Mindess, Young & Darwin, 2003).



Figur 2.7 Hydratiseringsprocessen med hjälp av en Tid-Temperatur kurva, (Aguirre 2022) via Heidelberg Materials.

Den första fasen (initiala reaktionen) uppstår när cement kommer i kontakt med vatten, här bildas Ca^{2+} och SiO_4^{4-} joner som frigörs i lösningen. Detta leder till kvick värmeutveckling i betongen.

Den andra fasen kallas för induktionsperioden eller latensfasen (viloperiod). Här saktar reaktionen ner och värmeutvecklingen sänks betydligt. Forskaren Taylor (1997) argumenterar att detta kan bero på flera anledningar men att det troligtvis kan bero på en

metastabil passiveringsfilm som reducerar joners diffusion. Denna film spelar en avgörande roll för att reglera reaktionshastigheten och betongens egenskaper under de första timmarna efter blandning.

Den tredje fasen är ofta förknippad med acceleration. Här ökar reaktionen substant på grund av omkristallisering av den passiverande filmen, men även på grund av tillväxt av C-S-H och CH. Detta resulterar i ett stort hopp i värmeutvecklingen.

I den fjärde fasen (nedbromsningsfasen) avtar reaktionshastigheten gradvis. Hydratiseringen fortsätter dock under en längre period. Enligt Taylor (1997) beror detta på att hydreringen av β -C₂S sker i en långsammare takt än av C₃S, vilket i sin tur beror på att β -C₂S har en mer stabil kristallstruktur. Detta bidrar främst till betongens långsiktiga hållfasthetsegenskaper.

Vissa forskare menar att nedbromsningsfasen fortsätter i en femte fas där hydratiseringen långsamt fortsätter under en oförutsägbar framtid (Taylor 1997; Maturix 2024).

2.7.2 Prediktion av hydratiseringsgrad

Hydratisering som är kopplad till värmeutvecklingen kan förutspås och beräknas på olika sätt. Under de första dagarna av hydratiseringsprocessen kan den värme som utvecklas mätas med konduktionskalorimetri (conductive calorimetry), som registrerar hur snabbt värme avges. Men efter ett par dagar avtar värmeutvecklingen och denna metod blir därefter inte lika praktisk. Detta gör att man därefter ofta använder en metod som löser upp den hydratiserade cementpastan med syra och försöker jämföra denna med icke bruten (ohydratiserad) cement. Genom detta kan man få ut den värme som cementen avgett under hydratiseringen. Formeln för att beräkna mängden värme vid en specifik tidpunkt visas nedan (Taylor 1997).

$$H_t = a(C_3S) + b(C_2S) + c(C_3A) + d(C_4AF) \quad (\text{ekv 2.5})$$

H_t= värmeutveckling [kJ/kg cement]

a,b,c,d = koefficienter/konstanter

C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF = massandelar av cementets huvudfaser

2.8 Värmeutveckling

Den initiala värmeutvecklingen som sker i betong beror på hydratiseringsprocessen. Värmeutvecklingen är en essentiell faktor för en lyckad härdningsprocess och bristande värmeutveckling kan resultera i oönskade hållfasthetsegenskaper. Just i kalla klimat blir värmeutvecklingen särskilt viktig, då forskning tyder på att hydratiseringsprocessen helt avtar ifall betongen når en temperatur på cirka -2.8°C. Detta leder till att blandningsvattnet avsedd för hydratiseringsprocessen fryser, vilket i princip stoppar hydratiseringen helt (Yasien & Bassuoni 2024).

Schackow et al. (2016) hävdar att hydratiseringsprocessen kan liknas med en exoterm reaktion som genererar en stor mängd värme. Det lyfts även fram att massiva

konstruktioner såsom skyskrapor, infrastrukturprojekt och betongdammar utgör denna typ av termodynamisk utmaning. Denna massiva värmeutveckling kan i sin tur resultera i termiska spänningar och sprickbildningar i betongen, vilket i sin tur kan leda till degradering av materialegenskaper och förkortad teknisk livslängd (Schackow et al. 2016; Yasien & Bassuoni 2024).

2.9 Gjutning av betong i kall väderlek

Vintergjutning av betong innebär specifika utmaningar i norra regioner, främst på grund av de låga omgivningstemperaturerna. För att säkerställa ett hållbart och växande samhälle är det av yttersta vikt att kunna gjuta betong även på vinterhalvåret. Vid vintergjutning måste betongen ha uppnått tillräcklig hållfasthet innan formrivning sker. De främsta risker och problematik som försvårar möjligheten till formrivning är bland annat:

- (i) **Tidig frysning:** Där vattnet i betongblandningen avsett för hydratiseringsprocessen fryser tidigt efter gjutning innan hydratiseringen har kommit tillräckligt långt. Detta resulterar i en signifikant volymförändring och kan orsaka sprickbildning, samt en porös struktur med väsentligt sämre hållfasthet. Utöver detta kan tidig frysning orsaka oregelbunden hållfasthetsfördelning, där delar av konstruktionen kyls ner snabbare än andra kan det uppstå temperaturgradienter. Detta kan resultera i inre spänningar i materialet och som tidigare benämnts som sprickor i betongen.
- (ii) **Långsam hållfasthetsutveckling:** Uppstår vid låga temperaturer där reaktionen mellan cement och vatten går långsammare. Detta fördröjer betongens förmåga att uppnå tillräcklig hållfasthet, vilket ökar risken för tidig frysning och leder till senare formrivning (Shlyakhtina, Ivankova & Popov 2021).

2.9.1 Praktiska lösningar vid kall väderlek

Betongindustrin har idag kommit långt med att förebygga utmaningar vid gjutning i kalla klimat. Flera effektiva åtgärder används på byggarbetsplatser, såsom:

- (i) **Värmebläktar:** Av olika energival som exempelvis el, diesel och andra energikällor kan användas för att tillföra värme och ge en ständig temperatur för den färska betongen och dess omgivning.
- (ii) **Värmekablar:** Består oftast av en ståltråd innesluten i ett skyddande plastlager och är anpassade för användning i alla typer av betongkonstruktioner, oavsett dimensioner, form eller armering. Värmekablar används ofta på grund av sin effektivitet och möjligheten att använda dem även i extremt låga temperaturer.
- (iii) **Skydd och isolering:** En av de vanligaste metoderna för att minska värmeförlust är att använda isolerande täckmaterial och formmaterial som minskar avkylningen. Exempelvis används värmefiltar, presenningar eller särskilda formar med isolerande egenskaper.
- (iv) **Anpassad betongsammansättning:** Cement med snabb värmeutveckling kan användas för att påskynda hydratiseringsprocessen. Här kan exempelvis högre

andel portlandcement nyttjas alternativt tillsatsmedel som accelererar härdningen kan också bidra till att betongen snabbare når nödvändig hållfasthet. Tillsatsmedel som exempelvis antifrysmedel i betongen, används ofta för att öka frostbeständigheten.

- (v) **Varmgjutning (hot concrete casting):** Är en annan metod där betongblandningens temperatur höjs genom uppvärmt vatten eller uppvärmda ballastmaterial (Chen et al. 2020; Shlyakhtina, Ivankova & Popov 2021).

3. Metod och Material

3.1 Metodologisk Ansats

Valet av metod baserades på förmågan att ge en detaljerad och kvantifierbar analys av betongtypernas egenskaper utan att kräva omfattande fältförsök. Totalt simulerades sex olika betongklasser, inklusive tre nivåer av KFB. Samtliga simuleringar genomfördes under tre olika temperaturscenarier för att bedöma materialens prestanda under varierande temperaturförhållanden, vilket möjliggjorde en snabb identifiering av de mest hållbara alternativen. Analyserna utfördes genom en kombination av numeriska simuleringar. Dessutom genomfördes en koldioxidberäkning för att uppskatta de utsläpp som olika åtgärder medförde, i syfte att skapa goda förhållanden för gjutning av KFB. Resultaten jämfördes och utvärderades för att ge en helhetsbild av materialens prestanda.

3.2 KFB enligt Svensk Betong och dess egenskaper

Med tanke på den betydande klimatpåverkan som är förknippad med betongtillverkning har Svensk Betong utvecklat riktlinjer för klimatvänligare betongprodukter som nämnts tidigare i *avsnitt 2.5.2*.

Den förändrade sammansättningen i lågklinkerbetong innebär att egenskaperna kan avvika från traditionell betong. I färskt tillstånd påverkar tillsatsmaterial som kalksten och slagg både reologi och hydratisering. Arbetbarheten kan förbättras genom optimerad partikelpackning och användning av lämpliga tillsatsmaterial, medan stelningstiden kan påverkas av långsammare reaktioner hos vissa tillsatsmaterial jämfört med klinker. Dessutom sker hållfasthetsutvecklingen ofta i en långsammare takt, särskilt vid låga temperaturer, vilket kräver särskilda åtgärder vid vintergjutningar.

Gällande beständighet visar lågklinkerbetonger flera fördelar. Genom en ökad tätning och en optimerad hydratiseringsprocess med tillsats av till exempel kalksten, uppnås förbättrat motstånd mot kloridinträngning och kemiska angrepp. Dessutom bidrar lägre värmeutveckling under hydratiseringen till att minska risken för sprickbildning i massiva konstruktioner. Vad gäller uttorkning kan vissa sammansättningar, exempelvis kalkstenkalcinerad lera blandningar, prestera bättre än traditionella betonger.

Användningen av dessa betonger liknar i stort sett traditionell betong, men vissa egenskaper kräver extra omsorg. Betonger med hög andel finmald kalksten kan exempelvis visa reducerad blödning, vilket ökar vikten av extra omsorg. Ytterligare vid kalla förhållanden kan långsammare stelning och hållfasthetsuppbyggnad kräva ytterligare vinteråtgärder (Ben-Haha, Termkhajornkit, Ouzia, Uppalapati & Huet 2023).

Tabell 3.1, betongtyper som analyseras i denna studie och dess vct

Betongtyp	vct
C30/37 Nivå 1	0,55

<i>C30/37 Nivå 2</i>	0,55
<i>C30/37 Nivå 3</i>	0,55
<i>C32/40 Nivå 1</i>	0,55
<i>C32/40 Nivå 2</i>	0,55
<i>C32/40 Nivå 3</i>	0,55
<i>C35/45 Nivå 1</i>	0,5
<i>C35/45 Nivå 2</i>	0,5
<i>C35/45 Nivå 3</i>	0,5
<i>C40/50 Nivå 1</i>	0,45
<i>C40/50 Nivå 2</i>	0,45
<i>C40/50 Nivå 3</i>	0,45
<i>C45/55 Nivå 1</i>	0,4
<i>C45/55 Nivå 2</i>	0,4
<i>C45/55 Nivå 3</i>	0,4
<i>C50/60 Nivå 1</i>	0,38
<i>C50/60 Nivå 2</i>	0,38
<i>C50/60 Nivå 3</i>	0,38

3.3 HETT 22

HETT22 är en simuleringsprogramvara baserad på COMSOL Multiphysics och använder väderdata från SMHI (Heidelberg Materials 2023). Programmet är särskilt utvecklat för att simulera temperatur- och hållfasthetsutvecklingen i betongkonstruktioner och syftar till att effektivisera planeringen av betonggjutningar. Genom att beakta faktorer som betongsammansättning, konstruktionens geometri, formmaterial, isolering samt aktuella väderförhållanden hjälper till HETT22 att identifiera lämpliga åtgärder för att säkerställa en optimerad och hållbar gjutningsprocess.

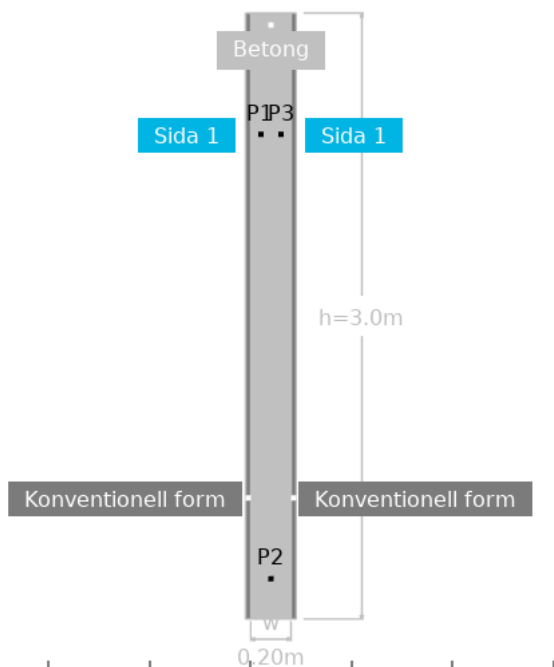
Programvaran kan simulera ett flertal viktiga aspekter, såsom formrivningstid, risk för tidig frysning, temperaturgränser, betongens hållfasthetsutveckling samt påverkan av olika åtgärder, exempelvis isolering, täckning och glättningstid. Detta ger användaren ett beslutsunderlag för att säkerställa en säker, effektiv och hållbar produktionsprocess (HeidelbergMaterials u.å).

I denna studie användes HETT22 för att analysera temperatur- och hållfasthetsutvecklingen i både vägg- och valvkonstruktioner under varierande förhållanden, såsom väder och täckning. Genom att modellera hur värme utvecklades och spreds i betong över tid, med särskild hänsyn till olika betongkvaliteter och gjutförhållanden, erhöles praktiskt användbara insikter för byggprojekt. Jämförelsen möjliggjorde mer resurseffektiva arbetssätt men även systematiska och kontrollerade jämförelser mellan olika scenarier.

3.3.1 Simulering av väggkonstruktion

I programvaran skapades en tvådimensionell modell för att representera en vägg med en tjocklek på 200 mm och en höjd på 3,0 meter. Modellen var symmetrisk, vilket innebär

att temperatur- och materialförhållanden antogs vara lika på båda sidor av väggen. Modellen som modellerades användes för att analysera temperaturutvecklingen under härdningsprocessen. Geometrin som användes vid modelleringen illustreras i *figur 3.1* nedan, där mätpunkten som kontrollerades är märkt med "P2" i figuren. Punkten är placerad mitt över väggens bredd och 200 mm ovanför dess nedre kant.



Figur 3.1, Geometri för vägg med lika sidor i HETT 22.

De parametrar som har använts vid simuleringen av väggkonstruktionen i denna studie såsom exempelvis geometri, isoleringsnivå, formmaterial och klimatdata presenteras nedan.

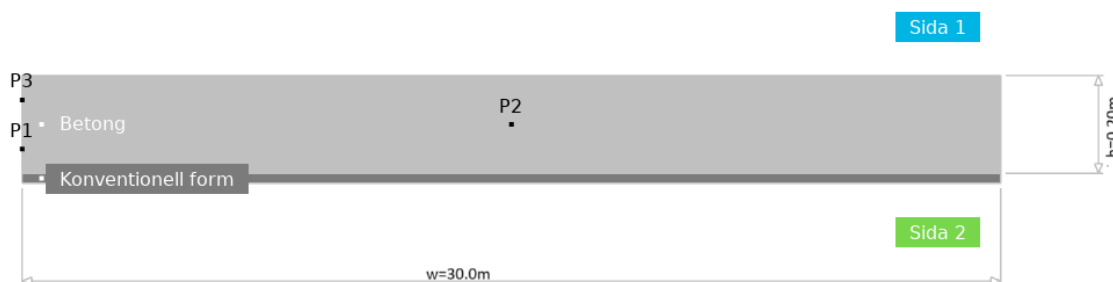
Tabell 3.2, Inställningsparametrar för väggkonstruktion i HETT22

Konstruktion	Väggjocklek - 200mm
	Vägghöjd - 3,0 m
	Form material – plywoodform 15 mm oisolerat
Betong	Betongkvalitet- se tabell 3.1
	Cementsort - CEM II/A- LL 42.5R
	Gjuttemperatur – 20 °C
Tid	Simuleringslängd - 24h
Väderförhållanden	Temperaturförhållanden runt konstruktionen – se avsnitt 3.3.3
	Vindförhållanden runt konstruktionen- 3.04m/s
Täckning	Typ av täckning – 30 mm isolermatta

3.3.2 Simulering av valvkonstruktion

Simuleringar i HETT22 genomfördes för att fastställa hur lång tid valvkonstruktionen behövde värmas upp för att uppnå 70 % av sin slutliga tryckhållfasthet, vilket enligt branschpraxis anses tillräckligt för formrivning. Valvet modellerades på samma sätt

som väggen med en tvådimensionell och symmetrisk geometri, omfattande 30 meters längd och 200 mm tjocklek. Geometrin framgår av *figur 3.2*, där den kontrollerade mätpunkten P2 är placerad i mitten av valvets längd och tjocklek. I simuleringarna beaktades enbart betongkvaliteten C30/37, både som branschreferens och nivå 2 av betongklassen. Den framtagna tiden utgjorde ett centralt underlag i de efterföljande koldioxidberäkningarna, där klimatpåverkan från både uppvärmningsåtgärder och materialval analyserades. En utförligare beskrivning av beräkningsmetodiken återfinns i senare avsnitt.



Figur 3.2, Geometri för valv med symmetrisk konstruktion i HETT 22.

De parametrar som legat till grund för simuleringarna av valvkonstruktionen presenteras nedan.

Tabell 3.3, Inställningsparametrar för valvkonstruktion i HETT22

Konstruktion	Bjälkkagstjocklek - 200 mm
	Bjälklagsbredd- 2.4m
	Form material – plywoodform 15 mm oisolerat
Betong	Betongkvalitet- C30/37 Branschreferens C30/37 Nivå 2
	Cementsort - CEM II/A- LL 42.5R
	Gjuttemperatur – 20 °C
Tid	Simuleringslängd - 10 dygn
Väderförhållanden	Temperaturförhållanden runt konstruktionen – se avsnitt 3.3.3
	Vindförhållanden runt konstruktionen- se avsnitt 3.3.3
Täckning	Typ av täckning – 30 mm isolermatta

3.3.3 Antaganden och parametrar

Antagandena och parametrarna som använts i *tabell 3.2* och *3.3* för både vägg- och valvkonstruktioner beskrivs nedan. Dessa antaganden och scenarier har utformats för att spegla realistiska förhållanden vid vintergjutning.

- (i) **Väggkonstruktion:** Valet av väggkonstruktion har gjorts utifrån den mest branschefterfrågade lösningen. Väggens mått är 3.0 m i höjd och 0,2 m i bredd.
- (ii) **Valvkonstruktion:** Valet av valvkonstruktion har gjorts med utgångspunkt i typiska tillämpningar inom bostadshusbyggande, vilket är en av de vanligaste byggnadstyperna i Sverige enligt branschpraxis. Valvets mått är 30,0 meter i längd och 200 millimeter i tjocklek.
- (iii) **Val av Form:** I simuleringarna användes en 15 mm oisolerad plywoodform för både vägg- och valvkonstruktioner, vilket är ett vanligt förekommande material i praktiken.
- (iv) **Betongkvalite:** Framgår i *tabell 3.1* för väggar och *tabell 3.3* för valv.
- (v) **Cementsort:** CEM II/A- LL 42.5R användes till alla simuleringar.
- (vi) **Gjuttemperatur:** Den initiala temperaturen på nygjuten betong antogs vara +20 °C, enligt branschpraxis vid vintergjutning.
- (vii) **Simuleringslängd:** 24 timmar för väggkonstruktionen, samt tiden det tog för valvkonstruktionen att uppnå 70% av den slutliga hållfasthetsstyrkan.
- (viii) **Temperaturdata:** Temperatur- och klimatvärden har hämtats från SMHI:s statistik över perioden oktober till mars under åren 2014–2025, vilket gav en tillförlitlig bild av både extrema och genomsnittliga vintertemperaturer (SMHI, u.å).
- (ix) **Temperaturintervall:** Analysen omfattar temperaturintervallet +5 °C till –16,0 °C. Den övre gränsen baserades på branschexpertis där åtgärder vanligtvis börjar vidtas vid +5 °C. Den undre gränsen baserades på den lägsta temperaturen som identifierades i Stockholm den 15 januari 2016 (SMHI, u.å).
- (x) **Vindförhållanden:** Vindens inverkan på betongens temperaturutveckling har beaktats i samtliga simuleringar. Ett genomsnittligt vindvärde om 3,04 m/s har fastställts baserat på klimatdata från SMHI för vintermånaderna under perioden 2014–2025 (SMHI, u.å). För väggkonstruktionen antas vinden påverka samtliga exponerade ytor med en konstant hastighet av 3,04 m/s. För valvkonstruktionen modelleras vindpåverkan enbart på den exponerade sidan, benämnd som "sida 1" i *figur 3.2*, medan "sida 2", vilken omges av väggar, antas vara skyddad från vind och därmed vindstill.
- (xi) **Täckning:** Betongen antas täckas vid temperaturer på –5 °C eller lägre med en 30 mm isolermatta, i enlighet med rekommendationer från branschexperter.

För att undersöka temperaturpåverkan under olika vinterförhållanden har tre scenarier definierats och tillämpats på både vägg- och valvmodellerna:

- (i) **Scenario 1:** I det första scenariot hölls temperaturen vid +5 °C i 12 timmar, följt av 0 °C i 12 timmar.
- (ii) **Scenario 2:** I det andra scenariot hölls temperaturen vid 0 °C i 12 timmar, följt av –5 °C i 12 timmar.
- (iii) **Scenario 3:** I det tredje scenariot hölls en temperatur på –5 °C i 12 timmar, följt av –16 °C i 12 timmar.

3.4 Beräkningsgång för temperaturutveckling

Beräkningen för temperaturutvecklingen baserades på empiriskt och teoretiskt underlag som integrerades i modeller och beräkningsformler. Detta avsnitt redogör för den beräkningsgång som antogs ha tillämpats i HETT22, men även hur temperaturutvecklingen i betongen beräknades.

3.4.1 Hydratiseringsgrad

Graden av hydratisering även känt som α , ger information om hur långt reaktionen mellan cement och vatten har avancerat. När ingen kemisk reaktion har skett indikerar α värdet noll, medan fullständig hydratisering motsvarar värdet ett (Fjellström, 2013).

$$\alpha = \frac{\text{Quantity of hydrated cement}}{\text{Original quantity of cement}} \quad (\text{ekv 3.1})$$

När cement åstadkommer en fullständig hydratisering förekommer bland annat gelprodukter som innehåller 25% kemiskt bundet vatten, även betecknat som w_n . Detta ger ytterligare en formel för hydratiseringsgraden (Fjellström, 2013).

$$\alpha = \frac{w_n}{0.25 \times C} \quad (\text{ekv 3.2})$$

α = hydratiseringsgrad [enhetslös]

w_n = kemiskt vatten [kg]

C = cementhalt [kg]

0.25 = konstant som motsvarar 25% kemiskt bundet vatten

3.4.2 Hydratiseringsgrad för slagg

Slagg och cement reagerar olika snabbt med vatten i så kallade hydratiseringsprocessen. Därför har de olika hydratiseringsgrader vid samma tidpunkt, cement har en snabbare reaktion medan slagg tar längre tid se *avsnitt 2.5.2*. Därav kan man nyttja följande ekvation som analyserar hydratiseringsgraden för slagg i kombination med cement (Chen & Brouwers 2011).

$$\alpha^{sl} = 1 - \exp \left[-k_2 \left(\frac{t}{24} - K_3 \right)^{k_1} \right] \quad (\text{ekv 3.3})$$

α^{sl} = hydratiseringsgraden för slagg, i kombination med cement [enhetslös]

t = tid för hydratisering [h], timmar

k_1, k_2, k_3 = empiriska parametrar som anpassas för att beskriva hur hydratiseringen fortskrider över tid [enhetslös]

3.4.3 Värmeutveckling

När cement reagerar med vatten frigörs värme i en exoterm process och beskriv med beteckningen Q . Denna värmeutveckling anses vara direkt proportionell mot cementmängden och kan beskrivas med följande formel nedan (Fjellström 2013).

$$Q = q_{cem} \times C \quad (\text{ekv 3.4})$$

Q = värmeutvecklingen [J/m³]

q_{cem} = värme från hydratisering [J/kg]

C = cementhalt [kg/m³]

Värmen från hydratiseringen är proportionell mot hydratiseringsgraden därav kan α från *ekvation 3.1* respektive *3.2* nyttjas och q_{cem} kan räknas ut med nedanstående ekvation (Fjellström, 2013).

$$q_{cem} = q_u \times \alpha \quad (\text{ekv 3.5})$$

q_u = specifika hydratiseringsvärmerna per massaenhet cement vid fullständig hydratisering (dvs. när graden av hydratisering $\alpha = 1$).

α = hydratiseringsgrad

3.4.4 Databas

Databasen som användes i denna studie skapades genom att betong gjöts i specifika standardformar, kuber eller alternativt cylindrar. Därefter härdades dessa betongprover under bestämda förhållanden i olika temperaturer. Sensorer inkluderades inuti betongen för att mäta temperaturen i betongprovet. Efter ett bestämt tidsintervall krossades testerna i ett kompressionstest, vilket gav möjligheten att relatera temperaturen med hållfasthetsstyrkan (Fjellström, 2013; SIS, 2021).

3.5 Koldioxidberäkningar för valvkonstruktionen

För att bedöma klimatpåverkan från valvkonstruktionen omfattade studien två huvudsakliga utsläppskällor. Dels betongens inbyggda utsläpp enligt livscykelanalysens faser A1–A3 (råvaruförsörjning, transporter och tillverkning), och dels de utsläpp som uppstod till följd av de uppvärmningsåtgärder som krävdes för att säkerställa att valvkonstruktionen uppnådde formrivning vid låga temperaturer under kall väderlek. Eftersom uppvärmningsåtgärderna genomförs på byggarbetsplatsen, kunde dessa utsläpp även hänföras till livscykelphas A5, vilken inkluderade bygg- och installationsskedet, se *figur 2.5*. Beräkningarna genomfördes för tre olika temperaturscenarier, vilka närmare beskrevs i *avsnitt 3.3.3*.

Två betongtyper jämfördes för valvkonstruktionen:

- (i) C30/37

(ii) C30/37 Nivå 2

Koldioxidutsläppen för dessa betongtyper har hämtats från Svensk Betongs databas och omfattar klimatpåverkan i form av kg CO₂-ekvivalenter per kubikmeter betong för livscykel faserna A1–A3, beräknade enligt etablerad EPD-metodik (Svensk Betong 2022).

Tabell 3.4, *Klimatpåverkan (GWP-GHG) för betongtyp C30/37 enligt livscykel faserna A1–A3*

Betongtyp	Klimatpåverkan (kg CO ₂ / m ³)
C30/37	255
C30/37 Nivå 2	205

För KFB har dessutom ytterligare utsläpp beaktats, kopplade till de uppvärmningsåtgärder som krävdes för att betongen skulle uppnå 70 % av sin slutliga tryckhållfasthet. De uppvärmningsmetoder som analyserades utgjorde de mest frekvent förekommande i praktiken, vilket bekräftades genom dialog med flera branshexperter.

Dessa två uppvärmningsmetoder analyserades i konsultation med branshexperter:

- (i) Deseleldad byggtork
- (ii) Eldrivna varmluftsfläktar

Uppvärmningsmetodernas koldioxidutsläpp beräknades enligt följande formler, som baserades på principer för effekt- och energibehov (Çengel, Cimbala & Turner 2015). *Formeln är anpassad för att passa de specifika förutsättningarna i studien.*

$$\text{Effektbehov} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right) = V \times \Delta T \times \rho \times c_p \times k \quad (\text{ekv 3.6})$$

V är luftvolymen (m³) i det utrymme där valvet härdats. I denna studie avsåg luftvolymen det simulerade inneslutna utrymme som omslöt valvet, vilket i praktiken motsvarar det utrymme som uppstår i en form eller inbyggnad där betongen gjuts. Volymen har i beräkningarna uppskattats till 1350 m³, baserat på typiska mått för den aktuella valvkonstruktionen.

ΔT (°C) är temperaturdifferensen mellan utomhustemperaturen och den målsatta temperaturen som eftersträvas genom uppvärmningen. I varje scenario motsvarade utomhustemperaturen det lägsta temperaturvärdet som användes i respektive fallstudie. I samråd med branshexperter fastställdes en måltemperatur om +10 °C som rekommendation för att uppnå tillräckliga härdningsförhållanden vid kall väderlek. ΔT utgjorde således skillnaden mellan den aktuella utetemperatur och denna målsatta temperatur.

ρ [kg/m³] är luftens densitet, vilken i denna beräkning antogs vara cirka 1,293 kg/m³ vid normaltryck och rumtemperatur (20 °C).

c_p [kJ/kg°C] är luftens specifika värmekapacitet och anges till 1,005 kJ/kg·°C, vilket är ett standardvärde för torr luft.

k är en isoleringsfaktor som användes för att beakta värmeförluster till omgivningen. I denna studie har ett värde på $k = 3$ använts, vilket motsvarar ett antagande om att väggarna var uppförda men att fönster ännu inte var monterade, dock täckta.

Vidare beräknades det totala energibehovet under härdningsfasen genom att multiplicera effektbehovet med uppvärmningstiden och därefter justera med hänsyn till verkningsgraden hos den aktuella värmekällan. Uppvärmningstiden fastställdes med hjälp av simuleringar i HETT22 och avsåg den tid som krävdes för att valvkonstruktionen skulle uppnå 70 % av sin slutliga tryckhållfasthet.

$$\text{Energibehov [kWh]} = \frac{\text{Effektbehov[kW]} \cdot \text{tid[h]}}{\eta} \quad (\text{ekv 3.7})$$

tid [h] = antal timmar det tar för valvet att nå 70% av sin slutliga tryckhållfasthet i HETT 22

η för eldrivna varmluftsfläktar= 1 (U.S, Department of Energy u.å)

η för dieseleldad byggtork= 0,95 (Vakkilainen 2017)

Klimatpåverkan från uppvärmningsåtgärderna beräknades genom att multiplicera det totala energibehovet med respektive emissionsfaktor (kg CO₂/kWh) för de använda värmekällorna. Det är viktigt att beakta att Sveriges elproduktion till stor del är fossilfri (Vattenfall 2025), vilket tyder på att valet av uppvärmningsmetod har stor betydelse för klimatpåverkan.

Emissionsfaktorerna har tagit hänsyn till Boverkets riktlinjer, med tillhörande emissionsfaktor [kg CO₂/kWh] (Boverket 2025).

$$\text{CO}_2 \text{ utsläpp} = \text{Energibehov (kWh)} \times \text{emissionsfaktor} \left(\frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}} \right) \quad (\text{ekv 3.8})$$

$$\text{Emissionsfaktorn för eldrivna varmluftsfläktar} = 0,037 \frac{\text{kg Co}_2}{\text{kWh}}$$

$$\text{Emissionsfaktorn för dieseleldad byggtork} = 0,34236 \frac{\text{kg Co}_2}{\text{kWh}}$$

4. Resultat

4.1 Betongens beteende i kall väderlek

Resultaten från simuleringarna i HETT22 presenteras i tabellform nedan. Syftet har varit att beräkna den tid det tar för betongen att uppnå 5 MPa för väggkonstruktionen och 70 % av den slutliga tryckhållfastheten för valvkonstruktionen, vilket definierar tidpunkten för formrivning för respektive konstruktion.

Simuleringarna bygger på de antaganden som redovisas i *Avsnitt 3.3.3*, där parametrar såsom klimatdata, vägg- och valvkonstruktion, gjuttemperatur, vindförhållanden och formmaterial har definierats. *Tabell 4.1* visar resultaten för väggkonstruktionen, medan *Tabell 4.2* redovisar motsvarande data för valvkonstruktionen.

Färgskalan i *Tabell 4.1* illustrerar hur snabbt 5 MPa uppnås i väggkonstruktionen:

	0- 14 timmar
	15- 24 timmar
	>24 timmar

Tabell 4.1, Betongens beteende på scenario 1 till 3 genererat av HETT22 för väggar

Material	Scenario1 +5°C(12h)→0°C(12h)	Scenario2 0°C(12h)→ -5°C(12h)	Scenario3 -5°C(12h)→ -16°C(12h)
C30/37	Yellow	Yellow	Yellow
C30/37 Nivå 1	Yellow	Yellow	Red
C30/37 Nivå 2	Yellow	Red	Red
C30/37 Nivå 3	Red	Red	Red
C32/40	Green	Yellow	Yellow
C32/40 Nivå 1	Yellow	Yellow	Red
C32/40 Nivå 2	Yellow	Yellow	Red
C32/40 Nivå 3	Red	Red	Red
C35/45	Green	Yellow	Yellow
C35/45 Nivå 1	Yellow	Yellow	Yellow
C35/45 Nivå 2	Yellow	Yellow	Red
C35/45 Nivå 3	Yellow	Red	Red

C40/50			
C40/50 Nivå 1			
C40/50 Nivå 2			
C40/50 Nivå 3			
C45/55			
C45/55 Nivå 1			
C45/55 Nivå 2			
C45/55 Nivå 3			
C50/60			
C50/60 Nivå 1			
C50/60 Nivå 2			
C50/60 Nivå 3			

Färgskalan i *Tabell 4.2* illustrerar hur snabbt 70 % av betongens hållfasthet uppnås i valvkonstruktionen:

- 0-98 timmar
- 99- 168 timmar
- >168 timmar

Tabell 4.2, Betongens beteende på scenario 1 till 3 genererat av HETT22 för valv

Material	Scenario1 +5°C(12h)→0°C(12h)	Scenario2 0°C(12h)→ -5°C(12h)	Scenario3 -5°C(12h)→ -16°C(12h)
C30/37			
C30/37 Nivå 2			

4.2 Koldioxidberäkningar

Tabellen nedan presenterar klimatpåverkan, uttryckt i kg CO₂-ekvivalenter per kvadratmeter, för valvkonstruktionen utförd med betong av hållfasthetsklass C30/37, dels i form av en traditionell branschreferens, dels som en klimatförbättrad variant enligt nivå 2. För betongtyp C30/37 nivå 2 redovisas klimatpåverkan även med beaktande av utsläpp från uppvärmningsåtgärder, där både eldrivna varmluftsfläktar och dieseleldade byggtorkar har analyserats.

Samtliga antaganden och beräkningar har genomförts i enlighet med metodiken som beskrivs i *avsnitt 3.5*.

Tabell 4.3, Klimatpåverkan vid vintergjutning av valvkonstruktion med olika uppvärmningsmetoder

Scenarier	Koldioxidutsläpp kg CO ₂ /m ²		
	<i>Branschreferens C30/37</i>	<i>C30/37, Nivå 2 Uppvärmning mha eldrivna varmluftfläktar</i>	<i>C30/37, Nivå 2 Uppvärmning mha dieseleldad byggtork</i>
+5°C(12h)→ 0°C(12h)	51	41.18	42.73
0°C(12h)→ - 5°C(12h)	51	41.3	43.96
-5°C(12h)→ - 16°C(12h)	51	41.6	46.84

5. Analys och Diskussion

5.1 Betongens prestanda vid gjutning i kall väderlek

Syftet med detta examensarbete har varit att undersöka om KFB är ett miljömässigt hållbart alternativ jämfört med referensbetong vid gjutning i kall väderlek. Studien har omfattat simuleringar av gjutning av både betongväggar och valv. Frågeställningarna har fokuserat på i vilken mån KFB är fördelaktig ur miljösynpunkt, samt vilka typer och nivåer av KFB som lämpar sig bäst under olika temperaturförhållanden.

De simulerade resultaten visar att branschreferenserna för samtliga betongtyper uppfyller kraven i alla tre temperaturscenarier utan behov av ytterligare åtgärder. Detta tyder på att referensbetongerna fortsatt kan betraktas som en robust lösning i kall väderlek, förutsatt att skyddsåtgärder som exempelvis täckning med 30 mm isolermatta vid temperaturer på -5 °C och lägre tillämpas.

Vid gjutning av väggar visar KFB i nivå 1 god prestanda i majoriteten av de simulerade scenarierna. Däremot uppnås inte formrivningshållfastheten på 5 MPa inom de första 24 timmarna i scenario 3 för hållfasthetsklasserna C30/37 och C32/40, om inte kompletterande åtgärder vidtas. I övriga fall presterar nivå 1 betongen väl utan behov av ytterligare åtgärder, vilket gör den till ett fördelaktigt alternativ ur ett miljöhänsende.

Analysen visar att ju högre klimatförbättringsnivå som används i simuleringarna, desto svårare blir det att uppnå den kritiska formrivningshållfastheten inom de första 24 timmarna. Detta blir särskilt tydligt i kallare temperaturscenarier, där högre nivåer av KFB i flera fall inte når upp till 5 MPa. Därmed bekräftar simuleringensresultaten tidigare forskning som visar att användningen av SCM kan innebära utmaningar vid kall väderlek (Chen et al. 2020; Phuyal et al. 2023).

För nivå 2 och 3 blir bilden mer komplex. Redan i scenario 2 krävs extra uppvärmningsåtgärder för KFB C30/37 i nivå 2. För nivå 3 är behovet av sådana åtgärder ännu större och omfattar även högre hållfasthetsklasser, såsom C32/40 och C35/45. Trots detta visar simuleringarna att högre betongklasser i nivå 3, till exempel C40/50 och C45/55, kan uppnå tillräcklig hållfasthet i de mildare temperaturscenarierna utan andra åtgärder än de som redan tillämpas inom dagens byggpraxis.

5.2 Simuleringsbegränsningar och praktiska osäkerhetsfaktorer

För att stärka studiens relevans och tillförlitlighet har antagandena i simuleringarna utformats i samråd med branschexperter eller baserats på tidigare forskning, med målet att efterlikna realistiska arbetsmetoder inom dagens byggpraxis. Samtidigt är det viktigt att understryka att resultaten från simuleringarna, även om de baseras på realistiska antaganden är förknippade med en viss osäkerhet på grund av de variationer som kan förekomma i faktiska byggprojekt.

I samtliga tre scenarier har temperaturen i simuleringarna antagits vara konstant under två tidsperioder, där de första 12 timmarna har en viss temperatur och de följande 12 timmarna en annan. I verkligheten är dock temperaturförhållandena ofta mer dynamiska och kan förändras betydligt snabbare beroende på tidpunkt, plats och rådande väderförhållanden. Detta kan potentiellt påverka betongens temperaturutveckling och därmed hållfasthetsutvecklingen.

Ett liknande antagande har använts för vindförhållanden, varpå simuleringarna har en konstant vindhastighet på 3,04 m/s under hela 24-timmarsperioden, medan vindhastigheten i praktiken ofta kan variera och vara betydligt högre. Detta kan påverka värmeförlusten från den färska betongen, särskilt vid gjutning av vertikala element som väggar där exponeringsytan är större. Sådana variationer är svåra att exakt förutsäga i en simuleringsmodell men kan i praktiken leda till en större avkylningseffekt och därmed en långsammare hållfasthetsutveckling.

Utöver väderfaktorer spelar även utförandet i praktiken en avgörande roll. I simuleringarna som genomförts i HETT22 förutsätts att alla arbetsmoment sker utan fördröjning och enligt en fastställd tidsram. Faktorer som logistik, resursbegränsningar eller oförutsedda händelser kan leda till förseningar. Dessa fördröjningar kan uppstå mellan olika moment, såsom blandning, transport, utläggning, komprimering och täckning av betongen. Sådana avvikelser från den förväntade processen kan medföra ytterligare variationer i den tidiga hållfasthetsutvecklingen.

Faktorer såsom täckning och andra uppvärmningsåtgärder har en stor påverkan på betongens termiska beteende efter gjutning, särskilt under de första timmarna när betongen härdar och temperaturen i materialet är kritisk för hållfastheten. Däremot kan det vara svårt att exakt modellera dessa faktorer i vissa simuleringar i HETT 22 eftersom det kan finnas många oförutsägbara faktorer som spelar in i verkliga byggförhållanden.

5.3 Klimatpåverkan vid valvgjutning och uppvärmningsåtgärder

En central del av denna studie har varit att analysera klimatpåverkan vid valvgjutning med betongtypen C30/37 nivå 2 och dess motsvarighet i branschens referensstandard. Med hjälp av beräkningsverktyget HETT22 har tiden för respektive betongtyp att uppnå 70 % av sin slutliga tryckhållfasthet analyserats, vilket i sin tur har legat till grund för att uppskatta den uppvärmningstid som krävs för KFB att uppnå formrivning.

Simuleringsresultaten visar att branschreferensen når tillräcklig hållfasthet inom sju dygn i samtliga tre temperaturscenarier. För KFB krävs aktiv uppvärmning för att säkerställa en omgivningstemperatur på 10 °C och resultaten konstaterar att KFB uppnår tillräcklig hållfasthet inom sju dygn i det första och andra scenariot. I det tredje scenariot uppnår KFB däremot inte 70 % av sin slutliga hållfasthet inom denna tidsram, trots uppvärmning.

För att bedöma uppvärmningsåtgärdernas effekt på klimatet genomfördes kompletterande beräkningar där två uppvärmningsmetoder analyserades, eldrivna

varmluftsfläktar och dieseldrivna byggtorkar. I det kallaste temperaturscenariot visar beräkningsresultaten att koldioxidutsläppen minskar med 9,4 kg CO₂ per kvadratmeter när KFB värms upp med eldrivna varmluftsfläktar, jämfört med referensbetongen. Vid uppvärmning med dieseldrivna byggtorkar minskar utsläppen med 4,16 kg CO₂ per kvadratmeter i samma scenario. Resultaten visar att det är möjligt att uppnå klimatvinster även när extra uppvärmningsåtgärder krävs, oavsett val av uppvärmningsmetod. Däremot framgår det tydligt att eldrivna varmluftsfläktar medför en avsevärt lägre klimatpåverkan jämfört med dieseldrivna byggtorkar. I det kallaste temperaturscenariot är klimatvinsten med eldrivna fläktar 5,24 kg CO₂ per kvadratmeter större än med dieseldrivet alternativ. Resultaten visar även tydligt att ju kallare temperaturscenariot är, desto mer jämnas ut utsläppsnivåerna mellan KFB med uppvärmning och referensbetongen. Detta tyder på att klimatvinsterna med KFB blir allt svårare att uppnå i riktigt kalla förhållanden, då behovet av uppvärmning ökar och därmed också dess klimatpåverkan.

En viktig aspekt att beakta är ursprunget för den energi som används vid uppvärmningen. Sveriges elproduktion är till stor del fossilfri (Vattenfall 2025). Detta stärker de klimatomåttliga fördelarna med eldrivna uppvärmningslösningar jämfört med dieseldrivna alternativ. I sin tur innebär det att eldrivna varmluftsfläktar inte bara ger en lägre klimatpåverkan i de analyserade scenarierna, utan även ett långsiktigt miljömässigt försprång över dieseldrivna byggtorkar.

Det bör dock understrykas att klimatbesparingar inte uppnås utan ökade kostnader. Användningen av KFB, särskilt nivå 2 och 3, medför ökade kostnader, dels för det mer klimatoptimerade materialet, dels för de uppvärmningsåtgärder som krävs för att uppnå formrivning vid låga temperaturer. I praktiken krävs därför en helhetsbedömning där både klimatpåverkan och ekonomiska faktorer vägs in. Det kan förväntas att kostnaden per sparad kilogram CO₂ ökar i kallare klimat och vid högre nivåer av KFB, även om någon detaljerad kostnadsanalys inte har genomförts inom ramen för detta arbete. För att optimera den ekonomiska och miljömässiga balansen kan det även vara relevant att överväga alternativa lösningar som kombinerar KFB med effektiva uppvärmningsmetoder, där livscykelkostnader och långsiktiga miljövinster beaktas.

Livscykelanalysen i denna studie har avgränsats till de faser som direkt påverkar CO₂-utsläppen från betongen, nämligen A1–A3 (råmaterial, transport till fabrik och tillverkning) samt A5 (byggskedet, uppvärmning). Transportfasen till byggarbetsplatsen (A4) har inte inkluderats i denna studie. Om A4 hade tagits med i beräkningarna skulle resultaten visa en ännu högre klimatpåverkan. Detta gäller särskilt om olika betongtyper och uppvärmningsutrustning kräver varierande transportavstånd. Transportens inverkan på klimatpåverkan kan vara av särskild vikt i regioner med längre avstånd till fabriker eller vid användning av betong som kräver mer specialiserad logistik.

Vidare är det viktigt att väga in de praktiska och logistiska faktorer som kan påverka valet av uppvärmningsmetod. Tillgången till elektricitet, säkerhetskrav på byggarbetsplatsen och fysiska begränsningar kan göra att dieseldrivna alternativ väljs, trots deras högre klimatpåverkan. Detta innebär att praktiska förutsättningar kan

påverka de teoretiska klimatbesparingarna, och att även arbetsplatslogistik och säkerhetsöverväganden måste beaktas i den totala bedömningen.

En annan relevant aspekt är risken för produktionsföreningar, där KFB kräver ofta ökad tillsyn och särskilda åtgärder vid uppvärmning. Om åtgärderna inte genomförs korrekt och betongen inte uppnår önskad hållfasthet i tid, kan det leda till allvarliga konsekvenser för byggprocessen. Detta kan i sin tur medföra ökade arbetskostnader, högre energiförbrukning och därmed även indirekta utsläpp. Detta belyser vikten av att inte endast fokusera på klimatpåverkan per material, utan att också ta hänsyn till bygglogistik, arbetssätt och tidsaspekter för att uppnå de bästa möjliga resultaten, både ekonomiskt och miljömässigt.

6. Slutsatser

Syftet med studien var att undersöka om KFB är ett miljömässigt hållbart alternativ även i kalla klimat, samt att identifiera vilka nivåer av KFB som lämpar sig bäst under sådana förhållanden.

Resultaten visar att KFB kan vara miljömässigt fördelaktigt även vid kall väderlek, förutsatt att rätt nivå väljs och att nödvändiga härdningsåtgärder vidtas. Nivå 1 uppvisar god prestanda i samtliga tre temperaturscenarier utan behov av kompletterande åtgärder, vilket gör den till ett robust och klimatomässigt hållbart val även vid lägre temperaturer. För nivå 2 krävs kompletterande insatser redan vid måttligt kalla temperaturer, medan nivå 3 ställer ännu högre krav på åtgärder, även när betong med högre hållfasthetsnivå används.

Simuleringsresultaten bedöms som tillförlitliga, då både validitet och reliabilitet har säkerställts genom realistiska antaganden och anpassning till branschpraxis. Samtidigt bör resultaten tolkas med viss försiktighet, eftersom praktiska variationer i verkliga byggprojekt inte fullt ut kan fångas i simuleringsmodellen. Detta visar på behovet av fortsatt analys vid tillämpning i skarpa projekt.

Vid en jämförelse mellan referensbetong och KFB som uppvärms med hjälp av eldrivna varmluftsfläktar eller dieseldrivna byggtorkar, kan tydliga klimatvinster identifieras. Koldioxidberäkningarna visar att CO₂-utsläppen kan reduceras med upp till 8–19 % per kvadratmeterbetong vid användning av KFB i nivå 2 jämfört med traditionell referensbetong. Detta visar att klimatvinsten inte enbart beror på val av betongtyp utan även på hur den kombineras med energieffektiva uppvärmningsstrategier i praktiken.

För att uppnå ett optimalt helhetsresultat bör materialvalet i varje projekt baseras på en välavvägd kombination av miljömässiga, ekonomiska och praktiska överväganden. Med rätt förutsättningar och åtgärder kan KFB därmed bidra till att minska klimatavtrycket från byggprojekt och stödja bygg- och anläggningssektorns omställning mot en mer hållbar framtid.

7. Förslag till vidare studier

För framtida studier rekommenderas fältförsök under verkliga vinterförhållanden för att validera simuleringsresultaten. Vidare bör forskning fokusera på optimerade uppvärmningsstrategier och materialutveckling av KFB för att förbättra tidig hållfasthet i kallt klimat. Det är även relevant att inkludera en ekonomisk bedömning av kostnad per sparad kilogram CO₂. En ytterligare aspekt att beakta är uppvärmningens klimatpåverkan för väggar, som inte har behandlats i denna studie.

8. Referenser

- Aguirre, J.C. (2022) *Cementhydration*, Heidelberg Materials. [PDF], Tillgänglig via: https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sites/default/files/2022-05/Cement%20hydratation_maj%202022_JAC%20f%C3%B6r%20delning2.pdf [Hämtad 7 maj 2025].
- Barcelo, L., Kline, J., Walenta, G. & Gartner, E. (2013). Cement and carbon emissions. *Materials and Structures*, 47(6), pp.1055–1065. doi: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0114-5>.
- Ben Haha, M., Termkhajornkit, P., Ouzia, A., Uppalapati, S. & Huet, B. (2023). Low clinker systems - Towards a rational use of SCMs for optimal performance. *Cement and Concrete Research*, 174, p.107312. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107312>.
- Berggren, J. (2024) *Så vet du att din el är fossilfri*. Vattenfall. Tillgänglig på: <https://www.vattenfall.se/fokus/hallbarhet/sa-vet-du-att-din-el-ar-fossilfri/> [Hämtad: 5 maj 2025].
- Boverket (2024.) *Introduktion till livscykelanalys (LCA)*. Tillgänglig via: <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/introduktion-till-livscykelanalys-lca/> [Hämtad 30 April 2025].
- Boverket (2025.) *Klimatdatabasen*. Tillgänglig via: <https://klimatdatabasen.boverket.se/navigera/2> [Hämtad 30 April 2025].
- Carino, N.J. & Lew, H.S. (2001) *The Maturity Method: From Theory to Application*. [Online] Tillgänglig via: https://www.researchgate.net/publication/237724702_The_Maturity_Method_From_Theory_to_Application1 [Hämtad 7 Maj 2025].
- Çengel, Y.A., Cimbala, J.M. & Turner, R.H. (2015) *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences in SI Units*. 5th edn. New York: McGraw-Hill Education.
- Chen, S., Lu, W., Olofsson, T., Dehghanimohammadabadi, M., Emborg, M., Nilimaa, J., Wang, Y. & Feng, K. (2020). Concrete Construction: How to Explore Environmental and Economic Sustainability in Cold Climates. *Sustainability*, 12(9), pp.3809–3809. doi: <https://doi.org/10.3390/su12093809>.
- Chen, W. & Brouwers, H.J.H. (2011). A method for predicting the alkali concentrations in pore solution of hydrated slag cement paste. *Journal of Materials Science*, 46(10), pp.3622–3631. doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5278-1>.
- El-Mir, A., Assaad, J.J., Nehme, S.G. & El-Hassan, H. (2022). Correlating strength and durability to time-temperature profiles of high-performance mass concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 16, p.e01055. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01055>.

- Farfan, J., Fasihi, M. & Breyer, C. (2019). Trends in the global cement industry and opportunities for long-term sustainable CCU potential for Power-to-X. *Journal of Cleaner Production*, 217, pp.821–835. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.226>.
- Fennell, P.S., Davis, S.J. & Mohammed, A. (2021). Decarbonizing cement production. *Joule*, 5(6), pp.1305–1311. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.04.011>.
- Fjellström, P. (2013). *Measurement and Modelling of Young Concrete Properties*. [online] Tillgänglig via: <https://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:999094/FULLTEXT01.pdf> [Hämtad 24 Apr. 2025].
- Gagg, C.R. (2014). Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis*, 40, pp.114–140. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>.
- Ghafoori, N., Maler, M.O., Najimi, M., Hasnat, A. & Gbadamosi, A. (2024). Role of Cement Type on Properties of High Early-Strength Concrete. *Journal of Composites Science*, [online] 9(1), pp.3–3. doi: <https://doi.org/10.3390/jcs9010003>.
- Heidelberg Materials. (u.å.). *Basement: Teknisk beskrivning* [PDF]. Tillgänglig via: https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sites/default/files/assets/document/4b/fc/basement_teknisk_beskrivning.pdf [Hämtad 21 april 2025].
- Heidelberg Materials Cement Sverige. (u.å.). *Prognosverktyg HETT22*. Tillgänglig via: <https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sv/hett22> Hämtad [2025-04-15]
- Heidelberg Materials Cement Sverige. (u.å.). *Så här tillverkas cement*. [online] Tillgänglig via: https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sv/tillverkning-av-cement?utm_source=chatgpt.com [Hämtad 10 April. 2025].
- Heidelberg Materials Northern Europe. (2023). *Licensvillkor – HETT22*. [PDF] Tillgänglig via: <https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sv/ladda-ner-hett22> [Hämtad 6 Maj 2025].
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2018) *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*. [PDF], Tillgänglig via: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf [Hämtad 15 April 2025].
- Li, Z., (2011). *Advanced concrete technology*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Lothenbach, B., Scrivener, K. & Hooton, R.D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), pp.1244–1256. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>.
- Maturix (2024) *What is cement hydration?* [Online]. Tillgänglig via: <https://maturix.com/knowledge-center/what-is-cement-hydration/> [Hämtad 2025-04-06].

Mindess, S., Young, J. F. & Darwin, D. (2003) *Concrete* (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.

Nassif, A.Y. & Petrou, M.F. (2013). Influence of cold weather during casting and curing on the stiffness and strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 44, pp.161–167. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.016>.

Pang, X., Sun, L., Sun, F., Zhang, G., Guo, S. & Bu, Y. (2021). Cement hydration kinetics study in the temperature range from 15 °C to 95 °C. *Cement and Concrete Research*, 148, pp.106552–106552. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106552>.

Phuyal, K., Sharma, U., Mahar, J., Mondal, K. & Mashal, M. (2023). A Sustainable and Environmentally Friendly Concrete for Structural Applications. *Sustainability*, 15(20), p.NA–NA. doi: <https://doi.org/10.3390/su152014694>.

Raje, S.R., Deshmukh, P.A., Swamy, R.M. & Patil, Y.S. (2019) ‘Fundamentals of maturity methods for estimating concrete strength: review’, *International Research Journal of Engineering and Technology* (IRJET), 6(2), pp. 2406–2410. [PDF] Tillgänglig via: <https://www.irjet.net/archives/V6/i2/IRJET-V6I2475.pdf> [Hämtad 15 Mars 2025].

Schackow, A., Effting, C., Gomes, I.R., Patruni, I.Z., Vicenzi, F. & Kramel, C. (2016). Temperature variation in concrete samples due to cement hydration. *Applied Thermal Engineering*, 103, pp.1362–1369. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.048>.

Scrivener, K.L., John, V.M. & Gartner, E.M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, pp.2–26. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.

Selander, A. (2017) *Den nya betongen? Erfarenheter från cementtillverkare.*, Fuktcentrum, Lunds Tekniska Högskola (LTH). Material tillhandahållet av Heidelberg Materials.,[PDF], Tillgänglig på: <https://www.fuktcentrum.lth.se/fileadmin/fuktcentrum/PDF-filer/ERFadagar/2017/AndersSelander-ERFA-dagen20171129.pdf> [Hämtad 8 Maj 2025].

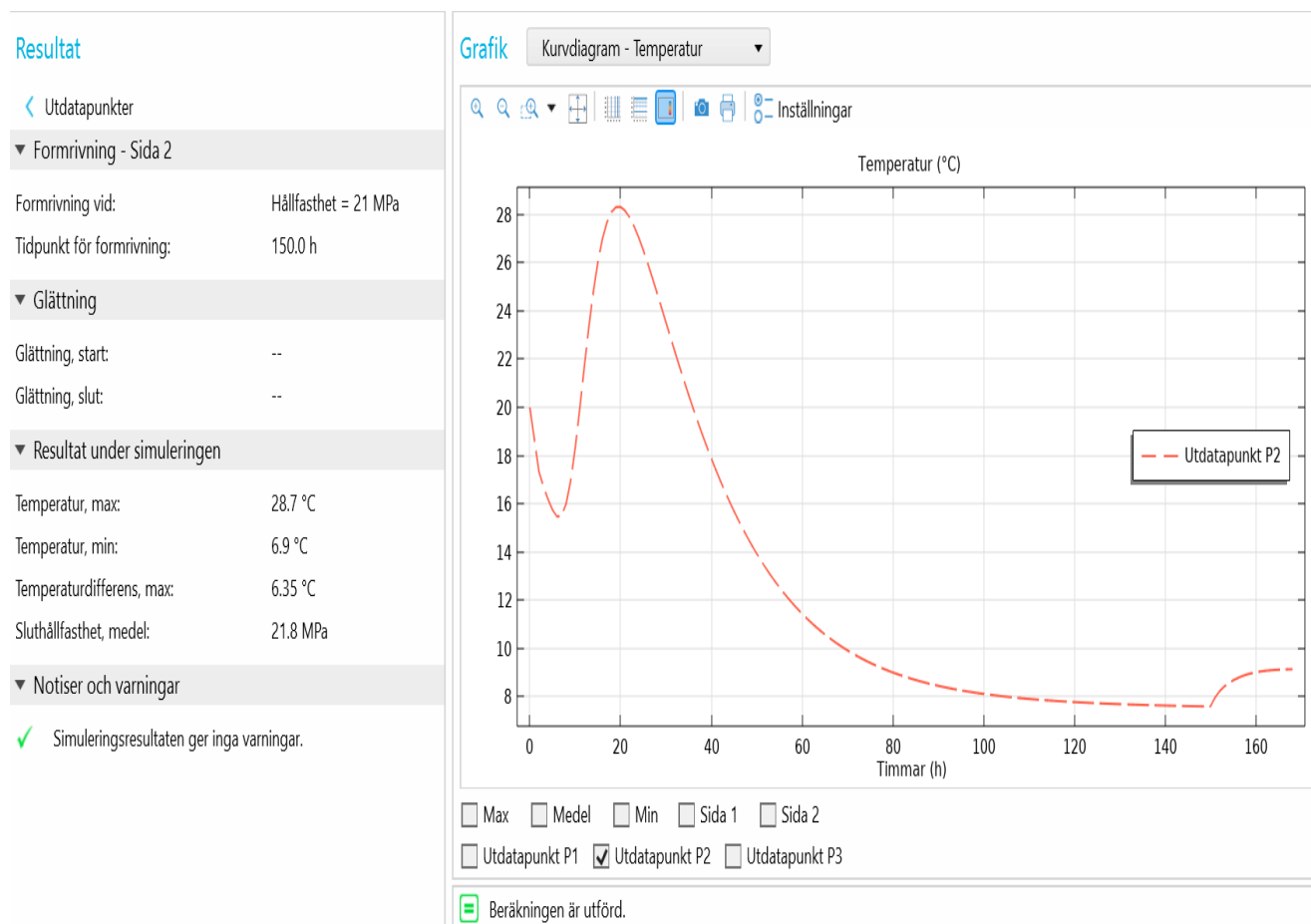
Shi, C., Meyer, C. & Behnood, A. (2008). Utilization of copper slag in cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), pp.1115–1120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.008>.

Shlyakhtina, T.F., Ivankova, E.A. & Popov, N.A. (2021). Winter concrete: problems and solutions. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 751(1), p.012081. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/751/1/012081>.

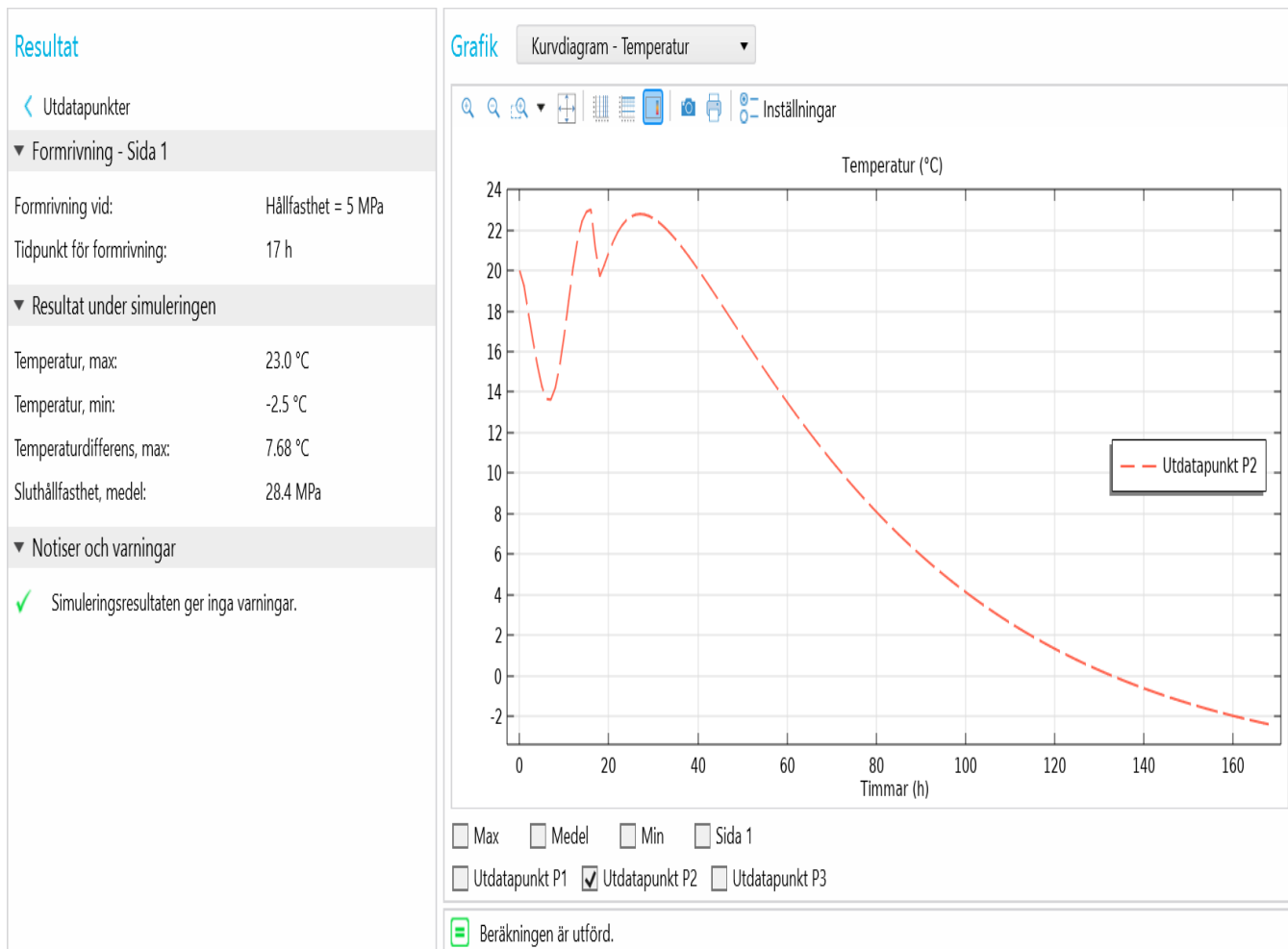
SIS (2006) SS-EN 15167-1:2006. *Ground granulated blast furnace slag for use in concrete, mortar and grout - Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria*. Stockholm: Svenska institutet för standarder.

- SIS (2011) SS-EN 197-1:2011. *Cement- Del 1: Sammansättning och fordringar för ordinära cement*. Stockholm: Svenska institutet för standarder.
- SIS (2019) SS-EN 196-6:2019. *Cement- Provning – Del 6: Bestämning av specifik yta*. Stockholm: Svenska institutet för standarder.
- SIS (2021). SS-EN 12390-1:2021. *Provning av hårdnad betong – Del 1: Form, dimensioner och övriga krav på provkroppar och formar*. Stockholm: Svenska institutet för standarder.
- SIS (2024). SS 137003:2021+T1:2024. *Betong- Användning av SS-EN 206:2013+A2:2021 i Sverige*. Stockholm: Svenska institutet för standarder.
- SMHI. *Hur var vädret?* [Online] Tillgänglig via: <https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/hur-var-vadret> [Hämtad 7 Mars 2025].
- SMHI. *Temperatur och vind – Vinddata* (Excel-fil) [Dataset]. Tillgänglig via: <https://www.smhi.se/data/temperatur-och-vind/vind/wind/71420> [Hämtad 7 Mars 2025].
- Svensk Betong (u.å) *Betongutförande vägg*. [Online] Tillgänglig via: <https://www.svenskbetong.se/om-betong/platsgjutet/produktion/flerbostadshus/vagg/betongutforande-vagg> [Hämtad 13 april 2025].
- Svensk Betong. (2022). *Vägledning klimatförbättrad betong*: Utgåva 2. Stockholm: Svensk Betong. Tillgänglig via: <https://www.svenskbetong.se/component/edocman/?task=document.viewdoc&id=60&Itemid=> [Hämtad 18 april 2025].
- Svensk Betong. (2024). *Bilaga 1 Fabriksbetong: Vägledning klimatförbättrad betong – Utgåva 2*. Stockholm: Svensk Betong. Tillgänglig via: <https://www.svenskbetong.se/component/edocman/?task=document.viewdoc&id=104&Itemid=> [Hämtad 18 april 2025].
- Taylor, H.F.W. (1997) *Cement Chemistry*. 2nd edn. London: Thomas Telford Publishing.
- U.S. Department of Energy (u.å) *Electric Resistance Heating*. Tillgänglig via: <https://www.energy.gov/energysaver/electric-resistance-heating> [Hämtad 25 april 2025].
- Vakkilainen, E.K. (2017). *Steam generation from biomass: construction and design of large boilers*. Amsterdam: Butterworth-Heinemann Ltd, s.75.
- Westerberg, B. (2021). Faktorer som generellt påverkar hållfastheten. I Hallgren, M. & Hassanzadeh, M. (red.), *Betonghandbok – Material. Del 2*. Svensk Byggtjänst, s. 32–56.
- Yasien, A. & Bassuoni, M.T. (2024). Cold weather concreting: provisions of codes and research advances. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 177(5), pp.286–301. doi: <https://doi.org/10.1680/jcoma.23.00062>.

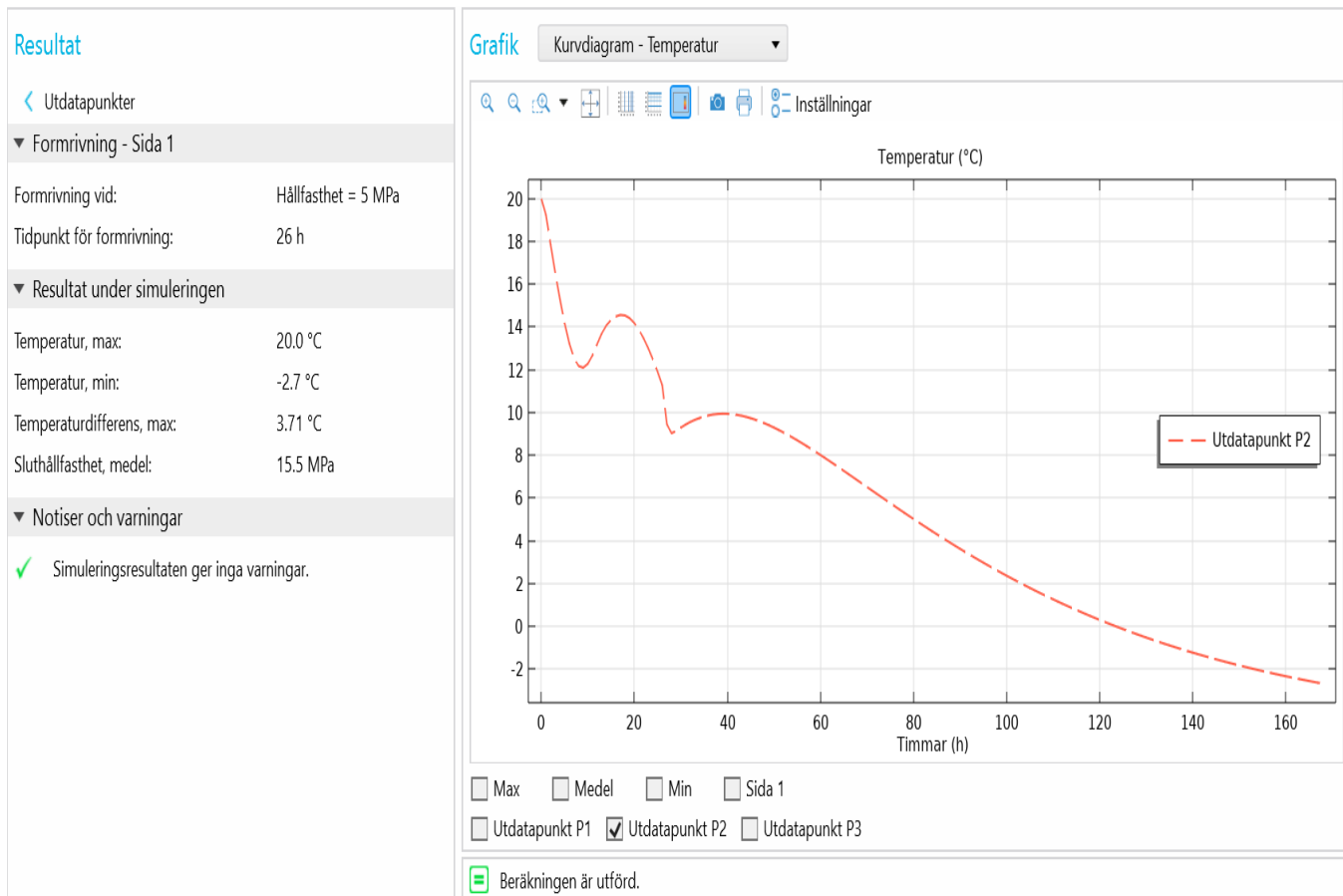
9. Bilagor



Figur 9.1, Simulerad temperaturutveckling för valv (C30/37, nivå 2) under scenario 2 enligt HETT2.



Figur 9.2, Simulerad temperaturutveckling för vägg med betongklass (C30/37 branschreferens) under scenario 2 enligt HETT22.



Figur 9.3. Simulerad temperaturutveckling för vägg med betongklass (C30/37, nivå 2) under scenario 2 enligt HETT22.