

Temperatures inverkan på självuttorkningen hos klimatförbättrad betong

Samir Ezmorrod

Byggnadsmaterial | LTH | Lunds universitet



Temperatures inverkan på självuttorkningen hos klimatförbättrad betong

Samir Ezmorrod



LUND
UNIVERSITY

Master Thesis, Report 5126, Division of Building Materials, Faculty of Engineering, Lund University, Lund, 2022

Examensarbete, Rapport 5126, Avdelningen Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund, 2022

Temperatures inverkan på självuttorkningen hos klimatförbättrad betong

Samir Ezmorrod

Report 5126

ISRN LUTVDG/TVBM-22/5126-SE

Antal sidor/Number of pages: 38

Illustrationer/Illustrations: 25

Sökord

Betong, cement, självtorkande, självtuttorkning, uttorkning, masugnsslagg, slagg, BCSA, belit, belit-kalcium-sulfo-aluminat-cement, accelerator, Bascement Slite, relativ fuktighet, RH, värmeutveckling, fossilfri

Keywords

Concrete, cement, self-desiccation, GGBS, slag, ground granulated blast furnace slag, belite, belitic, calcium, sulfoaluminate, relative humidity, heat, fossil-free

© Copyright: Division of Building Materials, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2022

Avdelningen Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2022.

Byggnadsmaterial
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.byggnadsmaterial.lth.se

Division of Building Materials
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund, Sweden

www.byggnadsmaterial.lth.se/english

Sammanfattning

Självtorkande betong behöver en hög halt cement för att fungera väl, vilket direkt leder till begränsande möjligheter till reduktion av koldioxidutsläpp. Intresset för att finna alternativ till en hög cementhalt är därför stort. Exempelvis är det känt att en lägre härdningstemperatur kan förbättra självtorkningen och det finns även alternativa bindemedel med en potential till självtorkning.

Det primära syftet med detta examensarbete var att undersöka temperaturens påverkan på självtorkning i klimatförbättrade betonger med höga cementhalter. Ett BCSA-cement samt tre olika variationer på ett CEM II-cement, med slagg och accelerator som faktorer, undersöktes vid olika härdningstemperaturer såsom 1, 5, 10 och 20 °C. Mätning av kubhållfasthet och relativ fuktighet på krossat material i provrör gjordes vid olika tidpunkter.

Resultatet tyder på att en högre självtorkning uppnås vid lägre temperaturer för CEM II-cement utan slagg. För varianterna med slagg fanns inget temperaturberoende, dock erhöles en likvärdig, om inte högre självtorkning. Inget tydligt samband i självtorkning kunde urskiljas för varianterna med slagg, med hänsyn till accelerators effekt. BCSA-cementet uppnådde en mycket god självtorkning vid låg temperatur, utan något samband vid högre temperaturer.

Möjligtvis kan det finnas ett samband mellan temperatur och reaktionshastighet, där ett långsammare reaktionsförlopp bidrar till en fin mikrostruktur. Stödet för detta påstående ligger i skillnaden i reaktionshastighet för CEM-II cementet utan slagg och varianterna med slagg, där de senare alternativen hade en låg reaktionshastighet trots en hög temperatur. Dock är detta något som kräver vidare studier för att fastställa. Vidare öppnade resultatet för BCSA-cement upp för vidare forskning, som en potentiell ersättare till cement i framtiden.

Abstract

To achieve an increased self-desiccation in concrete, a high cement content is needed, which leads to limited opportunities in a reduction of greenhouse gas emissions. There is therefore an interest in finding alternatives to a high cement content for self-desiccating concrete. For example, it is known that a lower curing temperature can improve self-desiccation. Furthermore, there are also alternative binders with a potential to high self-desiccation.

The primary purpose of this thesis was to investigate the effect of temperature on self-desiccation in climate-enhanced concrete with high cement contents. A BCSA-cement and three different variations on a CEM II-cement, with slag and accelerator as factors, were studied in 1, 5, 10 and 20 °C. Cube strength and relative humidity in the form of crushed material in test tubes were measured at different time intervals.

The result indicates that a higher self-desiccation is achieved at lower temperatures for CEM II-cements without slag. For the variants with slag, there was no temperature dependence, however, an equivalent, if not higher self-drying was obtained. No clear distinction in self-desiccation could be determined between the variants, in regards to the accelerators effect. The BCSA-cement achieved a very high self-desiccation at a low temperature, without any relation at higher temperatures.

Possibly there may be a connection between temperature and reaction rate, where a smooth reaction process contributes to a fine microstructure. The support for this claim lies in the difference in reaction rate between the CEM-II cement without slag and the variants with slag, where the latter ones had a slower reaction rate, even at a high temperature. However, this is something that requires further study to determine. Furthermore, the results for BCSA-cement opened up for further research, as a potential replacement for cement in the future.

Förord

Detta examensarbete omfattar det arbete jag har utfört de senaste fem månaderna som en avslutande del på civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet gjordes vid avdelningen för Byggnadsmaterial LTH av mig, Samir Ezmorrod, i samarbete med Skanska Industrial Solutions AB.

Handledare för arbetet har varit Lars Wadsö, professor vid avdelningen för Byggnadsmaterial LTH. Industrihandledare har varit Balasan Khachadorian och Johan Hedman, Skanska Industrial Solutions AB, samt Paul Sandberg, Calmetrix. Examinator för arbetet har varit Peter Johansson, avdelningschef vid avdelningen för Byggnadsmaterial LTH.

Först och främst är jag oerhört tacksam mot min handledare som har hjälpt och väglett mig genom hela arbetet. Jag vill även rikta ett stort tack till Stefan Backe, forskningsingenjör vid avdelningen för Byggnadsmaterial, för all hjälp i det experimentella arbetet. Vidare vill jag även tacka mina biträdande handledare, min examinator samt Niklas Johansson, Mapei AB, för medverkan i form av råd, hjälp och material. Ett stort tack även till samtliga på avdelningen för Byggnadsmaterial LTH för ett varmt välkomnande.

Slutligen vill jag rikta ett särskilt stort tack till min familj samt nära och kära för ert stöd under hela min studietid, för utan er vore detta inte möjligt.

Samir Ezmorrod
Maj, 2022

Innehållsförteckning

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduktion | 1 |
| 1.1 | Bakgrund | 1 |
| 1.2 | Syfte och mål | 2 |
| 1.3 | Avgränsningar..... | 2 |
| 2 | Litteraturstudie..... | 3 |
| 2.1 | Allmänt om betong och cement som bindemedel..... | 3 |
| 2.1.1 | Betong- och cementstandard i Sverige..... | 4 |
| 2.1.2 | Tillsatsmaterials inverkan på olika ordinära cementtyper..... | 5 |
| 2.1.3 | Tillsatsmedel..... | 6 |
| 2.1.4 | Belit-kalcium-sulfo-aluminat-cement | 6 |
| 2.2 | Självtorkning | 7 |
| 3 | Material och metod | 8 |
| 3.1 | Material..... | 9 |
| 3.2 | Metod..... | 10 |
| 3.2.1 | Blandning, gjutning och lagring..... | 10 |
| 3.2.2 | Inre relativ fuktighet | 12 |
| 3.2.3 | Tryckhållfasthet | 13 |
| 3.2.4 | Värmeutveckling..... | 14 |
| 3.2.5 | Kontrollmätningar..... | 14 |
| 4 | Resultat..... | 15 |
| 4.1 | Inre relativ fuktighet | 15 |
| 4.2 | Tryckhållfasthet..... | 18 |
| 4.3 | Värmeutveckling | 21 |
| 4.4 | Kontrollmätningar | 25 |
| 5 | Diskussion | 27 |
| 5.1 | Metodval och osäkerheter..... | 27 |
| 5.2 | Temperaturens påverkan på självtorkning..... | 29 |
| 5.3 | Användning för betongbranschen..... | 31 |
| 6 | Slutsats..... | 32 |
| 7 | Förslag till vidare studier | 33 |
| 8 | Referenser..... | 34 |
| | Bilaga A – Betongrecept och desorptionsisoterm | 36 |
| | Bilaga B – Relativ fuktighet | 37 |
| | Bilaga C – Tryckhållfasthet..... | 38 |

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Betong är det byggnadsmaterial som i särklass används mest världen över. Detta beror på dess unika egenskaper som möjliggör den moderna infrastrukturen vi har idag. Dock är betong även en bidragande faktor i den globala uppvärmningen och ansvarar för 5–8% av de globala koldioxidutsläppen, vilket har lett till stora utmaningar för betongbranschen [1].

Orsaken till att betong står för en så pass stor del av de globala koldioxidutsläppen är att det används så stora volymer av det. Betong utgör oftast massiva konstruktionsdelar och dimensioneras som massivt jämfört med exempelvis stål. Dessutom är det även som material tillgängligt över stora delar av världen till en relativt låg kostnad i förhållanden till alternativen. Intresset för att utveckla miljövänlig betong är därför stort.

Den största delen av koldioxidutsläppen, omkring 90%, som är förknippade med betong kommer ifrån produktionen av cementklinker, det huvudsakliga bindemedlet i traditionell Portlandcement [2]. Detta trots att cement enbart utgör cirka 14–22% av den totala vikten i betong. Orsaken till de höga utsläppen ligger i tillverkningsprocessen, där koldioxid drivs ut ur kalksten genom upphettning med bränslen som också ger koldioxidutsläpp. Fastän det har skett stora framsteg i optimering av denna process har man nått en gräns för vidare förbättring utan att förändra slutprodukten [1]. Fokus har därmed skiftat till en optimering i användandet av betong, där man kombinerar Portlandcement med alternativa bindemedel med lägre koldioxidutsläpp och projekteringsmässiga lösningar för att minska på de totala utsläppen. Överlag så går det att applicera denna teknik på de flesta typer av betong med goda resultat utan att förlora de typiskt önskvärda egenskaperna som hållfasthet och beständighet. Exempelvis finns det idag alternativ med upp till 50% lägre koldioxidutsläpp baserat på slaggcement, en cement baserad på restprodukter från tillverkning av stål. Dessvärre uppstår problem vid behovet av andra egenskaper, som till exempel självtorkning. Självtorkning kan enbart ske vid höga cementhalter, vilket direkt leder till begränsade möjligheter till en reduktion av koldioxidutsläpp.

Användningen av självtorkande betong i Sverige är ett resultat av de krav som ställs av Boverkets byggregler (BBR) på fuktsäkerhet vid nyproduktion i kombination med mål mot kortare tidsplaner från entreprenörer. Det har alltså utvecklats en byggteknik som bygger på strävan efter effektivitet utan att man har fokuserat på miljön. Problemet med denna byggteknik är att den inte lämpar sig väl i den klimatomställning som byggbranschen står inför idag. Detta då man försöker uppnå en klimatneutralitet fram till 2045 med stegvisa förbättringar fram till dess [2].

Utmaningarna för att klimatförbättra självtorkande betong är stora. Trots alternativ som baseras på ersättning med slaggcement går det inte att komma undan behovet av hög cementhalt. Dessutom är fuktkraven inte till för betongen i sig, utan för att undvika skada på de material som kommer i kontakt med fuktig betong. Ett argument för att kraven på fuktsäkerhet även skall gälla de tillverkare vars produkter berörs av höga fukthalter vid nyproduktion kan därför göras. Dock är detta inte tillräckligt för att uppnå de mål som ställs i byggbranschen idag och i framtiden med hänsyn till både miljö samt effektivitet.

Vidare forskning krävs inom området för att finna fler alternativ till en hög cementhalt i självtorkande betong. Det är bland annat känt att låg härdningstemperatur kan förbättra självtorkningen, troligtvis till följd av en förändring i mikrostrukturen [3]. Ett annat alternativ av intresse är alternativa bindemedel med en potential till både självtorkning i betong och produktion i Sverige. Belit-kalcium-sulfo-aluminat-cement (BCSA), som är en utveckling av snabbverkande kalcium-sulfo-aluminat-cement (CSA), är ett exempel på detta. BCSA-cement har använts i USA i cirka 40 år, främst till icke-lastbärande betong, och ska ge en beständighet mer lik Portlandcement genom en långsam hållfasthetsutveckling. Dock krävs en vidare utveckling av cementet, eftersom det fortfarande råder oklarheter kring dess beständighet samt att cementet är dyrt att producera [4].

Möjligheterna som fullgod ersättare till Portlandcement är stora. BCSA-cement ger inte bara ett lägre koldioxidutsläpp vid produktion, utan det kan troligtvis ge god självtorkning samt är möjligt att producera från restprodukterna av fossilfri stålproduktion [5–8]. Detta alternativ ger därmed även en möjlighet till en ersättning av slaggcement i framtiden, då den slagg som vi i Sverige använder idag riskerar att fasas ut i strävan mot en fossilfri ståltillverkning.

1.2 Syfte och mål

Syftet med detta arbete är att undersöka temperaturens inverkan på självtorkning i miljöförbättrad betong. Detta för att både undersöka om det finns en självtorkning att hämta i en optimering av härdningstemperatur samt ifall det råder ett annorlunda temperaturberoende då olika cement används.

Målet är att bidra med resultat som är av användning för byggbranschen. Resultatet behöver inte vara kvantifierbart för att uppnå målet. Påvisas ett temperaturberoende som kan leda till en minimal skillnad i självtorkning kan även detta hjälpa entreprenörer, då de kan undvika ofördelaktiga härdningstemperaturer. Vidare kan även en minimal skillnad bidra till en stor vinst i produktionstid, vilket i sig minimerar behovet av att använda ännu mer cement i de fall då väldigt korta tidsplaner behövs.

1.3 Avgränsningar

För att begränsa omfattningen av arbetet har inte de undersökta betongernas mikrostrukturer studerats, trots att dess inverkan på självtorkningen är känd sedan tidigare.

2 Litteraturstudie

2.1 Allmänt om betong och cement som bindemedel

Betong är ett kompositmaterial som består av ballast i form av sand, grus och stenar bundet ihop av en till början plastisk massa, känd som cementpasta. Denna massa bildas vid blandning av det hydrauliska bindemedlet cement och vatten, varvid kemiska reaktioner uppstår som leder till ett fast material beständigt mot vatten. Processen kallas hydratation och leder till en gradvis utveckling av hållfasthet och värme [9].

För att urskilja olika bindemedel brukar de delas in i tre olika grupper: hydrauliska, latent hydrauliska samt icke-hydrauliska eller rent puzzolana. Det som avgör den hydrauliska egenskapen är förhållandet mellan kalcium och kisel, CaO/SiO_2 , där ju högre förhållandet är desto mer hydrauliskt blir bindemedlet [10]. Puzzolana bindemedel innehåller alltså ingen kalcium medan latent innehåller en mindre mängd. Dock kan dessa aktiveras med hjälp av Portlandcement alternativt en alkalisk aktivator för latent bindemedel, vilket är grunden till hur olika cementtyper skapas.

Portlandcement, som är den allra vanligaste cementen idag, utgörs av mald klinker samt en mindre mängd gips. Klinkern, som även är känd som cementklinker eller Portlandklinker, består av föreningar av oxider som bildar mineraliska hydrater [11]. Huvudkomponenterna för Portlandklinker utgörs till största del av kalciumsilikaterna alit, C_3S , och belit, C_2S , samt en mindre mängd av aluminat, C_3A , och ferrit, C_4AF^1 . Det är dessa komponenter som reagerar med vatten för att bilda fast material, främst i form av C-S-H-gel och portlandit (CH) från kalciumsilikatreaktionerna, men även ettringit från aluminat- och ferritreaktionerna.

Utöver rena Portlandcement finns det även andra cementtyper som grundar sig i Portlandklinker, men med en inblandning av mineraliska restprodukter i form av tillsatsmaterial. Slagg, flygaska samt silikastoft är vanliga typer av tillsatsmaterial, där slagg klassas som latent hydrauliskt och flygaska samt silikastoft som puzzolana [12]. Dessa tillsatsmaterial klassas också som bindemedel, dock inte hydrauliska. De kräver reaktionsprodukten portlandit från kalciumsilikatreaktionerna för att själva reagera och skapa en C-S-H liknande gel. I detta arbete kommer därför cement referera till hydrauliska bindemedel.

Utöver tillsatsmaterial tillsätts även tillsatsmedel för att få önskvärda egenskaper hos betongen. Variationen i typer av tillsatsmedel är stor och vanligtvis delas de in i följande kategorier: flytmedel, luftporbildande, accelererande, retarderande, sprutbetongtillsatser samt övriga. Det som skiljer tillsatsmedel från tillsatsmaterial är att de är organiska föreningar som tillsätts i små kvantiteter. Tillsatsmedlen utgör oftast 0,1–2,0% av cementvikten medan tillsatsmaterial varierar mellan 3–60% [12,13].

¹ Här används de kortfattade beteckningar som cementkemister använder: C=CaO, S=SiO₂, H=H₂O, A=Al₂O₃

Vid produktion av betong kan man även påverka egenskaperna genom att förändra andelarna av de ingående materialen. Förhållandet mellan cement och vatten, känt som vct eller vbt, är den viktigaste parametern, där en lägre vattenhalt ger högre hållfasthet samt förstärkt självtuttorkning. Detta eftersom cement är den beståndsdel som skapar hållfasthet i betong och binder vatten, dock till en försämrad arbetbarhet. Vanligtvis används därför flyttillsatsmedel för att motverka detta.

2.1.1 Betong- och cementstandard i Sverige

För att urskilja olika cementtyper delas de i Sverige in i klasser efter *SS-EN 197-1*, en direkt översättning av den europeiska cementstandarden *EN 197-1*. Klasserna baseras på andel Portlandklinker samt tillsatsmaterial i cementen och redovisas övergripligt i tabell 2.1. På liknande sätt specificeras krav vid produktion av betong, såväl platsgjuten som prefabricerad, av standarden *SS-EN 206*, där exempelvis användningen av delmaterial styrs.

Gemensamt för båda standarderna är att de gäller över nationella standarder. Dock ska nationell standard och kunskap appliceras i de fall då de europeiska inte omfattar särskilda områden. *SS 137003-21* är ett exempel på detta, där användningen av *SS-EN 206* regleras. Detta möjliggör brukandet av exempelvis BCSA-cement som ej ingår i *SS-EN 197-1*, dock i en begränsad omfattning.

Klasserna i *SS-EN 197-1* kategoriseras ytterligare genom tilläggsbeteckningar, se tabell 2.2. Varje tillsatsmaterial har en tilldelad bokstav som beteckning. Eftersom massandelen kan variera stort används även de stegvisa beteckningarna A, B och C för att ange massandel inom ett givet intervall, där A motsvarar det lägsta innehållet. Exempelvis är *CEM II/A-W* ett Portland-flygaskcement, där W står för kalkhaltig flygaska och A för den lägsta massandelen.

Utöver dessa beteckningar tillkommer det även beteckningar för cement med särskilda egenskaper samt hållfasthet. Exempel på cement med särskilda egenskaper är sulfatresistent cement (SR), lågalkaliskt cement (LA) samt cement med låg (LH) och moderat (MH) värmeutveckling. Hållfasthet betecknas enligt 28-dygns normerad tryckhållfasthet i tre klasser: klass 32,5, klass 42,5, klass 52,5. Ytterligare beteckningar för 2 eller 7 dagars tryckhållfasthet tillkommer också, där L, N och R står för låg, normal och hög tidig hållfasthet [14].

Tabell 2.1. Indelning av huvudtyper för cement utefter massandel portlandklinker enligt *SS-EN 197-1* [14].

| Cementtyp | Massandel portlandklinker, % |
|--|------------------------------|
| CEM I – Portlandcement | ≥ 95 |
| CEM II – Sammansatta Portlandcement | 65–94 |
| CEM III – Slaggcement | 5–64 |
| CEM IV – Puzzolancement* | 45–89 |
| CEM V – Kompositcement* | 20–64 |
| * CEM IV innehåller 11–55% puzzolant material och CEM V innehåller en blandning mellan slagg och puzzolant material. Används ej i Sverige. | |

Tabell 2.2. Tilläggsbeteckningar för tillsatsmaterial i olika cementtyper enligt SS-EN-197-1 [14].

| Tillsatsmaterial | Tilläggsbeteckning |
|------------------------|--------------------|
| Portlandklinker | K |
| Masugnsslagg | S |
| Silika | D |
| Naturliga puzzolaner | P |
| Kalcinerade puzzolaner | Q |
| Kiselhaltig flygaska | V |
| Kalkhaltig flygaska | W |
| Bränd skiffer | T |
| Kalksten | L/LL |

2.1.2 Tillsatsmaterials inverkan på olika ordinära cementtyper

Inom varje huvudtyp av cement ingår det flera olika cementtyper, alla med sina egna egenskaper och verkningsätt. Portlandcement, CEM I, utgörs nästintill enbart av finmald Portlandklinker tillsammans med en mindre del gips (omkring 5 %). Gipsets främsta uppgift är att motverka en snabb bindning som orsakas av klinkerkomponenten aluminat, C_3A , vid kontakt med vatten. Dock bidrar den även till hållfastheten. Utöver detta tillsätts även max 1% kromatreducerande medel för att motverka kromallergi vid direkt hudkontakt samt upp till 5% mineraliska tillsatser i form av kalkstenfillers, flygaska eller masugnsslagg [14].

För sammansatta Portlandcement, CEM II, varierar cementsorternas egenskaper starkt beroende av deras bindemedelssammansättning. I Sverige är masugnsslagg, flygaska, silikastoft samt kalksten allra vanligast som tillsatsmaterial. Överlag följer det att ju högre substitut av Portlandklinker, desto långsammare hållfasthetsutveckling, dock i vissa fall en högre sluthållfasthet. Reaktiviteten, som påverkar reaktionshastigheten och följaktligen hållfasthetsutvecklingen för de olika tillsatsmaterialen, har därför också en stor påverkan på cementsorternas materialegenskaper.

Reaktiviteten avgörs av glashalten, finheten samt andelen reaktiva oxider i tillsatsmaterialet [12]. Hur dessa påverkas i sig grundas både i sammansättningen av de ingående materialen som används i industriella verksamheter samt i behandlingen av restprodukterna därefter. Eftersom det är restprodukter prioriteras generellt inte sammansättningen i tillsatsmaterialen. Dock går det att påverka glashalten samt finheten.

Glashalten påverkas genom hur snabbt restprodukterna kyls av från smält form. Materialet som skapas kan sedan malas ner till ett fint pulver. Finheten, även känd som specifik yta, ger en större kontaktyta för reaktioner att ske på. Exempelvis är det vanligt att producera slaggcement, CEM III, med en högre finhet för att motverka den annars långsamma hållfasthetsutvecklingen.

Utöver hållfasthet och dess utveckling påverkar tillsatsmaterialen också andra egenskaper. Variationerna är flera, men exempelvis kan en högre arbetbarhet uppnås, minskad vattenseparation samt ökad sulfatresistens [12].

2.1.3 Tillsatsmedel

Detta delkapitel redovisar övergripligt de tillsatsmedel som har använts i arbetet.

För alla betongrecept i studien användes superplasticerande flyttillsatsmedel. Flyttillsatsmedel, liksom flera andra tillsatsmedel, förekommer i flera olika varianter, där superplasticerare är det senaste inom flyttillsatsmedel med en god dispergerande förmåga. De lämpar sig därför väl för betong med låga vct, där det råder en hög kontaktyta mellan fasta partiklar [13].

Vidare användes även en accelerator i ett av recepten baserad på syntetiskt framställda hydrerade silikater, även känt som kristallkärnor. Liksom flyttillsatser förekommer det accelerators av flera olika sorter, med olika tillämpningsområden. Området för nya accelerators är komplext och därför är deras verkningsätt inte helt utredda. Dock visar nyligen utförda studier på att kristallkärnor är effektivast, jämfört med andra vanliga accelerators [15,16]. De ger upphov till en bättre utveckling av den hydratiserade cementpastan, snabbare reaktion av slag samt en lägre total porvolym [17,18].

2.1.4 Belit-kalcium-sulfo-aluminat-cement

Kalcium-sulfo-aluminat-cement (CSA) kännetecknas av dess snabba hållfasthetsutveckling. Däremot leder denna snabba utveckling inte till en hög sluthållfasthet. För att motverka detta har det därför utvecklats en variant, BCSA, med ett högre innehåll av belit [19]. Belit, som även är en huvudkomponent i Portlandcement, bidrar till en hög sluthållfasthet, dock under en långsam utveckling.

Dagens intresse för CSA-cement och olika varianter av dem grundar sig i hur cementen tillverkas samt dess koldioxidutsläpp. Vid tillverkningen av klinker till CSA-cement släpps det ut mindre koldioxid, både ur råmaterialen i sig samt genom en förbrukning av mindre bränsle då klinkern kan produceras till en lägre temperatur. Dessa klinker är dessutom lättare att mala ner till ett fint pulver jämfört med Portlandklinker och kan produceras i samma fabriker [19].

Jämfört med Portlandcement så har BCSA-cement ett högre kemiskt behov av vatten. Studier visar på att behovet är starkt relaterat till innehållet av kalciumsulfat, upp till ett innehåll av 30% [5,19–21]. Förklaringen ligger i bildandet av ettringit, där kalciumsulfat tillsammans med klinkerkomponenten aluminat, C_3A , reagerar och binder en stor mängd vatten. Resultatet blir ett cement som kan ge självuttorkning, jämfört med andra typer av cement. Vidare kan även cementet tillverkas till stor del av många olika restprodukter, vilket är fördelaktigt ur ett miljöperspektiv [19].

2.2 Självtorkning

Som nämnts i introduktionen grundar sig intresset för självtorkande betong i en strävan att nå kraven för farlig byggfukt inom en rimlig produktionstid. Med farlig byggfukt menas den fukthalt som är skadlig mot material i kontakt med betong, där diverse skador riskerar uppstå. En fuktig betong är alltså inget negativt sett ur betongens hållfasthets- eller beständighetsperspektiv.

Kunskap om hur man kan sänka uttorkningshastigheten genom ett lägre vct har existerat under en längre tid. Detta visade Lars-Olof Nilsson redan 1976 i sin rapport *Fuktproblem vid betonggolv*, med ett vct på 0,50. Dock räckte inte resultaten till för att lösa de relaterade byggfuktsproblem som fanns då. Problem uppstod bland annat vid yttre fuktbelastning i form av regn, utöver behovet av en ännu snabbare uttorkning. Det var inte förrän 1989 som man i ett gemensamt forskningsamarbete om högpresterande betong upptäckte som biresultat att ett ännu lägre vct, omkring 0,40, kunde motverka dessa problem, vilket kan ses som början för det vi känner till som självtorkande betong idag [22].

Skillnaden mellan självtorkande betong och självtuttorkning i betong är därmed viktigt att beakta. Teoretiskt sett går det att säga att all betong självtuttorkar till viss del, dock är inte alla typer av betong självtorkande. Orsaken till detta ligger i uttorkningsprocessen för betong, som utgörs av självtuttorkning samt fuktutbyte med omgivningen, där självtuttorkning är den centrala delen för självtorkande betong [10]. Lars-Olof Nilssons resultat med en ökad uttorkningshastighet var alltså till följd av en förbättrad självtuttorkning, dock inte tillräckligt för att nå det som kännetecknar en självtorkande betong idag.

Grunden för självtuttorkning ligger både i en kemisk bindning av vatten, då cement hydratiserar, samt en fysikalisk bindning i den porstruktur som skapas då de finporösa hydratiserade ämnena bildas [23]. Processen för hur dessa två samspelar samt är beroende av andra faktorer är invecklad. Överlag följer det dock att självtuttorkningsegenskaperna förstärks av ett lägre vct. Detta genom att det finns kvar en mindre mängd fritt vatten efter den kemiska bindningen, vilket sedan binds fysiskt på väggarna och i porer genom kapillärkondensation i den fina porstruktur som skapas då cementet hydratiserar [23]. På så sätt skapas en självtorkande betong, där den fina porstrukturen kan binda den låga mängden vatten som är kvar efter den kemiska hydratationen. Båda faktorerna samverkar för att uppnå en sänkning av den inre relativa fuktigheten i materialet utan att torkning sker till omgivningen.

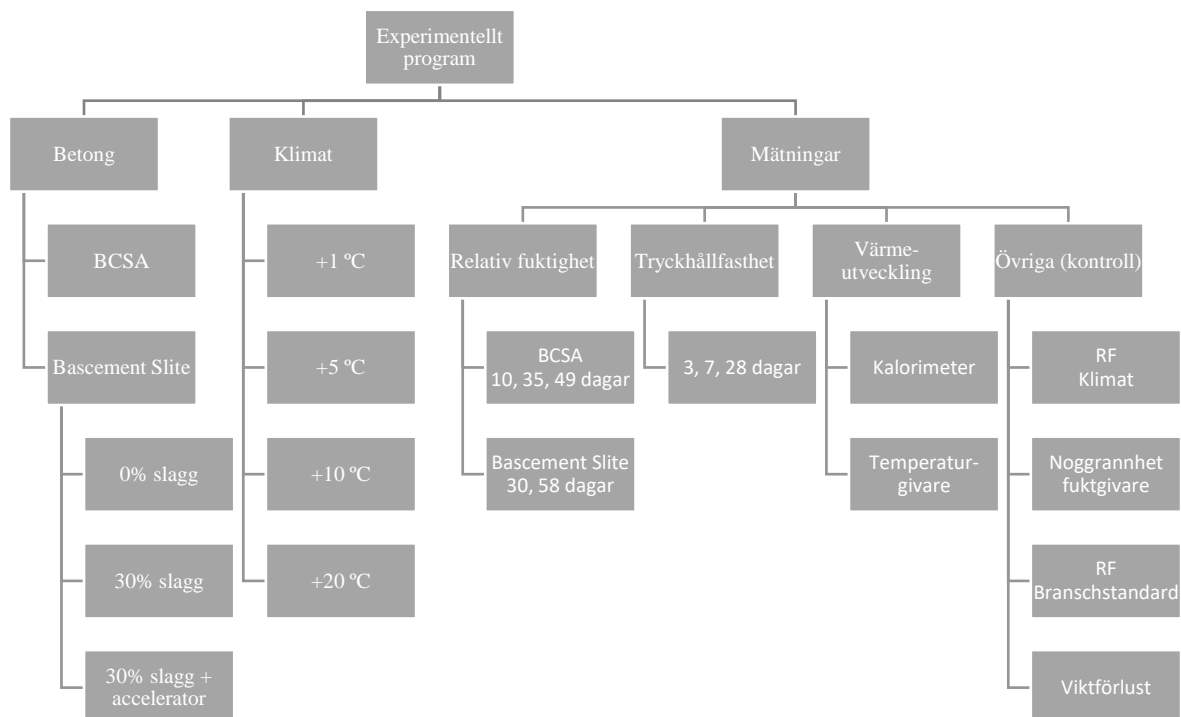
Andra faktorer som kan ha en stor inverkan, genom en påverkan på mängden kemiskt bundet vatten samt finheten i mikrostruktur, är bindemedelssammansättning samt temperatur. Det är exempelvis känt att flygaska binder mindre vatten kemiskt samt att slagg skapar en finare mikrostruktur jämfört med Portlandcement [24,25]. Vidare är det även visat att en lägre härdningstemperatur binder mer vatten kemiskt i reaktionsprodukten C-S-H samt att en finare porositet uppnås, troligtvis till följd av en annorlunda packning av materialet [3]. Många faktorer kan påverka reaktionsmönstret då tillsatsmaterial används och orsaken ligger främst i deras beroende av portlandit för att själva reagera. Exempelvis kan ett varierat förhållande mellan Portlandcement samt tillsatsmaterial tillsammans med en varierad temperatur ge olika mängder av reaktionsprodukter vid samma tidpunkt, vilket i sin tur kan påverka mikrostrukturen samt mängden kemiskt bundet vatten. Med andra ord skapas en balansgång som är svår att modellera ur ett självtuttorkningsperspektiv vid användningen av tillsatsmaterial, där tidiga skeden är intressanta.

3 Material och metod

Studiens huvudsakliga syfte var att undersöka temperaturens effekt på självuttorkning, varför det utfördes mätningar på fyra olika betongtyper i fyra olika klimat: +1, +5, +10 samt +20 °C, där den inre relativa fuktigheten avlästes vid given tid enligt figur 3.1. För att efterlikna en verklig situation där betong transporteras till produktion tilläts proven härddas två timmar i rumstemperatur först. Proven förseglades också för att undvika fuktavgivning mot omgivningen. Som stöd till att tolka dessa resultat utfördes även mätningar av tryckhållfasthet och värmeutveckling för varje betongtyp. I fortsättningen av detta kapitel kommer relativ fuktighet i vissa fall benämnas som RF.

Förutom ovanstående huvudmätningar utfördes även kontrollmätningar för att stödja bedömningen i mätosäkerhet genom att mäta RF i lagringsklimaten, fuktgivarnas noggrannhet i olika temperaturer, vikt förlust vid lagring samt en inre RF-mätning enligt branschstandard. Det bör observeras att dessa kontrollmätningar inte applicerades på varje betongtyp, utan som enstaka kontrollfall. I figur 3.1 redovisas det experimentella programmet översiktligt.

Betongtyperna grundade sig i två olika cement, Bascement Slite som är ett CEM II/A-L 42,5R cement och ett BCSA-cement från Vicat. Som syns i figur 3.1 utgjorde Bascement Slite grunden till tre av alternativen, där 0% slagg motsvarar en traditionell självuttorkningsbetong. De två andra alternativen innehöll slagg, varav ett alternativ även hade en accelerator som tillsats. Detta för att jämföra dess påverkan på självuttorkning då det är vanligt med användning av accelerators för cement med slagg vid låga temperaturer.



Figur 3.1. Översikt över struktur för det experimentella programmet.

3.1 Material

I grunden baserades varje betongtyp på ett basrecept för självtorkande betong med vct 0,36 enligt tabell 3.1. Detta recept korrigerades sedan i efterhand för cementtyp, tillsatsmaterial, fukthalt i ballast och tillsatsmedel samt önskvärd arbetbarhet. För slutliga betongrecept, se bilaga A.

Receptet för betongen med BCSA korrigerades till ett högre vct på 0,42 då den har ett högre kemiskt vattenbehov. Detta uppnåddes genom att sänka cementhalten i basreceptet och ersätta mängden med ballast i fraktion 0–2 för att bibehålla receptet i kg/m^3 . Korrektion för fukthalt i ballast utfördes även i detta fall, eftersom finare ballast överlag har en högre fukthalt.

I de varianter som innehöll slagg ersattes cementet i en likvärdig mängd, då k-faktorn 1,0 användes. Denna faktor, som varierar mellan 0 och 1, benämns även som effektivitetsfaktor och används i de fall då tillsatsmaterial används för att ange hur stor andel som kan ersätta Portlandcement. Vidare används även benämningen vattenbindemedel-tal, istället för vattencement-tal, då tillsatsmaterial används.

I varje betongtyp användes superplasticerare, där doseringen anpassades för att få ett sättmått omkring 100–210 mm (S3-S4). Eftersom superplasticerare fungerar olika bra beroende på cementtyp användes Dynamon SX-A 170 (Mapei AB) till Bascement Slite och Sikament Evo 26 (SIKA AB) till BCSA-cementet. Acceleratorn, Mapefast Ultra N (Mapei AB), som användes i ett av recepten doserades i 3% av cementvikten.

Tabell 3.1. Basrecept med vct 0,36 för de olika betongtyperna.

| Delmaterial | kg/m³ |
|--------------------------|-------------------------|
| Cement | 510 |
| Vatten | 183 |
| Ballast (krossad) | |
| 0–2 mm | 676 |
| 4–8 mm | 338 |
| 8–11 mm | 676 |

3.2 Metod

3.2.1 Blandning, gjutning och lagring

För att bibehålla en jämförbarhet i resultatet följde blandningarna en struktur för både förberedelse samt utförande av blandning. Förberedelserna började genom en mätning av fukthalt på sanden med en fuktanalysator (Adam Equipment), då det experimentella programmet löpte över flera veckor. Därefter vägdes delmaterialen upp på en våg med 1 g upplösning (Mettler Toledo ID1-Plus) för satser om 20 l betong i torra brukshinkar med ett punktugsug för att fånga upp damm. För vattnet fuktades dock hinkarna först upp. Tillsatsmedlen vägdes upp i mätglas på en våg med 0,1 g upplösning (Mettler PJ 1220), där accelerator vägdes upp i exakt mängd. Superplasticerare vägdes upp i en mängd strax över det beräknade eftersom det doserades för att få önskvärd arbetbarhet. Vidare oljades formarna in med formolja. När förberedelserna var klara kunde blandningarna påbörjas, enligt följande procedur:

1. Frifallsblandaren (AB Sandby Maskiner), vibratorbord samt övrig utrustning fuktades. Vattnet tilläts rinna av i blandaren för att förhindra en större samling vatten. Punktugsug placerades över blandaren.
2. Blandaren placerades i en lutande riktning uppåt, varvid ballasten kunde tillföras för att blandas om kort i cirka 10 sekunder, se figur 3.2.
3. Cement samt eventuellt tillsatsmaterial tillsattes med blandaren avstängd. Därefter startades blandaren i korta impulser för jämna ut cement samt tillsatsmaterial, för att sedan köras kontinuerlig under cirka 10 sekunder när det bedömdes att inget spill skulle förekomma.
4. När ballast, cement samt eventuellt tillsatsmaterial bedömdes vara färdigblandat borstades sidorna i blandaren med en diskborste för att få med det som satt sig på sidorna. Efter detta startades blandaren för att tillsätta vatten under kontinuerlig blandning under en kontrollerad form där blandarbladen undveks för att förhindra spill utanför blandaren. Vid tillsättning av vattnet startades ett tidtagarur, och blandaren kördes i cirka 30 sekunder.
5. Blandaren stoppades efter 30 sekunder, varefter superplasticerare tillsattes i en mängd strax under den beräknade mängden. Blandaren kördes igång kort, cirka 10 sekunder, för att sedan stoppas då tillsatsen bedömdes vara väl inblandad i materialet. Vid den första blandningen mättes sättmättet för att uppnå en konsistensklass omkring 100–210 mm (S3-S4). Därefter bedömdes arbetbarheten utefter hur blandningen satte sig när betongblandaren slutade rotera. Det eftersträvades ett flyt var cementpastan omslöt den grövre ballasten enligt figur 3.3. Processen upprepades tills en önskvärd arbetbarhet uppnåddes och använd mängd superplasticerare noterades.



Figur 3.2. Blandad ballast.



Figur 3.3. Önskvärt flyt.

6. Vid uppnådd arbetbarhet kördes blandaren tills tidtagaruret nått 7 minuter för blandningar med Basement Slite och 5 minuter för blandningar med BCSA-cement, då BCSA-cement har en kortare bindningstid. Sedan fylldes 100 mm formarna halvfylla, se figur 3.4, för att kort vibreras på ett vibratorbord. Därefter fylldes resterande mängd för att vibreras återigen, varpå överflödig betong skrapades av och termoelement fördes ner i tre provkroppar för att kunna mäta temperaturutveckling i klimaten för +1, +5 samt +10 °C.

Totalt göts 48 kubiska provkroppar på 1 l vid varje tillfälle, där 3 blandningar om 20 l efter ett recept utfördes. Provkropparna tilläts härda i två timmar i rumstemperatur under en tät byggfolie innan de fördelades jämnt över de olika klimaten, där de lagrades i 3 dagar under byggfolie innan avformning. Efter avformning placerades de i täta plastpåsar som markerades och veks under proven för att skapa en god försegling, se figur 3.5, för att sedan fortsätta lagras i sina klimat. Termoelement klipptes av i detta skede.

Klimaten för +1, +5 samt +10 °C utgjordes av klimatskåp, där tråg med vatten placerades för att upprätthålla en hög relativ fuktighet, se figur 3.5–7. Klimatet för +20 °C utgjordes av en större plastlåda med en tätningslist och skiva av glas som lock, placerad i ett klimatrums för +20 °C med en jämn relativ fuktighet på 60%, se figur 3.8. Likt tråget med vatten placerades en fuktig trasa i plastlådorna.



Figur 3.4. Halvfulla provkroppar utan vibrering.



Figur 3.5. Prov förseglade med plastpåsar i klimatskåp



Figur 3.6. Klimatskåp för +5 och +10 °C.



Figur 3.7. Klimatskåp för +1 °C.



Figur 3.8. Plastlådor med glaslock för +20 °C.

3.2.2 Inre relativ fuktighet

Vanligtvis sker mätning av relativ fuktighet för betong enligt en branschstandard som är designad utefter behov i produktion. Kortfattat går metoden ut på att borra hål i betongen, där fuktgivare förs ner. Denna metod går att efterlikna i laborativa miljöer, där plåthinkar om 5 l gjuts som mätobjekt. Dock är det ett krävande metod, både materiellt, utrymmesmässigt samt fysiskt, när flera faktorer ska studeras.

I denna studie, där det göts totalt 192 provkroppar, utfördes därför RF-mätningarna på krossat material i provrör förseglade med gummiproppar, där fuktgivare (Vaisala HMP40S) var installerade, se figur 3.9. Detta möjliggjorde ett friare val av dimension på provkropp, varför en kubisk form med sidorna 10 cm valdes. Denna dimension minimerade inte bara mängden betong utan möjliggjorde främst studien då en lagring i klimatskåp kunde genomföras, där utrymme är begränsat. Vidare kunde samma provkroppar, då tidpunkterna överlappade, användas för mätning av hållfasthet.

Mätningarna utfördes i respektive klimat, där varje mätning utgjordes av tre prov för ett medelvärde. Tidpunkten för när detta skedde avgjordes delvis av hållfasthetsmätningarna, då samma prov användes, i kombination med tiden det tar för fuktgivarna att komma i jämvikt med omgivningen. Tiden varierar beroende på provets fuktavgivningshastighet, givarnas fuktkapacitet samt volym på provbehållare, med en risk för felaktig avläsning om det sker för tidigt. I studiens fall avlästes därför proven 2–3 dagar efter monterad fuktgivare, se figur 3.1 för exakta dagar, beroende på om hållfasthetsmätning skedde i kombination. Notera att RF mättes vid 10, 35 samt 49 dagar för betong med BCSA-cement, då det reagerar snabbare jämfört med Portlandcement. I övriga fall lästes RF annars av vid 30 samt 58 dagar.

En viktig aspekt vid krossning av materialet var att förhindra uppvärmning. För att motverka detta tempererades därför provrör samt gummipropp med fuktgivare i respektive klimat och togs ut när materialet var förberett. Vidare utfördes processen för en provkropp i taget, medan resterande låg kvar i sina klimat. Tillvägagångssättet går att summera enligt följande steg:

1. Vid överlappande tid med hållfasthetsmätning provades först provet för hållfasthet. Därefter krossades det i plastpåse i en manuell tryckpress tills erforderligt brott uppnåddes.
2. Inre bitar av det krossade materialet sorterades för vidare uppdelning med hacka i medelstora bitar som fick plats i provrör.
3. Provrör med gummipropp samt givare togs ur givet klimat och fylldes upp till cirka 70–80% med krossat material så att gummipropp med givare kunde monteras. Därefter placerades provrör tillbaka direkt i klimatskåp.



Figur 3.9. Fyllt provrör med gummipropp samt fuktgivare.

3.2.3 Tryckhållfasthet

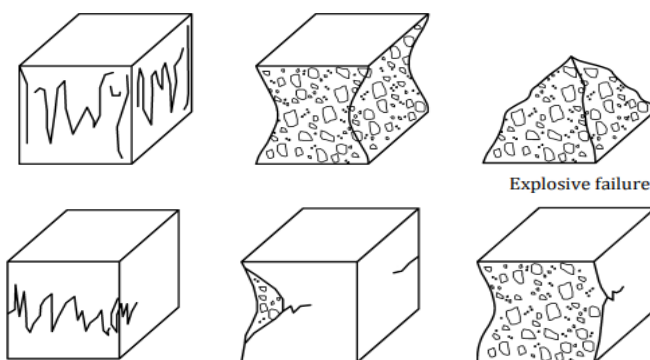
När det gäller betong brukar dess hållfasthet utvärderas främst genom mätning av tryckhållfasthet, då materialet inte erhåller större draghållfasthetsegenskaper utan förstärkning i form av armering. Likt cementbruk där hållfastheten klassas efter 28 dygns normerad hållfasthet, tidigare nämnt i kapitel 2.1.1, utvärderas hållfasthet för betong vid samma tidpunkt. För att komplettera resultaten har dock mätningar också utförts vid 3 samt 7 dagar i denna studie, se figur 3.1, där 3 mätningar utfördes för ett medelvärde.

Hållfastheten delas in i olika klasser, exempelvis C 30/37, där C betecknar normal eller tung betong, 30 lägsta karaktäristiska cylinderhållfasthet och 37 lägsta karaktäristiska kubhållfasthet. Kraven för hur bestämning ska ske går att härleda ur *SS-EN 206*, där det hänvisas till en rad olika standarder för tillvägagångssättet. Kraven som ställs innefattar allt från hur materialet tillbereds, toleranser på provkroppar till fordring på tryckpress. I denna studie kommer inte en fördjupning göras i dessa standarder, då mätningarna är en bedömning och inte bestämning av tryckhållfasthet. Det ska dock observeras att förfarandet har följt ramen för regelverket, vilket kan sammanfattas enligt följande steg:

1. Provytor och trycktytor i tryckpress rengjordes för en utplaning. Eventuella skarvar bröts loss.
2. Kub placerades i tryckpress så att skarvfria och plana sidor mötte trycktytor, se figur 3.10.
3. Kubdimensioner matades in i den automatiska tryckpressen (Formtest Digimaxx C-24) och provning startades. Om provning sker med manuell tryckpress, följ *SS-EN 12390-1*.
4. Brottresultatet utvärderades, där homogena brottmönster eftersträvades. Dessa förekom i både sprickor samt avspjälkning. Vid icke homogena brott förkastas resultatet, vilket inte skedde i studien. Se figur 3.11 nedan för exempel.



Figur 3.10. Kub i tryckpress. Observera avspjälkat material i botten av testkammaren från tidigare prov



Figur 3.11. Exempel på brottmönster [28]. Översta raden är godkända och nedersta raden är icke godkända. I studien liknade resultaten främst det första exemplet i översta raden.

3.2.4 Värmeutveckling

Värmeutveckling i de fyra betongerna studerades med hjälp av termoelement (Testo 175T3) samt en isoterm kalorimeter, I-Cal Betong (Calmetrix). Som tidigare nämnts i kapitel 3.2.1, fördes termoelementen in i tre prov vid varje blandningstillfälle för att mäta värmeutveckling i +1, +5 samt +10 °C fram tills avformning där de avlägsnades. I fallet för +20 °C användes kalorimetern, där utvecklingen kunde följas under en längre period.

Kalorimetern sattes till 20 °C i mättemperatur och vid slutet av varje blandningstillfälle fylldes en liten provburk med cirka 200 g betong för att sedan förseglas. Innan provet fördes ner i en tom mätkanal i kalorimetern vägdes det på en våg (Mettler PJ 1220) med 0,1 g upplösning. Mätningarna skedde kontinuerligt jämsides med det experimentella programmet och resultat plockades ut mot slutet.

3.2.5 Kontrollmätningar

Parallellt med de primära mätningarna utfördes kontroller av viktförlust i provkroppar, noggrannhet för givarna, RF i klimatskåp samt inre RF vid 28 dagar utförd likt branschstandard. Observera, som nämnt tidigare, att dessa skedde för enstaka kontrollfall och inte för alla betonger.

Viktförlust

Efter att en blandning slutfördes och härdats i 2 timmar vägdes 4 prov på en våg (OHAUS Explorer) med 0,1 g upplösning för att sedan föras in i respektive klimat. Strax innan avformning vägdes de återigen, för att sedan vägas ytterligare en gång när de var inplastade. Proven återinfördes i sina klimat och vid jämna intervall togs de ut ur sina klimat för att vägas.

Noggrannhet fuktgivare

Givarna monterades till en mättad saltlösning av kaliumklorid för att sedan föras in i respektive klimat och avläsas efter 2 dagar.

RF i klimatskåp

Fuktmätare (Testo 175H1) fördes in i klimatskåpen för kontinuerlig övervakning av RF. Mot slutet av det experimentella programmet togs de ut för att plocka ut resultat.

RF likt branschstandard

En plåthink på 5 liter förbereddes genom att förses med maskeringstejp längs förseglingskant. Detta för att tillgodose en ren yta vid montering av lock. Provet fylldes i slutet av en blandning, likt kuberna, där det fylldes delvis och vibrerades. Därefter förseglades det och förvarades i samma rum som för prov i +20 °C.

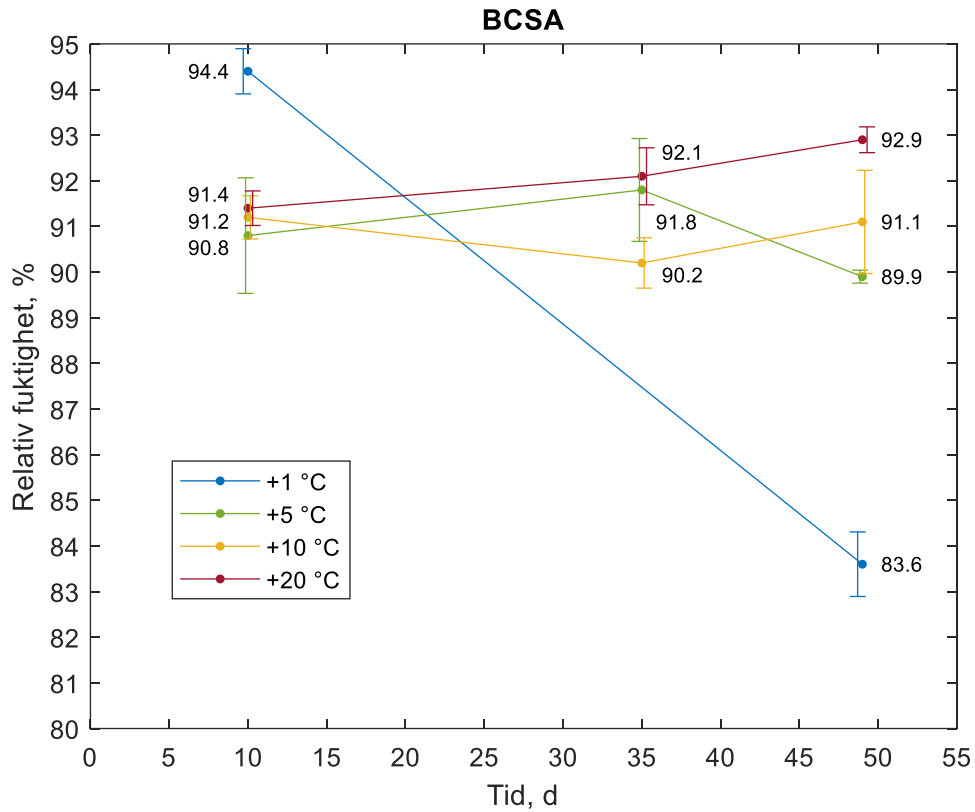
Vid 28 dagar borrades 3 hål med en diameter om 16 mm genom plåtlocket ner till halva djupet med hjälp av en slagborrmaskin (Hilti TE 30C). Därefter monterades mätrör i plast som förseglades med en tät massa. Provet läts vila i cirka 1 dygn innan fuktgivare monterades. Efter ytterligare ett dygn avlästes resultatet.

4 Resultat

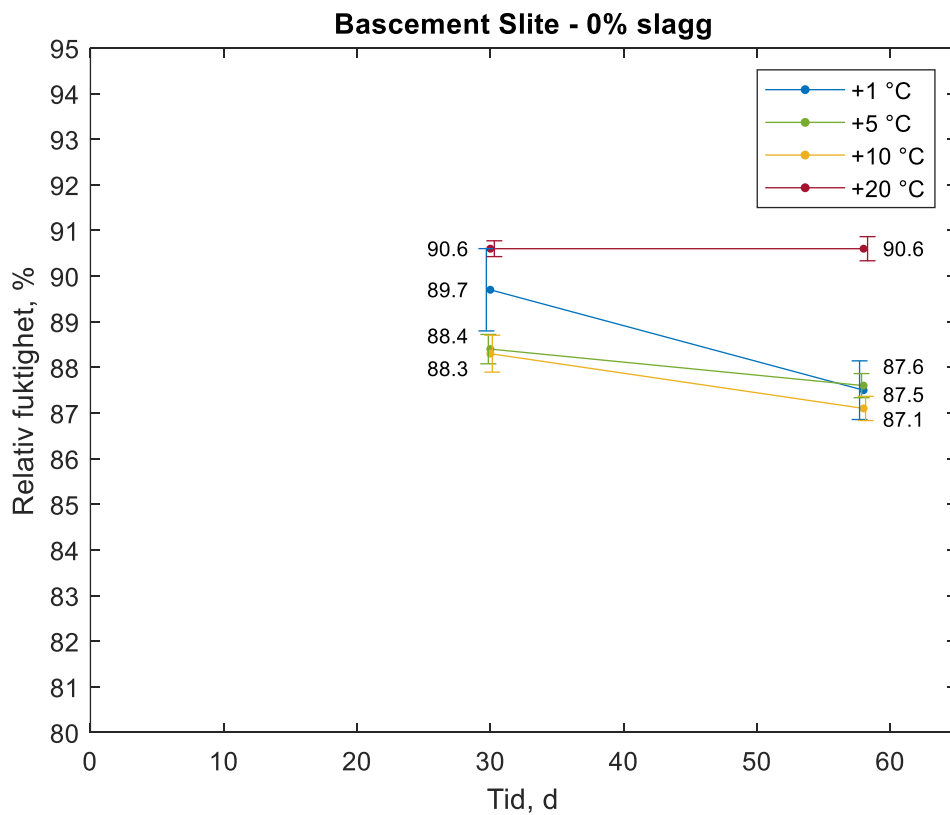
4.1 Inre relativ fuktighet

Betongerna baserade på Bascement Slite testades vid 30 samt 58 dagar och vid 10, 35 samt 49 dagar för den som var baserad på BCSA-cement. Varje mätpunkt utgörs av ett medelvärde av tre mätningar med standardavvikelse i form av vertikala streck, förutom vid de punkter där avstickande värden exkluderats, se bilaga B, samt vid 49 dagar för betongen med BCSA-cement i +5, +10 samt +20 °C där det utfördes två mätningar. Detta för att en extra provkropp användes vid tryckhållfasthetsmätning vid 3 dagar till följd av en större spridning i resultatet, främst för provkropparna i +1 °C, se tabell C1 i bilaga C. Provkropparna för +1 °C göts därför om.

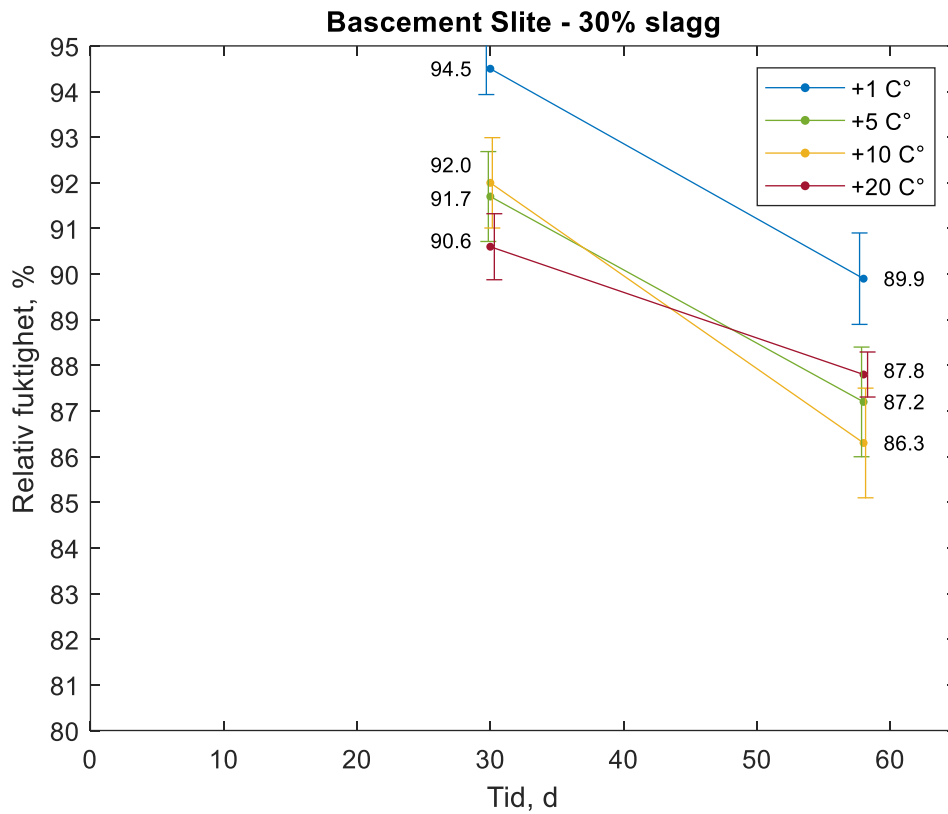
Resultatet från mätningarna för inre relativ fuktighet i de olika betongtyperna redovisas i figur 4.1–4. För individuella värden, se tabell B1-B4 i bilaga B. Observera skillnaderna för BCSA-cement i figur 4.1, där den relativa fuktigheten ökar mellan 10 och 35 dagar för +5 och +20 °C samt mellan 35 och 49 dagar för +10 och +20 °C. Dessa skillnader beror högst troligen på osäkerheter i mätningarna.



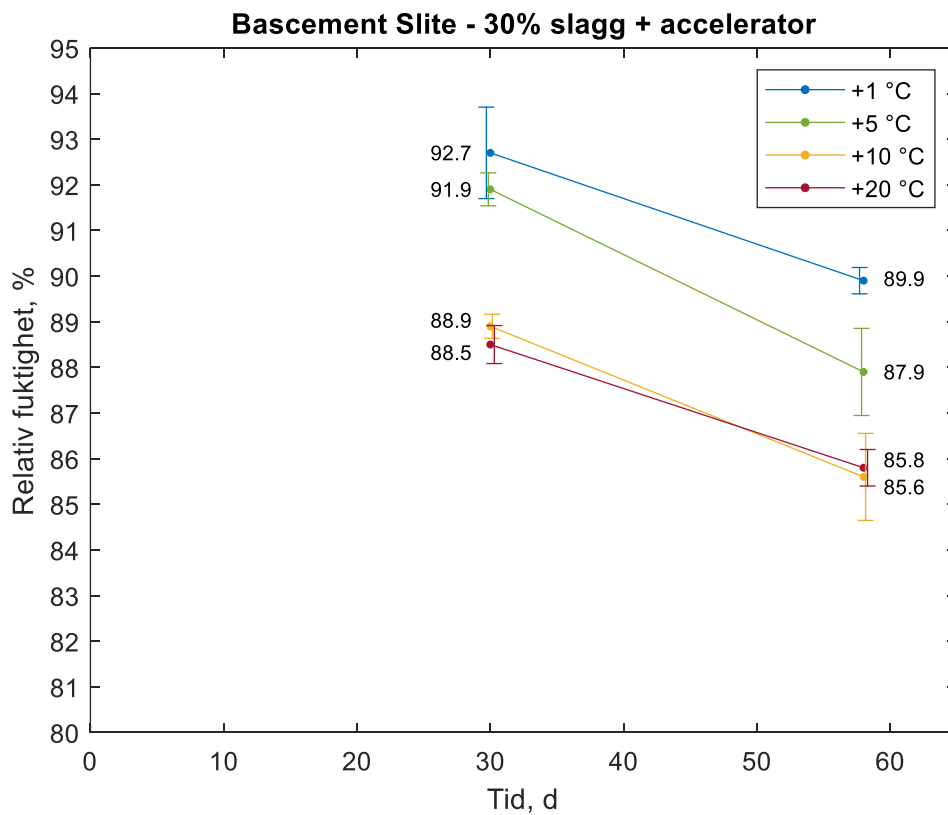
Figur 4.1. Relativ fuktighet för BCSA vid 10, 35 samt 49 dagar.



Figur 4.2. Relativ fuktighet för Bascement Slite - 0% slagg vid 30 samt 58 dagar.



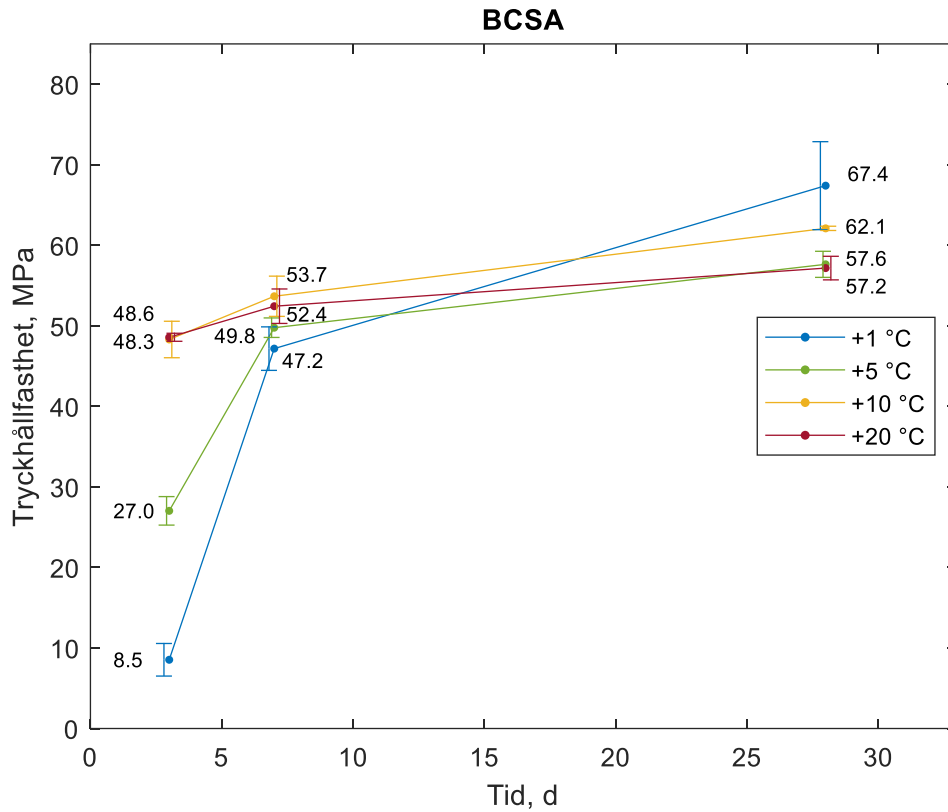
Figur 4.3. Relativ fuktighet för Basement Slite - 30% slagg vid 30 samt 58 dagar.



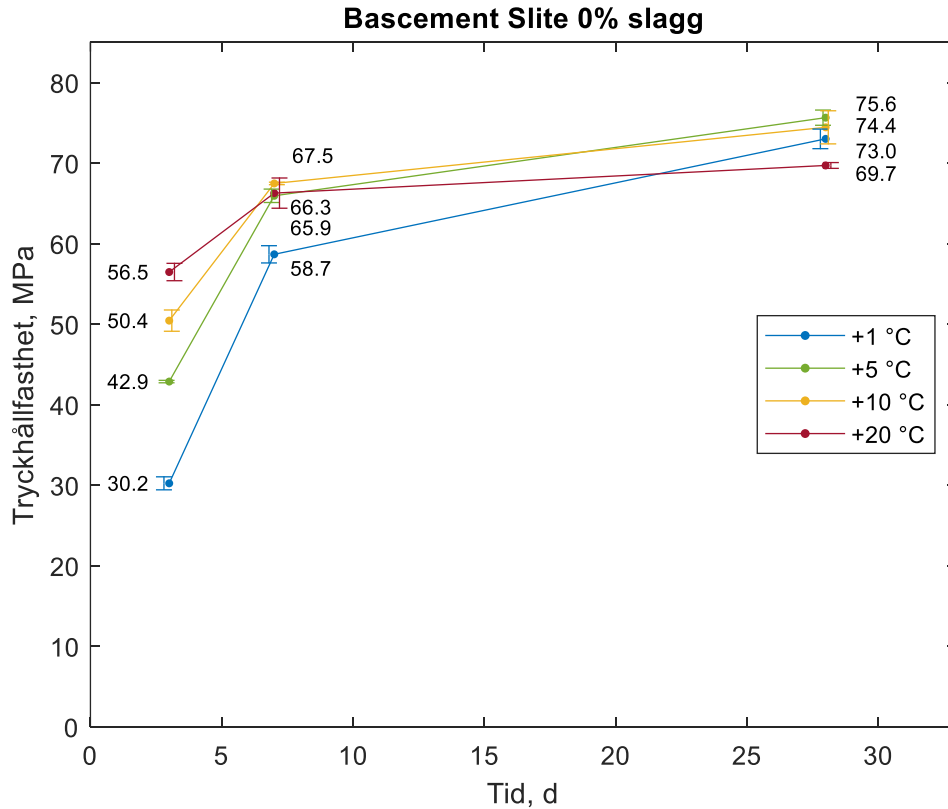
Figur 4.4. Relativ fuktighet för Basement Slite - 30% slagg + accelerator vid 30 samt 58 dagar.

4.2 Tryckhållfasthet

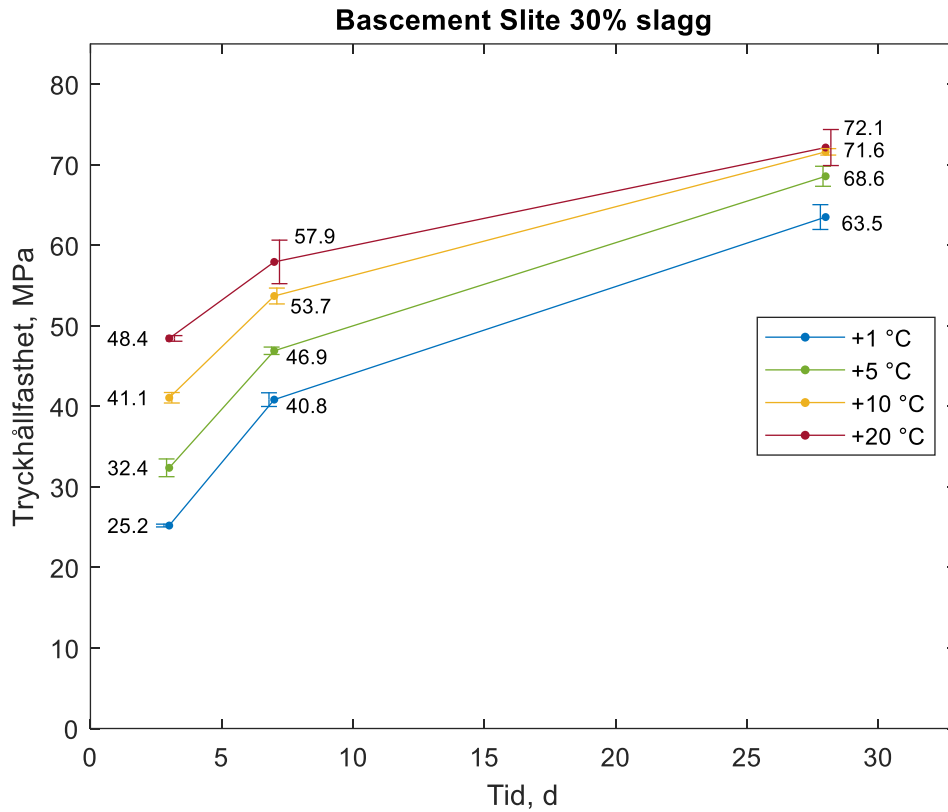
Hållfasthetsmätning vid 3, 7 samt 28 dagar utfördes för samtliga betongtyper. Likt mätningarna för relativ fuktighet utgörs varje mätpunkt av ett medelvärde av tre mätningar med standardavvikelse i form av vertikala streck. Resultatet redovisas i figur 4.5–8. För individuella värden, se tabell C1-4 i bilaga C.



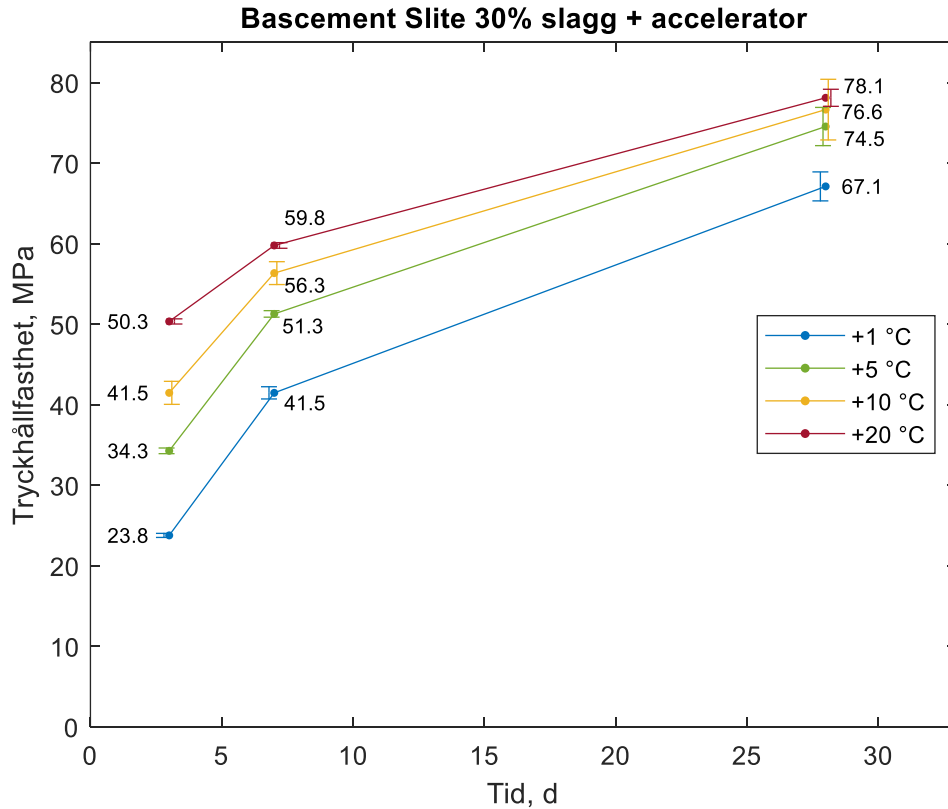
Figur 4.5. Tryckhållfasthet för BCSA i olika temperaturer vid 3, 7 samt 28 dagar.



Figur 4.6. Tryckhållfasthet för Bascement Slite 0% slagg i olika temperaturer vid 3, 7 samt 28 dagar.



Figur 4.7. Tryckhållfasthet för Bascement Slite 30% slagg i olika temperaturer vid 3, 7 samt 28 dagar.

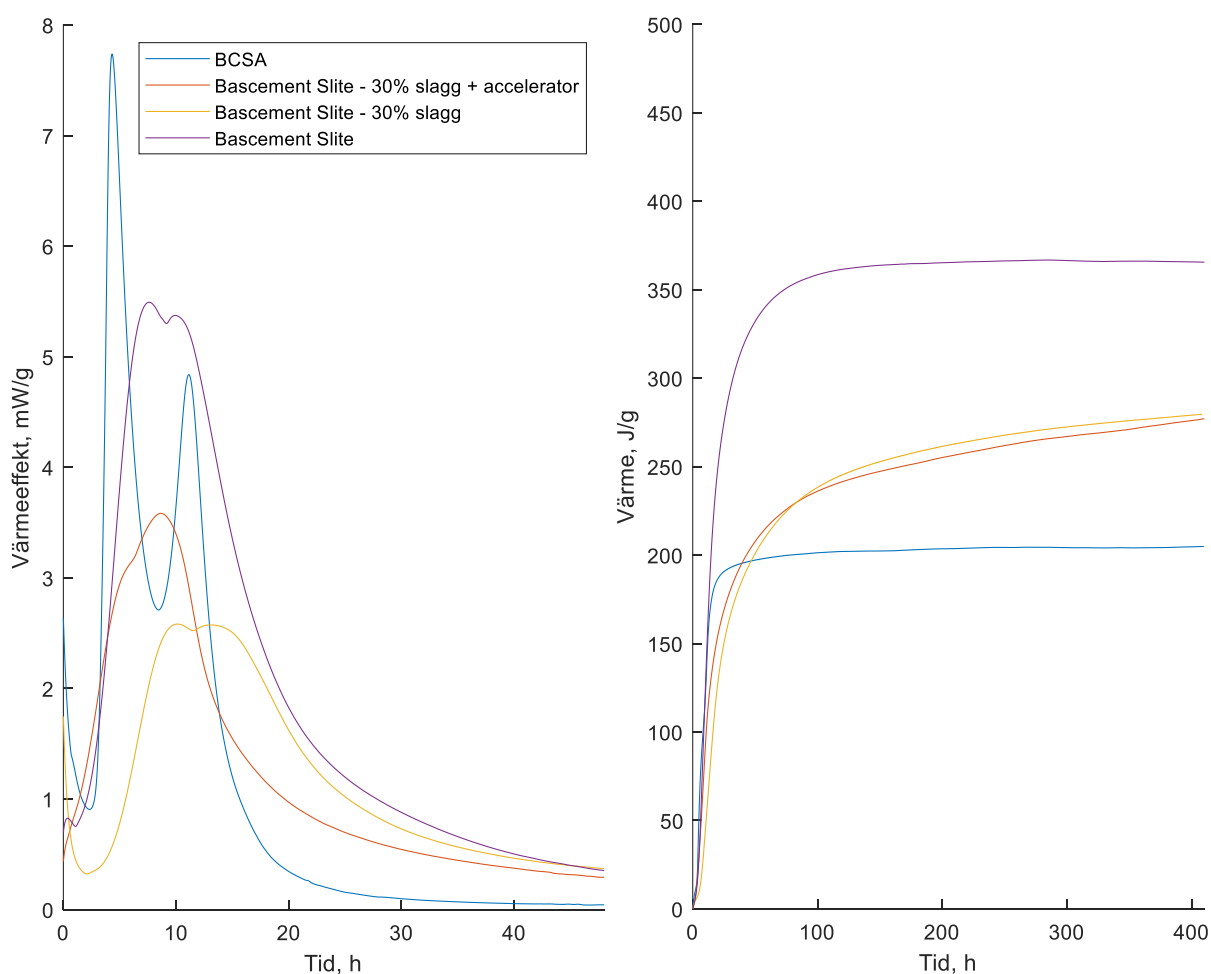


Figur 4.8. Tryckhållfasthet för Bascement Slite 30% slagg + accelerator i olika temperaturer vid 3, 7 samt 28 dagar.

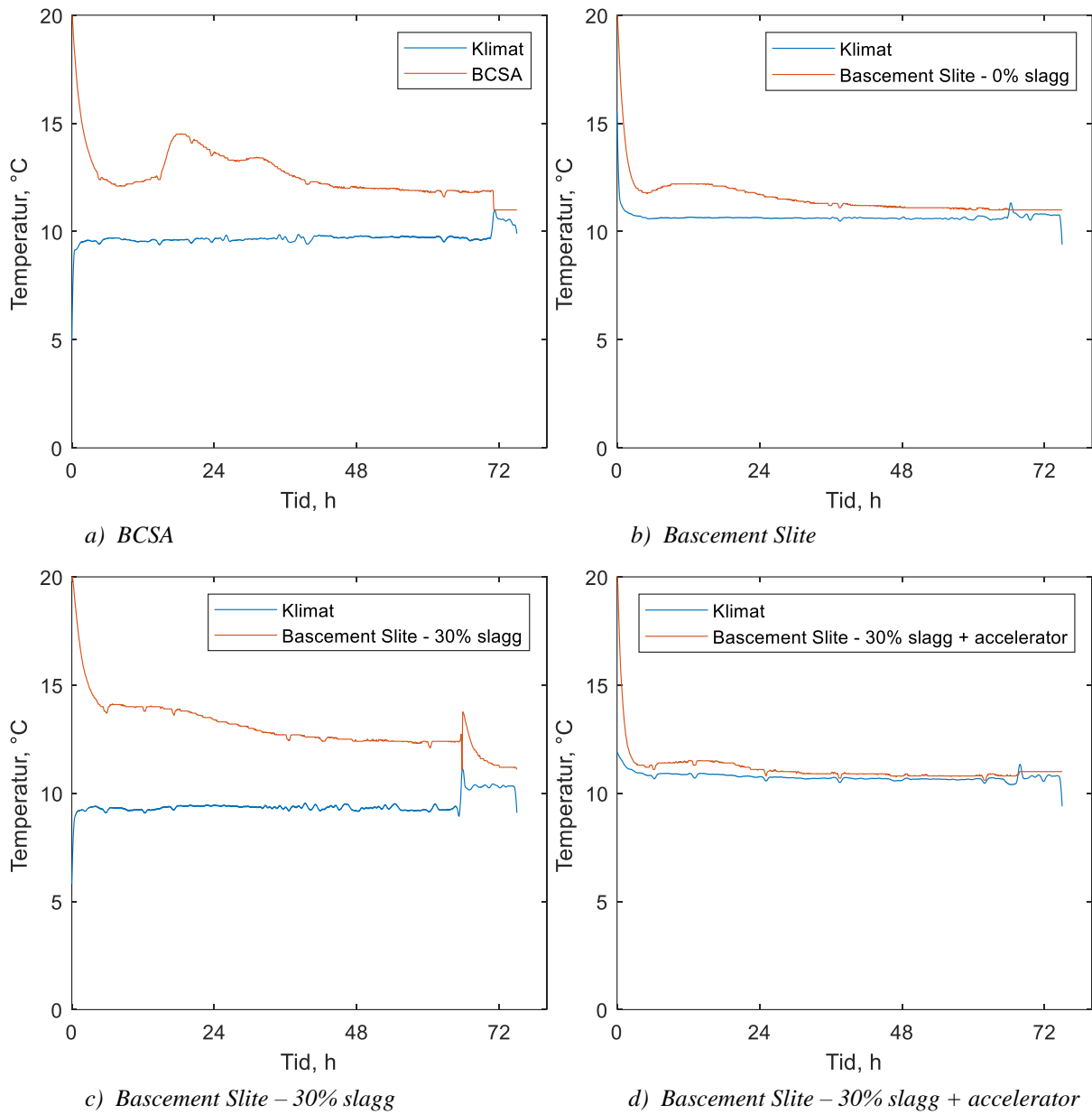
4.3 Värmeutveckling

Värmeutvecklingen under en längre period vid +20 °C, som mättes med en isoterm kalorimeter, presenteras i figur 4.9. Resultaten för den tidiga värmeutvecklingen som utfördes med termoelement i de olika klimatskåpen, +1, +5 samt +10 °C, redovisas i figur 4.10–12. Temperaturen inne i klimatskåpen undersöktes också. Detta för att se hur betongens temperatur kom till jämvikt med omgivande klimat samt hur klimatet påverkades av att det var många stora provkroppar i varje skåp.

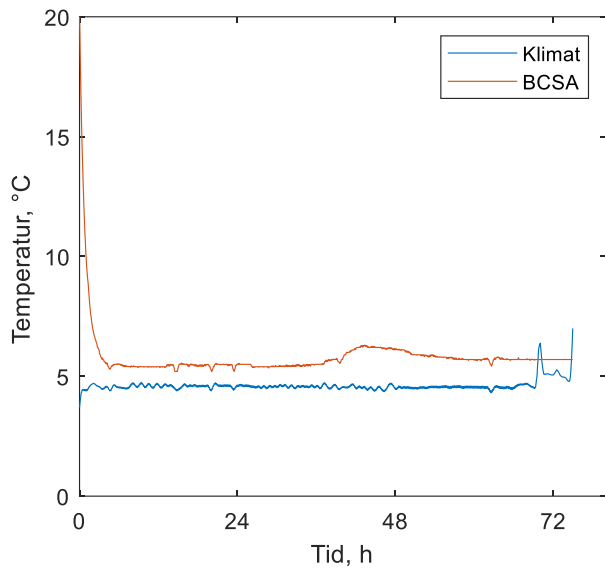
Vid sammanställningen av resultatet kunde det observeras att temperaturen för klimatskåpen reglerades cykliskt med intervaller om en minut. För att presentera resultatet används därför ett glidande medelvärde. Termoelementen glömdes även att kopplas in direkt vid en gjutning, vilket är varför temperaturen startar vid ett lägre värde i figur 4.12 c). Det bör observeras att resultatet varierar, både för betongen och klimatet i sig samt skillnaden mellan dessa, för mätningen med termoelement. Detta grundar sig troligtvis i hur djupt termoelementen har förts ner vid gjutning, vilket kan ge utslag för lägre temperaturer då de är för nära ytan, trots ett mer reaktivt cement. Vidare kan även placeringen av prov i klimatskåpen ha påverkat temperaturen något, genom att förändra luftrörelsen i klimatskåpen.



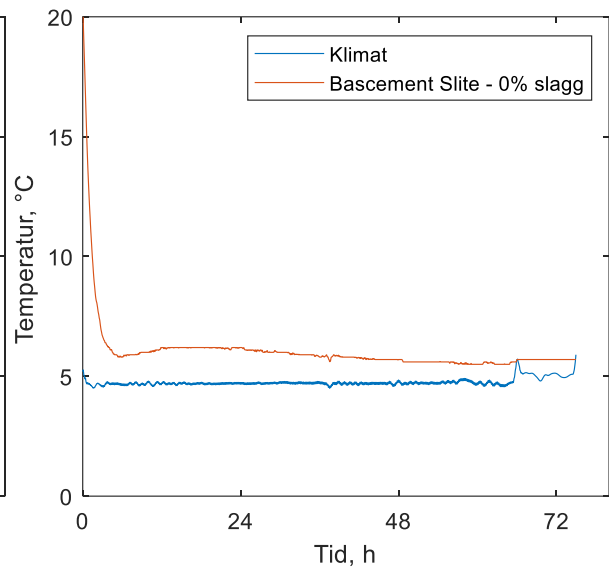
Figur 4.9. Till vänster: Utvecklad värmeeffekt för olika cement i +20 °C.
Till höger: Totalt utvecklad värmeeffekt för respektive cement.



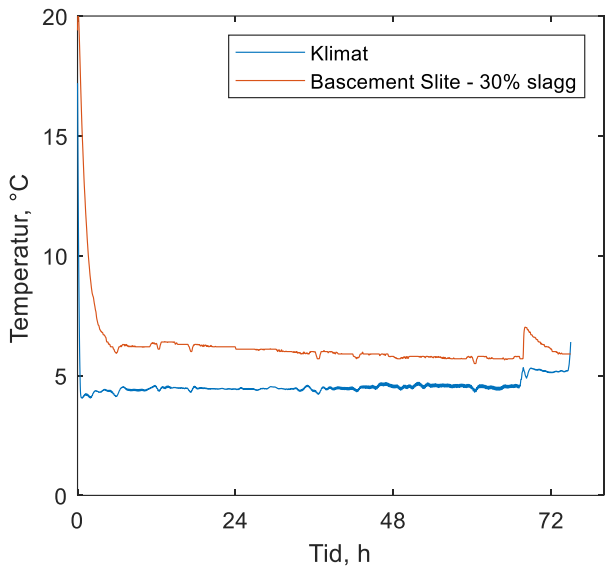
Figur 4.10. Värmeutveckling i +10 °C under ett tidigt skede för olika betongblandningar som först låtits härda i två timmar +20 °C.



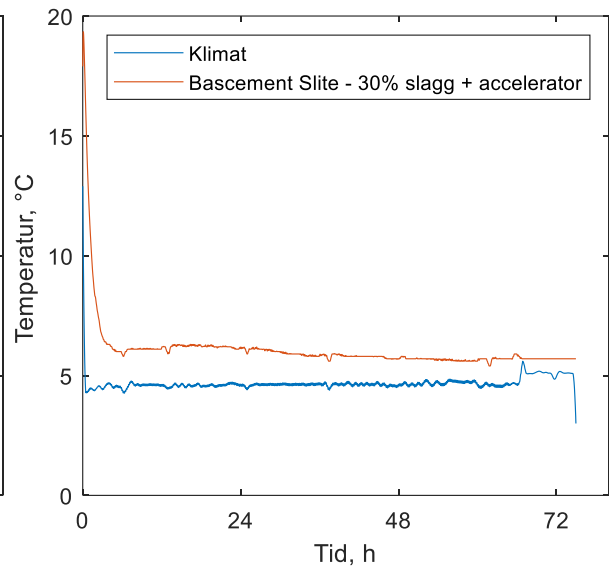
a) BCSA



b) Bascement Slite

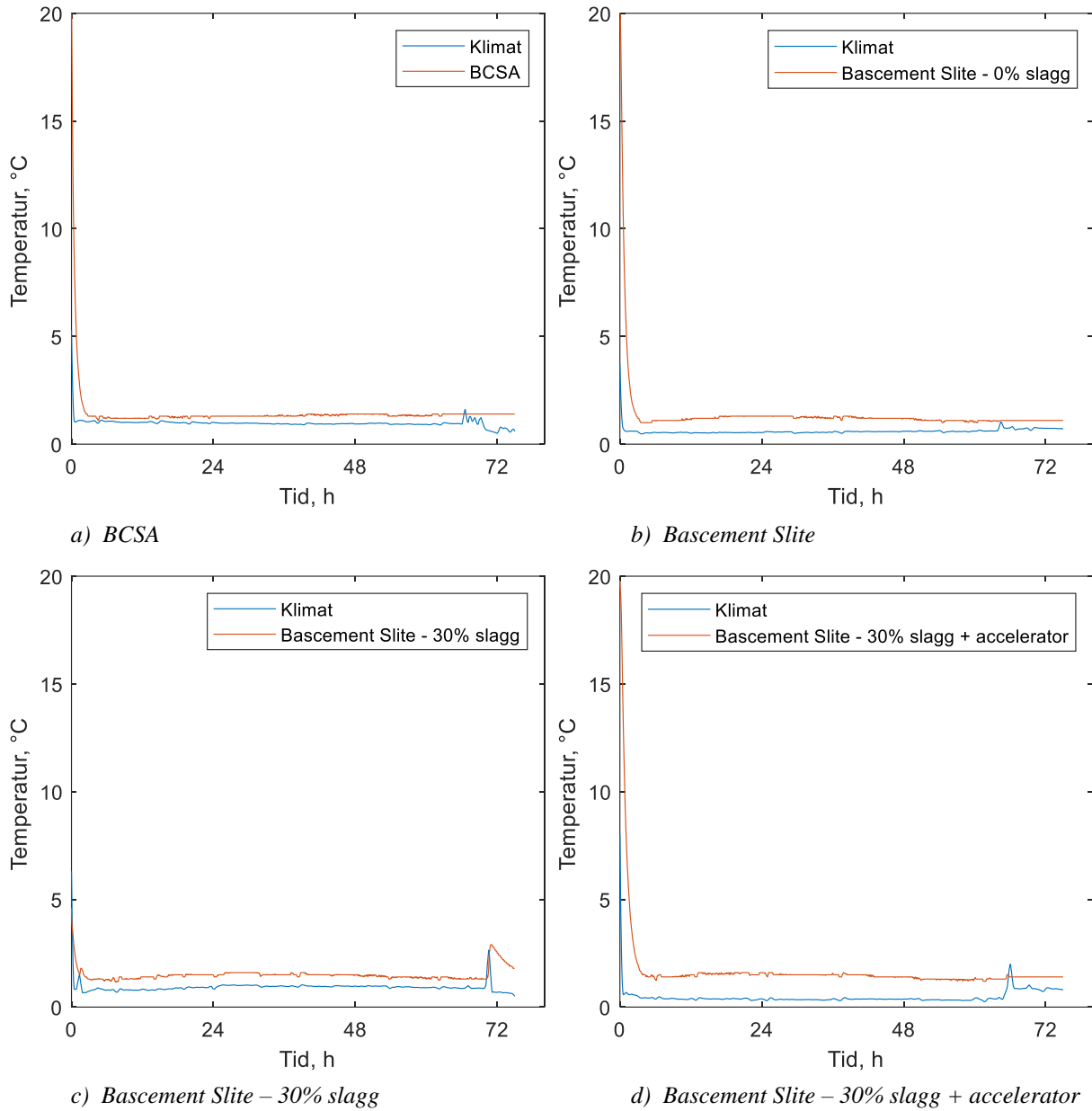


c) Bascement Slite – 30% slagg



d) Bascement Slite – 30% slagg + accelerator

Figur 4.11. Värmeutveckling i +5 °C under ett tidigt skede för olika betongblandningar som först låtits härda i två timmar +20 °C.



Figur 4.12. Värmeutveckling i +1 °C under ett tidigt skede för olika betongblandningar som först låtits härda i två timmar +20 °C.

4.4 Kontrollmätningar

Viktförlust

Viktförlusten presenteras i tabell 4.1 och baserades på kuber gjorda av Bascement Slite med 0% slagg. Det bör observeras att dag 3 utgör tidpunkten vid avformning, varför det är en tydlig viktförlust innan kuberna avformades. För +20 °C som varierar mot resterande klimat ligger skillnaden troligen i hur provkropparna har lagrats. I +20 °C ligger provkropparna tillsammans i en förseglad klimatlåda medan de ligger enskilt förseglade i resterande klimat, se figur 3.5 och 3.8. Om orsaken ligger i en omfördelning av fukt mellan proverna alternativt i kondens som droppar ner är oklart, dock noterades ingen kondens vid de tidpunkter då prov togs ur för tester.

Genom att beräkna andelen tillsatt vatten i vikt-% med hjälp av grundreceptet i bilaga A fås ett värde på cirka 7,7%. Med en ungefärlig provkroppsvikt på 2400 g utgörs därför varje provkropp av 185 g vatten, där 5 g motsvarar cirka 2,7% av den totala mängden vatten i en provkropp. Av 185 g vatten krävs det cirka 27 g i uttorkning för en sänkning av RF från 100% till 85%, om en desorptionsisoterm för rent Portlandcement avläses vid ett vct på 0,36, se figur 1A i bilaga A. Om 5 g av dessa 27 g som behöver torkas ut försvinner genom diffusion skulle möjligtvis en skillnad i ungefär 1% RF erhållas. Det bör dock noteras att det är en osäker uppskattning.

Tabell 4.1. Viktförlust för en provkropp baserad på Bascement Slite med 0% slagg ur varje klimat under en längre period. 0,0 g utgör första vägningen direkt efter gjutning.

| Viktförlust (g) | | | | |
|-----------------|-------|-------|--------|--------|
| Dag | +1 °C | +5 °C | +10 °C | +20 °C |
| 1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 3 | -6,0 | -5,0 | -4,0 | -2,0 |
| 7 | -6,0 | -5,0 | -4,0 | -3,0 |
| 10 | -6,0 | -5,0 | -4,0 | -2,0 |
| 14 | -6,0 | -5,0 | -4,0 | -1,0 |
| 28 | -6,0 | -5,0 | -4,0 | +2,0 |
| 56 | -6,0 | -5,0 | -4,0 | +4,0 |

Noggrannhet fuktgivare

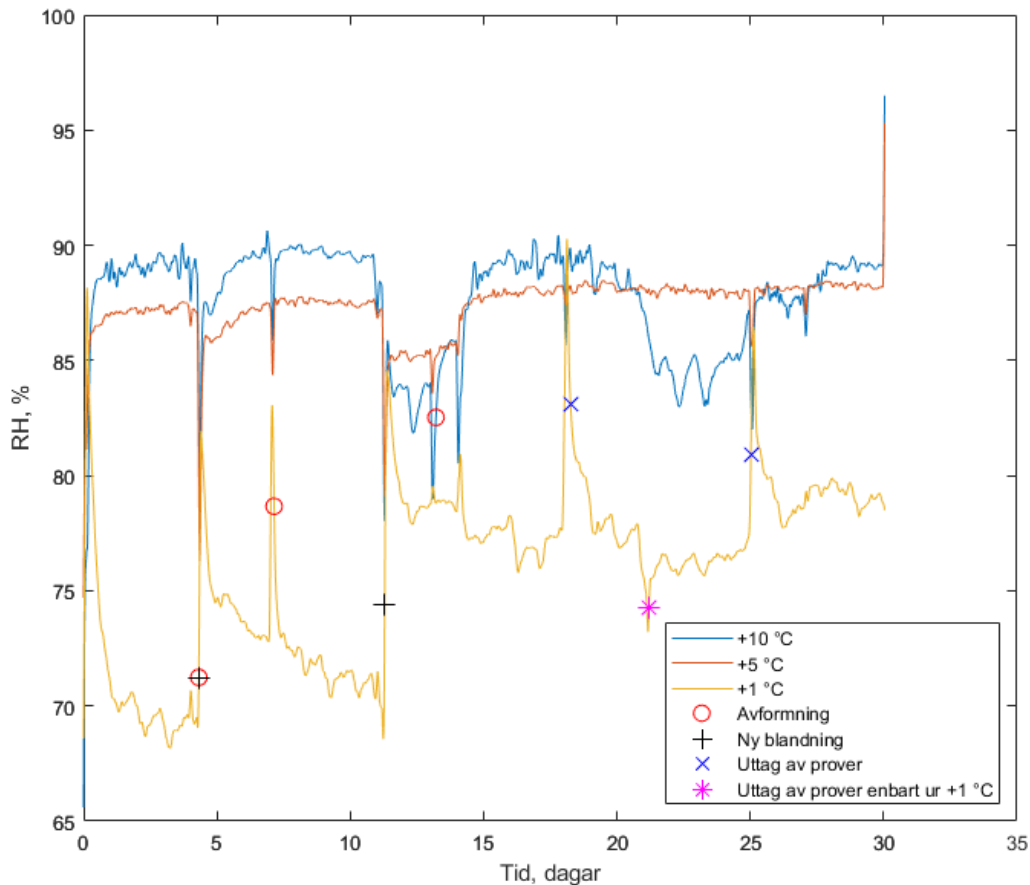
Fuktgivarnas utslag vid olika temperaturer redovisas i tabell 4.2. Noggrannheten för fuktgivarna är vid 0–40 °C $\pm 1,5\%$ vid RF under 90% och $\pm 2,5\%$ vid RF över 90%. Av att döma från resultatet bör fuktgivarna därför fungera inom deras noggrannhet vid respektive temperatur.

Tabell 4.2. Utslag från fuktgivare vid olika temperaturer för en mättad saltlösning av kaliumklorid (KCl).

| Temperatur (°C) | RF Saltlösning (%) | RF Givare 1 (%) | RF Givare 2 (%) | RF Givare 3 (%) | Medelvärde givare (%) |
|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------|
| +1 | 88,61 \pm 0,53 | 89,7 | 89,7 | 88,9 | 89,4 |
| +5 | 87,67 \pm 0,45 | 88,5 | 88,6 | 88,0 | 88,4 |
| +10 | 86,77 \pm 0,39 | 88,0 | 88,1 | 87,6 | 87,9 |
| +20 | 85,11 \pm 0,29 | 86,6 | 86,4 | 85,8 | 86,3 |

RF i klimatskåp

Den relativa fuktigheten i respektive klimatskåp redovisas i figur 4.13, där ett glidande medelvärde har utförts till följd av klimatskåpens cykliska reglering av temperatur. Observera de ungefärliga markörerna för en korrelation mellan graf och händelser. Det var betydligt torrare i klimatskåpet med +1 °C.



Figur 4.13. Relativ fuktighet i klimatskåp under en längre period. Observera markörerna för en tydligare koppling mellan händelser och markanta utslag.

RF likt branschstandard

Tre mätningar utfördes på en betong baserad på Bascement Slite med 0% slagg lagrad 30 dagar i +20 °C. Resultatet redovisas i tabell 4.3. Medelvärdet för de tre mätningarna blir 89,1%. Jämfört med figur 4.2, där ett medelvärde om 90,6% mättes vid 30 dagar för en likadan betong, överensstämmer resultaten relativt väl. Skillnaden mellan medelvärdena ligger inom intervallet för fuktgivarnas osäkerhet.

Tabell 4.3. Relativ fuktighet vid 30 dagar för Bascement Slite med 0% slagg i +20 °C utförd enligt branschstandard

| Relativ fuktighet (%) | | |
|-----------------------|----------|----------|
| Givare 1 | Givare 2 | Givare 3 |
| 88,5 | 89,0 | 89,9 |

5 Diskussion

5.1 Metodval och osäkerheter

Vid planeringen av studien var det primära syftet att undersöka temperaturens påverkan på självuttorkning i klimatförbättrad betong. Dessa betongtyper innehåller vanligen tillsatsmaterial med en lägre reaktivitet jämfört med Portlandcement, vilket kan bli problematiskt vid lägre temperaturer. För att komplettera eventuella resultat där betongen inte hade kunnat komma igång ordentligt vid lägre temperaturer, mättes även tryckhållfasthet.

Ett i branschen vanligt sätt att mäta RF är att använda sig av borrhållsmätningar som bedöms som pålitliga. Studier med sådana mätningar vid olika temperaturer kräver dock stort utrymme och blir svåra att genomföra om man inte har klimatrums med de olika temperaturer som krävs. Vidare hade inte mätning av tryckhållfasthet kunnat göras på samma provkroppar, vilket hade resulterat i fler provkroppar som tar ytterligare utrymme. Resultatet av detta blev att kuber om sidorna 10 cm göts och användes för både mätning av tryckhållfasthet och relativ fuktighet genom att krossat material från hållfasthetsmätningarna placerades i provrör för RF-mätning. Hur dessa två metoder, borrhållsmätning och mätning på krossat material i provrör från kuber, ställer sig mot varandra är dock en viktig aspekt att beakta. Det är fler steg involverade för metoden med kuber, vilket ökar risken för osäkerhet i resultaten. Dock innebär det inte automatiskt att metoden är av lägre kvalitet. Detta eftersom osäkerheterna blir beroende av kvalitén på utförandet, vilket kan göra dem nästintill försumbara. Vid den testmätning som gjordes på tre prov gav borrhållsmetoden 89,1% RF och metoden med mätning på krossat material i provrör 90,6% RF i medelvärde. Skillnaden på 1,5% RF är inom givarnas osäkerhet, och provrörsmetoden gav ett högre resultat, vilket indikerar att de mängder som förloras när materialet krossas är försumbara.

I denna studie var det ett betydligt lägre RF i klimatskåpet för +1 °C, se figur 4.13. Utöver en lägre RF skiljde sig även klimatskåpet mot de andra klimatskåpen, se figur 3.6 och 3.7, där en fläkt var på konstant i klimatskåpet för +1 °C. Detta i sig kan ha ökat risken för luft pressats in under byggfolien. Fram tills 3 dagar, då avformning skedde, hade en provkropp i +1 °C förlorat 6,0 g i vikt, jämfört med 5,0 g i +5 °C, 4,0 g i +10 °C och 2,0 g i +20 °C enligt tabell 4.1. Trots en högre viktförlust vid +1 °C bedömer jag att detta inte har påverkat resultaten, då en stor del av den viktförlusten kan ha varit material som fastnat på den täckande byggfolien då proverna låg i sina respektive formar.

I tabell 4.1 syns det även tydligt att de täta plastpåsarna förhindrade en vidare viktförlust efter avformning, medan provkroppen i +20 °C till och med sakta ökade i vikt av okänd anledning. Vissa mindre skillnader i medeltemperatur i klimatskåpen under projektets gång (figur 4.10-11) bör inte ha påverkat resultatet.

Figur 4.10-12 visar även skillnad i temperatur för de olika betongtyperna, där exempelvis Bascement Slite med 30% slagg i figur 4.10 c) visar på en högre temperaturökning jämfört med varianten med accelerator i figur 4.10 d). Detta motstrider inte bara teorin för att varianten med acceleratoren ska ha en högre värmeutveckling, utan även figur 4.9, där varianten med accelerator faktiskt har en högre värmeutveckling. Mätningarna av betongtemperaturer i 4.10-12 är därför osäkra, troligen till följd av att termoelementen var placerade på något olika djup i kuberna. Dessutom är de mätta temperaturökningarna låga och detta sätt att kvantifiera reaktionshastigheten är inte alls lika bra som till exempel isoterm kalorimetri.

En möjlig osäkerhet i mätningarna är att de olika proverna kan ha hanterats lite olika länge i rumstemperatur vid hållfasthetsmätningarna och krossningen inför RF-mätningarna. Troligtvis är dock dessa skillnader små eftersom alla mätningar gjordes på samma sätt.

För mätningen av RF – både i provrör och i borrhål – finns det en risk för läckage. Vilken metod som är mest benägen till läckage är dock oklart, då en stor del ligger i utförandet. Dock visar resultaten i figur 4.2 och tabell 4.3 en sammanstämmighet. Skillnaden på 1,5 % i RF vid 30 dagar mellan provrörs- och borrhålmätning är inom intervallet för givarnas noggrannhet. Vidare testades även givarna i olika temperaturer med en mättad lösning av KCl och visade då en god sammanstämmighet med litteraturvärden för KCl. En osäkerhet som bara gäller metoden med provrör är att de krossade bitar som placeras i provrören kan torka ut om inte laddningen av provrören sker snabbt.

Det finns en del felkällor i RF-mätningarna, men med tanke på att replikaten i de flesta fall visade god överensstämmelse och den begränsade jämförelse med borrhålmotoden visade en god överensstämmelse, bör de redovisade resultaten vara sanna inom de standardavvikelser som är redovisade (eller dubbla standardavvikelser om man vill ha en högre säkerhet i resultaten).

5.2 Temperaturens påverkan på självuttorkning

För att bedöma resultatet så krävs det att flera aspekter tas i beaktning. Exempelvis, som tidigare nämnt i kapitel 2.2, så visar tidigare studier på att vid en lägre härdningstemperatur binds mer vatten kemiskt i reaktionsprodukten C-S-H och mikrostrukturen blir finare, vilket ger en ökad fysikalisk bindning av vatten [3]. Det förklarar även varför en lägre hållfasthet uppnås vid högre temperaturer, då porsystemet blir grövre. Med andra ord bör en högre självuttorkning uppnås vid samma hydratationsgrad vid lägre temperatur. Dock bör det ha i åtanke att temperaturen även påverkar hydratationsutvecklingen, så att en viss hydratationsgrad uppnås vid olika ålder vid olika temperaturer. Detta i sin tur påverkar mängden kemiskt bundet vatten vid en given ålder. Påverkan blir störst vid ett tidigt skede, då det finns mycket vatten tillgängligt för vidare reaktioner, och minskar med tiden, då betongen blir allt tätare och tillgängligheten av vatten minskar. I detta arbete, där mätningarna utfördes senast vid 58 dagar, blir en urskiljning mellan dessa två fenomen svår att göra. Detta eftersom åldern inte bara är relativt låg för betongerna, utan för att de även innehåller tillsatsmaterial som har ett annat temperaturberoende jämfört med det rena Portlandcement som använts i de flesta tidigare studier.

Temperaturberoendet är tydligt i figur 4.6–8, där tryckhållfastheten för varianterna av Basement Slite med 30% slagg ökar med en ökad temperatur, medan varianten med 0% slagg har en lägre hållfasthetsutveckling vid en ökad temperatur efter 3 dagar. Varianten med 0% slagg, som är mest lik ren Portlandcement, sammanstämmer med resultat i tidigare studier [3]. Varför varianterna med slagg inte följer samma mönster beror antagligen på en hydratationsgrad, vilket är tydligt i figur 4.9. Vidare visar figur 4.7–9 på att acceleratoren har gett en effekt i något ökad tryckhållfasthet och värmeutveckling, vilket är förväntat. Pålitligheten bedöms vara hög för resultaten, då standardavvikelsen är låg.

För BCSEA-cementet som har ett helt annorlunda reaktionsmönster jämfört med Portlandcement går inte samma jämförelse i temperaturberoende att göra enligt de tidigare studierna. Detta för att C-S-H inte är den primära reaktionsprodukten som bildas. Dock är det tydligt i figur 4.5, att ett även för detta cement existerar det ett temperaturberoende, och ett starkt sådant. Skillnaden i hållfasthet är tydligast vid 3 dagar, där en temperatur över +10 °C verkar ge störst utveckling. En temperatur över +10 °C efter det ger en minimal förändring i hållfasthet. Vid 7 dagar är skillnaden i hållfasthet låg för alla temperaturer och vid 28 dagar har hållfastheten för +1 °C ökat markant jämfört med de övriga temperaturerna. Varför inte härdningstemperaturen +5 °C, som också till en början har en låg hållfasthet, följer samma mönster är oklart. Notera dock standardavvikelsen, där den är relativt stor för +1 °C och överlappande med +10 °C vid 28 dagar. Trots överlappandet bedöms resultatet som pålitligt, då det finns ett avstickande värde på 61,2 MPa, se tabell C1 i bilaga C, som orsakar den stora standardavvikelsen.

Eftersom det finns en sammanstämmighet i tryckhållfastheterna mellan de tidigare studierna och denna studie med Basement Slite med 0% slagg kan argumentet för en förändrad mikrostruktur vid olika temperaturer göras. Detta är synligt i figur 4.2 där temperaturer under +10 °C ger en högre självuttorkning vid 58 dagar, på cirka 3% RF, jämfört med +20 °C. Jämförs även deras hållfasthetsutveckling är det tydligt att den planar ut efter 7 dagar för +20 °C medan det finns en viss utveckling för övriga temperaturer. Med en låg standardavvikelse mellan de exakta värdena i mätningarna och en noggrannhet på $\pm 1,5\%$ RF för givarna under 90% RF i studerad temperatur, kan skillnaden bedömas som ett säkert resultat.

För varianterna med slagg går inte samma resonemang för tryckhållfasthet och en förändrad mikrostruktur att göra. Detta är synligt i figur 4.3–4, där lägst självuttorkning erhöles vid +1 °C. Däremot är det känt sedan tidigare att slagg ger en finare mikrostruktur jämfört med Portlandcement [25]. I ett tekniskt PM från Skanska Industrial Solutions nämns det även att deras klimatförbättrade betong erhåller bättre självuttorkningsegenskaper jämfört med en traditionell betong enligt tidigare resultat från olika provningar [26]. Med hänsyn till standardavvikelserna enligt figur 4.3–4 samt det korta tidsspannet för de utförda mätningarna finns det en viss osäkerhet om en sådan jämförelse skulle göras från resultatet i denna studie. Sett utifrån de individuella mätvärdena i bilaga B tillsammans med resultatet från Skanska kan en viss sammanstämmighet dras för varianten med accelerator vid 58 dagar i +20 °C. Dock betyder inte detta att acceleratoren i sig bidrar till ett positivt resultat i längden, då standardavvikelserna överlappar. Överlag bedöms resultatet som pålitligt trots större standardavvikelser, då det finns en tydlig skillnad mellan +1 °C och +20 °C.

Figur 4.1 visar på en mycket god självuttorkning vid låg härdningstemperatur, +1 °C, för BCSA-cementet. Möjligtvis kan det finnas ett temperaturliknande beroende som för Portlandcement, dock mycket starkare, då figur 4.9 visar på en mycket hög värmeutveckling för BCSA-cement jämfört med resterande cement. Om detta stämmer dock kräver vidare studier. Resultatet bedöms som pålitligt, med hänsyn till den låga standardavvikelsen.

För att bedöma temperaturens inverkan på självuttorkning i betong i helhet så verkar det finnas ett samband mellan reaktionshastighet och temperatur, där cement med hög reaktionshastighet får en bättre självuttorkning vid lägre temperaturer. Förklaringen till detta kan vara hur mikrostrukturen utvecklas, där en lägre temperatur sänker reaktionshastigheten och låter en fin mikrostruktur bildas. Stöd för påståendet kan dras ur resultatet för slaggvarianten som hade en låg reaktionshastighet där en åtminstone likvärdig, om inte bättre, självuttorkning erhöles, trots en temperatur på +20 °C. Huruvida skillnaderna av detta fenomen blir i tidiga skeden är oklart, avseende till olika hydratationsgrad. Däremot för senare skeden där RF på ungefär 2–3% under kravet på 85% blir intressant, kan det finnas en märkbar skillnad beroende på hur mikrostrukturen utvecklats tills dess.

5.3 Användning för betongbranschen

Som resultaten visar så finns det ett samband mellan lägre härdningstemperatur och högre självuttorkning för cement som liknar rena Portlandcement. Sambandet tros vara kopplat till reaktionshastighet, där en långsammare reaktionshastighet verkar fördelaktigt för att nå de RF som är intressanta ur ett produktionsperspektiv. Slagg som börjar bli allt mer vanligt i betongbranschen i Sverige, erhåller denna egenskap naturligt. Den verkar även lämpa sig bättre sett ur ett helhetsperspektiv, då den presterar bättre i ett bredare temperaturintervall. Ur ett klimat- och produktionsperspektiv är därför cement med slagg att föredra.

I dagens läge, där slagg räknas som en restprodukt, blir beräkningen av koldioxidutsläpp fördelaktigt för slagg, gentemot en potentiell minskning av halt Portlandcement. Detta är en av orsakerna till att allt fler aktörer börjar använda sig av slagg. Dock kan det hända att slagg börjar räknas som en primär produkt ur ett produktionsperspektiv, vilket innebär att potentiella vinster med koldioxidutsläpp minskar.

Sannolikheten för att slagg skall behöva bära kostnaderna av sina koldioxidutsläpp ökar med ett ökat användande av slagg. Enligt grundläggande ekonomisk teori sker även en prisökning då efterfrågan är större än tillgång, vilket är en risk betongbranschen står inför idag, då allt fler är i behov av klimatförbättrade produkter. Hur klimatvänligt slagg därför är blir en tvådelad fråga, beroende av om den faktiskt är en restprodukt då det primära syftet är att tillverka slagget. Vidare riskerar betongbranschen även utveckla ett beroende av slagg i framtiden. Likt betongbranschen står även andra branscher inför ökade krav på koldioxidutsläpp, som exempelvis stålindustrin. I takt med mål om att ersätta koltillverkat stål, där det slagg som används idag härstammar ifrån, med en fossilfri ståltillverkning, ökar behovet av nya alternativ.

BCSA-cement lämpar sig väl för vidare forskning och utveckling. Resultaten visar på en förmåga till självuttorkning, trots ett vct på 0,42. Vidare erhåller den nästan samma tryckhållfasthet som de andra cementen, med goda marginaler för de områden självtorkande betong används för.

6 Slutsats

För cement som liknar rent Portlandcement uppnåddes en högre självuttorkning vid lägre härdningstemperaturer. Vid en inblandning av slagg erhöles inte samma temperaturberoende. Dock uppnåddes en likvärdig, om inte bättre, självuttorkning, i ett bredare temperaturintervall. Vidare kunde en hög självupptorkning nås för BCSA-cement vid +1 C°, utan något påvisat samband vid högre temperaturer.

Orsaken till temperaturberoendet för de reaktiva cementen och resultatet för varianten med slagg tros ligga i en korrelation till reaktionshastighet, där ett långsammare reaktionsförlopp verkar bidra till en mikrostruktur som ger god självuttorkning. Resultatet för mätning av relativ fuktighet bedöms som pålitlig inom de mätosäkerheter som finns och metoden klassas som jämlig med mätning enligt branschstandard.

7 Förslag till vidare studier

För att fortsätta denna studie och ämnet kring självuttorkning så kan studier på temperaturens påverkan på mikrostruktur göras i olika cement. Exempelvis kan olika mängder av tillsatt slagg jämföras mot Portlandcement för att avgöra skillnaden i mikrostruktur. Vidare kan separata studier utföras på BCSA-cement för att bedöma dess potential som ersättare till cement.

Utveckling av en förfinad metod lik den använd i studien kan också utföras, med lösningar på de mätosäkerheter som diskuterades. Exempelvis kan små lock i form av massiva metallplattor användas för att täcka formarna, vilket minimerar risken för läckage samtidigt som en jämn temperaturfördelning säkerställs. Vidare kan även metoden för hur proven krossades utvecklas, i form av en systematisk rutin för en så snabb process som möjligt. Ytterligare jämförelser av RF vid användning av provrör eller större behållare vore även intressant, för att utesluta risken för en stor påverkan av uttorkning på provet då det krossas i kombination med en för liten provmängd mot vad fuktgivarnas fuktkapacitet är.

8 Referenser

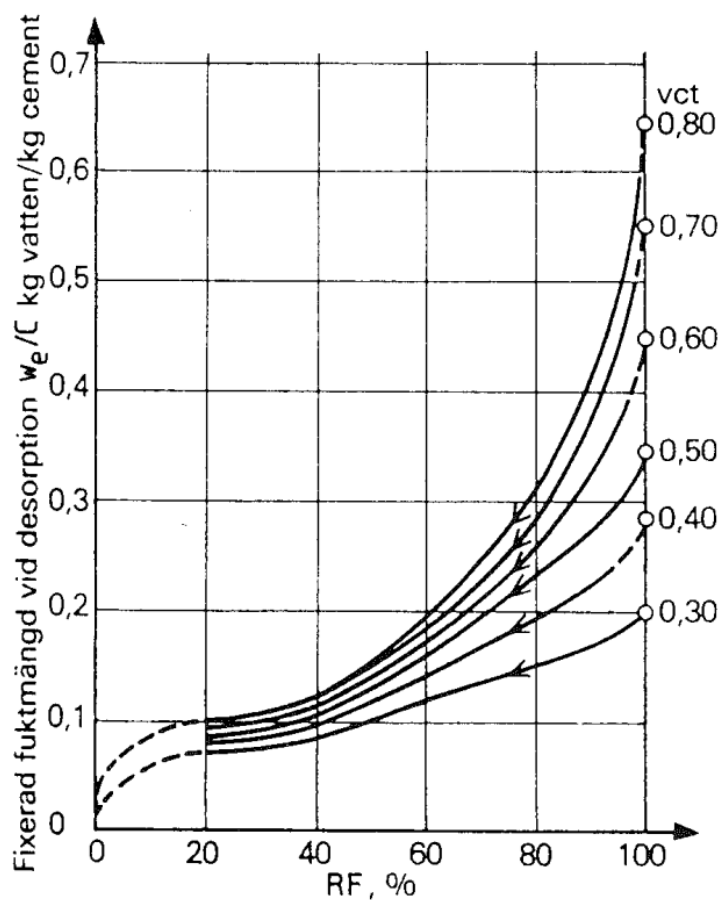
- [1] Scrivener KL. Options for the future of cement. *The Indian Concrete Journal* 2014;88:11–21.
- [2] Svensk Betong. Betong och klimat. En rapport om arbetet för klimatneutral betong. 2017.
- [3] Gallucci E, Zhang X, Scrivener KL. Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H). *Cement and Concrete Research* 2013;53:185–95. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2013.06.008>.
- [4] Bescher E. Belitic calcium sulfoaluminate cement: Hydration chemistry, performance, and use in the United States Belitic calcium sulfoaluminate cement View project, n.d.
- [5] Glasser FP, Zhang L. High-performance cement matrices based on calcium sulfoaluminate–belite compositions. *Cement and Concrete Research* 2001;31:1881–6. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00649-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00649-4).
- [6] Ukrainczyk N, Frankovic Mihelj N. Calcium Sulfoaluminate Eco-Cement from Industrial Waste. *Chem Biochem Eng O* 2013;11:83–93.
- [7] Iacobescu RI, Koumpouri D, Pontikes Y, Angelopoulos GN. Hydraulic and Leaching Behaviour of Belite Cements Produced with Electric Arc Furnace Steel Slag as Raw Material. vol. 57. 2013.
- [8] Iacobescu RI, Koumpouri D, Pontikes Y, Saban R, Angelopoulos GN. Valorisation of electric arc furnace steel slag as raw material for low energy belite cements. *Journal of Hazardous Materials* 2011;196:287–94. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.09.024>.
- [9] Kurdowski W. *Cement and Concrete Chemistry*. Dordrecht: Springer Netherlands; 2014. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>.
- [10] Fagerlund G. Struktur och strukturutveckling. *Betonghandbok. Material Del I Delmaterial samt färsk och hårdnande betong. Tredje, reviderade, Solna: Svensk byggtjänst; 2017, p. 418–21.*
- [11] Locher FW. *Cement: principles of production and use*. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik; 2006.
- [12] Löfgren I. Tillsatsmaterial. *Betonghandbok. Del 1 Delmaterial samt färsk och hårdnande betong. Tredje, reviderade, Solna: Svensk byggtjänst; 2017, p. 139–82.*
- [13] Johansson N, Löfgren I. Tillsatsmedel. *Betonghandbok. Del 1 Delmaterial samt färsk och hårdnande betong. Tredje, reviderade, Solna: Svensk byggtjänst; 2017, p. 97–8.*
- [14] Johansson S-E. Cement. *Betonghandbok. Del 1 Delmaterial samt färsk och hårdnande betong. Tredje, reviderade, Solna: Svensk byggtjänst; 2017, p. 31–68.*
- [15] Pizon J, Lazniewska-Piekarczyk B. Microstructure of High C3A Portland Slag Cement Pastes, Modified with Accelerating Admixtures for Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 603, Institute of Physics Publishing; 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/3/032089>.

- [16] Pizoń J, Łaźniewska-Piekarczyk B. Comparison of Efficiency of Accelerating Admixtures for Concrete Using Multiple-Criteria Decision Analysis (MCDA). *Materials* 2019;471. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/3/032043>.
- [17] Pizoń J, Łaźniewska-Piekarczyk B. Microstructure of CEM II/B-S Pastes Modified with Set Accelerating Admixtures. *Materials* 2021;14. <https://doi.org/10.3390/ma14216300>.
- [18] Pizoń J, Miera P, Łaźniewska-Piekarczyk B. Influence of Hardening Accelerating Admixtures on Properties of Cement with Ground Granulated Blast Furnace Slag. *Procedia Engineering* 2016;161:1070–5. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.08.850>.
- [19] Juenger MCG, Winnefeld F, Provis JL, Ideker JH. Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research* 2011;41:1232–43. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>.
- [20] Chen IA, Hargis CW, Juenger MCG. Understanding expansion in calcium sulfoaluminate–belite cements. *Cement and Concrete Research* 2012;42:51–60. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2011.07.010>.
- [21] Álvarez-Pinazo G, Cuesta A, García-Maté M, Santacruz I, Losilla ER, Sanfélix SG, et al. In-situ early-age hydration study of sulfobelite cements by synchrotron powder diffraction. *Cement and Concrete Research* 2014;56:12–9. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2013.10.009>.
- [22] Fagerlund G. Snabb- och självtorkande betong. Så här fungerar de. *Byggforskning* 1996.
- [23] Emborg M, Carlsson CA, Jonasson J-E. Tidig egenskapstillväxt och hårdnande betong. *Betonghandbok. Del 1 Delmaterial samt färsk och hårdnande betong*, 2017, p. 348–54.
- [24] De Weerd K, Ben Haha M, Le Saout G, O Kjellsen K, Justnes H, Lothenbach B. The effect of temperature on the hydration of composite cements containing limestone powder and fly ash. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 2012;45:1101–14. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9819-5>.
- [25] Chen W. Hydration of slag cement. Theory, modelling and application. University of Twente, 2006.
- [26] Hedman J. Jämförelse uttorkning: Skanskas gröna uttorkningsbetong vs. konventionell uttorkningsbetong utan slagg. 2022.
- [27] Nilsson L-O. Hygroscopic moisture in concrete - drying, measurements & related material properties. Lund: 1980. Lunds Tekniska Högskola, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Rapport TVBM-1003.
- [28] SS-EN 12309-3:2019 Provning av hårdnad betong - Del 3: Tryckhållfasthet hos provkroppar 2019.

Bilaga A – Betongrecept och desorptionsisoterm

| Delmaterial (kg) | Betong | | | | |
|--------------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| | Grundrecept | BCSA | Bascement Slite | | |
| | | | 0% slagg | 30% slagg | 30% slagg accelerator |
| Cement | 10,20 | 8,57 | 10,20 | 7,14 | 7,14 |
| Slagg | - | - | - | 3,06 | 3,06 |
| Vatten | 3,66 | 3,19 | 3,08 | 3,23 | 2,85 |
| Ballast (krossad) | | | | | |
| 0–2 mm | 13,52 | 15,58 ^a | 14,06 ^b | 13,91 ^a | 14,06 ^b |
| 4–8 mm | 6,76 | 6,76 | 6,76 | 6,76 | 6,76 |
| 8–11 mm | 13,52 | 13,52 | 13,52 | 13,52 | 13,52 |
| Flyttillsats | - | 0,026 ^c | 0,074 ^d | 0,085 ^d | 0,083 ^d |
| Accelerator | - | - | - | - | 0,306 ^e |

a: 2,5% fukthalt
 b: 4,0% fukthalt
 c: Sika Evo 26
 d: Dynamon SX-A 170
 e: Mapefast Ultra N



Figur 1A. Desorptionsisoterm för rent Portlandcement [27].

Bilaga B – Relativ fuktighet

Observera de gula markeringarna. Värdena räknas som avstickande och exkluderas i resultatet. För +1 °C vid 35 dagar exkluderas alla tre värden till följd av en för stor spridning.

Tabell B1. Relativ fuktighet för alla testade provkroppar av BCSA.

| BCSA, relativ fuktighet (%) | | | | | | | | | |
|-----------------------------|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|
| Temperatur (°C) | 10 dagar | | | 35 dagar | | | 49 dagar | | |
| +1 | 94,7 | 94,0 | 89,2 | 89,5 | 86,7 | 82,4 | 80,1 | 83,1 | 84,1 |
| +5 | 89,4 | 91,8 | 91,3 | 93,1 | 91,2 | 91,1 | 90,0 | 89,8 | |
| +10 | 91,7 | 91,0 | 90,8 | 90,2 | 89,7 | 90,8 | 90,3 | 91,9 | |
| +20 | 91,7 | 91,6 | 91,0 | 91,9 | 92,8 | 91,6 | 93,1 | 92,7 | |

Tabell B2. Relativ fuktighet för alla testade provkroppar av Bascement Slite – 0% slagg.

| Bascement Slite - 0% slagg, relativ fuktighet (%) | | | | | | | |
|---|----------|------|------|----------|------|------|--|
| Temperatur (°C) | 30 dagar | | | 58 dagar | | | |
| +1 | 89,6 | 88,8 | 90,6 | 87,0 | 87,2 | 88,2 | |
| +5 | 88,3 | 88,8 | 88,2 | 87,5 | 87,5 | 87,8 | |
| +10 | 88,1 | 88,8 | 88,1 | 87,0 | 86,9 | 87,4 | |
| +20 | 90,5 | 90,5 | 90,8 | 90,5 | 90,4 | 90,9 | |

Tabell B3. Relativ fuktighet för alla testade provkroppar av Bascement Slite – 30% slagg.

| Bascement Slite - 30% slagg, relativ fuktighet (%) | | | | | | |
|--|----------|------|------|----------|------|------|
| Temperatur (°C) | 30 dagar | | | 58 dagar | | |
| +1 | 94,9 | 90,8 | 94,1 | 88,9 | 89,8 | 90,9 |
| +5 | 92,5 | 90,6 | 92,0 | 87,5 | 86,7 | 87,5 |
| +10 | 91,3 | 92,7 | 88,3 | 87,5 | 85,1 | 86,4 |
| +20 | 90,2 | 91,4 | 90,1 | 87,6 | 87,5 | 88,4 |

Tabell B4. Relativ fuktighet för alla testade provkroppar av Bascement Slite – 30% slagg + accelerator.

| Bascement Slite - 30% slagg + accelerator, relativ fuktighet (%) | | | | | | |
|--|----------|------|------|----------|------|------|
| Temperatur (°C) | 30 dagar | | | 58 dagar | | |
| +1 | 93,7 | 91,7 | 92,6 | 89,7 | 89,7 | 90,2 |
| +5 | 91,6 | 91,8 | 92,3 | 88,2 | 88,3 | 87,2 |
| +10 | 89,2 | 88,7 | 88,8 | 85,0 | 85,1 | 86,7 |
| +20 | 88,0 | 88,6 | 88,8 | 85,4 | 86,2 | 85,8 |

Bilaga C – Tryckhållfasthet

Tabell C1. Tryckhållfasthet för alla testade provkroppar av BCSA.

| BCSA (MPa) | | | | | | | | | | |
|-----------------|---------|------|------|---------|------|------|----------|------|------|------|
| Temperatur (°C) | 3 dagar | | | 7 dagar | | | 28 dagar | | | |
| +1 | 9,8* | 6,2* | 9,6* | 48,2 | 44,1 | 49,2 | 69,5 | 71,5 | 61,2 | |
| +5 | 25,0 | 26,1 | 28,3 | 28,7 | 50,7 | 48,4 | 50,2 | 59,5 | 56,6 | 56,8 |
| +10 | 48,5 | 50,8 | 45,3 | 48,6 | 56,4 | 51,5 | 53,1 | 62,3 | 62,2 | 61,8 |
| +20 | 48,9 | 48,2 | 48,1 | 49,1 | 54,9 | 51,3 | 51,1 | 58,5 | 57,4 | 55,6 |

* Nya värden efter omgjutning. Värden innan omgjutning: 2,4, 5,0, 12,1, 12,6.

Tabell C2. Tryckhållfasthet för alla testade provkroppar av Bascement Slite – 0% slagg.

| Bascement Slite - 0% slagg (MPa) | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------|------|------|---------|------|------|----------|------|------|
| Temperatur (°C) | 3 dagar | | | 7 dagar | | | 28 dagar | | |
| +1 | 31,1 | 29,5 | 30,1 | 59,6 | 57,5 | 58,9 | 73,8 | 71,6 | 73,6 |
| +5 | 43,0 | 42,9 | 42,7 | 65,0 | 66,2 | 66,6 | 75,3 | 76,7 | 74,9 |
| +10 | 50,7 | 49,0 | 51,6 | 67,6 | 67,3 | 67,5 | 76,8 | 73,1 | 73,4 |
| +20 | 55,7 | 56,0 | 57,7 | 64,6 | 68,3 | 65,9 | 69,6 | 70,1 | 69,4 |

Tabell C3. Tryckhållfasthet för alla testade provkroppar av Bascement Slite – 30% slagg.

| Bascement Slite - 30% slagg (MPa) | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------|------|------|---------|------|------|----------|------|------|
| Temperatur (°C) | 3 dagar | | | 7 dagar | | | 28 dagar | | |
| +1 | 25,3 | 25,0 | 25,3 | 40,0 | 41,7 | 40,8 | 63,1 | 65,2 | 62,2 |
| +5 | 33,5 | 32,3 | 31,3 | 47,3 | 47,0 | 46,4 | 70,0 | 67,9 | 67,8 |
| +10 | 41,7 | 41,1 | 40,4 | 52,6 | 54,5 | 54,0 | 72,0 | 71,2 | 71,6 |
| +20 | 48,8 | 48,4 | 48,1 | 55,3 | 57,8 | 60,7 | 71,1 | 74,7 | 70,6 |

Tabell C4. Tryckhållfasthet för alla testade provkroppar av Bascement Slite – 30% slagg + accelerator.

| Bascement Slite - 30% slagg + accelerator (MPa) | | | | | | | | | |
|---|---------|------|------|---------|------|------|----------|------|------|
| Temperatur (°C) | 3 dagar | | | 7 dagar | | | 28 dagar | | |
| +1 | 23,8 | 24,0 | 23,5 | 42,0 | 41,8 | 40,6 | 65,3 | 68,9 | 67,1 |
| +5 | 34,3 | 34,6 | 33,9 | 51,2 | 51,7 | 50,9 | 75,2 | 76,5 | 71,9 |
| +10 | 39,9 | 42,7 | 41,8 | 56,6 | 57,6 | 54,8 | 72,3 | 78,5 | 79,1 |
| +20 | 50,2 | 50,1 | 50,7 | 60,1 | 59,8 | 59,4 | 79,3 | 77,3 | 77,7 |