

Metoder för sprickriskbedömning och - begränsning hos hårdnande betong

En omvärldsanalys och parameterstudie

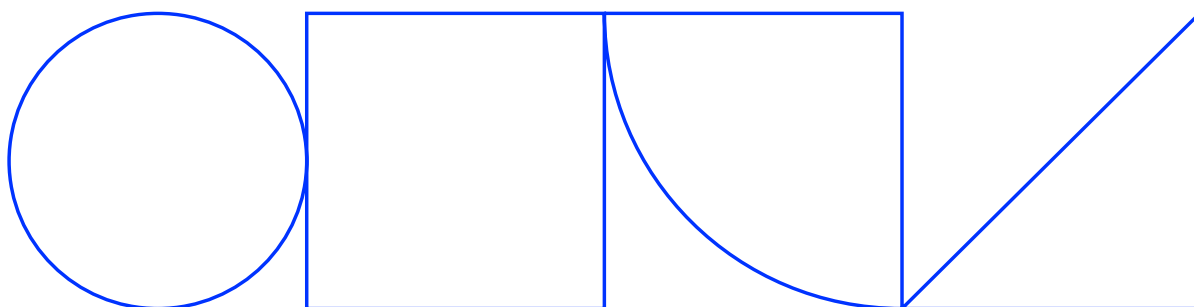
Jonas Magnusson, Alexandre Mathern, Iad Saleh – NCC

Ingemar Löfgren, Carlos G. Berrocal – Thomas Concrete Group

Jan Suchorzewski – RISE

Rasmus Rempling – Chalmers tekniska högskola

2024-04-26



Förord

Denna studie har utförts under tiden november 2022 till december 2023. Studien har finansierats av SBUF och egeninsatser av medverkande företag. Följande personer har medverkat i arbetsgruppen:

Arbetsgrupp

Jonas Magnusson, NCC Sverige AB, Projektledare / Betongspecialist
Alexandre Mathern, NCC Sverige AB, Betongspecialist
Iad Saleh, NCC Sverige AB, Betongspecialist
Carlos Gil, Thomas Concrete Group AB, Betongspecialist
Ingemar Löfgren, Thomas Concrete Group AB, Betongspecialist
Jan Suchorzewski, RISE, Betongspecialist
Rasmus Rempling, Chalmers, Genomförande av workshop

Arbetsgruppen har i sitt arbete haft stöd av både en referensgrupp och en nordisk expertgrupp som deltog i workshop. Arbetsgruppen vill tacka projektets referensgrupp för värdefull input och goda diskussioner inom projektet.

Referensgrupp / Expertgrupp

Lars	Wadsö	LTH	Sverige
Ola	Dahlblom	LTH	Sverige
Martin	Laninge	PEAB	Sverige
David	Dackman	WSP	Sverige
Kristian	Tammo	Swerock	Sverige
Claus	Vestergaard	DTI	Danmark
Andrzej	Cwirzen	LTU	Sverige
Mats	Emborg	LTU	Sverige
Jan	Suchorzewski	RISE	Sverige
Urs	Muller	Schwenk	Sverige
Terje	Kanstad	NTNU	Norge
Anja-Birgitta	Estensen	NTNU	Norge
Antonia	Menga	NTNU	Norge
Øyvind	Bjøntegaard	Statens Vegvesen	Norge
Mats	Karlsson	Infratec	Sverige
Patrik	Groth	Skanska	Sverige
Hans	Hedlund	Skanska	Sverige
Andrzej	Cwirzen	LTU	Sverige
Ali	Fahrang	CONVIA	Sverige
Carsten	Vogt	BOSTEK	Sverige

Arbetsgruppen vill speciellt tacka finansiärerna som möjliggjort projektet, samt referensgruppen och expertgruppen.

Göteborg, 2024-04-26

Jonas Magnusson

Sammanfattning

Forskningsområdet betongkonstruktioner under härdning och risken för temperatursprickor har en lång tradition i Sverige, med rötter som sträcker sig tillbaka till 1940-talet. Sedan början av 1990-talet har ett antal projekt genomförts för att studera och minimera risken för sprickbildning i ung betong, en fråga som blivit alltmer relevant i takt med nya byggtekniker och material. Trots dessa insatser har forskningen fram till nyligen haft begränsningar, särskilt när det gäller integrering av internationell kunskap och utveckling av standardiserade metoder. Detta understryker vikten av en omfattande omvärldsanalys för att sammanföra och utvärdera befintlig kunskap, särskilt med tanke på de luckor som finns i den svenska metoden.

Bland slutsatserna från den aktuella studien framgår det att det finns ett omfattande internationellt kunskapsutbyte som Sverige kan dra nytta av, särskilt inom områden som sprickbildning och armeringens inverkan på betongens egenskaper. En betydande insikt är att det råder osäkerhet kring hur man ska karakterisera centrala parametrar som draghållfasthet och elasticitetsmodul, vilka är kritiska för att förstå och förutsäga sprickbildning i ung betong. Ytterligare utmaningar inkluderar bristen på standardiserade provningsmetoder och att det inte finns konsensus om de bästa metoderna för att bedöma dessa parametrar, särskilt vid tidig ålder.

Rapporten belyser även att resultat från Monte Carlo-simuleringar är starkt beroende av de valda statistiska fördelningarna för inputparametrar. Det finns en tydlig indikation på att de fördelningar som användes i tidigare studier kanske inte längre är representativa för moderna cement- och betongmaterial. Detta pekar på ett behov av uppdaterade och mer relevanta modeller. Ytterligare är en viktig slutsats att det fortfarande saknas väl dokumenterade, beskrivna och tillräckligt noggranna men samtidigt enkla provningsmetoder för att bedöma temperatursprickparametrar. Denna brist på tillförlitliga metoder påverkar introduktionstakten av nya bindemedel i Sverige.

Den här rapporten understryker vikten av fortsatt forskning och utveckling inom området, med en stark inriktning på internationellt samarbete och standardisering av metoder. En sådan inriktning skulle bidra till en mer enhetlig förståelse och hantering av problem relaterade till ung betong och temperatursprickor, vilket är centralt för framtiden inom hållbar och effektiv byggnation.

Summary

The research field of concrete structures during curing and the risk of temperature cracking has a long tradition in Sweden, with roots dating back to the 1940s. Since the early 1990s, a number of projects have been carried out to study and minimize the risk of early-age cracking in concrete, a question that has become increasingly relevant with new building techniques and materials. Despite these efforts, research until recently has had limitations, especially in terms of integrating international knowledge and developing standardized methods. This underscores the importance of a comprehensive global analysis to compile and evaluate existing knowledge, especially considering the gaps in the Swedish method.

Among the conclusions of the current study, it is clear that there is extensive international knowledge exchange from which Sweden can benefit, especially in areas such as crack formation and the impact of reinforcement on the properties of concrete. A significant insight is that there is uncertainty around how to characterize central parameters such as tensile strength and modulus of elasticity, which are critical for understanding and predicting crack formation in young concrete. Additional challenges include the lack of standardized testing methods and the absence of consensus on the best way for assessing these parameters, especially at an early age.

The report also highlights that the results from Monte Carlo simulations are highly dependent on the chosen statistical distributions for input parameters. There is a clear indication that the distributions used in earlier studies may no longer be representative of modern cement and concrete materials. This points to a need for updated and more relevant models. Another important conclusion is that there is still a lack of well-documented, described, and sufficiently accurate, yet simple, testing methods for assessing temperature crack parameters. This lack of reliable methods affects the pace of introducing new binders in Sweden.

This report emphasizes the importance of continued research and development in the field, with a strong focus on international collaboration and standardization of methods. Such an approach would contribute to a more unified understanding and management of problems related to young concrete and temperature cracks, which is central to the future of sustainable and efficient construction.

Innehåll

Förord.....	3
Sammanfattning	5
Summary	6
1 Inledning.....	9
1.1 Bakgrund	9
1.2 Problemställningen	11
1.3 Syfte och Mål.....	12
1.4 Avgränsningar	13
2 Bakgrund	14
2.1 Studien satt i ett större sammanhang	14
2.2 Kravställande ur ett svenskt perspektiv	16
3 Omvärldsanalys.....	19
3.1 Forskning på ung och hårdnande betong	19
3.2 Generellt om omvärldens utveckling inom området.....	19
3.3 Workshop	22
3.3.1 Metod.....	22
3.3.2 Resultat och diskussion	25
3.4 Studieresa – BATir ULB	28
3.5 Provningsmetoder och standarder.....	28
4 Parameterstudie	32
4.1 Beskrivning av modellen.....	33
4.1.1 Geometri och randvillkor	33
4.1.2 Ekvationer som beskriver betongens egenskaper	34
4.2 Materialparametrar	37
4.3 Validering av modellen (Jämförelse med Contest Pro).....	40
4.4 Valda parametrar till parameterstudie.....	42
4.5 Parameterstudie en faktor i taget (OFaT)	43
4.6 Monte Carlo simulering.....	47
4.6.1 Statistiska fördelningar av parametrar	47
4.6.2 Analys av resultat.....	50

5	Diskussioner och rekommendationer	58
5.1	Diskussion av resultat från Omvärldsanalysen	58
5.1.1	Provning och Materialegenskaper.....	58
5.1.2	Krav och Standarder	59
5.1.3	Kvalitetskontroll, Övervakning och Verifiering	60
5.2	Diskussion av resultat från Parameterstudie	61
5.3	Rekommendationer	64
6	Slutsatser	66
	Referenser.....	67

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Forskningsområdet betongkonstruktioner under härdning och risken för temperatursprickor startade i Sverige på 40-talet med att Bertil Löfquist disputerade på Chalmers 1946 [1] vars projekt initierades av Vattenfall [2]. På 60- och 70-talet genomfördes ett antal projekt vid "Svenska Forskningsinstitutet för Cement och Betong" (sedermera CBI betonginstitutet). Bland annat Buö [3], [4] studerade värmeutveckling och sprickbildning i betongväggar och T. C. Hansen undersökte betongens krympning och krypning [5], [6]. 1980 presenterade Byfors sin avhandling [7] om ung betong. På mitten av 1960-talet och 70-talet skedde en nystart när Stig Bernander började att analysera egenspanningar p.g.a. temperaturförlopp under härdning i samband med byggandet av Tingstadstunneln och detta resulterade senare i uppstarten av forskning vid Luleå tekniska universitet [8], [9].

Sedan början av 1990-talet har ett antal SBUF-projekt genomförts med fokus på hårdnande betongkonstruktioner och risken för temperatursprickor. Det har också utvecklats datorprogram och hjälpmedel/verktyg för bedömning av spännings- och sprickrisikanalys av betongkonstruktioner under härdning och krav har införts i "branschpraxis" AMA Anläggning, EBE.11, baserat på Trafikverkets kravställning från Bro 94. Nedan listas en del av de SBUF-projekt som genomförts samt nyligen beviljade SBUF-projekt:

- 1122 Temperatursprickor i betong (1992–1993)
- 11015 Avancerade metoder för planering och uppföljning av betongkonstruktioner (2001-2003)
- 10089 IPACS - Förbättrad betongteknik för avancerade betongkonstruktioner, del 2 (2000–2001)
- 11015 Avancerade metoder för planering och uppföljning av betongkonstruktioner (2001–2003)
- 11094 Handberäkningsmetoder för praktiskt bruk - Verktyg för bedömning av sprickrisk i ung betong (2002–2003)
- 11618 Tvång för sprickrisikanalys (2005-2015)
- 12524 Undvik vattenläckage i betongkonstruktioner genom temperatur- och härdningsstyrning (2011–2019)
- 12965 Undvikande av lastoberoende sprickor - vägledning och rekommendationer för ny praktisk metod mötande nyanserade krav (2014–2017)
- 13108 Kvalitetssäkrad utvärdering av materialdata - spänningsanalyser i PPB (2015–2018)
- 13630 Utveckling av metoder för sprickbegränsning av hårdnande betongen (2019-2023)

- 13872 Grönare anläggningsbetong – data för temperatur- och härdningsstyrning (2020–2023)
- 14016 Analys av spänningsberäkning i ConTeSt och framtagning av prototyp för PPB (2021–2022)
- 14096 STAR – Temperatursprickdata för klimatförbättrad betong (2022-2023)
- 14155 Mätning av töjningar i ung klimatförbättrad betong (2022-)
- 14133 Utveckling av beräkning av sprickrisker i Produktionsplanering Betong (2022-)
- 14170 Metoder för sprickriskbedömning och -begränsning hos hårdnande betong (2022-)

Utöver dessa projekt har flera forskningsprojekt genomförts vid högskolor och projekt har finansierats av bland annat Trafikverket och Elforsk/Vattenfall Utveckling [10], [11] och programvaran Hacon utvecklades vid LTH [12]. Nagys [10] studier av sprickbildning omfattade inte bara spänningar utan även sprickbildning.

Men någon systematisk genomgång av kunskapsläget (State-Of-The-Art) har inte genomförts de senaste 20 åren, den senaste genomfördes inom det SBUF och Brite/Eu-Ram-finansierade projektet IPACS [13]. En State-Of-The-Art rapport publicerades 2011 i Norge [14] och Norsk Betongförening publicerade 2021 en vägledning [15], [16]. I Danmark undersöktes temperatursprickor inom projektet "HETEK" i slutet av 90-talet och provningsmetoder och materialmodeller presenterades [17]. Inom RILEM har en omfattande State-Of-The-Art genomförts, men ingen från Sverige har varit delaktiga i de RILEM-kommittéer som nyligen har publicerat rekommendationer och vägledningar: RILEM TC 287-CCS "*Early-age and long-term crack width analysis in RC structures*" [18], RILEM TC 254-CMS "*Thermal cracking of massive concrete structures*" [19]. I den nyligen publicerade Betonghandbok Material, Del 2, tas egenspanningar och sprickor av temperaturrörelse och krympning upp [20]. En uppdatering med hänsyn till nordisk forskning har gjorts men det saknas en systematisk översyn av den internationella forskningen som har gjorts de senaste 20 åren, t.ex. inom RILEM eller vid utländska universitet.

Medan fokus i Sverige har varit på att undvika sprickbildning (låg spänningskvot) och forskningen har varit baserad på de metoder och modeller som utvecklades på 80- och 90-talet har man internationellt jobbat med att utveckla mätmetoder [21] och mätsystem [22]. Men fokus har även varit kring hur man hanterar de tidiga spänningarna och töjningarna vid dimensionering av armering m.h.t. sprickbreddskrav. Detta är något som har inarbetats i revideringen av Eurokod 2 [23]; se t.ex. Bödfeld [24], Schlicke [25], Turner [26] and Klausen [27].

Det finns således ett behov att genomföra en omvärldsanalys för att identifiera "State-Of-The-Art" gällande provningsmetoder och beräkningsmodeller samt hur de tidiga spänningarna ska hanteras m.a.p. dimensionering av sprickarmering. Problemställningen och "gap-analys" beskrivs nedan.

1.2 Problemställningen

I Sverige infördes 1994 krav från Vägverket i Bro 94 att åtgärder för att minska risken för temperatursprickor ska vidtas vid nybyggnation. Dessa krav finns numera i AMA Anläggning, men är till stor del desamma som de som fanns i Bro 94. Införandet av dessa krav har medfört ett mer systematiskt arbete för att minimera risken för tidig sprickbildning. Emellertid finns det en del brister i den "Svenska metoden" då metodiken inte har utvecklats särskilt mycket sedan den introducerades. I ett tidigare SBUF-projekt [28] gjordes ett försök att jämföra beräknade töjningar med uppmätta töjningar, för att på så sätt kunna utvärdera beräkningsmodellens prediktiva förmåga, men slutsatsen blev att det inte gick att jämföra töjningarna och det anges följande skäl: *"Detta beror på två icke-linjära egenskaper, dels att den "sanna" fritöjningen synes vara spänningsberoende, dels på att en direkt användning av mätta töjningar inte speglar betongens krypning"*. I ett examensarbete jämfördes den "Svenska sprickmodellen" [29] men i princip var det endast möjligt att jämföra om sprickbildning skedde eller inte och vidare konstaterades det att spricksäkerheten överskattades, men om det var p.g.a. beräkningsmodellen och materialparametrarna var felaktiga kunde man inte konstatera då enbart temperaturen jämfördes (vilken dock hade god överensstämmelse).

Nedan listas de luckor som har identifierats ("GAP-analys"):

Lucka 1

De provningsmetoder som används är inte standardiserade och metodiken är otillräckligt beskriven. Därmed blir utvärderingen av försöken mycket känslig då det är många parametrar som är "anpassningsfunktioner" vilket gör att kvalitetssäkringen är tveksam (SBUF-projekt 13108 "Kvalitetssäkrad utvärdering av materialdata"). Det betyder också att det finns få laboratorier som kan genomföra provningen. Idag tar det minst sex månader till ett år att få en provning genomförd. Jämför man med våra grannländer Norge och Danmark så skiljer sig också förfarandet åt – det finns således ett behov av en standardisering och harmonisering av provningsmetoder.

Lucka 2

För "moderna betongtyper" och klimatförbättrad betong har en del provningar genomförts och det finns materialparametrar för en del betonger (bl.a i SBUF-projekt 14096 och BBT-projekt 2018-033). Men provningsmetodiken är inte fullt utprovad för denna typ av betong. Det finns idag ett stort behov av materialdata för klimatförbättrad betong men laboratorieresurserna är mycket begränsade vilket orsakar en fördröjd implementering av klimatförbättrad betong i anläggningsprojekt (SBUF-projekt 14096 "STAR – Temperatursprickdata för klimatförbättrad betong").

Lucka 3

I temperatursprickberäkningar beaktas inte armeringen, som ger upphov till ett inre tvång (viktigt för betong med en hög baskrympning) men samtidigt har en sprickfördelningseffekt som gör att sprickbredden kan kontrolleras.

Lucka 4

De spänningar och töjningar som uppstår i det tidiga skedet beaktas inte vid dimensionering av armeringen m.a.p. sprickbredds krav. Detta är dock något som kommer att ingå (informativ bilaga) i Eurokod (EN 1992-1-1) som är under revidering och därför måste en framtida beräkningsmetodik hantera både tidiga och senare töjningar (orsakade av temperaturförändringar, krympning, belastning, etc.).

Lucka 5

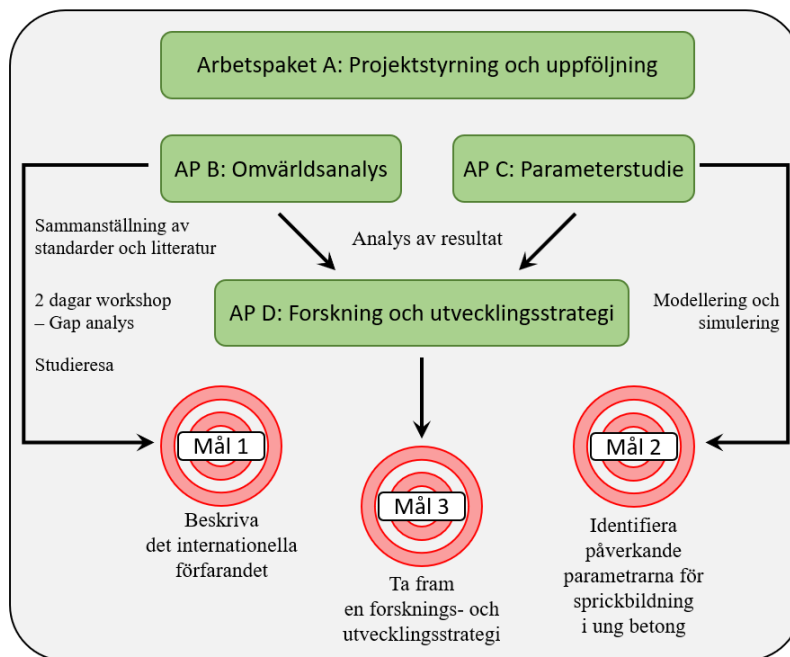
I det beräkningsprogram som idag uteslutande används (ConTeSt Pro) kan inte realistiska töjningar bestämmas. Detta gör att det är omöjligt att jämföra beräkningsmodellen med uppmätta töjningar (vilket bland annat är syftet med SBUF-projekt 14155 "Mätning av töjningar i ung klimatförbättrad betong") och för att kunna utveckla metodiken så är det av största vikt att kunna jämföra beräknade och uppmätta töjningar.

1.3 Syfte och Mål

Huvudsyftet med projektet var att, genom en omvärldsanalys av metoder och verktyg som används för att bestämma karaktären av betong under härdning, belysa det svenska behovet för forskning och utveckling av metoder och verktyg.

Följande mål definierar syftet:

- A. Beskriva internationella förfarande, med fokus på Norden, genom en omvärldsanalys
- B. Identifiera parametrar/variabler som påverkar sprickbildning i hårdnande betong
- C. Ta fram en forsknings- och utvecklingsstrategi, samt behov för ny branschstandard



Figur 1. Organisation och interaktion mellan arbetspaket och dess koppling till projektets mål.

1.4 Avgränsningar

Arbetet utgår från ett svenskt behovsperspektiv. Omvärldsstudien avgränsades till de nordiska länderna men under förarbetet och studieresan har även Europa och övriga världen inkluderats. För parameterstudien söktes analysverktyg brett men ganska snabbt avgränsades arbetet till ConTest Pro och Diana. Dock användes i slutändan självimplementerade skript skrivna i Matlab för att genomföra den parametriska studien, medan Contest Pro och ProduktionsPlanering Betong (PPB) användes för kalibreringsändamål. Det bör noteras att i den första delen av parameterstudien så inkluderades ett bredare antal parametrar men i Monte Carlo analyserna fokuserade studien på parametrar relaterade till materialegenskaperna. Följaktligen utelämnades värmeöverföringskoefficienten vid ytan och tvångsgrad från den parameterstudien fast de anses vara mycket inflytelserika parametrar. Inverkan av armeringsmängden, som skulle ingå i parameterstudien enligt ansökan, beaktades inte p.g.a. att analyserna genomfördes i Matlab istället för Diana som var planerat.

2 Bakgrund

2.1 Studien satt i ett större sammanhang

För att kunna modellera och bedöma sprickrisken hos hårdnande betong behövs materialmodeller för att beskriva temperaturutvecklingen och hur de mekaniska egenskaper samt krympning och krypning/relaxation utvecklas över tid. Det är många materialegenskaper som ska beskrivas, se avsnitt 4.1.2 och 4.2, och för detta krävs oftast att en omfattande materialprovning, se Figur 2. Illustrationen avser främst det förfarande som används i Sverige och i Norge, med vissa skillnader där man t.ex. i Norge bestämmer temperaturutvidgningskoefficientens utveckling med en styrd temperaturvariation ("sågtandad" temperatur profil).

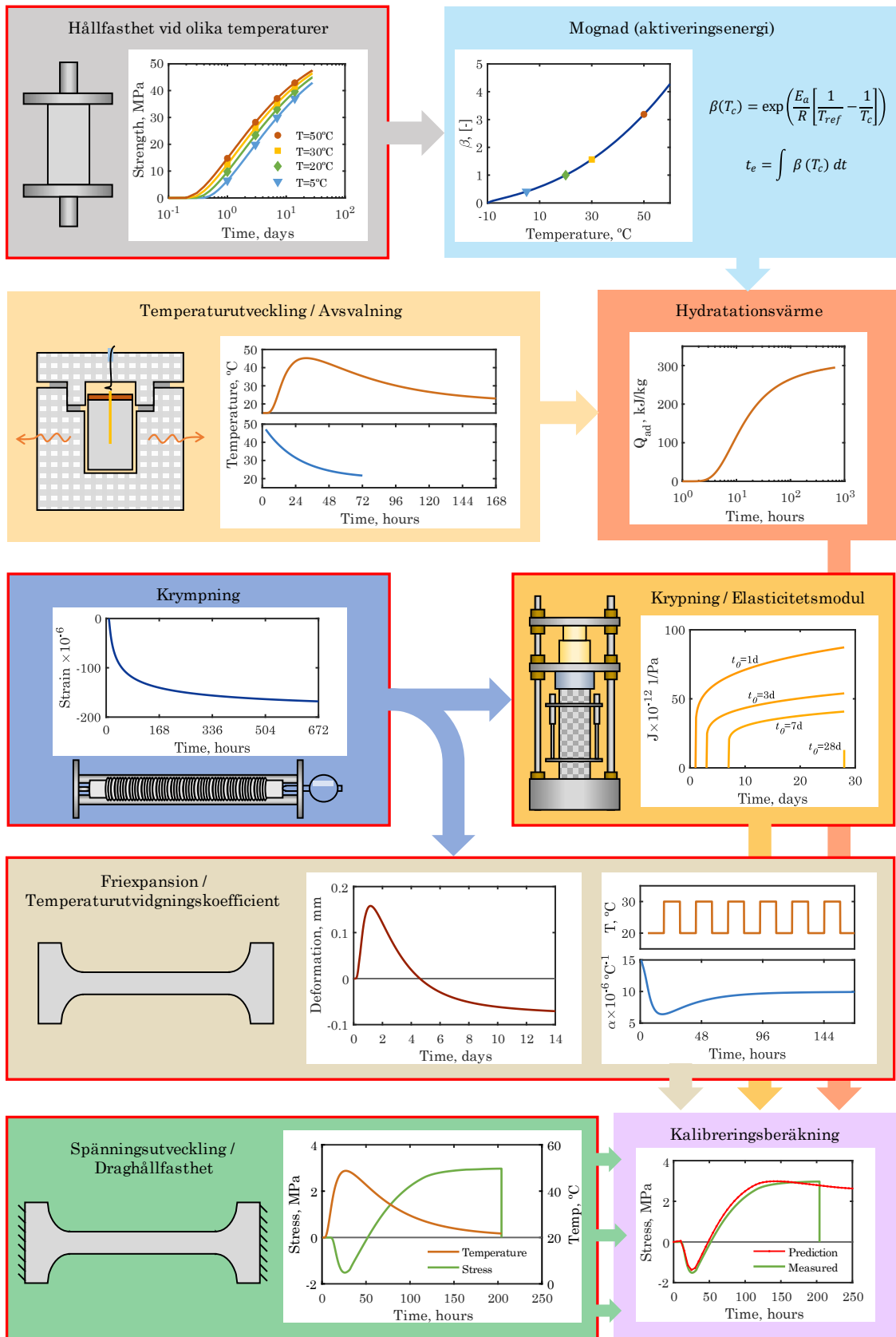
Vanligtvis så inleds provningen med att bestämma betongens tryckhållfasthetstillväxt vilket sker vid en "referenstemperatur" (20 °C) samt vid låga och höga temperaturer och då vanligtvis vid minst fyra olika temperaturer. Tryckhållfasthetsprovningen resulterar dels i en beskrivning av tryckhållfasthetstillväxten vid referenstemperaturen (20 °C) men också i mognadsfunktionen som beskriver temperaturens inverkan på ekvivalent mognadsålder vid referenstemperaturen (20 °C). För mognadsfunktionen är det temperaturfaktorn β_T som beskriver sambandet mellan tid och temperatur till ekvivalent mognadsålder, vilket ofta beskrivs med hjälp av en Arrheniusfunktion och där aktiveringsenergin (E_a , J/mol) är en central parameter.

Även om temperaturfaktorn β_T bestäms genom provning av tryckhållfasthetstillväxt vid olika temperaturer så avser den egentligen att beskriva hydratationshastigheten och dess temperaturberoende. Det går också att bestämma aktiveringsenergin med hjälp av isoterm kalorimetrisk metod. Dock skiljer sig aktiveringsenergin när den bestäms genom värmeutveckling jämfört med mekaniska egenskaper [30].

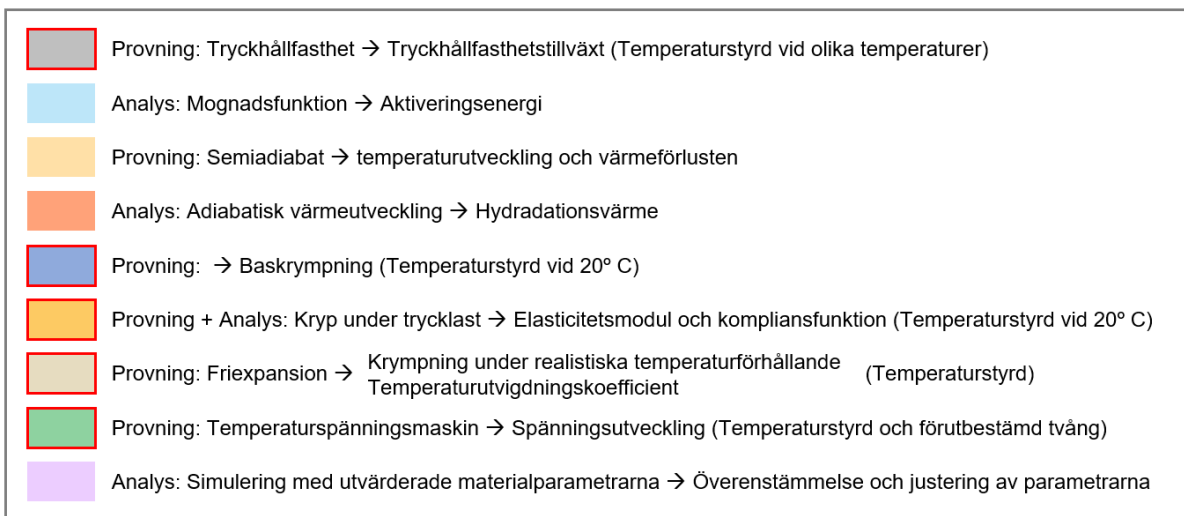
Försök har också visat att aktiveringsenergin inte är konstant utan minskar för ökande hydratationsgrad [31]. När temperaturfaktorn β_T är bestämd används denna som en ingångsparameter för att bestämma betongens adiabatiska värmeutveckling där temperaturutvecklingen följs i en så kallade semiadiabat, som är en välisolerad behållare med "känd" värmeförlust (se avsnitt 3.5 för standarder). Med hjälp av mognadsfunktionen och den kända värmeförlusten kan den adiabatiska värmeutvecklingen i förhållande till ekvivalent mognadsålder beskrivas.

Då krympning (främst autogen vilken kommer att benämnas baskrympning i den nya eurokoden) är en pådrivande mekanism för sprickbildning och krypning/relaxation (baskrympning/-relaxation) är en hämmande mekanism så behöver dessa materialegenskaper bestämmas och i samband med krypprovningen bestäms även elasticitetsmodulens utveckling. Provningsen av krypning/relaxation sker vanligtvis i tryck (vid cirka 20% av aktuell tryckhållfasthet) och både krympning och krypning genomförs vid isoterma förhållanden (20 °C).

Vid provningen av krypning utvärderas också elasticitetsmodulen, men vid tidig belastning av ung betong kan det vara svårt att skilja mellan den elastiska deformationen och de viskoelastiska.



Figur 2. Flödesschema för provning och analys av ung betongs egenskaper.



Figur 2 (kont). Flödesschema för provning och analys av ung betongs egenskaper.

Krypförsöken kan utvärderas med olika modeller, men i Sverige används vanligtvis en vekhetsfunktion (som beaktar den totala deformation) och som benämns komplians, J [Pa^{-1}]. Kompliansfunktionen beskrivs med en bi-linjär logaritmisk modell [32], [33]. Kompliansfunktionen översätts sedan till ett relaxationsspektrum, där vissa justeringar görs för att undvika att dragspänningar uppstår en lång tid efter belastning påförts, se avsnitt 4.2.

Det slutliga steget i provningsförfarandet är att utföra en provning i temperaturspänningsmaskin (TSTM, "Temperature Stress Testing Machine") där spänningsutvecklingen för en bestämd temperaturhistorik uppmäts vid en förutbestämd grad av tvång (ofta fullständigt tvång). För denna typ av provning krävs att man har ett prov med tvång och ett motsvarande prov, som upplever samma temperaturhistorik, som kan röra sig fritt (friexpansion/-kontraktion Figur 2). Mätningen av friexpansion/-kontraktion kan också kombinera med en bestämning av hur temperaturutvidgningskoefficienten utvecklas genom att påtvinga en måttlig stegvis pålagd temperaturökning och – sänkning.

När all provning är genomförd och alla materialparametrar och samband är bestämda används resultaten för TSTM-provningen för att utföra en kontrollberäkning/-simulering för att säkerställa att de utvärderade materialparametrarna resulterar i en realistisk spänningsutveckling som stämmer överens med försöksresultaten. Om simuleringen inte överensstämmer så justeras de uppmätta materialparametrarna för att uppmätt och simulerad spänningsutvecklingen ska överensstämma.

2.2 Kravställande ur ett svenskt perspektiv

AMA Anläggning ställer krav på att risken för temperatursprickor under härdning minimeras. Det innebär att entreprenören ska göra så gott som den kan för att minska risken för sprickor men det ställs inga krav på att undvika sprickor helt förutom begränsning av ytsprickbredden i härdade konstruktioner.

Sprickrisknivån för temperatursprickor (η) definieras som kvoten mellan beräknad dragspänning och aktuell draghållfasthet alternativt beräknas den som kvoten mellan dragtöjning och brottöjning. Sprickrisknivån definieras beroende på exponeringsklass, dvs hur armeringsaggressiv miljön är. Det innebär att för de mest kloridutsatta konstruktionerna i XD3 och XS3 är temperaturriskkravet för normalfallet det högsta enligt Tabell 1 (från senaste AMA Anläggning 23)

Tabell 1. Värderna på spricksäkerhet S för beräkningsmetod 2 och 3 enligt AMA EBE.11/1.

Exponeringsklass	Receptspecifika materialparametrar	Generella materialparametrar	
		Bindemedelshalt, kg/m ³	
		≤ 460	> 460
XC1, XC2	1,05 ¹⁾	1,18	1,33
XC3, XC4	1,11	1,25	1,42
XD1, XD2, XS1, XS2	1,18	1,33	1,54
XD3, XS3	1,25	1,42	1,67

1) S beräknas som inversen av kvoten mellan dragtöjning och brottöjning.

För att få fram en temperatursprickrisk, vilken en beräkning jämförs med, inverteras värdet i tabellen. Till exempel, för en betong i exponeringsklass XD3 med bindemedelshalt understigande 460 kg är spänningskvoten $1/1,42 = 0,70$. Kravet ökar ytterligare om bindemedelshalten överstiger 460 kg och/eller krav på ensidigt vattentryck finns på betongkonstruktionen enligt Tabell 2.

Tabell 2. Värderna på spricksäkerhet S för beräkningsmetod 3 för konstruktioner som utsätts för ensidigt vattentryck enligt AMA EBE.11/2.

Exponeringsklass	Receptspecifika materialparametrar	Generella materialparametrar	
		Bindemedelshalt, kg/m ³	
		≤ 460	> 460
Alla	1,42	1,67	2,0

I värsta fallet kan alltså sprickrisknivån sjunka till 0,50 om bindemedelshalten överstiger 460 kg vid fallet ensidigt vattentryck, oavsett exponeringsklass.

Kravet på spricksäkerhet sjunker (kvoten för sprickrisknivån ökar) om betongens egenskaper är väl definierade.

Trafikverket kräver ofta redovisning av åtgärder för att minska risken för temperatursprickrisker baserat på underlag och beräkningar från en av metoderna uppräknade i AMA Anläggning. Enligt AMA är tre metoder angivna för bedömning av temperatursprickrisken, en för ytsprickor (metod 1) samt två metoder för bedömning av både ytsprickor genomgående sprickor (metod 2 och 3). Metod 2, som är framtagen vid

Luleå Tekniska Universitet, innebär en förenklad analysmetod i Excel med framtagna sprickrisker för olika bestämda fall. Den vanligaste metoden, metod 3, innebär användning av ett datorprogram såsom ConTeSt eller Hacon. För de vanligaste fallen (platta på mark, vägg på platta) kan metod 2 användas men för mer komplicerade fall som t. ex. motgjutning mot berg, varierande tvärsnitt osv. krävs nästan alltid metod 3.

3 Omvärldsanalys

3.1 Forskning på ung och hårdnande betong

Kovler [34] beskriver utvecklingen inom området och artikeln bygger på en väl citerad RILEM artikel i *Materials and Structures* från 1994 [35]. Maruyama & Lura [36] ger en aktuell överblick av de materialegenskaper som är viktiga med hänsyn till risken för tidiga temperatursprickor i massiva konstruktioner. En mer omfattande sammanställning är den som RILEM TC 254-CMS publicerade 2018 "Thermal Cracking of Massive Concrete Structures: State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 254-CMS" [19] ger en bra överblick av området och de behov som finns.

Under de senaste 20 åren har en omfattande forskning skett inom området ung och hårdnande betong och flera universitet har varit aktiva inom olika områden, från hydratation och värmeutveckling till viskoelastiska och mekaniska egenskaper samt utveckling av numeriska modeller och finita elementanalyser. Bland de universitet som har varit mest aktiva (utanför Sverige och Norge) kan nämnas det tekniska universitetet i Braunschweig, universitetet i Bryssel, Delft, Paris, Graz, Austin (Texas). I ett flertal avhandlingar har "klimatförbättrad" betong, med slagg, flygaska och andra alternativa bindemedel provats m.a.p. risken för temperatursprickor (bl.a. vid universitetet i Bryssel, Delft och Braunschweig). Vid universitetet i Bryssel har man haft mycket fokus på avancerade metoder för att kontinuerligt bestämma materialegenskaper från ett tidigt skede och man har också tillgång till en modern TSTM [37]. En genomgång av "moderna" experimentella tekniker för ung och hårdnande betong ges i boken "Advanced Techniques for Testing of Cement-Based Materials" [38] som är ett resultat av projektet COST Action TU1404 (www.tu1404.eu).

3.2 Generellt om omvärldens utveckling inom området

Sverige

Nyligen och pågående forskning inom BBT- och SBUF-projekt har lyft vikten om mätning och modellering av materialparametrar för betong. Enligt [39] konstateras att "*många egenheter observerats beträffande materialparametrarnas inmätning och modellering*". Forskning inom viskoelastiska egenskaper är nödvändig, särskilt för att kartlägga övergången från linjärt till icke-linjärt beteende och förstå dess beroende av temperatur och fukt. Sex olika recept på klimatförbättrad betong (med en måttlig klinkerersättning) har testats så länge, en stor utmaning framöver är att utveckla kostnadseffektiva och relevanta metoder för mätning av dessa materialparametrar, särskilt med tanke på att "observerade beteenden" hos klimatförbättrad betong inte alltid liknar det som tidigare dokumenteras vilket har konstaterats.

Norge

I Norge genomförs för vissa projekt sprickrisksbedömningar i Crack TeSt COIN, men det finns inga generella krav på detta. Provningsförfarandet har förenklats något jämfört med svensk praxis genom att krypförsök inte genomförs utan man utnyttjar data från tidigare genomförda mätningar med liknande betongrecept och delmaterial. Elasticitetsmodul och frirörelse provas tillsammans med provning i en

temperaturspänningsrigg (TSTM) [40]. I de forskningsprojekt som har genomförts vid NTU har klimatförbättrad betong provats, det har handlat om betonger med höga andel flygaska och med slaggcement, se [41] & [42].

I Norge, vid NTNU, pågår förnärvarande (startade 2021) ett doktorandprojekt. Fokus på projektet är:

- Att studera volymförändringarna och öka förståelsen för temperaturdilatationen och den autogena deformationen/-krympningen samt hur dessa påverkas av realistiska temperaturer.
- Att uppdatera materialmodeller för de tidiga mekaniska egenskaperna och hur dessa utvecklas.
- Undersöka och uppdatera krypmodeller för "transitional thermal creep" och om denna är applicerbar för dragbelastning och relaxation.

Danmark

I Danmark genomförs för vissa projekt sprickriskbedömningar, men det finns inga generella krav på detta. Ett provningsförfarande finns beskrivet hos DTI (Danish Technological Institute) där hållfasthetsutveckling, värmeutveckling, tidig krypning och krympning provas (se avsnitt 3.5). Någon provning i en temperaturspänningsrigg (TSTM) görs däremot inte.

Tyskland och Österrike

I Tyskland är det flera universitet och forskningsinstitut som har varit aktiva inom området, främst är det de tekniska universiteten i Braunschweig samt München som har varit aktiv under lång tid. Men BAW (Bundesanstalt für Wasserbau) tagit fram riktlinjer för sprickbegränsning [43] och bl.a. Bödefeld [44] och Turner [45] studerade inverkan av de rörelser som tillkommer i senare skeden (temperaturrörelser, krympning, mm) och inverkan av armering på sprickbredd [46]. Även RWTH Aachen har bidragit till detta ämne [47].

Hermerschmidt [48] utvecklade materialmodeller för att beskriva ung och hårdnande betong och arbetet bygger vidare på tidigare arbeten [49], [50], [51]. Hermerschmidt undersökte bland annat det som i Sverige benämns som klimatförbättrad betong, där både slaggcement och tillsats av stenkolsflygaska, kalksten och naturliga puzzolaner (Trass och mald Fonolit) undersöktes. Vid TUM Munich utvecklade Eierle [52] också beräkningsmodeller för att beskriva hydratationen, viskoelastiska och mekaniska egenskaper.

Vid universitetet i Graz har man också arbetat med metoder för att beräkna sprickbredd under inverkan av tvång och inkluderande av tidiga och senare deformationer [53]. Heinrich [54] utvecklade viskoelastiska modeller för att på ett mer-realistiskt sätt beakta inverkan av spänningsväxling och effekten på krypning och relaxation.

Frankrike och Belgien

I Frankrike har man haft flera större projekt bl.a. i anslutning till kärnkraftsindustrin, bl.a. de större nationella forskningsprogrammen kan nämnas CEOS.fr, Mefisto och MACENA (11-RSNR-0012 Control of nuclear vessel in accident conditions). De ledande universiteten involverade inom området har varit: Université de Toulouse; École des Ponts ParisTech, Univ. Gustave Eiffel; University Paris-Est/IFSTTAR; Ecole normale supérieure Paris-Saclay. I Frankrike har Central Laboratory Ponts Et Chaussées LCPC (ingår numera i IFSTTAR, The French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks) utvecklat mätmetoder för att bestämma värmeutveckling och aktiveringsenergi [55]. Forskning kring långtidseffekter, krypning och autogen krympning, har haft stort fokus [56], [57], [58].

Sedan cirka 20 år tillbaka har också Université libre de Bruxelles (ULB) arbetat med detta ämne [59], [60], [61], [62]. ULB har också samarbetat med IFSTTAR. Den forskning som har genomförts berör allt ifrån utveckling av mätmetoder för autogen krypning, värmeutvidgningskoefficient, krypdeformationer, elasticitetsmodul till mätning i en temperaturspänningsrigg. Forskningen har också omfattat utveckling av modeller för tidiga krypdeformationer samt modeller för simulering av konstruktioner. Intressant att notera är att man i dessa projekt har studerat många betonger med tillsatsmaterial (slagg, flygaska, mm) och klimatförbättrad betong.

Nederländerna

TU Delft har mycket länge arbetat och forskat om ung och hårdnande betong och där van Breugel tidigt undersökte centrala aspekter rörande ung och hårdnande betong [63], [64]. Senare studier har tittat på inverkan av armering på tidig sprickbildning [65], autogen krympning [66], [67], effekten av relaxation och mikrosprickbildning på tvångsspänningar [68], samt nya hydratationsmodeller för cement/betong med inblandning av flygaska och slagg [69].

Sule [65] studerade armeringens inverkan på sprickbildning i höghållfast betong och standardbetong och kunde då konstatera att armeringen ledde till en ökad töjningskapacitet innan sprickbildning skedde. Detta var särskilt tydligt för höghållfast betong, och armeringsutformningen hade stor påverkan på sprickbildningsprocessen. På senare tid har man arbetat med maskininlärningsmodeller för modellering och analys [70], [71].

Japan

I Japan publicerades de första riktlinjerna 1986 "JCI Guidelines for Control of Cracking of Mass Concrete" och den senaste versionen kom 2016 [72]. Följande referenser ger en överblick av state-of-the-art i Japan [73], [74].

En del forskning pågår bl.a. vid University of Tokyo [75], [76], [77] vilket inkluderar både TSTM provning men också hur sprickor kan undvikas med expansiva tillsatser och hur sprickrisk och sprickbredd kan beräknas.

USA

American Concrete Institute har publicerat en rapport där den senaste versionen kom 2007 [78]. Rapporten är ganska så övergripande och ger inte så detaljerad information och diskuterar mer de inverkande faktorerna.

Vid några universitet [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85] har olika inverkande faktorer undersöks, men huvudfokus har varit på temperaturutvecklingen och hur denna kan bestämmas och beräknas.

3.3 Workshop

För att undersöka behovet av forskning och innovation när det gäller att skala upp användningen av klimatförbättrad betong genomfördes en 2 dagars workshop mellan den första och andra december 2022. Workshopens primära syfte var att identifiera avvikelserna i perspektiven mellan de nordiska länderna och mellan branschens huvudaktörer (beställare, konstruktör, entreprenör, betongmaterialtillverkare och akademiker), samt identifiera behov, risker och drivkrafter för användning av klimatförbättrad betong.

3.3.1 Metod

I workshopen genomfördes en explorativ studie utifrån forskningsmetoden tematisk analys; studien använder en övergripande fokusgruppsworkshop som det huvudsakliga empiriska verktyget. Det övergripande tillvägagångssättet innefattar följande steg:

1. Förhandsidentifiering av allmänna teman.
2. Identifiering och urval av fokusgruppsdeltagare.
3. Datainsamling genom inspelning och anteckningar.
4. En iterativ analys av empirin och utvecklingen av de föridentifierade teman.

Tematisk analys är en flexibel och mycket använd forskningsmetod för att identifiera och analysera meningsfulla mönster eller teman inom kvalitativa data. Mer specifikt, det innebär en systematisk och iterativ process för att identifiera, analysera och tolka betydelsemönster och teman i data och det värderas för sin förmåga att identifiera mönster och teman i data som kanske inte är omedelbart uppenbara genom andra metoder.

Processen med tematisk analys börjar med datainsamling, följt av bekantskap med data, generering av initiala koder, sökning efter teman, granskning och förfining av teman och slutligen framtagande av presentation av resultaten.

Förhandsidentifiering av teman

Innan datainsamlingen organiserades brainstormade forskargruppen perspektiv på ämnet för att identifiera generella teman som skulle kunna användas som diskussionsämnen. Sedan itererade och reflekterade teamet över potentiella teman eftersom en begränsad grund fanns i litteraturen. Det slutliga urvalet av teman som beslutades att användas under workshopen baserades på antagandet att det finns en diskrepans i

perspektiven mellan de nordiska länderna och mellan huvudaktörerna i branschen (Beställare, konstruktör, entreprenör, betongmaterialtillverkare och akademiker). Efter den iterativa processen upprättades följande lista med teman:

- Process och definition av materialkrav
- Testmetod och metoder
- Verktyg för analys och produktionsplanering

Urval av deltagare och anordnande av workshopen

Fokusgruppen bildades bland forskargruppens gemensamma sektors nätverk och genom referenser i vetenskapliga och branschpublikationer. Totalt deltog 21 personer med olika kompetensområden inom betongbyggnadssektorn som representerade branschens olika aktörer i workshopen. Tabell 3 visar deltagarlistan.

Tabell 3. Deltagarlistan till workshopen.

Förnamn	Efternamn	Position	Institution	Land
Lars	Wadsö	Professor	LTH	Sverige
Ola	Dahlblom	Professor	LTH	Sverige
Martin	Laninge	Brospecialist	PEAB	Sverige
David	Dackman	Konstruktör	WSP	Sverige
Kristian	Tammo	Produktutvecklare	Swerock	Sverige
Iad	Saleh	Betongspecialist	NCC Sverige	Sverige
Claus	Vestergaard	Affärschef	DTI	Danmark
Andrzej	Cwirzen	Professor	LTU	Sverige
Mats	Emborg	Professor	LTU	Sverige
Jan	Suchorzewski	Forskare	RISE	Sverige
Urs	Muller	Tekniskchef	Schwenk	Sverige
Terje	Kanstad	Professor	NTNU	Norge
Anja-Birgitta	Estensen	Professor	NTNU	Norge
Antonia	Menga	Doktorand	NTNU	Norge
Øyvind	Bjøntegaard		Statens Vegvesen	Norge
Mats	Karlsson		Infratec	Sverige
Carlos	Gil	Projektledare	Thomas Concrete	Sverige
Ingemar	Löfgren	FoU Chef	Thomas Concrete	Sverige
Jonas	Magnusson	Teknisk specialist	NCC Sverige	Sverige
Alexandre	Mathern	Teknisk specialist	NCC Sverige	Sverige
Rasmus	Rempling	Professor	Chalmers	Sverige

Workshopen genomfördes under två dagar, under vilken deltagarna utmanades att diskutera de etablerade teman under specifika sessioner. Presentationer av

huvudaktörernas perspektiv gjordes för att introducera varje session. I Tabell 4 visas deltagarna som höll en presentation i workshopen tillsammans med ämnet för deras presentation.

Diskussionen genomfördes i mindre fördefinierade grupper. Grupperna var fördefinierade för att skapa en mer omfattande diskussion och mildra fördomar i resultatet. Följande sessioner planerades och genomfördes utifrån de fastställda teman:

- Metoder för design och bedömning av klimatförbättrad betong.
- Erfarenheter av fältmätningar.
- Krav i entreprenadkontrakt, principer och skillnader.
- Testanläggningar och kapacitet samt arbete med standarder.
- Diskutera behov och drivkrafter av kunskap, faciliteter och kompetens ur ett sektorsövergripande perspektiv.

Tabell 4. Lista av deltagare som presenterade i workshopen och presentationernas ämnen.

Deltagare	Presentations ämne
Lars Wadsö	Heat development
Antonia Menga	Material models for early age cracking
Ola Dahlblom	Temperature and stress simulation
Claus Vestergaard	Design approaches and testing in Denmark
Terje Kanstad	Design approaches and testing in Norway
Mats Emborg	Design approaches and testing in Sweden
Carlos Gil	Field measurements – Uddevalla
Øyvind Bjøntegaard	Field measurements – Norway
Martin Laninge	Field measurements – New SBUF project
Claus Vestergaard	Client requirements in Denmark
Øyvind Bjøntegaard	Client requirements in Norway
Mats Karlsson	Client requirements in Sweden
Iad Saleh	Technical requirements and material parameters, a contractor perspective
Jan Suchorzewski	Testing facilities and capacity
Terje Kanstad	Standardisation work

Datinsamling och tematisk analys

Datinsamlingen utfördes genom att dokumentera diskussionerna under sessionerna och spela in sammanfattningen av diskussionerna. Dokumentationen sparades för vidare analys efter workshopen genom att ta bilder av sammanfattningarna, samtidigt som inspelningarna transkriberades och användes för att tolka de dokumenterade diskussionerna.

Det sista steget i den tillämpade metoden var att iterativt analysera resultaten och generera underteman till teman genom att identifiera kontextuella budskap i de empiriska data.

3.3.2 Resultat och diskussion

Resultaten av workshopen sammanfattas i två systematiska tabeller, Tabell 5 och Tabell 6, som presenterar "Möjliggörare och utmaningar prioriterade i ordning av de viktigaste och mest akuta för att stimulera användningen av klimatförbättrad betong" respektive "Kunskapens behov och drivkrafter, anläggningar, och kompetens ur ett sektorsövergripande perspektiv för att stimulera utveckling och implementering av klimatförbättrad betong".

Tabell 5. Prioriterade möjliggörare och utmaningar prioriterade för att stimulera användandet av klimatförbättrad betong.

Nivå av Prioritet	Parametrar (möjliggörare, utmaningar)		
L1	Aktiveringsenergi, en "parameter" som beskriver temperaturutvecklingens hastighet, Standardisering för att få jämförbara resultat mellan testanläggningar, Tillåt sprickbildning baserat på konsekvens		
L2	Miljöparametrar, Ökad samordning mellan design och produktion, Standardisering för att få bättre underlag för internationellt samarbete och utveckling	Krympning, Kvalitetssäkring, För att få materialparametrar för klimatförbättrad betong såsom autogen krympning/krympning/aktiveringsenergi, Aktuella testmetoder kan vara föråldrade, Standardisering för att få tillgängliga och definierade testmetoder	
L3	Torkkrympning, Tillåt design för sprickbildning i sprickkontroll	Materialkrav, testrepeterbarhet, Tillåt design för sprickbildning i sprickkontroll för att minska spänningar i andra delar	Produktionsplanering, Att nå överenskommelser mellan länder, Labbackreditering
L4	Design för sprickkontroll av klimatförbättrad betong kan vara svårare, mindre behov av kylning genom användning av klimatförbättrad betong	Standardisering etableras ofta ur ett akademiskt perspektiv, Standardiserade parametrar för produktionsplaneringsanalys	
L5	Det kan vara svårt att förändra och anpassa sig till en ny standard		

Möjliggörare och utmaningar för att stimulera användningen av klimatförbättrad betong

Gruppen diskuterade möjligheterna och utmaningarna med att stimulera användningen av KF-betong. När det gäller ingångsparametrarna och materialkaraktäriseringen listade expertgruppen mer eller mindre samma parametrar, se Tabell 5, som man hittade under litteraturgenomgången. Aktiveringsenergi och en "parameter" som

beskriver temperaturutvecklingshastigheten är två huvudparametrar och anses vara de mest prioriterade parametrarna för att hitta en lösning.

Tabell 6. Behov och drivkrafter av kunskap, anläggningar, process och kompetens ur ett sektorsövergripande perspektiv för att stimulera utveckling och implementering av koldioxidsnål betong.

BEHOV, RISKER, MOROTTER, PINNAR						
Aktör	Kunskap & för- mågor	Anläggningar & resurser	Kompetens & erfarenhet	Kapacitet Regional/ nationell/ nordiska	Design metod & produktions planering	Övrigt
Betong- tillverkare	Prestandapara- metrar för KF- betong Behov av KF- betong	Labb närmare materialut- veckling, Risk för bris- tande kompe- tens som re- surs Brist på test- kapacitet	Härldningstek- nik Kunskap om nya pärmars prestanda Att vara le- dande inom le- verans av KF- betong	Brist på test- kapacitet Mer testut- rustning be- hövs		Incitament
Entreprenör	Uppfyller inte den kunskap som behövs CO ₂ -krav Behov av KF- betong		Att producera det som krävs Ledande inom hållbart byg- gande	Kostnader Behöver le- verera KF- betong	Kan justera standarder Behöver meto- der för att syste- matiskt doku- mentera temper- atur och sprick- bildning	Incitament
Konsult	Konsekvenser av sprickbild- ning, Kunskap om nya cementty- per Erfarenhet av design med KF- betong Risk att behovet av kunskapsut- veckling inte kan tillgodoses	Expertis inom nya områden	Expertis inom nya områden Utbildning om KF-betong Ledare för kli- matomställ- ning		Flexibilitet i de- sign Programvara som kan han- tera KF-betong Straff Designkrav	Incitament, Behov av ut- bildning
Beställare	Saknar kunskap Klimatförändring Behov av KF- betong		KF-betong långsiktig pre- station	Krav på ack- rediterad provning och medel för det	För strikta regler Straff Längre projekt- tid för att säker- ställa prestanda Behov av nya designkriterier Kostnadsbespa- ring	Incitament, Behöver tyd- liga krav
Provnings- laborato- rium	Behov av KF- betong	Behov av KF- betong Behov av standardtest- metoder Krav på stan- dardtestning	Behov av KF- betong Kan inte testa KF-betong	Behov av KF-betong, förutom i Norge Kan inte uppfylla kli- matmålen	Behov av verifi- eringsmetoder	Incitament

På metodaspekterna prioriterade gruppen hänsyn till sprickbildning och standardisering för att få jämförbara resultat mellan testanläggningar. Standardisering var ett ämne som upprepades i flera av diskussionerna som en fördel på flera nivåer, t. ex. för bättre internationellt samarbete, tillgänglighet av testanläggningar och fastställande av testmetodik. Å andra sidan påpekades att standardisering ofta behöver utvecklas ur ett akademiskt perspektiv vilket kan hindra en branschgemensam implementering.

- Betongtillverkarnas perspektiv

Betongtillverkarna är nära besläktade med testanläggningar och resurser och betonar att testlabbet bör ligga närmare materialutvecklingen för att lättare kunna karakterisera KF-betongen med prestandaparametrar. Tillverkarna bör dock överväga risken för bristande kompetens och kunskap om den nya bindemedelsprestanda. Samtidigt har de tydliga incitament att driva utvecklingen till att bli ledande inom materialdesign och utveckling.

- Entreprenörernas perspektiv

Entreprenörerna saknar idag kunskap om KF-betong med högre andel alternativa bindemedel och dess prestanda och är oroliga för att kostnaderna kommer att öka med introduktionen av ny KF-betong. Det finns dock uppenbara drivkrafter i form av både morötter och pinnar, då de förväntas leverera KF-betong i större skala och därför behöver metoder för att dokumentera temperatur och sprickbildning systematiskt.

- Designkonsulternas perspektiv

Ur designkonsulternas perspektiv finns det ett behov av mer expertis för att överbrygga den befintliga kunskapsklyftan. Om denna kunskapslucka kvarstår kan det finnas brist på resurser för att möta efterfrågan på design- och produktionsanalyser. Nya designkrav kan tvinga konsulter att satsa på kunskapsutveckling, men det finns en risk att denna kunskapsutveckling inte kan mötas.

- Kundernas perspektiv

Kunderna anses vara ansvariga för att driva föreskrifter och krav. Detta kan i slutändan leda till strikta regler som hämmar innovationer. Kunderna har också i sin hand frågan om ackrediterad provning och dess medel och man är också intresserad av KF-betongens långsiktiga prestanda.

- Provningslaboratoriets perspektiv

Det anses att det finns ett behov av fler provningsanläggningar och standardiserade provningsmetoder för att möta kravet på materialkaraktärisering som följer med utvecklingen av KF-betong. Den främsta drivkraften, som är både en pinne och en morot, är att dagens labb inte har metoder för att testa KF-betong.

Utforskning av inledande teman

Innan workshopen definierade forskarna en första uppsättning teman: Process och definition av materialkrav, testmetod och metoder samt Verktyg för analys och produktionsplanering.

Baserat på ovanstående aktörsperspektivdiskussion är standardisering av testproceduren en huvudstimulator för att använda klimatförbättrad betong. Man drar slutsatsen att ett standardiserat förfarande skulle gynna alla aktörer, men särskilt för homogeniseringen av förståelsen av det materiella beteendet som leder till en ökning av sektorsövergripande kunskapsbasen. När det gäller materialkrav observeras ett förhållande till testanläggningar. Det råder brist på testresurser (särskilt i Sverige) samtidigt som det råder osäkerhet om materialegenskaperna och de relaterade parametrarna som behövs för produktionsplanering.

3.4 Studieresa – BATir ULB

Mycket av den forskning som har genomförts har haft fokus på att utveckla tillförlitliga mätmetoder och modeller som kan beskriva utvecklingen av ung hårdnande betong. Enligt professor Stéphanie Staquet har en drivkraft varit följande frågeställning: *"Hur kan vi få ut så mycket information från tester som möjligt och kan vi mäta kontinuerligt"*.

Detta har lett fram till att man använder sig av olika mättekniker speciellt utvecklade för ändamålet bland dessa kan nämnas: ultraljud; autogen krympning och temperaturutvidgningskonstanten med "BTJADE" och "AUTOSHRINK"; krypning och elasticitetsmodul. I samarbete med IFSTTAR har man bland annat väsentligt förbättrat metoderna för att bestämma E-modulusutvecklingen och den tidiga krypningen (även i drag), se [21], [86]. På BATir har man också en väldig modern temperaturspänningsrigg [37] med utökade möjligheter att styra temperaturförloppet, mm.

Med de experiment som har genomförts har materialmodeller utvecklats för att beskriva de centrala parametrarna men också hur dessa påverkas av tillsatsmaterial som slagg och flygaska, t.ex. autogen krympning och svällning samt de viskoelastiska egenskaperna. Man har även studerat och beskrivet temperatureffekter på t.ex. den autogena krympningen.

Presentationsmaterial från studiebesöket presenteras i Bilaga A.

3.5 Provningsmetoder och standarder

När det gäller ung betong och hårdnande betong så finns det en del standarder och provningsmetoder som är specifikt utvecklade för området men de flesta är avsedda för hårdnad betong.

För provning av cement finns tre standarder för bestämning av cementets värmeutveckling:

- SS-EN 196-8:2010: Cementprovning - Del 8: Värmeutveckling – Lösningvärmemetod
- SS-EN 196-9:2010: Cementprovning - Del 9: Värmeutveckling - Semiadiabatisk metod
- SS-EN 196-11:2019: Cementprovning – Del 11: Värmeutveckling – Isoterm kalorimetrisk metod

För provning av betong finns följande standarder:

- SS-EN 12390-3:2009: Provning av hårdnad betong - Del 3: Tryckhållfasthet hos provkroppar
- SS-EN 12390-6:2009: Provning av hårdnad betong - Del 6: Spräckhållfasthet hos provkroppar
- SS-EN 12390-13: Provning av hårdnad betong – Bestämning av elasticitetsmodulens sekantvärde vid tryck.
- SS-EN 12390-14:2018: Provning av hårdnad betong – Del 14: Semi-adiabatisk metod för bestämning av värmeutvecklingen i betong vid härdning
- SS-EN 12390-15:2019: Provning av hårdnad betong - Del 15: Adiabatisk metod för bestämning av värmeutvecklingen i betong vid härdning
- SS-EN 12390-16:2019: Provning av hårdnad betong - Del 16: Bestämning av krympning av betong
- SS-EN 12390-17:2019: Provning av hårdnad betong - Del 17: Bestämning av krypning under kompression
- SS 137215: Betongprovning - Hårdnad betong – Krympning
- SS 13 71 26: Betongprovning – Färsk betong - Tillstyvnadstid.

Följande ASTM standarder är tillämpliga:

- ASTM C 403/C 403M: Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance.
- ASTM Standard C469: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.
- ASTM Standard C512: Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression
- ASTM C 1074: Standard practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method
- ASTM C1698-09: Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar
- ASTM E1876 (2015). Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration.

Nordiska NT-Build har följande standarder som är relevanta:

- NT Build 367: Concrete, Repair Materials – Coefficient of Thermal Expansion
- NT Build 388: Concrete – Heat Development
- NT Build 476: Concrete, Fresh – Initial Setting time and Activation Energy during setting
- NT Build 505: Measurement of heat of hydration of cement with heat conduction calorimetry

I Norge finns följande standarder:

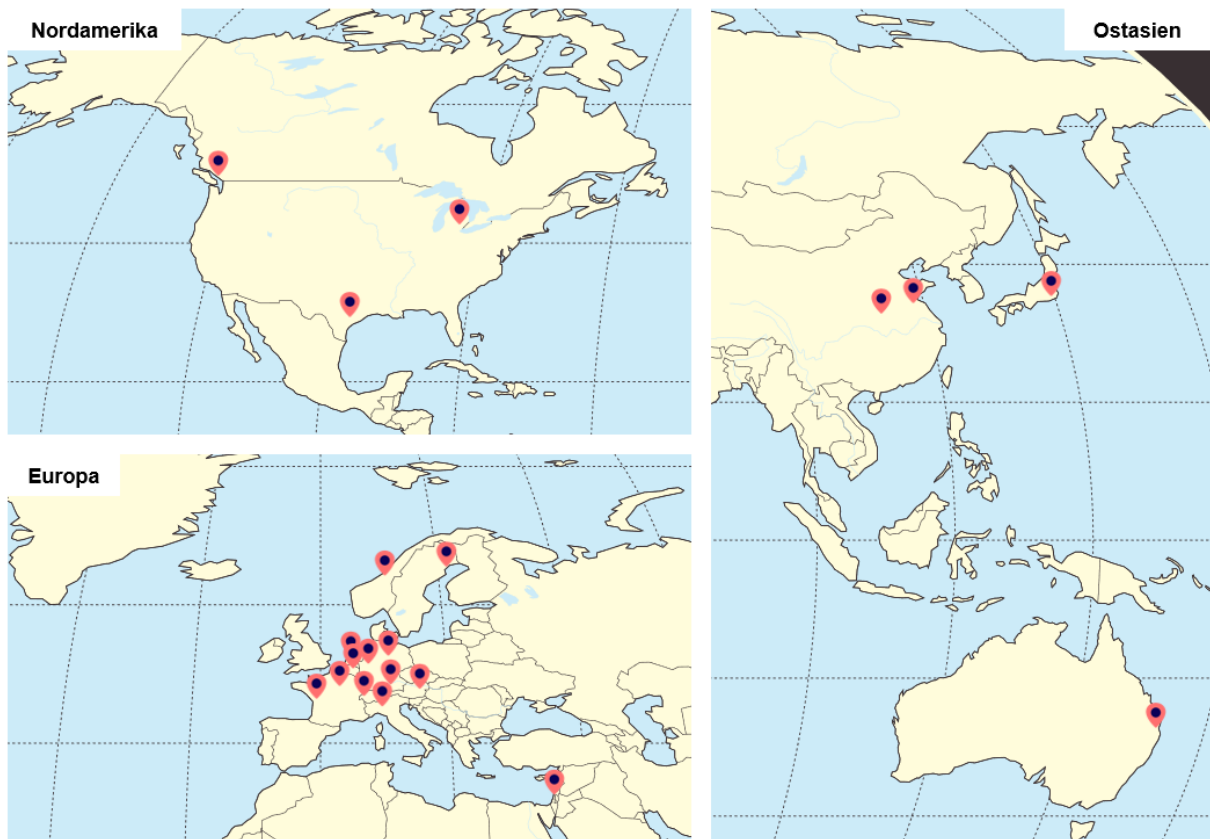
- NS 3656:1993 Rate of reaction
- NS 3657:1993 Heat development
- NS 3661:1987 Betongprøving - Fersk betong - Avbinding

Teknologiskt Institut i Danmark (DTI) har följande metodbeskrivningar för provning av ung och hårdnande betong:

- TI-B 103 (94): Test Method - Activation Energy for the Maturity Method
- TI-B 102 (15): Test Method - Strains from Creep and Early-Age shrinkage

Emellertid är merparten av de standarder som finns inte specifikt framtagna för att mäta på ung och hårdnande betong, t.ex. krympning, elasticitetsmodul och krypning. Detta problem nämns bland annat i [19] och avsaknaden av ett standardiserat provningsförfarande gör det svårare att jämföra provningar utförda vid olika provningslaboratorier.

För provning av spänningsutveckling under fullständigt tvång används en så kallad "temperaturspänningsmaskin", TSTM (Temperature Stress Testing Machine). Denna typ av utrustning och provning utförs vid några universitet och forskningsinstitut och totalt finns cirka 16 stycken provningsriggar i Europa (Tyskland, Nederländerna, Frankrike, Belgien, Italien, Schweiz, Österrike, Norge & Sverige) och ytterligare utrustningar finns i Kina, Japan, Australien, USA, Canada och Israel, se Figur 3. Nguyen m.fl. beskriver en "state-of-the-art TSTM" [87]. I Schmidt m.fl. (2023) [47] beskrivs en TSTM och en provningsmetodik för att undersöka inverkan av armering på sprickbildning och sprickbredd.



Figur 3. Karta som visar några av de temperaturspänningsmaskinerna som finns i världen.

4 Parameterstudie

Detta kapitel beskriver den parametriska studie som genomfördes för att utvärdera vilka parametrar som har störst inverkan på tidig sprickbildning i hårdnande betong. Den parametriska studien delades in i två faser: (a) en uppställning och validering av en numerisk modell och (b) den parametriska analysen.

För uppställningen och valideringen av modellen var det ursprungliga förslaget att modellera experiment som utförts i en "temperature stress testing machine" (TSTM) med hjälp av finitelement programvara DIANA och validera modellen med resultaten. Emellertid stötte vi på några hinder på vägen som krävde att vi antog ett annat tillvägagångssätt. Detta medförde också att inverkan av armeringsmängden, som skulle ingå i parameterstudien enligt ansökan, inte beaktades.

Å ena sidan var det svårt att hitta publicerade forskningsresultat där geometri, indata och randvillkor för experimenten var omfattande och noggrant dokumenterade. Därför bestämde vi oss för att i stället modellera en del av ett väggelement, nämligen en 700 mm tjock vägg, som är det element som används för att bestämma temperaturkurvan som styr TSTM-experimenten vid Luleå Tekniska Universitet [ref]. Observera att även om laboratorier i andra länder kan använda olika temperaturkurvor för att styra sina experiment, kommer resultaten ändå att representera ett realistiskt betongelement. Följaktligen, eftersom det inte fanns några experiment tillgängliga för validering av modellen, utfördes en jämförelse med programvaran Contest Pro i stället, med användning av materialparametrar som tillhandahålls i programvarans databas för att verifiera att modellens resultat var rimliga.

Å andra sidan, under ett möte med projektets referensgrupp, informerades vi om svårigheter som upplevts i tidigare försök att modellera i DIANA det tidiga åldersbeteendet hos betongelement utsatts för tvång under varierande initiala temperaturförhållanden. När vi undersökte detta stötte vi också på att resultaten som erhöles med DIANA visade oväntat beteende. Efter flera diskussioner med den tekniska supporten för DIANA hittades ingen tillfredsställande förklaring till det observerade beteendet. Som ett resultat, och på grund av tidsbrist, beslutades det att utveckla ett själv implementerat beräkningsprogram i Matlab för att utföra analyserna.

I den beräkningsmodellen använd i parameterstudien har vissa förenklingar antagits. Sambandet mellan töjning och spänning i betongen antogs linjär och krypbrott i drag ignorerades i beräkningen av spänningar, vilket innebär att den beräknade spänningskvoten kan vara större än 1. Dessutom har superpositionsprincipen för krypning använts även när spänningar närmar sig draghållfastheten och även då spänningen växlar från tryck till drag. Ytterligare har inte beaktats att både den autogena krympningen och krypningen är temperatur beroende.

När modellen var upprättad och validerad genomfördes den parametriska analysen i två steg. Först utfördes en metod för en faktor i taget (One Factor at a Time - OFaT) för att testa modellens känslighet för varje parameter och för att få en känsla av vilka parametrar som hade störst inverkan på modellens utdata. Därefter genomfördes en mer omfattande studie med hjälp av en Monte Carlo-simulering, där modellen kördes

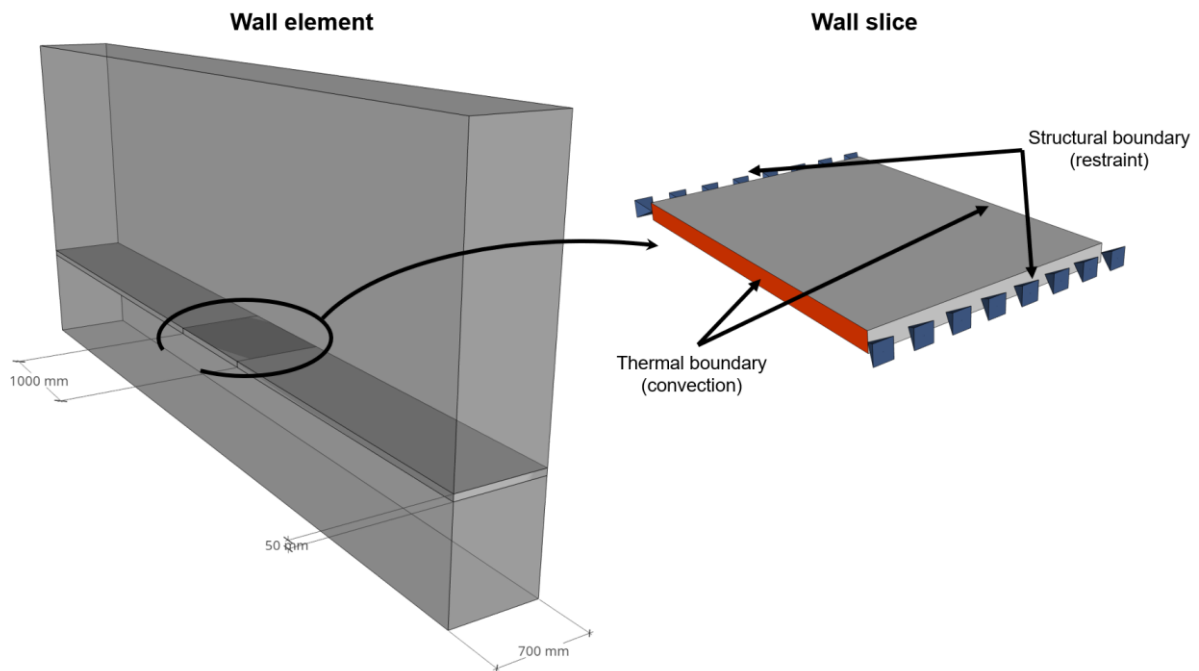
10^5 gånger med olika kombinationer av indata, slumpmässigt valda från föreskrivna statistiska fördelningar.

I det följande ges en beskrivning av modellen som användes för beräkningarna, följt av de huvudsakliga resultaten från den parametriska studien.

4.1 Beskrivning av modellen

4.1.1 Geometri och randvillkor

Geometrin som valts för den parametriska studien motsvarar ett horisontellt snitt av ett 700 mm tjock betongvägg som illustreras i Figur 4. Längden på snittet togs som 1 m fast detta spelar ingen stor roll i modellen eftersom rörelser och sprickbredder inte undersöktes. Vidare tas snittet tillräckligt långt från väggens över- och undersida så att snittets tjocklek inte spelar någon roll i beräkningarna heller, vilket förenklar modellens beteende till en tvådimensionell analys.



Figur 4. Geometrin av elementet använt i parameterstudien samt randvillkorna.

Betongens termo-mekaniska beteende analyseras med hjälp av ett tvåstegsförfarande. Först utförs en övergående termisk analys för att bestämma hur temperaturens fördelning i betongen utvecklas över tid. Eftersom väggen antas vara tillräckligt lång så att värmeöverföringen är noll i den längsgående riktningen, kan den termiska analysen reduceras till att lösa 1D-problemet i riktningen ut från väggen som beskrivs av Ekv. (1):

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_h(t) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

där $k \left[\frac{W}{m^2 \cdot C} \right]$ är betongens termiska ledningsförmåga, antagen som homogen och isotrop, $Q_h \left[\frac{W}{m^3} \right]$ är betongens hydratationsvärme, $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ är betongens densitet och $c \left[\frac{kJ}{kg \cdot C} \right]$ är specifik värmekapacitet. Konvektiva värmeöverföringsrandvillkor tillämpas på väggens sidor (rött streck i Figur 4) enligt Ekv. (2):

$$q_{n,x} = h_{conv}(T_{surf} - T_{env}) \quad (2)$$

där $q_{n,x} \left[\frac{W}{m^2} \right]$ är värmeöverföringen normalt till ytan, $h_{conv} \left[\frac{W}{m^2 \cdot C} \right]$ är värmeöverföringskoefficienten vid ytan och T_{surf} och $T_{env} [^{\circ}C]$ är temperaturen på betongens yta respektive i den omgivande miljön.

Temperaturens historia som beräknas genom väggen används sedan för att beräkna utvecklingen av betongens materialegenskaper, inklusive draghållfasthet, elasticitetsmodul, krympning och krypning enligt ekvationerna som presenteras i avsnitt 3.1.2. Därefter beräknas variationen av icke-elasticisk töjning i väggens längsgående riktning enligt Ekv. (3):

$$d\varepsilon^0 = d\varepsilon_T^0 + d\varepsilon_{SH}^0 \quad (3)$$

där $d\varepsilon_T^0$ and $d\varepsilon_{SH}^0$ är variationen av icke-elasticisk töjning på grund av temperatur respektive krympning. Sedan antas att sektionen av betongbiten förblir plan efter deformation och att den kan röra sig fritt i alla riktningar förutom i den längsgående riktningen där ett externt tvång, R_{ext} , tillämpas. Inget internt tvång beaktas i modellen förutom de egenspanningar som skapas på grund av den icke-linjära temperaturfördelningen genom väggen. Med tanke på att den totala töjningen är summan av den mekaniska (elasticiska) och icke-elasticiska töjningarna kan den mekaniska (lastberoende) töjningen bestämmas enligt Ekv. (4):

$$d\varepsilon_m = (1 - R_{ext})d\varepsilon^0 - d\varepsilon^0 \quad (4)$$

Slutligen kan spänningsvariationen i betongen vid en godtycklig tid $t > t_0$, uttryckas i termer av variationen av mekanisk töjning enligt Ekv. (5):

$$d\sigma(t) = R(t, t_0)d\varepsilon_m(t_0) \quad (5)$$

där $t_0 [h]$ är den tid då variationen av mekanisk töjning $d\varepsilon_m$ inträffar, och $R(t, t_0) [GPa]$ är relaxationsfunktionen som beskriver materialets viskoelasticiska beteende under en konstant hållen töjning. Relaxationsfunktionen är inversen av eftergivlighetsfunktionen $J(t, t_0)$ och den kan härledas som beskrivs i [Westman 1999].

4.1.2 Ekvationer som beskriver betongens egenskaper

I detta avsnitt presenteras de viktigaste ekvationerna som används för att beskriva betongens termiska och mekaniska beteende. Även om det finns i litteraturen många olika modeller för att beskriva var och en av betongens egenskaper, har många av ekvationerna som används i Contest Pro [ref] valts i denna studie. Detta för att

underlätta införlivandet av materialparametrar från dess databas, jämförelse av resultat och efterföljande validering av modellen.

Hydratationsvärme

Mängden värme som frigörs under cementets hydratation beskrivs med Ekv. (6):

$$W = W_U e^{-\lambda_1 \left[\ln \left(1 + \frac{t_e}{t_1} \right) \right]^{-\kappa_1}} \quad (6)$$

där $W \left[\frac{J}{kg} \right]$ är värmen per vikten av bindemedel som frigörs vid en ekvivalent ålder $t_e [h]$, $W_U \left[\frac{J}{kg} \right]$ är den slutliga värmen per vikten av bindemedel vid fullständig hydratation och $\lambda_1 [-]$, $t_1 [h]$, $\kappa_1 [-]$ är justeringsparametrar.

Ekvivalent ålder och mognadsfunktion

För att beakta effekten av temperaturen på hydratationsprocessen och den efterföljande utvecklingen av betongens egenskaper används begreppet ekvivalent ålder. Den ekvivalenta åldern representerar varaktigheten av härdningsperioden vid en referenstemperatur, oftast 20°C (293K), som skulle resultera i samma mognad. Den ekvivalenta åldern kan beräknas enligt Ekv. (7).

$$t_e = \sum \beta_T \Delta t \quad (7)$$

där $\Delta t [h]$ en liten tidsintervall och $\beta_T [-]$ är mognadsfunktionen, som i detta studie baseras på Arrhenius ekvationen enligt Ekv. (8):

$$\beta_T = \exp \left(\theta \left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T + 273} \right] \right) \quad (8)$$

där $T [^{\circ}C]$ är betongens temperatur och $\theta [K]$ är förhållandet mellan aktiveringsenergin och allmänna gaskonstanten som kan uttryckas som en funktion av temperaturen enligt Ekv. (9) [Jonasson 1984]:

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{E_a}{R} = \theta_{ref} \left(\frac{T_{ref} + 10}{T + 10} \right)^{\kappa_3} & T > -10^{\circ}C \\ \theta &= \infty & T \leq -10^{\circ}C \end{aligned} \quad (9)$$

där $\theta_{ref} [K]$ är förhållandet mellan aktiveringsenergin och allmänna gaskonstanten vid referenstemperaturen and $\kappa_3 [-]$ är en justeringsparameter som bestäms experimentellt.

Hållfasthetsutveckling

Utvecklingen av tryckhållfasthet kan beskrivas som en funktion av den ekvivalenta åldern enligt ekvation (10):

$$f_{cc} = f_{cc,28d} \exp \left[s \left(1 - \left(\frac{672 - t_s}{t_e - t_s} \right)^{n_{cc,28}} \right) \right] \quad (10)$$

där $f_{cc,28d}$ [MPa] är betongens tryckhållfasthet efter 28 dagars härdning i referenstemperaturen, t_s [h] är ekvivalent härdningstid och s [-] är en formparameter som bestäms genom experimentell passning. Det bör noteras att Ekv. (10) är en mer generell ekvation för hållfasthetsutvecklingen där parametern $n_{cc,28}$ [-] introduceras, som i ConTest Pro anses vara 0.5.

Analogt kan utvecklingen av betongens draghållfasthet beskrivas med Ekv. (11):

$$f_{ct} = f_{ct,28d} \left(\frac{f_{cc}}{f_{cc,28d}} \right)^{\beta_1} \quad (11)$$

där $f_{ct,28d}$ [MPa] representerar draghållfastheten hos betong vid 28 dagars härdning under referenstemperatur och β_1 är en ytterligare parameter för att beakta att draghållfastheten utvecklas snabbare än tryckhållfastheten.

Elasticitetsmodul

Utvecklingen av betongens elasticitetsmodul beskrivs som en funktion av ekvivalent ålder med hjälp av ett uttryck av analog form som för hållfastheten enligt Ekv. (12):

$$E_c = E_{c,28d} \left(\frac{f_{cc}}{f_{cc,28d}} \right)^{\eta_E} \quad (12)$$

där $E_{c,28d}$ [GPa] är betongens elasticitetsmodul vid 28 dagars härdning i referenstemperaturen och exponenten η_E [-] är en parameter som tar hänsyn till den snabbare utvecklingen av elasticitetsmodulen jämfört med hållfastheten. För enkelhetens skull antas parametrarna t_s , s , and $n_{cc,28d}$ förbli konstanta i Ekv. (10)-(12).

Krypning

Det viskoelastiska beteendet hos betong beskrivs i denna studie med användning av "Double Power Law" krypmodellen enligt Ekv. (13):

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} (1 + \varphi t_0^{-d} (t - t_0)^p) \quad (13)$$

där $J(t, t_0)$ [GPa⁻¹] är värdet av krypfunktionen vid en tidpunkt t orsakad av ett spänningssteg som inträffar vid tidpunkten $t_0 < t$, $E_c(t_0)$ [GPa] är betongens elasticitetsmodul vid belastningsåldern och φ , d and p är anpassningsparametrar som styr funktionsformen.

Det kan noteras i ConTeSt används en krypmodell som kallas den linjära logaritmiska modellen (LLM) [88], [89], men i Norska CrackTeSt COIN används "double power law".

Autogen krympning

Betongens autogena krympning, ε_{SH}^0 [-], beskrivs som en funktion av ekvivalent ålder enligt Ekv. (14):

$$\varepsilon_{SH}^0 = \varepsilon_{SH}^{ref} \exp\left(-\left[\frac{t_{s1}}{t_e - t_{s0}}\right]^{\eta_{SH}}\right) \quad (14)$$

där ε_{SH}^{ref} [-] är det slutliga värdet för den autogena krympningen efter en lång tid, är t_{s0} [h] tiden då den autogena krympningen börjar utvecklas, och t_{s1} [h] and η_{SH} [-] är anpassningsparametrar som styr formen på krympkurvan.

Termiskt inducerad töjning

Variationen av spänningsoberoende töjning orsakad av en ökning eller minskning av temperaturen, ε_T^0 [-], beskrivs av Ekv. (15):

$$\frac{\partial \varepsilon_T^0}{\partial t} = \alpha_T \frac{\partial T}{\partial t} \quad (15)$$

där α_T [$^{\circ}C^{-1}$] är betongens temperaturutvidgningskoefficient, som i denna studie tas som ett konstant värde och lika för både positiva och negativa temperaturändringar.

4.2 Materialparametrar

Som tidigare nämnts togs de parametrarna i Ekv. (6)-(15) som används för att beskriva betongens materialbeteende från ConTest Pro-databasen. Specifikt valdes en C32/40 betong med anläggningcement, $v_{ct} = 0,40$ och en cementhalt på 420 kg/m^3 . Att denna betong valdes och inte en "klimatförbättrad" betong är att det finns mycket erfarenhet kring denna typ av betong medans det för klimatförbättrad betong föreligger en del osäkerheter kring materialparametrarna. I Tabell 7 listas parametrarna i databasen för den betong som användes.

Tabell 7. Materialparametrar från ConTest Pro för den valda betongen.

W_U [kJ/kg]	λ_1 [-]	t_1 [h]	κ_1 [-]	θ_{ref} [K]
325	2.2	4.75	1.65	4200
κ_3 [-]	$f_{cc,28d}$ [MPa]	$f_{ct,28d}$ [MPa]	s [-]	t_s [h]
0.5	48	3.45	0.331	5.56
β_1 [-]	ε_{SH}^{ref} [$\mu\varepsilon$]	t_{s1} [h]	t_{s0} [h]	η_{SH} [-]
0.667	-136.8	120	24	0.3
ρ [kg/m ³]	c [J/kg $^{\circ}C$]	k [W/m $^{\circ}C$]	$\alpha_{T,E}$ [$^{\circ}C^{-1}$]	$\alpha_{T,C}$ [$^{\circ}C^{-1}$]
2350	1000	2.1	$11 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$

Temperaturutvidgningskoefficienten, som i ConTest Pro har olika värde för positiva och negativa temperaturgradienter, valdes som medelvärde för båda som $\alpha_T = 10^{-5}$.

När det gäller parametrarna som styr det viskoelastiska beteendet hos betong, tillhandahåller materialdatabasen för ConTest Pro ett relaxationsspektrum, som visas i Tabell 8:

Tabell 8. Relaxationsspektrum för C32/40 betong med anläggningscement.

Loading ages, t_0	E_μ [GPa] for the following retardation times							
	τ_1 0.005	τ_2 0.05	τ_3 0.5	τ_4 5	τ_5 50	τ_6 500	τ_7 5000	τ_8 10^{15}
[d]	[d]	[d]	[d]	[d]	[d]	[d]	[d]	[d]
0.25	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.50	0.83	0.25	3.41	1.13	0.77	0.43	0.12	0.10
1.08	2.60	4.68	8.80	3.69	3.91	2.14	0.69	0.73
2.32	2.06	4.14	7.99	7.04	6.18	3.42	1.07	0.67
5.00	1.23	2.68	5.80	8.10	7.08	3.86	1.22	3.06
10.77	0.78	1.74	4.07	7.24	7.30	4.02	1.28	6.87
23.21	0.52	1.22	2.86	6.05	7.45	4.32	1.37	9.64
50.00	0.39	0.92	2.17	4.95	7.51	4.88	1.53	11.19
107.72	0.32	0.74	1.80	4.13	7.44	5.71	1.81	11.61
232.08	0.28	0.64	1.61	3.61	7.26	6.70	2.31	11.18

Data i Tabell 8 representerar värdena för fjädrarnas elastiska konstanter i en Maxwellkedja med 8 element där varje rad i tabellen beskriver beteendet vid olika ålder. Från dessa data är det möjligt att extrahera information om utvecklingen av elasticitetsmodulen såväl som parametrarna som styr krypfunktionen. Baserat på det givna relaxationsspektrumet, kan värdet av relaxationsfunktionen vid en tidpunkt t för ett töjningsinkrement applicerat vid en tidpunkt t_0 beräknas enligt Ekv. (16) som:

$$R(t, t_0) = \sum_{\mu} E_{\mu}(t_0) \cdot \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_{\mu}}\right) \quad (16)$$

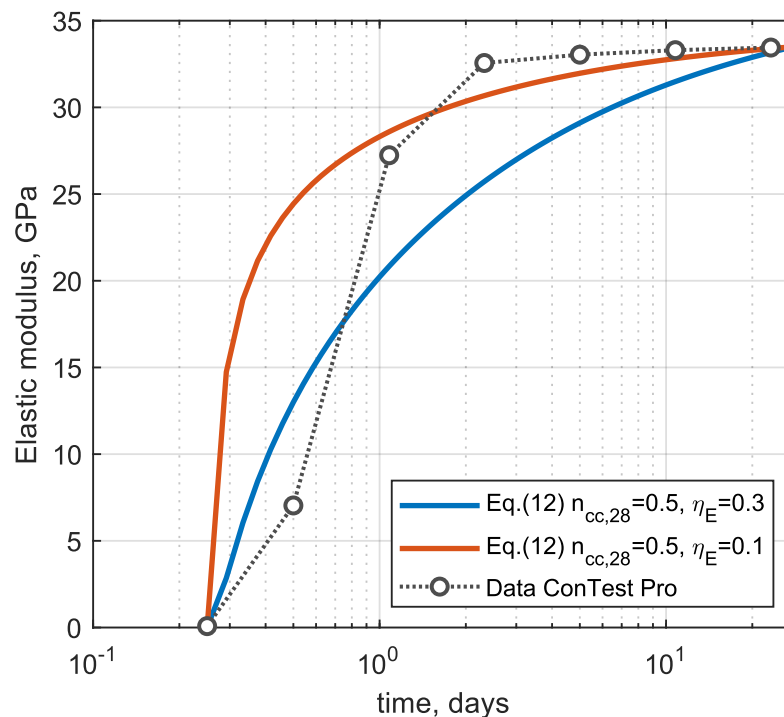
När $t = t_0$ Ekv.(16) returnerar värdet av E_c vid t_0 . Genom att beräkna värdet av E_c vid olika belastningsålder är det sedan möjligt att uppskatta värdet av $E_{c,28d}$. Tabell 9 presenterar de olika värdena för $E_c(t_0)$, vilket visar att $E_{c,28d}$ är ungefär 33.5 GPa. Med de värden som presenteras i Tabell 9 är det emellertid också möjligt att jämföra hur väl parametrarna $s, n_{cc,28}$, and η_E passar utvecklingen av elasticitetsmodulen som extraherats från relaxationsspektrumet.

I Figur 5 jämförs värdena i Tabell 9 med kurvan som ges av Ekv. (12) och parametrarna i Tabell 7, där η_E har tagits som 0.3 enligt Eurocode 2 [90]. Utvecklingen av elasticitetsmodulen erhållen från data i Tabell 8 med användning av Ekv. (16) är synligt snabbare än den som ges av Ekv. (12). Man skulle kunna ifrågasätta om det är rimligt att nå 80% av referensvärdet vid 28 dagar efter bara 24 timmar. En kurva till presenteras

ändå i Figur 5, där η_E minskades till ett värde av 0.1, vilket uppnår en bättre överensstämmelse för $t > 1 \text{ day}$, även om elasticitetsmodulen kraftigt överskattas vid mycket tidiga åldrar.

Tabell 9. Beräkning av elasticitetsmodulen vid olika lasttider.

t_0	$E_c(t_0)$
[d]	[GPa]
0.25	0.08
0.50	7.04
1.08	27.24
2.32	32.56
5.00	33.04
10.77	33.30
23.21	33.45
50.00	33.53



Figur 5. Jämförelse mellan utvecklingen av elasticitetsmodulen enligt data i Tabell 3 från Contest Pro och Ekv. (12) med olika ingångsparametrar.

Slutligen, för att erhålla värdena för parametrarna φ , d and p i Ekv. (13) utfördes en inversanpassningsprocedur med användning av spänningsresultaten från en analys i ConTest Pro. Proceduren innebar att variera parametrar ovan för att hitta en kombination som minimerar medelkvadratfelet mellan spänningen som ges av modellen och spänningen från ConTest. Den inversa analysproceduren resulterade i följande värden $\varphi = 1.72$, $d = 0.32$ och $p = 0.26$.

Förutom alla materialparametrar relaterade till betongens beteende kräver modellen också värmeöverföringskoefficienten vid ytan och omgivningstemperaturen enligt Ekv. (2). Den senare bör väljas enligt den förväntade lufttemperaturen på platsen men för jämförelsen med ConTest väljs den som ett konstant värde lika med 20 °C under hela analysen. Värmeöverföringskoefficienten å andra sidan beror huvudsakligen på formen och vindhastigheten. I ConTest, uttrycket som ges av Ekv. (17) föreslås för en yta i kontakt med luften (dvs utan form):

$$h_{free} = \begin{cases} 5.6 + 3.95v & \text{för } v \leq 5 \text{ m/s} \\ 7.8v^{0.78} & \text{för } v > 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (17)$$

där v [m/s] vindhastigheten. När formsättning finns, kan värmeöverföringskoefficienten vid ytan beräknas som en ekvivalent värmeöverföringskoefficient, h_{surf} , det vill säga summan av de olika skikten i serie som:

$$h_{surf} = \left(\frac{1}{h_{free}} + \sum_i \frac{l_i}{k_i} \right)^{-1} \quad (18)$$

där l_i [m] och k_i $\left[\frac{W}{m^2C} \right]$ är tjockleken och värmeledningsförmågan för det i :te materialet i formsättningen. För enkelhetens skull och lättare jämförelse av resultaten beaktas dock ingen formsättning eller isolering medan en vindhastighet på 1 m/s väljs, vilket enligt Ekv. (17) resulterar i en värmeöverföringskoefficient $h_{conv} = h_{free} = 9.55 \frac{W}{m^2C}$.

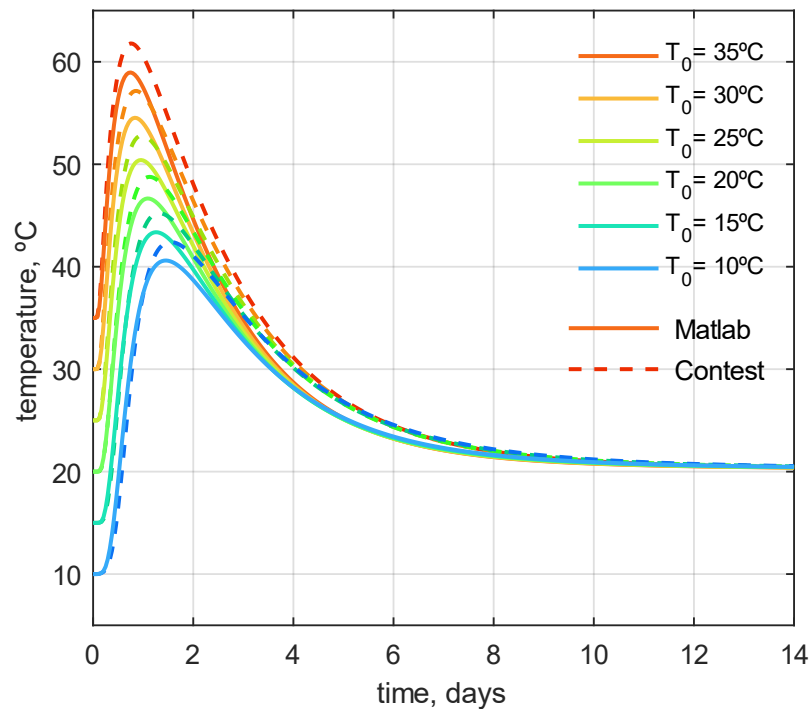
4.3 Validering av modellen (Jämförelse med Contest Pro)

I det här avsnittet jämförs resultaten av modellen med hjälp av parametrarna som presenteras i avsnitt 3.2 med resultatet från Contest Pro när det gäller temperatur- och spänningsutvecklingen för en rad värden för betongens utgångstemperatur, nämligen mellan 10°C och 35°C i steg på 5°C.

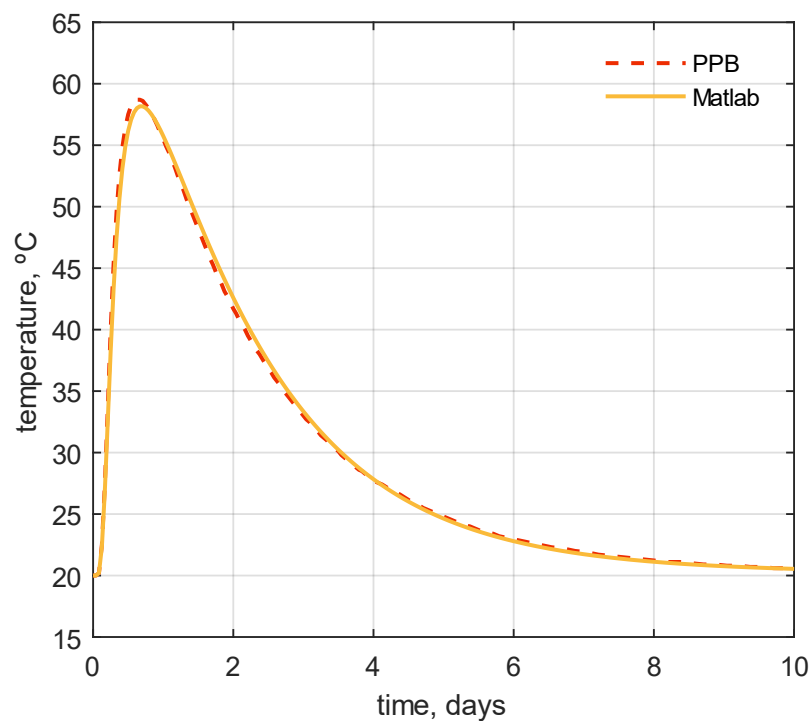
I Figur 6 presenteras temperaturutvecklingskurvorna i mitten av väggskivan under en period av 14 dagar för de 6 utgångstemperaturerna som studerats. Man kan se att den implementerade modellen generellt visar en relativt god överensstämmelse med Contest Pro. I synnerhet är den utgångstemperaturökningen under de första 24 timmarna nästan identisk för båda modellerna. Matlab-modellen underskattade dock konsekvent topptemperaturen som förutspåts av Contest Pro, som visar en maximal temperatur mellan 2°C och 3°C högre.

För att ytterligare verifiera modellens beteende genomfördes också en verifiering med programvaran Produktionsplanering Betong (PPB). En materialmodell skapades med samma ingångsparametrar som tidigare beskrivits. Det måste dock noteras att PPB antar att parametern λ_1 i Ekv. (6) är alltid lika med 1, vilket är en "förenkling" som infördes när ConTest Pro utvecklades. Därför justerades detta i modellen. Figur 7, illustrerar jämförelsen mellan modellen och resultaten av PPB för fallet med utgångstemperatur på betongen lika med 20°C, vilket visar en mycket bättre överensstämmelse mellan de två. Dessa resultat antyder att den termiska analysen i modellen är korrekt implementerad och att skillnaderna mellan modellen och resultaten från

ConTest Pro sannolikt beror på oavsiktlig oenighet mellan ingångsparametrarna, såsom värmeöverföringskoefficienten som är internt beräknad av ConTest.

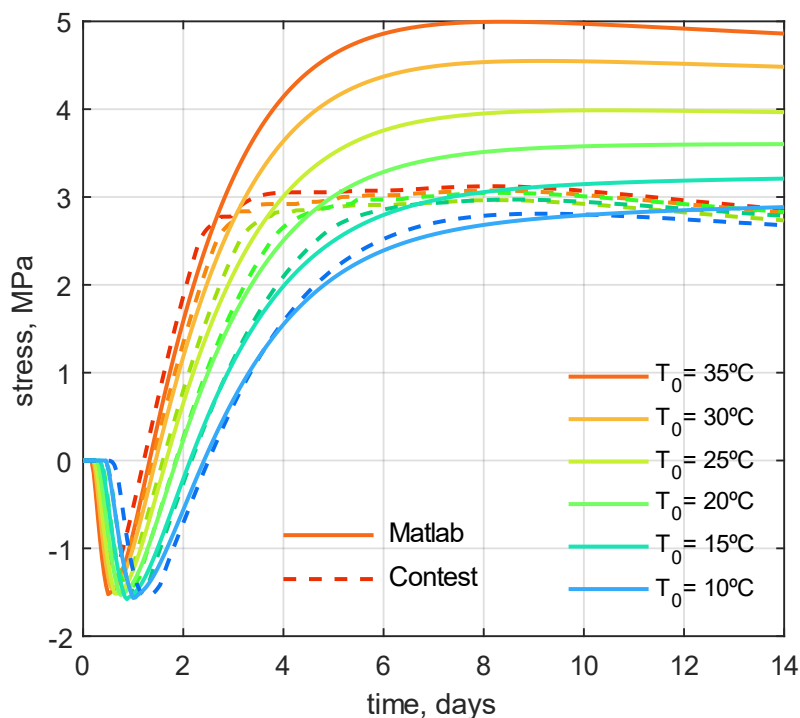


Figur 6. Jämförelse mellan temperaturutveckling beräknad med Contest Pro och den utvecklade modell för olika utgångstemperaturer.



Figur 7. Jämförelse mellan temperaturutveckling beräknad med PPB och den utvecklade modell för utgångstemperatur lika med 20°C.

Därefter jämförs spänningsresultaten av i Figur 8. Återigen observeras en generell överensstämmelse mellan de två modellerna, men med tydliga skillnader. För det första kan det observeras att tryckspänningarna i Matlab utvecklas snabbare än i Con-Test, vilket kan hänföras till skillnaden i utvecklingen av elasticitetsmodulen vid mycket tidiga åldrar, som visas i Figur 5. Ett liknande värde på maximala tryckspänningarna uppnås för båda modellerna varefter utvecklingen av dragspänningar också visar en någorlunda god överensstämmelse. Men när spänningarna närmar sig betongens draghållfasthet börjar kurvorna avvika eftersom den konstitutiva modellen implementerad i ConTest tar hänsyn till ett icke-linjärt spännings-töjningsförhållande som asymptotiskt närmar betongens draghållfasthet. Omvänt tar modellen implementerad i Matlab inte hänsyn till betongens draghållfasthet i beräkningen av spänningarna, vilket leder till spänningar som är betydligt högre än sprickhållfastheten. För utvärderingen av sprickrisken är dock resultaten efter att draghållfastheten har överskridits inte av intresse och kan bortses från.



Figur 8. Jämförelse mellan spänningsutveckling beräknad med Contest Pro och den utvecklade modell för olika utgångstemperaturer.

4.4 Valda parametrar till parameterstudie

Tabell 10 visar de parametrar som väljs för att studera deras inverkan på temperatur- och spänningsutvecklingen hos härdande betongelement som utsätts för yttre tvång. Totalt väljs 22 parametrar som beskriver utvecklingen av hydratationsvärmens, de mekaniska egenskaperna, inklusive draghållfasthet, viskoelastiskt beteende och krympning, samt termisk töjning och randvillkor, både värmeöverföring och tvånggrad.

Vissa parametrar varieras inte, såsom betongens densitet, specifik värmekapacitet samt värmeledningsförmåga, eftersom de förväntas variera relativt lite för typiska betongblandningar. Ytterligare parametrar som inte har modifierats i den parametriska analysen är anpassningsparametern λ_1 i Ekv. (6) och parametrarna t_{s0} och t_{s1} i Ekv. (14). Det främsta skälet till att inte ändra dessa parametrar är att minska antalet variabler, särskilt när de inte förväntas variera nämnvärt eller de används för att beskriva ekvationer för vilka flera andra parametrar redan beaktas. De parametrar som anses vara konstanta i analyserna presenteras i Tabell 11.

Tabell 10. Valda parametrar och referensvärde använd till parameterstudie

C_c	420 kg/m ³	β_1	0.667
W_u	325 kJ/kg	$E_{c,28d}$	33.5 GPa
t_1	4.75 h	η_E	0.33
κ_1	1.65	φ	2.05
θ_{ref}	4200 K	d	0.47
κ_3	0.5	p	0.24
T_{c0}	15 °C	ε_{SH}^{ref}	-136.8 $\mu\varepsilon$
$f_{ct,28d}$	3.45 MPa	η_{SH}	0.3
s	0.331	α_T	10 ⁻⁵ °C ⁻¹
t_s	6 h	h_{conv}	9.55 W/m ² °C
$n_{cc,28d}$	0.5	R_{ext}	0.833

Tabell 11. Parametrar som beaktas som konstant i analyserna och referensvärde

ρ [kg/m ³]	c [J/kg°C]	k [W/m°C]	λ_1 [-]	t_{s1} [h]	t_{s0} [h]
2350	1000	2.1	2.2	120	24

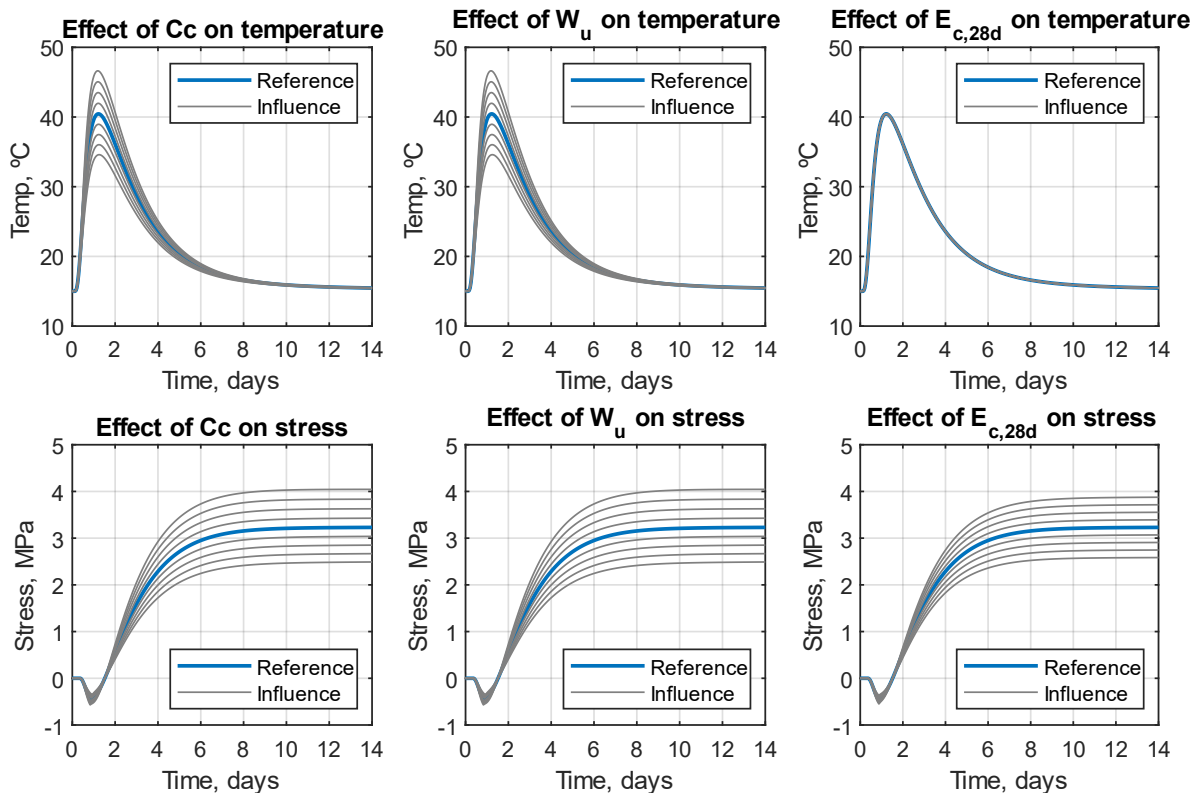
4.5 Parameterstudie en faktor i taget (OFaT)

När modellen har ställts in och validerats, och parametrarna som ska undersökas har bestämts, är det dags att genomföra den parametriska studien. Till att börja med används en faktor i taget-metod (OFaT) för att testa känsligheten för varje parameter individuellt och för att få en snabb känsla om vilka parametrar som har störst inverkan på modellens output.

Den parametriska OFaT-studien utfördes med värdena i Tabell 10 som utgångspunkt, och därefter varierade varje parameter mellan intervallet -20 % till +20 % i steg om 5 %. Det innebär att utöver referensfallet gjordes ytterligare 8 analyser för varje parameter, totalt 177 fall.

Figur 9 visar ett exempel på påverkan av tre parametrar, nämligen cementhalten, den ultimata hydratationsvärmen och elasticitetsmodulen vid 28 dagar, på både temperaturutvecklingen (översta raden) och spänningsutvecklingen (nedre raden). Resultaten som visas gäller mitten av väggskivan, där den högsta temperaturen uppnås.

I Figur 9 är effekten av cementhalten och det slutliga hydratationsvärmen ganska lika både för temperatur- och spänningsutvecklingen, medan elasticitetsmodulen, som förväntat, inte hade någon inverkan på temperaturen men den påverkade spänningarna på ett liknande sätt.

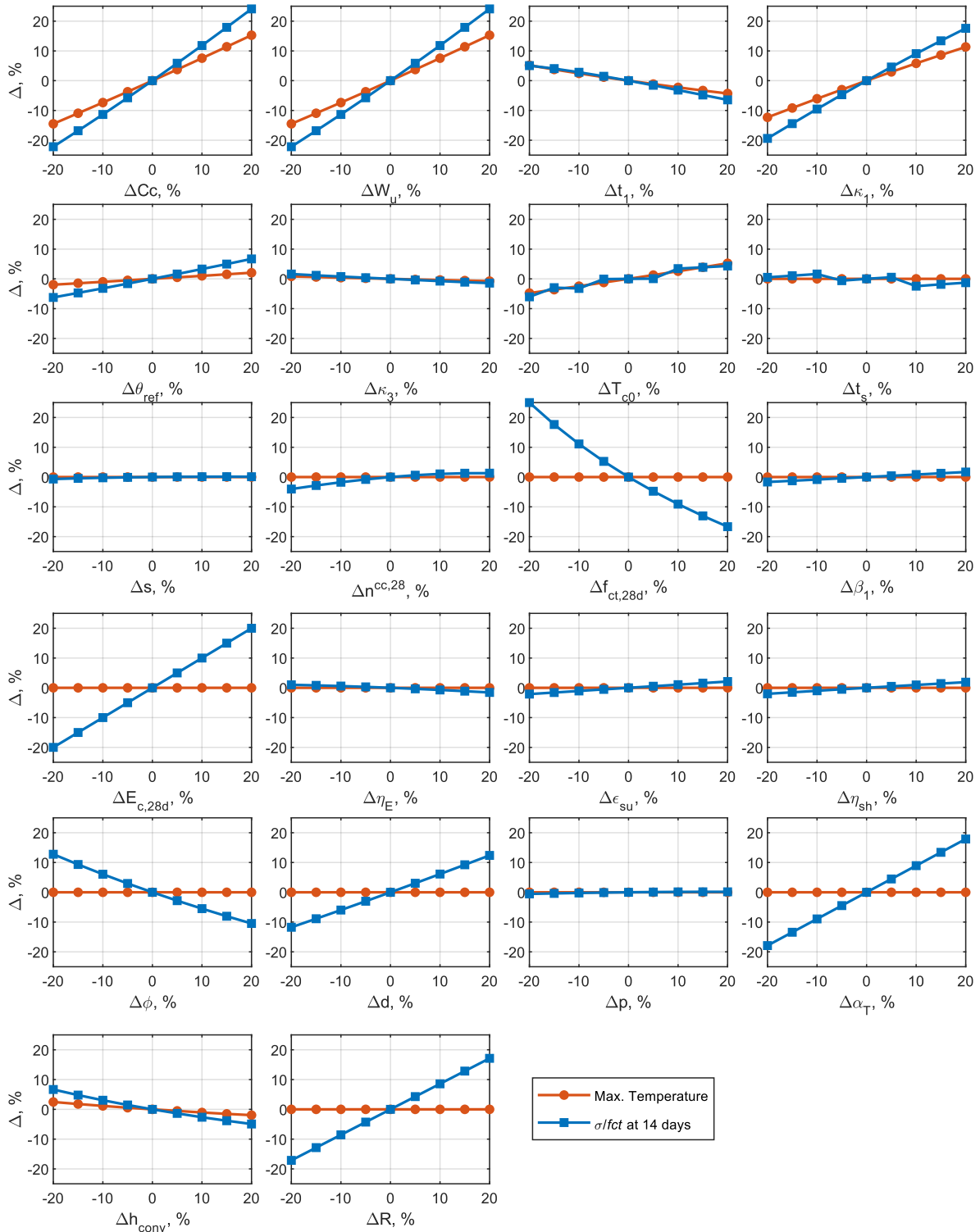


Figur 9. Exempel av påverkan av olika parametrar på temperatur- och spänningsutveckling.

För att möjliggöra ett direkt sätt att jämföra effekten av varje variabel och tillhandahålla ett sätt att visualisera känsligheten för de olika parametrarna, i Figur 10 plottas den relativa variationen i modellens resultat som en funktion av den relativa variationen av varje parameter med avseende på referensfallet. Resultaten ingår för både den maximala temperaturen som uppnåts i analysen samt för kvoten mellan spänning och hållfasthet i slutet av analysen, dvs efter 14 dagar.

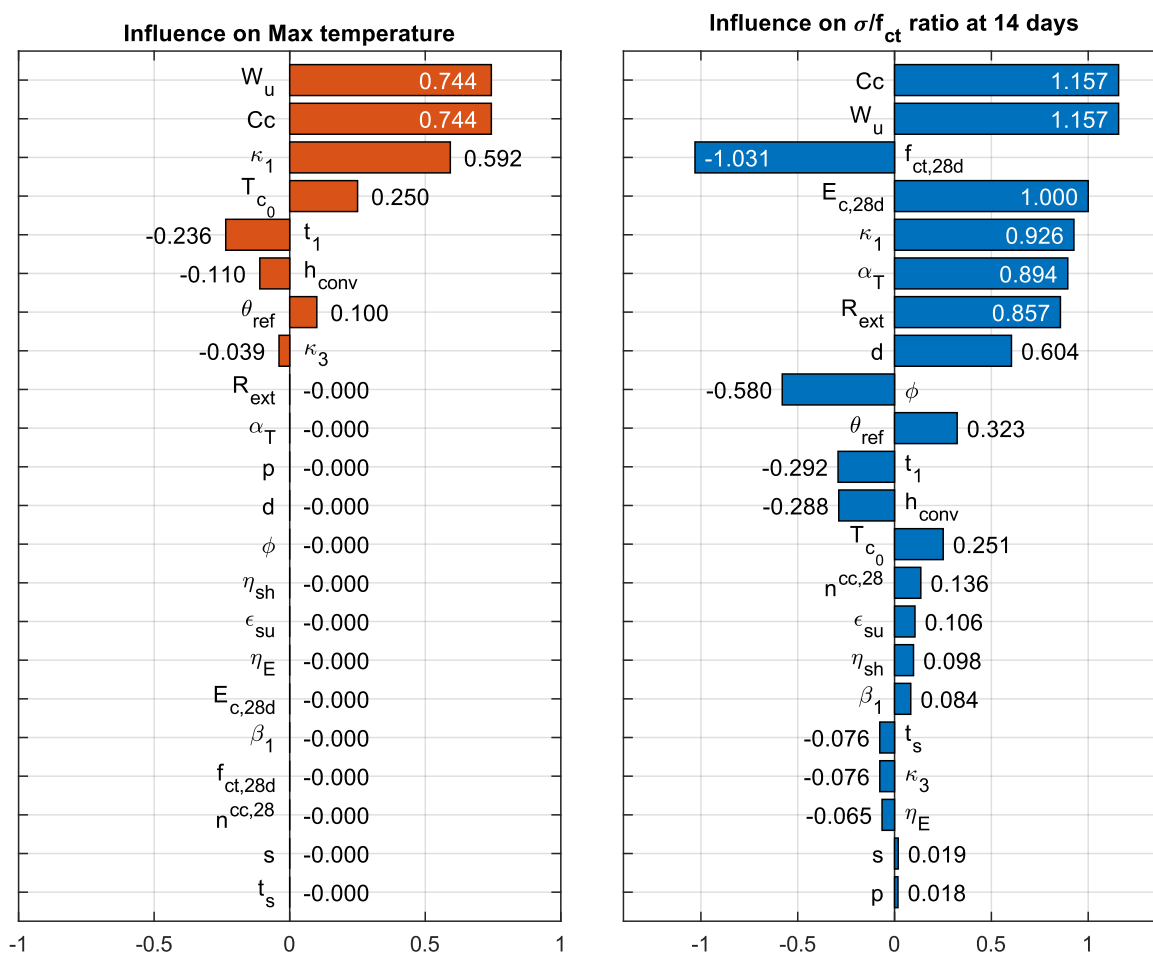
I Figur 10 kan man enkelt se vilka parametrar modellen är mest känslig för och om parametrarna har en positiv eller negativ korrelation med de visade resultaten. Det är också intressant att notera att när endast en parameter ändras åt gången, visar alla parametrar ett linjärt (eller nästan linjärt) förhållande till maximal temperaturen och spänningskvoten för det valda variationsområdet ($\pm 20\%$). Denna observation möjliggör en enkel kvantitativ jämförelse genom att utföra en linjär regressionsanalys på varje enskilt diagram.

I Figur 11 presenteras koefficienten för den linjära regressionsanalysen (lutningen av den räta linjen) för varje parameter som ett tornadodiagram för både den maximala temperaturen och det slutliga spänningskvoten.



Figur 10. Relativa variationen av maximal temperatur och slutlig spänningskvot för alla undersökta parametrar.

Resultaten i Figur 11 indikerar att både cementshalten och slutvärdet av hydratationsvärmens, som är faktiskt tätt sammankopplade, har den största inverkan på både den maximala uppnådda temperaturen och det slutliga spänningskvoten. Detta kan förklaras av den dubbla effekten av dessa parametrar, å ena sidan på temperaturen som då kommer att påverka den termiska töjningen, men också på utvecklingshastigheten för elasticitetsmodulen. För spänningskvoten har drag-hållfastheten och elasticitetsmodulen, som förväntat, också en stark påverkan, följt av parametern κ_1 , temperaturutvidningskoefficient α_T och yttre tvångsgrad R_{ext} .



Figur 11. Påverkan av parametrar baserat på regressionskoefficienten från OFaT analysen.

Det är dock viktigt att notera att OFaT-metoden har flera begränsningar. Först och främst antar denna metod att alla parametrar är oberoende, när de parametrar som beaktas i denna studie i verkligheten är tätt sammankopplade. Dessutom har alla parametrar varierats individuellt med samma relativa storlek, dvs $\pm 20\%$. Även om detta tillvägagångssätt möjliggör att man kan jämföra känsligheten för varje parameter, kan en förändring på 20% i en viss parameter vara en orealistiskt hög variation medan andra parametrar kan variera över ännu ett bredare intervall.

För att övervinna dessa begränsningar och få resultat som är mer meningsfulla med avseende på den verkliga variation som dessa parametrar kan genomgå i verkligheten, genomförs en ytterligare parametrisk studie med Monte Carlo-simulering.

4.6 Monte Carlo simulering

4.6.1 Statistiska fördelningar av parametrar

För att ta hänsyn till parametrarnas variabilitet tilldelades en statistisk fördelning till varje parameter. För varje parameter hölls referensvärdet i Tabell 10 som medelvärde av fördelningen. När det gäller typen av fördelning och variabiliteten, det vill säga variationskoefficienten, baserades de valda värdena på arbetet utfört av Krauss [50] i sin Doktorsavhandling.

När det gäller parametrarna som beskriver det viskoelastiska beteendet hos betong, skilde sig krypfunktionen som användes i [50] från funktionen i Ekv. 13. Därför utfördes en preliminär analys för att bestämma variationskoefficienten för parametrarna φ , d and p . Krypfunktionen som används i [50] kan uttryckas enligt Ekv. (19):

$$\varphi(t - t_0, t_0) = (a_1 - b_1 \alpha_0)(t - t_0)^{a_2} \quad (19)$$

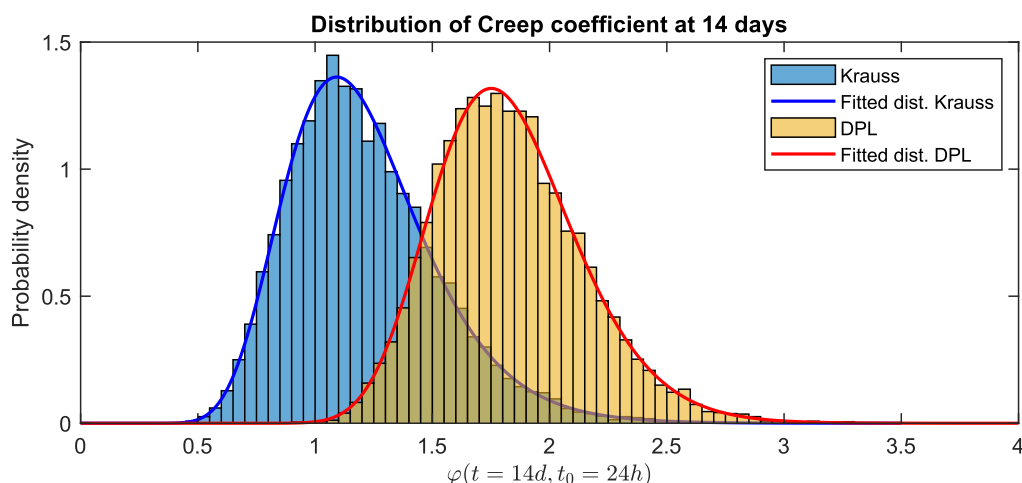
där α_0 är hydratationsgraden vid belastningsåldern och a_1 , b_1 och a_2 är anpassningsparametrar som är specifika för betongreceptet. Proceduren för att bestämma variabiliteten av parametrarna i "Double Power Law" krypfunktionen är följande:

1. Med hjälp av medelvärden, standardavvikelser och typ av fördelning som anges i [91], genererades 10 000 kombinationer av parametrarna a_1 , b_1 and a_2 .
2. Värdet på krypfunktionen vid 14 dagar beräknades för varje kombination med antagande av en belastningsålder på 24 timmar och en hydratationsgrad på 0.2.
3. En lognormalfördelning anpassas till den resulterande fördelningen av krypvärden.
4. Då med medelvärdena i Tabell 10 och tilldelning av en lognormalfördelning till parametrarna φ and p och en normalfördelning till d , genereras 10 000 kombinationer av dessa parametrar genom att välja ett godtyckligt värde för standardavvikelsen
5. Värdet på krypfunktionen vid 14 dagar beräknas baserat på "Double Power Law" med antagande om en belastningsålder på 24 timmar.
6. En lognormalfördelning anpassas till den resulterande fördelningen av krypvärden.
7. Variansen i fördelningen jämförs med variansen i fördelningen som hittades i steg 3.

Steg 4-7 upprepas, varvid standardavvikelsen för DPL-parametrarna varieras tills variansen för båda fördelningarna sammanfaller. I Figur 12 jämförs sannolikhetstäthetsfunktionen för krypfunktionen som används i [91] med den resulterande sannolikhetstäthetsfunktionen för DPL när variationskoefficienten tas som 7.5% av medelvärdet för de tre parametrarna φ , d and p .

Tabell 12 utökar medelvärdena som anges i Tabell 10 med variationskoefficienten och typen av fördelning för varje parameter. De resulterande fördelningarna för en slumpmässigt genererad uppsättning av 100 000 körningar presenteras i Figur 13. Det bör noteras att två parametrar exkluderades från analysen jämfört med OFaT-studien, nämligen värmeöverföringskoefficienten vid ytan och tvångsgrad.

Det främsta skälet till att exkludera dessa två parametrar är att deras värden inte enbart beror på betongens sammansättning utan att de främst påverkas av externa faktorer som typ och tjocklek på formmaterialet/isoleringen som används eller hur elementet anslutas till intilliggande delar och marken.



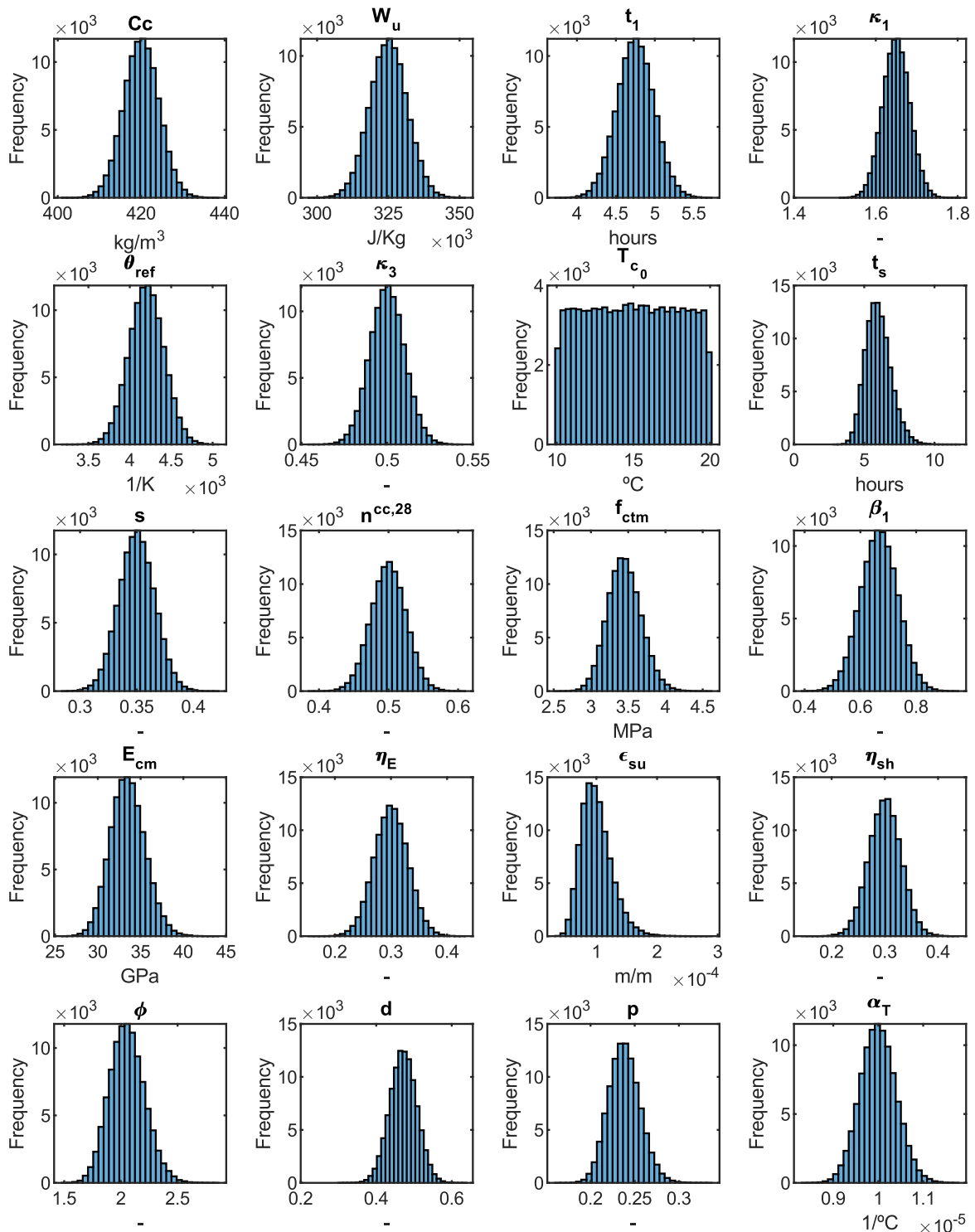
Figur 12. Jämförelse mellan sannolikhetsfunktionen för krypfunktionen från Krauss och double power law funktionen med en variationskoefficient lika med 7.5% av parametrarnas medelvärde.

Tabell 12. Statistiska fördelnings data för alla parametrar i Monte Carlo simulering.

Parameter	Enhet	Medelvärde	Std. avvikelse	CoV [%]	Fördelning
C_c	kg/m^3	420	4.2	1.0	Normal
W_u	kJ/kg	325	6.5	2.0	Normal
t_1	h	4.75	0.24	5.0	Normal
κ_1	-	1.65	0.033	2.0	Normal
θ_{ref}	K	4200	210	5.0	Normal
κ_3	-	0.5	0.01	2.0	Lognormal
T_{c0}	$^{\circ}C$	15	5*	—	Uniform
$f_{ct,28d}$	MPa	3.45	0.22	6.5	Lognormal
s	-	0.331	0.015	4.5	Normal
t_s	h	6	0.9	15.0	Lognormal
$n_{cc,28d}$	-	0.5	0.025	5.0	Normal
β_1	-	0.667	0.067	10.0	Normal
$E_{c,28d}$	-	33.5	2.01	6.0	Lognormal
η_E	-	0.33	0.033	10.0	Normal
φ	-	2.05	0.154	7.5	Lognormal
d	-	0.47	0.035	7.5	Normal
p	-	0.24	0.018	7.5	Lognormal
ε_{SH}^{ref}	$\mu\varepsilon$	-136.8	34.2	25.0	Lognormal
η_{SH}	-	0.3	0.03	10.0	Normal
α_T	$^{\circ}C^{-1}$	10^{-5}	$4 \cdot 10^{-7}$	4.0	Lognormal

* Den enhetliga fördelningen definieras av de nedre och övre gränserna

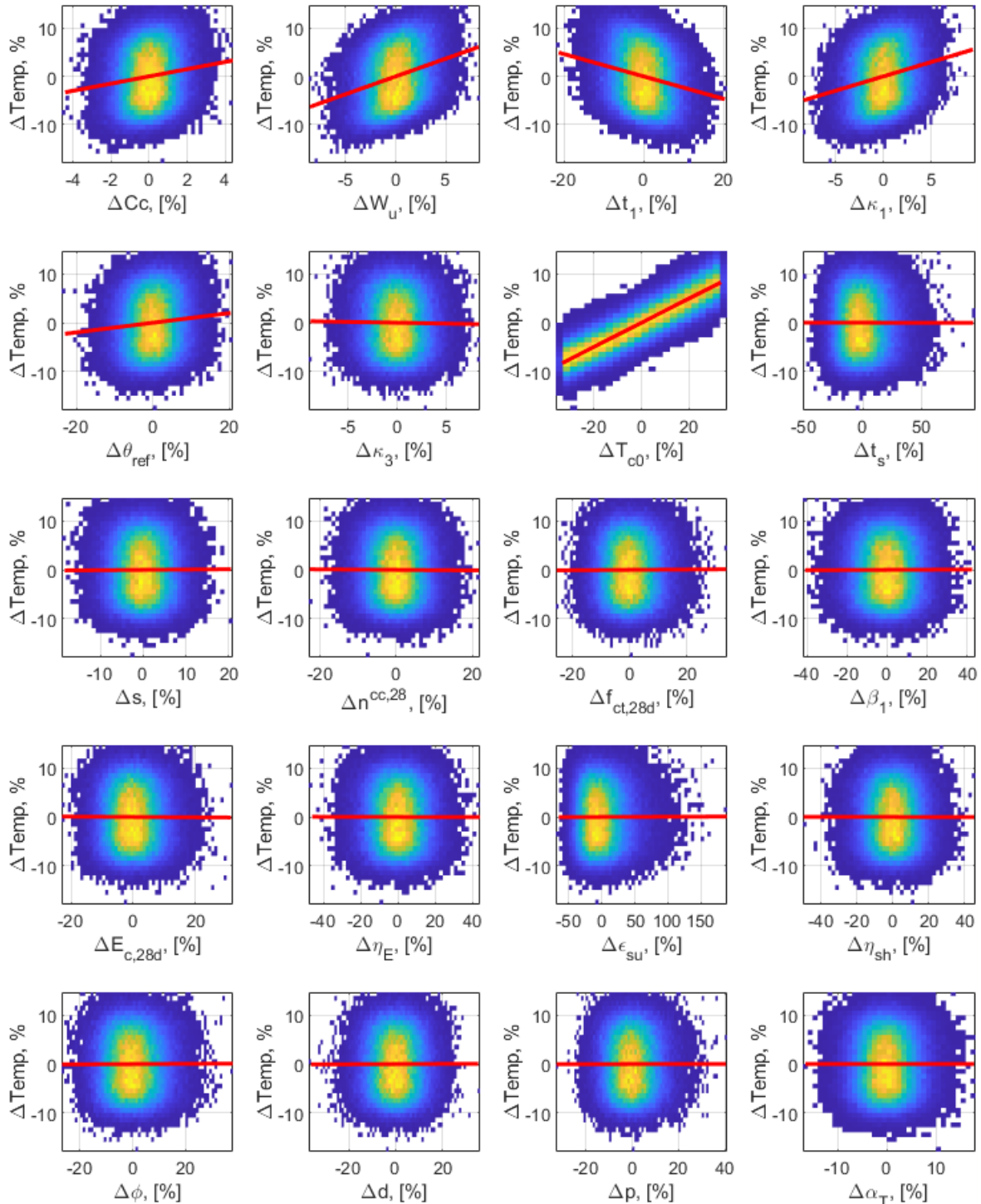
Dessutom kan värmeöverföringskoefficienten vid ytan i princip variera inom mycket stora intervall, vilket skulle kunna skugga inverkan av andra parametrar i analysen. Eftersom målet med detta arbete är att definiera en forskningsstrategi för utveckling av nya metoder och verktyg för att karakterisera nya betongrecept, undersöks inte effekten av dessa parametrar i Monte Carlo-simuleringen.



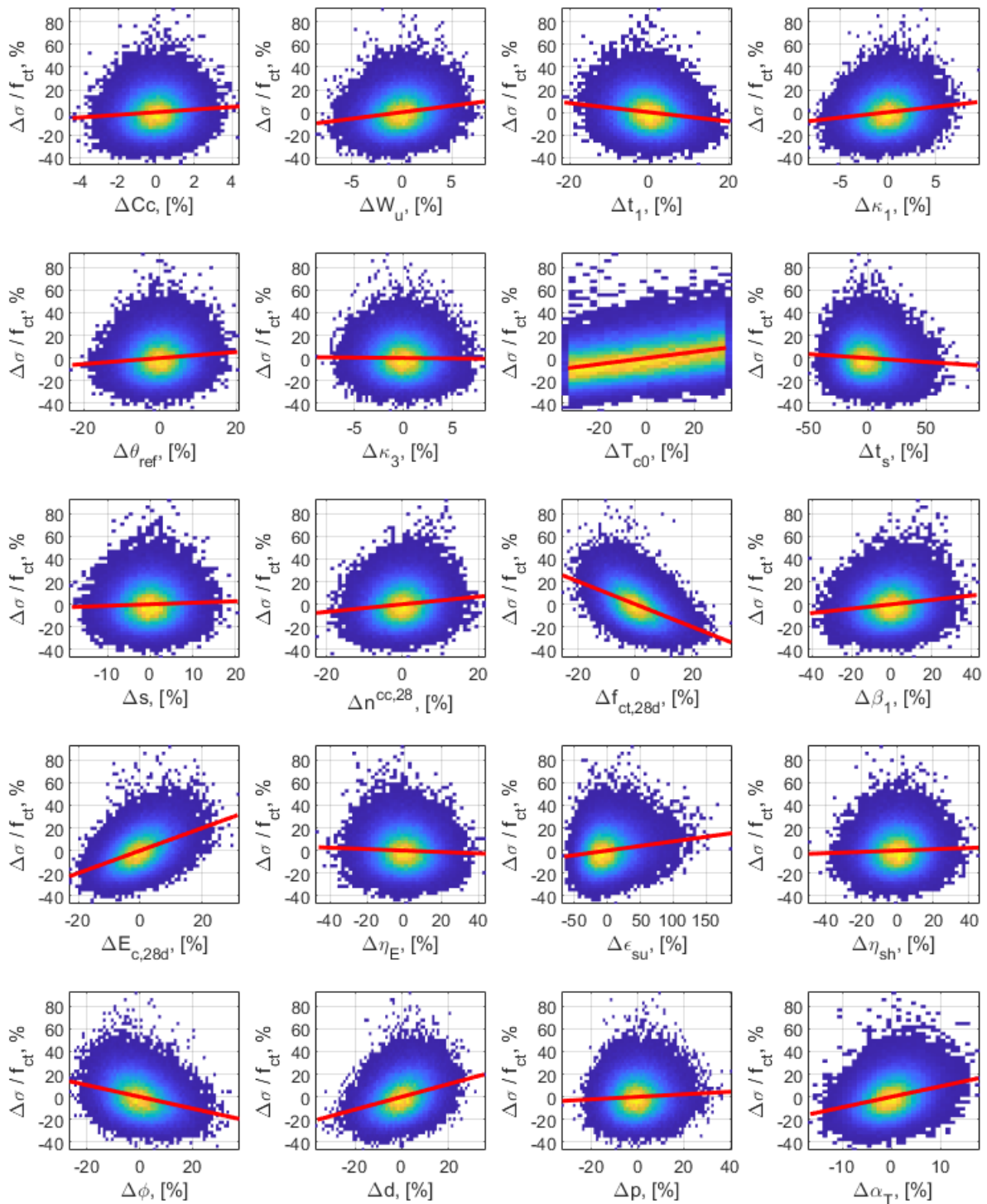
Figur 13. Statistiska fördelningarna för 10000 slumpmässigt genererade parameterkombinationer.

4.6.2 Analys av resultat

Resultaten av Monte Carlo-simuleringen presenteras i Figur 14 och Figur 15 för den maximala temperaturen respektive spänningskvoten vid 14 dagar. Varje figur består av 20 diagram där varje diagram presenterar en 2D-densitetsgraf mellan den studerade parametern och motsvarande utdatavariabel.



Figur 14. Resultat för maximal temperatur från Monte Carlo-simuleringen. Den röda linjen visar linjär regression anpassning.



Figur 15. Resultat för spänningskvitto från Monte Carlo-simuleringen. Den röda linjen visar linjär regression anpassning.

Eftersom alla parametrar har olika enheter och olika magnitudskalor har resultaten normaliserats till medelvärdet för varje parameter. Dessutom inkluderar diagrammen en röd linje som visar den linjära regressionen som passar bäst data.

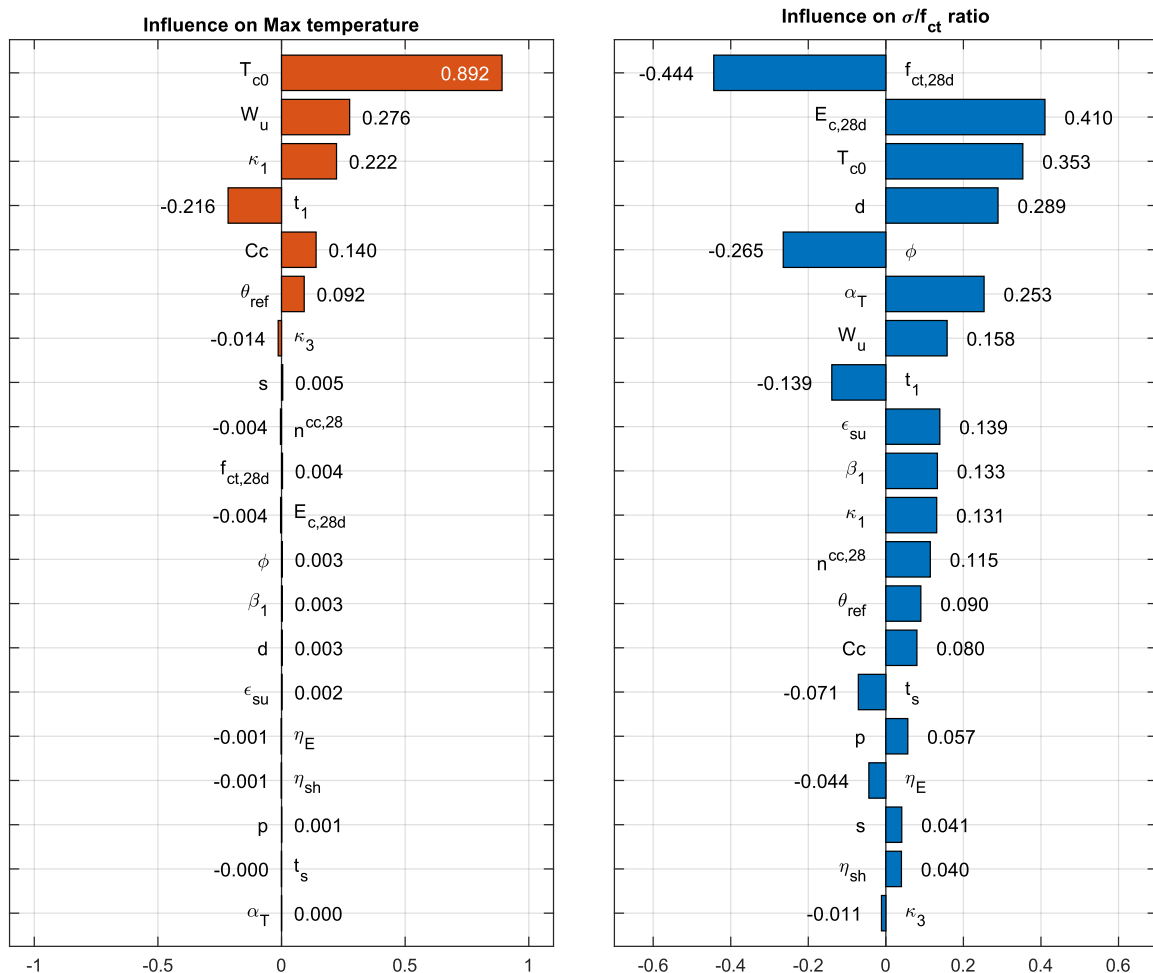
Korrelationsanalys

Det första sättet att undersöka resultaten av Monte Carlo-simuleringen är genom korrelationskoefficienten. Korrelationskoefficienten är ett mått på det linjära beroendet mellan två slumpvariabler, och den mäts vanligtvis med hjälp av Pearsons koefficient som beskrivs i Ekv. (20):

$$\rho(A, B) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right) \quad (20)$$

Där N är antalet observationer och μ_A, σ_A och μ_B, σ_B är medelvärdet och standardavvikelsen för variablerna A respektive B. Korrelationskoefficienten kan variera mellan 1 och -1, vilket indikerar perfekt linjär positiv respektive perfekt linjär negativ korrelation.

Korrelationskoefficienten presenteras i Figur 16 för den maximala temperaturen och spänningskvot vid 14 dagar som tornadodiagram.



Figur 16. Parametrars inverkan enligt korrelationskoefficienten från Monte Carlo simulering.

När det gäller maxtemperaturen visar resultaten från Monte Carlo-simuleringen att betongens initialtemperatur har den högsta korrelationskoefficienten medan

cementhalten, som betraktades som en mycket inflytelserik parameter i OFaT-analysen, visar en mycket lägre korrelationskoefficient.

På liknande sätt visar cementhalten och slutlig hydratationsvärme en låg korrelationskoefficient för spänningskvoten trots att de hade de största regressionskoefficienterna i OFaT-analysen. I stället visar draghållfastheten och elasticitetsmodulen de högsta korrelationskoefficienterna även om korrelationen fortfarande är svag med koefficienter under 0.5.

Eftersom korrelationskoefficienten undersöker sambandet mellan variabler, innebär en hög korrelation inte nödvändigtvis en hög påverkan av de oberoende variablerna över modellens resultat. Därför kan inte denna parameter ensam användas för att utvärdera parametrarna.

Linjär regressionsanalys

Som tidigare gjorts i OFaT-analysen har den linjära regressionskoefficienten, som motsvarar lutningen av röda linjer i Figur 14 och Figur 15, beräknats i minsta kvadratmetoden enligt Ekv. (21):

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (21)$$

där \bar{x}, \bar{y} är medelvärdena för den oberoende variabeln x_i och den beroende variabeln y_i . I Figur 17 presenteras koefficienten för den linjära regressionen för varje parameter som ett tornadodiagram för både den maximala temperaturen och det slutliga spänningskvoten.

Intressant nog gav den linjära regressionsanalysen från Monte Carlo-simuleringen mycket liknande resultat som den regressionsanalys som utfördes på OFaT-studien. Det bör dock noteras att den linjära regressionskoefficienten β är relaterad till Pearsons korrelationskoefficient enligt Ekv. (22):

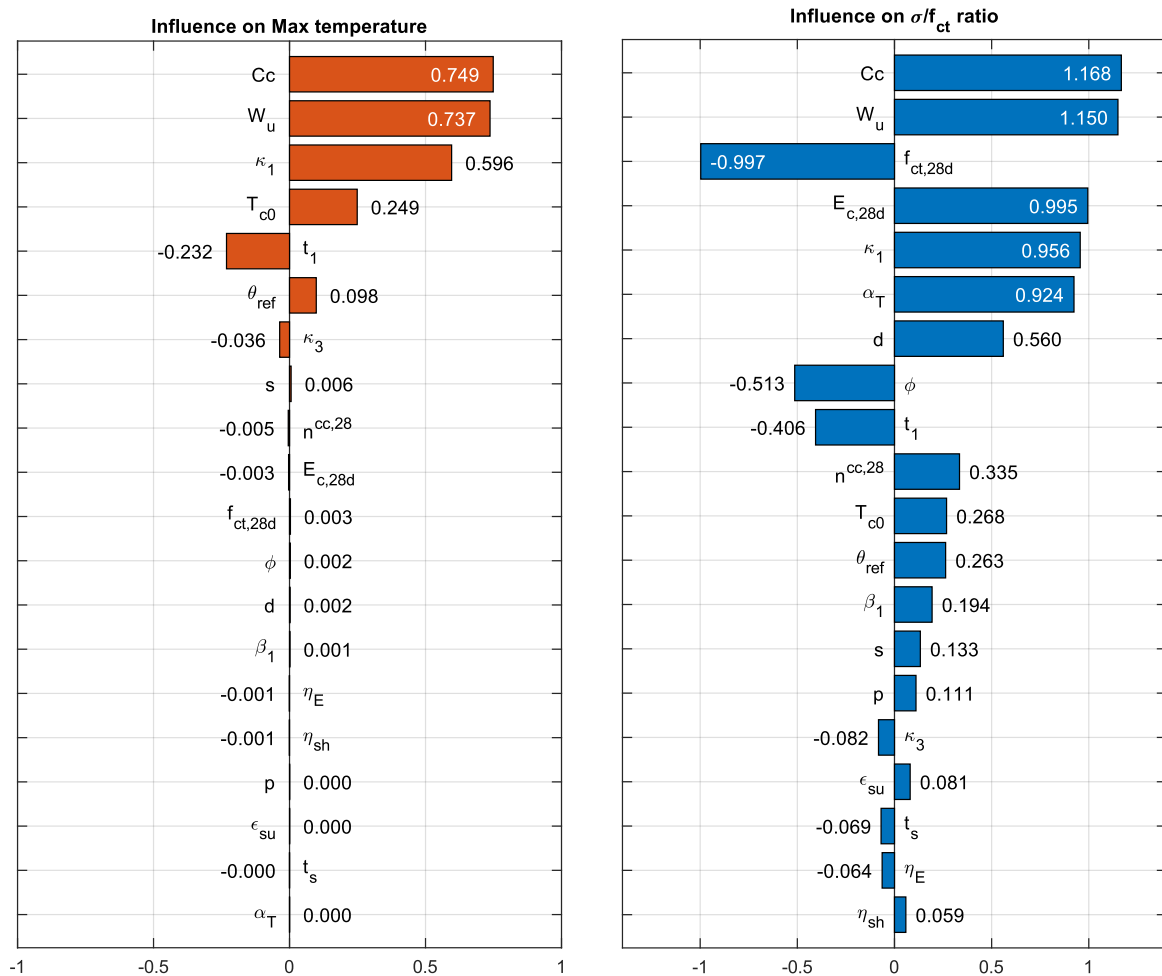
$$\beta = \rho(x, y) \frac{s_y}{s_x} \quad (22)$$

där s_x och s_y är de okorrigerade urvalets standardavvikelser av x_i och y_i definierad som:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (23)$$

Eftersom standardavvikelsen för den beroende variabeln är fixerad över de olika parametrarna, relateras sedan regressions- och korrelationskoefficienterna genom standardavvikelsen för den undersökta parametern. Detta förklarar varför, även om cementhalten har en korrelationskoefficient på endast 0.08 med spänningskvoten, på grund av dess lilla standardavvikelse på endast 0.01 (när det normaliseras med

medelvärde), är regressionskoefficienten större än draghållfastheten som visade en korrelationskoefficient på 0.44.



Figur 17. Parametrars inverkan enligt regressionskoefficienten från Monte Carlo simulering.

I det här fallet, på grund av spridningen i utgångsvariablerna, de låga korrelationskoefficienterna för de flesta parametrar och variabiliteten i variansen av parametrarnas fördelningar, är det också svårt att dra slutsatser endast baserat på regressionskoefficienterna.

Random Forest Feature Importance

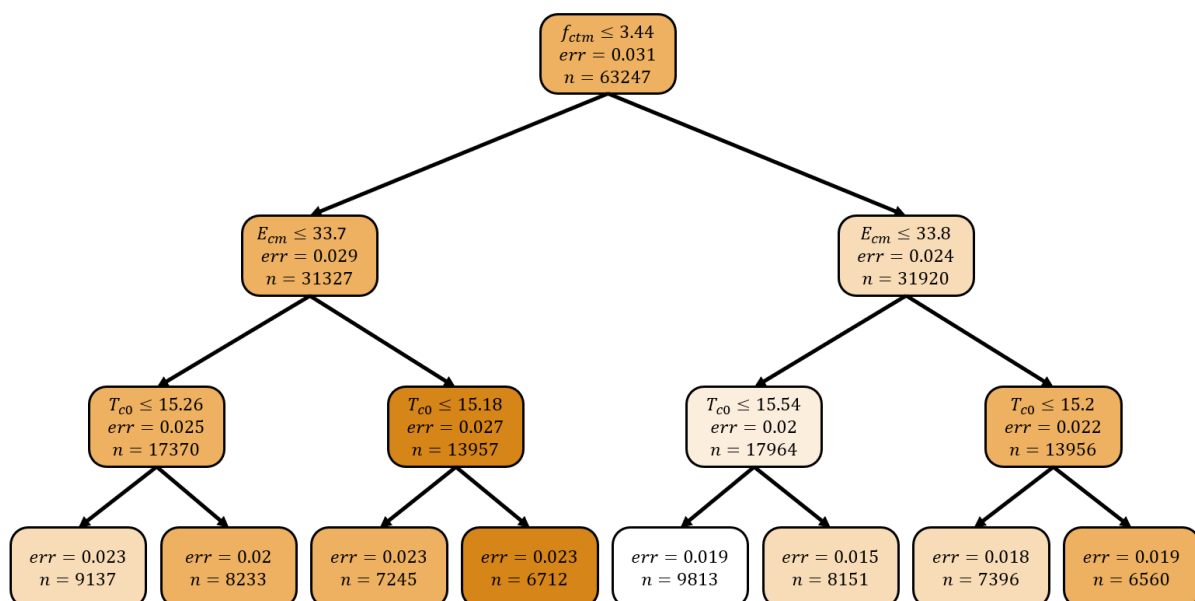
Med tanke på begränsningarna i den tidigare beskrivande statistiken för att dra exakta slutsatser om vilka parametrar som är mest inflytelserika för den maximala temperaturen och risken för sprickbildning, användes en tredje metod för att analysera resultaten från Monte Carlo-simuleringen.

I det här fallet tränades en random forest regressor med Python-biblioteket Scikit-learn. En random forest regressor är en ensemblemetod inom familjen av övervakade maskininlärningsalgoritmer som ger ett genomsnitt av utdata från flera randomiserade beslutsträd för att minska överanpassning [ref]. Modellen som tränades i den här studien

använde de 20 ingångsparametrarna som indata och utgångsvariablerna, temperatur eller spänningkvot, som markerade sanningsetiketter för att generera en prediktiv uppskattare.

Grundtanken bakom ett beslutsträd för regressionsproblem är att dela upp den oberoende variabel data på ett sätt så att medelkvadratfelet minimeras vid den punkten. Därefter upprepas samma operation med de nyskapade delmängderna på ett rekursivt sätt och en trädliknande struktur skapas.

Figur 18 visar ett exempel på ett litet beslutsträd med endast tre nivåer (träden i den faktiska random forest modellen som tränas har mer än 30 nivåer vilket gör dem svåra att visualisera). I detta träd visar varje nod antalet datapunkter, n , och medelkvadratfelet för delmängden, vilket minskar när delmängderna delas upp ytterligare. Villkoret som används för att dela upp delmängderna visas också för de övre noderna, medan färgen indikerar Gini-impurity i nodens delmängd, vilket är ett tal mellan 0-0.5 som indikerar sannolikheten för att en ny slumpmässig datapunkt blir felklassificerad. För ytterligare detaljer om random forest och beslutsträd hänvisas läsaren till dokumentationen av Scikit-learn.



Figur 18. Exempel av beslutsträd med tre nivåer.

En högre grad av randomisering kan uppnås genom att använda olika delmängder av indata och urval för varje träd, vilket ytterligare kan minska uppskattarens varians (minska överanpassning) i utbyte mot något högre bias. Men eftersom syftet med denna studie inte var att utveckla en modell som kan generalisera bra till osynliga observationer utan att åstadkomma en modell som kan förklara träningsdataset så exakt som möjligt, användes hela träningsdataset i alla beslutsträd.

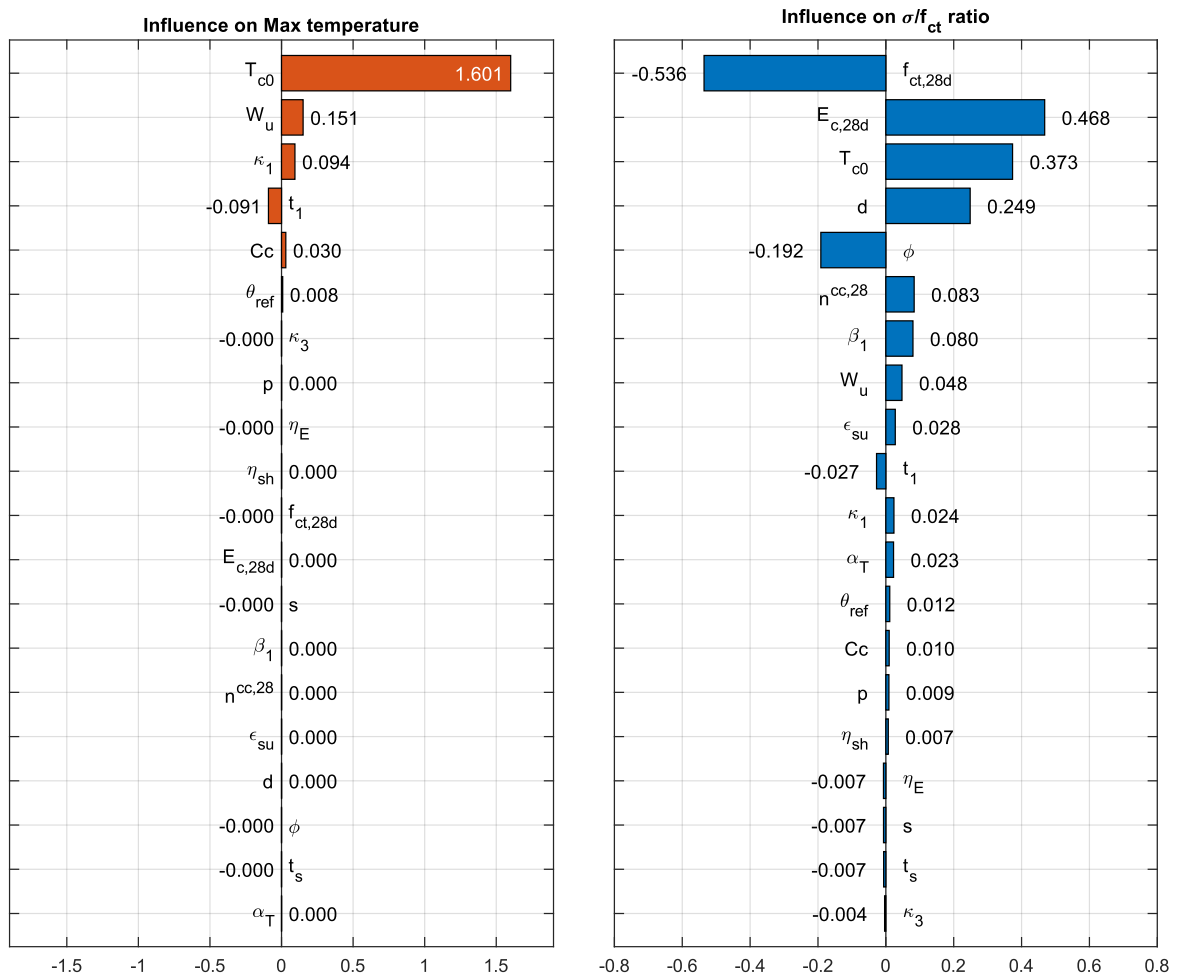
Den random forest modellen tränades med standardinställningar, d.v.s. 100 träd, och ett random state lika med 42 för reproducerbarhet, vilket uppnådde en R^2 -score (bestämningkoefficient) på 0.998 för maxtemperaturen och 0.963 för spänningkvoten.

För att utvärdera hur viktig varje parameter är för modellens förutsägelse genomfördes en permutationsviktighetsanalys, som mäter minskningen av modellens förutsägelse R^2 -score när en av parametrar blandas slumpmässigt. Formellt kan permutationsvikten för den j :te funktionen, pi_j , skrivas som:

$$pi_j = s - \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K s_{k,j} \quad (24)$$

Där s är score för den grundtränade modellen, K är antalet gånger funktionen blandas slumpmässigt och $s_{k,j}$ är score för modellen när den j :te parameter blandas på den k :te iterationen. Observera att eftersom R^2 -score kan vara ett negativt värde, kan permutationsviktigheten faktiskt vara större än 1.

I Figur 19 har värdena för permutationsviktigheten för alla parametrar presenterats som ett tornadodiagram för både den maximala temperaturen och det slutliga späningskvoten. Observera att permutationsviktighetsvärden alltid är positiva men i Figur 19 presenteras de med motsvarande tecken på korrelationskoefficienten.



Figur 19. Parametrars inverkan enligt permutationsviktigheten från Random Forest modell tränad med resultaten från Monte Carlo simulering.

Det är intressant att notera att ordningen för permutationsviktighetsvärdena överensstämmer med ordningen för korrelationskoefficienten för den maximala temperaturen och även för de fem viktigaste parametrarna för spänningskvoten. Särskilt betongens initiala temperatur spelade en avgörande roll för den förutspådda maximala temperaturen av modellen, mycket viktigare än någon av de andra parametrarna. När det gäller sprickrisken var draghållfastheten och elasticitetsmodulen de två viktigaste parametrarna, följt av betongens initialtemperatur och krypfunktionsparametrarna.

Det är värt att lyfta fram att på samma sätt som valet av den statistiska fördelningen och i synnerhet den lilla standardavvikelsen för vissa parametrar gjorde dem mycket känsliga i regressionsanalysen trots att de hade relativt låga korrelationskoefficienter, är den motsatta effekten tillämplig här, där en begränsad variation i intervallet för en ingångsparameter gör det mindre viktigt att förutsäga modellens utfall.

5 Diskussioner och rekommendationer

5.1 Diskussion av resultat från Omvärldsanalysen

Från litteraturstudien, workshoppen, studiebesöket och referensgruppsmötet identifierades flera aspekter som idag inte särskilt behandlas eller som kräver ytterligare utredning. Dessa aspekter kan klassificeras inom tre huvudkategorier, nämligen Provning och Materialegenskaper, Krav och Standarder samt Kvalitetskontroll, Övervakning och Verifiering. I det följande diskuteras några av de mest relevanta aspekterna som identifierats.

5.1.1 Provning och Materialegenskaper

En betydelsefull aspekt vid bestämning av materialparametrar genom provning är att säkerställa att den nödvändiga data samlas in med önskad noggrannhetsnivå. Detta kan uppnås genom att specificera vad som behöver mätas och hur detta ska göras samt att säkerställa att detaljerade, klara och att en väldokumenterad metodik finns för att genomföra testerna samt att analysera resultaten av dessa. Detta ska också bidra till jämförbarheten av resultat och ska öka förtroende för den insamlade data.

Som ett exempel behandlas utvecklingen av betongens draghållfasthet, som är en av de viktigaste parametrarna för beräkning av sprickrisken vid unga åldrar, sällan på ett systematiskt sätt. I vissa fall bestäms draghållfastheten vid en viss tid, och det antas att den följer de befintliga relationerna med tryckhållfastheten, trots dess högre variabilitet. I andra fall, när provkroppen i spänningsriggen inte spricker, förs den till dragbrott för att få ett värde av draghållfastheten under de förhållanden som har varit i temperaturspänningsriggen. Det bör noteras att upprätthållen belastning på belastningsnivåer nära draghållfastheten kommer att orsaka för tidigt brott jämfört med korttidsbelastning.

Analys av materialtestresultat är oerhört viktigt. Trots den tid och resurser som ägnas åt att mäta betongens materialegenskaper, är det väl känt att betongens hydratationsprocess fortsätter långt utöver de 28 dagar som vanligtvis används som referens. Därför är det avgörande att specificera hur extrapolering av data bör genomföras när långtids värden av vissa parametrar krävs, till exempel den slutliga hydratationsvärmen eller krypkoefficienten.

Ett annat av de aspekter som kan väcka frågor angående den vanliga praxisen för betongprovning är bestämningen av aktiveringsenergin. Idag härleds aktiveringsenergin från tryckhållfasthetsprover av provkroppar som hårdnar vid olika temperaturer under antagandet att tryckhållfastheten är proportionell mot hydratationsgraden. Dock, när betong utsätts för höga temperaturer vid en ung ålder, observeras ett hållfasthetsfall vid senare skeden, jämfört med samma betong som hårdas vid lägre temperaturer, i det som är känt som cross-over effekten. Detta framhäver att antagandet om proportionalitet mellan styrka och hydratationsgrad endast är giltigt inom ett visst temperaturintervall.

Som ett alternativ till nuvarande praxis skulle en kombination av isoterm och semiadiabatisk kalorimetri kunna användas för att bestämma aktiveringsenergin baserat på hydratationsvärmen, vilket skulle kunna representera denna parameter bättre

samtidigt som det sparar tid och pengar på destruktiv provning. En nackdel med denna metod är att en ny modell för hållfasthetsutveckling, som beaktar härdningstemperaturen, bör användas för att ta hänsyn till hållfasthetstappet vid höga temperaturer.

Andra materialegenskaper där effekten av temperatur inte uttryckligen beaktas, när materialparametrar erhålls genom provning, är krypning och krympning. Idag är dessa parametrar endast noggrant bestämda vid en referenstemperatur och effekten av temperatur inkluderas bara genom att justera de initiala mätningarna baserat på observationer från spänningsriggen respektive friexpansionstestet. Denna procedur kan leda till orealistiska värden som används i materialmodellerna, som kan passa bra med resultaten av ett visst försök men som kan fungera dåligt när de extrapoleras till andra fall. Att utveckla nya modeller som tar hänsyn till temperaturens inverkan på krypning och krympning skulle lindra detta problem.

En ytterligare aspekt värt att notera är att betong med tillsatsmaterial kan resultera i ett annorlunda beteende jämfört med betong baserade på enbart Portlandcementklinker. Särskilt användningen av slagg och flygaska har observerats påverka den autogena deformationen av betong [92], vilket kan leda till en inledande svällningsfas före den förväntade krympfasen [93]. Detta gör nuvarande analytiska krympmodeller oförmögna att beakta denna effekt, vilket antyder att nya modeller också kan behövas när användningen av klimatförbättrad betong blir alltmer utbredd. Dessutom är det också viktigt att analysera hur detta beteende kan påverka andra materialprovningar, t.ex. krypningstest, eftersom en inledande expansion kan motverka den viskoelastiska deformationen, vilket kan göra det svårt att mäta. Det bör noteras dock att i de sista åren har en del forskning pågått som har undersökt hur man kan både mäta och modellera tidiga deformationerna i betongsammansättningar med tillsatsmaterial, se t.ex. [94], [95], [96], [97], [98].

Vidare är inte bara provningsförfarandena och de använda modellerna viktiga. Att mäta noggrant och säkerställa mätningarnas kvalitet (mätosäkerhet) är också avgörande. Idag mäts en del av parametrarna först efter avformning, dvs. 16–24 timmar efter gjutning, vilket innebär att vissa tidiga deformationer inte fångas. Därför är utveckling av provningsutrustningen för att säkerställa att de undersökta egenskaperna, t.ex. deformation, töjningar osv., mäts med rätt noggrannhet och precision också kritiskt för en framgångsrik karaktärisering av materialegenskaperna.

5.1.2 Krav och Standarder

I Sverige är den rådande principen att sprickbildning i konstruktioner bör undvikas, och om sprickor trots detta uppstår, bör de injekteras när: (a) sprickvidden är större än 0,2 mm om det finns risk för armeringskorrosion eller (b) sprickvidden är större än 0,1 mm om konstruktionen utsätts för vattentryck. Därför kretsar de flesta diskussioner om krav och standarder kring möjligheten att tillåta att betongkonstruktioner spricker under härdningsprocessen.

Dessa diskussioner motiveras ytterligare av att det i vissa fall görs stora ansträngningar för att undvika sprickor under de första veckorna efter gjutning, men ofta spricker konstruktioner ändå vid senare skede på grund av tvångkrafter orsakade av krympning vid

torkning eller temperaturfluktuationer. Att dock ta itu med denna aspekt kräver hantering av tre viktiga frågor: när ska en konstruktion tillåtas spricka under härdning? Vilken sprickvidd ska tillåtas? Och hur kan sprickvidden beräknas i konstruktioner som utsätts för tvångkrafter inklusive långtidseffekter? För de efterkommande rörelserna (långtidskrympning och temperaturrelser) så kommer de sprickor som först bildades att öka i sprickbredd innan nya sprickor kan bildas och detta måste då beaktas [99].

Den första frågan är kopplad till konstruktionens funktion och exponeringsklasser. Är byggdelen ett bärande element? Kommer elementet huvudsakligen att utsättas för tryckkrafter under sin livstid, vilket innebär att eventuella tidiga sprickor kommer att stängas senare? Är elementets tillstånd avgörande för hela konstruktionens integritet eller funktionalitet? Är elementet utsatt för havsmiljö eller avsiningsalter som kan främja armeringskorrosion? Svaret på dessa och liknande frågor relaterade till konstruktionen skulle kunna användas för att fastställa en klassificering av fall där sprickor i betong i tidigt skede kan vara acceptabelt utan att påverka konstruktionens funktionalitet och integritet.

Den andra frågan är kopplad till den maximala tillåtna sprickvidden som inte negativt kommer att påverka konstruktionens hållbarhet. Denna fråga innebär dock att skilja mellan olika typer av sprickor, nämligen ytsprickor, böjsprickor, genomgående sprickor, och var och hur sprickvidden bestäms. Det bör noteras att för anläggningskonstruktioner med stora täcksjikt mellan 60 mm och 80 mm är det realistiskt att förskriva en sprickviddsbegränsning på 0,1 mm på ytan, då ingen mängd armering kan klara det.

Den tredje frågan följer naturligt de två föregående: om vi tillåter sprickbildning och vi föreskriver en maximal tillåten sprickvidd, hur kan vi då dimensionera för detta? Detta innebär att undersöka vilka modelleringsmetoder som kan användas för att inkludera armeringens effekt i sprickviddsberäkningar för konstruktioner utsatta för tvångkrafter under lång tid samt vilka ytterligare materialprov som skulle krävas. Vidare är det också viktigt att undersöka hur dessa beräkningar kan utföras i enlighet med modellerna och kraven som ges i konstruktionsreglerna.

Det är värd att notera att i den kommande Eurokod 2, [23], har beräkningar och gränser för sprickbredder (täthet, estetik, hållbarhet) noggrant övervägts under utvecklingsprocessen, vilket har lett till nya formuleringar som ges i kapitel 9, bilaga B, bilaga D, bilaga H. Dock är bilagorna endast informativa och det kvarstår osäkerheter kring hur medelavståndet för sprickor i konstruktioner som utsätts för tvångsprickbildning ska bestämmas.

5.1.3 Kvalitetskontroll, Övervakning och Verifiering

En av de största utmaningarna när det gäller bedömningen av risken för sprickbildning i tidigt skede är den ständigt användningen av nya betongrecept med olika mängder och kombinationer av tillsatsmaterial, för vilka industrin har begränsad erfarenhet jämfört med traditionella betongrecept. Därför ses skapandet av en databas med pålitliga materialparametrar för ett brett utbud av klimatförbättrad betong som ett nödvändigt steg för att uppnå en mer utbredd användning av betong med låg koldioxid avtryck.

Utöver behovet av materialparametrar för nya betongrecept ifrågasätts det också om avancerade numeriska analyser krävs för en och var enskild situation. I praktiken kunde de flesta av de konstruktioner där sprickbildning under härdningsprocess är ett problem grupperas in i ett begränsat antal typfall, t.ex. vägg på platta, platta på mark, osv. I sådana fall skulle nya bedömningsmetoder, möjligtvis baserade på analytiska beräkningar, kunna utvecklas för att erbjuda en förenklad metodik för produktionsplanering av nya och traditionella betongrecept.

Men en sådan metodik bör också beakta påverkan av externa förutsättningar, både miljöfaktorer som vind, sol, lufttemperatur och luftfuktighet, samt tvångsgrad, som inte inkluderats i den parametriska studien i detta studie. Vad gäller tvångseffekten skulle det vara värdefullt att samla in data om graden av tvång från verkliga konstruktioner. Det innebär dock att övervakning av verkliga konstruktioner inte bör begränsas till endast temperaturmätningar. Övervakning av töjningar och möjligtvis kraft eller spänningar, genom ny sensorteknik, bör också utföras för att öka vår förståelse om konstruktionens beteende och påverkan av externa faktorer.

Samtidigt är det avgörande att systematiskt dokumentera alla mätningar och sprickbildning för att säkerställa homogenitet och fullständighet av övervakningsdata och möjliggöra jämförbara resultat som kan analyseras för att dra generaliserade slutsatser. Det innebär att en kvalitetskontrollmetodik för dokumentation av data i anläggningskonstruktioner bör utvecklas. Mockup provningar kan också vara extremt värdefulla, vilket ger flera fördelar som validering av materialparametrar, verifiering av arbetsförhållanden, godkännande av platsåtgärder och även att fungera som testbäddar för en eventuell systematisk kvalitetskontrollmetodik.

En ytterligare iakttagelse som går igenom de två tidigare delarna, är utvecklingen av standardtestmetoder för materialprovning. Att utveckla nya standarder som tydligt beskriver precisa instruktioner, nödvändig utrustning och entydiga acceptanskriterier för testernas utförande skulle vara mycket fördelaktigt. Detta skulle säkerställa uppberedbarheten av provresultaten och därmed öka kvalitetskontrollprocessen. Det skulle också möjliggöra jämförelse av resultat som erhållits av olika laboratorier och därigenom underlätta samarbete, kunskapsöverföring och innovation.

5.2 Diskussion av resultat från Parameterstudie

I Tabell 13 presenteras resultaten från den parametriska studien där de topp 5 mest betydelsefulla parametrarna framgår baserat på de olika använda analysmetoderna. Som observerats, är draghållfastheten och elasticitetsmodulen alltid bland de fem viktigaste parametrarna oavsett den metod som används för att analysera resultaten. Det kan också utläsas från resultaten att begränsning av den totala hydratationsvärmen, antingen genom att använda lägre bindemedelshalt eller genom att använda bindemedel som ger en låg värmeutveckling, är mycket fördelaktigt när det gäller sprickrisk. På liknande sätt kan minskning av utgångstemperaturen på färsk betong för att begränsa temperaturfallet under avsvälning vara ett effektivt sätt att minska risken för tidig sprickbildning. Slutligen fanns även betongens viskoelastiska beteende i unga åldrar bland de mest betydelsefulla parametrarna, särskilt när variationen av hydratationsvärmen är begränsad.

Tabell 13. Sammanfattning av parameterstudiens resultat.

		OFAT	Monte Carlo Simulering		
		Regression	Korrelation	Regression	Random Forest
Rank	#1	C_c	$f_{ct,28d}$	C_c	$f_{ct,28d}$
	#2	W_u	$E_{c,28d}$	W_u	$E_{c,28d}$
	#2	$f_{ct,28d}$	$T_{c,0}$	$f_{ct,28d}$	$T_{c,0}$
	#4	$E_{c,28d}$	d	$E_{c,28d}$	d
	#5	κ_1	φ	κ_1	φ

I Tabell 14 jämförs de topp 5 mest betydelsefulla parametrarna från en liknande studie baserad på Monte Carlo-simuleringar utförda av Krauss [91] med de topp 5 mest betydelsefulla parametrarna i denna studie baserad på Monte Carlo-simuleringar och analyserade med korrelationsmetoden. Det kan ses att i båda studierna betraktas draghållfastheten, elasticitetsmodulen och betongens utgångstemperatur som mycket betydelsefulla.

Tabell 14. Jämförelse av mest betydelsefulla parametrar baserad på Monte Carlo-simuleringar.

Studie		Krauss 2004 [91]	Denna studie
Metod		MC simulering	MC simulering (Korrelation)
Rank	#1	$f_{ct,28d}$	$f_{ct,28d}$
	#2	$E_{c,28d}$	$E_{c,28d}$
	#2	α_T	$T_{c,0}$
	#4	W_u	d
	#5	$T_{c,0}$	φ

Det är värt att notera att Krauss [91] tittade på flera betongrecept med olika sammansättningar, och det är därför logiskt att värmeutvecklingen vid härdning betraktas som en av de mest betydelsefulla parametrarna. Dessutom rankas temperaturutvidgningskoefficienten som sjätte i denna studie, direkt efter krypkoefficienten och med en liknande korrelationskoefficient. Detta indikerar även en överenskommelse om påverkan av temperaturutvidgningskoefficienten.

Det är intressant att belysa att enligt Krauss studie påverkas dessa faktorer av graden av tvång samt omgivningstemperaturen, vilka inte inkluderades som variabler i den parametriska studien i detta arbete. Som ett exempel nämner Krauss att krypningen påverkan blir större vid höga tvångsgrader, medan temperaturutvidgningskoefficienten

blir mindre viktig. Detta kan förklara skillnaderna mellan rankade positioner av de mest betydelsefulla parametrarna som hittats i denna studie jämfört med Krauss.

Andra studier har också tittat på känsligheten hos olika parametrar för beräkning av sprickrisk. Lura och Van Breugel [100] studerade numeriskt påverkan av några av betongens termiska egenskaper med avseende på sprickrisk med hjälp av en OFaT-analys. De kom fram till att värmekapacitet och temperaturutvidgningskoefficienten hade ett betydande roll för sprickrisken, medan variationen av den värmeledningsförmåga och aktiveringsenergin inte visade en liknande inverkan på resultaten. De tittade dock inte på inverkan av andra parametrar som beskriver betongens mekaniska beteende.

Baserat på de två tidigare studierna och egen allmän erfarenhet av termisk spännings-simulering föreslog Bjöntegaard [14] en klassificering av parametrar baserad på betydelse för spänningsuppbyggnad och sprickrisk. De delade upp parametrarna i tre betydelsesnivåer och även mellan två kategorier, nämligen materialegenskaper och omgivnings-/platsförutsättningar. I den högsta betydelsegruppen inkluderades samma parametrar som de som hittats av Krauss (se Tabell 11) men även autogen krympning och tillstyvnadstid (slutet av vilofasen). Ingen särskild rangordning nämndes dock inom varje parametergrupp.

I en nyligen genomförd studie av Klausen et al. [93] testade författarna experimentellt sprickrisken för flera betongrecept med olika sammansättningar. Intressant nog visade det sig att två betongblandningar med samma nominella sammansättning uppvisade olika beteenden på grund av variationer i värmeutvecklingen som orsakades av egenskaper av två omgångar av samma cement. Detta indikerar att den antagna koefficienten av variation för parametrarna relaterade till hydratationsvärmen är kanske för låg, och den borde troligen höjas för att beakta sådana osäkerheter.

Klausen et al. [93] visade också att autogen deformation tydligt beror på temperaturen, vilket idag inte beaktas i standarder, men dess nettoeffekt på sprickrisken var endast marginell. De studerade också effekten av externt tvång och omgivningstemperatur, och förvånansvärt nog resulterade de simulerade förhållandena med en initial betongtemperatur på 10°C och en omgivningstemperatur på 5°C i en lägre risk för sprickbildning jämfört med sommarförhållanden. Detta kan förklaras av att i simuleringen under vinterförhållanden revs inte formen, vilket resulterade i en betydligt långsammare temperaturförlust och följaktligen en långsammare uppbyggnad av dragspänningar.

I examensarbetet av Van Bokhorst [101], genomfördes också en parametrisk studie för att undersöka effekten av vissa parametrar som ansågs ha en stor osäkerhet. Listan över parametrar omfattade både termiska och mekaniska egenskaper samt termiska randvillkor inklusive solstrålning. Dock inkluderades inte några av de parametrar som andra bestämt som mest betydelsefulla, såsom draghållfasthet, elasticitetsmodul eller hydratationsvärmen. Resultaten av analyserna, baserade på OFaT, visade att den mest påverkande faktorn var utgångstemperaturen på den färska betongen följt av temperaturutvidgningskoefficienten och i lägre grad betongens värmeledningsförmåga. Effekten av betongens viskoelastiska egenskaper studerades separat och man

kom fram till att en överskattning av tidig krypning kunde leda till minskade tryckspänningar under uppvärmningsfasen, vilket resulterade i en förskjutning mot större draghållfasthetsspänningar under avsvalningsfasen.

5.3 Rekommendationer

Baserat på diskussionen ovan, en forskningsstrategi presenteras nedan. Den formuleras som forskningsfrågor som bedöms kritiska för framsteg i området. De identifierade forskningsfrågorna grupperas i de tre ovannämnde kategorierna.

<p style="text-align: center;">Provning och materialegenskaper</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kan resultaten som erhålls i parameterstudien extrapoleras till nya klimatförbättrade betongsammansättningar (dvs får man samma/liknande resultat)? • För vilka bindemedel och vid vilka temperaturer utvecklas svällande respektive krympande reaktionsprodukter? • Hur stor effekt har temperaturen för olika bindemedel på autogen krympning (baskrympning) respektive krypning (baskrypning)? • Hur ser sambandet ut mellan hydratationsgrad och aktiveringsenergin (hög vid låg hydratationsgrad & lägre vid hög hydratationsgrad) och är sambandet bindemedelsberoende? • Hur kan provningsmetoder utvecklas för att bestämma de tidiga egenskaperna från betongens tillstyvnadstid (4-6h) (krypning, E-modul, m.m.) upp till 24/48/72 timmar? • Hur kan provningsmetoder förenklas och effektiviseras för att erhålla värmeutveckling, mognadsfunktion (aktiveringsenergi), E-modul, draghållfasthet för sprickrisks beräkningar? • Finns det behov för förenklade standardiserade metoder för framtagning av materialparametrar? • På vilket sätt påverkar armeringen sprickbildningsprocessen, det inre tvånget och betongens töjningskapacitet och hur kan detta utvärderas?
<p style="text-align: center;">Krav och Standarder</p>	<ul style="list-style-type: none"> • För vilka förutsättningar (konstruktionens funktion, utformning, sprickstorlek) är det lämpligt att låta konstruktioner spricka? • Vilken sprickbredd har ingen påverkan på beständigheten av konstruktioner i särskilda exponeringsklasser? • Hur ska man modellera och prova materialegenskaper för långtidskrypning på ett bättre sätt tillsammans med armering?

<p>Kvalitetskontroll, Övervakning och Verifiering</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Hur noga behöver man vara för att kontrollera om en konstruktion spricker? Räcker det med handberäkningar? • Hur påverkas sprickbegränsningen av externa förutsättningar som inte är mekaniska (vind, sol, temperatur, tvång (inre/extern tvång), fuktighet)? • Kan en förenklad metodik för produktionsplanering utvecklas för att hantera användandet av nya bindemedel t.ex. naturliga puzzolaner? • Hur kan man fältmässigt bekräfta töjningar och spänningar på likartat sätt som för temperatur och hållfasthet? • Kan kunskap om tvångsgrad/uppkommande sprickor m.m. samlas in från data från verkliga konstruktioner?
---	--

6 Slutsatser

Det finns en lång tradition i Sverige inom forskning och utveckling kring ung betong på arbetsplats för att undvika tidig sprickbildning. Sedan början av 1990-talet har SBUF finansierat ett flertal projekt inom området. Samtidigt har det utförts betydande forskning och utveckling i vår omvärld, i till exempel Tyskland, Frankrike, Belgien och Japan. Internationella samarbetsprojekt har också pågått inom området, t.ex. inom RILEM, där igen från Sverige har deltagit. Baserad på omvärldsanalysen och parameterstudien som genomfördes i projektet kan följande slutsatser dras:

- Den relativt begränsade omvärldsanalys som genomfördes i det här projektet visar att det finns mycket kunskap att hämta hem och att man skulle behöva genomföra en mer omfattande omvärldsanalys. Man kan notera att i flera av de avhandlingar som finns bland referenserna har provningar genomförts på klimatförbättrad betong. Svårheten är att en del av den mest relevanta litteraturen finns på franska och tyska.
- Provingar av armerade tvärsnitt i TSTM visar att armering påverkar sprickbildningsprocessen och töjningskapaciteten samtidigt som den ger upphov till ett inre tvång. Därför borde effekten av armeringen undersökas och hur man ska beskriva betongens viskoelastiska egenskaper (dvs. elasticitetsmodul och krypning/relaxation).
- Den parametriska studien visade att draghållfastheten och elasticitetsmodulen är de mest betydelsefulla parametrarna för att utvärdera sprickrisken under betongens härdning. Dock finns det för närvarande ingen konsensus om vilket är bästa sättet att karakterisera dessa parametrar, särskilt vid tidig ålder.
- Resultaten av Monte Carlo-simuleringen är starkt beroende av de statistiska fördelningarna som valts för inputparametrarna. I detta arbete användes fördelningar från en tidigare studie från 2004. Emellertid tyder variabiliteten av några av parametrarna som observerats i nyligen publicerade studier på att de använda fördelningarna kanske inte representerar moderna cement- och betongmaterial väl. Uppdaterade värden på variabiliteten av materialparametrar, särskilt för nya bindemedel, krävs och en mer omfattande Monte Carlo-simuleringen bör genomföras.
- Trots flera tidigare forskningsinsatser kring metoder för framtagning av temperatursprickparametrar för sprickriskanalyser saknas fortfarande väl dokumenterade, beskrivna och tillräckligt noggranna samt enkla provningsmetoder som kan implementeras på flera labb. Detta påverkar takten för introduktion av nya alternativa bindemedel i Sverige. Mätning av egenskaper under tillstyvnadstid av betong, effekter av temperatur på krypning och krympning, ny modell för bedömning av aktiveringsenergi kräver vidare forskning med särskild fokus på branschgemensamma projekt där alla berörda aktörer får bidra med sin kunskap och erfarenhet att hitta bredd accepterade lösningar.

Referenser

- [1] B. Löfquist, "Temperatureffekter i hårdnande betong - undersökning av några faktorer som påverka sprickbildningen i grövre konstruktioner; jämförelse mellan två svenska cement - PhD Thesis," Chalmers Tekniska Högskola, 1946. [Online]. Available: <https://research.chalmers.se/publication/183391>
- [2] M. Rosenqvist, "Betongteknikens utveckling och betydelse för svensk vattenkraftsutbyggnad," 2018.
- [3] F. O. Buö, "Sprickbildning i betongväggar till följd av cementets hydratationsvärmeutveckling," *Nordisk Betong*, vol. 2, 1973.
- [4] F. O. Buö, "Temperaturförlopp i betongkonstruktioner under betongens hårdnande," 1967.
- [5] T. C. Hansen, "Surface cracking of mass concrete at early form removal," *RILEM-Bulletin*, no. 28, pp. 145–153, 1965.
- [6] T. C. Hansen, "Creep on concrete: the influence of variations in the humidity of the ambient atmosphere," 1960.
- [7] J. Byfors, "Plain concrete of early ages. PhD-Thesis," Cement och Betonginstitutet, Fo 3:80, 1980.
- [8] M. Emborg, "Thermal stresses in concrete structures at early ages. PhD Thesis," Luleå Tekniska Högskola, 1989.
- [9] J.-E. Jonasson, "Modelling of Temperature, Moisture and Stresses in Young Concrete," Luleå University of Technology, Luleå, 1994.
- [10] A. Nagy, "Cracking in reinforced concrete structures due to imposed deformations. PhD Thesis," Lunds teknisk högskola, 1997.
- [11] J. Kölfors, "Temperatursprickor i grova betongkonstruktioner - En undersökning av olika sprickreducerande åtgärder vid bygget av Forss kraftstation i Nätraån," 1994.
- [12] O. Dahlblom and J. Lindemann, "Hacon. A program for simulation of temperature and stress in hardening concrete," 2000.
- [13] H. Hedlund, "Hardening concrete: Measurements and evaluation of non-elastic deformation and associated restraint stresses. PhD Thesis," Tekniska Universitet Luleå, 2000.
- [14] Ø. Bjøntegaard, "Basis for and practical approaches to stress calculations and crack risk estimation in hardening concrete structures—State of the art COIN Project report 31," 2011.
- [15] Ø. Bjøntegaard, I. Hegseth, S. Smepllass, T. Kanstad, A. Klausen, and B. Kristiansen, "Praktiske råd og tiltak mot fastholdingsriss i herdende betongkonstruksjoner," 1997.

- [16] A. B. Hauggaard-Nielsen, "Mathematical modelling and experimental analysis of early age concrete. PhD Thesis," Technical University of Denmark, 2007.
- [17] H. Spange and E. S. Pedersen, "HETEK—Control of early age cracking—Main report," 1997.
- [18] M. Azenha *et al.*, "Recommendations of RILEM TC 287-CCS: thermo-chemo-mechanical modelling of massive concrete structures towards cracking risk assessment," *Mater Struct*, vol. 54, no. 4, p. 135, Aug. 2021, doi: 10.1617/s11527-021-01732-8.
- [19] RILEM Technical Committee 254-CMS, *Thermal Cracking of Massive Concrete Structures*, vol. 27. in RILEM State-of-the-Art Reports, vol. 27. Cham: Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-76617-1.
- [20] M. Emborg, "Egenspänningar och sprickor av temperaturrörelser och krympning. Värme- och mognadsutveckling.," in *Betonghandboken material, Del 2*, Svensk Byggtjänst., vol. kapitel 19, Svensk Byggtjänst, 2021.
- [21] B. Delsaute, "New approach for Monitoring and Modelling of the Creep and Shrinkage behaviour of Cement Pastes, Mortars and Concretes since Setting Time. PhD Thesis," Université Libre de Bruxelles, BATir, Belgium & Université Paris-Est, Ifsttar, France, 2016.
- [22] D. H. Nguyen, V. T. Nguyen, P. Lura, and V. T. N. Dao, "Temperature-stress testing machine – A state-of-the-art design and its unique applications in concrete research," *Cem Concr Compos*, vol. 102, pp. 28–38, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.04.019.
- [23] FprEN 1992-1-1:2021, "FprEN 1992-1-1:2021 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures."
- [24] J. Bödefeld, "Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme," 2010.
- [25] D. Schlicke, "Mindestbewehrung für zwangbeanspruchten Beton. PhD Thesis," Graz University of Technology, 2014.
- [26] K. Turner, "Ganzheitliche Betrachtung zur Ermittlung der Mindestbewehrung für fugenlose Wasserbauwerke. PhD Thesis," Bundesanstalt für Wasserbau, 2020.
- [27] A. B. E. Klausen, "Early age crack assessment Codes, guidelines and calculation methods WP 1.2 Calculation of crack spacing and crack widths," DaCS Durable advanced Concrete Solutions - Report No.2, 2018.
- [28] J.-E. Jonasson, K. Wallin, and M. Nilsson, "Gjutning av vägg på platta - Studier av sprickrisker orsakat av temperaturförloppet vid härdningen," 2009.

- [29] P. Eriksson, "Temperatursprickor i Ung Betong - Uppföljning av Den Svenska Sprickmodellen. Master Thesis," Luleå tekniska universitet, Institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser, 2017.
- [30] J. Carette and S. Staquet, "Monitoring and modelling the early age and hardening behaviour of eco-concrete through continuous non-destructive measurements: Part I. Hydration and apparent activation energy," *Cem Concr Compos*, vol. 73, pp. 10–18, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2016.07.002.
- [31] L. D'Aloia and G. Chanvillard, "Determining the 'apparent' activation energy of concrete: E_a —numerical simulations of the heat of hydration of cement," *Cem Concr Res*, vol. 32, no. 8, pp. 1277–1289, Aug. 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00791-3.
- [32] M. Larson and J.-E. Jonasson, "Linear Logarithmic Model for Concrete Creep I. Formulation and Evaluation," 2003.
- [33] M. Larson and J.-E. Jonasson, "Linear Logarithmic Model for Concrete Creep II. Prediction Formulas for Description of Creep Behaviour," 2003.
- [34] K. Kovler, "M&S highlight: Kovler (1994), Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 55, no. 2, pp. 1–5, Mar. 2022, doi: 10.1617/S11527-021-01852-1/FIGURES/3.
- [35] K. Kovler, "Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage," *Mater Struct*, vol. 27, no. 6, pp. 324–330, Jul. 1994, doi: 10.1007/BF02473424/METRICS.
- [36] I. Maruyama and P. Lura, "Properties of early-age concrete relevant to cracking in massive concrete," *Cem Concr Res*, vol. 123, p. 105770, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2019.05.015.
- [37] S. Staquet, B. Delsaute, A. Darquennes, and B. Espion, "Design of a revisited TSTM system for testing concrete since setting time under free and restrained conditions," in *Crack Control of Mass Concrete and Related Issues Concerning Early-Age of Concrete Structures*, F. Toutlemonde and J. M. Torrenti, Eds., Paris: RILEM Publications, 2010, pp. 99–110.
- [38] M. Serdar, I. Gaborjel, D. Schlicke, S. Staquet, and M. Azenha, Eds., "Advanced Techniques for Testing of Cement-Based Materials," 2020, doi: 10.1007/978-3-030-39738-8.
- [39] M. Emborg, A. Hösthagen, M. Westerholm, J. Nilimaa, M. Nilsson, and J. Carlswärd, "Egenspänningar i tidig ålder av temperaturrelser och krympning - försökanalys, modellering, kriterier i Sverige," *Bygg och Teknik 6/23*, 2023.

- [40] Ø. Bjøntegaard and K. O. Kjellsen, *Property development and cracking tendency in hardening concrete: Effect of cement type and fly ash content*. COIN Project report 40 - SINTEF Building and Infrastructure, 2012. [Online]. Available: www.coinweb.no
- [41] G. Ji, "Cracking risk of concrete structures in the hardening phase: Experiments, material modeling and finite element analysis," NTNU, Trondheim, 2008.
- [42] A. B. E. Klausen, "Early age crack assessment of concrete structures," NTNU, Trondheim, 2016.
- [43] BAWMerkblatt, "Rissbreitenbegrenzung für frühen Zwang in massiven Wasserbauwerken (MFZ)," 2011. [Online]. Available: www.baw.de
- [44] J. Bödefeld, "Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme," Karlsruhe, 2010. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102589>
- [45] K. Turner, "Ganzheitliche Betrachtung zur Ermittlung der Mindestbewehrung für fugenlose Wasserbauwerke," TU Graz, 2017. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107144>
- [46] K. Turner, "Ganzheitliche Betrachtung zur Ermittlung der Mindestbewehrung für fugenlose Wasserbauwerke," Karlsruhe, 2020. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107144>
- [47] C. Schmidt, R. Chudoba, C. Jin, and J. Hegger, "Experimental investigations on early crack development in fully restrained reinforced concrete members with active zero-displacement control," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 56, no. 6, pp. 1–23, Jul. 2023, doi: 10.1617/S11527-023-02200-1/FIGURES/12.
- [48] W. Hermerschmidt, "Modelle zur Beschreibung der thermomechanischen Materialeigenschaften jungen Betons," Braunschweig, 2016. doi: 10.24355/dbbs.084-201607191054-0.
- [49] A.-W. Gutsch, "Stoffeigenschaften jungen Betons: Versuche und Modelle," Braunschweig, 1998. doi: 10.24355/dbbs.084-201501281057-0.
- [50] H.-W. Krauss, "Zur Auswirkung hochfeiner inerter Zusatzstoffe auf die Hydratationskinetik und die Mikrostruktur von Zementstein," Braunschweig, 2013. doi: 10.24355/dbbs.084-201401071013-0.
- [51] R. Nothnagel, "Hydratations- und Strukturmodell für Zementstein," Braunschweig, 2007. doi: 10.24355/dbbs.084-201311081126-0.
- [52] B. Eierle, "Berechnungsmodelle für rißgefährdete Betonbauteile unter frühem Temperaturzwang," Technischen Universität München, 1999.

- [53] D. Schlicke, "Mindestbewehrung für zwangbeanspruchten Beton," Technische Universität Graz, 2014.
- [54] Dipl.-I. Peter and J. Heinrich, "Effiziente Erfassung viskoelastischer Eigenschaften bei der Spannungsermittlung von gezwängten Betonbauteilen," Technischen Universität Graz, 2018.
- [55] C. Boulay, J. Michel Torrenti, J. Luc Andre, and R. Saintilan, "Quasi-adiabatic calorimetry for concretes : Influential factors," *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, vol. 278, 2010, [Online]. Available: <https://hal.science/hal-00562100>
- [56] A. Hilaire, F. Benboudjema, A. Darquennes, Y. Berthaud, and G. Nahas, "Modeling basic creep in concrete at early-age under compressive and tensile loading," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 269, pp. 222–230, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.nucengdes.2013.08.034.
- [57] A. Aili, M. Vandamme, J.-M. Torrenti, and B. Masson, "A viscoelastic poromechanical model for shrinkage and creep of concrete," *Cem Concr Res*, vol. 129, p. 105970, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105970.
- [58] A. Aili, M. Vandamme, J.-M. Torrenti, and B. Masson, "Theoretical and practical differences between creep and relaxation Poisson's ratios in linear viscoelasticity," *Mech Time Depend Mater*, vol. 19, no. 4, pp. 537–555, Nov. 2015, doi: 10.1007/s11043-015-9277-5.
- [59] A. Darquennes, "Comportement au jeune âge de bétons formulés à base de ciment au laitier de haut-fourneau en condition de déformations libre et restreinte," Université libre de Bruxelles, 2009.
- [60] R. Cortas, "Nouvelle approche expérimentale pour la maîtrise de la fissuration du béton jeune: influence de la nature et de la saturation des granulats," 2012.
- [61] J. Carette, "Towards Early Age Characterisation of Eco-Concrete Containing Blast-Furnace Slag and Limestone Filler," Université Libre de Bruxelles, 2015.
- [62] B. Delsaute, "New approach for Monitoring and Modelling of the Creep and Shrinkage behaviour of Cement Pastes, Mortars and Concretes since Setting Time," Université libre de Bruxelles, 2016.
- [63] K. Van Breugel, "Relaxation of young concrete," 1980.
- [64] K. Van Breugel, "Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials," Technical University of Delft, 1991.
- [65] M. S. Sule, "Effect of Reinforcement on Early-Age Cracking in High Strength Concrete," Technical University of Delft, 2003.
- [66] T. Lu, "Autogenous shrinkage of early age cement paste and mortar," Technical University of Delft, 2019. doi: 10.4233/uuid:e06bd615-7fc4-481b-a334-37627f142e3d.

- [67] P. Lura, "Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete," 2003.
- [68] G. C. Bouquet, "Effect of relaxation on eigenstresses and microcracking in concrete under imposed deformation," Technical University of Delft, 2019. doi: 10.4233/uuid:5d9a9cc3-9f5a-4a0e-9ff1-f7dbd310a6a9.
- [69] P. Gao, "Simulation of hydration and microstructure development of blended cements," Technical University of Delft, 2018. doi: 10.4233/uuid:5bb2f97b-55f7-4afa-b6f4-f18f16543273.
- [70] M. Liang *et al.*, "Predicting early-age stress evolution in restrained concrete by thermo-chemo-mechanical model and active ensemble learning," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 37, no. 14, pp. 1809–1833, Nov. 2022, doi: 10.1111/mice.12915.
- [71] M. Liang *et al.*, "Stress evolution in restrained GGBFS concrete due to autogenous deformation: bayesian optimization of aging creep," *Constr Build Mater*, vol. 324, p. 126690, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126690.
- [72] JCI, "JCI Guidelines for Control of Cracking of Mass Concrete," 2016.
- [73] H. Mihashi and J. P. de B. Leite, "State-of-the-Art Report on Control of Cracking in Early Age Concrete," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 141–154, 2004, doi: 10.3151/jact.2.141.
- [74] T. Yamamoto and T. Ohtomo, "PRACTICES FOR CRACK CONTROL OF CONCRETE IN JAPAN," in *CONCRACK 3 - RILEM-JCI International Workshop on Crack Control of Mass Concrete and Related Issues Concerning Early-Age of Concrete Structures*, Paris, France, 2012.
- [75] P. Srimook and I. Maruyama, "Energy-based approach to predict thermal cracking characteristics of a massive RC member subjected to external restraint from its bottom," *Journal of Building Engineering*, vol. 76, p. 107339, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jobbe.2023.107339.
- [76] G. Ou, Z. Lin, and T. Kishi, "The practical application of a self-developed temperature stress testing machine in development of expansive concrete blended with calcium sulfoaluminate additives," *Cem Concr Res*, vol. 164, p. 107045, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.107045.
- [77] G. F. Ou, T. Kishi, Z. H. Lin, and T. Kamada, "Theoretical Modeling and Evaluation of Thermal Stress Evolution of Concrete at Early Age by Temperature Stress Testing Machine," 2021, pp. 1769–1780. doi: 10.1007/978-981-15-8079-6_163.
- [78] ACI Committee 207, "ACI PRC-207.2-07 Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete," 2007.

- [79] K. A. Riding, J. L. Poole, A. K. Schindler, M. C. G. Juenger, and K. J. Folliard, "Statistical Determination of Cracking Probability for Mass Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, no. 9, Sep. 2014, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000947.
- [80] K. A. Riding, "Early age concrete thermal stress measurement and modeling," University of Texas at Austin, 1978.
- [81] J. A. Whigham, "Evaluation of Restraint Stresses and Cracking in Early-age Concrete with the Rigid Cracking Frame," Auburn University, 2005.
- [82] J. L. Poole, "Modeling temperature sensitivity and heat evolution of concrete," University of Texas at Austin, 1977.
- [83] A. M. Lawrence, "A Finite Element Model for the Prediction of Thermal Stresses in Mass Concrete," University of Florida, 2009.
- [84] Y. K. Cho, R. Gentry, K. Kurtis, J. Brown, J. Park, and L. Al Hasani, "Phase II – Investigation and Guidelines for Best Practices of Mass Concrete Construction Management," 2022.
- [85] Y. Kwon Cho, R. Gentry, J. Brown, L. Kahn, and J. Park, "Investigation and Guidelines for Mass Concrete Construction Management," 2019.
- [86] B. Delsaute *et al.*, "Testing Concrete E-modulus at Very Early Ages Through Several Techniques: An Inter-laboratory Comparison," *Strain*, vol. 52, no. 2, pp. 91–109, Apr. 2016, doi: 10.1111/str.12172.
- [87] D. H. Nguyen, V. T. Nguyen, P. Lura, and V. T. N. Dao, "Temperature-stress testing machine – A state-of-the-art design and its unique applications in concrete research," *Cem Concr Compos*, vol. 102, pp. 28–38, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2019.04.019.
- [88] M. Larson and J.-E. Jonasson, "Linear Logarithmic Model for Concrete Creep I. Formulation and Evaluation," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 172–187, 2003, doi: 10.3151/jact.1.172.
- [89] M. Larson and J.-E. Jonasson, "Linear Logarithmic Model for Concrete Creep II. Prediction Formulas for Description of Creep Behavior," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 188–200, 2003, doi: 10.3151/jact.1.188.
- [90] EN 1992-1-1 Eurocode 2, "EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings." Brussels, Belgium, 2004.
- [91] M. Krauß, "Probabilistischer Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen gegen frühe Trennrisse in massigen Betonbauteilen - PhD Thesis," 2004. [Online]. Available: <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=0006364604/08/2016>

- [92] J. Carette, S. Joseph, Ö. Cizer, and S. Staquet, “Decoupling the autogenous swelling from the self-desiccation deformation in early age concrete with mineral additions: Micro-macro observations and unified modelling,” *Cem Concr Compos*, vol. 85, pp. 122–132, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.10.008.
- [93] A. E. Klausen, T. Kanstad, and Ø. Bjøntegaard, “The cracking risk of hardening concrete exposed to realistic curing temperature regimes and restraint conditions – Experimental investigations of important parameters,” *Constr Build Mater*, vol. 338, p. 127662, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127662.
- [94] T. A. Hammer and Ø. Bjøntegaard, “Testing of autogenous deformation (AD) and thermal dilation (TD) of early age mortar and concrete - recommended test procedure,” in *Int. RILEM conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*, 2006, pp. 341–346.
- [95] Ø. Bjøntegaard, T. A. Hammer, and E. J. Sellevold, “On the measurement of free deformation of early age cement paste and concrete,” *Cem Concr Compos*, vol. 26, no. 5, pp. 427–435, Jul. 2004, doi: 10.1016/S0958-9465(03)00065-9.
- [96] A. Jamali, J. Mendes, B. Nagaratnam, and M. Lim, “A new four stage model of capillary pressure in early age concrete: Insights from high capacity tensiometers,” *Cem Concr Res*, vol. 161, p. 106955, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106955.
- [97] D. S. Kurup, M. K. Mohan, K. Van Tittelboom, G. De Schutter, M. Santhanam, and A. V. Rahul, “Early-age shrinkage assessment of cementitious materials: A critical review,” *Cem Concr Compos*, vol. 145, p. 105343, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105343.
- [98] L. Stefan, C. Boulay, J.-M. Torrenti, B. Bissonnette, and F. Benboudjema, “Influential factors in volume change measurements for cementitious materials at early ages and in isothermal conditions,” *Cem Concr Compos*, vol. 85, pp. 105–121, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.10.007.
- [99] F. Fingerloos, “Welche Risskonzepte sind in Planung und Ausführung für dünne oder massige Betonbauteile zweckmäßig?/Die Frage nach frühem oder spätem Zwang muss der Tragwerksplaner mit exakten Informationen beantworten,” *DER PRÜFINGENIEUR*, 2019.
- [100] P. Lura and K. Van Breugel, “THERMAL PROPERTIES OF CONCRETE: SENSITIVITY STUDIES,” 2001.
- [101] J. R. Van Bokhorst, “Early-age cracking of concrete A study into the influence of stress relaxation on early-age cracking of concrete structures under imposed deformations,” Delft, 2020. [Online]. Available: <http://repository.tudelft.nl/>.