



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

CONSAVE Smartere & Grønnere Beton

MUDP Rapport

September 2024

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Jan M. Kloppenborg og Mikkel L. Sørensen, DTU Compute,

Mads Hegnsby og Thomas Juhl, Maturix

Claus V. Nielsen, Benjamin Ebert og Lars Thrane, Teknologisk Institut

Fotos:

Teknologisk Institut

Maturix

ISBN: 978-87-7038-655-5

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet, der støtter udvikling, test og demonstration af miljøteknologi.

MUDP investerer i udvikling af fremtidens miljøteknologi til gavn for klima og miljø i Danmark og globalt, samtidig med at dansk vækst og beskæftigelse styrkes. Programmet understøtter dels den bredere miljødagsorden, herunder rent vand, ren luft og sikker kemi, men understøtter også regeringens målsætninger inden for klima, biodiversitet og cirkulær økonomi.

Det er MUDP's bestyrelse, som beslutter, hvilke projekter der skal modtage tilskud. Bestyrelsen betjenes af MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen.

MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5, 5000 Odense | Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: ecoinnovation@mst.dk

Web: www.mudp.dk

Denne slutrapport er godkendt af MUDP, men det er alene rapportens forfatter/projektlederen, som er ansvarlige for indholdet. Rapporten må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Introduktion og læsevejledning	5
1. Consave resultater og konklusioner	6
2. Prædiktation af temperaturudviklingen (1)	8
2.1 Indledning	8
2.2 Start på cast	8
2.3 Modeller	9
2.4 Modenhed	11
2.5 Model bibliotek	11
2.6 Prædiktationer og resultater	12
3. Prædiktation af temperaturudvikling (2)	14
3.1 Indledning	14
3.2 Cast recognition	14
3.3 Prædiktation	14
3.4 Semi-fysisk Model	15
3.5 Prediction Algoritme	16
3.6 Validering	17
3.7 Implementering	18
3.8 Anvendelse	19
4. CO₂ beregner til beton	21
4.1 Indledning	21
4.2 Baggrund	21
4.3 CO ₂ kalkulator	22
4.4 Data om tidlig styrke	24
4.5 Omgivelsestemperatur	24
4.6 Anvendelse	26
5. Forsøg med styrkeudvikling for grønne betoner	27
5.1 Indledning	27
5.2 Betontyper og forsøgsprogram	28
5.3 Forsøgsresultater	30
5.4 Konklusioner	33

Introduktion og læsevejledning

Bag CONSAVE projektet står Sensohive/Maturix, Dansk Beton, Teknologisk Institut og DTU Compute og er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet. Som projektnavnet angiver er målsætningen af fokusere på "concrete savings".

Formålet med projektet CONSAVE er, at udvikle AI understøttede Big Data modeller for beton-anvendelse, der under anvendelse af avanceret sensorteknologi kan reducere anvendelsen af cement med 6-10% i betonbyggerier i DK og helt op til 25-35% i udlandet. Dette overforbrug af cement skyldes overdimensionering og sikkerhedsmarginer som pålægges betoners styrker, når de designes. Cement er særdeles energikrævende at producere og i processen frigøres CO₂ fra den anvendte kalk og fra de brændsler der anvendes til at opvarme cementovnene. Emissionen fra 1 ton cement svarer til ca. 0,6-1,0 ton CO₂ (afhængig af cementtype) og udgør pt. ca. 8% af den samlede, globale CO₂ udledning.

Tidligt i projektfasen blev et af de oprindelige projektrisici desværre valideret; manglende brugeraccept af en ny løsning til at bestemme beton-mix-design, og faktum at det ikke muligt med nuværende blandestationer at ændre mixes baseret på real time data fra byggepladserne. Som konsekvens af dette ændrede scope sig i projektet – dog stadig fokus på cementbesparelser i betonen, men med andre fokusområder. Disse ændringer og tilpasninger vil blive beskrevet i detaljer i denne rapport

Denne afrapportering er opdelt i kapitler, som har hvert sit fokusområde og primære aktører:

Kapital 1: Consave resultater og konklusioner

Kapital 2+3: Prædiktation af temperaturudviklingen - DTU (1. del) og Maturix (2.del)

Kapital 4: CO₂ beregner til beton (DanskBeton, TI og Maturix)

Kapital 5: Grønne betoner – aktiveringsenergi i grønne betoner (TI og Maturix)

Hvert kapital (2-5) vil være bygget op med en baggrund og introduktion for fokusområdet, beskrivelser af forsøgene som er gennemført og slutteligt resultaterne af disse.

Projektets tidsplan:

Projektet starter d. 1. januar 2021 og afsluttes med levering af slutregnskab senest d. 31. december 2022, men grundet Corona blev opstarten udsat til august 2021.

1. Consave resultater og konklusioner

Som anført i introduktion tog projektet allerede fra projektets opstart (indenfor de første tre måneder) en ændring som nødvendiggjorde en anmodning til MUDP-sekretariatet. Specifikt var feedbacken fra branchen, at man ikke var klar til at kunne håndtere "live" data til at optimere på betonrecepterne, og at man ikke var villig til at påtage nogen risici ift. at indføre dette paradigme skifte.

Efter dialog med MUDP og projektpartnerne blev fokus ændret således at projektet stadig kunne gennemføres med samme ambition, men med ændrede opgaver. Så der blev ansøgt om ændringer til projektet for at sikre et godt projekt med brugbart resultat for projektpartnerne og branchen som helhed med fokus på CO₂ reduktioner.

Som konsekvens af dette, blev opgaverne ændret, mens den overordnede målsætning forblev den samme ift de CO₂ besparelse, der kan opnås via optimering af beton brug, som beskrives i kapitallerne 2 til 5. Herunder følger et kort oprids af hvert kapital med resultater og konklusioner tilføje.

Kapital 2+3: Prædiktation af betonstyrke udvikling baseret på temperaturudviklingen i betonen. Maturix og DTU Compute gik sammen om at lave en ny metode til at temperatur forudsigtelse baseret på historiske data. Dette muliggør at forudsige både temperatur udvikling og styrkeudviklingen af betonen op til 72 timer ud i fremtiden, hvilket gør planlægningen af arbejdet på byggepladsen meget nemmere og ventetid undgås i større grad.
Status: Det er lykkedes at udvikle og implementere denne metode i Maturix software "Maturix insitu", som bruges af mere end 300 projekter i hele verden.

Kapital 4: Dansk Beton og Maturix har udviklet og testet sammen med branchen en hurtig beregner "CO₂-calculator" til at beregne CO₂ forbruget på en given beton, og om der er bedre alternativer til den ønskede beton. Her der det især krav til tidlig styrke, som afgør om der kan bruges andre betoner med lavere CO₂ aftryk. CO₂ simuleringsværktøj er i dag online på Maturix webside med generiske betoner (og tilhørende EPD'er), der arbejdes videre med værktøjet for at få det tilpasset readymixernes egne betoner. Der har desuden været en større kommunikativ opgave at diskutere CO₂/EPD med brugerne. Således alle kan få gavn af dette værktøj i branchen.
Status: Det er i dag funktionelt værktøj til at lave CO₂ beregninger baseret på beton indhold og finde bedre alternativer (CO₂-mæssigt).

Kapital 5: Cement- og bindersystemer med reduceret CO₂ aftryk – hærdetemperaturens indflydelse på styrkeudviklingen. Teknologisk Institut har haft fokus på at etablere datasæt for styrkeudviklingen af cement- og bindersystemer med reduceret CO₂ aftryk, bl.a. FutureCem cement, ved forskellige hærdetemperaturer. Resultatet er en række datasæt, som kan implementeres i den Consave model, der er udviklet til at forudsige tidlige styrker, afhængigt af betonens alder og hærdetforhold (temperatur og vejr). Som en del af projektet er der udviklet og afprøvet en ny metode for bestemmelse af aktiveringsenergi baseret på mørtelemner fremfor betonemner.

Foruden ovennævnte har Maturix også bygget et lab-modul til brug i beton laboratoriet. Der har dog ikke været muligt at validere behovet for dette, hvorfor det er blevet skrinlagt ift. kommercialisering.

Samarbejdet mellem Maturix, TI Beton og Dansk Beton vil således fortsætte på bagkant af projektet for at sikre implementering af best practice for de grønne betoner.

2. Prædiktation af temperaturudviklingen (1)

1. del. Forfatter: Jan M. Kloppenborg og Mikkel L. Sørensen, DTU Compute

2.1 Indledning

Denne del af projektet omhandler prædiktation af modenhed af beton. Prædiktioner er baseret på historiske temperaturprofiler og den aktuelle serie hvor modenhed prædikteres på baggrund af "live" data. Modellerne er baseret på såkaldte "gray-box" modeller hvor modeller inspireret af fysiske/mekanistiske modeller kombineres med statistiske modeller med henblik på at konstruere robuste modeller, der både giver en korrekt prædiktation af middelværdi og udsprender usikkerheden korrekt. En praktiske udfordring i arbejdet er at sensorer ikke direkte angiver om der faktisk er lavet en cast af beton, men at tidspunktet skal bestemmes fra målte temperaturprofiler.

2.2 Start på cast

I forhold til modellering er detektion af det præcise tidspunkt for hvornår modellering skal starte essentiel. Modellens parametre bestemmes ud fra målte værdier der forudsætter at den kemiske reaktion som modelleres er i gang. Denne del af arbejdet viste sig at være ret vanskelig at implementere på en automatiseret måde.

Under projektet blev en automatiseret algoritme til detektion af starttidspunkter udviklet. Algoritmen baserer sig på analyse af temperatursignalet. Hovedkomponenterne i algoritmen er analyse af temperatursignalet, hvor hurtige skift i temperaturen og store forskelle mellem beton temperaturen og lufttemperaturen indikerer at temperatursensoren ligger inde i betonen og at cast'en dermed er startet.

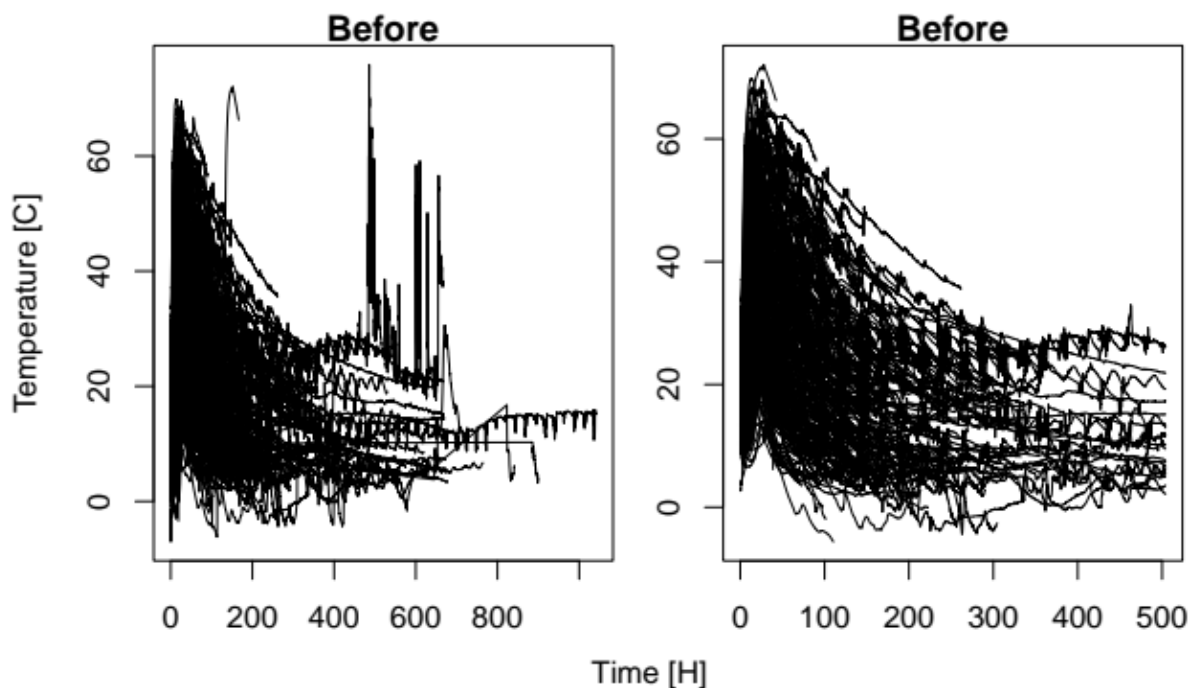
Algoritmen blev testet på omkring 300 temperatur serier og sammenlignet med manuelle satte starttidspunkter sat ud fra "best judgement". I mange tilfælde er starttidspunkter veldefinerede, men i en del tilfælde er starttidspunkter ikke veldefinerede og det vil være uklart om der er lavet en cast eller ikke.

Algoritmen baserer sig som nævnt på pludselige skift i temperaturprofilen eller store forskelle mellem lufttemperatur og sensortemperatur. Konkret sker identificeres en cast hvis én af følgende betingelser er opfyldt

- hældningen i en lokal (20 observationer) lineær regression er større en 0.1 grader Kelvin pr minut
- der er et spring (mellem 2 målepunkter) i temperaturen på mindst 3 grader Kelvin
- sensortemperaturen er mindst 5 grader Kelvin større end lufttemperaturen.

Identifikation af starttidspunkter fungerer generelt godt for veldefinerede profiler hvor det også vil være rimeligt klart hvornår cast'en er sket, mens der også er mange tilfælde hvor det er uklart fra profilen hvornår cast'en er sket i disse tilfælde er det naturligvis også vanskeligt for en automatiseret algoritme.

Figuren herunder viser resultatet af at sætte starttidspunkter, effekten er at dele af serien hvor det kan antages at der ikke er sket en cast filtreres ud og dermed får vi mere ensartede serier med en stigning grundet kemiske proces efterfulgt af et varmetab grundet temperaturløb til omgivelser.



FIGUR 1. Temperatur serie før (venstre plot) og efter (højre plot) identifikation af start tidpunkter.

2.3 Modeller

Den grundlæggende model for temperatur prædiktioner er baseret på en dynamisk model der inkluderer et led for den kemiske varmeudviklingen i beton, samt et led der beskriver varmetabet til omgivelserne, dette er beskrevet ved den stokastiske differentialligning

$$dT_t = (\phi(t) - \alpha(T_t - T_{out}(t)))dt + \sigma dB_t$$

hvor $\phi(t)$ er den kemiske varmeudvikling til tid t , α er varmetabskoefficienten, T_t er sensortemperaturen, $T_{out}(t)$ er lufttemperaturen til tid t , og σdB_t er differentiell støj (Wiener støj).

Den beskrevne ligning for temperaturen er en lineær tidsvarierende stokastisk differentialligning og dermed kan en eksakt løsning opskrives. Løsningen mellem tidsskridt er en normalfordeling, hvor udtryk for middelværdi og varians vil indeholde integraler over $\phi(t)$, hvis $\phi(t)$ vælges så en eksPLICIT løsning af integralet eksisterer kan en eksPLICIT løsning for den prædiktive fordeling opskrives på lukket form, hvilket er vigtigt for hurtig og præcis online implementering.

Parameterestimerer er fundet rekursivt ved likelihood estimation.

Her vælges $\phi(t)$ som en faktor gange tæthedsfunktionen for en gamma fordeling, dette valg er ikke direkte fysisk baseret, men giver stor fleksibilitet i varmeudviklingsprofilen, samtidig med at der er relativt få parametre. Konkret er $\phi(t)$ givet som

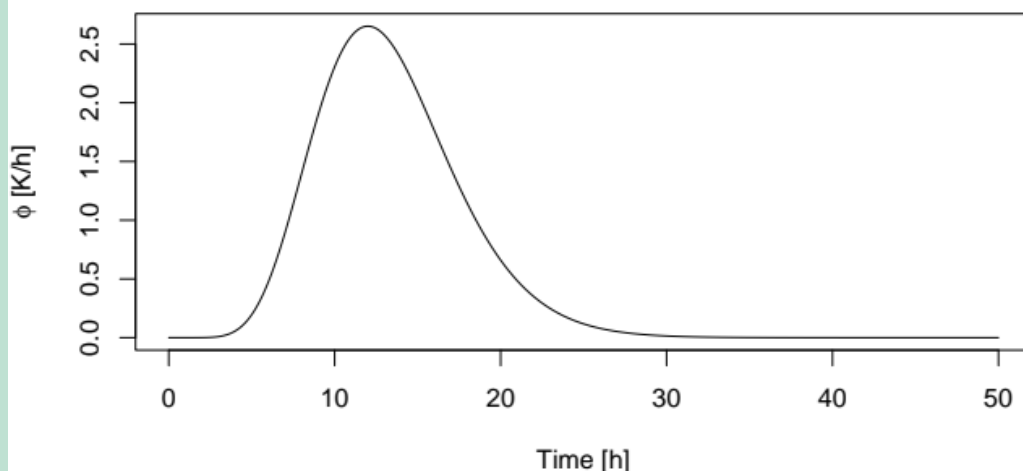
$$\phi(t) = \frac{k\gamma^\beta t^{\beta-1} e^{-\gamma t}}{\Gamma(\beta)}$$

parametrene k , γ og β bestemmer således varmeudviklingskurven, der estimeres baseret på tidligere estimerede varmeudviklingskurver samt den aktuelt observerede temperaturprofil.

Varmeutviklingskurven vil teoretisk set afhænge betontypen, her bestemmes den statistisk baseret på det data der er til rådighed på et givet tidspunkt. Parameteren α vil afhænge af placering af sensoren, primært afstand til luft, men bestemmes også fra temperaturprofilen.

Figuren herunder viser et eksempel på varmeudviklings funktionen for de estimerede serier.

Den viste funktion er for det aritmetiske gennemsnit for alle de estimerede serier.

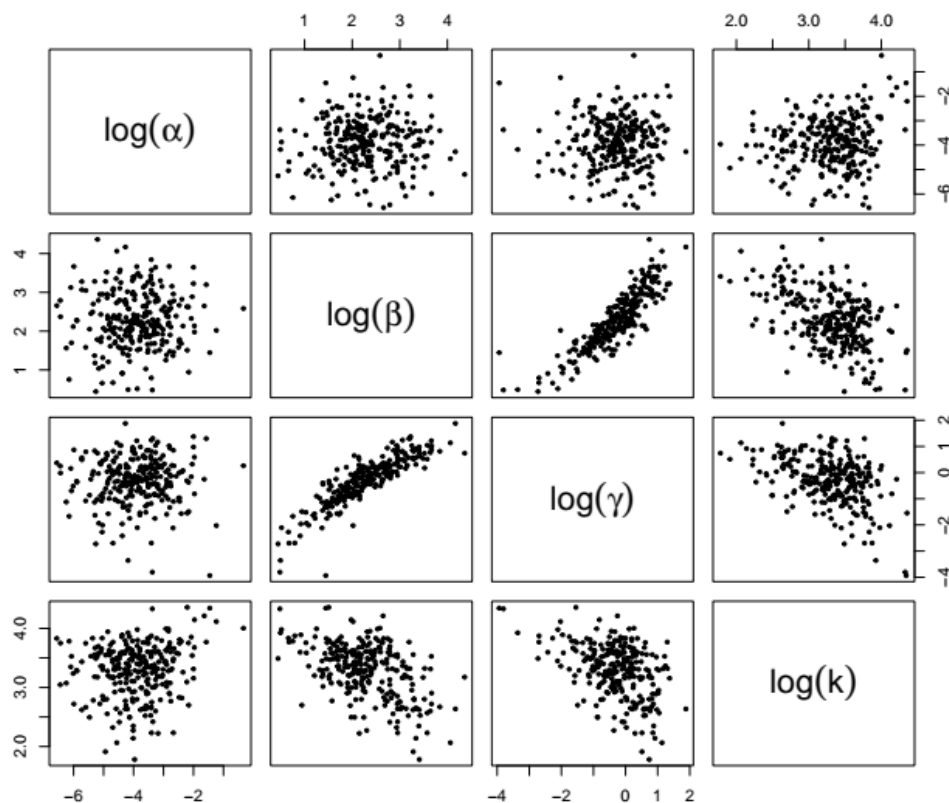


FIGUR 2. Eksempel på varmeudviklings funktion, parametre er taget som gennemsnit af alle estimerede parameter værdier.

I observationsstudier som dem der er lavet her er der mange ubekendte faktorer, der kan indvirke på de faktiske resultater, ligesom modellen ikke tager højde for interaktioner mellem forskellige punktestimer, eksempelvis vil temperaturer forskellige steder i betonen naturligvis påvirke hinanden. For at have en simpel og operationel model ignoreres disse effekter, men vil være indeholdt i parameterestimerer der opdateres for hver ny måling (eller ved på forhånd definerede tidspunkter).

Da alle parametre i modellen er strengt positive estimeres de i log-domænet, estimation i log-domænet vil sædvanligvis også gøre at paramter estimatorer er mere regulære (tættere på normal fordelingen), og dermed refererer prior kovarians matricen, som præsenteres herunder, til logaritmen af paramter værdierne. I estimationen er σ parameteren fri da den giver usikkerheden på prædiktionerne.

Figuren herunder viser de estimerede værdier af de dynamiske parametre. β og γ beskriver formen på varmeudviklings funktionen (ϕ), og er derfor meget korrelerede, mens k beskriver den maksimale varmeudvikling, der også har en vis korrelation med de to andre parametre, der beskriver varmeudviklingen. α der beskriver varmetab har lille korrelation med de andre parametre i modellen.



FIGUR 3. Scatterplot af estimerede (log-)parametre for den dynamiske model, parametre er estimeret for hver enkel tidsserie ved brug af alle observationer på den enkelte tidsserie.

2.4 Modenhed

Det egentlige produkt fra modellen er betonens modenhed der er en tidsækvivalent der udregnes fra temperaturen i betonen ved udtrykket,

$$t_{eq}(t) = \int_0^t \exp \left[\frac{-E_a(T(u))}{R} \left(\frac{1}{T(u)} - \frac{1}{T_s} \right) \right] du$$

hvor $T_s=293$ K er reference temperaturen, $T(u)$ er beton (sensor) temperaturen (målt i Kelvin), $R=8.3144$ J/K er gaskonstanten og E_a er aktiverings energien,

$$E_a(T) = E'_a + 1470(293 - T) \text{ for } T < 293K$$

og den materiale specifikke konstant er sat til $E'_a = 33500$ J dette studie. For $T > 293$ K er $E_a(T) = E'_a$. Dette betyder at for en given sekvens af temperaturer kan modenheden udregnes. Konkret approksimeres integralet ovenfor med en sum over målte og forudsagte temperature ved en given tidsopløsning (her 10 min).

2.5 Model bibliotek

Forudsigelses modeller bygger på en blanding af prior viden om parametre og viden opbygget fra den aktuelle cast, prior viden er opbygget ved hjælp et bibliotek af estimerede parametre på historiske cast. I det aktuelle studie er dette simuleret ved at antage at alle andre cast er

kendte når der forudsiges. Når data fra en serie kommer ind gennem systemet opbygges viden om den aktuelle cast ved at lægge mere vægt på den aktuelle cast og mindre på de historiske cast. Formelt bruges såkaldt MAP (maximum a posteriori) estimation. Hvor fordelingen af tidligere estimater tillægges en vis vægt.

Konkret er prior kovarians matricen givet ved:

$$\Sigma_{prior} = \frac{1}{w} \Sigma$$

hvor Σ er varians-kovarians matricen for de historiske serier og w er en vægt der skal sættes. Når w er lille lægges stor vægt på den aktuelle cast, mens hvis w er stor lægges mindre vægt på den aktuelle cast. Parametre for en aktuel cast udregnes ved likelihood estimation fra den beskrevne model med en prior der afhænger af de historiske serier i biblioteket.

Model biblioteket opbygges ved at inkludere estimerede parametre fra individuelle serier (dvs. uden priors), her er det vigtigt at de parametre der inkluderes er godt bestemt. Hvor godt en parameter er bestemt kan evalueres fra "standard error" af model parametrene, disse kan bestemmes fra Fishers informations matrix, i tilfælde hvor "standard error" er stor udelades det konkrete parameter sæt fra estimationen. Parameteren w er i det følgende sat til $w=144$, hvilket svarer til at prioren har samme vægt som 144 observationer (svarende til et døgn's målinger).

2.6 Prædiktioner og resultater

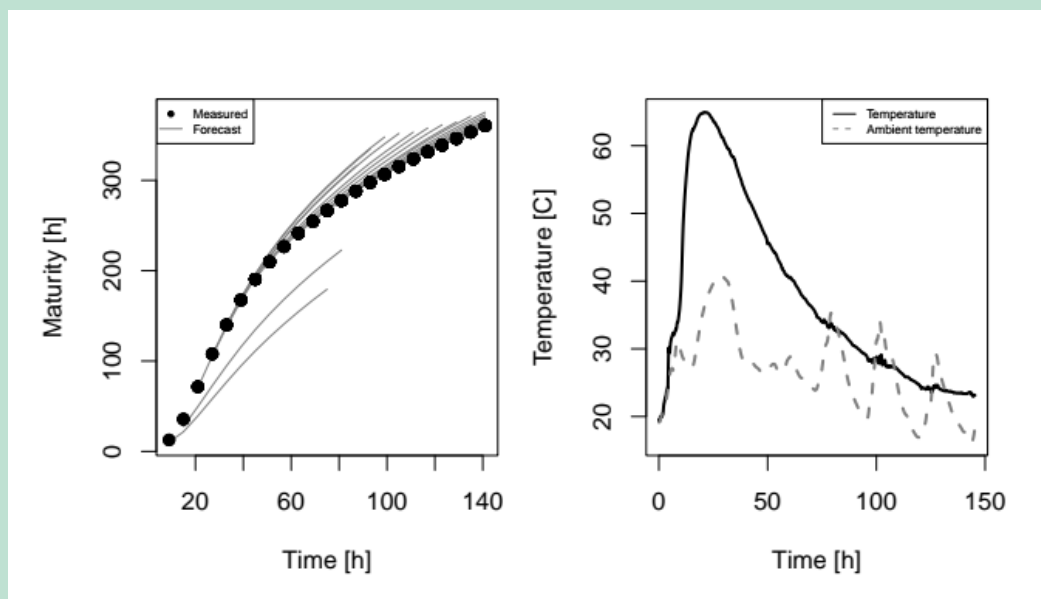
Kvaliteten af forudsigelserne er evalueret ved "root mean square error" (RMSE) af forudsigelser lavet 3, 9, ..., 168 timer efter den identificerede start på "cast'en", med forudsigelses horisonter 6, 12, ..., 72. Dvs. op til 3 døgn's forudsigelser af modenhed lavet op til en uge efter start på cast.

Forudsigelser er defineret som middelværdi forudsigelser fra den dynamiske model med information op til tid t for den individuelle serie og informationen fra de øvrige serier (inkluderet i prior'en).

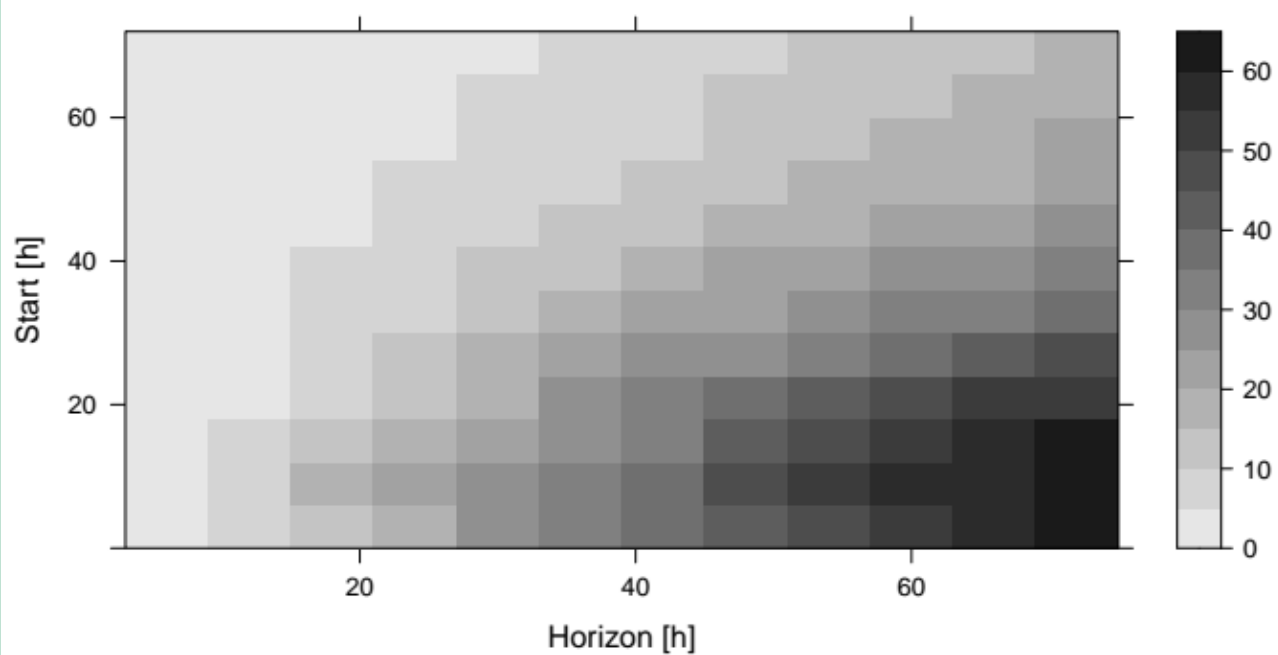
Figuren herunder viser et eksempel på en temperatur serier, modenhed samt forudsigelser lavet ved de nævnte tidspunkter (op til den sidste observation i serien). Fra figuren ses det at langtidsforudsigelser lavet tidligt i serien er ret upræcise, men også at forudsigelser lavet efter omkring 20 timer i dette tilfælde bliver rimelig præcise også på længere horisonter. Figuren illustrerer at modellen har brug for information om den konkrete cast for at lave præcise forudsigelser af modenheden.

En mere overordnet evaluering af de omkring 300 serier kan ses i figuren herunder (vist for prædiktioner lavet op til 72 timer efter start), konklusionen fra figuren er den samme som fra eksemplet overfor nemlig at langtidsforudsigelser lavet tidligt er ret upræcise, mens forudsigelser lavet senere er præcise, også på lange horisonter. Eksempelvis er RMSE for modenhed for 18 timers forudsigelser lavet omkring 21 timer efter start på cast'en mellem 5 og 10 timer (målt i modenhed).

Af ovenstående ses det at modenheden kan forudsiges ved hjælp af de dynamiske modeller og at information fra tidligere cast's kan inkluderes i modellerne ved hjælp af priors, ikke overraskende bliver forudsigelser mere præcise efterhånden som mere information fra den konkrete cast bliver inkluderet i modellerne.



FIGUR 4. Venstre plot: Eksempel på forudsigelser af modenhed af beton for en enkelt cast, punkter indikere observeret modenhed, mens grå linjer viser forudsigelser genereret på forskellige tidspunkter. Højre plot: Tilhørende temperatur profil for beton temperatur og udendørs-temperatur (observerede værdier).



FIGUR 5. "Root mean square error" af prædiktionsfejlen for prædikeret modenhed for prædiktions horisonter fra 3-72 timer (x-aksen) og starttidspunkter for prædiktionen mellem 3 og 72 timer (y-aksen).

3. Prædiktation af temperaturudvikling (2)

2. del. Forfatter: Mads Hegnby, Maturix

3.1 Indledning

På baggrund af arbejdet fra DTU, angående den prædiktive del af projektet, blev der undersøgt andre muligheder i forbindelse med prædiktation af temperatur -og styrkeudviklingen i betonestøbninger. Dette har både bestået i at videreudvikle en model der automatisk kan detektere støbningstidspunkt samt en model der kan drage prædiktive konklusioner om styrkeudviklingen. Projektet drager paralleller til arbejdet beskrevet ovenfor af DTU, i det den anvender den samme matematiske model til at beskrive temperaturudviklingen, mens de primære forskelle ligger i anvendelsen af denne model samt algoritmen der automatisk estimerer støbningstidspunktet.

3.2 Cast recognition

For automatisk at kunne detektere støbningstidspunktet, blev der udviklet en Machine Learning model der automatisk analyserer den målte temperaturserie for et støbningstidspunkt. Algoritmen er hovedsageligt baseret på at temperaturudviklingen i begyndelsen af støbningen sker eksponentielt. Ved at transformere denne eksponentielle udvikling logaritmisk, kan der anvendes en hurtig og effektiv lineær regressionsmodel. Dette gøres ved at opdele den målte temperaturserie i mange mindre intervaller, og derefter bestemme den del hvor temperaturen begynder at stige eksponentielt.

$$T(t) = be^{at}, \rightarrow \ln T(t) = \ln b + at$$

For yderligere at indsnævre starttidspunktet ledes der desuden efter følgende karakterer,

- Et stort temperaturspring forårsaget af at sensorer bliver støbt ind i en beton af anden temperatur.
- Et skift fra høj varians til lavere, da temperaturmålinger skifter fra at måle luft med lav varmekapacitet til at måle beton med høj varmekapacitet.
- Et skift fra at både indstøbte og omkringliggende sensorer måler det samme, til at de måler forskellige ting.

Denne startalgoritme blev verificeret på baggrund af 200 målinger hvor det beregnede starttidspunkt blev sammenlignet med det rigtige (sat manuelt efter bedste evne). Ved 91% af tilfældene blev starttidspunktet fundet korrekt, i 5% blev det fundet en smule for sent eller for tidligt (hvor det stadig kunne anvendes delvist), hvorimod i de resterende tilfælde blev starttidspunktet enten ikke fundet eller fundet helt forkert. På baggrund af hvilke kriterier der blev fundet i temperatursignalet, var det desuden muligt at give indikationer på hvor sandsynligt det er at det fundne starttidspunkt er det korrekte.

3.3 Prædiktation

Selve prediction modellen består af to overordnede dele, først opstilles og løses den matematiske model, der skal beskrive temperaturforløbet i beton. Herefter fittes den løsning til de målte data, med henblik på at kunne ekstrapolere prædiktive konklusioner. Disse to dele vil

blive beskrevet nedenfor, hvorefter modellen vil blive valideret. Sidst vil der blive beskrevet kort hvordan modellen bruges i praksis i Maturix' systemer.

3.4 Semi-fysisk Model

For at kunne fitte en model til de målte temperaturserier, kræver det at der udledes en matematisk eller fysisk model der kan generere løsninger som passer til de karakteristiske temperaturforløb der oftest ses i beton.

Varmefordelingen i enhver struktur menes at kunne bestemmes ved hjælp af Fouriers varmeligning, som er en parabolisk partiel differentialligning givet ved,

$$\frac{dT}{dt} + \nabla \cdot \nabla T = S(t),$$

hvor $T(t)$ beskriver temperaturen til tiden t og $S(t)$ er en varmekilde i objektet. Løsningen til ligningen skal dog findes ved hjælp af numeriske metoder, der hurtigt kan kræve meget beregningstid. Desuden, kræver ligningen information om både topologi, grænsebetingelser og materialeegenskaber, som i dette projekt ikke er kendte, da formålet med projektet er at algoritmen skal kunne anvendes på enhver måling, baseret udelukkende på målingen.

For dog stadig at kunne modellere diffusions-lignende løsninger, anvendes en forsimplet ordinær differentialligning, allerede foreslået i arbejdet fra DTU,

$$\frac{dT}{dt} = S(t) - \alpha \Delta T,$$

Hvor ΔT beskriver temperaturdifferentialet mellem målingen og omgivelserne og α beskriver hvor meget denne skal vægtes. Tilsvarende, skal der udledes et udtryk for varmekilden, igen uden information om de anvendte materialer og deres egenskaber. På baggrund af arbejdet fra DTU anvendes en gammafordeling til at beskrive denne udvikling,

$$S(t) \approx A \frac{t^{k-1} e^{-t/\theta}}{\theta^k \Gamma(k)},$$

hvor A, k, θ er ukendte matematiske variable som i flæng med variabelen α skal fittes baseret på den målte data gennem disse to ligninger. De to ligninger beskriver tilsammen den model som skal generere løsninger, der kan anvendes til at estimere prædiktive konklusioner om de observerede tidsserier. Modellen har ikke direkte nogen relation til de fysiske systemer, og er udelukkende en matematisk model som lader til at kunne beskrive lignende løsninger.

På grund af den højt ulineære varmekilde, giver det ikke mening at løse differentialligningen analytisk. I stedet diskretiseres systemet hvorved en 4. ordens Runge-Kutta metode anvendes til at fremskrive løsningen,

$$k_1 = hf(t_n, T_n)$$

$$k_2 = hf(t_n + \frac{h}{2}, T_n + \frac{k_1}{2})$$

$$k_3 = hf(t_n + \frac{h}{2}, T_n + \frac{k_2}{2})$$

$$k_4 = hf(t_n + h, T_n + k_3)$$

$$T_{n+1} = T_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

hvor h angiver skridtstørrelsen på den diskrete tidsakse og $f = \frac{dT}{dt}$ er temperaturdifferentialiet med henhold til tid.

3.5 Prediction Algoritme

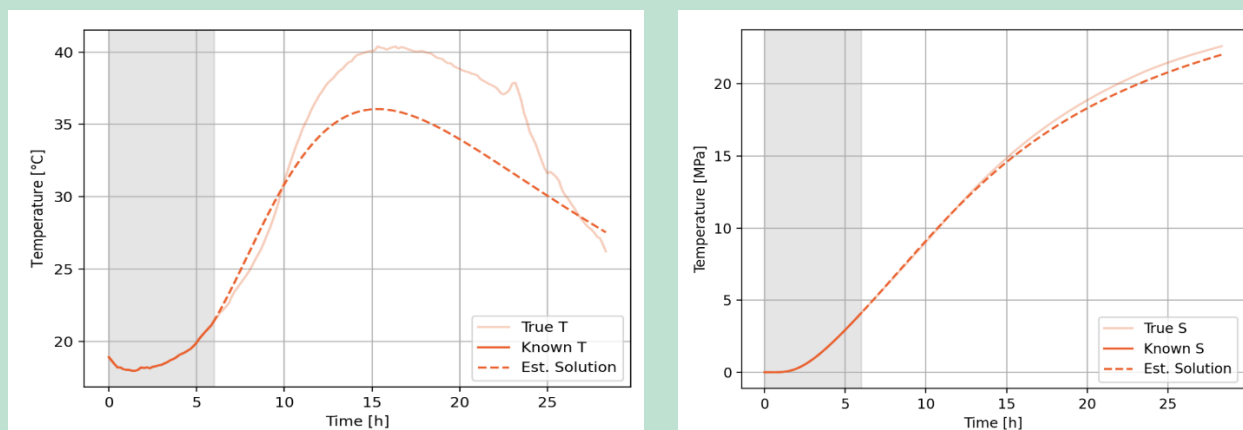
For at kunne ekstrapolere en prædiktiv løsning, bliver løsningen på differentilligningen fittet til den målte temperaturserie, for at de ukendte parametre, α, θ, k, A kan bestemmes. Når disse er kendte, kan løsningen på modellen blive ekstrapoleret ud i fremtiden. Til curve fitting af modellen anvendes en Levenberg-Marquardt algoritme der er baseret på et least squares fit. Imidlertid, da modellen ikke kræver nogle ekstraordinære komplekse problemstillinger, anvendes her blot Python modulet Scipy som har et indbygget optimerings og curve fitting modul, `scipy.optimize.curve_fit`.

Det bedste fit mellem løsningerne og målinger er dog ikke nødvendigvis det fit som giver de bedste prædiktioner. Det formodes at dette skyldes følgende problemstillinger,

- Modellen er en matematisk model, og har ikke nogen relation til den underliggende fysik for systemet.
- Eksterne påvirkninger og støj kan forårsage at modellen bliver fittet til dele af temperatursignalet som ikke skyldes temperaturudviklingen i beton, men støjen i signalet.

Derfor kombineres fitting algoritmen med en Random Forest model, der har til formål at estimere de ukendte parametre på forhånd. Disse estimerer bliver herefter brugt til at opstille fornuftige grænsebetingelser og begyndelsesværdier der anvendes ved curve fitting af løsningen til målingerne. Random Forest modellen er baseret på den nuværende temperatur og dens hældning, omgivelsesbetingelserne, udstøbningstemperaturen samt kalibreringskurven for den anvendte betonmix (modenheds-styrkekurven). Til selve implementationen af Random Forest modellen, blev Python modulet Scikit Learn anvendt (`sklearn.ensemble.RandomForestRegressor`).

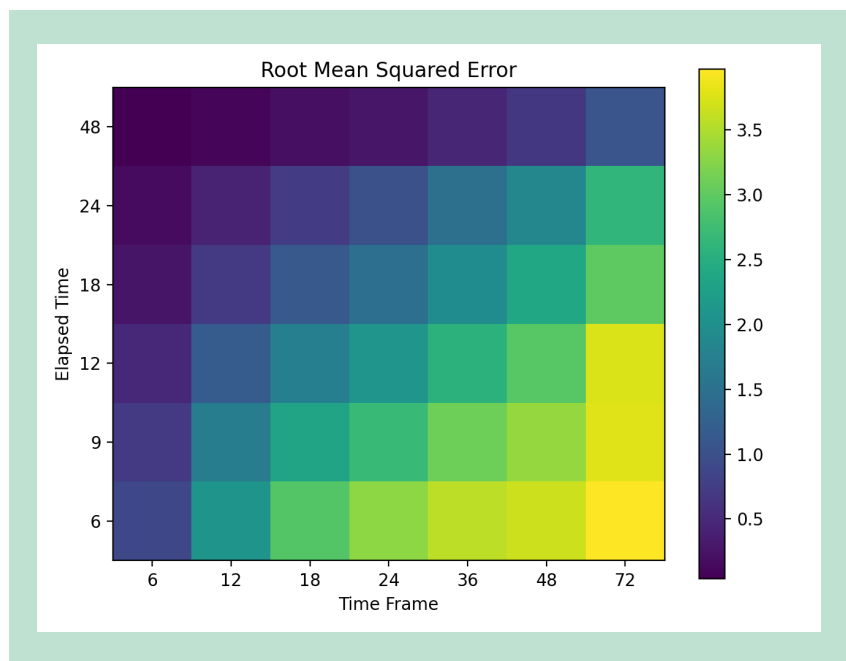
Nedenfor ses et eksempel på anvendelsen af prediction modellen. Styrkekurven er beregnet på baggrund af den anerkendte modenhedsmetode, der også er beskrevet af DTU ovenfor. Modenhedsmetoden bruges til beregning af modenheden, som derefter kan konverteres til styrke gennem kalibreringskurven.



FIGUR 6. Illustration af algoritmens evne til at forudsige det fremtidige temperatur (venstre) - og styrkeforløb (højre) for en enkelt betonmåling, baseret på seks timers målt data. Det grå felt markerer den kendte del af målingerne, hvor den tykke orange linje viser det målte temperatur- og styrkeforløb, mens den tynde orange viser den reelle fremtidige udvikling og den stiplede linje viser den estimerede kurve.

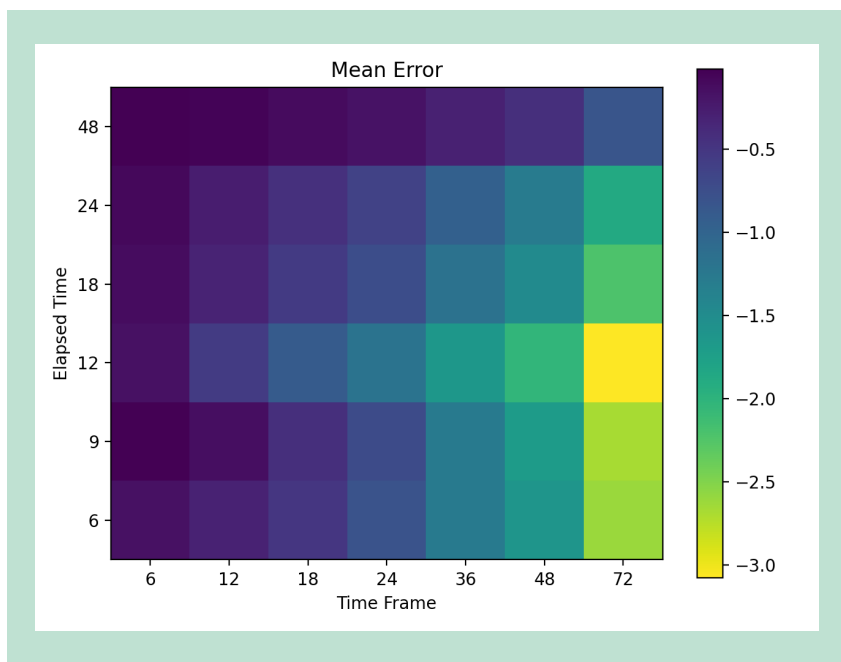
3.6 Validering

For på bedst vis at kunne validere modellens evne til at lave prædiktioner på styrken for forskellige betonstøbninger, omregnes alle temperaturprædiktioner til styrkeprædiktioner ved hjælp af modenhedsmetoden. Herefter valideres modellen ved at beregne root mean square afvigelse. Dette blev gjort både som funktion af tiden siden der blev støbt (elapsed time) og den fremtidige tidshorisont (time frame). Resultatet kan ses på nedenstående figur (alle akser er i timer).



FIGUR 7. Root mean squared error (RMSE) plot, den viser RMSE afvigelse som funktion af den forløbne tid og fremtidige tidshorisont. Som forventet er afvigelse størst hvis man forsøger at forudsige styrke langt ud i fremtiden relativt tidligt i forløbet (nede højre hjørne). Som tiden passerer vil afvigelse dog falde både for tidlige og lange fremtidsudsigter.

Det viser sig dog også at modellen er biased, da den har en generel tendens til at overestimere temperaturudviklingen og derfor også styrkeudviklingen. Dette kan ses på baggrund af de gennemsnitlige afvigelser i figuren nedenfor, hvor det tydeligt ses at de gennemsnitlige afvigelser på tværs af både elapsed time og time frame er negative. For en unbiased model skulle gennemsnitsafvigelserne gerne centrere sig omkring 0.

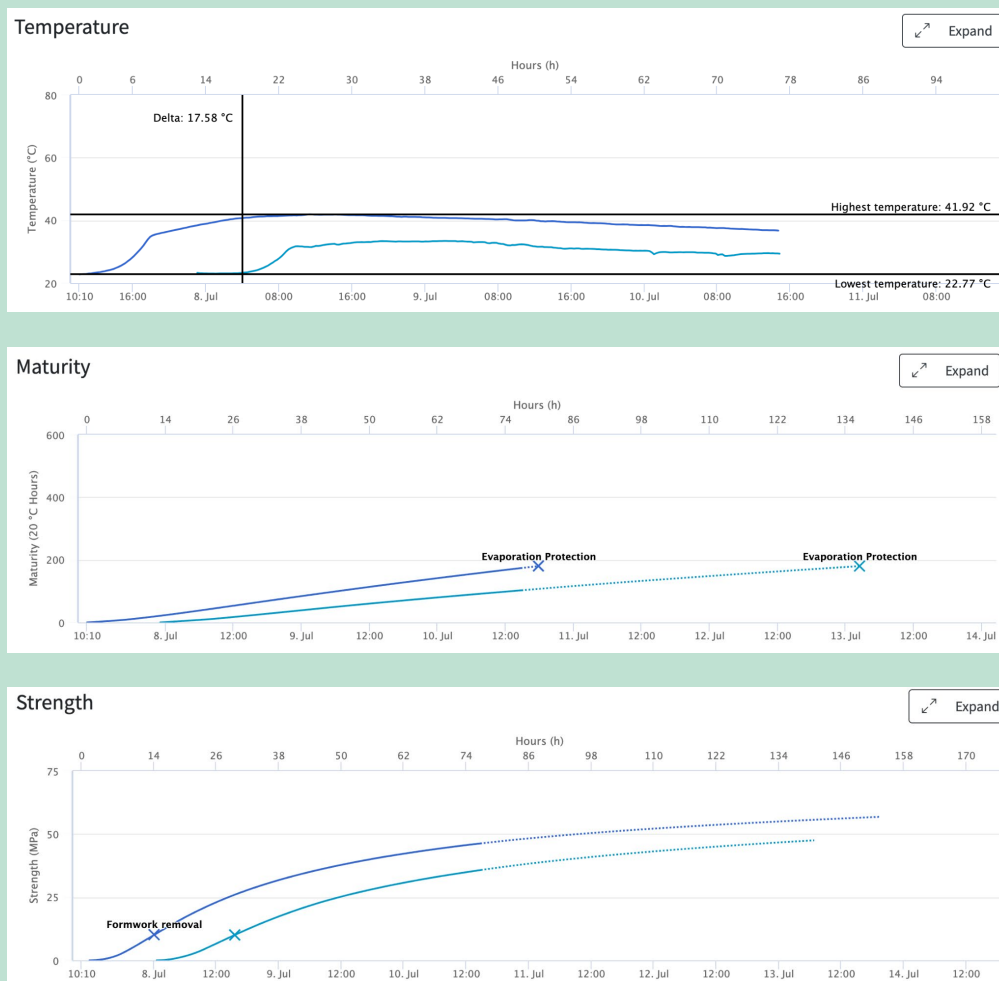


FIGUR 8. Den gennemsnitlige afvigelse på styrkeberegningerne. Her er det ikke størrelsen på afvigelsen der er relevant, da positive og negative målinger annullerer hinanden. En god og robust model skal gerne have en ubetydelig gennemsnitlig afvigelse, uagtet hvor store positive eller negative afvigelser der må være, da dette vil betyde at modellen ikke er biased, og altså ikke har en tendens til hverken at overskyde eller underskyde styrken systematisk. I dette tilfælde kan det dog ses at modellen for nogle få kombinationer af forløbet tid og tidshorisont er en smule biased.

3.7 Implementering

Predictionalgoritmen præsenteret her er implementeret i Maturix' softwareplatform Insitu, der mere generelt anvendes til at lagre og visualisere temperaturmålingerne for betonstøbninger. Her er algoritmen blevet integreret således at hvis der i Insitu indtastes et modenheds -eller styrketarget, så vil algoritmen blive anvendt til at estimere tidspunktet for hvornår dette target kan forventes at blive opnået.

På platformen vises både temperatur, modenhed og styrkeudviklingen, hvoraf de sidstnævnte beregnes automatisk på baggrund af kalibreringskurven angivet af kunden. Da temperaturudviklingen varierer en del, og i sig selv ikke har nogen prædiktiv værdi, vises kun modenheds - og styrkeprædiktioner. Implementeringen kan ses nedenfor.



FIGUR 9. Eksempel på algoritmen i drift i Maturix Insitu systemet. I skrivende stund laves over 100 forudsigelser af styrke og modenhed dagligt i systemet, som kan ses når brugerene har sat enten styrke -eller modenhedstargets på deres målinger.

3.8 Anvendelse

De prædiktive resultater bliver i høj grad anvendt af både byggeledere og entreprenører, da det giver en kæmpe fordel når det kommer til planlægning af projekter. Når man har støbt, kræver det nemlig at konstruktionen har en bestemt styrke, før man kan arbejde med den, eksempelvis fjerne forskalling, tilføje vægt eller flytte konstruktionen.

Ved at anvende et prædiktivt værktøj, som dette, kan man som byggeleder få indsigt i netop hvornår man forventer at kunne gøre disse ting. De prædiktive resultater kan ikke blot bruges til at estimere styrken til et bestemt tidspunkt, men også at estimere tidspunktet for en bestemt styrke.

På den måde kan man som byggeleder eller entreprenør sørge for at de redskaber, maskiner og mandskab er tilgængelige i det tidsrum hvor man forventer at konstruktionen er stærk nok. På den måde formindsker man også mængden af tid, hvor maskiner, mandskab, forskalling eller lignende ikke er i brug, hvilket ofte enten giver en besparelse af tid, ressourcer eller begge.

Udover at kunne anvendes til styrkemæssige formål, kan modellen også anvendes til at estimere de forventede maksimale temperaturer i støbningen. Dette giver mulighed for at man kan

estimere hvorvidt der er behov for fjernelse eller tilføjelse af isolering for både at undgå for høje temperaturer samt undgå for store temperaturdifferentialer i støbningen. Derved kan man potentielt set undgå problemer med den strukturelle integritet i støbningen som nedsat slutstyrke eller revner, hvilket igen danner grundlag for optimering af både ressourcer og tid.

4. CO₂ beregner til beton

Forfatter: Thomas Juhl, Maturix og Jesper Ketelsen, Dansk Beton

4.1 Indledning

Kalkulatoren formål er at hjælpe forskellige aktører med at forstå, hvordan deres beslutninger om valg af betontype og -styrke påvirker CO₂-aftrykket. For at opnå dette viser kalkulatoren sammenhængen mellem betonklasse, valg af tidlig styrke og CO₂-udslip. Kalkulatoren er beregnet til brug af hovedentreprenører, fabriksbetonproducenter, bæredygtighedskonsulenter eller enhver, der er interesseret i at træffe mere informerede beslutninger vedrørende deres beton og CO₂-aftryk.

4.2 Baggrund

Ifølge Chatham House-rapporten forfattet af Lehne og Preston (2020), bruges der hvert år mere end 4 milliarder ton cement på verdensplan. Dette svarer til cirka 8% af det samlede globale klimaaftryk. Beton består af en blanding af cement, vand, tilslag (sten og sand) og eventuelt additiver. Den mest CO₂-intensive del er produktionen af cement, da dette kræver brug af fossile brændstoffer til at opvarme en blanding af kalksten og ler til mere end 1.400 °C i en ovn. Under denne proces frigives cirka 600 kilogram kemisk bundet kuldioxid for hver ton cement, der produceres (Springer Nature Limited, 2021).

På grund af det høje potentiale for CO₂-besparelser har der været og bliver der fortsat forsket meget i måder at reducere cementindholdet i beton. To af de mest almindelige tilgange er at reducere mængden af cement ved optimering af opskriften og at erstatte en del af cementet med andre materialer.

Lovgivningsmæssigt er der også fokus på at reducere CO₂ aftrykket fra bygninger og dermed også bygningsmaterialer.

Med afsæt i Klimaloven fra 2020, hvis formål er, "at Danmark skal reducere udledningen af drivhusgasser i 2030 med 70 pct. i forhold til niveauet i 1990" udgav Indenrigs og boligministeriet i april 2021 "National strategi for bæredygtigt byggeri", der også følger op på anbefalingerne fra Klimapartnerskabet for bygge- og anlægssektoren, der igennem et større arbejde har præsenteret en række forslag til reduktion af CO₂-udledninger.

Strategien begyndte at indfase krav til klimaaftryk for byggeri i form af krav i Bygningsreglementet hvor store bygninger (>1000 m²) fra 2023 skal begrænse deres klimaaftryk til 12 kg CO₂ eq/m²/år dokumenteret ved livscyklusanalyse (LCA). Samtidig indførtes den frivillige bæredygtighedsklasse (FBK), hvor grænsen er 8 kg CO₂ eq/m²/år. Grænseværdierne bliver skærpet i 2025, og bliver forhandlet lige nu.

Problemet: Som nævnt i baggrundsafsnittet er der i øjeblikket offentliggjort en stor mængde forskningsdata om foranstaltninger til at reducere CO₂ aftrykket fra beton. Imidlertid bliver disse resultater ofte ikke anvendt i praktisk. Dette skyldes en kombination af faktorer såsom: tendensen til at foreskrive og bruge traditionelle løsninger/produkter, Vanskelighederne ved at ændre allerede etablerede praksisser og trægheden i tilslutning til nye teknologier.

Desuden er der et ret almindeligt problem, der bringer de førnævnte foranstaltninger i fare, nemlig overdimensionering af beton. Vi definerer betonoverdimensionering som "brugen af en

betonblanding eller betonklasse, der overstiger den specificerede styrke med én eller flere styrkeklasser". For eksempel, hvis en betongulvspecifikation kræver en betonblanding i styrkeklasse C20/25, men i stedet anvendes en C30/35. Dette problem skyldes hovedsageligt en kombination af risikobegrænsende praksisser og krav til tidlig styrke. Normalt vil en højere styrkeklasse blive bestilt for at:

- Opnå en høj tidlig styrke, så man kan fortsætte med de planlagte aktiviteter.
- Reducere risikoen for, at der anvendes et forkert produkt til en given konstruktion. Ved at anvende samme høje styrkeklasse til alle konstruktioner bestilles og indbygges, der ikke et produkt med forkerte specifikationer.

Styrkeklassen dikteres undertiden også af kravet om en lav v/c-ratio, som typisk er forbundet med det miljø konstruktionen eksponeres for og er et holdbarhedskrav. En lav v/c-ratio vil typisk resultere øget brug af cement og højere styrke.

Problemet med overdimensionering er vigtigt, fordi jo højere cementindholdet er, desto højere bliver CO₂-aftrykket. Derfor, hvis en højere styrkeklasse anvendes, vil CO₂-aftrykket typisk også stige, hvis det er baseret på samme cement. Således, hvis stigningen i styrkeklasse kan minimeres eller undgås, kunne en del af CO₂-aftrykket forebygges.

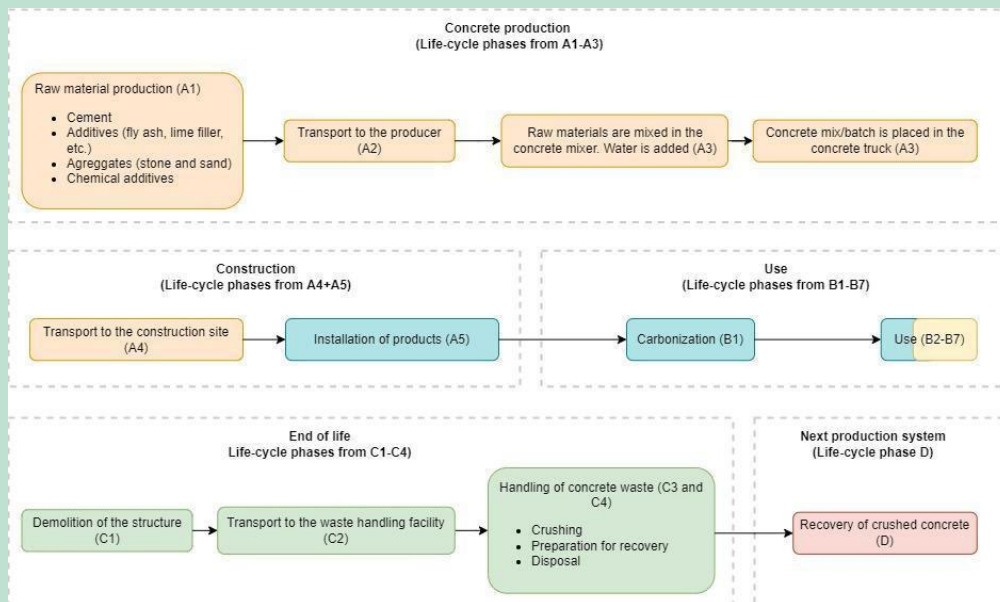
Dette er ikke en ukendt problemstilling og Dansk Beton har for at italesætte dette i marts 2023 udgivet "Dialoggrundlag for designoptimering af betonkonstruktioner", hvor der i formålet blandt andet står: "Formålet med Dialoggrundlaget er at bidrage til, at vi i fremtidens byggeri i Danmark anvender beton ansvarligt med respekt for de afledte CO₂-udledninger og ressourceforbrug"

4.3 CO₂ kalkulator

Udvikling af en CO₂-kalkulator, skal hjælpe brugerne med at forstå, hvordan deres valg af beton påvirker CO₂-aftrykket. Kalkulatoren viser sammenhængen mellem betonklasse, valg af tidlig styrke og CO₂-aftryk. Målet er at gøre denne sammenhæng synlig for de relevante aktører, så de kan vælge den beton, der passer bedst til opgaven. Forhåbentlig vil dette hjælpe med at minimere den overdimensionering, der sker på grund af krav til tidlig styrke og risikobegrænsning.

Metoder og datakilder: For at fungere kræver kalkulatoren CO₂-data samt data om tidlig styrke. CO₂-dataene blev hentet fra Miljøvaredeklarationer (EPD). EPD'er er uafhængigt verificerede og registrerede dokumenter, der analyserer produkters miljøpåvirkning i hele eller dele af deres livscyklus. Du kan læse mere om det her: www.epddanmark.dk. Som defineret i ISO 14044:2006, er EPD-livscyklussen opdelt i:

Production				Building Process				Use				End of life				Outside boundaries
Raw materials	Transport	Manufacturing	Transport	Installation	Use	Carbonization	Reparation	Replacement	Renovation	Energy Use	Water Use	Demolition	Transport	Waste Treatment	Disposal	Reuse and Recycling
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D



FIGUR 10. LCA beskrivelsen af beton fra råvare til nedbrydning.

Nogle af de miljøpåvirkninger, der rapporteres i EPD'er, er de ækvivalente CO₂-aftryk, for-suring af fjorde og vand eller eutrofiering blandt andre. Til kalkulatoren besluttede vi kun at inkludere det globale opvarmningspotentiale (GWP = CO₂-aftryk), da dette er den mest anvendte parameter i byggebranchen. Desuden vises CO₂-aftrykkene i kalkulatoren kun fra produktionsfaserne (A1-A3). Denne beslutning blev taget på grund af den øgede variabilitet i CO₂-resultaterne i de senere faser.

EPD typer: Der er tre hovedtyper af EPD'er ifølge EPD Danmarks program instruks 2.0:

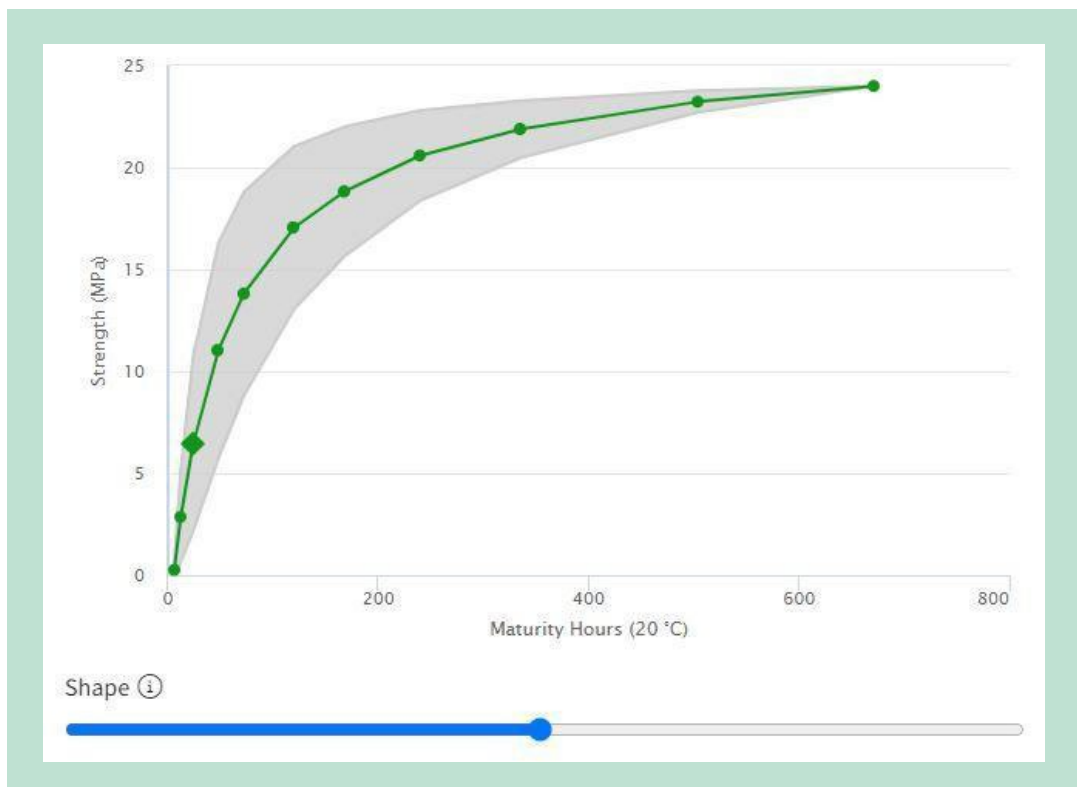
- **Branche EPD:** Dækker flere producenter og er derfor baseret på gennemsnitsdata. EPD'en kan dække et enkelt produkt eller flere produkter, hvis variationen mellem dem holder sig inden for en fastsat grænse. En Branche EPD skal publiceres.
- **Produkt-EPD,** Dækker en producent, men kan dække flere produktionssteder hos samme producent. EPD'en kan dække et enkelt produkt eller flere produkter, hvis variationen mellem dem holder sig inden for en fastsat grænse. En Produkt EPD skal publiceres.
- **Projekt EPD:** Variation af en Produkt EPD, der er udviklet for et specifikt produkt fra en producent til en specifik kunde/projekt. En Projekt EPD skal ikke publiceres.

Kalkulatorens CO₂-data blev taget fra de danske branche-EPD'er lavet af Dansk Beton Fabriksbetonforeningen. Disse omfattede: Færdigblandet beton (eksplosionsklasser X0, XC1), Færdigblandet beton (eksplosionsklasser XC2, XC3, XC4, XF1 og XA1), Færdigblandet beton (eksplosionsklasser XD1, XS1, XS2, XF2, XF3 og XA2) og Færdigblandet beton (eksplosions-

klasser XD2, XD3, XS3, XF4 og XA3). I nogle af EPD'erne var der forskellige typer af betonblandinger til samme styrkeklasse. I dette tilfælde blev CEM I-værdierne anvendt. Alle de nævnte EPD'er kan findes på EPD Danmarks hjemmeside.

4.4 Data om tidlig styrke

For data om tidlig styrke blev brugen af Modenhedskurver* valgt, da dette er, hvad Maturix har den dybeste viden om. I Maturix In-situ-softwaren findes der et Betonbibliotek med mere end 1000+ betonblandinger grupperet efter styrkeklasse. Hver betonklassegruppe består af blandinger, der har forskellige styrkeudviklingsprofiler, fra hurtigst til langsomst. Modenhedskurverne, der blev brugt til modenhedsberegningerne, blev opnået ved at vælge den gennemsnitlige styrkeudviklingsprofil fra hver af styrkeklassegrupperne. Et eksempel på dette kan ses nedenfor:



FIGUR 11. Billedet ovenfor stammer fra Maturix Insitu software som viser den gennemsnitlige styrkeudvikling samt outliers indikeret via den grå-zone.

* Modenhedskurver er grundlaget for Modenhedsmetoden. Hvis du ikke er bekendt med dette, anbefaler vi at læse (fra www.maturix.com)

- [Introduction to Concrete Maturity](#)
- [What is the Maturity Method?](#)

4.5 Omgivelsestemperatur

Under de tidlige udviklingsfaser af kalkulatoren inkluderede den ikke omgivelsestemperaturen. Derfor blev det antaget, at denne forblev konstant ved 20 °C. Dette skyldes, at ifølge ASTM 1074 skal temperaturen holdes konstant ved 20°C eller 23°C i USA under modenhedskalibreringen. Men dette havde et problem: temperaturen har indflydelse på den tid, det tager for beton at udvikle sin styrke.

Når man bruger Freiesleben Hansen & Pedersen modenhedsmodellen (Arrhenius), ville den mest præcise tilgang være at bruge betonblandingsens interne temperaturhistorik og konvertere den til reference temperaturen (20 °C) ved hjælp af ratefaktorer. Den interne temperatur kan påvirkes af mange faktorer såsom beton-geometri, type, placering, hærdningsmetoder og vejr. Dette gør det udfordrende at skabe en gennemsnitlig temperaturprofil for hver styrkeklasse uden at kræve omfattende generaliseringer og antagelser.

For at overvinde dette bruges omgivelsestemperaturen som den interne temperatur. Dette betyder, at hvis 40 °C vælges i rullemenuen for omgivelsestemperatur, vil dette blive brugt i formelen som betonens interne temperatur.

Denne tilgang kommer med sine egne begrænsninger, da omgivelsestemperaturen ofte kan være lavere end betonens interne temperatur på grund af den eksotermiske natur af cementhydratiseringsprocessen. Men det var et kompromis, der blev indgået for at inkludere temperatur og for at forenkle kalkulatorprocessen. Derfor er det vigtigt at bemærke, at den modne alder, der vises i kalkulatoren, kun er skøn.

Omfang CO₂-dataene, der vises i kalkulatoren, er fra Danmark, mens data om tidlig styrke kommer fra Maturix-databasen, som indeholder en blanding af betonblandinger fra forskellige dele af verden. Under forskningsprocessen blev det fundet, at CO₂ varierer meget afhængig af landet på grund af forskellige regler, produktionsprocesser og energikilder blandt andet. Derfor kan CO₂-data fra andre lande for de forskellige styrkeklasser være forskellige fra dem, der vises i Maturix CO₂-kalkulatoren.

Herunder ses nogle screendumps fra CO₂-beregneren. Som kan afprøves på

<https://consave.maturix.com/index.html>

The screenshot displays the Maturix CO₂ calculator interface. It is divided into three main sections: 'Instruktioner' (Instructions), 'Inputs', and 'Resultater' (Results).

Instruktioner: Contains three numbered steps for using the calculator, including selecting a concrete strength class, setting the curing time, and choosing an ambient temperature.

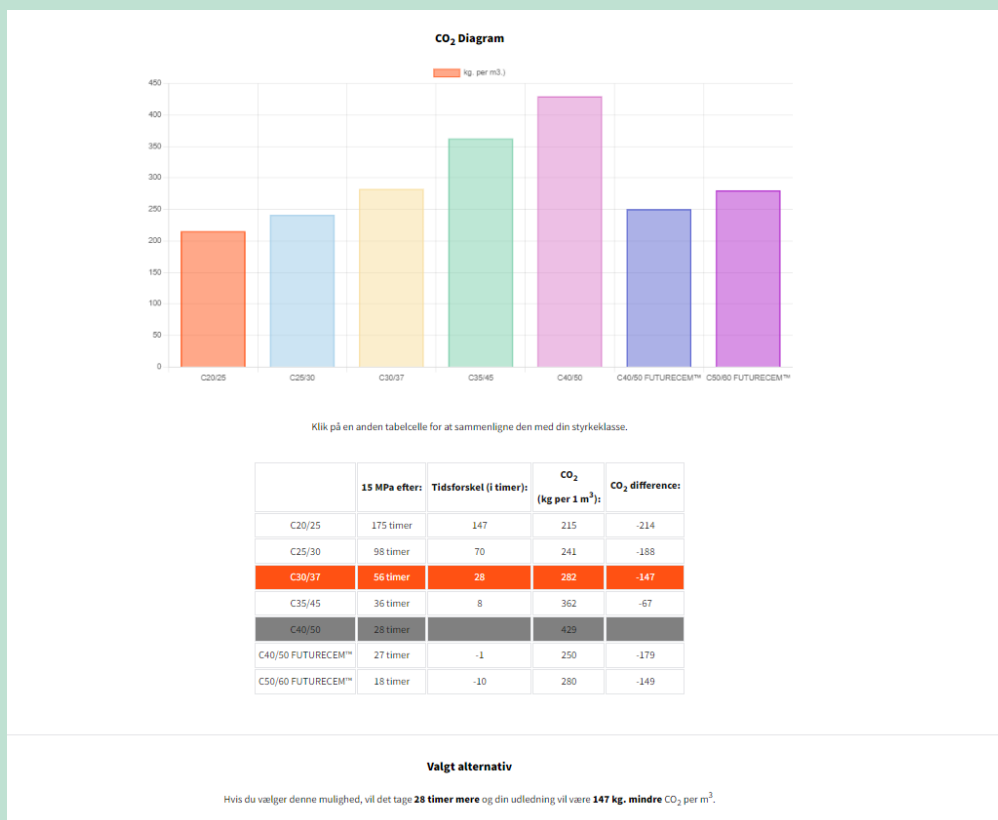
Inputs: A form with three dropdown menus: 'Beton Styrkeklasse' (set to C40/50), 'Tidlig styrke (MPa)' (set to 15), and 'Formodede omgivelsestemperatur' (set to 20 °C). A red 'Beregn' (Calculate) button is at the bottom.

Resultater: A table showing the calculated values:

Styrkeklasse	Samlede emissioner	Tidlig styrke
C40/50	429 kg CO ₂ -eq. per m ³	15 MPa til 28 timer

A note below the table states: 'Den valgte styrkeklasse er i stand til at nå den tidlige styrke i det antal dage, du har valgt.'

FIGUR 12. Ovenfor ses et screendump af ConSave Co2-beregner som er ligget til fri brug på ovennævnte webadresse.



FIGUR 13. Screenshot fra ConSave CO₂ beregneren.

4.6 Anvendelse

Arbejdet med CO₂ beregneren vil fortsætte også efter projektafslutningen, da det et primært fokus hos Dansk Beton og Maturix at få øget bevidstheden hos brugerne omkring deres valg af beton ift. CO₂.

Der er allerede interesse fra udenlandske betonleverandører på en tilpasset model til deres egne betoner. Og vi ser generelt en øget interesse i værktøjer som kan italesætte CO₂ problematikken på nem og hurtig måde ligesom denne CO₂ beregner.

5. Forsøg med styrkeudvikling for grønne betoner

Forfatter: Claus V. Nielsen, Benjamin Ebert og Lars Thrane, TI Beton

5.1 Indledning

De senere år er der sket meget på bæredygtighedssiden i betonindustrien og byggesektoren. Dette omfatter bl.a. oprettelsen af Dansk Betons bæredygtighedsinitiativ i 2019, udgivelsen af branche-EPD'er for forskellige betonprodukter i 2020, lancering af Aalborg Portlands Future-Cem i 2021 og indførelsen af CO₂ grænser for større byggeri igennem byggelovgivningen i 2023. Fælles for disse aktiviteter er ønsket om at reducere betons indlejrede CO₂ aftryk. Dansk Betons bæredygtighedsinitiativ udgav i 2019 et Roadmap mod 2030, hvor der skal ske en halvering af betonindustriens CO₂ aftryk frem mod 2030.

En af de udfordringer, som er identificeret i forbindelse med overgangen til grønnere betoner baseret på nye bindersystemer, er behovet for tidlig styrke ofte dikterer betonens slutstyrke. Dette er relateret til behov for afformning og generel fremdrift på byggepladsen. Temperaturen spiller også ind på den tidlige styrke via bindersystemets aktiveringsenergi. Aktiveringsenergien siger noget om hvor hurtigt cements hydratisering foregår ved forskellige temperaturintervaller. Jo højere temperatur jo hurtigere styrkeudvikling og vice versa.

Consave har arbejdet hen imod en model, der bedre kan hjælpe den udførende med at vælge korrekt beton og styrkeklasse, hvor CO₂ aftrykket er mindst – dvs. undgå unødvendig høj slutstyrke.

For at undersøge og afdække disse udfordringer har Teknologisk Institut gennemført styrkeforsøg på forskellige betontyper (se næste afsnit) lagret ved forskellige temperaturer, hvor styrkeudviklingen er kortlagt. Resultater af disse forsøg skal danne grundlag for Consaves model til forecast af tidlige betonstyrker på byggepladsen.

I de følgende afsnit er forsøgsprogrammet beskrevet samt hovedresultaterne præsenteret. Følgende tre bindersystemer er undersøgt:

- Ren Rapidcement fra Aalborg Portland (CEM I 52,5) som er den mindst grønne. Rapidcement har været den mest anvendte cementtype i Danmark i mange år. Emissionsfaktoren for Rapidcement er 0,80 kg CO₂/kg.
- FutureCem fra Aalborg Portland (CEM II/B-M (Q-LL) 52,5), som er den mest grønne cement i Danmark. FutureCem indeholder ca. en tredjedel kalk og kalcineret ler og er beregnet til generel anvendelse i byggeriet. Emissionsfaktoren² for FutureCem er 0,57 kg CO₂/kg.
- Solid cement fra Aalborg Portland med flyveaske (CEM II/A-V 42,5). Denne cementtype ligger mellem de to ovennævnte mht. CO₂ aftryk, men anvendes primært til anlægsbygværker. Der er desuden tilsat yderligere flyveaske for at gøre betonerne endnu grønnere i forsøgsprogrammet. Emissionsfaktoren² for Solidcement er 0,69 kg CO₂/kg.

5.2 Betontyper og forsøgsprogram

Der er udført test på 3 forskellige bindersystemer (Tabel 1), hvilket har resulteret i 5 forskellige betoner. For at optimere forsøgsprogrammet er det valgt at foretage en del af forsøgsprogrammet med mørtel i stedet for beton. Forskellen på mørtel og beton er at i førstnævnte er stenfraktionen udeladt af blandingen. Dette betyder at der kan foretages styrkeprøvning på mindre terninger (40 mm) set i forhold til beton som typisk styrketestes på ø100 mm cylindre. Derved spares der plads i laboratoriet til store lagringskar og materialer til fremstilling af forsøgsemner. Det giver bedre muligheder for at opnå specifikke datasæt og det er både ressourcebesparende og en forbedring af arbejdsmiljøet i betonlaboratoriet.

FIGUR 14 viser fotos af de anvendte prøveemner.

TABEL 1 indikerer også hvilken effekt de forskellige bindersystemer har på betonens CO₂ aftryk. Der er kun medregnet den del af CO₂ aftrykket, som stammer fra cementen, hvilket erfaringsmæssigt udgør det altdominerende bidrag. Som det fremgår, kan der være omkring 100 kg CO₂ pr. kubikmeter i forskel fra den traditionelle beton baseret på Rapidcement til den mest grønne beton. Der er imidlertid også forskel i betonernes styrker som det kan ses i næste afsnit med forsøgsresultater.

TABEL 1. Oversigt over de tre bindersystemer anvendt i forsøgsprogrammet.

Betegnelse	Rapidcement	FutureCem	Solid cement og FA
Bindersammensætning	100% CEM I 52,5	100 % CEM II/B-M (Q-LL) 52,5	85% CEM II/A 42,5 + 15% FA
Klinkerandel ¹	Ca. 95%	Ca. 70%	Ca. 70%
V/C forhold	0,45 og 0,40	0,46	0,45 og 0,40
Binderindhold	383 og 410 kg/m ³	376 kg/m ³	392 og 418 kg/m ³
CO ₂ aftryk for binder (A1-A3)	307 og 329 kg CO ₂ /m ³	216 kg CO ₂ /m ³	232 og 248 kg CO ₂ /m ³
Lagring ved temperaturintervaller	5, 10, 20, 30, 45 °C	5, 10, 20, 30, 45 °C	5, 10, 20, 30, 45 °C
Alder i døgn	1, 2, 3, 7, 9, 14, 18, 28, 56	1, 2, 3, 7, 9, 14, 18, 28, 56	1, 2, 3, 7, 9, 14, 18, 28, 56

¹ Cementklinker er den CO₂ intensive del af cement, da de produceres ved at varme kalk op til ca. 1500 °C i rotér-ovnen på cementfabrikken.



FIGUR 14. Betoncylinder (ø100 mm) til venstre og 40 mm mørtelterning til højre.

Mørtel indeholder pr. definition kun sandfraktionen, dvs. sten med partikelstørrelse over 4 mm er udeladt af recepten. Beton- og mørtelrecepterne er designet med følgende forudsætninger:

- Samme bindersystem
- Samme V/C-forhold
- Konstant blandingsforhold mellem pasta² og sand

Betonrecepterne er alle baseret på samme tilslag (sand og sten) og superplast. Der er ikke anvendt luftindblandingsmiddel. Betonrecepterne indeholder ca. 300 liter pasta, 293 liter sand og 387 liter sten pr. kubikmeter. Når stenfraktionen tages ud af betonrecepterne, opstår der et hulrum, der efterfølgende udfyldes med pasta og sand således at volumenforholdet mellem pasta og sand forbliver konstant. Det betyder at pastaindholdet i mørtelrecepten er ca. 500 liter pr. m³.

For at kunne vurdere hvor godt mørtelprismer og betoncylindre repræsenterer styrkeudviklingen blev der udstøbt prøveemner af både beton og mørtel som efterfølgende blev sammenlignet efter forskellige terminer ved 20 °C vådlagring. Styrkeudviklingen ved forskellige hærde-temperaturer foregik udelukkende vha. mørtelprismer.

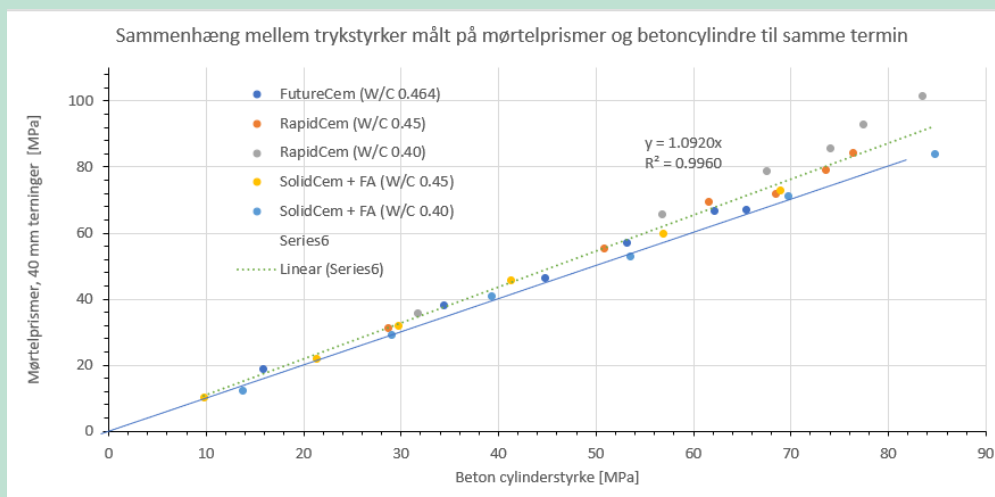
² Pasta er betegnelsen for binder, vand og tilsætningsstoffer.

5.3 Forsøgsresultater

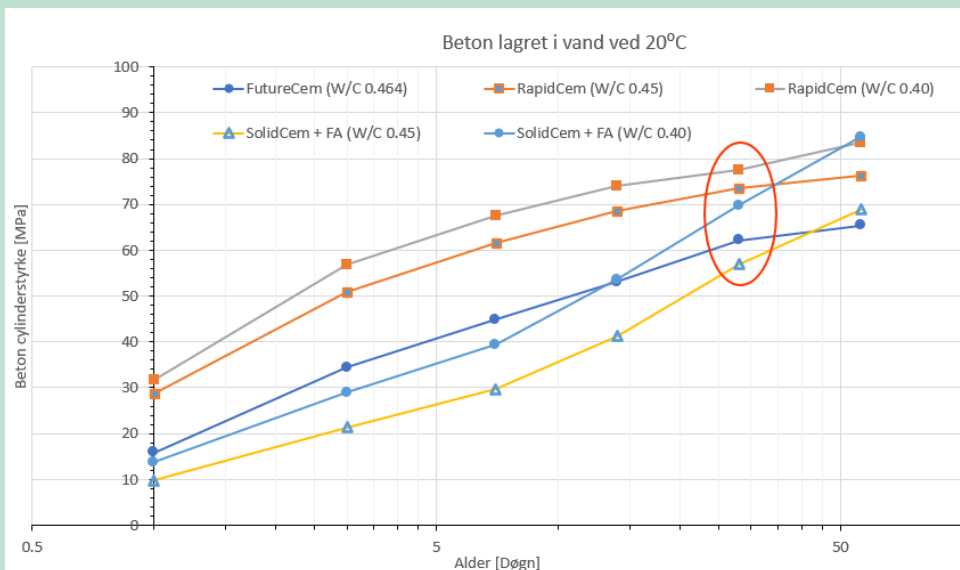
I det følgende er nogle af de vigtigste resultater præsenteret i diagrammer. Datapunkterne i FIGUR 15 omfatter alle styrkeresultater målt på både mørtel- og betonprøveemner. Den stiplede linje er det bedste fit til alle resultater, som siger at trykstyrken målt med mørtelprismer er ca. 9% højere end den tilsvarende betontrykstyrke, alt andet lige. Denne sammenhæng ses at være gyldig fra de helt tidlige (lave) trykstyrker op til slutstyrkerne.

Baseret på denne observation kan man omregne mørtelstyrker til betonstyrker og foretage tolkning og modellering baseret på mørtelforsøg, hvilket både er markant nemmere og hurtigere at udføre i laboratoriet.

Figur 3 indeholder styrkeudviklingerne målt fra alder 1 døgn op til 56 døgn. Det ses tydeligt at der er stort spænd specielt for de tidlige styrker (fra 20 til 60 MPa efter 3 døgn), hvor betonerne med Rapidcement udviser de højeste tidlige styrker samt generelt høje slutstyrker. Betonerne med Solidcement og FA oplever de laveste tidlige styrker, men efter 7 døgn sker der en markant forøgelse af hastigheden, som fortsætter uændret mod 56 døgn.



FIGUR 15. Trykstyrker målt på 40 mm mørtelprismer som funktion af trykstyrker målt på ø100 mm betoncylindre. Alle resultater er målt ved 20 °C vådlagring. Den fuldt optrukne blå linje indikerer hældning 1:1 i diagrammet.



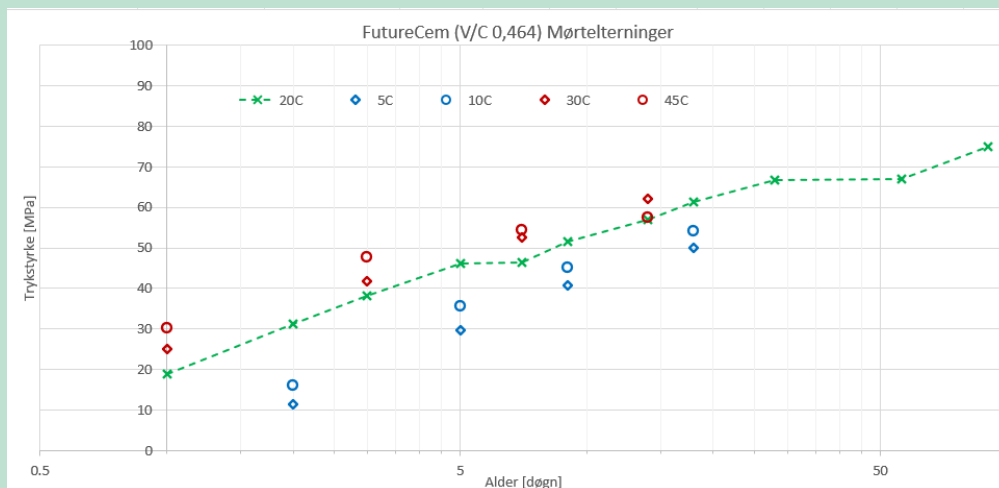
FIGUR 16. Styrkeudvikling som funktion af alder ved 20 °C vådlagring. Den røde markering angiver 28-døgn styrkeniveauet for de fem betontyper, som er omfattet af forsøgsprogrammet.

Typisk vil betontyper, som er anvendt her, være klassificeret som styrkeklasse C35 eller C40 af designeren. Men de reelle styrker efter 28 døgn indikerer markant højere slutstyrker end disse. Det skal dog nævnes, at betoner af denne type normalt er luftindblandet, hvilket vil reducere trykstyrkerne.

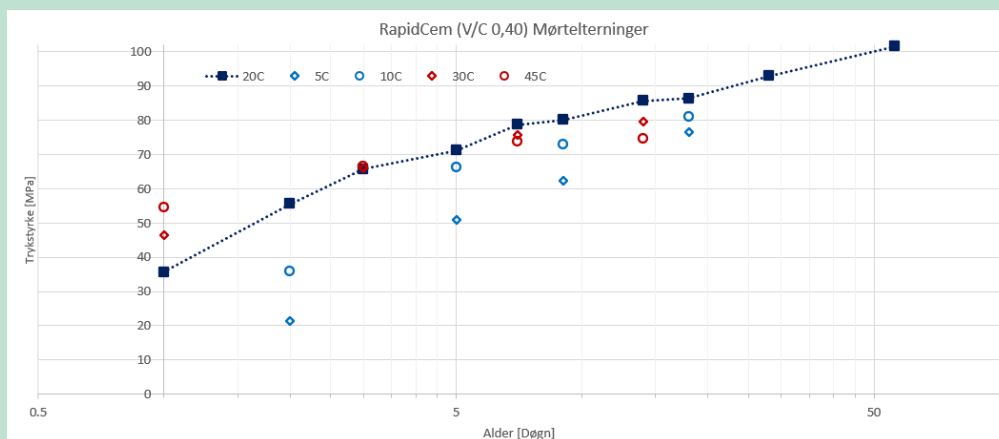
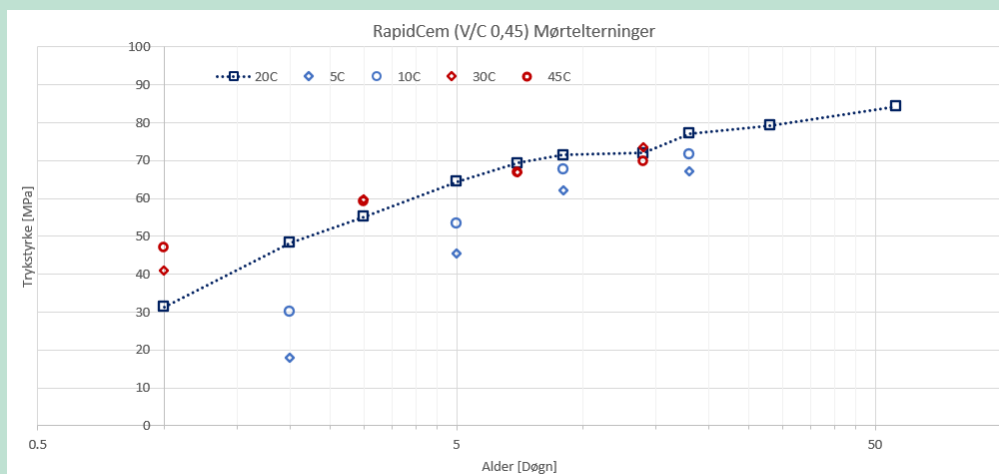
Resultaterne fra de forskellige hærdetemperaturer er vist i FIGUR 17 – FIGUR 19, som viser styrkeresultater målt på 40 mm mørtelterninger. Referenceresultaterne for 20 °C hærdetemperatur ses med stiplede linje i hvert diagram.

Generelt ses det hvordan hærdetemperaturer over 20 °C medfører hurtigere styrkeudvikling end referencetemperaturen og omvendt med hærdetemperaturer under 20 °C. Dog ses det at for FutureCem og Rapidcement er den relative forskel størst ved de tidlige terminer. Dette gælder for temperaturer over og under referencetemperaturen på 20 °C.

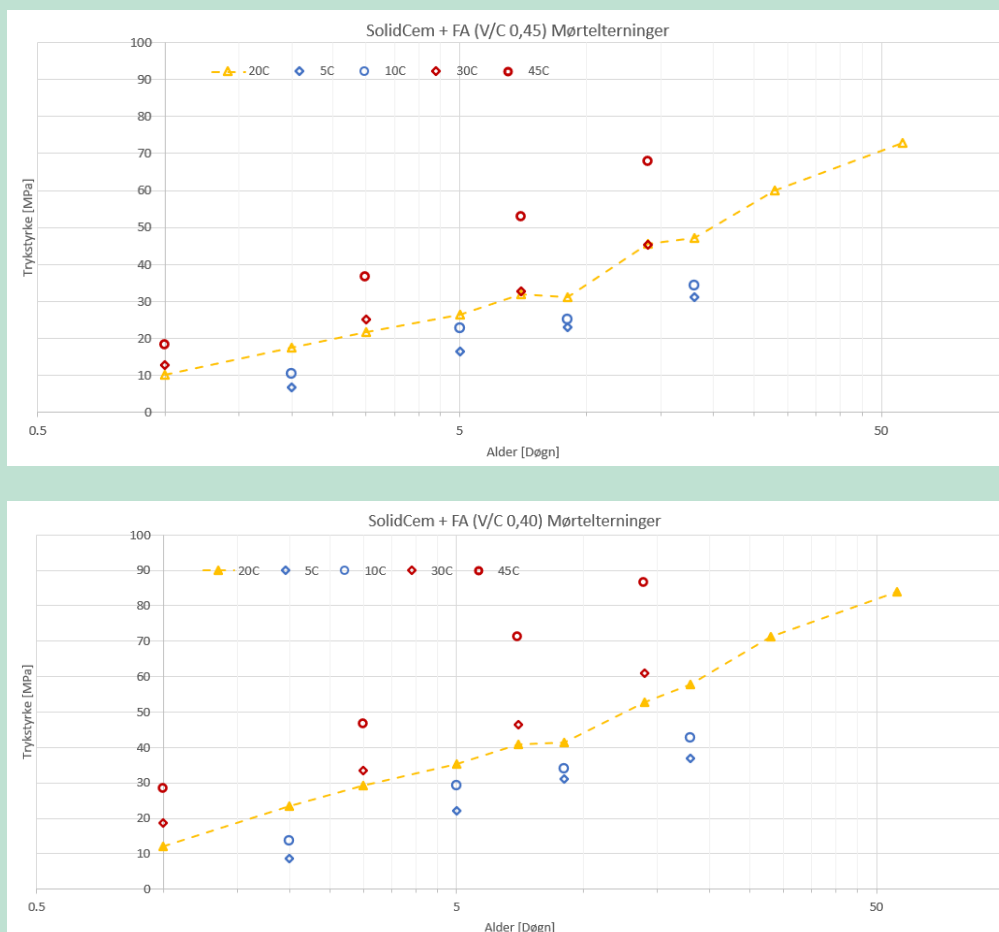
På basis af resultaterne kan der beregnes aktiveringsenergi for de forskellige bindere. Aktiveringsenergien anvendes i modenhedsfunktionen og bruges til at forudsige styrkeudvikling ved forskellige hærdetemperaturer.



FIGUR 17. Mørteltemner med FutureCem. Styrkeudvikling som funktion af alder ved forskellige hærdetemperaturer. Den stiplede streg viser data for 20 °C vådlagring.



FIGUR 18. Mørteltemner med Rapidcement. Styrkeudvikling som funktion af alder ved forskellige hærdetemperaturer. Den stiplede streg viser data for 20 °C vådlagring.



FIGUR 19. Mørtelemler med Solidcement og flyveaske. Styrkeudvikling som funktion af alder ved forskellige hærdetemperaturer. Den stiplede streg viser data for 20 °C vådlagring.

5.4 Konklusioner

Forsøgsprogrammet som er gennemført i Consave projektet og beskrevet her giver ny viden om hvordan den tidlige styrkeudvikling for beton med grønne bindertyper foregår ved forskellige hærdetemperaturer. Samtidig er der udviklet en metode, hvor mørtelprismer anvendes til trykstyrkebestemmelse fremfor betoncylindre. Denne metode er både ressourcebesparende i laboratoriet og medfører nemmere udstøbning, håndtering og lagring af prøveemner til gavn for arbejdsmiljø og projektøkonomi.

Styrkeudviklingerne kan efterfølgende implementeres i den Consave model, der er udviklet til at forudsige tidlige styrker, afhængigt af betonens alder og hærdeforhold (temperatur og vejr).

CONSAVE

Projektet CONSAVE handler om udvikling af mere CO₂-venlig tilgang i brugen af beton ved hjælp af AI-understøttede Big Data modeller. Projektet er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet og gennemført af Sensohive/Maturix, Dansk Beton, Teknologisk Institut, og DTU Compute. Målsætningen er at lave værktøjer som kan hjælpe med at skabe forståelse for CO₂-aftryk og hærdetider.

Projektet er opdelt i forskellige fokusområder som prædiktions af temperaturudvikling, CO₂-beregning for beton vs. hærdetider, og forsøg med styrkeudvikling for grønne betoner. Et hovedresultat er udviklingen af en metode til at forudsige betonens temperatur og styrkeudvikling op til 72 timer frem, hvilket forbedrer arbejdsplanlægningen på byggepladser. Et andet væsentligt resultat er en CO₂-beregner, som hjælper med at vælge betontyper med lavere CO₂-aftryk. Endvidere blev der gennemført forsøg for at forstå styrkeudviklingen i beton med reduceret CO₂-aftryk og udviklingen af en model til at forudsige tidlige betonstyrker på byggepladser.



Miljøstyrelsen
Tolderundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk