



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:

Konstruksjoner og materialer/
Byggkonstruksjoner

Vårsemesteret, 2020

Åpen/Konfidensiell

Forfatter: Andreas Teslo Kjos

(signatur forfatter)

Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså

Veileder(e): Kjell Tore Fosså

Tittel på masteroppgaven:

Effekten av å tilsette CO₂ i fersk betong

Engelsk tittel:

The Effect of Adding CO₂ in Fresh Concrete

Studiepoeng: 30

Emneord:

Betongteknologi, CO₂, Bærekraft,
Egenskaper i fersk betong, Egenskaper i
herdet betong, SEM, Termogravimetrisk
analyse

Sidetall: 78

+ vedlegg/annet: 138

Stavanger, 15/06/2020

Denne siden er blank med hensikt

Innhold

Innhold	iii
Sammendrag	vii
Abstract	viii
Forord	ix
Forkortelser	x
Definisjoner	xi
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn og motivasjon.....	1
1.2 Mål og omfang	2
1.3 Innhold	3
2 Teori.....	5
2.1 Hydratisering	5
2.2 Karbonisering	6
2.3 Reaksjonsproduktet kalsiumkarbonat.....	7
2.4 Tilsettingen av CO ₂	9
2.5 Tidligere forskning.....	11
2.6 Ferske egenskaper.....	11
2.6.1 Støpelighet	11
2.6.2 Densitet	13
2.6.3 Luftinnhold	13
2.6.4 Temperaturutvikling/Varmeutvikling.....	13
2.7 Herdede egenskaper	15
2.7.1 Trykkfasthet.....	15
2.7.2 Elastisitetsmodul	17
2.7.3 Spaltestrekkfasthet	17
2.7.4 Bøyestrekfasthet	18
2.7.5 Densitet og porøsitet.....	19
2.7.6 pH-verdi	19
2.8 Mikrostruktur	20
2.9 Kjemisk sammensetting	21
3 Prøveprogram og metoder.....	23
3.1 Plan for prøveprogram	24
3.1.1 Oversikt over de ulike doseringene av CO ₂	25

3.1.2	Oversikt over antall prøvestykker og prøvetidspunkt.....	25
3.1.3	Standarder.....	25
3.2	Materialer.....	26
3.2.1	Sement.....	26
3.2.2	Tilslag.....	27
3.2.3	CO ₂	28
3.2.4	Superplastiserende.....	29
3.2.5	Blandevann.....	29
3.3	Forberedelse av prøver.....	30
3.3.1	Proporsjonering.....	30
3.3.2	Former.....	31
3.3.3	Støping og herdning.....	32
3.3.4	Blanding av betong.....	33
3.4	Testprosedyrer.....	36
3.4.1	Ferske egenskaper.....	36
3.4.2	Herdede egenskaper.....	39
3.4.3	Mikrostruktur.....	47
3.4.4	Kjemisk sammensetting.....	48
4	Resultat og diskusjon.....	51
4.1	Dosering av CO ₂	52
4.2	CO ₂ sin effekt på betongens ferske egenskaper.....	53
4.2.1	Synkmål (støpelighet).....	53
4.2.2	Densitet.....	54
4.2.3	Luftinnhold.....	55
4.2.4	Temperaturutvikling/varmeutvikling.....	56
4.3	CO ₂ sin effekt på betongens herdede egenskaper.....	60
4.3.1	Trykkfasthet.....	60
4.3.2	Elastisitetsmodul.....	63
4.3.3	Spaltestrekkfasthet.....	64
4.3.4	Bøyestrekfasthet.....	65
4.3.5	Densitet og porøsitet – PF-metoden.....	67
4.3.6	pH-verdi.....	69
4.4	CO ₂ sin effekt på betongens mikrostruktur.....	70
4.4.1	SEM – Skanningelektronmikroskop.....	70
4.5	CO ₂ sin effekt på betongens kjemiske sammensetting.....	72

4.5.1 TGA – Termogravimetrisk analyse.....	72
4.6 Videre forskning	76
5 Konklusjon	77
Referanser	79
Figurliste	82
Tabelliste	84
Standarder.....	84
Ligninger og formler	85
Vedlegg.....	87

Denne siden er blank med hensikt

Sammendrag

Tilsetting av karbondioksid (CO₂) i fersk betong er potensielt en ny metode for produksjon av en mer bærekraftig betong. Tidligere forskning har vist lovende resultater angående effekten på betongens mekaniske egenskaper og det er vist at tilsetting av CO₂ i fersk betong resulterer i et akselerert hydrasjonsforløp og økt trykkfasthet. Denne oppgaven undersøker CO₂ sin effekt på betongens ferske egenskaper (støpelighet, densitet, luftinnhold, varmeutvikling), herdede egenskaper (trykkfasthet, elastisitetsmodul, spaltestrekkfasthet, bøyestrekfasthet, pH-verdi, densitet og porøsitet), mikrostruktur (SEM) og kjemisk sammensetning (TGA). Disse egenskapene er undersøkt ved å tilsette ulike mengder CO₂ i den ferske betongen under blanding, med lik mengde av de øvrige delmaterialene. De valgte mengdene av CO₂ er 0,36 wt%, 0,72 wt% og 1,08 wt% av sementvekt.

Resultatene viser at støpeligheten reduseres med økt mengde tilsatt CO₂, som videre har medført økt luftinnhold. Det er observert at tilsettingen av CO₂ resulterer i en umiddelbar reaksjon som øker temperaturen i betongen rett etter blanding. Samtidig er det observert lavere total varmeutvikling og et retardert hydrasjonsforløp i reseptene tilsatt CO₂. Resultatene har vist at tilsettingen av CO₂ gir redusert trykkfasthet etter 1 døgn, økt trykkfasthet ved 3 og 7 døgn og ingen forskjell ved 28 døgn. Samlet oppnådde resepten tilsatt minst CO₂ høyest trykkfasthet av reseptene tilsatt CO₂. Resultatene viser at spaltestrekkfastheten øker med økt mengde tilsatt CO₂. Det ble målt at bøyestrekfasthet øker for de to reseptene tilsatt minst CO₂, samtidig som resepten tilsatt mest CO₂ viste en reduksjon i bøyestrekfasthet. Det ble observert en reduksjon i betongens porøsitet i reseptene tilsatt CO₂, denne effekten var størst i resepten tilsatt minst CO₂. Tilsettingen av CO₂ medførte ingen observerbar endring i betongens mikrostruktur. Gjennom termogravimetrisk analyse ble det målt en høyere dannelselse av C-S-H i resepten tilsatt minst CO₂, mens de to reseptene tilsatt mest CO₂ hadde en redusert mengde C-S-H. Det ble også målt at dannelsen av C-H ble redusert med økt mengde tilsatt CO₂, samtidig som mengden kalsiumkarbonat økte. Den termogravimetriske analysen viste at resepten tilsatt minst CO₂ bandt opp størst andel av den tilsatte mengden CO₂.

Abstract

The addition of carbon dioxide (CO₂) in fresh concrete is potentially a new method for production of sustainable concrete. Previous research has shown promising results regarding the effect on the mechanical properties of concrete, and it has been shown that the addition of CO₂ in fresh concrete results in an accelerated degree of hydration and increased compressive strength. This thesis examines CO₂'s effect on the fresh properties of the concrete (workability, density, air content, heat of hydration), hardened properties (compressive strength, modulus of elasticity, splitting tensile strength, flexural strength, pH, density and porosity), microstructure (SEM) and chemical composition (TGA). These properties have been investigated by adding different amounts of CO₂ in the fresh concrete during mixing, with a fixed amount of the materials. The selected amounts of CO₂ are 0.36 wt%, 0.72 wt% and 1.08 wt% by the weight of the cement.

The results show that the workability is reduced with an increased amount of added CO₂, which has also resulted in increased air content. It has been observed that the addition of CO₂ results in an immediate reaction which increases the temperature of the concrete immediately after mixing. It has also been observed that the addition of CO₂ decreases the heat of hydration. The results have shown that the addition of CO₂ reduced the compressive strength after 1 day, increased the strength at 3 and 7 days and no difference at 28 days. In total, the batch added the least amount of CO₂, achieved the highest compressive strength of all the batches added CO₂. The results show that the splitting tensile strength increases with increased amount of added CO₂. The flexural strength increased for the two batches with the least amount of CO₂, while the batch with the most CO₂ showed a decrease in flexural strength. A reduction in the porosity of the concrete was observed in the batches with added CO₂, this effect was greatest in the batch with the least amount of CO₂. The addition of CO₂ did not cause any observable change in the microstructure of the concrete. Through thermogravimetric analysis, it was observed a higher amount of C-S-H in the batch with the least amount of CO₂, while the two batches with the amount of CO₂ had a reduced amount of C-S-H. It was also measured that the formation of C-H decreased with increased amount of added CO₂, while the amount of calcium carbonate increased. The thermogravimetric analysis showed that the batch containing the least amount of CO₂ had the highest CO₂ uptake relative to the amount of added CO₂.

Forord

Denne masteroppgave ble skrevet våren 2020 og slutfører min mastergrad innen konstruksjoner og materialer ved Universitet i Stavanger.

Oppgaven er skrevet i samarbeid med Kværner, og oppgaven er utformet med utgangspunkt i deres satsing på en mer bærekraftig produksjon av betong.

Jeg ønsker å takke veilederen min Kjell Tore Fosså for å ha bidratt til at prøveprogrammet ble gjennomført under de spesielle omstendighetene, og generelt for å ha bidratt med oppfølging, kunnskap og motivasjon underveis. Jeg ønsker også å takke John Grønli og de ansatte ved betonglaboratoriet ved UiS for å ha hjulpet meg med gjennomføringen av prøveprogrammet. Avslutningsvis ønsker jeg å takke Wakshum Mekonnen Tucho for bistand i forbindelse med bruk av skanningelektronmikroskop og Anna Cecilie Åsland for hennes ekspertise innen termogravimetrisk analyse.

Takk til Mohammad Afaghi, Ole Emil Karlsen og andre medstudenter som hjulpet meg underveis, og som har gjort disse årene ved UiS uforglemmelig.

Forkortelser

μl	Microliter
°C	Celsius
cm	Centimeter
∅	Diameter
C2S	Dikalsiumsilikat
GPa	Gigapascal
C-H	Kalsiumhydroksid
CaCO ₃	Kalsiumkarbonat
C-S-H	Kalsiumsilikathydrat
CO ₂	Karbondioksid
kg	Kilogram
kJ	Kilojoule
dm ³	Kubikkdesimeter
m ²	Kvadratmeter
m ³	Kubikkmeter
mm ²	Kvadratmillimeter
l	Liter
MPa	Megapascal
ml	Milliliter
mm	Millimeter
Mt	Megatonn
g/mol	Molar masse
N	Newton
nm	Nanometer
s	Sekund
S-H	Silikathydrat
SEM	Skanningelektronmikroskop
SP	Superplastiserende
TGA	Termogravimetrisk analyse
C4AF	Tetrakalsiumaluminaferritt
TEM	Transmisjonselektronmikroskop
C3A	Trikalsiumaluminat
C3S	Trikalsiumsilikat
wt%	Vektprosent

Definisjoner

CO ₂ -ekvivalenter	Enhet som tilsvarer den effekten en gitt mengde CO ₂ har på den globale oppvarmingen over en gitt periode
Entalpi	Mengden av varme i et system
Filler-effekt	Effekten av at små partikler fyller tomrommet mellom større partikler
Karbonatisering	Kjemisk reaksjon mellom herdet betong og karbondioksid
Karbonisering	Prosessen hvor karbondioksid løses opp i en væske
Reaksjonsprodukt	Stoff dannet ved kjemisk reaksjon mellom to eller flere stoffer
Reaktiv	Et stoff sin evne til å reagere kjemisk
Vekstområde	Oversatt fra engelsk, "nucleation site". Utgangspunktet for krystalldannelse

Denne siden er blank med hensikt

1 Innledning

Dette kapittelet vil presentere bakgrunn og motivasjon for oppgaven, samt oppgavens mål og omfang. Oppgavens innhold vil bli presentert avslutningsvis.

1.1 Bakgrunn og motivasjon

Klima, miljø og bærekraft er temaer som lenge har vært en del av den offentlige debatten. Dette har blant annet resultert i at Norge gjennom Parisavtalen har forpliktet seg til å redusere de årlige utslippene med minst 40 % innen 2030 sammenlignet med 1990-nivå. Dette målet ble også lovfestet gjennom klimaloven av 2018 [1].

I 2017 var Norges totale klimagassutslipp på 52,5 Mt CO₂-ekvivalenter [2], av dette kom 13,1 Mt CO₂-ekvivalenter, tilsvarende 25 % fra bygg- og anleggsnæringen [3]. For at Norge skal være i stand til å nå målene om reduksjon av klimagassutslipp er det derfor avgjørende med bidrag fra bygg- og anleggsnæringen. I bygg- og anleggsnæringen er det allerede gjennomført en rekke tiltak for å redusere utslippene. Blant annet er det innført lovpålagte miljø- og energikrav, samt implementering av livssyklusanalyser og bærekraftighetsvurderinger. Dette er tiltak som har motivert til en ny tankegang i bygg- og anleggsnæringen, hvor stadig flere bedrifter har fokus på å utvikle løsninger for fremtiden.

Det økende fokuset på bærekraft og reduksjon av klimagassutslipp har naturlig nok også innvirkning på det mest benyttede byggematerialet, betong. Sementproduksjon alene er estimert til å stå for 7-8 % av verdens totale klimagassutslipp [4]. I arbeidet med å redusere klimagassutslipp knyttet til bruk av betong har det hittil vært fokusert på tre områder:

- Bruk av organisk brensel til fyring av sementovnene.
- Fangst og lagring av CO₂ som spaltes ved brenning av kalkstein.
- Bruk av erstatningsmaterialer i sement, som pozzolaner og hydrauliske bindemidler.

Disse tre områdene er ansett som de viktigste for å redusere klimagassutslippet knyttet til bruk av betong. Det eksisterer allikevel potensiale og behov for å redusere klimagassutslippet ytterligere. En metode som er lite forsket på, er tilsetning av CO₂ i fersk betong. Ved å tilsette CO₂ i fersk betong kan man potensielt forbedre betongens egenskaper samtidig som CO₂ oppfanget i produksjonen av sement blir oppbundet i selve betongen.

1.2 Mål og omfang

Målet med oppgaven er å undersøke hvordan tilsetning av CO₂ i fersk betong påvirker betongens egenskaper.

Oppgavens omfang er avgrenset til å fokusere på følgende egenskaper i betongen:

1. CO₂ sin effekt på betongens ferske egenskaper

- Støpelighet
- Luftinnhold
- Densitet
- Temperaturutvikling/varmeutvikling

2. CO₂ sin effekt på betongens herdede egenskaper

- Trykkfasthet
- Elastisitetsmodul
- Spaltestrekkfasthet
- Bøyestrekfasthet
- Densitet/Porøsitet
- pH

3. CO₂ sin effekt på betongens mikrostruktur

4. CO₂ sin effekt på betongens kjemiske sammensetting

Gjennom å undersøke hvordan tilsetningen av CO₂ påvirker disse egenskapene i betongen ønsker denne oppgaven å skille seg fra tidligere forskning ved å undersøke hvordan tilsetningen av CO₂ påvirker betongens egenskaper, samtidig som betongens kjemiske sammensetting analyseres for å kunne beskrive hvilke mekanismer som forårsaker en eventuell endring i betongens egenskaper.

1.3 Innhold

Første del av oppgaven inneholder et litteraturstudium. I kapittel 2 presenteres relevant teori for oppgaven, samt resultater fra tidligere forskning ved tilsetning av CO₂ og nanokalsiumkarbonat i fersk betong. Kapittel 3 tar for seg prøveprogrammet med materialer, proporsjonering og blandedprosedyre. De ulike testprosedyrene blir så beskrevet avslutningsvis.

Siste del av oppgaven består av resultater fra de ulike testene med analyse. I kapittel 4 presenteres resultatene med fokus på å illustrere hvordan de ulike reseptene med tilsatt CO₂ presterer sammenlignet med resepten uten tilsatt CO₂, med den hensikt å vise CO₂ sin effekt på betongens egenskaper. I kapittel 4 vil også resultatene diskuteres med hensyn på effekten av tilsetningen av CO₂, før konklusjonen for oppgaven blir presentert i kapittel 5.



Figur 1. Oversikt over oppgaven

Denne siden er blank med hensikt

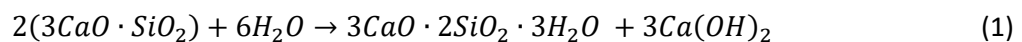
2 Teori

Formålet med dette kapittelet er å introdusere relevant teori knyttet til tilsetning av CO₂ i fersk betong. Innledningsvis vil det presenteres teori knyttet til de kjemiske reaksjonene som oppstår ved hydratisering og karbonisering. Deretter vil det presenteres teori angående tilsetning av CO₂ før det avslutningsvis presenteres tidligere forskning angående tilsetning av CO₂ og kalsiumkarbonat i fersk betong.

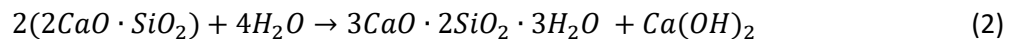
2.1 Hydratisering

Hydratiseringen av sement oppstår når det tilsettes vann til sement og det oppstår en kjemisk reaksjon mellom de fire klinkermineralene i sementen og vann.

Ved hydratiseringen av C₃S (trikalsiumsilikat) og C₂S (dikalsiumsilikat) dannes C-S-H (kalsiumsilikathydrat) og C-H (kalsiumhydroksid), som vist i ligning 1 og 2 [5].



Trikalsiumsilikat + Vann → Kalsiumsilikathydrat + Kalsiumhydroksid

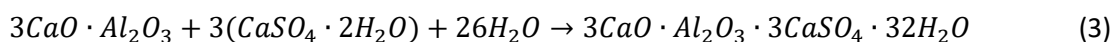


Dikalsiumsilikat + Vann → Kalsiumsilikathydrat + Kalsiumhydroksid

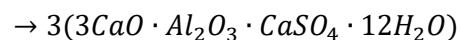
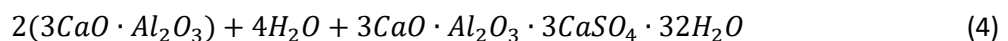
Hydratiseringen av C₃S og C₂S er en eksoterm reaksjon med en total varmetvikling lik ca. 500 kJ/kg for C₃S og ca. 260 kJ/kg for C₂S [6].

Ved hydratiseringen av C₃A (trikalsiumaluminat), reagerer først C₃A med gips og vann, som resulterer i dannelsen av ettringitt, som vist i ligning 3 [7].

Ettringitt reagerer videre med C₃A og vann, som resulterer i dannelsen av monosulfat, som vist i ligning 4 [7].



Trikalsiumaluminat + Gips + Vann → Ettringitt

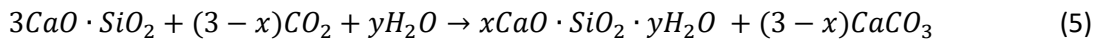


Trikalsiumaluminat + Vann + Ettringitt → Monosulfat

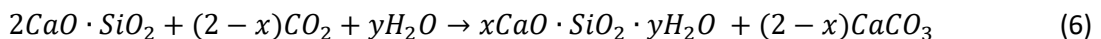
Hydratiseringen av C₄AF (tetrakalsiumaluminatferritt) er lik hydratiseringen av C₃A, men med lavere total varmetvikling lik 300 kJ/kg mot 900 kJ/kg for C₃A [8].

2.2 Karbonisering

Siden begynnelsen av 70-tallet har det vært forsket på hvilken effekt CO₂ har på hydratiseringen av fersk betong. Denne forskningen viste at vannet i betongen først karboniseres før det reagerer videre med de to klinkermineralene C₃S og C₂S. Disse reaksjonene resulterer i dannelsen av C-S-H og kalsiumkarbonat som vist i ligning 5 og 6 [9].

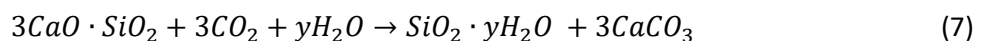


Trikalsiumsilikat + Karbondioksid + Vann → Kalsiumsilikathydrat + Kalsiumkarbonat

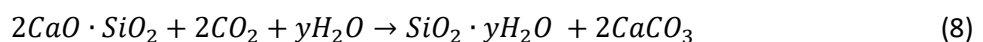


Dikalsiumsilikat + Karbondioksid + Vann → Kalsiumsilikathydrat + Kalsiumkarbonat

Reaksjonen mellom C₃S, C₂S og det karboniserte vannet er en eksoterm reaksjon med total varmeutvikling lik ca. 1520 kJ/Kg for C₃S og ca. 1068 kJ/Kg for C₂S [10]. Som ligning 5 og 6 viser vil større mengder CO₂ hindre dannelsen av C-S-H slik at reaksjonen mellom C₃S, C₂S og CO₂ fører til dannelsen av S-H (silikathydrat) og kalsiumkarbonat, som vist i ligning 7 og 8 [10].



Trikalsiumsilikat + Karbondioksid + Vann → Silikathydrat + Kalsiumkarbonat

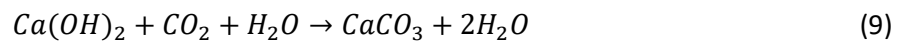


Dikalsiumsilikat + Karbondioksid + Vann → Silikathydrat + Kalsiumkarbonat

Den fullstendige reaksjonen mellom C₃S, C₂S og CO₂ består av følgende 9 steg [11]:

1. CO₂ (g) diffunderer gjennom luften til den ferske betongens overflate.
2. CO₂ (g) gass trenger inn i den ferske betongen.
3. CO₂ (g) oppløses til CO₂ (aq).
4. CO₂ (aq) reagerer med H₂O som resulterer i dannelsen av H₂CO₃.
5. Ionisering av H₂CO₃ til H⁺, HCO₃⁻ og CO₃²⁻. Forekomsten av H⁺-ioner resulterer i at pH-verdien senkes lokalt, før den senere stiger ettersom mikrostrukturen modnes.
6. Trikalsiumsilikat og dikalsiumsilikat løses opp, og det dannes et tynt lag av C-S-H rundt sementkornene. Dette laget vil hurtig løses opp, og resulterer i frigjørelse av Ca²⁺- og SiO₄⁴⁻-ioner.
7. Dannelse av konvensjonell C-S-H gel og termodynamisk stabilt CaCO₃.
8. CaCO₃ utfelles i fast form til kalsitt.
9. Sekundær karbonisering oppstår ved at C-S-H gel reagerer med CO₂, dette forårsaker at C-S-H blir avkalket, som videre resulterer i dannelsen av S-H og CaCO₃.

Det er vist at C-H i fersk betong kan reagere med CO₂ og vann som resulterer i dannelsen av kalsiumkarbonat, som vist i ligning 9 [12]:



Kalsiumhydroksid + Karbondioksid + Vann → Kalsiumkarbonat + Vann

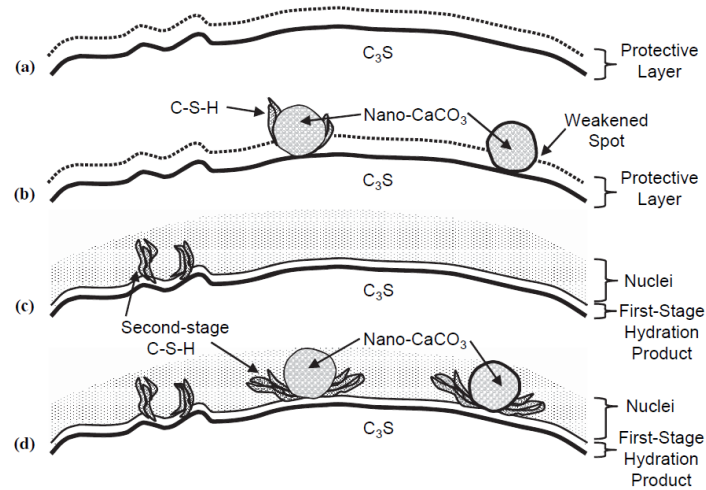
Denne reaksjonen er eksoterm med en varmeutvikling lik 999 kJ/Kg [12]. Denne reaksjonen ansees som neglisjerbar ved tilsetning av CO₂ i fersk betong, da det dannes begrensede mengder C-H tidlig i hydratasjonsforløpet [13]. Samtidig vil reaksjonen mellom C₃S, C₂S og CO₂ redusere dannelsen av C-H. Man antar derfor at tilgjengelig CO₂ kun vil reagere med C₃S og C₂S [13].

2.3 Reaksjonsproduktet kalsiumkarbonat

Kalsiumkarbonat som blir dannet ved reaksjonen mellom C₃S, C₂S og CO₂ er av typen krystallinsk kalsitt [14]. Disse partiklene er i størrelsesorden 1-100 nm og er homogent distribuert i sementpastaen [15].

Partikler med størrelse mindre enn 100 nm klassifiseres som nanomaterialer [16]. Tilsetning av nanomaterialer i fersk betong har de siste årene fått mye oppmerksomhet, og forskning har vist at man ved tilsetning av nanomaterialer i fersk betong kan oppnå akselerert hydratasjonsforløp og en forbedring av betongens mekaniske egenskaper [17].

Ved direkte tilsetning av nano-kalsiumkarbonat i fersk betong er det observert at nano-kalsiumkarbonat i sementpastaen, med større spesifikt overflateareal fungerer som vekstområder for dannelsen av C-S-H. Ved at nano-kalsiumkarbonat fasiliterer for dannelsen av C-S-H, er det vist at dette resulterer i et akselerert hydratasjonsforløp, høyere hydratasjonsgrad og økt tidligfasthet [18], denne prosessen er vist i *Figur 2*.



Figur 2. Den akselerende effekten av tilsetning av nano-kalsiumkarbonat [18]

Det er også observert nano-kalsiumkarbonat har en filler-effekt i matrisen som bidrar til å øke betongens tetthet [19].

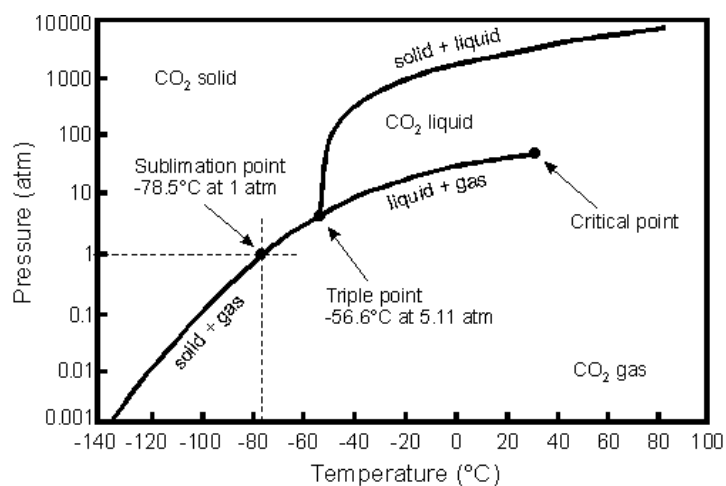
En uønsket effekt som er observert ved tilsetning av nano-kalsiumkarbonat er reduksjon av betongens støpelighet. Dette kommer som et resultat av at nanopartikler har større spesifikt overflateareal som forårsaker høyere vannabsorpsjon [20]. Samtidig er det vist at ved tilsetning av større mengder nano-kalsiumkarbonat (>1 wt%) vil partiklene klumpe seg sammen som reduserer det totale spesifikke overflatearealet [20]. Dette resulterer i at forbedringene i forbindelse med hydrasjonsforløp, hydrasjonsgrad og fasthetsutvikling avtar.

Ved å tilsette CO_2 i fersk betong er målet å oppnå de samme effektene som ved direkte tilsetning av nano-kalsiumkarbonat, samtidig som man binder opp CO_2 i betongen.

2.4 Tilsetningen av CO₂

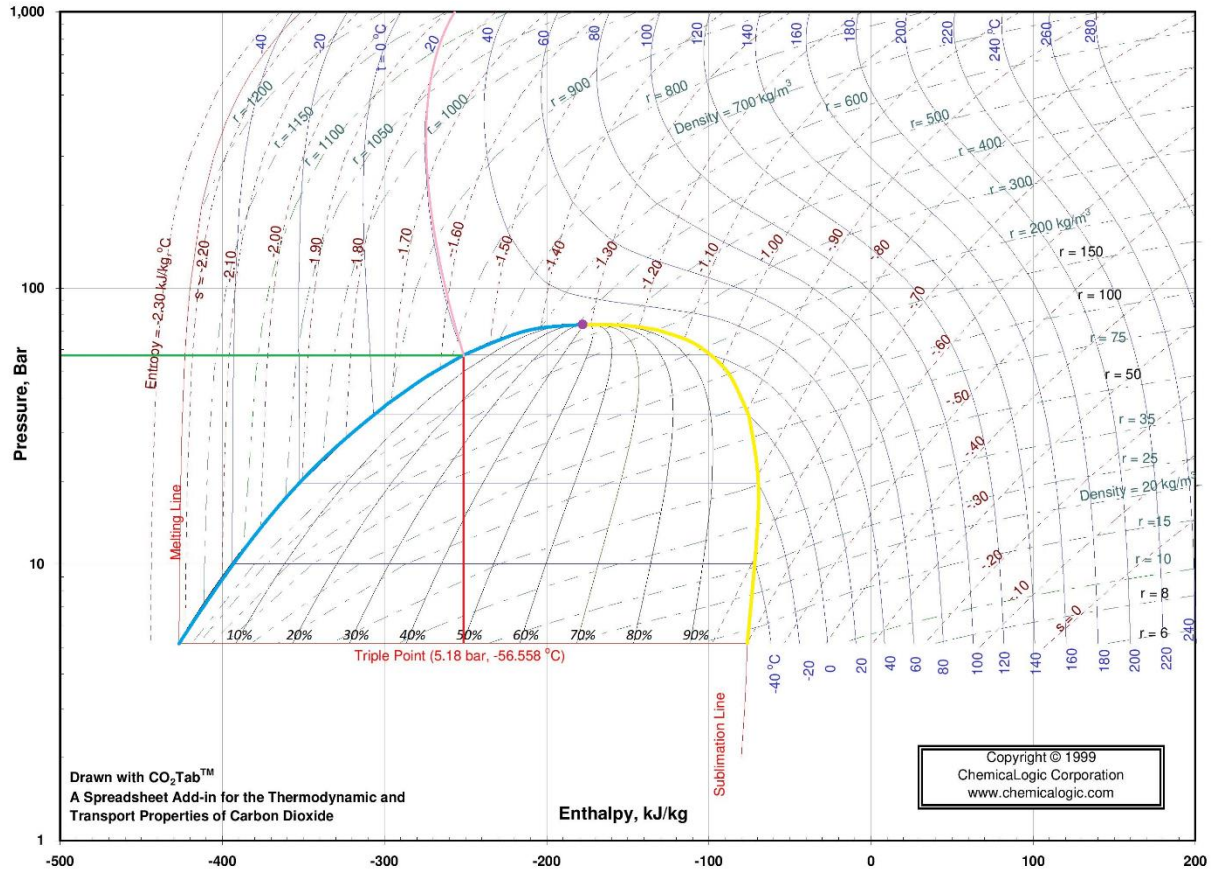
CO₂ er forsøkt tilsatt betong både som gass og fast stoff (tørris). Ved tilsetning av CO₂ i gassform har forsøk vist at CO₂ reagerer med den ferske betongen slik at det dannes kalsiumkarbonat. Det krever imidlertid en lufttett blander for å unngå at CO₂ går ut av blanderen. Samtidig er det vist at det tar lang tid for CO₂ å trenge inn betongen og reagere med vann før det videre reagerer med C₃S og C₂S [21]. Ved forsøk med tilsetning av tørris er det også vist at det dannes kalsiumkarbonat. Fordelen med denne metoden fremfor bruk av gass, er at tørris sublimerer til gass inne i selve betongen slik at det i gassform lettere reagerer videre med vann og klinkermineralene C₃S og C₂S. Denne metoden har imidlertid vist å retardere hydratasjonsforløpet [22]. Dette antas å komme som et resultat av tiden det tar for tørris å sublimerer.

Ved å benytte flytende CO₂ oppnår man en kombinasjon av to overnevnte metodene. CO₂ er stabilt som gassform ved atmosfærisk trykk og 20 °C, som vist i *Figur 3*. Ved tilsetning av flytende CO₂ vil dermed trykkfallet resultere i at det dannes en blanding mellom gass og solide CO₂ partikler, kjent som CO₂-snø. Ved denne metoden vil man kunne oppnå samme effekt som ved tilsetning av tørris, ved at de solide partiklene sublimerer til gass inne i selve betongen, samtidig som man unngår retardasjon av hydratasjonsforløpet da de små solide partiklene raskt sublimerer.



Figur 3. Fasediagram for CO₂ [23]

Ved anvendelse av flytende CO₂ er målet at størst mulig andel av CO₂-snøen som dannes skal bestå av solide partikler. Andelen solide CO₂ partikler som dannes kan estimeres ved bruk av mollier-diagram for CO₂, vist i Figur 4.



Figur 4. Mollier-diagram CO₂ [24]

Utgangspunktet for bruk av mollier-diagrammet er å ta skjæringspunktet mellom temperaturlinjen (rosa linje) og linjen for flytende CO₂ (blå linje). Ved 20 °C vil flytende CO₂ ha et trykk på ca. 55 bar (avmerket i y-asken). Dersom man antar at overgangen fra flytende form foregår umiddelbart, kan man se av skjæringspunktet på trippelpunktlinjen (rød linje) at blandingen (område mellom blå og gul linje) vil bestå av ca. 50 % gass, altså 50 % solide partikler. Man kan se av Figur 4 at dersom trykkfallet ikke foregår umiddelbart vil entalpien øke som resulterer i at blandingen vil ha en større andel gass.

2.5 Tidligere forskning

De følgende delkapitlene vil presentere tidligere forskning som omfatter tilsetning av CO₂ i fersk betong, og direkte tilsetning av nano-kalsiumkarbonat. Resultatene fra tidligere forskning er presentert relatert til prøveprogrammet som skal gjennomføres. Det er viktig å merke seg at forskning angående tilsetning av CO₂ i fersk betong er i et tidlig stadium, og teori bak hvilke mekanismer som oppstår er ikke alltid sammenfallende. Tidligere forskning på tilsetning av CO₂ i fersk betong skiller seg hovedsakelig i to retninger, hvor det på den ene siden er fokusert på hvilke effekt CO₂ har på betongens ferske og herdede egenskaper og hvor det på den andre siden er fokusert på hvordan CO₂ påvirker betongens mikrostruktur og kjemiske sammensetting. De presenterte resultater og observasjoner er basert på litteraturstudie gjennomført våren 2020.

2.6 Ferske egenskaper

2.6.1 Støpelighet

Redusert støpelighet er identifisert som en av utfordringene ved tilsetning av CO₂ i fersk betong. Redusert støpelighet vil innebære svakere komprimerbarhet som igjen kan påvirke betongens mekaniske egenskaper.

Monkman [25] observerte at betongens synkmål ble redusert med økt mengde tilsatt CO₂, som vist i *Figur 5*. Det samme ble observert av Monkman, MacDonald og Hooton [26], vist i *Figur 6*.

Batch	Air Content	Initial Slump (in)	Temperature (°C)
Control	5.9%	7	25.8
0.44% CO ₂	5.9%	4	28.1
1.69% CO ₂	4.5%	3	28.6

Figur 5. Ferske egenskaper i betong tilsatt CO₂ [25]

Sample Code	Condition	Age at injection (min)	CO ₂ Dose (%bwc)	Slump (inches)	Mix Temperature (°C)
801	Control		-	3.5	22.4
802	CO ₂	27	0.10	3.0	24.0
803	CO ₂	43	0.30	2.5	24.7
804	CO ₂	52	0.60	1.5	27.3
805	CO ₂	0	0.30	3.0	23.3

Figur 6. Ferske egenskaper i betong tilsatt ulike mengdert CO₂ [26]

Ved begge disse forsøkene ble imidlertid den ferske betongen tilsatt CO₂ 30–70 minutter i etterkant av blanding, hvor tidsintervallet mellom blanding og tilsetning av CO₂ økte i takt med mengden tilsatt CO₂, som vist i *Figur 6*. Dermed ville resepter med større tilsatt mengde CO₂ være lenger i hydrasjonsforløpet sammenlignet med resepter med mindre mengder tilsatt CO₂.

Ved det sistnevnte forsøket ble en resept tilsatt CO₂ under blandeprosessen (805). For denne resepten var reduksjonen i synkmålet lik 14 %. For resepten med tilsvarende mengde CO₂, men hvor CO₂ ble tilsatt 43 minutter etter blanding var reduksjonen i synkmålet lik 29 %, som vist i *Figur 6*.

Grunnet de mange variablene som kan ha påvirket betongens synkmål konkluderer ikke Monkman, MacDonald og Hooton med hva som har forårsaket redusert synkmål.

Ved direkte tilsetning av nano-kalsiumkarbonat observerte Liu, Chen, Liu og Wang [27] at synkutbredelsen ble redusert med økt mengde nano-kalsiumkarbonat, hvor reduksjon var 26 % med 3 wt% nano-kalsiumkarbonat, vist i *Figur 7*.

Specimens	NC (%)	Water requirement of normal consistency (ml)	Setting time		Flowability (mm)
			Initial Setting time (min)	Final setting time (min)	
C0	0	132	200	260	163
NC1	1	132	187	232	137
NC2	2	132	139	221	130
NC3	3	132	131	207	120

Figur 7. Ferske egenskaper i betong tilsatt nano-kalsiumkarbonat [27]

Liu, Chen, Liu og Wang foreslår at reduksjonen i synkutbredelse skyldes at det er mindre fritt vann i betongen tilsatt nano-kalsiumkarbonat. Dette som et resultat av at nano-kalsiumkarbonat har større spesifikt overflateareal som forårsaker høyere vannabsorpsjon.

2.6.2 Densitet

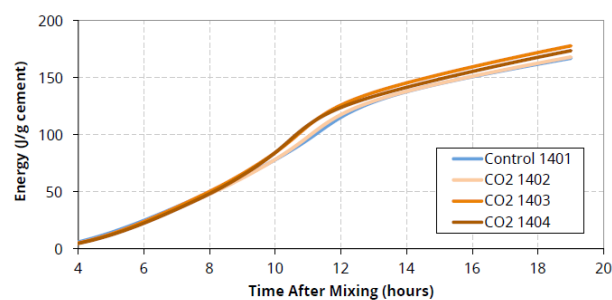
Under litteraturstudie er det ikke funnet noen tidligere forsøk som undersøker hvordan tilsetning av CO₂ påvirker betongens densitet, hverken i fersk eller herdet tilstand. Ved direkte tilsetning av nano-kalsiumkarbonat i fersk betong er det observert at nanopartiklene har en filler-effekt i matriksen som resulterer i økt densitet [19].

2.6.3 Luftinnhold

Det er gjennomført få forsøk som viser tydelig hvordan tilsetning av CO₂ påvirker luftinnholdet i den ferske betongen. Ved forsøk utført av Monkman [25] ble det forsøkt å måle CO₂ sin effekt på betongens luftinnhold. Det ble ikke observert noen differanse i betongens luftinnhold ved tilsetning av 0,44 wt % CO₂, mens det ved tilsetning av 1,69 wt % CO₂ ble observert en reduksjon på 24% av opprinnelig verdi, som vist i *Figur 5*. Ved dette forsøket var det imidlertid noe usikkerhet knyttet til doseringen av vann. Det er likevel presentert som en mulighet at betongens reaksjon med CO₂ kan redusere betongens evne til å danne luftbobler.

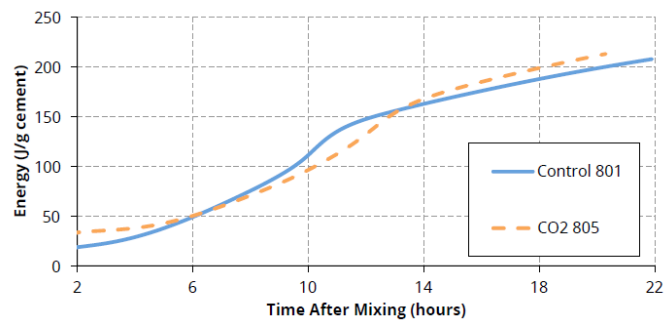
2.6.4 Temperaturutvikling/Varmeutvikling

Monkman, MacDonald og Hooton [26] observert ved sitt første forsøk 10 % reduksjon i varmeutviklingen de første 6 timene for alle reseptene tilsatt CO₂ (0,1 wt%, 0,3 wt% og 0,6 wt%). Etter 12 timer ble det observert at resepten tilsatt 0,1 wt% hadde samme varmeutvikling som referansen, mens reseptene tilsatt 0,3 wt% og 0,6 wt% hadde henholdsvis 12 % og 13 % høyere varmeutvikling, vist i *Figur 8*.



Figur 8. Varmeutvikling forsøk nr 1, Monkman MacDonald og Hooton

Monkman, MacDonald og Hooton observerte lik varmetvikling ved sitt andre forsøk. Ved dette forsøket ble imidlertid en resept tilsatt 0,3 wt% under blanding. Denne resepten viste en reduksjon i varmetvikling lik 17 % etter 11 timer, før det ble observert en økning på totalt 7 % ved 20 timer, vist i *Figur 9*.



Figur 9. Varmeutvikling, CO2 tilsatt i blander, Monkman, MacDonald og Hooton

Monkman, MacDonald og Hooton foreslår at reduksjon i varmetviklingen innledningsvis skyldtes at reaksjonsproduktene fra karboniseringen dekket til sementpartiklene slik at hydratiseringen ble hindret. Etter hvert som disse reaksjonsproduktene løsnet, bidro forekomsten av nano-kalsiumkarbonat til å øke den totale varmetviklingen ved å danne vekstområder for dannelsen av C-S-H.

Ved direkte tilsetning av nano-kalsiumkarbonat observerte Liu, Chen, Liu og Wang [27] at både begynnende og avsluttende størkningstid ble redusert med økende tilsatt mengde nano-kalsiumkarbonat opp til 3 wt%. Med 3 wt% nano-kalsiumkarbonat var begynnende størkningstid redusert med 35 % mens avsluttende størkningstid var redusert med 20 %, vist i *Figur 7*. Liu, Chen, Liu og Wang foreslår at akselerasjon i hydratasjonsforløpet skyldtes at forekomsten av nano-kalsiumkarbonat fasiliterer for dannelsen av C-S-H.

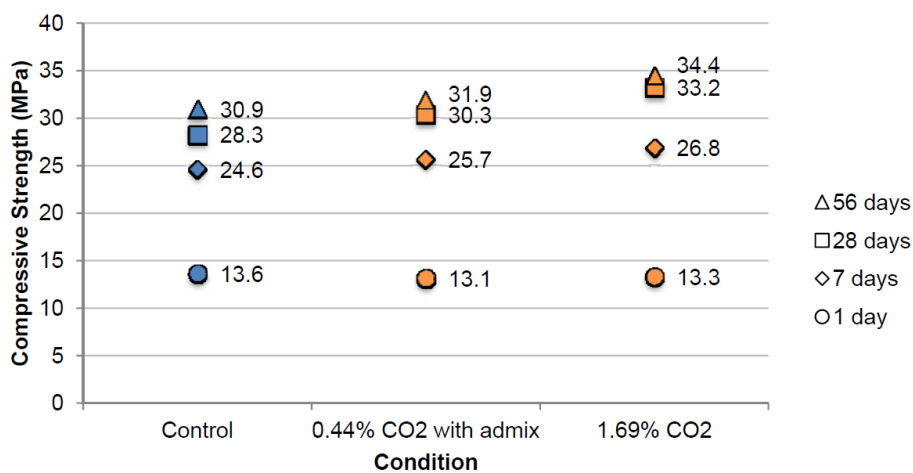
2.7 Herdede egenskaper

2.7.1 Trykkfasthet

Økt trykkfasthet er ansett som den mest fremtredende effekten ved tilsetning av CO₂ i fersk betong. Økt trykkfasthet er hovedsakelig forårsaket av dannelsen av nano-kalsiumkarbonat som fasiliterer for akselerert dannelse av C-S-H [18].

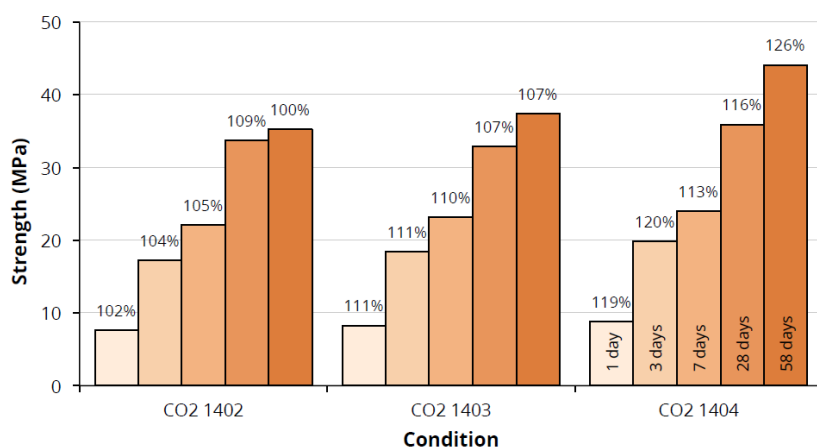
Majoriteten av tidligere forskning viser en økning av trykkfasthet ved tilsetning av CO₂, men det motsatte er også observert.

Monkman [25] observerte en reduksjon av trykkfastheten ved 1 døgn for begge reseptene tilsatt CO₂. Ved 7, 28 og 56 døgn ble det observert at de to reseptene tilsatt CO₂ (0,44 wt% og 1,69 wt%) hadde høyere trykkfasthet enn referansen. Den største økningen ble observert i resepten tilsatt mest CO₂ hvor trykkfastheten ved 28 døgn var 17 % høyere enn referansen, vist i Figur 10.



Figur 10. Trykkfasthet i betong tilsatt CO₂, Monkman [25]

Monkman, MacDonald og Hooton [26] observerte ved sitt første forsøk at trykkfastheten økte med tilsatt mengde CO₂, for doseringer lik 0,1 wt%, 0,3 wt% og 0,6 wt%. Den største økningen i trykkfasthet ble observert i resepten med 0,6 wt% CO₂, hvor trykkfastheten var 26 % høyere enn referansen etter 28 døgn, vist i *Figur 11*.



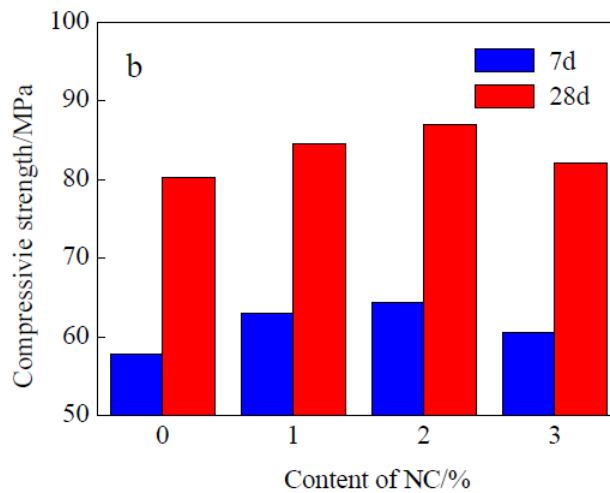
Figur 11. Trykkfasthet forsøk nr.1, Monkman, MacDonald og Hooton [26]

Monkman, MacDonald og Hooton [26] observerte også ved sitt andre forsøk at trykkfastheten økte med tilsatt mengde CO₂, for doseringer lik 0,1 wt%, 0,3 wt% og 0,6 wt%. Ved dette forsøket ble det i tillegg utført en resept hvor 0,3 wt% CO₂ ble tilsatt under blanding (0805), fremfor i trommelen på betongbilen. Dette var den resepten som viste størst økning i trykkfastheten med en økning på 26 % etter 3 døgn og 15% etter 91 døgn, vist i *Figur 12*. Som man kan se av *Figur 11* og *Figur 12* varierte resultatene med opptil 10 % fra det første til andre forsøket.

Sample Code	Condition	Test age					
		1 day	3 day	7 day	28 day	56 day	91 day
0801	Control	8.0	14.8	19.2	30.8	32.8	36.8
0802	CO ₂	8.0	15.8	20.4	32.0	27.9	37.8
0803	CO ₂	8.6	16.6	21.4	33.9	37.9	38.9
0804	CO ₂	8.7	16.1	22.1	32.8	36.4	39.6
0805	CO ₂	9.2	18.6	23.2	35.5	38.7	42.4
0801	Control	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0802	CO ₂	99%	107%	106%	104%	85%	103%
0803	CO ₂	106%	112%	111%	110%	116%	106%
0804	CO ₂	108%	109%	115%	107%	111%	107%
0805	CO ₂	114%	126%	121%	115%	118%	115%

Figur 12. Trykkfasthet forsøk nr. 2, Monkman, MacDonald og Hooton [26]

Ved direkte tilsetning av nano-kalsiumkarbonat observerte Liu, Chen, Liu og Wang [27] at trykkfastheten økte med tilsatt mengde nano-kalsiumkarbonat opp til 2 wt%. Med 2 wt% nano-kalsiumkarbonat økte trykkfastheten med 11,2 % og 8 % ved 7 og 28 døgn, vist i *Figur 13*.



Figur 13. Trykkfasthet ved tilsetning av nano-kalsiumkarbonat [27]

2.7.2 Elastisitetsmodul

Under litteraturstudie er det ikke funnet noen tidligere forsøk som undersøker hvordan tilsetning av CO₂ påvirker elastisitetsmodulen i betongen. Da betongens E-modul er avhengig av betongens trykkfasthet og tilslagets elastisitetsmodul [28] er det ventet at dette også er tilfellet ved tilsetning av CO₂ i fersk betong.

2.7.3 Spaltestrekkfasthet

Under litteraturstudie er det ikke funnet noen tidligere forsøk som undersøker hvordan tilsetning av CO₂ påvirker elastisitetsmodulen i betongen. Da betongens spaltestrekkfasthete er ca. 4-12 % av betongens trykkfasthet [29] er det ventet at dette også er tilfelle ved tilsetning av CO₂ i fersk betong.

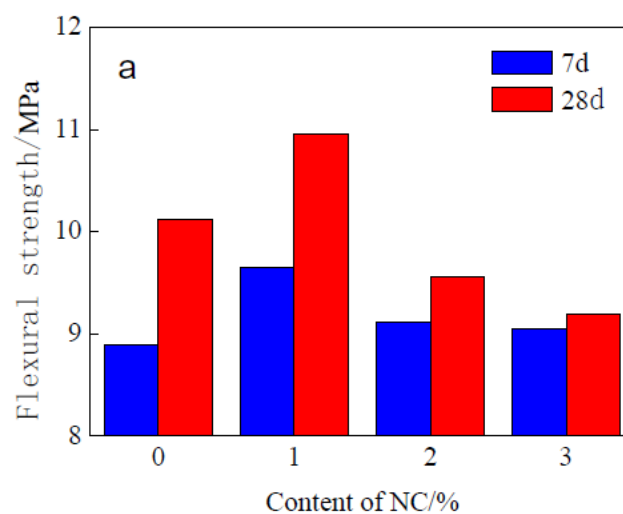
2.7.4 Bøyestrekfasthet

Monkman [25] observerte ved sitt første forsøk en reduksjon av bøyestrekfastheten ved 28 døgn for alle resepter med tilsatt CO₂ (0,43 wt%, 0,55 wt% og 0,64 wt%), med henholdsvis 99% for resept med 0,43 wt% CO₂, 98% for resept med 0,55 wt% CO₂ og 96% for 0,64 wt% CO₂ sammenlignet med referansen, vist i *Figur 14*. Ved dette forsøket var det imidlertid knyttet usikkerhet til vannmengden i de ulike reseptene.

Batch	Flexural Strength	
	MPa	vs Control
Control	6.41	100%
0.43% CO ₂	6.36	99%
0.55% CO ₂	6.26	98%
0.64% CO ₂	6.14	96%

Figur 14. Bøyestrekfasthet, Monkman [25]

Ved direkte tilsetning av nano-kalsiumkarbonat observerte Liu, Chen, Liu og Wang [27] at bøyestrekfastheten økte med tilsatt mengde nano-kalsiumkarbonat opp til 1 wt%. Bøyestrekfastheten var henholdsvis 111,2 % og 108 % målt mot referansen ved 7 og 28 døgn, vist i *Figur 15*.



Figur 15. Bøyestrekfasthet ved tilsetning av nano-kalsiumkarbonat [27]

2.7.5 Densitet og porøsitet

Under litteraturstudie er det ikke funnet noen tidligere forsøk som undersøker hvordan tilsetning av CO₂ påvirker herdet densitet eller porøsitet i betongen. Som nevnt i *Delkapittel 2.6.2* er det tidligere observert ved direkte tilsetning av nano-kalsiumkarbonat at nanopartiklene har en filler-effekt i matriksen som øker betongens ferske densitet. Det antas at dette også vil resultere i økt densitet i den herdete betongen. Samtidig er det ventet at økt vannabsorpsjon forårsaket av dannelsen av nano-kalsiumkarbonat vil kunne motvirke denne effekten til en viss grad, da vann har lavere densitet (1000 kg/m³).

Som presentert i *Delkapittel 2.3* vil dannelsen av nano-kalsiumkarbonat resultere i økt spesifikt overflateareal, som vil fasilitere for dannelsen av C-S-H, som videre resulterer i høyere hydratasjonsgrad. Høyere hydratasjonsgrad vil resultere i et redusert volum av gelporer [30]. Samtidig vil økningen av det totale spesifikke overflatearealet, resultere i høyere vannabsorpsjon, som presentert i *Delkapittel 2.3*. Dette vil kunne redusere mengden fritt vann i betongen, som vil resultere i at mindre vann fordamper slik at volumet av kapillærporer reduseres [30]. Det forventes derfor at porøsiteten vil reduseres ved tilsetning av CO₂ i fersk betong.

2.7.6 pH-verdi

Under litteraturstudie er det ikke funnet noen tidligere forsøk som undersøker hvordan tilsetning av CO₂ påvirker pH-verdien i herdet betongen. Ved flere forsøk [25] [26] antas det at den tilsatte mengden CO₂ vil reagere med C₃S og C₂S, som resulterer i dannelsen kalsiumkarbonat, slik at det ikke vil være igjen CO₂ som senere kan resultere i karbonatisering av den herdete betongen, med påfølgende reduksjon av pH-verdien. Det er derfor ventet at pH-verdien i den herdete betongen vil være mellom 11-13,5, og at tilsetningen av CO₂ ikke har noen effekt på pH-verdien

2.8 Mikrostruktur

For å oppnå høyoppløselige bilder av betongens mikrostruktur benyttes skanningelektronmikroskop (SEM) eller transmisjonselektronmikroskop (TEM).

Ved forsøk utført av Kwasny, Basheer og Russell [21] ble det etter 25 timer herding observert endringer i betongens overflate som følge av tilsetning av CO₂. På overflaten av resepten uten tilsatt CO₂ ble det observert en grov struktur som besto av reaksjonsprodukter fra hydratiseringen, samt sementkorn som ikke var hydratisert. I resepten med tilsatt CO₂ ble det til motsetning observert en finere struktur med mindre partikler som var nålformet og sopplignende, vist i *Figur 16*.

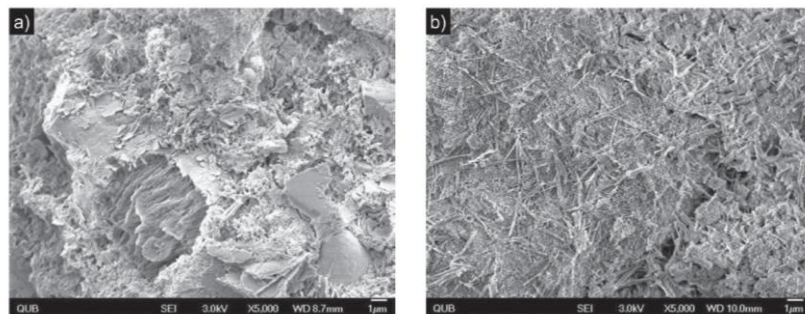


Figure 9. SEM micrographs of 25 h old (a) non-carbonated sample (mix A) and (b) carbonated sample (mix B).

Figur 16. SEM, betong tilsatt CO₂ [21]

Ved forsøk utført av Sato og Diallo [18] ble det etter 1 døgn herding observert at både resepten med direkte tilsetning av nano-kalsiumkarbonat og resepten uten nano-kalsiumkarbonat hadde en lignende overflatestruktur. Det ble imidlertid observert C-S-H partiklene i reseptene med tilsatt nano-kalsiumkarbonat, så ut til å ha vokst rundt et punkt, vist med hvit sirkel i *Figur 17*. Sato og Diallo foreslår at dette støtter teorien om at nano-kalsiumkarbonat fungerer som vekstområde for dannelsen av C-S-H.

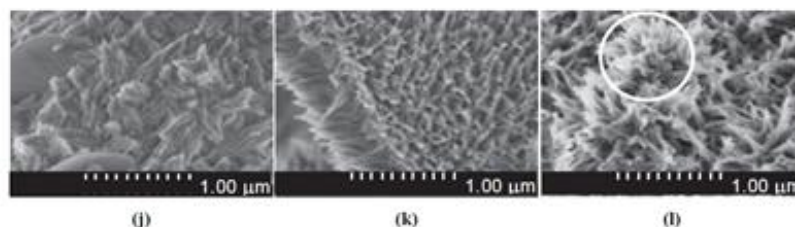


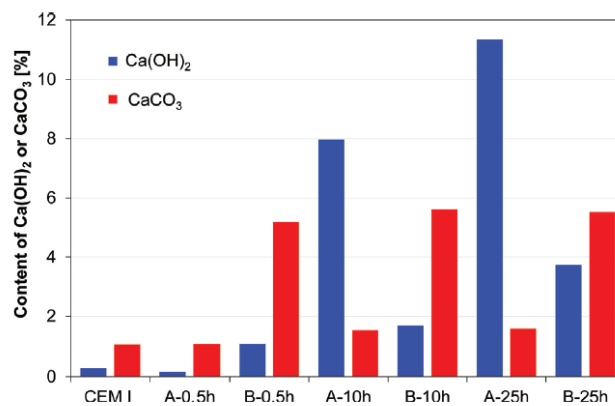
FIGURE 6 SEM results of C₃S control (*left*), C₃S + micro-CaCO₃ (*middle*), and C₃S + nano-CaCO₃ (*right*), hydrated for (a–c) 0 h, (d–f) 2 h, (g–i) 4 h, (j–l) 1 day, and (m–o) 3 days.

Figur 17. SEM, betong tilsatt nano-kalsiumkarbonat [18]

2.9 Kjemisk sammensetting

Den mest benyttede metoden for å kunne kvantifisere den kjemiske sammensettingen i betong og andre materialer er termogravimetrisk analyse (TGA). Under litteraturstudiet er det ikke funnet noen tidligere forsøk som kvantifiserer dannelsen av kalsiumkarbonat, og som samtidig kan kvantifisere mengden tilsatt CO₂.

Ved forsøk utført av Kwasny, Basheer og Russell [21] ble det gjennomført termogravimetrisk analyse av prøvene ved 0,5 time, 10 timer og 25 timer. De observerte at ved tilsetting av CO₂ (B) ble det dannet mindre kalsiumhydroksid og mer kalsiumkarbonat enn i referansen (A), vist i *Figur 18*. Det ble også observert at dannelsen av kalsiumkarbonat stanset etter de første 10 timene.



Figur 18. TGA av betong tilsatt CO₂ [21]

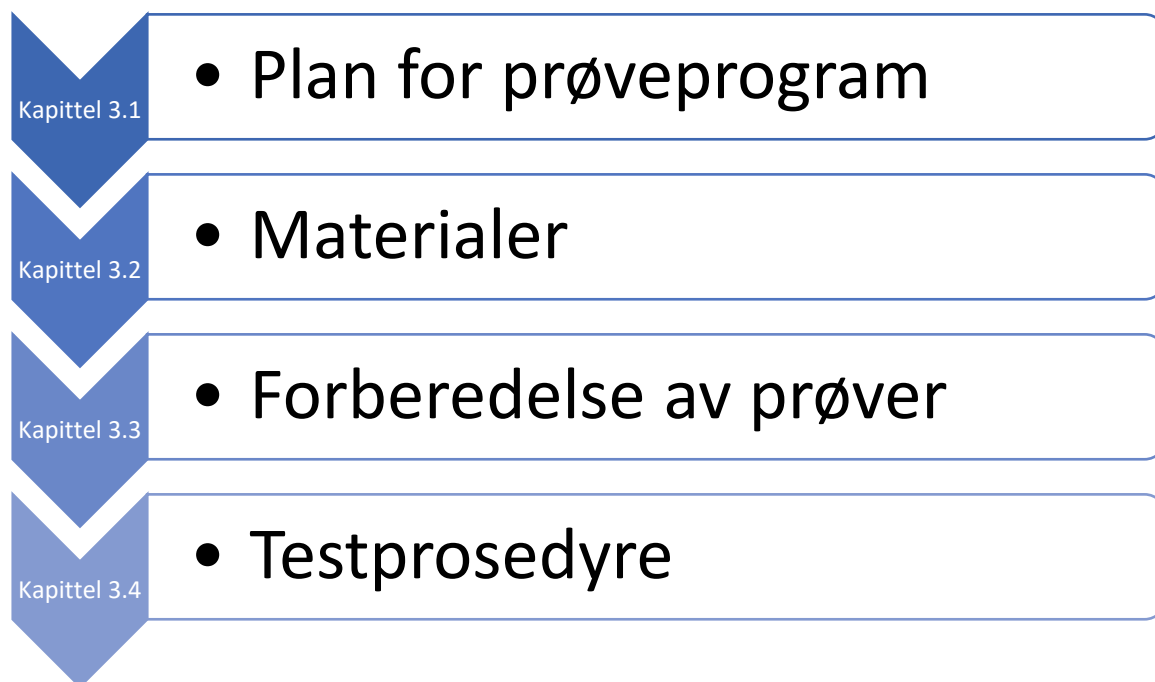
Denne siden er blank med hensikt

3 Prøveprogram og metoder

Dette kapitlet redegjør for de ulike praktiske forsøkene som er gjennomført i oppgaven. Kapitlet er delt inn i fire deler som følger den logiske rekkefølgen for gjennomføring av prøveprogrammet. Planen for prøveprogrammet er presentert i *Delkapittel 3.1*. *Delkapittel 3.2* presenterer de ulike materialene som er benyttet. Forberedelsen av de ulike prøvene er beskrevet i *Delkapittel 3.3*. *Delkapittel 3.4* beskriver oppsett og prosedyre for de ulike forsøkene.

Hensikten med prøveprogrammet er å undersøke hvorvidt CO₂ tilsatt fersk betong påvirker betongens egenskaper og sammensetting. Flere ulike forsøk er utført for å se hvordan ulik dosering av CO₂ påvirker betongens egenskaper i fersk og herdet tilstand. Det er også gjort analyser for kunne beskrive hvordan CO₂ påvirker betongens mikrostruktur og kjemiske sammensetting.

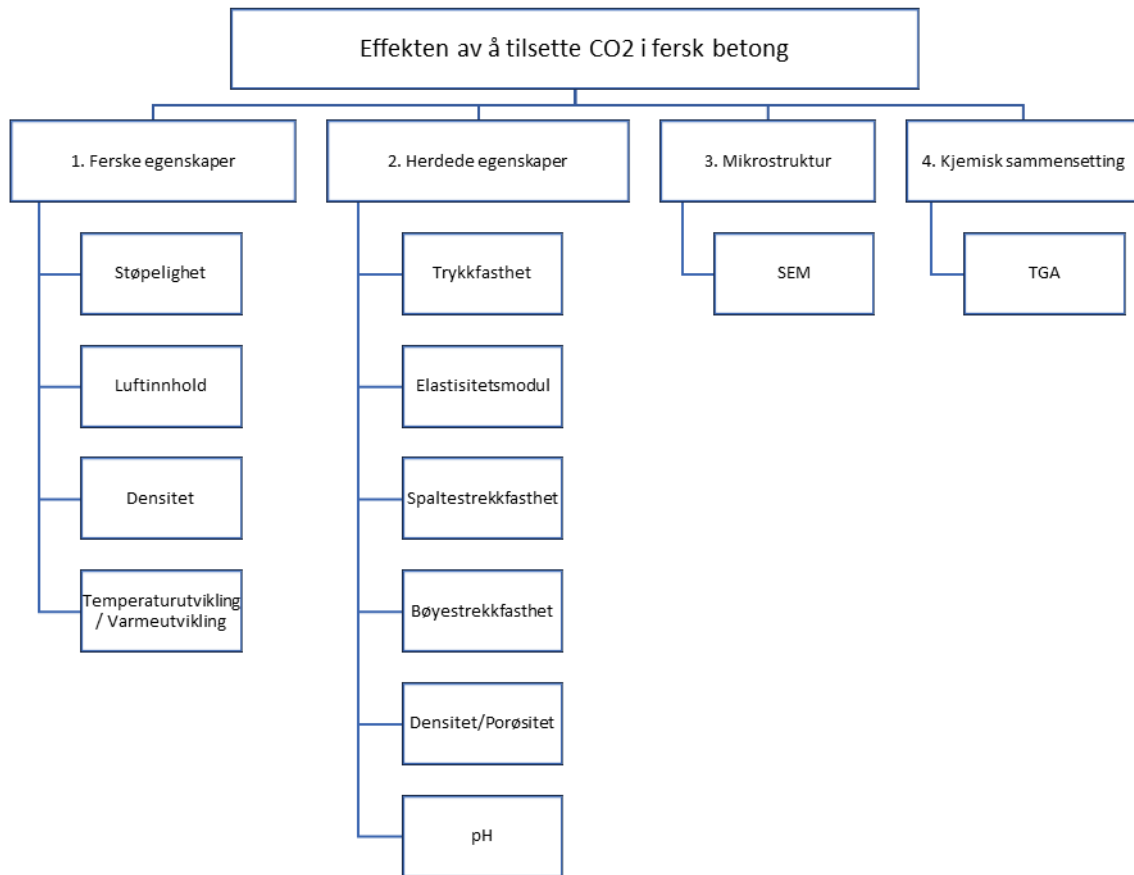
Oversikt over Kapittel 3



Figur 19. Oversikt over kapittel 3

3.1 Plan for prøveprogram

Plan for prøveprogram er illustrert i *Figur 20*. Prøveprogrammet er gjennomført med fire ulike betongresepter, hvorav en er referanse og de tre andre er med ulik dosering av CO₂, vist i *Tabell 1*. *Tabell 2* viser antall prøvestykker og prøvetidspunkt for de ulike prøvene av den herdede betongen.



Figur 20. Plan for prøveprogram

3.1.1 Oversikt over de ulike doseringene av CO2

Tabell 1 viser en oversikt over de ulike doseringene av CO2 i de fire reseptene.

Tabell 1. Oversikt over dosering av CO2 i de ulike reseptene

Type	wt% CO2
Referanse	0
CO2	0,3
	0,6
	0,9

3.1.2 Oversikt over antall prøvestykker og prøvetidspunkt

Tabell 2 viser en oversikt over antall prøvestykker og prøvetidspunkt for de ulike forsøkene av den herdede betongen for hver av reseptene.

Tabell 2. Oversikt over antall prøvestykker og prøvetidspunkt for de ulike testene for hver resept

Test	Antall prøvestykker	Prøvetidspunkt
Trykkfasthet	4 x 3 terninger	1, 3, 7 og 28 døgn
Elastisitetsmodul	1 sylinder	28 døgn
Spaltestrekkfasthet	1 sylinder	28 døgn
Bøyestrekkfasthet	1 prisme	28 døgn
Densitet/Porøsitet	1 terning -> 3 skiver	21 døgn
pH	3 x 5 gram betongstøv	28 døgn
SEM	1 bruddstykke	28 døgn
TGA	2 x 70 µl betongstøv	28 døgn

3.1.3 Standarder

Standardene som er benyttet som grunnlag for prøveprogrammet er primært *NS-EN 12350:2019 – Prøving av herdnet betong* og *NS-EN 12390:2019 – Prøving av fersk betong*. Standardene er kun brukt som et rammeverk, da det er ansett som hensiktsmessig med modifikasjoner for å kunne gjennomføre enkelte av forsøkene. Disse modifikasjonene er tydelig beskrevet der den valgte metode, prosedyre eller oppsett avviker fra standarden.

3.2 Materialer

3.2.1 Sement

Industrisement er levert av Norcem, Brevik. Sementen tilfredsstiller kravene i *NS-EN 197-1:2011 til Portlandsement CEM I 52,5 R*. Produktdata er presentert *Tabell 3*.



Figur 21. Norcem industrisement 52,5R

Tabell 3. Norcem CEM I 52,5 R, Kjemiske- og fysikalske data

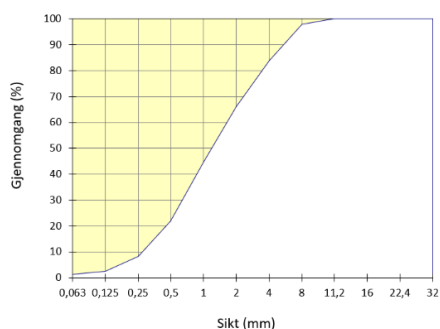
Kjemiske data	
Finhet (Blaine)	550 m ² /kg
Trikalsiumaluminat	7 %
Alkali (ekv. Na ₂ O, NB21)	1.3 %
Mineralske tilsetninger	4 %
Glødetap	2.5 %
Uløselig rest	1 %
Sulfat (SO ₃)	< 4%
Klorid	< 0.085 %
Spesifikk vekt	3.13 kg/dm ³
Fysikalske data	
Trykkfasthet 1 døgn	33 MPa
Trykkfasthet 2 døgn	41 MPa
Trykkfasthet 7 døgn	50 MPa
Trykkfasthet 28 døgn	59 MPa
Begynnende bindetid	110 min
Ekspansjon	1 mm

3.2.2 Tilslag

Tilslag er levert av Norstone Årdal. I betongreseptene er det benyttet tilslag i fraksjonene 0/8 mm og 8/16 mm. Fraksjonene er testet og godkjent i henholdt til *NS-EN 12620:2002+A1:2008+NA:2016 – Tilslag for betong*. Vesentlige egenskaper for de ulike fraksjonene presentert i *Tabell 4 og 5*. Siktekurvene for de ulike fraksjonene er presentert i *Figur 22 og 24*.

Tabell 4. Norstone Årdal 0/8 mm, vesentlige egenskaper

Norstone Årdal 0/8 mm			
Korndensitet	Vannabsorpsjon	Finstoffinnhold	Alkali
2,68 Mg/m ³	0,3 %	3 %	0,9%



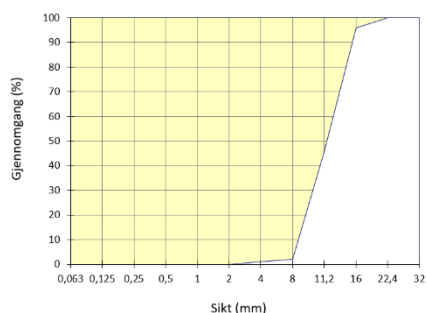
Figur 22. Siktekurve Norstone Årdal 0/8 mm



Figur 23. Norstone Årdal 0/8 mm

Tabell 5. Norstone Årdal 8/16 mm, vesentlige egenskaper

Norstone Årdal 0/8 mm			
Korndensitet	Vannabsorpsjon	Finstoffinnhold	Alkali
2,69 Mg/m ³	0,4 %	0,4 %	0,8%



Figur 24. Siktekurve Norstone Årdal 8/16 mm



Figur 25. Norstone Årdal 8/16 mm

3.2.2.1 Fukt i tilslag

For å kunne dosere korrekt mengde vann måles fukttinnholdet i tilslaget før blanding. Fukttinnholdet måles ved bruk av *Speedy Moisture Tester*. 20 gram av tilslaget legges i en beholder og blandes med to måleskjeer kalsiumkarbid. Beholderen vendes i 60 sekunder før man leser av resultatet på måleren i bunnen av beholderen. Fullstendig beskrivelse av prosedyre er gitt i *Vedlegg B*.



Figur 26. Speedy moisture tester, vekt



Figur 27. Speedy moisture tester, fuktmåler

3.2.3 CO₂

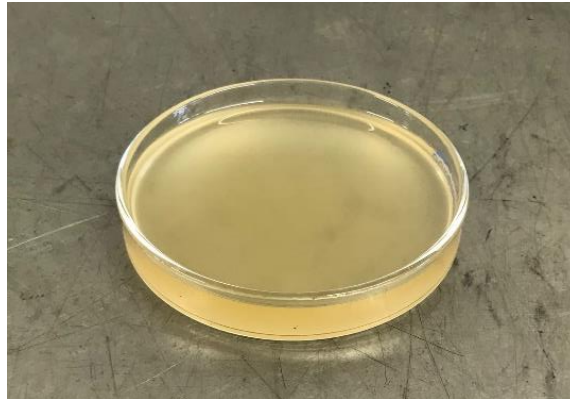
Flytende CO₂ er levert av Nippon Gasses Norge AS. Konsentrasjonene av CO₂ $\geq 99,5\%$ og er ansett som høyren CO₂. CO₂ sine egenskaper er presentert i *Tabell 6*.

Tabell 6. CO₂, egenskaper

CO ₂ - Egenskaper	
Molar masse	44,0095 g/mol
Farge	Fargeløs
Tetthet	1600 g/l (fast)
	771 g/l (flytende)
	1,98 g/l (gass)
Smeltepunkt	-78,5 °C
Kokepunkt	-56,6 °C
Kritisk temperatur	30 °C

3.2.4 Superplastiserende

Dynamon SX-N er et superplastiserende tilsetningsstoff basert på modifiserte akrylpolymer. Akrylpolymer har en dispergerende effekt ved sterisk hindring, som sørger for at sementpartiklene skyves fra hverandre. Anbefalt dosering er 0,3 – 2 % av sementmengden. Tekniske spesifikasjoner for Dynamon SX-N er gitt i *Tabell 7*.



Figur 28. Dynamon SX-N

Tabell 7. Dynamon SX-N, tekniske spesifikasjoner

Tekniske spesifikasjoner	
Konsistens	Væske
Farge	Gulbrun
Viskositet	Lettflytende
Tørrstoffinnhold	18,5 ± 1,0 %
Tetthet	1.06 ± 0.02 kg/L
pH-verdi	6,5 ± 1
Kloridinnhold	< 0,01 %
Alkali	< 2,0 %

3.2.5 Blandevann

Kvaliteten på tappevannet ansees som akseptabel. Vannet tapes 24 timer I forkant av blanding og vannbeholder oppbevares I vannbad med en konstant temperatur på 20°C.

3.3 Forberedelse av prøver

3.3.1 Proporsjonering

Betongen benyttet i forsøket er proporsjonert for å tilfredsstillere kravene til fasthetsklasse B30 og bestandighetsklasse M60 i henhold til *NS-EN 206-1: Spesifikasjon, egenskaper, fremstilling og ansvar*.

Proporsjoneringen er gjort ved hjelp av regnearket "*Proporsjonering av betong*", utviklet av Sverre Smedplass i Skanska. Matriksvolum og masseforhold bestemmes for å oppnå ønsket trykkfasthet og støpelighet. Volum på blandingen oppgis sammen med ønsket luftinnhold og fuktinnholdet i tilslaget. Regnearket vil deretter kalkulere et blandeskjema hvor mengde og fordeling mellom fint og grovt tilslag er kalkulert i sammenheng med ønsket matriksvolum.

Betongen er tilsatt ulike mengder CO₂ for de ulike reseptene. Superplastiserende er benyttet for å oppnå et synkmål på 200 mm. Betongsammensetningen er gitt i *Tabell 8*.

Ved forsøk utført med direkte tilsetning av nano-kalsiumkarbonat er det vist at optimal dosering er 1 wt% nano-kalsiumkarbonat [20]. Basert på reaksjonsligningene presentert i *Delkapittel 2.2* tilsvarer det 0,44 wt% tilsatt CO₂ dersom hele den tilsatte mengden CO₂ er reaktiv. Dersom det antas at 50-100 % av den tilsatte mengden CO₂ vil være reaktiv vil doseringsmengden være 0,44 wt% - 0,88 wt% CO₂. Samtidig er det ved tilsetning av CO₂ i fersk betong vist forbedring i de mekaniske egenskapene ved doseringer på 0,3% og 0,6% wt% CO₂ [26]. Med bakgrunn i dette er det valgt doseringer av CO₂ på 0,3 wt%, 0,6 wt% og 0,9 wt%.

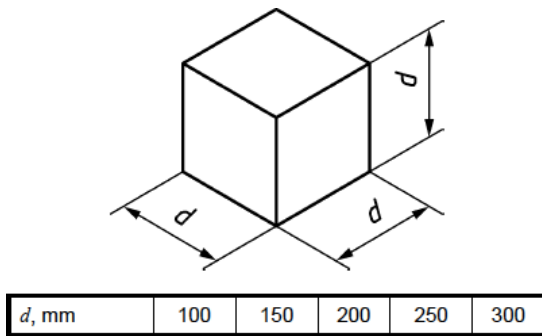
Tabell 8. Resept med de ulike doseringene av CO₂

Resept			
Materiale	Type	Leverandør	Mengde
CEM I 52,5R	Sement	Norcem	19,5 kg
0/8 mm sand	Tilslag	Norstone Årdal	56 kg
8/16 mm stein	Tilslag	Norstone Årdal	68,8 kg
Dynamon SX-N	Superplastifiserende	Maipei	136 g
Blandevann	Vann		10,6 kg
Flytende CO ₂	Tilsetningsstoff	Nippon	[0, 0,3, 0,6, 0,9] wt% av sementvekt

3.3.2 Former

3.3.2.1 Terninger – Trykkfasthet, Porøsitet

Terninger blir støpt i en form med dimensjon 100x100x100 mm i henhold til *NS-EN 12390-1*, punkt 4.2, illustrert i *Figur 29*.



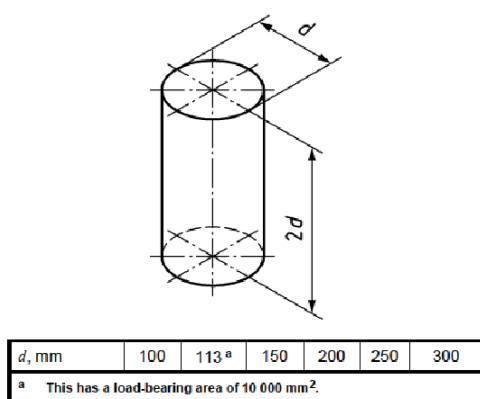
Figur 29. Støpeform, terning (NS-EN 12390-1)



Figur 30. Støpeform, terning

3.3.2.2 Sylinderer – Spaltestrekkfasthet, Elastisitetsmodul

Sylinder blir støpt i form med dimensjon 150 mm x 300 mm i henhold til *NS-EN 12390-1*, punkt 4.3, illustrert i *Figur 31*.



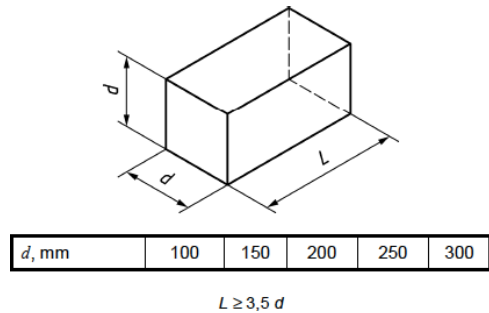
Figur 31. Støpeform, sylinder (NS-EN 12390-1)



Figur 32. Støpeform, sylinder

3.3.2.3 Prismer– Bøyestrekfasthet, CMOD

Prismet blir støpt i en form med dimensjonen 100 mm x 100 mm x 500 mm i henhold til NS-EN 12390-1, punkt 4.4, illustrert i Figur 33.



Figur 33. Støpeform, bjelke (NS-EN 12390-1)



Figur 34. Støpeform, bjelke

3.3.3 Støping og herdning

Prøvestykkene er støpt og herdet i henhold til NS-EN 12390-3: *Støping og herdning av prøvelegemer for fasthetsprøving*. Formene blir før støp påført et tynt lag med slippmiddel for å unngå heft mellom betong og form. Formene blir deretter fylt lagvis og komprimert mekanisk for å sikre full komprimering av betongen. Prøvestykkene vil herde i 24 timer før de tas ut av formen. Prøvestykkene vil deretter herde i vann med en temperatur på 20 ± 2 °C.



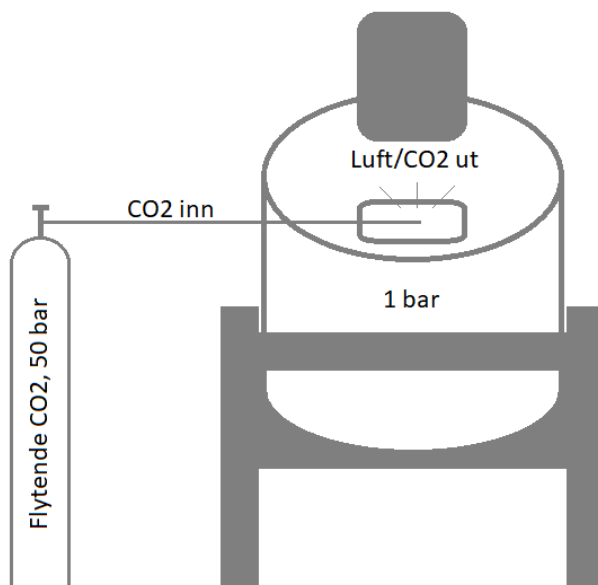
Figur 35. Herding i vannbad

3.3.4 Blanding av betong

3.3.4.1 Blandeoppsett

Blandeoppsettet består av en 150 liters tvangsblender, hvor det er påmontert inntak for CO₂ på lokket av blanderen. Inne i blanderen vil det være atmosfærisk trykk tilsvarende 1 atmosfære, mens beholderen med flytende CO₂ har et trykk på 50 bar. Da flytende CO₂ ikke er stabilt under luftrykket og temperaturen i blanderen går den over til en blanding av gass og fint distribuerte solide CO₂ partikler. CO₂ gass som kommer inn i blanderen vil fortrenge luften inni blanderen da tettheten til CO₂ er større luft. Dette vil presse luft, samt overflødig CO₂ gass ut av blanderen slik at atmosfæren inne i blanderen er 100% CO₂. *Figur 36* viser oppsett av blander og tilsetning av CO₂.

Blander: Eirich R09T 150l



Figur 36. Blandeoppsett, illustrasjon



Figur 37. Blandeoppsett

3.3.4.2 Blandeprosedyre

Blandeprosedyren er basert på blandeprosedyren utviklet av Monkman, MacDonald og Hooton [26] grunnet deres positive resultater. Blandeprosedyren er lik for referansen og de øvrige reseptene med unntak av tilsetning av CO₂. Se *Tabell 9* for blandeprosedyre.

Tabell 9. Oversikt over blandeprosedyre

Oversikt over blandeprosedyre		
Steg	Tid	Prosedyre
1	0 Sekunder	Tilsett tilslag og sement
2	60 Sekunder	Tilsett halvparten av total vannmengde
3	120 Sekunder	Tilsett CO ₂
4	240 Sekunder	Tilsett resterende vannmengde og SP
5	360 Sekunder	Avslutt blanding

3.3.4.3 Dosering av CO₂

3.3.4.3.1 Manuel dosering av CO₂

Ved forsøket ble dosering av CO₂ utført manuelt. Dette ble utført ved at beholderen ble veid i forkant av dosering. Ved doseringen ble ventilen åpnet i kalkulert doseringstid. Beholderen med flytende CO₂ ble i etterkant av dosering veid igjen for å kunne beregne nøyaktig hvor mye CO₂ som ble dosert. Doseringstiden ble kalkulert gjennom forsøk som viste hvor mye CO₂ som går ut av beholderen per sekund ved full åpning. Prosedyren er gitt i *Tabell 10*.

Tabell 10. Prosedyre for dosering av CO₂

Prosedyre for dosering av CO ₂	
Steg	Prosedyre
1	Vei beholderen med flytende CO ₂
2	Vri åpningsventilen til full åpning i kalkulert doseringstid
3	Vei beholderen med flytende CO ₂
4	Noter reel dosering

3.3.4.3.2 Elektronisk dosering av CO₂

For å kunne nøyaktig dosere en gitt mengde CO₂ over et gitt tidsintervall er man avhengig av et elektronisk doseringssystem. Dette oppnås ved bruk av måler basert på corioliseffekt. I et måleinstrument basert på corioliseffekten går mediet som skal måles gjennom et rør, som i forkant er satt til å vibrere i egenfrekvens. Ved bruk av optiske sensorer måles endringen i rørets vibrasjon, som igjen benyttes til å måle mediets massestrømning [kg/s]. Dersom den målte massestrømningen differerer fra den programmerte massestrømningen vil tilførselen av mediet inn i måleapparatet endres umiddelbart slik at man oppnår ønsket dosering. Utregningen til måleapparatet baserer seg på ligning 10 og 11.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (10) \quad \rho = \frac{K}{4\pi V f_2^2} - \frac{m}{V} \quad (11)$$

Hvor:

Hvor:

f = Frekvens før innføring av medie ρ = Mediets tetthet

K = Stivhetskonstant for rørene f_2 = Frekvens etter innføring av medie

m = Rørets masse

K = Stivhetskonstant for rørene

m = Rørets masse

V = Rørets volum

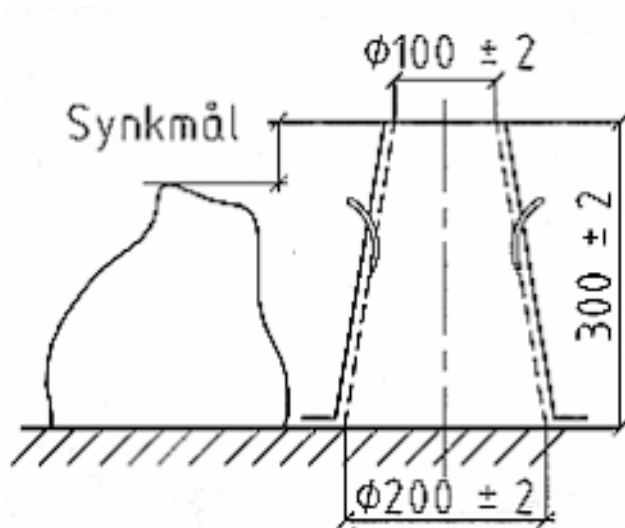
I tillegg til selve måleapparatet er det også behov for en ventil mellom måler og blander som håndterer faseendringen. Leveringstid og kostnaden på et slikt doseringssystem gjorde at denne løsningen ikke ble benyttet i forsøket.

3.4 Testprosedyrer

3.4.1 Ferske egenskaper

3.4.1.1 Synkmål

Betongens synkmål bestemmes i henhold til *NS-EN 12350-2: Synkmål*. Kjeglen plasseres på en stiv metallplate. Kjeglen fylles lagvis i tre like høye lag hvor betongen komprimeres med 25 støt ved bruk av komprimeringsstav mellom hvert lag. Etter at kjeglen er fylt løftes kjeglen kontrollert fra platen. Differansen mellom kjeglens høyde og betongens høyeste punkt angir betongens synkmål, vist i *Figur 38*. Kjeglens dimensjoner er vist i *Figur 38*.



Figur 38. Kjegle for bestemmelse av synkmål (Statens vegvesen, håndbok 14.622)



Figur 39. Synkmål

3.4.1.2 Densitet

Betongens densitet blir målt i henhold til *NS-EN 12350-6: Densitet*. Den sylindriske beholderen med 8 L volum veies før og etter den er fylt med betong og betongens densitet kalkuleres med følgende formel:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (12)$$

Hvor

D = Densiteten til den ferske betongen [kg/m^3]

m_1 = Vekt av tom beholder [kg]

m_2 = Vekt av beholder fylt med betong [kg]

V = Volum av beholderen [m^3]



Figur 40. Densitet av fersk betong

3.4.1.3 Luftinnhold

Betongens luftinnhold blir målt med trykkmåler i henhold til *NS-EN 12350-7: Luftinnhold - Trykkmetoder*. Den sylindriske beholderen med 8 L volum fylles i to lag, hvor betongen komprimeres ved bruk av en komprimeringsstav mellom hvert lag med den hensikt å fjerne luftlommer i betongen. Betongen settes deretter under trykk. Manometeret måler volumendringen relativt til normalt lufttrykk. Luftinnholdet i den ferske betongen er proporsjonal med volumendringen.



Figur 41. Utstyr for måling av luftinnhold

3.4.1.4 Temperaturutvikling/Varmeutvikling

Den ferske betongen plasseres i en isolert beholder av isopor med dimensjoner 150 mm x 150 mm x 150 mm. Veggene og lokket på beholderen har en tykkelse på 20 mm. Temperaturmåleren plasseres i senter av beholderen. Temperaturen logges automatisk hver halvtime. Temperaturen vil logges frem til temperaturen i betongen når romtemperatur. Akkumulert isotherm varmeutvikling er estimert ved bruk av regnearket "Herdekasse" utviklet av Sverre Smedplass, Skanska. Dette regnearket kalkulerer betongens reelle herdetid, kjent som modenhet basert på herding ved 20 °C. Utregningen av betongens modenhet gjøres med følgende formel:

$$M = \sum_{i=1}^{i=n} H(\theta_i) \times \Delta t_i \quad (13)$$

Hvor

M = Modenhet

n = Antall tidsintervall

$H(\theta_i)$ = Hastighetsfunksjonen av gjennomsnittelig temperatur θ_i i tidsintervall i

Δt_i = Lengden på tidsintervallet i

Den kalkulererte modenheten benyttes videre for å kalkulere varmeutviklingen med følgende formel:

$$Q(M) = Q_{\infty} \times e^{-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^{\alpha}} \quad (14)$$

Hvor

$Q(M)$ = Varmeutvikling ved modenhet M

Q_{∞} = Total varmeutvikling

τ_e = Retardasjonsparameter

α = Krumningsparameter

Detaljert oversikt over parameterne benyttet i estimeringen er gitt i Vedlegg H.



Figur 42. Utstyr for måling av temperaturutvikling

3.4.2 Herdede egenskaper

3.4.2.1 Trykkfasthet

Bestemmelse av betongens trykkfasthet utføres i henhold til *NS-EN 12390-3:2019: Prøvelegemers trykkfasthet*. De støpte terningene med dimensjon 100 mm x 100 mm x 100 mm plasseres på en sokkel med samme dimensjon, illustrert i *Figur 43*. Trykkprøvingsmaskinen påfører en økende belastning vinkelrett på prøvestykket til brudd oppstår. Den maksimale belastningen ved brudd registreres, og benyttes videre til å kalkulere prøvestykkets trykkfasthet med følgende formel:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (15)$$

Hvor:

f_c = Trykkfastheten [N/mm^2]

F = Maksimal belastning ved brudd [N]

A_c = Tverrsnittsarealet av prøvestykket [mm^2]

Prøvemaskin: Toni Technik trykkprøvingsmaskin



Figur 43. Test av trykkfasthet

3.4.2.2 Elastisitetsmodul

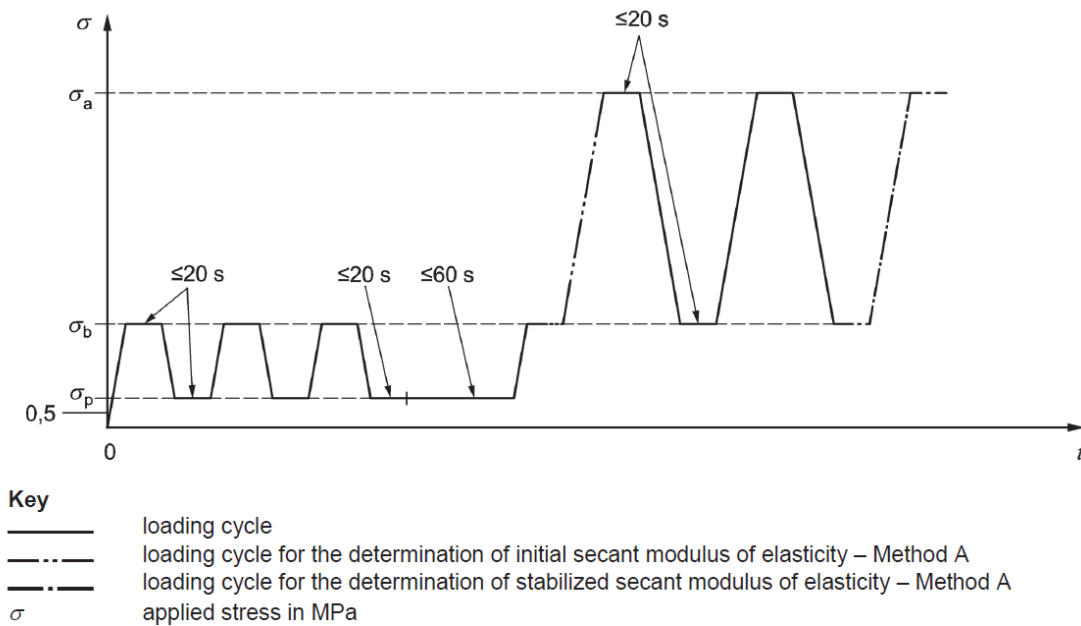
Bestemmelse av betongens elastisitetsmodul utføres i henhold til *NS-EN 12390-13:2013: Bestemmelse av sekantmodul for elastisitet under trykk – Metode A*. Den støpte sylindren med dimensjon 150 mm x 300 mm plasseres i en rigg med påmontert tøyningmåler. Riggens plasseres så stående i prøvingsmaskinen, illustrert i *Figur 44*.

Prøvemaskin: Toni Technik trykkprøvingsmaskin / HBM Strain Link



Figur 44. Test av elastisitetsmodul

Maskinen påfører aksialt trykk gjennom tre lastsykluser, illustrert i *Figur 45*.



Figur 45. Lastsykluser ved bestemmelse av elastisitetsmodul (NS-EN 12390-13)

Grenseverdiene for lastsyklusene bestemmes med følgende formler:

$$\text{\textit{Øvre spenning:}} \quad \sigma_a = \frac{f_c}{3} \quad (16)$$

$$\text{\textit{Nedre spenning:}} \quad 0,10 \times f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 \times f_c \quad (17)$$

$$\text{\textit{Forhåndslast spenning:}} \quad 0,5 \text{ Mpa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b \quad (18)$$

Hvor:

$$f_c = \text{\textit{Trykkfasthet, sylinder}} = \text{\textit{Trykkfasthet, terning}} \times 0,8$$

Spenningene og tøyningene i prøvestykket under lastsyklusene blir registrert og stabilisert elastisitetsmodul blir kalkulert med følgende formel:

$$E_{c,s} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}} \quad (19)$$

Hvor:

$$\sigma_a^m = \text{\textit{Øvre spenning}}$$

$$\sigma_b^m = \text{\textit{Nedre spenning}}$$

$$\varepsilon_{a,3} = \text{\textit{Gjennomsnittstøyning ved øvre spenning for tredje lastsyklus}}$$

$$\varepsilon_{b,2} = \text{\textit{Gjennomsnittstøyning ved nedre spenning for andre lastsyklus}}$$

3.4.2.3 Bøyestrekfasthet

Bestemmelse av betongens bøyestrekfasthet utføres i henhold til *NS-EN 12390-5:2019: Prøvelegemers bøyestrekfasthet*. Det støpte prismet med dimensjon 100 mm x 100 mm x 500 mm plasseres på to opplagere, illustrert i *Figur 46*. Maskinen påfører en økende belastning på oversiden av prøvestykket som skaper bøyemoment i prøvestykket. Den maksimale belastningen ved brudd registreres, og benyttes videre til å kalkulere prøvestykkets bøyestrekfasthet med følgende formel:

$$f_{ct} = \frac{F \times L}{d_1 \times d_2^2} \quad (20)$$

Hvor:

f_{ct} = Bøyestrekfastheten [N/mm^2]

F = Maksimal belastning ved brudd [N]

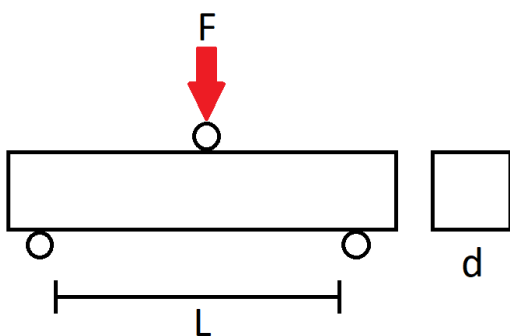
L = Avstand mellom opplagere [mm]

d_1 = Tverrsnitt [mm]

d_2 = Tverrsnitt [mm]

$d_1 = d_2$ for kvadratiske tverrsnitt

Prøvemaskin: Toni Technik Bauform



Figur 46. Bøyestrekfasthet, illustrasjon



Figur 47. Bøyestrekfasthet

3.4.2.4 Spaltestrekkfasthet

Bestemmelse av betongens spaltestrekkfasthet utføres i henhold til *NS-EN 12390-6:2009: Prøvelegemers spaltestrekkfasthet*. Den støpte sylindere med dimensjon 150 mm x 300 mm plasseres i en rigg og legges på siden i trykkprøvingsmaskinen, illustrert i *Figur 48*. Maskinen påfører en økende belastning langs prøvestykket som skaper strekkrefter vinkelrett på trykkretningen. Den maksimale belastningen ved brudd registreres, og benyttes videre til å kalkulere prøvestykkets bøyestrekfasthet med følgende formel:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (21)$$

Hvor:

f_{ct} = Spaltestrekkfastheten [N/mm^2]

F = Maksimal belastning ved brudd [N]

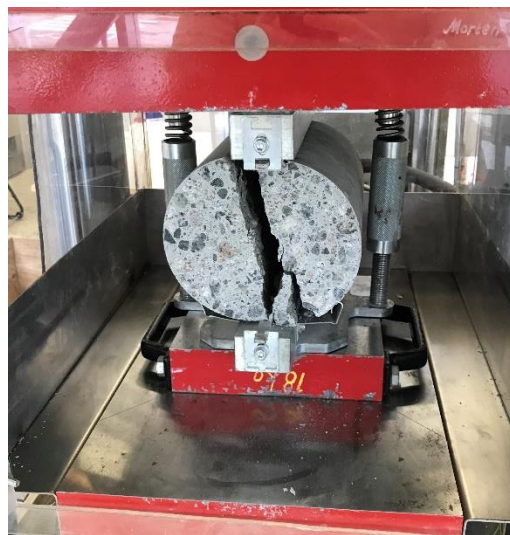
L = Lengden av sylindereens kontaktlinje [mm]

d = Fastsatt tverrsnitt [mm]

Prøvemaskin: Toni Technik trykkprøvingsmaskin / Rigg for spaltestrekkfasthet



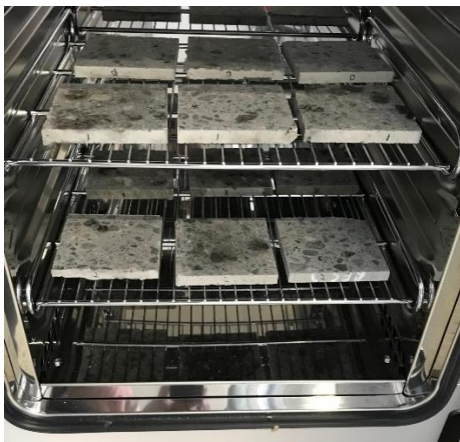
Figur 48. Spaltestrekkfasthet, før brudd



Figur 49. Spaltestrekkfasthet, etter brudd

3.4.2.5 Densitet og porøsitet – PF-Metoden

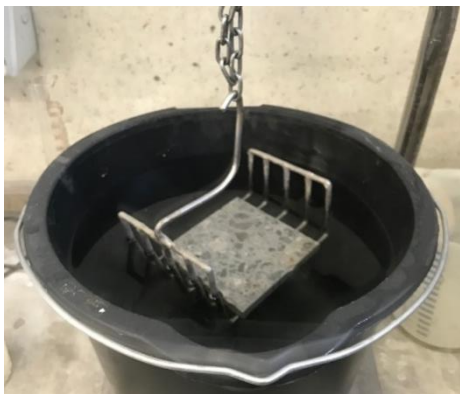
Bestemmelse av betongens densitet og porøsitet utføres i henhold til *Statens vegvesen: Håndbok 14.637 – Kapillær sugeshastighet og porøsitet, PF – Begrenset prosedyre*. Tre skiver fra hver resept med dimensjon 100 mm x 100 mm x 15 mm legges i tørkeskap ved 105 °C. Skivene ligger i tørkeskapet til vekttapet er mindre enn 0,01 % i døgnet. Deretter tildekkes skivene med plastfolie og oppbevares i romtemperatur i minimum 2 timer før de veies (vekt g_1). Skivene legges vil så ligge helt neddykket i vann i 7 døgn, for de veies i luft (vekt g_2) og under vann (vekt g_3). Til slutt vil skivene ligge et døgn neddykket i vann i trykktank ved 50 atm, før de veies (vekt g_4).



Figur 50. Test av porøsitet, tørkeskap



Figur 51. Test av porøsitet, vannbad



Figur 52. Test av porøsitet, veiing under vann



Figur 53. Test av porøsitet, trykktank

De registrerte veiingene benyttes sammen med følgende formler til å bestemme betongens densitet og porøsitet.

$$\text{Prøvestykkets volum:} \quad V = \frac{g_2 - g_3}{\rho_w} [m^3] \quad (22)$$

$$\text{Tørr densitet:} \quad \rho_1 = \frac{g_1}{V} [kg/m^3] \quad (23)$$

$$\text{Fast-stoff densitet:} \quad \rho_{fs} = \frac{g_1}{V - \frac{g_4 - g_1}{\rho_w}} [kg/m^3] \quad (24)$$

$$\text{Sug-porøsitet:} \quad \rho_s = \frac{g_2 - g_1}{V \times \rho_w} [kg/m^3] \quad (25)$$

$$\text{Makro-porøsitet:} \quad \rho_m = \frac{g_4 - g_2}{V \times \rho_w} [kg/m^3] \quad (26)$$

$$\text{Total porøsitet:} \quad \rho_1 = \rho_s + \rho_m [kg/m^3] \quad (27)$$

Hvor:

$$\rho_w = \text{Vannets densitet (Settes lik } 1000 \text{ kg/m}^3\text{)}$$

Tørr densiteten vil vise densiteten av betongen uten vann i kapillær- og gelporene, mens faststoff densiteten vil vise densiteten av betongen uten porer. Den målte sug-porøsiteten vil være avhengig av volumet av kapillær- og gelporer, mens makro-porøsiteten vil være avhengig av volumet av makro- og luftporer.

3.4.2.6 pH-verdi

Bestemmelse av pH-verdien i den herdede betongen ble utført i henhold til prosedyre utarbeidet av Grubb, Limaye og Kakade beskrevet i *Testing pH in concrete – Need for a standard procedure*. Det måles pH-verdi for hver av de fire reseptene etter 28 døgns herding.

Prosedyren begynner med kalibrering av den elektroniske pH-måleren. Dette gjøres ved bruk av bufferløsning med gitt pH-verdi. Deretter tas det ut betongstøv fra senter av tre ulike terninger for hver resept, illustrert i *Figur 54*. Totalt 5 gram betongstøv blandes så med 10 ml destillert vann. Etter blanding filtreres blandingen slik at partikler større enn 8 mm utelates. Deretter måles pH-verdien i blandingen, illustrert i *Figur 55*. Da avlest pH-verdi vil variere med temperatur må man avslutningsvis korrigere for temperaturforskjeller mellom de ulike blandingene. Ved dette forsøket ble det benyttet elektronisk pH-måler med automatisk temperatur kompensasjon slik at dette ikke var nødvendig.



Figur 54. pH i herdet betong, prøvemateriale



Figur 55. pH i herdet betong, måling

3.4.3 Mikrostruktur

3.4.3.1 SEM – Skanningelektronmikroskop

For å kunne observere forandringer i mikrostrukturen til de ulike reseptene benyttes skanningelektronmikroskop. Det blir laget et prøvestykke fra hver resept med dimensjon 7,5 mm x 7,5 mm. Prøvestykkene festes til en prøveplate (Ø 10 mm) ved bruk av karbonbasert tape som sørger for å lede strøm bort fra prøvestykket. Prøvene dekkes også av et tynt lag med palladium for å lede strøm bort fra overflaten, dette gjøres for å hindre støy på bildet.

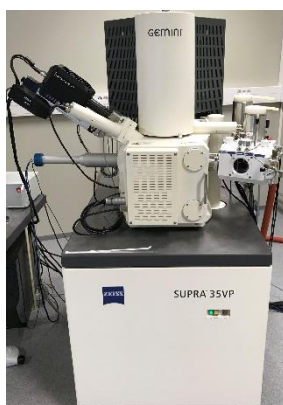


Figur 56. SEM, prøvestykker



Figur 57. SEM, prøvestykker dekket av palladium

Skanningelektronmikroskopet skanner så prøvestykkene med en fokusert elektronstråle. Elektronstrålene virker på atomene på prøvestykkets overflate, og det reflekteres elektroner fra overflaten. En rekke ulike detektorer fanger opp og analyserer disse elektronene slik at det fremstilles et høyoppløselig bilde av prøvestykkets overflate. Hele prosessen foregår i vakuum for å hindre oppbremsing av elektronene.



Figur 58. SEM, prøvemaskin

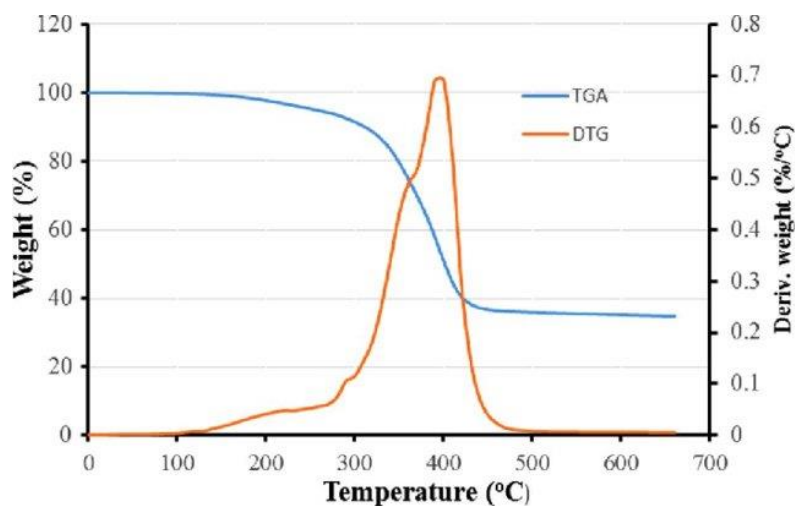


Figur 59. SEM, prøve-kammer

3.4.4 Kjemisk sammensetting

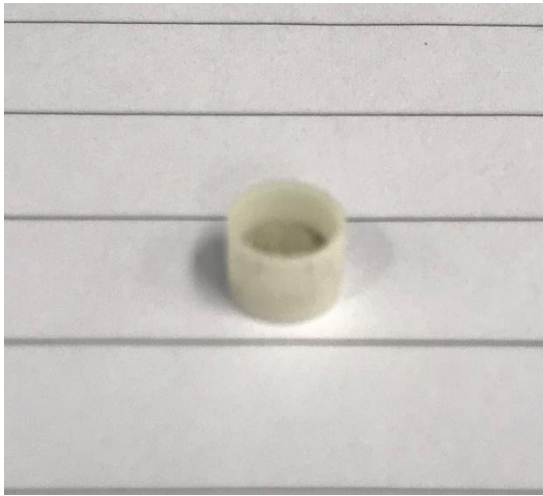
3.4.4.1 TGA – Termogravimetrisk analyse

For å kunne undersøke den kjemiske sammensettingen til de ulike reseptene benyttes termogravimetrisk analyse. Metode for gjennomføring og analysing av data er basert på metode benyttet av Kwasny, Basheer og Russel [21]. Betongen males opp ved å benytte morter og pistill, og siktes slik at alle korn i prøvemateriale er $\leq 0,063$ mm. Prøvemateriale fylles så i en beholder med 70 μ l volum, illustrert i *Figur 61*. Det tas to prøver fra sentrum av to terninger fra hver resept. Beholder plasseres inne i maskinen hvor materiale kontinuerlig veies mens temperaturen øker. Temperaturen øker fra 30°C - 1000°C, med en stigning på 20°C/min. Prosessen foregår i nitrogen-mettet atmosfære. Når testen er gjennomført vil man få ut en graf som viser vekttap i prosent gjennom oppvarmingsprosessen, samt grafen til den deriverte av funksjonen som viser hastigheten av vekttapet gjennom oppvarmingsprosessen, vist i *Figur 60*.



Figur 60. TGA- og DTA-grafer [31]

Disse grafene sammen med kunnskap om hvilke mineraler som løses opp ved ulike temperaturer gjør at man kan anslå den opprinnelige andelen av de ulike mineraler. Tidligere forskning [32] har vist at majoriteten av C-S-H nedbrytes i intervallet 180 - 400 °C, dehydrering av C-H foregår i intervallet 400 - 600°C og dekarbonisering av kalsiumkarbonat foregår i intervallet 600 - 900°C.



Figur 61. TGA, beholder



Figur 62. TGA, maskin

For å bestemme hvor stor andel CO₂ som er bundet opp i betongen sammenlignes de ulike resepten med referansen som ikke er tilsatt CO₂. Dette vil også vise hvor stor andel av den tilsatte mengden CO₂ som har vært reaktiv. Alt vekttap i intervallet 600 - 900°C tilegnes frigjøring av CO₂. Andelen CO₂ i betongen kalkuleres med følgende formel:

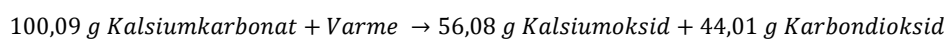
$$C_{\text{Andel CO}_2} = C_{\text{Vekttap i intervallet 600 - 900}^\circ\text{C}} - R_{\text{Vekttap i intervallet 600 - 900}^\circ\text{C}} \quad (28)$$

Hvor:

C = Resept tilsatt CO₂

R = Referanse

Videre vil andelen CO₂ i de forskjellige reseptene benyttes til å kalkulere hvor mye kalsiumkarbonat som er dannet i de ulike reseptene. Dette gjøres med følgende formler.

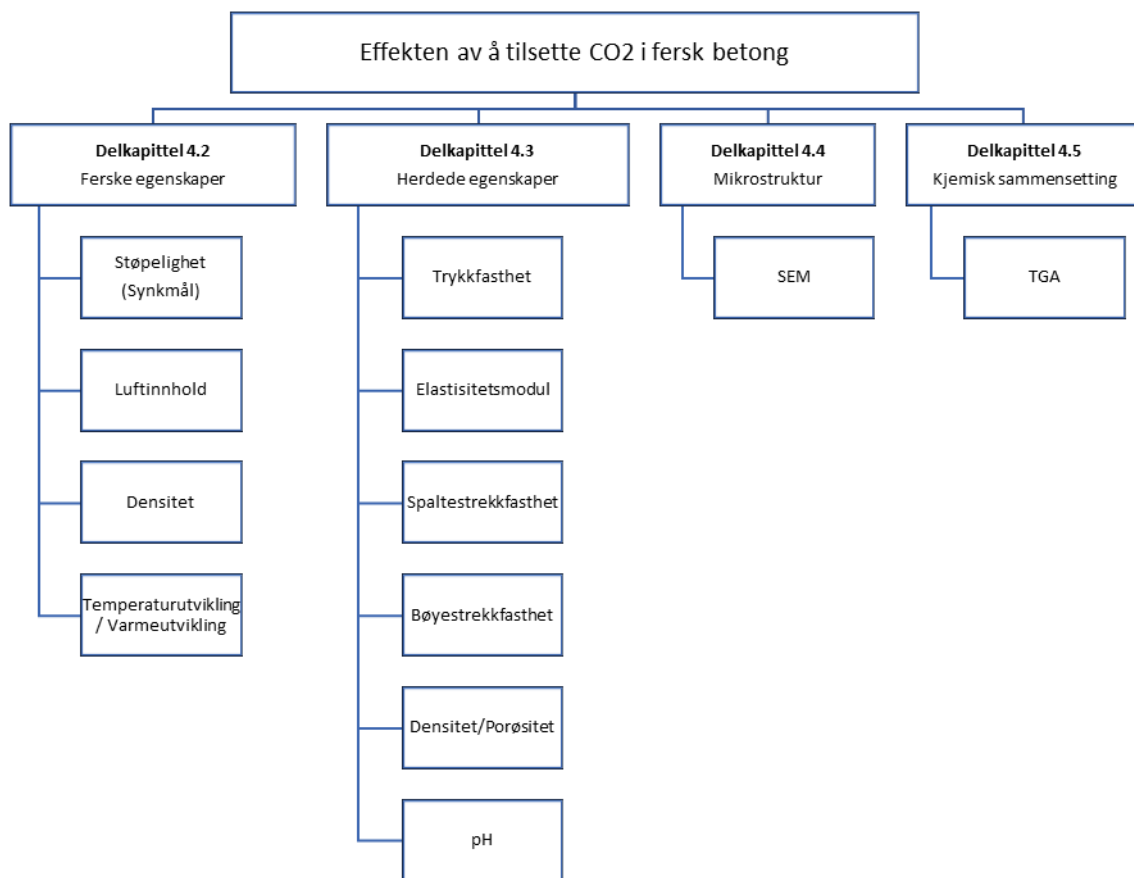


$$C_{\text{Andel kalsiumkarbonat}} = \frac{100,09}{44,01} \times C_{\text{Andel CO}_2} \quad (30)$$

Denne siden er blank med hensikt

4 Resultat og diskusjon

I dette kapitlet vil observasjoner og resultater fra prøveprogrammet presenteres og diskuteres. *Delkapittel 4.1* vil presentere doseringen av CO₂, videre vil resultatene og diskusjonen presenteres i henhold til planen for prøveprogrammet, illustrert i *Figur 63*. Avslutningsvis vil *Delkapittel 4.6* inneholde forslag til videre forskning i forbindelse med tilsetning av CO₂ i fersk betong.



Figur 63. Plan for prøveprogram, oversikt over resultat og diskusjon

4.1 Dosering av CO₂

Tabell 11 viser de reelle doseringsmengdene av CO₂ i de ulike reseptene.

Tabell 11. Reel doseringsmengde av CO₂

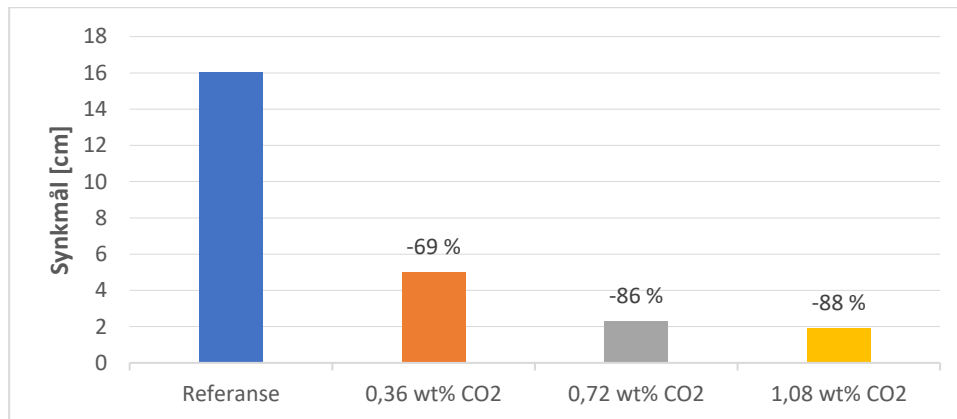
Blanding	Planlagt dosering		Oppnådd dosering	
	[wt% CO ₂]	[g]	[wt% CO ₂]	[g]
Referanse	0	0	0	0
CO ₂	0,3	58	0,36	70
	0,6	117	0,72	140
	0,9	175	1,08	210

Som man kan se av *Tabell 11* er den reelle doseringsmengden 20 % høyere for samtlige av reseptene. Bakgrunnen for avviket i doseringsmengden skyldes at det ved full åpning slippes ut ca. 1500 gram CO₂ per sekund. Dette gjorde at metoden for manuell tilsetting av CO₂, beskrevet i *Delkapittel 3.3.4.3.1*, ikke var gjennomførbar. De oppnådde doseringsmengdene ga allikevel en lineær økning av doseringsmengdene, og oppgavens mål om å undersøke hvilken effekt tilsetting av CO₂ har på betongens egenskaper er fortsatt ivaretatt.

4.2 CO2 sin effekt på betongens ferske egenskaper

4.2.1 Synkmål (støpelighet)

Resultatene fra test av synkmål er presentert i *Figur 64*. Y-aksen viser synkmål i cm. Prosentvis endring i synkmål sammenlignet med referansen er markert over de respektive søylene for hver av reseptene tilsatt CO₂. Det ble utført en test av synkmål for hver resept. Samtlige resultater er presentert i *Vedlegg F*.



Figur 64. Synkmål, resultater

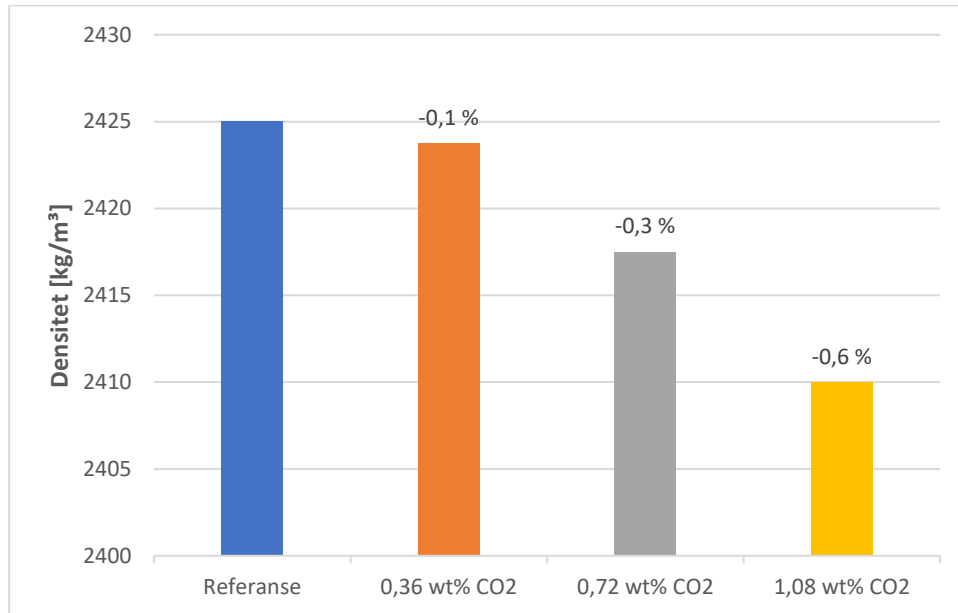
Som man kan se av *Figur 64* er det en sammenheng mellom betongens synkmål og tilsatt mengde CO₂. Reseptene tilsatt 0,36 wt%, 0,72 wt% og 1,08 wt% CO₂ hadde synkmål på henholdsvis 5 cm, 2,3 cm og 1,9 cm. Dette medfører en endring i konsistens fra flytende i referansen til plastisk i resepten tilsatt minst CO₂, og til stiv plastisk i de to reseptene tilsatt mest CO₂. Reduksjonen av synkmålet i samtlige resepter tilsatt CO₂ er så stor at det høyst sannsynlig vil kunne påvirke komprimerbarhet, og videre de mekaniske egenskapene.

Den observerte reduksjonen i betongens synkmål antas å være forårsaket av dannelsen av nano-kalsiumkarbonat. Da nano-kalsiumkarbonat har høyt spesifikt overflateareal vil disse partiklene absorbere fritt vann i betongen, presentert i *Delkapittel 2.3*.

Som presentert i *Delkapittel 2.6.1* er det ved tidligere forskning observert en reduksjon av synkmålet på opptil 57 % ved 0,6 wt% tilsatt CO₂. Det er noe usikkert hva som har forårsaket at den observerte reduksjonen er betraktelig større enn hva som tidligere er observert. Ved tilsetning av CO₂ i fersk betong er det stor usikkerhet rundt hvor mye av den tilsatte mengden CO₂ som er reaktiv. Differensen mellom den observerte reduksjonen og det som tidligere er observert kan forklares med at det ved dette forsøket har vært en større mengde reaktiv CO₂, som har resultert i større mengde nano-kalsiumkarbonat.

4.2.2 Densitet

Resultatene fra test av densitet i fersk betong er presentert i *Figur 65*. Y-aksen viser densitet i kg/m^3 . Prosentvis endring i densitet sammenlignet med referansen er markert over de respektive søylene for hver av reseptene tilsatt CO_2 . Det ble utført en test av densitet i fersk betong for hver resept. Samtlige resultater er presentert i *Vedlegg F*.



Figur 65. Densitet av fersk betong, resultater

Som man kan se av *Figur 65* er det en sammenheng mellom betongens ferske densitet og tilsatt mengde CO_2 . Den observerte endringen i betongens ferske densitet antas ikke å ha noen konsekvens for betongens mekaniske egenskaper.

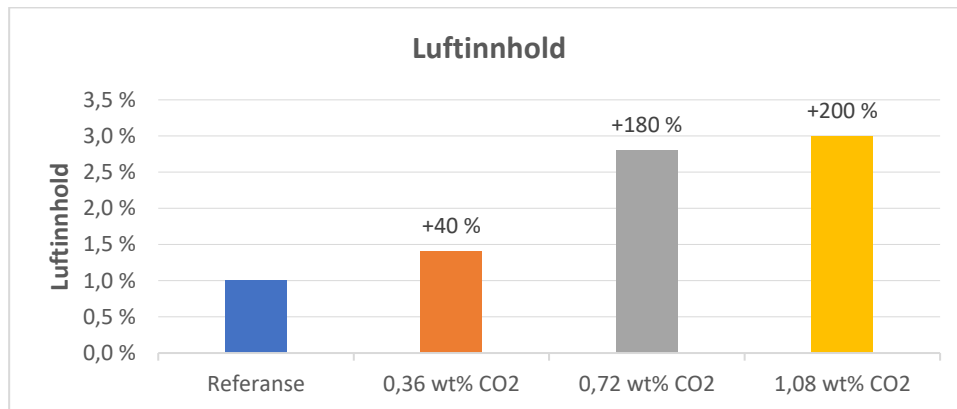
Det antas at den observerte endringen er forårsaket av reduksjonen i betongens synkmål, presentert i *Delkapittel 4.2.1*. Dette antas å ha resultert i redusert komprimerbarhet.

Som presentert i *Delkapittel 2.6.2* er det tidligere observert ved direkte tilsetning av nano-kalsiumkarbonat at densiteten øker som et resultat av at nanopartiklene har en filler-effekt i matriksen.

Da det ikke er observert en økning i densiteten ved dette forsøket, antas det at en eventuell filler-effekt fra nanopartiklene er blitt dominert av den reduserte komprimerbarheten.

4.2.3 Luftinnhold

Resultatene fra test av luftinnhold er presentert i *Figur 66*. Y-aksen viser luftinnhold i %. Prosentvis endring i luftinnhold sammenlignet med referansen er markert over de respektive søylene for hver av reseptene tilsatt CO₂. Det ble utført en test av luftinnhold for hver resept. Samtlige resultater er presentert i *Vedlegg F*.



Figur 66. Luftinnhold, resultater

Som man kan se av *Figur 66* er det en sammenheng mellom betongens luftinnhold og tilsatt mengde CO₂. Luftinnholdet varierte mellom 1 % og 3 %. Den observerte økningen av luftinnhold i resepten tilsatt minst CO₂ anses ikke for å være av betydning da det er innenfor forventet verdi (1 % - 2 %). Ved reseptene tilsatt 0,72 wt% og 1,08 wt% er økningen så stor at det vil kunne påvirke betongens trykkfasthet, da 1 % høyere luftinnhold gir ca. 5 % reduksjon i trykkfasthet.

Økningen av betongens luftinnhold antas å komme som et resultat av redusert synkmål, presentert i *Delkapittel 4.2.1*. En reduksjon av betongens synkmål vil kunne redusere komprimerbarheten, som videre fører til et høyere luftinnhold i betongen.

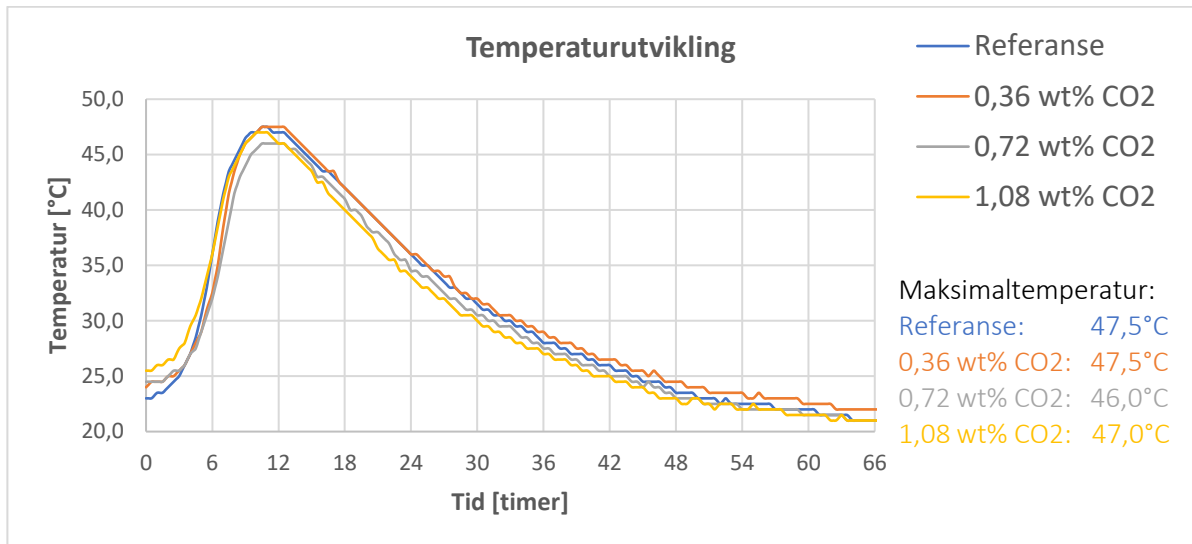
Ved tidligere forskning er det imidlertid observert en reduksjon av betongens luftinnhold ved tilsetning av CO₂, som presentert i *Delkapittel 2.6.3*. En reduksjon av luftinnholdet vil kunne forklares med at høyere vannabsorpsjon, forårsaket av nanopartiklenes høyere spesifikke overflateareal, fører til en reduksjon av mengden fritt vann. Dersom mengden fritt vann i betongen reduseres vil dette forårsake en reduksjon i betongens luftinnhold.

Da det ble observert en økning i luftinnholdet ved dette forsøket antas det at reduksjonen i komprimerbarhet er dominerende, slik at effekten av en eventuell reduksjon av mengden fritt vann ikke har gitt utslag i resultatene.

4.2.4 Temperaturutvikling/varmeutvikling

4.2.4.1 Temperaturutvikling

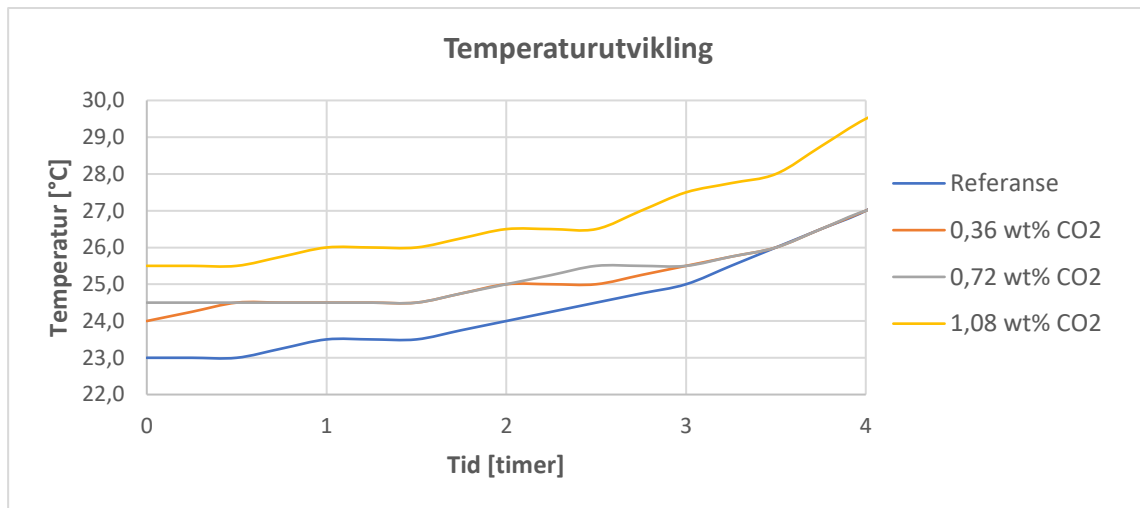
Resultatene fra måling av temperaturutvikling er presentert i *Figur 67*. Y-aksen viser temperatur i celsius og x-aksen tid etter blanding i timer. Samtlige resultater er presentert i *Vedlegg G*.



Figur 67. Temperaturutvikling

Som man kan se av *Figur 67* nådde samtlige resepter maksimaltemperatur ved 10,5 timer. Temperaturutviklingen for de ulike reseptene viser ingen stor differanse eller tydelig sammenheng mellom tilsatt mengde CO₂ og temperaturutvikling.

Det kan observeres en sammenheng mellom første registrerte temperatur og tilsatt mengde CO₂, som vist i *Figur 68*. Dette kan indikere at det har oppstått en umiddelbar reaksjon ved tilsetning av CO₂ som har økt temperaturen i betongen. Dette antas å være forårsaket av de eksoterme reaksjonene mellom C₃S, C₂S og det karboniserte vannet hvor varmeutviklingen er ca. tre ganger høyere enn ved vanlig hydratisering, som presentert i *Delkapittel 2.2*.

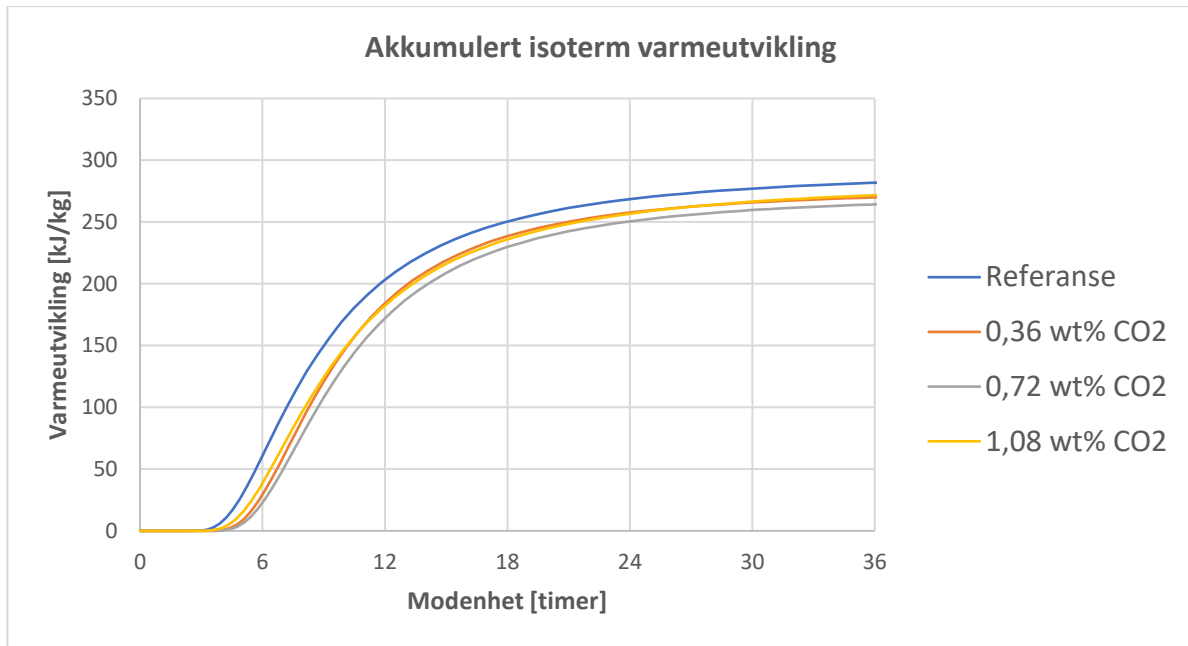


Figur 68. Utgangstemperatur, resultater

Videre viser *Figur 67* at de reseptene tilsatt mest CO₂ (0,72 wt% og 1,08 wt%) har noe lavere maksimaltemperatur og lavere temperatur videre i hydrasjonsforløpet. Dette kan være forårsaket av at nano-kalsiumkarbonat dannet ved reaksjonen mellom C₃S, C₂S og det karboniserte vannet ikke lenger finfordeles i sementpastaen, som resulterer i at nanopartiklene klumpes sammen og det totale spesifikke overflatearealet reduseres. Dette vil igjen redusere antallet nye vekstområder for dannelsen av C-S-H, slik at den senere varmeutviklingen avtar, som presentert i *Delkapittel 2.3*.

4.2.4.2 Varmeutvikling

Den akkumulerte isoterme varmeutviklingen er estimert med regnearket "Herdekassen" utviklet av Sverre Smedplass, Skanska. Estimatenes er basert på den målte temperaturutvikling, presentert i *Delkapittel 4.2.4.1*. Resultatene er presentert i *Figur 69*. Y-aksen viser varmeutvikling i kJ/kg, x-aksen viser betongens modenhet i timer. En detaljert oversikt over regnearket med parametere er presentert i *Vedlegg H*.



Figur 69. Akkumulert isoterm varmeutvikling

Som man kan se av *Figur 69* er varmeutviklingen redusert ved samtlige tidspunkt for reseptene tilsatt CO₂, samtidig kan det observeres en retardasjon i varmeutviklingen på ca. 1 time. Ved 10 timer modenhet hadde reseptene tilsatt 0,36 wt%, 0,72 wt% og 1,08 wt% CO₂ henholdsvis 19 %, 28 % og 6 % lavere varmeutvikling. Ved 36 timer var reduksjonen i varmeutvikling 4 % for reseptene tilsatt 0,36 wt% og 1,08 wt% CO₂, mens resepten tilsatt 0,72 wt% CO₂ hadde 7 % lavere varmeutvikling enn referansen. Lavere varmeutvikling er en indikasjon på lavere hydratasjonsgrad, som vil resultere i redusert trykkfasthet.

Ved tidligere forskning er det observert lignende varmeutvikling med en reduksjon i varmeutviklingen på 17 % ved 11 timer, men hvor den totale varmeutviklingen var 7 % høyere enn referansen ved 20 timer, som presentert i *Delkapittel 2.6.4*. Differensen mellom den observerte reduksjonen og det som tidligere er observert kan forklares med at det ved dette forsøket har vært en større mengde reaktiv CO₂, slik at effekten av tilsetningen av CO₂ er blitt større.

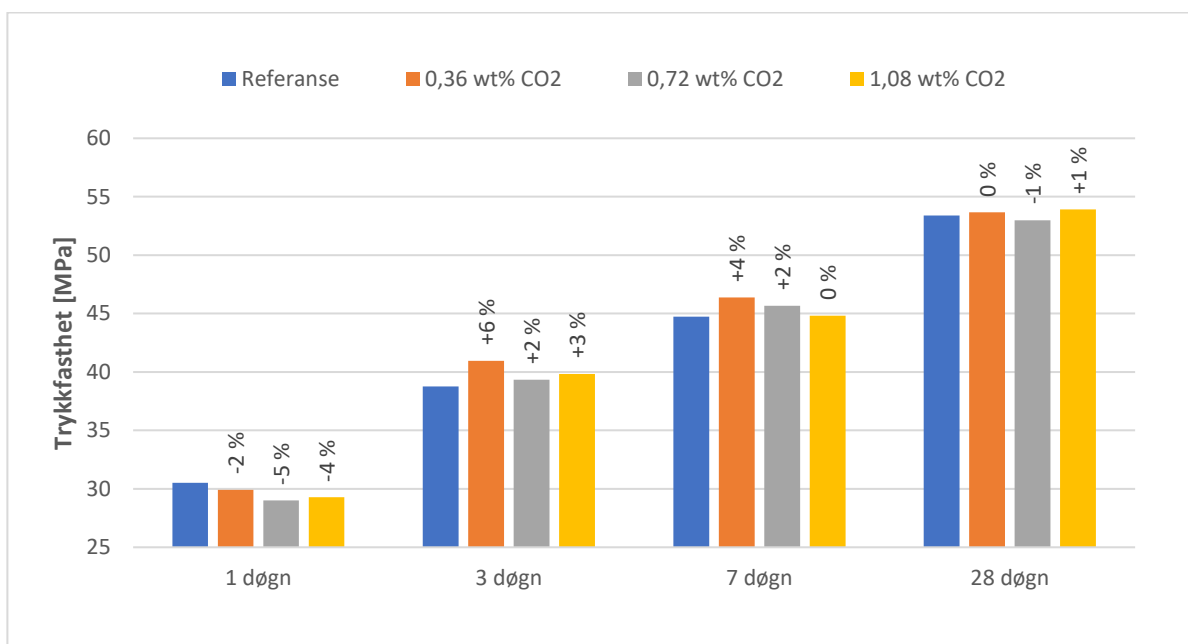
Den reduserte varmeutviklingen kan være forårsaket av at nano-kalsiumkarbonat dannet ved reaksjonen mellom C_3S , C_2S og det karboniserte vannet, klumpes sammen rundt sementpartiklene og hindrer dannelsen av C-S-H. Etter hvert som deler av nano-kalsiumkarbonatformasjonene løses opp, vil dannelsen av C-S-H fortsette, samtidig som finfordelt nano-kalsiumkarbonat vil fasilitere for dannelsen av C-S-H. Dette vil igjen øke varmeutviklingen, som presentert i *Delkapittel 2.6.4*.

Som presentert i *Delkapittel 2.4.2.1* er det observert en varmeutvikling i betongen før temperaturen ble logget, samtidig som varmeutviklingen ikke viser noen tydelig sammenheng med tilsatt mengde CO_2 . Det trengs derfor mer forskning for å kunne avgjøre hvordan tilsetning av CO_2 påvirker betongens varmeutvikling.

4.3 CO2 sin effekt på betongens herdede egenskaper

4.3.1 Trykkfasthet

Resultatene fra test av trykkfasthet er presentert i *Figur 70*. Y-aksen viser trykkfasthet i megapascal (MPa). Prosentvis endring i trykkfasthet sammenlignet med referansen er markert over de respektive søylene for hver av reseptene tilsatt CO2. Det ble utført test av trykkfasthet av tre prøvestykker fra hver resept ved 1, 3, 7 og 28 døgn herding, hvor den presenterte trykkfastheten er gjennomsnittet av de tre prøvestykkene. Samtlige resultater er presentert i *Vedlegg I*.



Figur 70. Trykkfasthet, resultater

Som man kan se av *Figur 70* er trykkfastheten ved 1 døgn herding redusert for samtlige resepter tilsatt CO2. Ved 3 døgn herding kan det observeres en økning i trykkfastheten for samtlige resepter tilsatt CO2, hvor resepten tilsatt 0,36 wt% viser en økning på 6 % sammenlignet med referansen. Ved 7 døgn herding oppnådde reseptene tilsatt 0,36 wt% og 0,72 wt% CO2 en økning på henholdsvis 4 % og 2 % sammenlignet med referansen, mens resepten tilsatt 1,08 wt% CO2 ikke viste noen endring. Ved 28 døgn herding var det ingen betydelig differanse mellom referansen og reseptene tilsatt CO2. Av resultatene presentert i *Figur 70* kan det ikke observeres noen klar sammenheng mellom tilsatt mengde CO2 og trykkfasthet.

Observasjonen av at referansen tilsatt minst CO₂ gir størst økning i trykkfasthet antas å være forårsaket av at nano-kalsiumkarbonat dannet ved reaksjonen mellom C₃S, C₂S og det karboniserte vannet er fint distribuert i sementpastaen, slik at det totale spesifikke overflatearealet økes, som videre vil fasilitere for dannelsen av C-S-H, som presentert i *Delkapittel 2.3*.

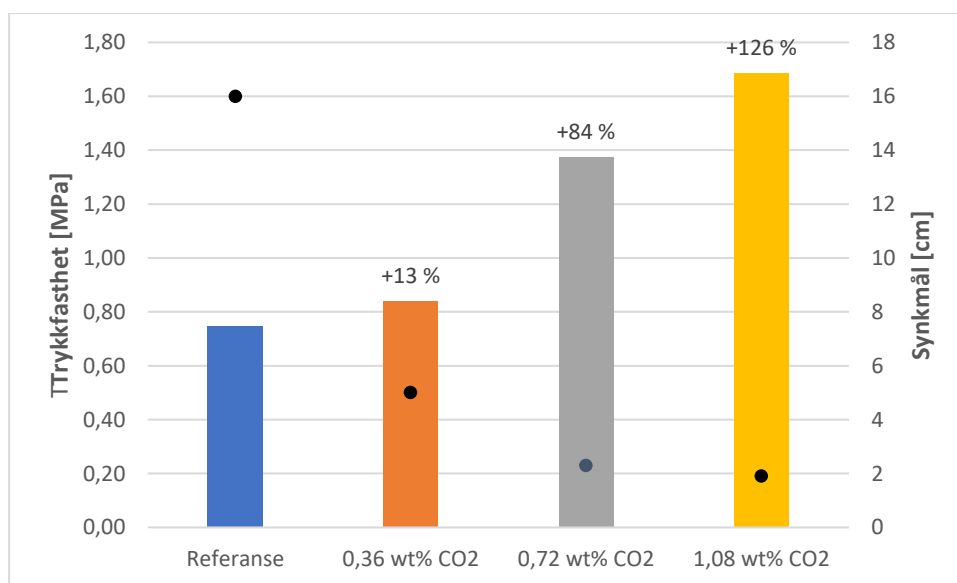
At de to reseptene tilsatt mest CO₂ (0,72 wt% og 1,08 wt%) oppnår noe lavere trykkfasthet kan derav forklares med at større mengder nano-kalsiumkarbonat ikke lenger vil finfordeles i sementpastaen, men klumper seg sammen. Dette vil igjen redusere det totale spesifikke overflatearealet og videre redusere antallet nye vekstområder for dannelsen av C-S-H, som presentert i *Delkapittel 2.3*. Lavere trykkfasthet ved de to reseptene tilsatt mest CO₂ kan også være forårsaket av at den tilsatte mengden CO₂ har vært høy nok til å hindre dannelsen av C-S-H som presentert i *Delkapittel 2.2*. Reseptene tilsatt mest CO₂ viste også en reduksjon i synkmålet sammenlignet med resepten tilsatt 0,36 wt% CO₂, presentert i *Delkapittel 4.2.1*, samtidig som de viste en økning i luftinnholdet sammenlignet med resepten tilsatt 0,36 wt% CO₂, presentert i *Delkapittel 4.2.3*. Begge disse faktorene vil også kunne føre til en reduksjon av trykkfastheten.

At samtlige resepter oppnår lavere trykkfasthet sammenlignet med referansen ved 1 døgn herding kan sees i sammenheng med den observerte reduksjonen i betongens varmeutvikling som videre har resultert i en lavere hydratasjonsgrad, presentert i *Delkapittel 4.2.4.2*.

Ved tidligere forskning med tilsetning av CO₂ i fersk betong er det observert en lignende fasthetsutvikling hvor differansen mellom referansen og resepter tilsatt CO₂ er minst ved 1 og 28 døgn, mens det er observert størst differanse ved 3 og 7 døgn, som presentert i *Delkapittel 2.7.1*. Ved disse forsøkene er det imidlertid observert en større økning i trykkfastheten, hvor den maksimale økningen var på mellom 10 % og 20 % for de fleste reseptene tilsatt CO₂.

At det ved tidligere forskning er observert en større økning av betongens trykkfasthet kan sees i sammenheng med den observerte reduksjonen av betongen synkmål, presentert i *Delkapittel 4.2.1*. Ved dette forsøket var reduksjonen i betongens synkmål større enn hva som er observert ved tidligere forskning. Dette vil videre gi en større reduksjon i betongens støpelighet og komprimerbarhet som høyst sannsynlig har gitt lavere trykkfasthet. Ved å se på standardavviket av trykkfastheten for de ulike reseptene kan man anslå hvorvidt utfordringer med betongens støpelighet og komprimerbarhet har fått konsekvens for trykkfastheten.

Standardavviket av trykkfastheten relatert til synkmålet for de ulike reseptene er presentert i *Figur 71*. Det presenterte standardavviket er et gjennomsnitt av standardavviket ved 1, 3, 7 og 28 døgner herding for 3 prøvestykker av hver resept. Samtlige resultater er presentert i *Vedlegg I*.



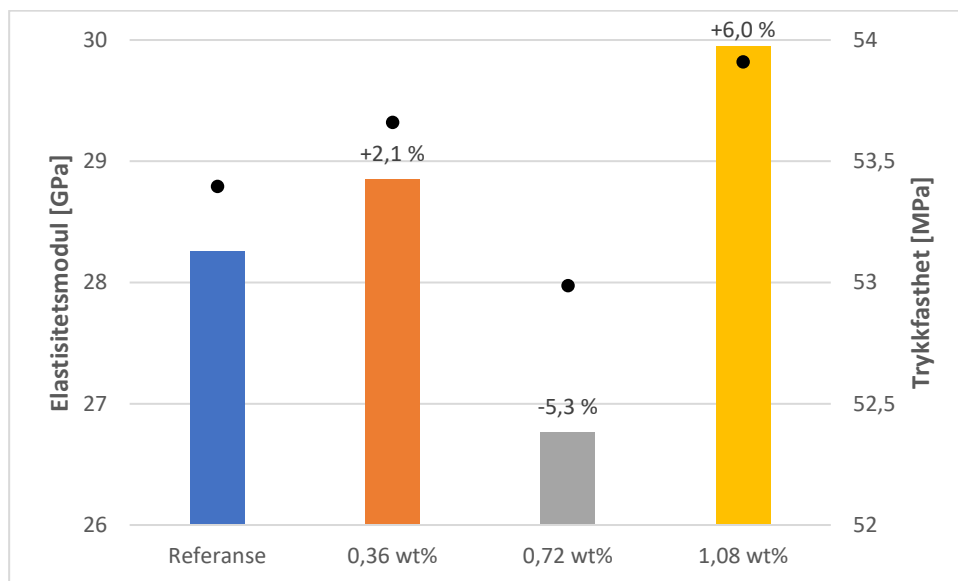
Figur 71. Standardavvik ved test av trykkfasthet

Som man kan se av *Figur 71* er det en sammenheng mellom standardavviket og synkmålet for hver av reseptene, hvor standardavviket øker i takt med redusert synkmål.

Basert på resultatene fra test av betongens trykkfasthet kan mindre tilsetning av CO₂ (0,36 wt%) i fersk betong gi en økning i betongens trykkfasthet. Samtidig oppnår samtlige resepter tilsatt CO₂ høyere trykkfasthet enn hva som kan forventes basert på observasjonen av redusert synkmål og økningen av luftinnhold. Utfordringer knyttet til reduksjon av betongens synkmål kan imidlertid se ut til å ha påvirket resultatenes validitet betraktelig.

4.3.2 Elastisitetmodul

Resultatene fra test av elastisitetmodul er presentert i *Figur 72*. Y-aksen viser elastisitetmodul i gigapascal (GPa). Prosentvis endring i elastisitetmodul sammenlignet med referansen er markert over de respektive søylene for hver av reseptene tilsatt CO₂. Trykkfastheten ved 28 døgn herding er illustrert med en svart markør, hvor den sekundære y-aksen viser trykkfasthet uttrykt i MPa. Det ble utført test av elastisitetmodul av et prøvestykke fra hver resept ved 28 døgn herding. Samtlige resultater er presentert i *Vedlegg J*.



Figur 72. Elastisitetmodul, resultater

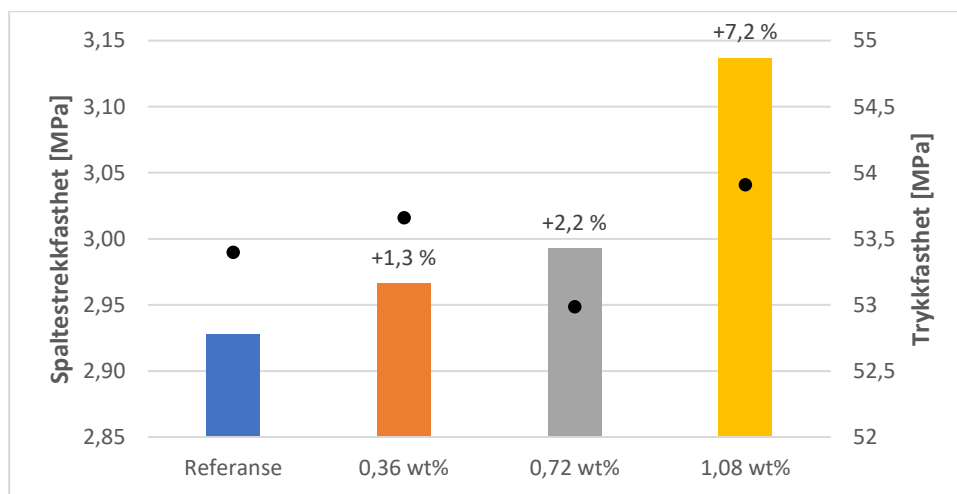
Som man kan se av *Figur 72* gir reseptene tilsatt 0,36 wt% og 1,08 wt% CO₂ en økning i elastisitetmodulen på henholdsvis 2,1 % og 6 %, sammenlignet med referansen, mens resepten tilsatt 0,72 wt% CO₂ viser en reduksjon på 5,3 %.

Som man kan se av *Figur 72* kan det se ut til å være en sammenheng mellom betongens elastisitetmodul og trykkfasthet, som viser at betongens elastisitetmodul er avhengig av betongens trykkfasthet og tilslagets elastisitetmodul, som presentert i *Delkapittel 2.7.2*.

Ved dette forsøket ble det imidlertid kun utført en test av elastisitetmodul for hver av reseptene. Det trengs derfor mer forskning for å kunne avgjøre hvordan tilsetningen av CO₂ påvirker betongens elastisitetmodul.

4.3.3 Spaltestrekkfasthet

Resultatene fra test av spaltestrekkfasthet er presentert i *Figur 73*. Y-aksen viser spaltestrekkfasthet uttrykt i MPa. Prosentvis endring i spaltestrekkfasthet sammenlignet med referansen er markert over de respektive søylene for hver av reseptene tilsatt CO₂. Trykkfastheten ved 28 døgn herding er illustrert med en svart markør, hvor den sekundære y-aksen viser trykkfasthet uttrykt i MPa. Det ble utført test av spaltestrekkfasthet av et prøvestykke fra hver resept ved 28 døgn herding. Samtlige resultater er presentert i *Vedlegg J*.



Figur 73. Spaltestrekkfasthet, resultater

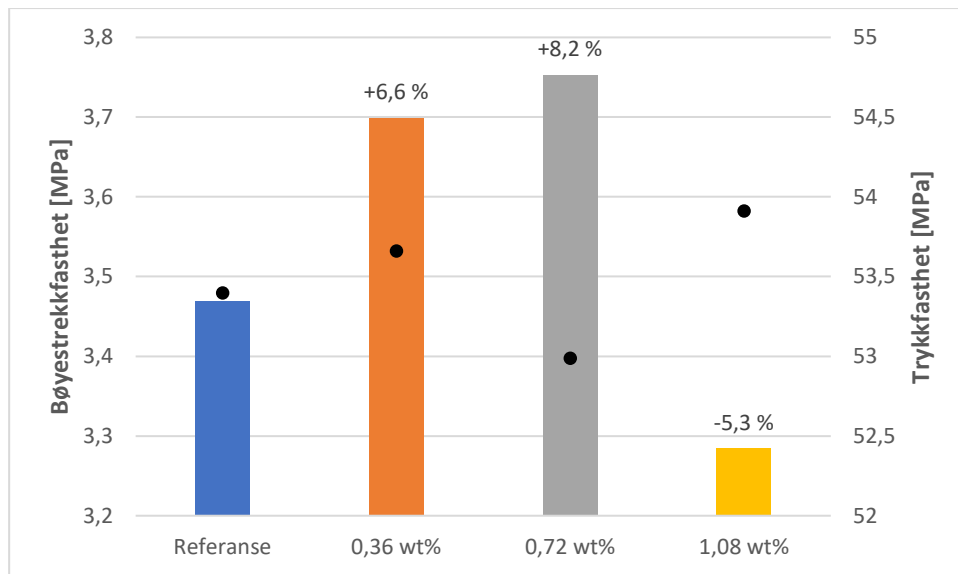
Fra *Figur 73* kan det observeres en sammenheng mellom tilsatt mengde CO₂ og spaltestrekkfasthet, hvor spaltestrekkfastheten øker med tilsatt mengde CO₂. Reseptene tilsatt 0,36 wt%, 0,72 wt% og 1,08 wt% CO₂ viser en økning på henholdsvis 1,3 %, 2,2 % og 7,2 % sammenlignet med referansen.

Som man kan se av *Figur 73* kan det se ut til å være sammenheng mellom betongens spaltestrekkfasthet og trykkfasthet, med unntak av resepten tilsatt 0,72 wt% CO₂. Dette antas å være et resultat av reduksjonen av synkmål, presentert i *Delkapittel 4.2.1*, da dette kan påvirke betongens komprimerbarhet som kan føre til varierende resultater. For alle reseptene er spaltestrekkfastheten 5,48 % - 5,82 % av trykkfastheten, noe som er forventet i henhold til teori presentert i *Delkapittel 2.7.3*.

Ved dette forsøket ble det imidlertid kun utført en test av spaltestrekkfasthet for hver av reseptene. Det trengs derfor mer forskning for å kunne avgjøre hvordan tilsetningen av CO₂ påvirker betongens spaltestrekkfasthet.

4.3.4 Bøyestrekfasthet

Resultatene fra test av bøyestrekfasthet er presentert i *Figur 74*. Y-aksen viser bøyestrekfasthet uttrykt i MPa. Prosentvis endring i bøyestrekfasthet sammenlignet med referansen er markert over de respektive søylene for hver av reseptene tilsatt CO₂. Det ble utført test av bøyestrekfasthet av et prøvestykke fra hver resept ved 28 døgner herding. Samtlige resultater er presentert i *Vedlegg J*.



Figur 74. Bøyestrekfasthet, resultater

Som man kan se av *Figur 74* gir reseptene tilsatt 0,36 wt% og 0,72 wt% CO₂ en økning i bøyestrekfastheten på henholdsvis 6,6 % og 8,2 %, sammenlignet med referansen, mens resepten tilsatt 1,08 wt% CO₂ viser en reduksjon på 5,3 %. Som man kan se av *Figur 73* er det ingen sammenheng mellom bøyestrekfasthet og trykkfasthet. For alle reseptene er bøyestrekfastheten 6,1 % - 7,1 % av trykkfastheten,

Ved tidligere forskning er det observert en lignende utvikling ved direkte tilsetning av nano-kalsiumkarbonat hvor spaltestrekfastheten økte ved 1 wt% nano-kalsiumkarbonat, mens høyere doseringsmengder reduserte bøyestrekfasthet sammenlignet med referansen, presentert i *Delkapittel 2.7.4*.

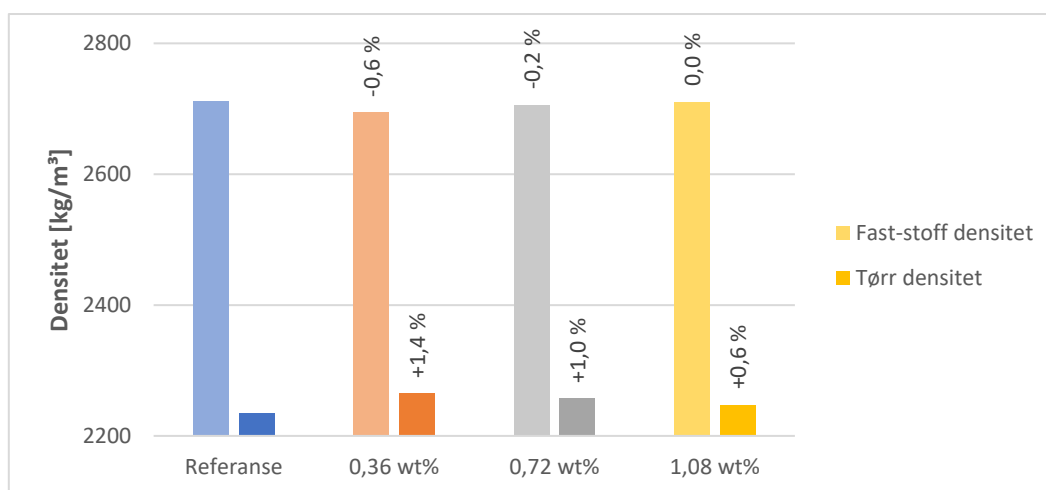
At de to referansene tilsatt minst CO₂ gir størst økning i bøyestrekfasthet antas å være forårsaket av at dannet nano-kalsiumkarbonat er fint distribuert i sementpastaen, som videre vil fasilitere for dannelsen av C-S-H, mens reduksjon av bøyestrekfasthet ved resepten tilsatt mest CO₂ kan være forårsaket av at større mengder nano-kalsiumkarbonat vil klumpe seg sammen og redusere antallet nye vekstområder for dannelsen av C-S-H, som presentert i *Delkapittel 2.3*. Samtidig viste resepten tilsatt mest CO₂ høyest spaltestrekfasthet, presentert i *Delkapittel 4.3.3*. Den observerte reduksjonen i bøyestrekfasthet skyldes derfor mest sannsynlig reduksjonen av synkmål, presentert i *Delkapittel 4.2.1*, da dette kan ha påvirket betongens komprimerbarhet og medført varierende resultater.

Ved dette forsøket ble det imidlertid kun utført en test av bøyestrekfasthet for hver av reseptene. Det trengs derfor mer forskning for å kunne avgjøre hvordan tilsetningen av CO₂ påvirker betongens bøyestrekfasthet.

4.3.5 Densitet og porøsitet – PF-metoden

4.3.5.1 Densitet

Resultatene fra test av densitet i herdet betong er presentert i *Figur 75*. Y-aksen viser tørr densitet og fast-stoff densitet i kg/m^3 . Prosentvis endring i densitet sammenlignet med referansen er markert over de respektive søylene for hver av reseptene tilsatt CO_2 . Det ble utført test av tre prøvestykker fra hver resept hvor de presenterte resultatene er et gjennomsnitt av disse tre prøvestykkene. Samtlige resultater er presentert i *Vedlegg K*.



Figur 75. Densitet av herdet betong

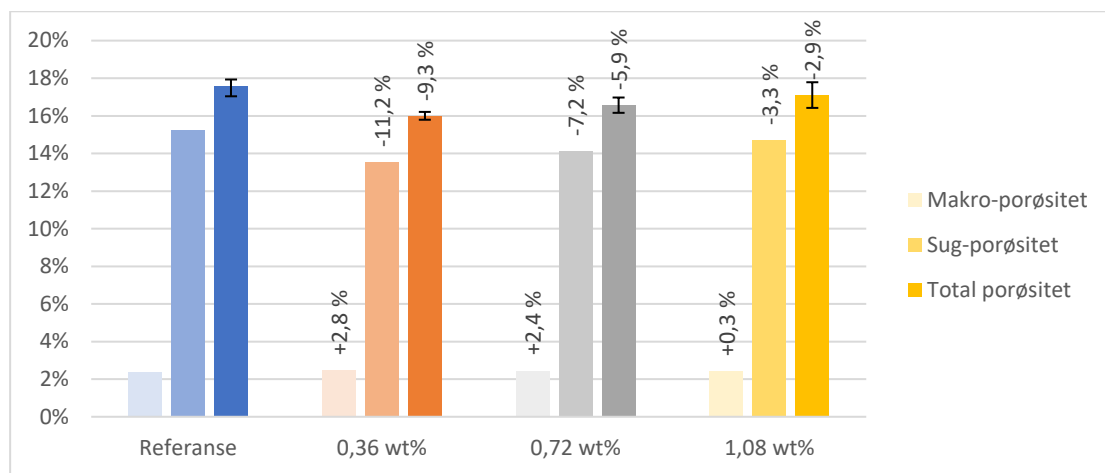
Av *Figur 75* kan det observeres en sammenheng mellom tørr densitet, fast-stoff densitet og tilsatt mengde CO_2 , hvor differensen er størst for resepten tilsatt 0,36 wt% CO_2 og avtar ved høyere dosering av CO_2 . Den observerte endringen i tørr densitet og fast-stoff densitet antas å ikke være av betydning for betongens mekaniske egenskaper.

Den observerte økningen i tørr densitet er antatt å være forårsaket av at nano-kalsiumkarbonat dannet ved reaksjonen med CO_2 har større spesifikt overflateareal som resulterer i høyere vannabsorpsjon. Dette vil redusere mengden fritt vann i betongen slik at det dannes færre kapillærporer, etter hvert som vannet fordamper, som presentert i *Delkapittel 2.7.5*. Dette vil også forklare den observerte reduksjonen i fast-stoff densitet da absorpsjonen av fritt vann vil redusere fast-stoff densiteten, da vann har lavere densitet (1000 kg/m^3).

At differansen fra referansen avtar ved høyere doseringer av CO_2 er antatt å være forårsaket av at økt forekomst av nano-kalsiumkarbonat har ført til at partiklene har klumpet seg sammen som reduserer det totale spesifikke overflatearealet, som presentert i *Delkapittel 2.3*.

4.3.5.2 Porøsitet

Resultatene fra test av betongens porøsitet er presentert i *Figur 76*. Y-aksen viser porøsitet, X-aksen viser makro-porøsitet, sug-porøsitet og total porøsitet for de ulike reseptene. Prosentvis endring i porøsitet sammenlignet med referansen er markert over de respektive søylene for hver av reseptene tilsatt CO₂. Det ble utført tre tester fra hver resept hvor de presenterte resultatene er et gjennomsnitt av disse tre testene. Brakettene viser variasjonen i total porøsitet mellom de tre prøvestykkene for hver resept. Samtlige resultater er presentert i *Vedlegg K*.



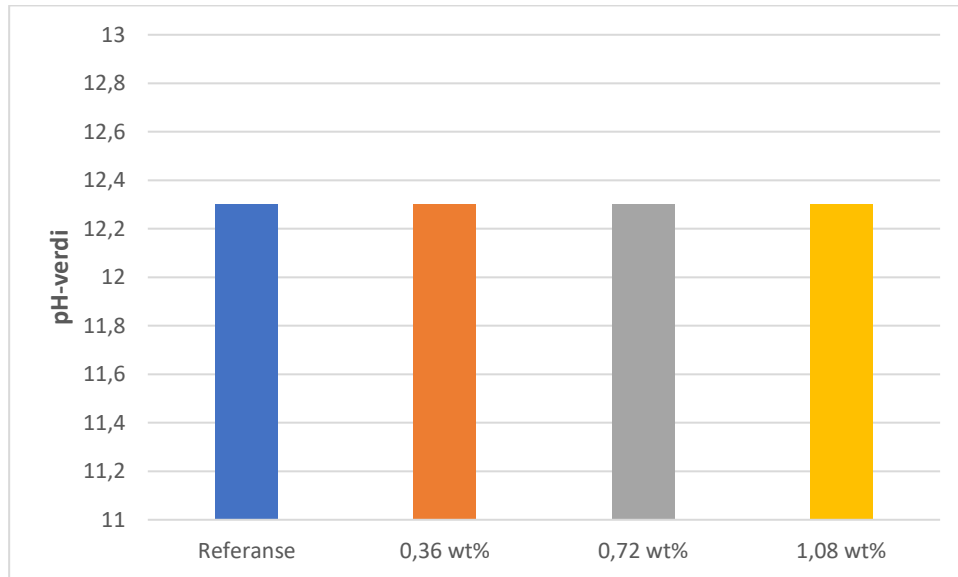
Figur 76. Porøsitet

Som man kan se av *Figur 76* er det en sammenheng mellom betongens porøsitet og tilsatt mengde CO₂, hvor makro-porøsiteten er noe høyere for resepter tilsatt CO₂, mens sug-porøsiteten er betraktelig lavere for resepter tilsatt CO₂. Disse effektene er størst for resepten tilsatt 0,36 wt% CO₂ og avtar ved høyere dosering av CO₂. Som man se av *Figur 76* er den totale porøsiteten redusert ved samtlige resepter tilsatt CO₂. Betongens porøsitet er et tegn på betongens hydrasjonsgrad og mengden fritt vann i betongen. Dette vil igjen kunne resultere i høyere densitet som presentert i *Delkapittel 4.3.5.1*, og høyere trykkfasthet som presentert i *Delkapittel 4.3.1*.

Den observerte endringen i sug-porøsitet er antatt å være forårsaket av dannelsen av nano-kalsiumkarbonat som gir økt vannabsorpsjon. Dette vil redusere mengden fritt vann i betongen slik at det blir dannet færre kapillærporer som resulterer i redusert sug-porøsitet. presentert i *Delkapittel 2.7.5*. Dette vil også forklare økningen av makroporøsitet, da fritt vann absorbert av nano-kalsiumkarbonat senere vil fordampe som resulterer i luft/makroporer som øker makroporøsiteten.

4.3.6 pH-verdi

Resultatene fra test av pH-verdi i den herdede betongen er presentert i *Figur 77*. Y-aksen viser pH-verdi. Det ble tatt ut betongstøv fra 3 terninger av hver resept etter 28 døgn herding. Betongstøvet ble samlet før det ble utført en test fra hver resept. Samtlige resultater er presentert i *Vedlegg L*.



Figur 77. pH-verdi, resultater

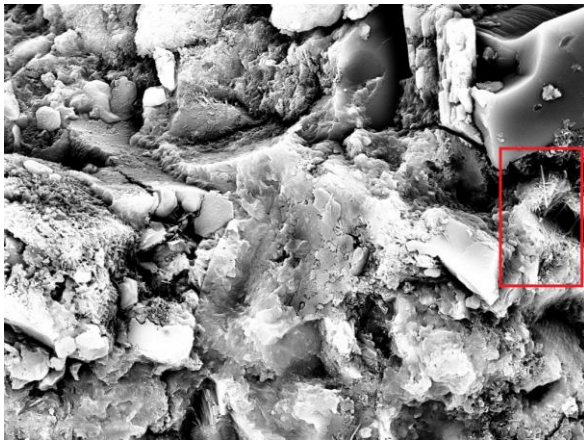
Som man kan se av *Figur 77* var pH-verdien i samtlige resepter lik 12,3.

Resultatene kan tyde på at den tilsatte mengden CO₂ har reagert med C₃S og C₂S, og resultert i dannelsen kalsiumkarbonat, slik at det sannsynligvis ikke er igjen CO₂ som senere har resultert i karbonatisering av den herdede betongen, med påfølgende reduksjon av pH-verdien. Resultatene var som forventet basert på teori presentert i *Delkapittel 2.7.6*.

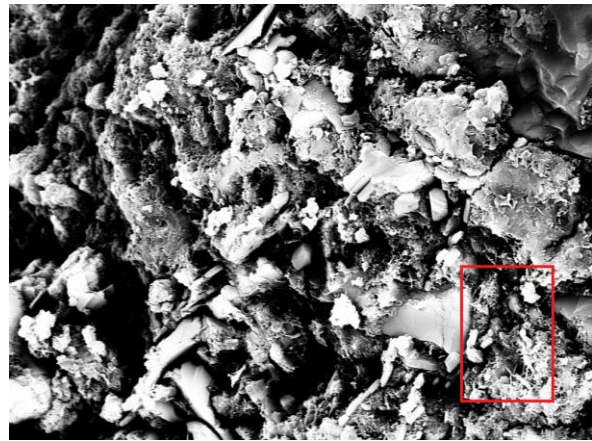
4.4 CO₂ sin effekt på betongens mikrostruktur

4.4.1 SEM – Skanningelektronmikroskop

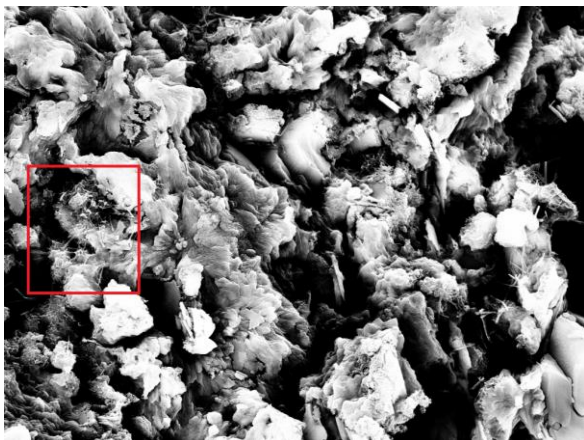
Resultatene fra SEM for reseptene tilsatt 0 wt%, 0,36 wt%, 0,72 wt% og 1,08 wt% er presentert i *Figur 78, 79, 80 og 81*. SEM ble utført ved 28 døgnet, med 10.000 ganger forstørrelse av bruddoverflaten til prøvestykkene. Den røde markering i de ulike bildene viser den karakteristiske nålformede C-S-H strukturen. Samtlige resultater er presentert i *Vedlegg M*.



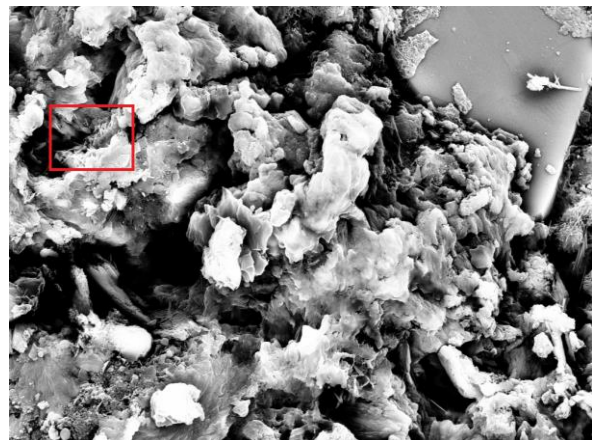
Figur 78. SEM, referanse



Figur 79. SEM, 0,36 wt% CO₂



Figur 80. SEM, 0,72 wt% CO₂



Figur 81. SEM, 1,08 wt% CO₂

Ved tidligere forskning er det ved tilsetning av CO₂ observert at reseptene tilsatt CO₂ har en finere overflatestruktur, bestående av mindre partikler enn referansen, som presentert i *Delkapittel 2.8*. Ved dette forsøket kan ikke det observeres noen signifikant endring. Dette antas å være forårsaket av at det er tilsatt relativt små mengder CO₂. Samtidig ble det ved dette forsøket, i motsetning til tidligere forsøk, benyttet tilslag i reseptene. Dette gjør at det observeres en mindre andel sementkorn og C-S-H i bruddoverflaten.

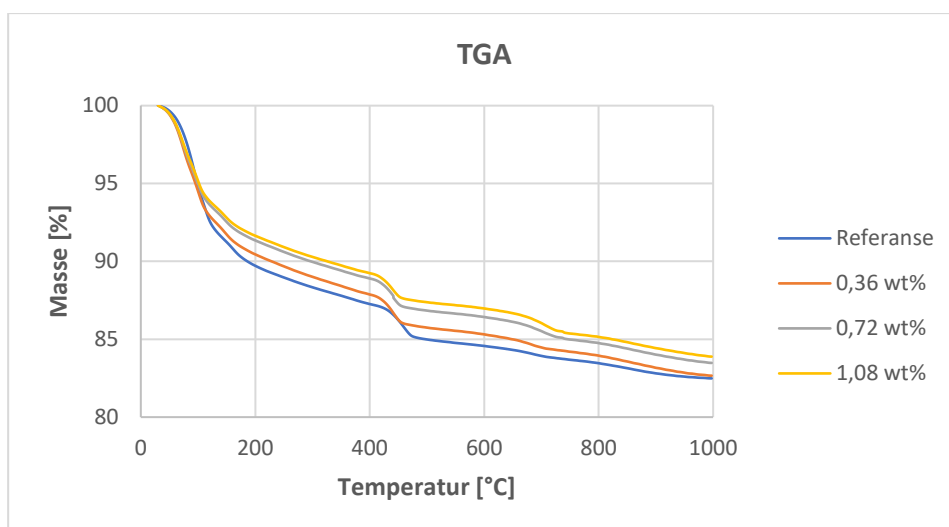
Ved tidligere forsøk med direkte tilsetning av nano-kalsiumkarbonat er det observert at C-S-H er dannet fra et senter i reseptene tilsatt nano-kalsiumkarbonat, som presentert i *Delkapittel 2.8*. Dette samme kan ikke observeres ved dette forsøket, da den nålformede C-S-H strukturen ser ut til å være dannet tilfeldig. Det antas at også mangelen på denne observasjonen skyldes bruk av tilslag som gjør at det observeres en mindre andel sementkorn og C-S-H i bruddoverflaten.

Av resultatene kan det ikke observeres nano-kalsiumkarbonat på overflaten i noen av reseptene. Dette antas å være et resultat av det er tilsatt relativt små mengder med CO₂ som videre resulterer i at det dannes små mengder med nano-kalsiumkarbonat (ca. 1 wt%).

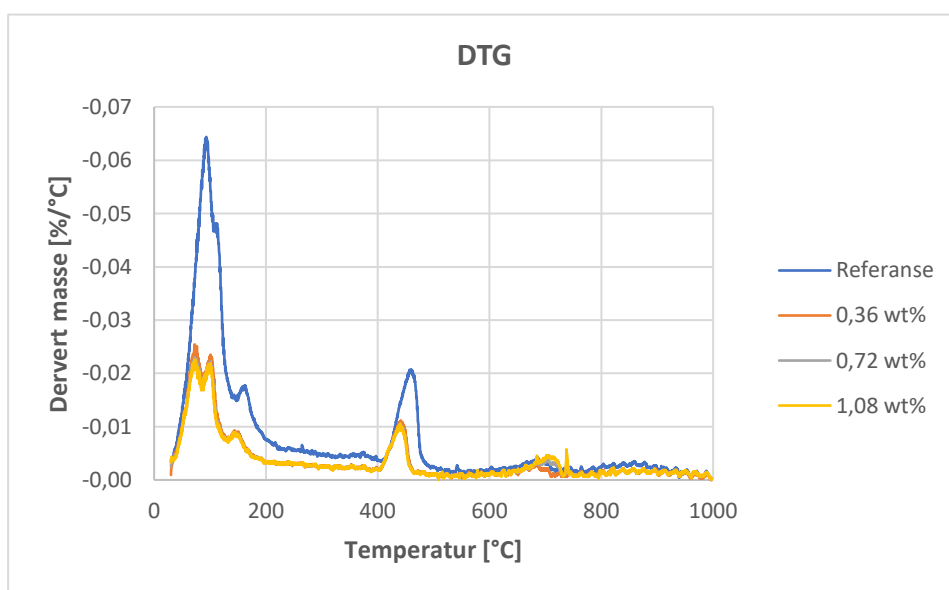
4.5 CO₂ sin effekt på betongens kjemiske sammensetting

4.5.1 TGA – Termogravimetrisk analyse

Resultatene fra den termogravimetriske analysen er presentert i *Figur 82 og 83*. I *Figur 82* viser y-aksen massen i av prøvematerialet i prosent, x-aksen viser temperaturen i celsius. De ulike kurvene viser massetapet til de forskjellige referansene gjennom oppvarmingsprosessen. I *Figur 83* vises den deriverte av Figur 82, hvor y-aksen viser massetap i prosent per celsius og x-aksen viser temperatur. Det ble utført to termogravimetriske analyser av de forskjellige reseptene ved 28 døgn, hvor de presenterte kurvene er gjennomsnittet av de to prøvene. Samtlige resultater er presentert i *Vedlegg N*.



Figur 82. Termogravimetrisk analyse, TGA, resultater

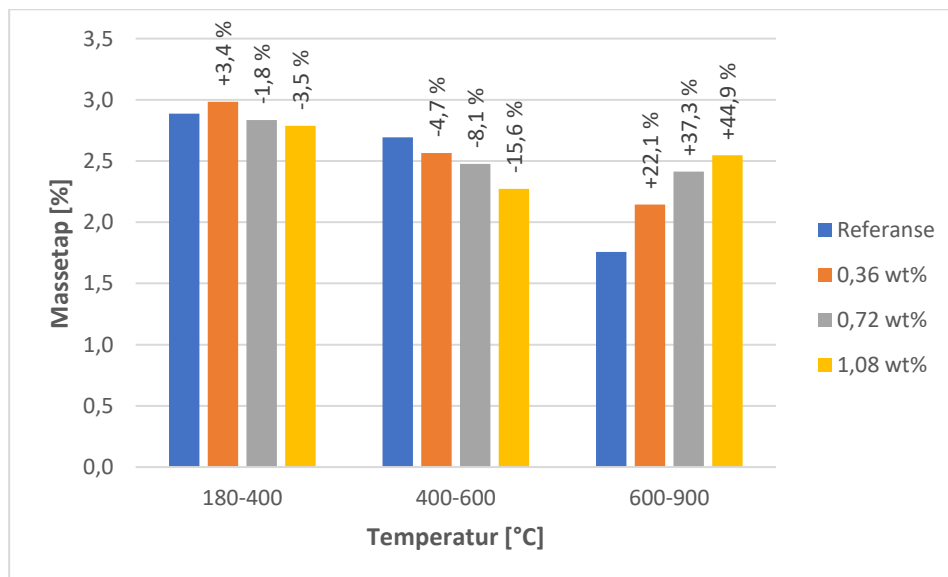


Figur 83. Termogravimetrisk analyse, DTG, resultater

Som man kan se av *Figur 82* er det en sammenheng mellom mengden tilsatt CO₂ og massetap, hvor referansen viser et totalt massetap lik 17,5 %, mens resepten tilsatt mest CO₂ viser et massetap lik 16,1 %. Av *Figur 83* kan det observeres en betydelig differanse mellom referansen og reseptene tilsatt CO₂, hvor referansen har størst massetap av samtlige resepter i området 0-190 °C og i området 400-470 °C, mens reseptene tilsatt CO₂ ser ut til å ha et høyere massetap rundt 700 °C.

Frem til 180 °C oppløses fritt vann i betongen, dette tyder på at referansen har en større mengde fritt vann enn reseptene tilsatt CO₂, som antas å være forårsaket av økt porøsitet, presentert i *Delkapittel 4.3.5.1*. I området 400-600 °C dehydreres C-H, noe som tyder på at det er dannet mer C-H i referansen enn i reseptene tilsatt CO₂. Det økte massetapet til reseptene tilsatt CO₂ rundt 700 °C viser dannelsen av kalsiumkarbonat, da kalsiumkarbonat dekarboneres i området 600-900 °C.

Figur 84 viser massetapet i intervallene 180-400 °C, 400-600 °C og 600-900 °C. Prosentvis endring i massetap sammenlignet med referansen er markert over de respektive søylene for hver av reseptene tilsatt CO₂.



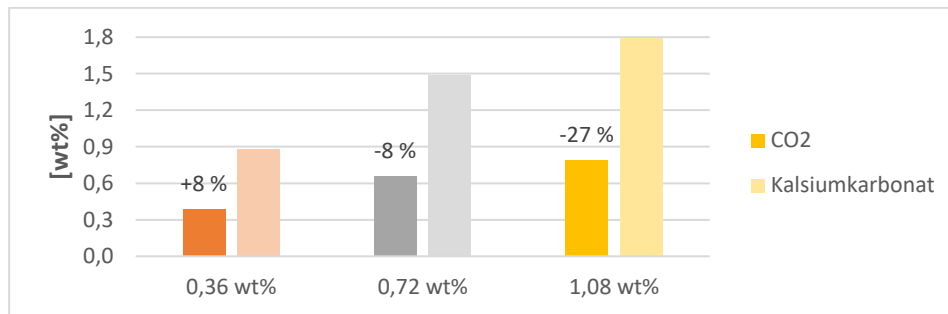
Figur 84. Massetap i ulike temperaturintervaller

Som man kan se av *Figur 84* er det en sammenheng mellom mengden tilsatt CO₂ og massetapet i de ulike temperaturintervallene. I intervallet 180-400 °C vil majoriteten av C-S-H i betongen nedbrytes. Dette tyder på at det er dannet mer C-S-H i resepten tilsatt 0,36 wt% CO₂. Dette kan forklares med at nano-kalsiumkarbonat dannet ved reaksjonen mellom C₃S, C₂S og det karboniserte vannet har økt det totale spesifikke overflatearealet som har skapt nye vekstområder for dannelsen av C-S-H. Dette vil også kunne forklare observasjonene av forbedrede mekaniske egenskaper, presentert i *Delkapittel 4.3.1-4.3.4*. Reduksjonen av C-S-H i de to reseptene tilsatt mest CO₂ er videre antatt å være forårsaket av at nano-kalsiumkarbonat dannet ved reaksjonen mellom C₃S, C₂S og det karboniserte vannet har klumpet seg sammen som har redusert det totale spesifikke overflatearealet slik at antallet vekstområder for dannelsen av C-S-H reduseres. Den reduserte mengden C-S-H i de to reseptene tilsatt mest CO₂ kan også være forårsaket av at den tilsatte mengden CO₂ har vært høy nok til å hindre dannelsen av C-S-H som presentert i *Delkapittel 2.2*.

I intervallet 400-600 °C vil C-H dehydratiseres. Som man kan se av *Figur 84* reduseres mengden C-H med økt mengde tilsatt CO₂. Dette er forårsaket av reaksjonen mellom C₃S, C₂S og det karboniserte vannet, da dette resulterer i dannelsen av kalsiumkarbonat fremfor C-H, som presentert i *Delkapittel 2.2*. Reduksjonen av C-H vil videre medføre at betongen blir mer motstandsdyktig mot karbonatisering

I intervallet 600-900 °C vil kalsiumkarbonat dekarboneres. Som man kan se av *Figur 84* øker mengden kalsiumkarbonat med økt mengde tilsatt CO₂. Dette oppstår som et resultat av reaksjonen mellom C₃S, C₂S og det karboniserte vannet hvor kalsiumkarbonat dannes. Som man kan se av *Figur 84* har også referansen uten tilsatt CO₂, et massetap i dette intervallet. Dette antas å være forårsaket av videre nedbrytning av C-S-H, da C-S-H nedbrytes fullstendig i intervallet 105-1000 °C, selv om majoriteten nedbrytes i intervallet 180-400 °C.

Figur 85 viser andelen CO₂ og andelen kalsiumkarbonat i de ulike reseptene tilsatt CO₂, beregnet etter metode presentert i *Delkapittel 3.4.4.1*. Y-aksen viser vektprosent av sementvekt. Prosentvis endring i andel CO₂ sammenlignet med tilsatt mengde CO₂ er markert over de respektive søylene for hver av reseptene.



Figur 85. Andel CO₂/Kalsiumkarbonat, resultater

Som man kan se av *Figur 85* økes andelen CO₂ og kalsiumkarbonat med økt mengde tilsatt CO₂. I resepten tilsatt 0,36 wt% CO₂, er andelen CO₂ høyere enn den tilsatte mengden CO₂, dette antas å være forårsaket av at det i denne resepten er dannet mer C-S-H, som senere nedbrytes i intervallet 600-900 °C. Dette vil også være gjeldende for reseptene tilsatt 0,72 wt% og 1,08 wt% CO₂, hvor andelen CO₂ vil være noe lavere enn i realiteten da det i disse reseptene ble dannet mindre C-S-H enn i referansen. Differansen ansees allikevel ikke som signifikant da differansen i dannet C-S-H er mellom -3,5 % og 3,4 % sammenlignet med referansen.

Som man kan se av *Figur 85* reduseres mengden reaktiv CO₂ med økende mengde tilsatt CO₂. Referansen tilsatt minst CO₂ viser at nær hele den tilsatte mengden CO₂ har vært reaktiv, mens de to reseptene tilsatte 0,72 wt% og 1,08 wt% CO₂ viser at henholdsvis 92% og 73 % av den tilsatte mengden CO₂ har reagert med den ferske betongen- Dette kan tyde på at det eksisterer en grense for hvor mye CO₂ som kan bindes opp i betongen.

Videre kan man se av *Figur 85* at andelen kalsiumkarbonat for reseptene tilsatt 0,36 wt%, 0,72 wt% og 1,08 wt% CO₂ er henholdsvis 0,88 wt%, 1,49 wt% og 1,79 wt%. Som presentert i *Delkapittel 4.3* er det vist at resepten tilsatt 0,36 wt% CO₂ gir størst forbedring av betongens herdede egenskaper, dette korresponder med tidligere forskning angående direkte tilsetning av nano-kalsiumkarbonat, da denne resepten med 0,88 wt% nano-kalsiumkarbonat er nærmest det som tidligere er observert som optimal dosering (1 wt% nano-kalsiumkarbonat), som presentert i *Delkapittel 2.3*.

4.6 Videre forskning

I dette delkapittelet presenteres forslag til videre forskning basert på oppdagelser gjort underveis i prøveprogrammet.

- Øke doseringen av superplastiserende tilsetningsstoff for å oppnå samme støpelighet ved resepter tilsatt CO₂, med den hensikt å kunne observere en større effekt av CO₂ på betongens herdede egenskaper.
- Utføre prøveprogram med lavere doseringer av CO₂, med den hensikt å kunne observere optimal dosering av CO₂.
- Test av betongens temperaturutvikling/varmeutvikling umiddelbart etter tilsetning av CO₂ og med kortere intervall mellom temperaturlogging.
- Utføre test av elastisitetsmodul, spaltestrekkfasthet og bøyestrekfasthet med flere prøvestykker for å avgjøre effekten av å tilsette CO₂.
- Utføre test av trykkfasthet ved 56, 90 og 180 døgn herding.
- Gjennomføre termogravimetrisk analyse ved ulike tidspunkt tidlig i hydrasjonsforløpet for å undersøke utviklingen av C-S-H og kalsiumkarbonat i betongen.
- Undersøke hvordan tilsetningen av CO₂ påvirker betong tilsatt pozzolan.

5 Konklusjon

Gjennom prøveprogrammet er effekten av å tilsette CO₂ i fersk betong blitt observert og kvantifisert. Generelt er det observert store differanser i betongens ferske egenskaper og kjemiske sammensetting og mindre differanser i betongen herdede egenskaper og mikrostruktur. Konklusjonene fra den utførte forskningen er organisert og presentert i henhold til oppgavens mål.

1. CO₂ sin effekt på betongens ferske egenskaper

Det er vist at betongens støpelighet (synkmål) reduseres med økende mengde tilsatt CO₂. Reduksjonen av betongens støpelighet medfører at konsistensen til de to reseptene tilsatt mest CO₂ kan betegnes som stiv plastisk. Tilsetningen av CO₂ hadde ingen observerbar effekt på betongens ferske densitet. Luftinnholdet i betongen korrelerte med betongens støpelighet, og det kan ikke vises at tilsetningen av CO₂ har hatt noen effekt på betongens luftinnhold. Betongens varmeutvikling reduseres ved tilsetning av CO₂, samtidig som tilsetningen av CO₂ har medført et retardert hydrasjonsforløp. Det er observert en umiddelbar økning i betongens temperatur rett etter blanding som korrelerer med mengden tilsatt CO₂.

2. CO₂ sin effekt på betongens herdede egenskaper

Resultatene viser at tilsetningen av CO₂ medfører en reduksjon av betongens trykkfasthet etter 1 døgn. Ved 3 og 7 døgn er trykkfastheten økt ved samtlige resepter tilsatt CO₂, hvor den største økningen var 6 % sammenlignet med referansen. Ved 28 døgn viser ingen av reseptene tilsatt CO₂ noen signifikant differanse sammenlignet med referansen. Av reseptene tilsatt CO₂ oppnådde resepten tilsatt minst CO₂ høyest trykkfasthet. For de ulike reseptene korrelerte elastisitetsmodulen med trykkfastheten, og det kan ikke observeres at tilsetningen av CO₂ har hatt noen effekt på betongens elastisitetsmodul. Det er observert at spaltestrekkfasthet øker med økt mengde tilsatt CO₂, hvor resepten tilsatt mest CO₂ viste en økning på 7,2 % sammenlignet med referansen. Det er observert at bøyestrekkfasthet øker for de to reseptene tilsatt minst CO₂, hvor økningen tilsvarer henholdsvis 6,6 % og 8,2 %. Resepten tilsatt mest CO₂ viste en reduksjon i bøyestrekkfasthet på 5,3 %.

Tilsetningen av CO₂ viser ingen observerbar effekt på betongens herdede densitet. Betongens sug-porøsitet reduseres ved tilsetning av CO₂, samtidig som makro-porøsiteten økes til en viss grad. Disse effektene var størst ved resepten tilsatt minst CO₂ hvor den totale porøsiteten ble redusert med 9,3 %. Tilsetningen av CO₂ viste ingen effekt på pH-verdien i den herdede betongen.

3. CO₂ sin effekt på betongens mikrostruktur

Det kan ikke observeres at tilsetningen av CO₂ har hatt noen effekt på betongens mikrostruktur.

4. CO₂ sin effekt på betongens kjemiske sammensetting

Det er observert en større dannelse av C-S-H i resepten tilsatt minst CO₂. Samtidig er det observert at det dannes minst C-S-H i de to reseptene tilsatt mest CO₂. Det er videre vist at mengden C-H reduseres med økt mengde tilsatt CO₂. Det er også vist at det dannes mer kalsiumkarbonat med økt mengde tilsatt CO₂. Det er vist en sammenheng mellom tilsatt mengde CO₂ og andel oppbundet CO₂ i de ulike reseptene, hvor det i resepten tilsatt minst CO₂ ble bundet opp størst andel av den tilsatte mengden, mens resepten tilsatt mest CO₂ hadde bundet opp minst CO₂ av den tilsatte mengden.

Referanser

- [1] Klima- og miljødepartementet, «Klimaloven,» 16 Juni 2017. [Internett]. Available: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2017-06-16-60>. [Funnet 13 Mars 2020].
- [2] Statistisk sentralbyrå, «Norges utslipp,» 1 November 2019. [Internett]. Available: <https://energiogklima.no/klimavakten/norges-utslipp/>. [Funnet 13 Mars 2020].
- [3] Byggnæringens Landsforening, «Bygg- og anleggssektorens klimagassutslipp,» 14 Mai 2019. [Internett]. Available: https://www.bnl.no/siteassets/dokumenter/rapporter/klimautslipp_bae_2019.pdf. [Funnet 13 Mars 2020].
- [4] UNEP, "Greening Cement Production has a Big Role to Play in Reducing Greenhouse Gas Emissions," 1 November 2010. [Online]. Available: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8832/GreeningCementProductionhasaBigRoletoPlayinReducingGreenhouseGasEmissions.pdf?sequence=3&%3BisAllowed=>. [Accessed 13 Mars 2020].
- [5] E. J. Sellevold, «Chapter 6 - Hydration,» i *TKT 4215 Concrete Technology 1*, 2014, pp. 6-6.
- [6] E. J. Sellevold, «Chapter 6 - Hydration,» i *TKT 4215 Concrete Technology 1*, 2014, pp. 6-3.
- [7] E. J. Sellevold, «Chapter 6 - Hydration,» i *TKT 4215 Concrete Technology 1*, 2014, pp. 6-7.
- [8] E. J. Sellevold, «Chapter 6 - Hydration,» i *TKT 4215 Concrete Technology 1*, 2014, pp. 6-4.
- [9] R. L. Berger, J. F. Young og K. Leung, «Acceleration of Hydration of Calcium Silicates by Carbon-Dioxide Treatment,» *Nature: Physical Science*, vol. 240, pp. 16-18, 1972.
- [10] C. J. Goodbrake, J. F. Young og R. L. Berger, «Reaction of Beta-Dicalcium Silicate and Tricalcium Silicate with Carbon Dioxide and Water Vapor,» *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 62, pp. 168-171, 1979.
- [11] A. Marries, «The Activation of Portland Cement by Carbon-Dioxide,» i *Conference in Cement and Concrete Science*, University of Oxford, 1992.
- [12] D. R. Moorehead, «Cementation by the carbonation of hydrated lime,» *Cement and Concrete Research*, vol. 16, pp. 700-708, 1986.
- [13] S. Kashaf-Haghighi og S. Ghoshal, «CO₂ Sequestration in Concrete through Accelerated Carbonation Curing in a Flow-through Reactor,» *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, pp. 1143-1149, 2010.
- [14] S. Goto, K. Suenaga, T. Kado og M. Fukuhara, «Calcium Silicate Carbonation Products,» *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 78, pp. 2867-2872, 1995.

- [15] S. Monkman, P. A. Kenward, G. Dipple, M. MacDonald og M. Raudsepp, «Activation of cement hydration with carbon dioxide,» *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, vol. 7, pp. 160-181, 2018.
- [16] J. Silvestre, N. Silvestre og J. de Brito, «Review on concrete nanotechnology,» *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 20, pp. 1-31, 2014.
- [17] K. Sobolev, «Nanotechnology and Nanoengineering of Construction Materials,» i *Nanotechnology in Construction*, 2015, pp. 3-13.
- [18] T. Sato og F. Diallo, «Seeding Effect of Nano-CaCO₃ on the Hydration of Tricalcium Silicate,» *Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2141, pp. 61-67, 2010.
- [19] L. Guhua, «Effect of nano-materials on durability of concrete,» Doktorgradsavhandling, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 2006.
- [20] Z. Ge, K. Wang, R. Sun, D. Huang og Y. Hu, «Properties of self-consolidating concrete containing nano-CaCO₃,» *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, vol. 3, pp. 191-200, 2014.
- [21] J. Kwasny, M. Basheer og M. I. Russel, «CO₂ Sequestration in Cement-Based Materials During Mixing Process Using Carbonated Water and Gaseous CO₂,» i *International Conference on the Durability of Concrete Structures*, Purdue University, 2014.
- [22] Y. Wang, F. He og L. Yang, «Influence of dry ice on the performance of Portland cement and its mechanism,» *Construction and Building Materials*, vol. 188, pp. 898-904, 2018.
- [23] «CO₂ phase diagram,» [Internett]. Available: https://stevengoddard.files.wordpress.com/2010/09/co2_phase_diagram.gif.
- [24] «Mollier Chart CO₂,» [Internett]. Available: http://www.chemicallogic.com/Documents/co2_mollier_chart_met.pdf.
- [25] S. Monkman, «Carbon Dioxide Utilization in Fresh Industrially Produced Ready Mixed Concrete,» i *International Concrete Sustainability Conference*, 2014.
- [26] S. Monkman, M. MacDonald og R. Hooton, «Using Carbon Dioxide as a Beneficial Admixture in Ready-Mix Concrete,» i *International Concrete Sustainability Conference*, 2015.
- [27] X. Liu, L. Chen, A. Liu og X. Wang, «Effect of Nano-CaCO₃ on Properties of Cement Paste,» i *International Conference on Future Energy, Environment, and Materials*, 2012.
- [28] M. Maage, «8.5 Betongens stivhet - elastisitetsmodul,» i *Betong - regelverk, teknologi og utførelse*, Byggnæringens Forlag, 2015, pp. 200-201.
- [29] M. Maage, «8.4 Strekkfasthet, bøyestrekfasthet og skjærfasthet,» i *Betong - regelverk, teknologi og utførelse*, Byggnæringens Forlag, 2015, pp. 198-199.
- [30] E. J. Sellevold, «Chapter 8 - Porosity, pore structure,» i *TKT 4215 Concrete Technology 1*, 2014, pp. 8-3.

- [31] J. I. Osayi, S. Iyuke, M. O. Daramola, P. Osifo, I. J. Van Der Walt og S. E. Ogbeide, «Evaluation of pyrolytic oil from used tires and natural rubber (*Hevea brasiliensis*),» *Chemical Engineering Communications*, vol. March, 2018.
- [32] Vidya og S. Rao, «THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS OF CONCRETE,» *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*, 2019.
- [33] A. Sarkar, S. D. Sarkar, M. Langanki og R. Chowdhury, «Studies on Pyrolysis Kinetic of Newspaper,» *Journal Energy*, vol. 2015, 2015.
- [34] E. Sellevold, «Chapter 14 - Permeability, moisture condition,» i *TKT 4215 Concrete Technology 1*, 2015, pp. 14-6.

Figurliste

Figur 1. Oversikt over oppgaven	3
Figur 2. Den akselerende effekten av tilsetning av nano-kalsiumkarbonat [18]	8
Figur 3. Fasediagram for CO ₂ [23].....	9
Figur 4. Mollier-diagram CO ₂ [24].....	10
Figur 5. Ferske egenskaper i betong tilsatt CO ₂ [25]	11
Figur 6. Ferske egenskaper i betong tilsatt ulike mengder CO ₂ [26]	11
Figur 7. Ferske egenskaper i betong tilsatt nano-kalsiumkarbonat [27].....	12
Figur 8. Varmeutvikling forsøk nr 1, Monkman MacDonald og Hooton	13
Figur 9. Varmeutvikling, CO ₂ tilsatt i blander, Monkman, MacDonald og Hooton	14
Figur 10. Trykkfasthet i betong tilsatt CO ₂ , Monkman [25].....	15
Figur 11. Trykkfasthet forsøk nr.1, Monkman, MacDonald og Hooton [26]	16
Figur 12. Trykkfasthet forsøk nr. 2, Monkman, MacDonald og Hooton [26]	16
Figur 13. Trykkfasthet ved tilsetning av nano-kalsiumkarbonat [27]	17
Figur 14. Bøyestrekfasthet, Monkman [25].....	18
Figur 15. Bøyestrekfasthet ved tilsetning av nano-kalsiumkarbonat [27]	18
Figur 16. SEM, betong tilsatt CO ₂ [21]	20
Figur 17. SEM, betong tilsatt nano-kalsiumkarbonat [18]	20
Figur 18. TGA av betong tilsatt CO ₂ [21]	21
Figur 19. Oversikt over kapittel 3	23
Figur 20. Plan for prøveprogram	24
Figur 21. Norcem industrisement 52,5R	26
Figur 22. Siktekurve Norstone Årdal 0/8 mm.....	27
Figur 23. Norstone Årdal 0/8 mm	27
Figur 24. Siktekurve Norstone Årdal 8/16 mm.....	27
Figur 25. Norstone Årdal 8/16 mm	27
Figur 26. Speedy moisture tester, vekt	28
Figur 27. Speedy moisture tester, fuktmåler	28
Figur 28. Dynamon SX-N.....	29
Figur 29. Støpeform, terning (NS-EN 12390-1)	31
Figur 30. Støpeform, terning	31
Figur 31. Støpeform, sylinder (NS-EN 12390-1)	31
Figur 32. Støpeform, sylinder	31
Figur 33. Støpeform, bjelke (NS-EN 12390-1)	32
Figur 34. Støpeform, bjelke	32
Figur 35. Herding i vannbad	32
Figur 36. Blandeoppsett, illustrasjon.....	33
Figur 37. Blandeoppsett	33
Figur 38. Kjegle for bestemmelse av synkmål (Statens vegvesen, håndbok 14.622).....	36
Figur 39. Synkmål	36
Figur 40. Densitet av fersk betong	37
Figur 41. Utstyr for måling av luftinnhold	37
Figur 42. Utstyr for måling av temperaturutvikling.....	38
Figur 43. Test av trykkfasthet	39
Figur 44. Test av elastisitetsmodul	40

Figur 45. Lastsykluser ved bestemmelse av elastisitetsmodul (NS-EN 12390-13)	40
Figur 46. Bøyestrekfasthet, illustrasjon	42
Figur 47. Bøyestrekfasthet	42
Figur 48. Spaltestrekfasthet, før brudd	43
Figur 49. Spaltestrekfasthet, etter brudd	43
Figur 50. Test av porøsitet, tørkeskap	44
Figur 51. Test av porøsitet, vannbad	44
Figur 52. Test av porøsitet, veiing under vann	44
Figur 53. Test av porøsitet, trykktank	44
Figur 54. pH i herdet betong, prøvemateriale	46
Figur 55. pH i herdet betong, måling	46
Figur 56. SEM, prøvestykker	47
Figur 57. SEM, prøvestykker dekket av palladium	47
Figur 58. SEM, prøvemaskin	47
Figur 59. SEM, prøvekommer	47
Figur 60. TGA- og DTA-grafer [31]	48
Figur 61. TGA, beholder	49
Figur 62. TGA, maskin	49
Figur 63. Plan for prøveprogram, oversikt over resultat og diskusjon	51
Figur 64. Synkmål, resultater	53
Figur 65. Densitet av fersk betong, resultater	54
Figur 66. Luftinnhold, resultater	55
Figur 67. Temperaturutvikling	56
Figur 68. Utgangstemperatur, resultater	57
Figur 69. Akkumulert isoterm varmeutvikling	58
Figur 70. Trykkfasthet, resultater	60
Figur 71. Standardavvik ved test av trykkfasthet	62
Figur 72. Elastisitetsmodul, resultater	63
Figur 73. Spaltestrekfasthet, resultater	64
Figur 74. Bøyestrekfasthet, resultater	65
Figur 75. Densitet av herdet betong	67
Figur 76. Porøsitet	68
Figur 77. pH-verdi, resultater	69
Figur 78. SEM, referanse	70
Figur 79. SEM, 0,36 wt% CO ₂	70
Figur 80. SEM, 0,72 wt% CO ₂	70
Figur 81. SEM, 1,08 wt% CO ₂	70
Figur 82. Termogravimetrisk analyse, TGA, resultater	72
Figur 83. Termogravimetrisk analyse, DTG, resultater	72
Figur 84. Massetap i ulike temperaturintervaller	73
Figur 85. Andel CO ₂ /Kalsiumkarbonat, resultater	75

Tabelliste

Tabell 1. Oversikt over dosering av CO ₂ i de ulike reseptene.....	25
Tabell 2. Oversikt over antall prøvestykker og prøvetidspunkt for de ulike testene for hver resept...	25
Tabell 3. Norcem CEM I 52,5 R, Kjemiske- og fysikalske data	26
Tabell 4. Norstone Årdal 0/8 mm, vesentlige egenskaper	27
Tabell 5. Norstone Årdal 8/16 mm, vesentlige egenskaper	27
Tabell 6. CO ₂ , egenskaper	28
Tabell 7. Dynamon SX-N, tekniske spesifikasjoner.....	29
Tabell 8. Resept med de ulike doseringene av CO ₂	30
Tabell 9. Oversikt over blandedprosedyre	34
Tabell 10. Prosedyre for dosering av CO ₂	34
Tabell 11. Reel doseringsmengde av CO ₂	52

Standarder

Standard	Side
NS-EN 197-1:2011 til Portlandsement CEM I 52,5 R	24
NS-EN 12620:2002+A1:2008+NA:2016 – Tilslag for betong	25
NS-EN 206-1: Spesifikasjon, egenskaper, fremstilling og ansvar	28
NS-EN 12390-1	29, 30
NS-EN 12390-3: Støping og herdning av prøvelegemer for fasthetsprøving	30
NS-EN 12350-2: Synkmål	34
NS-EN 12350-6: Densitet	35
NS-EN 12350-7: Luftinnhold - Trykkmetoder	35
NS-EN 12390-3:2019: Prøvelegemers trykkfasthet	37
NS-EN 12390-13:2013: Bestemmelse av sekantmodul for elastisitet under trykk–Metode A	38
NS-EN 12390-5:2019: Prøvelegemers bøyestrekfasthet	40
NS-EN 12390-6:2009: Prøvelegemers spaltestrekfasthet	41

Ligninger og formler

Nummer	Beskrivelse	Side
1	Reaksjon mellom C3S og vann	4
2	Reaksjon mellom C2S og vann	4
3	Reaksjon mellom C3A, gips og vann	4
4	Reaksjon mellom C3A, ettringitt og vann	4
5	Reaksjon mellom C3S og karbonisert vann, dannelse av CSH	5
6	Reaksjon mellom C2S og karbonisert vann, dannelse av CSH	5
7	Reaksjon mellom C3S og karbonisert vann, dannelse av SH	5
8	Reaksjon mellom C2S og karbonisert vann, dannelse av SH	5
9	Reaksjon mellom CH og karbonisert vann	6
10	Utreking av frekvens, corioliseffekt	33
11	Utreking av mediets tetthet, corioliseffekt	33
12	Utrekning av fersk densitet	35
13	Utrekning av betongens modenhet	36
14	Utrekning av betongens varmeutvikling	36
15	Utrekning av trykkfasthet	37
16	Utrekning av øvre spenning, elastisitetsmodul	39
17	Utrekning av nedre spenning, elastisitetsmodul	39
18	Utrekning av forhåndslast spenning, elastisitetsmodul	39
19	Utrekning av stabilisert elastisitetsmodul	39
20	Utrekning av bøyestrekfasthet	40
21	Utrekning av spaltestrekfasthet	40
22	Utrekning av prøvestykkets volum, Porøsitet/densitet	43
23	Utrekning av tørr densitet, Porøsitet/densitet	43
24	Utrekning av fast-stoff densitet, Porøsitet/densitet	43
25	Utrekning av sugporøsitet, Porøsitet/densitet	43
26	Utrekning av makroporøsitet, Porøsitet/densitet	43
27	Utrekning av total porøsitet, Porøsitet/densitet	43
28	Utreknings av CO ₂ opptak i betong tilsatt CO ₂	47
29	Dekarbonisering av kalsiumkarbonat	47
30	Utrekning av dannet mengde kalsiumkarbonat	47

Denne siden er blank med hensikt

Vedlegg

Vedlegg A.....	88
Blandeskjema	88
Vedlegg B.....	89
Speedy Moisture Tester	89
Vedlegg C.....	91
<i>Statens vegvesen: Håndbok 14.637 – Kapillær sugehastighet og porøsitet, PF – Begrenset prosedyre</i>	91
Vedlegg D.....	93
Testing pH in concrete – Need for a standard procedure.....	93
Vedlegg E.....	99
Termogravimetrisk analyse	99
Vedlegg F.....	101
Densitet av fersk betong	101
Synkmål	101
Luftinnhold	101
Vedlegg G	102
Temperaturutvikling - måledata.....	102
Vedlegg H	113
Akkumulert isoterm varmeutvikling – Inndata i regneark "Herdekassen"	113
Vedlegg I.....	117
Trykkfasthet.....	117
Vedlegg J.....	119
Elastisitetsmodul, Spaltestrekkfasthet og Bøyestrekfasthet.....	119
Vedlegg K.....	120
Porøsitet og herdet densitet	120
Vedlegg L	122
pH-verdi.....	122
Vedlegg M.....	123
SEM.....	123
Vedlegg N	125
TGA.....	125

Vedlegg A

Blandeskjema

Blandeskjema				
	Referanse	0,36 wt% CO2	0,72 wt% CO2	1,08 wt% CO2
Sement – CEM I – 52,5R [kg]	19,45			
Sand 0/8 mm Årdal [kg]	56,03			
Stein 8/16 mm Årdal [kg]	68,79			
Vann [kg]	10,64			
SP – Dynamon SX-N [wt%]	0,7			
SP – Dynamon SX-N [kg]	0,136			
CO2 planlagt [wt%]	0	0,3	0,6	0,9
CO2 dosert [wt%]	0	0,36	0,72	1,08
CO2 dosert [g]	0	70	140	210
W/C	Matriksvolum [l/m³]		Blandevolum [l]	
0,6	300		65	

Moisture Test Procedure for Large Size Speedy



A large size speedy is shown in the photograph to the left. The moisture test procedure is simple to follow and takes a just few minutes for most materials. However, to ensure accurate and consistent results the procedure should be followed precisely. To test your sample, refer to the photographs below and complete the following steps:



1. **Clean the Speedy vessel:** Prior to using the Speedy tester, ensure that the inside of the Speedy cap and vessel are empty and clean. Use the bristle brush to remove any residues from previous tests.
2. **Select and prepare the sample:** Ensure that the sample to be weighed and placed in the Speedy is representative of the material that is under investigation. Some materials, such as free-flowing powders and sands, need no preparation whereas others may need to be ground prior to testing or pulverized during the test. See *Table 4* on page 6 for further information.
3. **Weigh the sample:** Place the empty measuring beaker on the electronic scale and zero the scale (refer to the electronic scale user instructions for further details). Add small amounts of material from the sample until the correct sample weight is reached. The sample weight is determined by the size and measurement range of the Speedy that is being used, as listed in *Table 3* below.

Table 3: Sample Weights - Large Vessel

Model	Vessel Size	Range (H ₂ O% W/W)	Sample Wt. (g)
L2000C	Large	0-10	40
L2000D	Large	0-20	20
L2000G	Large	0-50	8

4. **Add the sample to the Speedy vessel:** Pour the sample into the chamber of the Speedy vessel. If so indicated in the *Sample Preparation* table, place pulverizing balls into the chamber.
5. **Add the reagent to the Speedy cap:** Using the metal scoop, add a minimum of two full scoops of calcium carbide reagent to the Speedy cap cavity.
6. **Seal the Speedy:** Hold the Speedy horizontally and position the cap as shown. Then swing the stirrup into position and tighten the top screw to seal.
7. **Mix the sample with the reagent:**
 - a. **Without pulverizing balls:** Hold the Speedy vertically with the pressure gauge facing the ground and shake vigorously for 5 seconds. Rotate the Speedy through 180° so that the pressure gauge faces the sky, tap the sides of the Speedy to ensure the sample falls into the cap cavity and prop or hold the Speedy in this position for 1-2 minutes.
 - b. **With pulverizing balls:** Hold the Speedy horizontally and shake it in an orbital motion to make the balls spin around inside the Speedy vessel. Do this for 20 seconds and then rest for 20 seconds. Repeat this process 2 or 3 times so that the spinning balls pulverize the sample to give a more reliable measurement.
8. **Take the reading:** Hold the Speedy horizontally and at eye level and take the moisture content reading directly from the pressure gauge.

Moisture Test Procedure for Large Size Speedy (cont.)

9. **Release the pressure:** Hold the Speedy vertically with the pressure gauge facing the ground. Locate the arrow on the flange of the cap and point this away from yourself and other people in your vicinity. Unscrew the top screw slowly to vent the gas that may have been generated within the Speedy.
10. **Remove the sample and reagent:** Tip the contents of the Speedy directly into a clean and dry open container and dispose of in accordance with *Section 13 of the Calcium Carbide Material Safety Data Sheet*.
11. **Clean the Speedy:** Clean the Speedy vessel, cap and measuring beaker in preparation for the next moisture measurement.

Special Considerations

Use the instructions in this section to adapt your test procedures to special measuring conditions.

Applying the Proportional Test Technique

If the moisture content of the material exceeds the measurement range of the Speedy being used, then the *Proportional Test Technique* may be used to obtain measurements. This involves halving the normal sample weight and doubling the gauge value. For example:

1. Assume an L2000D Speedy with a measurement range of 0-20 H₂O% W/W is being used to test soil with a nominal moisture content of 30%.
2. The sample is prepared as required and half the normal weight (i.e. 10 g) is placed in the Speedy.
3. The normal test procedure is followed and a gauge value of 14.7% is recorded.
4. This value is then doubled to give the actual moisture content of 29.4%.

The *Proportional Test Technique* may also be used to obtain clearer readings in very dry material by doubling the sample size and halving the gauge value.

Compensating for Non-Standard Temperature

For optimum performance the Speedy tester and sample should be at 20°C (68°F) when used. If this is not practical, take at least three tests in quick succession to equilibrate temperatures as much as possible. Ignore the first and second test results and record the later results.

Establishing Correction Factors

When compared with oven test results, Speedy readings may be low if the material under investigation contains volatile components other than water, as these may evaporate with the water at elevated temperatures. Correction factors for given materials can be established by plotting graphs of Speedy test results against oven test results.

Measuring Moisture Content in Liquids

Speedy testers may be used to measure the moisture content of certain liquids (most commonly oils) by adapting the test procedure as follows:

1. Weigh the liquid sample as in the standard procedure.
2. Place the liquid in a clean mixing vessel and add two to four scoops of dry sand. Mix the contents thoroughly and place the mixture in the Speedy vessel.
3. Continue with the test as detailed in the standard *Moisture Test Procedure*.

Converting Wet Weight to Dry Weight

The pressure gauges used with the Series 2000 Speedy testers are calibrated to give the moisture content expressed as a percentage of the sample's wet weight. If required, the measured value (M_{WW}) can be expressed as a percentage of the sample's dry weight (M_{DW}) by using the following formula:

$$M_{DW} = \frac{100 \times M_{WW}}{100 - M_{WW}}$$

Vedlegg C

Statens vegvesen: Håndbok 14.637 – Kapillær sugeshastighet og porøsitet, PF – Begrenset prosedyre

14.637 - side 1 av 5



Statens vegvesen

14.6 Betong og materialer til betong
14.63 Undersøkelse av herdet betong

14.637 Kapillær sugeshastighet og porøsitet, PF

Gjeldende prosess (nov. 1996): NY

Omfang

Metodebeskrivelsen omfatter bestemmelse av kapillær sugeshastighet og porøsitet for herdet betong med naturlig forekommende tilslag.

Begrenset prosedyre omfatter bare bestemmelse av porøsitet- og densitetsverdier (PF-metoden), og kan benyttes på irregulære prøvestykker. PF-metoden muliggjør et estimat av betongens masseforhold. Full prosedyre krever regulære skiveformede prøvestykker til bestemmelse av tetthetsparametrene kapillær- tetstall og motstandstall. Full prosedyre inkluderer også PF-metoden. Saksbehandler beskriver i hvert enkelt tilfelle om det skal benyttes full eller begrenset prosedyre.

Referanser

SINTEF Bygg og miljøteknikk (1996): *Bestemmelse av kapillær sugeshastighet og porøsitet*. KS 70 110, Utgave 2. Trondheim

S. Smeplass: *Kapillærabsorpsjon som kvalitetskriterium*. SINTEF rapport STF65 A88028. SINTEF, Trondheim

E.J. Sellevold (1986): *PF-metoden*. Rapport O1731. NBI, Oslo

Utstyr

- liten steinsag
- plastkasser med rist i bunnen
- vekt med nøyaktighet 0,01 g
- stoppeklokke
- trykktank til vannmetting (50 atm.)
- ventilert tørkeskap

Fremgangsmåte

Tillaging av prøver (full prosedyre)

Det skal fortrinnsvis benyttes skiver med diameter ca. 100 mm. Et prøvesett består normalt av 4 parallelle skiver (færre skiver benyttes bare når det ikke foreligger tilstrekkelig mengde prøvematerialer). I unntakstilfeller kan det benyttes skiver tildannet fra borkjerner med mindre diameter enn 90 mm. I slike tilfeller skal skivens sideflater males med latex- eller epoxy-maling. Skivene skal være planparallele.

Antall skiver skal tilpasses slik at samlet areal er minst:

- 20 000 mm² for betong med $d_{\text{maks}} \leq 16$ mm
- 25 000 mm² for betong med $d_{\text{maks}} > 16$ mm

Skivetykkelse (h) registreres ved hjelp av et skyvelære. Skivetykkelsen skal være 20 ± 1 mm. Eksponert flate skal være en sagflate, unntatt når selve stoppehuden skal prøves. Dette skal i så fall gå klart fram av rapporten.

Full prosedyre

- Eventuell maling av sideflatene
- Torking i ventilert tørkeskap ved 105 °C inntil vekttapet er mindre enn 0,01 % pr. time (eventuelt i 7 døgn dersom konstant tørketid er mer hensiktsmessig), og deretter minimum 2 timer avkjøling i luft ved romtemperatur, tildekket med plastfolie, veiing (vekt g_1)
- 4 døgns suging fra vannspeil (helt sugeflaten skal være i kontakt med vann uten at vannspeilet står mer enn 1-2 mm opp på sideflaten, kassen skal være tildekket). Veiing etter
 - 10 og 30 minutter
 - 1, 2, 3, 4 og 6 timer
 - 1, 2, 3 og 4 døgn
- 3 døgn helt neddykket i vann, veiing i luft (vekt g_2), og under vann (vekt g_3). Dette forutsetter at prøven er opphengt i vekta
- Minimum 1 døgn neddykket i vann i trykktank ved 50 atm. trykk, veiing i luft (vekt g_4)

Ved veiing skal følgende prosedyre følges for hver skive:

- Skiven tas opp fra risten (pass på at det ikke drypper på andre skiver)
- Skiven tørkes av med fuktig klut og veies
- Skiven legges tilbake på risten

Vektene føres inn i eget skjema, som vist på figur 14.637-1.

Kommentar: Når flere prøvesett prøves samtidig må det totale antall prøvestykker normalt ikke være større enn 20 dersom det skal være mulig å gjennomføre prøvingsprosedyren for hvert enkelt prøvestykke uten avvik fra de oppgitte prøvingstidspunktene.

Begrenset prosedyre

Porøsitet og densitetsverdier kan bestemmes uten at det utføres måling av sugeshastighet. I slike tilfeller er prøvestykkens form av mindre betydning (det skal ikke foretas maling av sideflater). Det totale prøvolumet bør være større enn 200 cm³. Minste tverrmål bør ikke være større enn 50 mm for noen av prøvestykkene.

Hvert prøvestykke bør ha et volum tilsvarende ca. 100-150 cm³. Følgende prosedyre benyttes:

- Torking i ventilt torkeskap ved 105 °C inntil vektøstet er mindre enn 0,01 % pr. time (eventuelt i 7 døgn dersom konstant tørketid er mer hensiktsmessig) (vekt g_1)
- Neddykking i vann i 7 døgn, veiing i luft (vekt g_2), og under vann (vekt g_3)
- Minst 1 døgn neddykking i vann i trykktank ved 50 atm., veiing i luft (vekt g_4)

Kommentar: Veiing etter trykkmetting må skje umiddelbart for å unngå at vannet presses ut av prøvestykket.

Vektene føres inn på skjema som vist på figur 14.637-2.

Resultater

Beregninger

Følgende størrelser beregnes:

$$\text{prøvestykkens volum: } V = \frac{g_2 - g_3}{\rho_w} \quad (\text{m}^3)$$

$$\text{tørr densitet: } \rho_1 = \frac{g_1}{V} \quad (\text{kg} / \text{m}^3)$$

$$\text{fast-stoff densitet: } \rho_{fs} = \frac{g_1}{V - \frac{g_4 - g_1}{\rho_w}} \quad (\text{kg} / \text{m}^3)$$

$$\text{sug porositet: } p_s = \frac{g_3 - g_1}{V \cdot \rho_w}$$

$$\text{makro porositet: } p_m = \frac{g_4 - g_2}{V \cdot \rho_w}$$

$$\text{total porositet: } p_1 = p_s + p_m$$

hvor:

ρ_w er vannets densitet (settes lik 1000 kg/m³)

De målte absorpsjonsverdiene, (uttrykt som mengde vann pr. arealenhet (kg/m²), ved angitte tidspunkter brukes til å bestemme et tidspunkt (t_{kap}) og en tilhørende absorpsjonsverdi (Q_{kap}) som tilsvarer at vannfronten akkurat har nådd toppflaten på prøvestykket, dvs. en stige høyde (h). Dermed kan motstandstallet (m) og kapillaritetstallet (k) bestemmes:

$$k = \frac{Q_{kap}}{\sqrt{t_{kap}}} \quad (\text{kg} / \text{m}^2 \sqrt{\text{s}})$$

$$m = \frac{t_{kap}}{h^2} \quad (\text{s} / \text{m}^2)$$

Prinsippet for beregning av m og k er vist i figur 14.637-3. Skjæringspunktet for de to kurvedelene (t_{kap} , Q_{kap}) kan enten bestemmes grafisk eller ved lineær regresjonsanalyse.

Usikkerhet

Pålitelighet av resultatene avhenger blant annet av kvaliteten av regresjonsanalysen. Lokaliseringen av skjæringspunktet mellom kurvedelene, og dermed m og k , avhenger av at måleverdiene plasseres i riktig kurvedel. Korrelasjonskoeffisienten (R^2) fra regresjonsanalysen kan brukes som kriterium for plassering av målepunktene. Den beste konfigurasjonen gir normalt de største korrelasjonskoeffisientene. Det bør legges størst vekt på å oppnå høye verdier av (R^2) for den steile kurvedelen.

Generelt bør korrelasjonskoeffisienten fra regresjonsanalysen ikke underskride 0,95 for den steile kurvedelen, og 0,90 for den horisontale kurvedelen. Ved avvik forkastes beregningen av m og k , og resultatene presenteres bare i grafisk form. Ved grafisk bestemmelse av skjæringspunktet må kvaliteten på bestemmelsen av m og k vurderes skjønnsmessig. Målepunkt nær skjæringspunktet kan eventuelt utelates.

Estimatet av masseforholdet (effektivt v/c). Basert på Powers formel og antagelsene at betongen inneholder 30 % volumprosent bindemiddel med 75 % hydratiseringsgrad av sementen, kan v/c bestemmes fra sugporositeten (p_s) ved ligningen:

$$v/c = \frac{0,32 p_s + 0,04}{0,30 - p_s}$$

v/c -estimatet forventes å ha en nøyaktighet på $\pm 0,05$ for betong eldre enn 2 mnd. og med v/c -tall større enn 0,40. v/c -estimatet kan brukes til reseptkontroll såvel som til vurdering av feltbetong med ukjent resept.

Rapportering

Rapporten skal minimum inneholde følgende opplysninger:

- prøvingslaboratorium (navn og adresse)
- ansvarlig for prøvingen
- dato og rapportidentifikasjon, identifikasjon på prøvebeholder
- prøvingsmetode (denne beskrivelsens nummer og tittel)
- eventuelt avvik fra metodebeskrivelsen
- navn og adresse på oppdragsgiver/anlegg
- navn på prøvetaker og metode for prøveuttak, adresse for prøveuttaket
- navn på produsent/leverandør
- sted for uttak, dato og klokkeslett for prøvetakingen
- grafisk framstilling av sugeforløpet
- tabellarisk oppstilling av beregnede verdier
- enkel vurdering av resultatene
- værforhold, og andre ting som kan være av interesse for senere bedømmelse av prøvingsresultat

Testing pH of Concrete

Need for a standard procedure

BY JENNIFER A. GRUBB, HEMANT S. LIMAYE, AND ASHOK M. KAKADE

Although concrete typically begins its life at a highly basic pH of about 13, the pH values at exposed surfaces soon fall as reactions occur between carbon dioxide from the atmosphere and alkalis in the concrete—a process known as carbonation. Over time, fronts of carbonated concrete, with pH values of about 8.5, advance below exposed surfaces.

It may be necessary to determine the depth of this front, as carbonated concrete can allow corrosion of reinforcing steel. This can be done by spraying a phenolphthalein indicator solution onto a fractured or cut surface of the concrete and noting the location of a color change. In this case, the color change occurs when the solution contacts a material with a pH of 9 to 9.5. The depth of the carbonation front can also be evaluated by using a drill to collect samples at selected depths. In this case, the pH of the powdered samples can be evaluated using the standard test methods described in the following sections.

It may also be necessary to evaluate the pH of a concrete floor surface, as the adhesives used to install vinyl flooring or carpet tiles can be damaged when applied to substrates with pH values exceeding 9 (many flooring manufacturers won't issue a warranty on their installed products unless the pH has been verified to be within acceptable ranges). Although paragraph 5.3 in ASTM F 710-05, "Standard Practice for Preparing Concrete

Floors to Receive Resilient Flooring,"¹ indicates a procedure to be used to test concrete floors for alkalinity, we believe the procedure isn't adequate. We therefore propose an alternate standard procedure for testing the pH of concrete.

FUNDAMENTALS OF pH

pH is an approximate measure of acidity or alkalinity of a solution and is defined as the negative logarithm of the hydrogen ion (H^+) concentration. As the pH of a solution increases, the number of free hydrogen ions decreases, and a change in pH of one reflects a tenfold change in the H^+ concentration. For example, there are 10 times as many hydrogen ions available at a pH of 7 than at a pH of 8. The pH scale ranges from 0 to 14, and a pH of 7 is considered to be neutral. Substances with a pH less than 7 are acidic and substances with a pH greater than 7 are basic.

The following are examples showing the relationship between H^+ concentration and pH for various solutions:

- In a hydrogen chloride solution, or hydrochloric acid, the H^+ concentration is 1×10^{-2} , and the pH is 2;
- In water, the H^+ concentration is 1×10^{-7} , and the pH is 7;
- In saturated calcium hydroxide, the H^+ concentration is about $1 \times 10^{-12.4}$, and the pH is about 12.4; and
- In sodium hydroxide solution, the H^+ concentration is 1×10^{-14} , and the pH is 14.

Because pH is a measure of a solution, accurately measuring the pH of a solid substance such as concrete is a challenging task.

The information in this article was originally presented at the ACI Fall 2004 Convention, San Francisco, CA.

TABLE 1:
REPORTED pH VALUES FOR CONCRETE-RELATED MATERIALS

Category	pH
Fresh cement	>12.5
Low alkali cement	12.7 to 13.1
High alkali cement	13.5 to 13.9
High alumina cement	11.4 to 12.5
Mixing water for concrete	6 to 9
Sea water	7.5 to 8.4
Hardened cement paste with ingress of sea water	12.0
Range of phenolphthalein solution (colorless to red)	8 to 10
Class F fly ash	>13.2
Silica fume slurry (equal mass of water & silica fume)	5.5
Reduction in pH due to 10% silica fume	0.5
Reduction in pH due to 20% silica fume	1.0
pH of silica fume concrete	>12.5

EVALUATION

Our evaluation included a literature survey, an informal survey of professionals and associations, and assessment of test standards and methods, including pH strips, pH pencils, and digital meters. In addition, we also quantified the influence of procedural variables on the measured test results.

Literature survey

Our literature survey revealed that there is plenty of literature available concerning the pH of concrete as it relates to carbonation, embedded steel corrosion, alkali-silica reaction, and the effects of mineral admixtures. There are, however, few published papers related to the measurement of concrete pH, especially with regard to a standard procedure. In addition, most of the literature doesn't indicate the procedures followed to measure the pH. Some of the reported pH values are summarized in Table 1.

Informal survey

We used telephone and e-mail surveys of leading petrographers, various trade associations, and test laboratory personnel to determine the procedures now commonly used to measure concrete pH. Although pH-indicating strips reportedly are the most widely used method, most respondents didn't indicate the use of a specific dilution ratio. Some petrographers did indicate they use the procedure provided in ASTM C 25² with a pH probe and digital meter, and personnel at a few testing laboratories

reported that they measure concrete pH using a pH pencil.

Standards review

As stated previously, to measure the pH of solid materials such as lime, soil, or concrete, an aqueous solution of the powdered material must be created—this dilutes the concentration of the solid material. A review of various standards and commentaries indicates that dilution ratios vary between 1:9 and 1:20. The following are summaries of the methods used in the publications we reviewed:

- ASTM C 25, "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime"²: Mix 10 g (0.35 oz) of sample with 200 mL (6.8 fl oz) of deionized water. Stir for 30 minutes, and let the solution stand for 30 minutes. Measure pH with a pH probe and meter. Report pH value to four significant figures;
- ASTM F 710, "Standard Practice for Preparing Floors to Receive Resilient Flooring"¹: Place several drops of distilled or deionized water on a clean concrete surface to form an approximately 25 mm (1 in.) diameter circle. After 60 ± 5 seconds, measure pH using a pH strip; and
- ICRI Guideline No. 03740, "Guideline for Inorganic Repair Material Data Sheet Protocol"³: Mix 10 g (0.35 oz) of sample passed through the 90 µm (No. 170) sieve with 90 g (3.2 oz) of distilled or deionized water for 1 minute. After settling, measure pH using pH paper or a pH probe and meter.

Influence of variables

We designed our experimental program to observe the effects of major variables such as the type of concrete, sample size, and dilution ratio. We also conducted a limited number of tests for other variables such as soaking or waiting time, sample gradation, and temperature. Our samples were prepared using cement paste; mortar; concrete with 0, 15, and 50% cement replacement by weight with fly ash; or concrete from an old sidewalk. The samples were pulverized using a vibratory micro-mill. Sample sizes of 5, 10, and 20 g (0.18, 0.35, and 0.71 oz) were diluted with distilled water, using dilution ratios of 1:1, 1:2, 1:4, 1:9, 1:20, and 1:50 before testing for pH. The pH readings were obtained using either a pH probe with a digital meter or pH strips. The prepared solution was not stirred during the measurement process.

TEST RESULTS AND DISCUSSION

Type of sample

The measured pH values for various mixtures of cement paste, mortar, and concrete are listed in Table 2. All of the prepared samples were less than 2 months old at the time of testing except for the sample from a 20-year-old exposed concrete sidewalk. The tests were conducted using 5 g (0.18 oz) samples with a dilution ratio of 1:2. The highest pH of 12.71 was obtained for cement paste with a water-cementitious material ratio (w/cm) of 0.40. The lowest pH of 10.45 was obtained for the 20-year-old sidewalk sample.

Amount of sample

For each type of mixture, pH was measured using 5, 10, and 20 g (0.18, 0.35, and 0.71 oz) of material with various dilution ratios. Sample graphs are shown in Fig. 1 to 4. The difference in pH was less than 0.30.

TABLE 2:
MEASURED pH VALUES FOR VARIOUS CONCRETE MATERIALS

Material	Measured pH*
0.4 w/cm cement paste	12.71
0.4 w/cm mortar	12.69
0.4 w/cm concrete	12.62
0.55 w/cm concrete	12.49
Concrete with 15% fly ash (0.45 w/cm)	12.58
Concrete with 50% fly ash (0.45 w/cm)	12.37
Concrete from 20-year-old sidewalk	10.45

*All values are for sample size of 5 g (0.18 oz) and dilution ratio of 1:2.

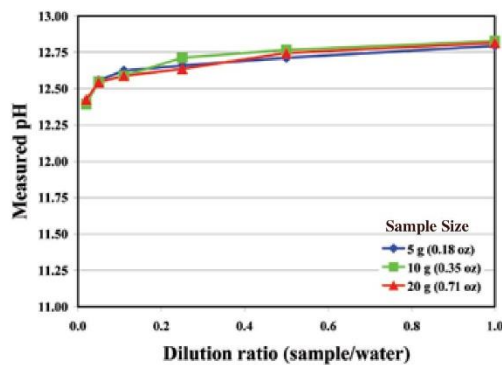


Fig. 1: Measured pH versus dilution ratio for cement paste with a 0.4 w/cm

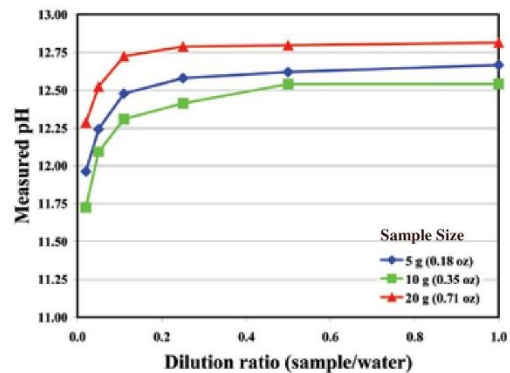


Fig. 2: Measured pH versus dilution ratio for concrete with a 0.4 w/cm

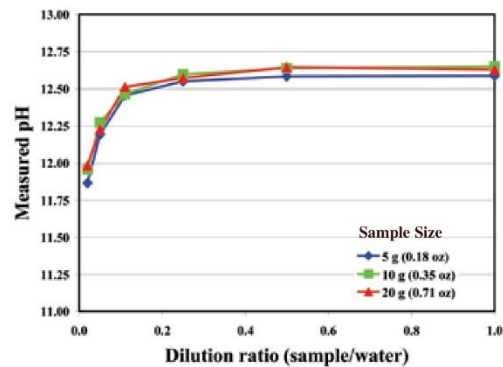


Fig. 3: Measured pH versus dilution ratio for concrete with 15% cement replacement by weight with fly ash

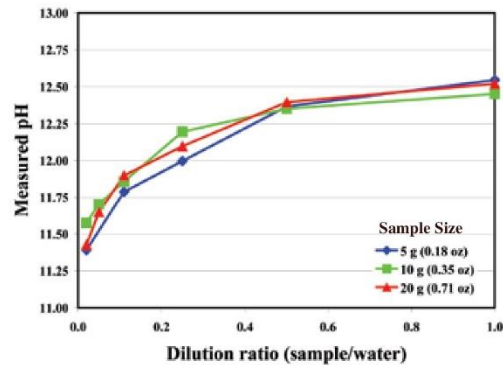


Fig. 4: Measured pH versus dilution ratio for concrete with 50% cement replacement by weight with fly ash

Dilution ratio

Figures 1 to 5 also show the effects of dilution ratio on pH values for various materials. The trend of increasing pH as the dilution ratio decreases from 1:50 to 1:1 is similar for all mixtures.

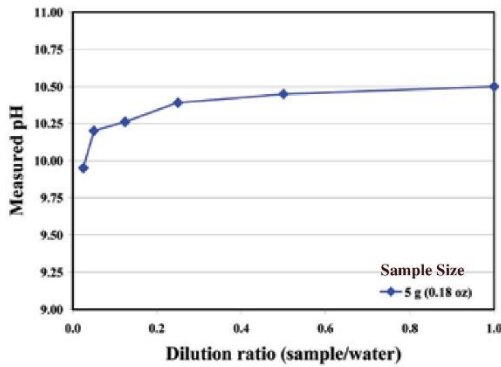


Fig. 5: Measured pH versus dilution ratio for carbonated concrete sample from a 20-year-old sidewalk

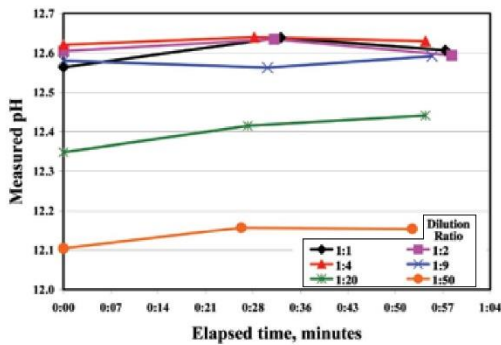


Fig. 6: Measured pH versus elapsed time for concrete with 0.4 w/cm

TABLE 3:
EFFECT OF PARTICLE SIZE ON pH FOR A 5 g (0.18 oz) SAMPLE OF CONCRETE WITH A 0.4 w/cm USING A 1:2 DILUTION RATIO

Particle size	Distribution, %	Measured pH
Small, passing 850 μm (No. 20) sieve	59.6	12.48
Intermediate, passing 2.00 mm (No. 10) sieve and retained on 850 μm (No. 20) sieve	19.2	11.87
Large, retained on 2.00 mm (No. 10) sieve	21.2	11.55
Combined	100	12.37

Soaking period

The graph in Fig. 6 illustrates the short time (1 hour) effect of soaking time on pH as a function of dilution ratio for a concrete sample. The change in pH was insignificant (less than 0.15) for all dilution ratios.

Sample gradation

Tests were conducted using powdered samples obtained from concrete with a w/cm of 0.40 and no fly ash. The pH measurements were conducted on the portion of the sample that was retained on the 2.00 mm (No. 10) sieve (large particles), the portion passing the 2.00 mm (No. 10) sieve and retained on the 850 μm (No. 20) sieve (intermediate particles), and the portion passing the 850 μm (No. 20) sieve (small particles) using a dilution ratio of 1:2. The pH values for the large particle size portion and the small particle size portion were found to be 11.55 and 12.48, respectively. Although the difference in pH was nearly 0.93, the pH of the combined sample was 12.37, indicating that it's not necessary to obtain a sample passing through the 850 μm (No. 20) sieve. The particle size distribution of the sample and measured pH values are shown in Table 3.

Temperature

Raising the temperature of a saturated solution of calcium hydroxide from 0 to 60 °C (32 to 140 °F) has been reported to decrease measured pH from 13.423 to 11.449.⁴ The graph in Fig. 7 shows the effect of temperature found in the test program over a narrow temperature range.

COMPARISON OF TEST METHODS

The pH of a concrete slab was measured using a pH pencil, a pH probe with digital meter, and pH strips using the procedure indicated in ASTM F 710. As shown in Table 4, the measured values varied between 10 and 12. Color change obtained using a pH pencil (Fig. 8) was difficult to judge, as it was confusing to distinguish between the color match for pH values of 10 and 13.

To measure the pH of the slab with a pH probe and meter, a 0.3 g (0.011 oz) sample of concrete powder was obtained by sanding the surface, and the sample was mixed with 6 mL (0.2 fl oz) of distilled water. The mixture was contained in a sealed ring on the concrete slab (Fig. 9). With this method, a pH of 11.5 was obtained for a dilution ratio of 1:20.

When the procedure described in ASTM F 710 was used on a clean concrete surface, a pH of 10 was measured (Fig. 10). To improve the accuracy of the ASTM F 710 procedure,

a powdered sample of the concrete was collected by sanding the surface of the slab. The measurement was then taken using a pH strip dipped into the mixture. This procedure resulted in a measured pH of 12 for the same concrete. Even though pH values of 10 and 12 appear to be close, it should be noted that a pH value of 10 could be considered carbonated concrete, while a pH of 12 could be considered non-carbonated concrete.

TABLE 4:
COMPARISON OF TEST METHODS TO MEASURE SURFACE pH OF A CONCRETE SLAB

Method	Measured pH
ASTM F 710	10
Proposed method	12
pH pencil	?
pH probe and meter	11.5

*Color change obtained using a pH pencil was difficult to judge, as it was confusing to distinguish between the color match for pH values of 10 and 13.

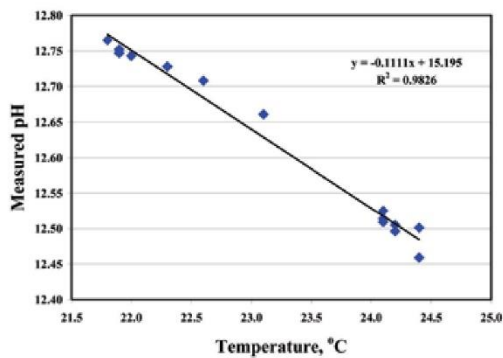


Fig. 7: Measured pH versus temperature

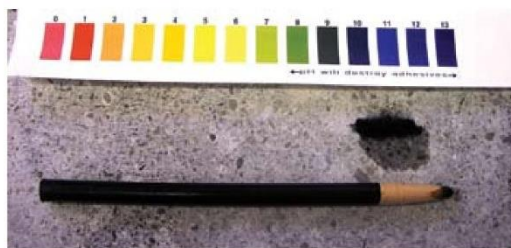


Fig. 8: Measuring pH using a pH pencil. It's difficult to distinguish color differences for pH values from 10 to 13

In another field test, the pH of a slab that had been previously tested by others using the ASTM F 710 procedure was found to have a pH of 7. The same slab was found to have a pH of 9 when the slab was sanded to obtain a powdered sample before conducting the ASTM F 710 procedure.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Based on the test results from this study, dilution ratio and temperature have the greatest effect on measured pH values. All other factors such as particle size, amount of sample, and soaking time have less influence on the measured pH value. The use of a dilution ratio of 1:2 seems practical to make the pH measurement.

The pH measured on a powdered concrete sample of a slab was significantly different than the pH measured using the ASTM F 710 procedure. This shows that placing a few drops of deionized water on an undisturbed concrete surface is not enough to form a solution containing concrete particles. It's therefore our opinion that the procedure



Fig. 9: Measuring pH using a pH probe with a digital meter. Here, the pH is shown to be 11.53

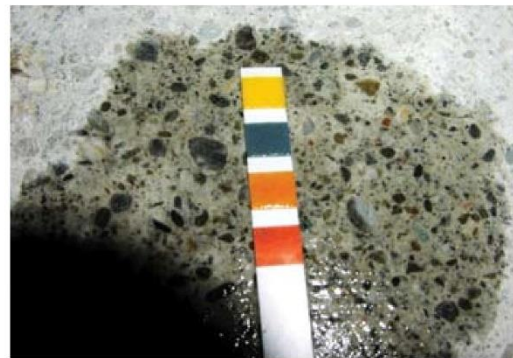


Fig. 10: The pH of clean concrete surface is measured using a pH strip and the procedure provided in ASTM F 710. Here, the pH is shown to be 10

provided in ASTM F 710 doesn't provide a true indication of concrete pH, and the procedure should be modified.

The experience gained during our testing program also showed that it's not convenient to measure the pH of the concrete slab with a pH probe with a meter. The probe that we used needs at least 6 mL (0.2 fl oz) of solution to measure pH. At a dilution ratio of 1:2, this requires 3 g (0.11 oz) of powdered sample. Sanding a concrete surface to obtain this much powder is time-consuming and laborious. Therefore, we recommend that the probe and meter be used only in a laboratory with a larger concrete sample.

Because floor adhesive is only in contact with the surface of the concrete slab, flooring industry personnel are only interested in measuring the pH of the concrete surface. To achieve proper adhesion of resilient flooring, most manufacturers recommend abrasive cleaning or bead blasting of the slab to remove surface residue. Therefore, it makes sense to measure pH by sanding the surface of the slab. For carbonation and embedded steel corrosion-related issues, it's necessary to measure the pH of the concrete at various depths with more precision. Therefore, it's our opinion that two different procedures are needed: one for using pH strips to measure the pH of the concrete surface in the field, and one for using a pH probe to measure the pH at various depths within the concrete in the laboratory.

RECOMMENDED TEST PROCEDURES Field test for pH measurement of a concrete surface

- Clean the surface using a wire brush. Be sure to remove dirt, concrete sealer, and old adhesive residue;
- Gather 0.5 g (0.018 oz) of concrete powder by hand sanding an approximately 50 x 50 mm (2 x 2 in.) area with 50-grit general-purpose sandpaper;
- Thoroughly mix the concrete powder with 10 to 12 drops of fresh distilled water with a small, flat plastic stirrer. Let stand for 60 seconds;
- Insert a pH strip into the mixture. Compare the strip to the color chart to determine the pH; and
- Note the temperature of the concrete surface.

Laboratory test for pH measurement of concrete

- Calibrate the pH probe and meter using the manufacturer's directions and appropriate buffer solutions;
- Collect 5 g (0.18 oz) of concrete powder at the required depth using a drill;
- Use a plastic stirrer to mix the concrete powder with 10 mL (0.34 fl oz) of fresh distilled water at a temperature of 22 ± 1 °C (72 ± 2 °F);
- Filter the mixture using No. 40 filter paper;
- Insert the pH probe into the mixture. Read the pH to one decimal place; and

- Note the temperature of the mixture.

Acknowledgments

The authors are grateful for the comments and opinions provided by persons who responded to the e-mails and telephone calls of our informal survey.

References

1. ASTM F 710-05, "Standard Practice for Preparing Concrete Floors to Receive Resilient Flooring," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005, 6 pp.
2. ASTM C 25-06, "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, 36 pp.
3. Guideline No. 03740, "Guideline for Inorganic Repair Material Data Sheet Protocol," International Concrete Repair Institute, Des Plaines, IL, 2003, 10 pp. (Available at http://www.icri.org/committees/03740DataSheetProtocol_11082004_inenumberedDraft.pdf)
4. Bates, R.G., *Determination of pH—Theory and Practice*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, NY, 1973, 479 pp.

Selected for reader interest by the editors after independent expert evaluation and recommendation.



Jennifer A. Grubb performed the testing for this research in 2004 while an intern at Concrete Science, Inc., Hayward, CA, and is now an Engineer at Simpson Gumpertz & Heger, Inc., Boston, MA. She received her BS in civil engineering from Cornell University in 2003 and her ME in structural materials from the University of California at Berkeley in 2005.



ACI member Hemant S. Limaye is a Principal Engineer with Concrete Science, Inc. He is also a member of the American Society of Mechanical Engineers. His interests include nondestructive methods, sensors, instrumentation, and testing methodologies.



ACI member Ashok M. Kakade is a Principal Engineer with Concrete Science, Inc., where he is a professional engineer involved in the evaluation of and repair recommendations for concrete structures. He is also a member of ASTM International, the American Society of Civil Engineers, and the International Concrete Repair Institute.

Vedlegg E

Termogravimetrisk analyse

Beskrivelse av metode, Kwasny, Basheer og Russell

74 CARBONATION

time carbonated water, prepared under 40 bar CO₂ pressure, was used.

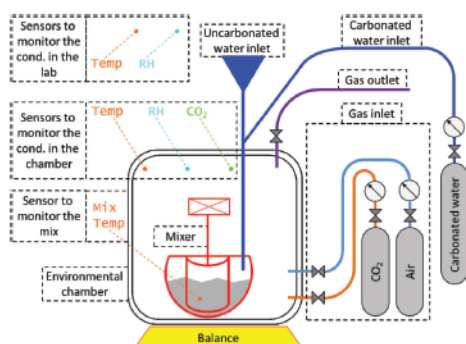


Figure 2. Schematic of setup used for paste mixing.

2.4 Sample collection and preparation

Samples were collected at 0.5, 10, and 25 h after beginning of mixing, as specified below:

- At 0.5 h a fresh sample of the paste was placed in a plastic bottle. Acetone was added to the sample bottle to enable the unreacted water to be removed from the cement paste. The mixture was centrifuged and decanted five times within a 1-h period after sample collection (each time the bottle was refilled with fresh portion of acetone). Afterwards the bottle was again filled with acetone, air-tight closed, and stored for future testing.
- At 10 and 25 h, the hardened cement paste was crushed and pieces obtained from the inner part of the 50 mm size cubes were placed in acetone filled plastic bottles that were subsequently sealed.

After 7 days, the acetone was removed from the bottle and the bottle was immediately transferred to a desiccator and stored for ca. 24 h under vacuum. To facilitate testing, dried samples were divided into two portions. Samples for thermogravimetric (TG), X ray diffraction (XRD), and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) studies were powdered using mortar and pestle to obtain a powder passing a 63- μ m sieve. Immediately after grinding, powdered samples were placed in sealable plastic bags and stored in the desiccator under vacuum until testing. SEM analysis was carried out on fractured fragments. These samples were transferred to an air-tight plastic bottle for storage.

2.5 Testing methods

Conditions in the environmental chamber were measured with several sensing devices to determine apparent gaseous CO₂ concentration, relative

humidity, and temperature within the chamber (all at 10 s intervals). In addition, a novel temperature sensor was utilized to continuously measure, at 5 s intervals, the temperature development of the paste during the mixing process. Details are provided below.

CO₂ concentration in the environmental chamber was measured, at 10 s intervals, with a commercially available CO₂ sensor which uses non-dispersive infrared technology to sense, as a function of transmitted light, the concentration of CO₂ in air (measurement range of 0–100% CO₂ concentration, resolution of 0.01% and accuracy of $\pm 0.5\%$).

Paste temperature during mixing process was measured with a commercially available self-sufficient temperature logger (measurement range of -40 to 85°C , resolution of 0.06°C and accuracy of $\pm 0.5^\circ\text{C}$). The sensor, which was attached to the mixing blade, recorded measurements at 5 s intervals.

Heat of cement hydration was measured using isothermal calorimetry method (the reaction heat rate was measured at constant temperature of 20°C), using TAM Air Isothermal Conduction Calorimeter. Paste samples (5 ± 0.5 g) were collected straight after mixing and transferred to a plastic ampoule, which was immediately placed in a cell of the calibrated calorimeter. Data collection was started exactly 1 h after beginning of paste mixing (ca. 30 min after the placement of the ampoule in the cell).

Thermogravimetric analysis was used to confirm the type and quantify of hydrates developed in the paste samples. Powdered samples of 50 ± 3 mg were examined using Netzsch's STA 449C Jupiter. The temperature was ramped from 25 to 1000°C , at a rate of $20^\circ\text{C}/\text{min}$, in nitrogen atmosphere. The weight loss information, obtained from TG curve and TG first derivative (DTG), were used to estimate the amount of the hydration phases; in particular Ca(OH)₂ and CaCO₃.

Powdered samples were analyzed using XRD, with PANalytical X'Pert PRO diffractometer, to identify the crystalline components. Diffraction patterns were collected between 5° and $65^\circ 2\theta$ with a step size of 0.016° . PANalytical X'Pert Highscore software with the Powder Diffraction File database was employed to elucidate the mineralogy of the samples based on the diffraction patterns.

To qualitatively identify CaCO₃ and Ca(OH)₂ phases powdered samples were analyzed using FTIR. PerkinElmer Spectrum 100 Series FTIR Spectrometer with Attenuated Total Reflectance attachment was used. The spectra were gathered between 550 and 4000 cm⁻¹ wavenumber at 4 cm⁻¹ intervals. Essential FTIR software version 2.00.045 was used to analyze the FTIR spectra.

Tabell for analyse av kjemisk sammensetting, Vidya og Rao

Table 1 Physico-chemical transformation	
Temperature range (°C)	Transformation
27- 110	the evaporable water escapes
110 – 180	loss of water from interlayers of cement paste and aggregate
180 – 400	decomposition of C-S-H gel and evaporation of chemically bound water
400 - 600	dehydroxylation of portlandite
600 - 900	decarbonation of calcium carbonate

Vedlegg F

Densitet av fersk betong

	Referanse	0,36 wt% CO2	0,72 wt% CO2	1,08 wt% CO2
Densitet [kg/m ³]	2425	2423,75	2417,5	2410
Endring fra referanse		-0,1 %	-0,3 %	-0,6 %

Synkmål

	Referanse	0,36 wt% CO2	0,72 wt% CO2	1,08 wt% CO2
Synkmål [cm]	16	5	2,3	1,9
Endring fra referanse		-69 %	-86 %	-88 %

Luftinnhold

	Referanse	0,36 wt% CO2	0,72 wt% CO2	1,08 wt% CO2
Luft [%]	1,0 %	1,4 %	2,8 %	3,0 %
Endring fra referanse		+40 %	+180 %	+200 %

Vedlegg G

Temperaturutvikling - måledata

	Referanse	0,36 wt% CO2	0,72 wt% CO2	1,08 wt% CO2	Romtemperatur
Tid [timer]	Temperatur [°C]				
0	23,0	24,0	24,5	25,5	21,0
0,25	23,0	24,3	24,5	25,5	21,0
0,5	23,0	24,5	24,5	25,5	21,0
0,75	23,3	24,5	24,5	25,8	21,3
1	23,5	24,5	24,5	26,0	21,5
1,25	23,5	24,5	24,5	26,0	21,3
1,5	23,5	24,5	24,5	26,0	21,0
1,75	23,8	24,8	24,8	26,3	21,3
2	24,0	25,0	25,0	26,5	21,5
2,25	24,3	25,0	25,3	26,5	21,3
2,5	24,5	25,0	25,5	26,5	21,0
2,75	24,8	25,3	25,5	27,0	21,0
3	25,0	25,5	25,5	27,5	21,0
3,25	25,5	25,8	25,8	27,8	21,0
3,5	26,0	26,0	26,0	28,0	21,0
3,75	26,5	26,5	26,5	28,8	21,0
4	27,0	27,0	27,0	29,5	21,0
4,25	27,8	27,5	27,3	30,0	21,0
4,5	28,5	28,0	27,5	30,5	21,0
4,75	29,5	28,5	28,3	31,3	21,0
5	30,5	29,0	29,0	32,0	21,0
5,25	31,8	30,0	29,8	33,0	20,8
5,5	33,0	31,0	30,5	34,0	20,5
5,75	34,5	31,8	31,3	35,0	20,5
6	36,0	32,5	32,0	36,0	20,5
6,25	37,5	33,8	33,0	37,3	20,5
6,5	39,0	35,0	34,0	38,5	20,5

	Referanse	0,36 wt% CO2	0,72 wt% CO2	1,08 wt% CO2	Romtemperatur
Tid [timer]	Temperatur [°C]				
6,75	40,3	36,8	35,3	39,8	20,5
7	41,5	38,5	36,5	41,0	20,5
7,25	42,5	40,0	37,8	42,0	20,5
7,5	43,5	41,5	39,0	43,0	20,5
7,75	44,0	42,5	40,3	43,5	20,5
8	44,5	43,5	41,5	44,0	20,5
8,25	45,0	44,3	42,3	44,5	20,5
8,5	45,5	45,0	43,0	45,0	20,5
8,75	46,0	45,5	43,5	45,5	20,8
9	46,5	46,0	44,0	46,0	21,0
9,25	46,8	46,3	44,5	46,3	21,0
9,5	47,0	46,5	45,0	46,5	21,0
9,75	47,0	46,8	45,3	46,8	20,8
10	47,0	47,0	45,5	47,0	20,5
10,25	47,3	47,3	45,8	47,0	20,8
10,5	47,5	47,5	46,0	47,0	21,0
10,75	47,5	47,5	46,0	47,0	21,0
11	47,5	47,5	46,0	47,0	21,0
11,25	47,3	47,5	46,0	46,8	21,0
11,5	47,0	47,5	46,0	46,5	21,0
11,75	47,0	47,5	46,0	46,3	21,0
12	47,0	47,5	46,0	46,0	21,0
12,25	47,0	47,5	46,0	46,0	21,0
12,5	47,0	47,5	46,0	46,0	21,0
12,75	46,8	47,3	45,8	45,8	21,0
13	46,5	47,0	45,5	45,5	21,0
13,25	46,3	46,8	45,5	45,3	21,0
13,5	46,0	46,5	45,5	45,0	21,0

	Referanse	0,36 wt% CO2	0,72 wt% CO2	1,08 wt% CO2	Romtemperatur
Tid [timer]	Temperatur [°C]				
13,75	45,8	46,3	45,3	44,8	21,0
14	45,5	46,0	45,0	44,5	21,0
14,25	45,3	45,8	44,8	44,3	21,0
14,5	45,0	45,5	44,5	44,0	21,0
14,75	44,8	45,3	44,3	43,8	21,0
15	44,5	45,0	44,0	43,5	21,0
15,25	44,3	44,8	43,5	43,0	21,0
15,5	44,0	44,5	43,0	42,5	21,0
15,75	43,8	44,3	43,0	42,5	21,0
16	43,5	44,0	43,0	42,5	21,0
16,25	43,5	43,8	42,8	42,0	21,0
16,5	43,5	43,5	42,5	41,5	21,0
16,75	43,3	43,5	42,3	41,3	20,8
17	43,0	43,5	42,0	41,0	20,5
17,25	42,8	43,0	41,8	40,8	20,8
17,5	42,5	42,5	41,5	40,5	21,0
17,75	42,3	42,3	41,3	40,3	21,0
18	42,0	42,0	41,0	40,0	21,0
18,25	41,8	41,8	40,5	39,8	21,0
18,5	41,5	41,5	40,0	39,5	21,0
18,75	41,3	41,3	40,0	39,3	20,8
19	41,0	41,0	40,0	39,0	20,5
19,25	40,8	40,8	39,8	38,8	20,8
19,5	40,5	40,5	39,5	38,5	21,0
19,75	40,3	40,3	39,0	38,3	21,0
20	40,0	40,0	38,5	38,0	21,0
20,25	39,8	39,8	38,3	37,8	21,3

	Referanse	0,36 wt% CO2	0,72 wt% CO2	1,08 wt% CO2	Romtemperatur
Tid [timer]	Temperatur [°C]				
20,5	39,5	39,5	38,0	37,5	21,5
20,75	39,3	39,3	38,0	37,0	21,8
21	39,0	39,0	38,0	36,5	22,0
21,25	38,8	38,8	37,8	36,3	22,0
21,5	38,5	38,5	37,5	36,0	22,0
21,75	38,3	38,3	37,3	35,8	22,3
22	38,0	38,0	37,0	35,5	22,5
22,25	37,8	37,8	36,5	35,5	22,5
22,5	37,5	37,5	36,0	35,5	22,5
22,75	37,3	37,3	35,8	35,0	22,8
23	37,0	37,0	35,5	34,5	23,0
23,25	36,8	36,8	35,5	34,5	23,0
23,5	36,5	36,5	35,5	34,5	23,0
23,75	36,3	36,3	35,0	34,3	23,3
24	36,0	36,0	34,5	34,0	23,5
24,25	35,8	36,0	34,5	33,8	23,5
24,5	35,5	36,0	34,5	33,5	23,5
24,75	35,3	35,8	34,3	33,3	23,8
25	35,0	35,5	34,0	33,0	24,0
25,25	35,0	35,3	34,0	33,0	24,0
25,5	35,0	35,0	34,0	33,0	24,0
25,75	34,8	34,8	33,8	32,8	23,8
26	34,5	34,5	33,5	32,5	23,5
26,25	34,3	34,5	33,3	32,3	23,3
26,5	34,0	34,5	33,0	32,0	23,0
26,75	33,8	34,3	32,8	32,0	23,0
27	33,5	34,0	32,5	32,0	23,0

	Referanse	0,36 wt% CO2	0,72 wt% CO2	1,08 wt% CO2	Romtemperatur
Tid [timer]	Temperatur [°C]				
27,25	33,3	34,0	32,3	31,8	23,0
27,5	33,0	34,0	32,0	31,5	23,0
27,75	33,0	33,5	32,0	31,3	23,0
28	33,0	33,0	32,0	31,0	23,0
28,25	32,8	32,8	31,8	30,8	22,5
28,5	32,5	32,5	31,5	30,5	22,0
28,75	32,3	32,5	31,3	30,5	22,3
29	32,0	32,5	31,0	30,5	22,5
29,25	32,0	32,3	31,0	30,5	22,3
29,5	32,0	32,0	31,0	30,5	22,0
29,75	31,8	32,0	30,8	30,3	21,8
30	31,5	32,0	30,5	30,0	21,5
30,25	31,3	31,8	30,5	29,8	21,8
30,5	31,0	31,5	30,5	29,5	22,0
30,75	31,0	31,5	30,3	29,5	22,0
31	31,0	31,5	30,0	29,5	22,0
31,25	30,8	31,3	30,0	29,3	21,8
31,5	30,5	31,0	30,0	29,0	21,5
31,75	30,5	30,8	29,8	29,0	21,8
32	30,5	30,5	29,5	29,0	22,0
32,25	30,3	30,5	29,5	28,8	21,8
32,5	30,0	30,5	29,5	28,5	21,5
32,75	30,0	30,5	29,5	28,5	21,5
33	30,0	30,5	29,5	28,5	21,5
33,25	29,8	30,3	29,3	28,3	21,8
33,5	29,5	30,0	29,0	28,0	22,0
33,75	29,5	30,0	28,8	28,0	22,0

	Referanse	0,36 wt% CO2	0,72 wt% CO2	1,08 wt% CO2	Romtemperatur
Tid [timer]	Temperatur [°C]				
34	29,5	30,0	28,5	28,0	22,0
34,25	29,3	29,8	28,5	27,8	22,0
34,5	29,0	29,5	28,5	27,5	22,0
34,75	29,0	29,5	28,3	27,5	22,0
35	29,0	29,5	28,0	27,5	22,0
35,25	28,8	29,3	28,0	27,5	22,3
35,5	28,5	29,0	28,0	27,5	22,5
35,75	28,3	29,0	27,8	27,3	22,3
36	28,0	29,0	27,5	27,0	22,0
36,25	28,0	28,8	27,5	27,0	22,0
36,5	28,0	28,5	27,5	27,0	22,0
36,75	28,0	28,5	27,3	26,8	22,0
37	28,0	28,5	27,0	26,5	22,0
37,25	27,8	28,3	27,0	26,5	22,0
37,5	27,5	28,0	27,0	26,5	22,0
37,75	27,5	28,0	27,0	26,5	22,0
38	27,5	28,0	27,0	26,5	22,0
38,25	27,3	28,0	26,8	26,3	22,0
38,5	27,0	28,0	26,5	26,0	22,0
38,75	27,0	27,8	26,5	26,0	22,0
39	27,0	27,5	26,5	26,0	22,0
39,25	27,0	27,5	26,3	25,8	22,0
39,5	27,0	27,5	26,0	25,5	22,0
39,75	26,8	27,3	26,0	25,5	22,0
40	26,5	27,0	26,0	25,5	22,0
40,25	26,5	27,0	26,0	25,3	22,0
40,5	26,5	27,0	26,0	25,0	22,0

	Referanse	0,36 wt% CO2	0,72 wt% CO2	1,08 wt% CO2	Romtemperatur
Tid [timer]	Temperatur [°C]				
40,75	26,3	26,8	25,8	25,0	22,0
41	26,0	26,5	25,5	25,0	22,0
41,25	26,0	26,5	25,5	25,0	22,3
41,5	26,0	26,5	25,5	25,0	22,5
41,75	26,0	26,5	25,3	25,0	22,3
42	26,0	26,5	25,0	25,0	22,0
42,25	25,8	26,5	25,0	24,8	21,8
42,5	25,5	26,5	25,0	24,5	21,5
42,75	25,5	26,3	25,0	24,5	21,8
43	25,5	26,0	25,0	24,5	22,0
43,25	25,5	26,0	25,0	24,5	21,8
43,5	25,5	26,0	25,0	24,5	21,5
43,75	25,3	25,8	24,8	24,3	21,5
44	25,0	25,5	24,5	24,0	21,5
44,25	25,0	25,5	24,5	24,0	21,5
44,5	25,0	25,5	24,5	24,0	21,5
44,75	24,8	25,5	24,3	24,0	21,5
45	24,5	25,5	24,0	24,0	21,5
45,25	24,5	25,3	24,3	23,8	21,8
45,5	24,5	25,0	24,5	23,5	22,0
45,75	24,5	25,3	24,3	23,5	21,8
46	24,5	25,5	24,0	23,5	21,5
46,25	24,5	25,3	24,0	23,3	21,5
46,5	24,5	25,0	24,0	23,0	21,5
46,75	24,3	24,8	23,8	23,0	21,5
47	24,0	24,5	23,5	23,0	21,5
47,25	24,0	24,5	23,5	23,0	21,5

	Referanse	0,36 wt% CO2	0,72 wt% CO2	1,08 wt% CO2	Romtemperatur
Tid [timer]	Temperatur [°C]				
47,5	24,0	24,5	23,5	23,0	21,5
47,75	23,8	24,5	23,3	23,0	21,3
48	23,5	24,5	23,0	23,0	21,0
48,25	23,5	24,5	23,0	22,8	21,5
48,5	23,5	24,5	23,0	22,5	22,0
48,75	23,5	24,3	23,0	22,5	21,8
49	23,5	24,0	23,0	22,5	21,5
49,25	23,5	24,0	23,0	22,8	21,5
49,5	23,5	24,0	23,0	23,0	21,5
49,75	23,3	24,0	23,0	23,0	21,5
50	23,0	24,0	23,0	23,0	21,5
50,25	23,0	24,0	22,8	22,8	21,3
50,5	23,0	24,0	22,5	22,5	21,0
50,75	23,0	23,8	22,5	22,5	21,3
51	23,0	23,5	22,5	22,5	21,5
51,25	23,0	23,5	22,5	22,3	21,3
51,5	23,0	23,5	22,5	22,0	21,0
51,75	22,8	23,5	22,5	22,3	21,0
52	22,5	23,5	22,5	22,5	21,0
52,25	22,8	23,5	22,5	22,5	21,0
52,5	23,0	23,5	22,5	22,5	21,0
52,75	22,8	23,5	22,5	22,5	21,0
53	22,5	23,5	22,5	22,5	21,0
53,25	22,5	23,5	22,5	22,3	21,0
53,5	22,5	23,5	22,5	22,0	21,0
53,75	22,5	23,5	22,3	22,0	21,0
54	22,5	23,5	22,0	22,0	21,0

	Referanse	0,36 wt% CO2	0,72 wt% CO2	1,08 wt% CO2	Romtemperatur
Tid [timer]	Temperatur [°C]				
54,25	22,5	23,3	22,0	22,0	20,8
54,5	22,5	23,0	22,0	22,0	20,5
54,75	22,5	23,0	22,0	22,3	20,5
55	22,5	23,0	22,0	22,5	20,5
55,25	22,5	23,3	22,0	22,3	20,5
55,5	22,5	23,5	22,0	22,0	20,5
55,75	22,5	23,3	22,0	22,0	20,8
56	22,5	23,0	22,0	22,0	21,0
56,25	22,5	23,0	22,0	22,0	20,8
56,5	22,5	23,0	22,0	22,0	20,5
56,75	22,3	23,0	22,0	22,0	20,8
57	22,0	23,0	22,0	22,0	21,0
57,25	22,0	23,0	22,0	22,0	21,0
57,5	22,0	23,0	22,0	22,0	21,0
57,75	22,0	23,0	22,0	21,8	21,0
58	22,0	23,0	22,0	21,5	21,0
58,25	22,0	23,0	22,0	21,5	21,0
58,5	22,0	23,0	22,0	21,5	21,0
58,75	22,0	23,0	22,0	21,5	21,3
59	22,0	23,0	22,0	21,5	21,5
59,25	22,0	22,8	21,8	21,5	21,3
59,5	22,0	22,5	21,5	21,5	21,0
59,75	22,0	22,5	21,5	21,5	21,0
60	22,0	22,5	21,5	21,5	21,0
60,25	22,0	22,5	21,5	21,5	21,0
60,5	22,0	22,5	21,5	21,5	21,0
60,75	21,8	22,5	21,5	21,5	21,3

	Referanse	0,36 wt% CO2	0,72 wt% CO2	1,08 wt% CO2	Romtemperatur
Tid [timer]	Temperatur [°C]				
61	21,5	22,5	21,5	21,5	21,5
61,25	21,5	22,5	21,5	21,5	21,5
61,5	21,5	22,5	21,5	21,5	21,5
61,75	21,5	22,5	21,5	21,3	21,3
62	21,5	22,5	21,5	21,0	21,0
62,25	21,5	22,3	21,5	21,0	21,0
62,5	21,5	22,0	21,5	21,0	21,0
62,75	21,5	22,0	21,5	21,3	21,0
63	21,5	22,0	21,5	21,5	21,0
63,25	21,5	22,0	21,3	21,3	21,0
63,5	21,5	22,0	21,0	21,0	21,0
63,75	21,3	22,0	21,0	21,0	21,0
64	21,0	22,0	21,0	21,0	21,0
64,25	21,0	22,0	21,0	21,0	21,0
64,5	21,0	22,0	21,0	21,0	21,0
64,75	21,0	22,0	21,0	21,0	21,0
65	21,0	22,0	21,0	21,0	21,0
65,25	21,0	22,0	21,0	21,0	20,8
65,5	21,0	22,0	21,0	21,0	20,5
65,75	21,0	22,0	21,0	21,0	21,0
66	21,0	22,0	21,0	21,0	21,5
66,25	21,0	22,0	21,0	21,0	21,3
66,5	21,0	22,0	21,0	21,0	21,0
66,75	21,0	22,0	21,0	20,8	20,8
67	21,0	22,0	21,0	20,5	20,5
67,25	21,0	21,8	20,8	20,5	20,8
67,5	21,0	21,5	20,5	20,5	21,0

	Referanse	0,36 wt% CO2	0,72 wt% CO2	1,08 wt% CO2	Romtemperatur
Tid [timer]	Temperatur [°C]				
67,75	20,8	21,5	20,5	20,5	20,8
68	20,5	21,5	20,5	20,5	20,5
68,25	20,5	21,5	20,5	20,5	20,5
68,5	20,5	21,5	20,5	20,5	20,5
68,75	20,5	21,5	20,5	20,5	20,5
69	20,5	21,5	20,5	20,5	20,5
69,25	20,5	21,5	20,5	20,5	20,5
69,5	20,5	21,5	20,5	20,5	20,5
69,75	20,5	21,5	20,8	20,5	20,8
70	20,5	21,5	21,0	20,5	21,0

Vedlegg H

Akkumulert isoterm varmeutvikling – Inndata i regneark "Herdekassen"

Referanse

(v 2.8 ss 06-02-2012)

Concrete parameters

Temp. trans. coeff.	0,0526
Density	2379
Heat capacity (fresh)	1,04
Heat capacity (hardened)	1,04
Cement content	299
Set time	4
A - set time	33500
B - set time	1470
A - hydration	33500
B - hydration	1470
Adia. start temperature	20

Temp. trans. coeff.

dQ/dm	0
m>	22
m<	76

Heat function

m-limit	80
Q_{∞}	292
τ	7,42
α	2,12
R^2	0,9975
$\Sigma\Delta Q$	11993

Spesifikk varmekapasitet [kJ/kg°C]			
Vann	Sement	Sand	Stein
4,2	0,8	0,8	0,8
Resept [kg/m ³]			
Materiale			
Vann	178,58		
Sement	299,3		
Sand	832,9		
Stein	1053,1		
Densitet	2379		
Samlet varmekapasitet	1,04		

0,36 wt% CO2

(v 2.8 ss 06-02-2012)

Concrete parameters

Temp. trans. coeff.	0,0507
Density	2379
Heat capacity (fresh)	1,04
Heat capacity (hardened)	1,04
Cement content	299
Set time	4,9
A - set time	33500
B - set time	1470
A - hydration	33500
B - hydration	1470
Adia. start temperature	20

Temp. trans. coeff.

dQ/dm	0
m>	22
m<	76

Heat function

m-limit	80
Q_{∞}	278
τ	8,35
α	2,46
R^2	0,9951
$\Sigma\Delta Q$	12045

Spesifikk varmekapasitet [kJ/kg°C]			
Vann	Sement	Sand	Stein
4,2	0,8	0,8	0,8
Resept [kg/m ³]			
Materiale			
Vann	178,58		
Sement	299,3		
Sand	832,9		
Stein	1053,1		
Densitet	2379		
Samlet varmekapasitet	1,04		

0,72 wt% CO2

(v 2.8 ss 06-02-2012)

Concrete parameters

Temp. trans. coeff.	0,0575
Density	2379
Heat capacity (fresh)	1,04
Heat capacity (hardened)	1,04
Cement content	299
Set time	5,5
A - set time	33500
B - set time	1470
A - hydration	33500
B - hydration	1470
Adia. start temperature	20

Temp. trans. coeff.

dQ/dm	0
m>	22
m<	76

Heat function

m-limit	80
Q_{∞}	273
τ	8,72
α	2,43
R^2	0,9961
$\Sigma\Delta Q$	12987

Spesifikk varmekapasitet [kJ/kg°C]			
Vann	Sement	Sand	Stein
4,2	0,8	0,8	0,8
Resept [kg/m ³]			
Materiale			
Vann	178,58		
Sement	299,3		
Sand	832,9		
Stein	1053,1		
Densitet	2379		
Samlet varmekapasitet	1,04		

1,08 wt% CO2

(v 2.8 ss 06-02-2012)

Concrete parameters

Temp. trans. coeff.	0,0621
Density	2379
Heat capacity (fresh)	1,04
Heat capacity (hardened)	1,04
Cement content	299
Set time	4,2
A - set time	33500
B - set time	1470
A - hydration	33500
B - hydration	1470
Adia. start temperature	20

Temp. trans. coeff.

dQ/dm	0
m>	22
m<	76

Heat function

m-limit	80
Q_{∞}	283
τ	8,22
α	2,18
R^2	0,9943
$\Sigma\Delta Q$	12890

Spesifikk varmekapasitet [kJ/kg°C]			
Vann	Sement	Sand	Stein
4,2	0,8	0,8	0,8
Resept [kg/m³]			
Materiale			
Vann	178,58		
Sement	299,3		
Sand	832,9		
Stein	1053,1		
Densitet	2379		
Samlet varmekapasitet	1,04		

Vedlegg I
Trykkfasthet

Dato	Resept	Nummer	Herdetid	Trykkfasthet	Gjennomsnitt	Standardavvik
07.mai	Referanse	1	1 døgn	30,46	30,51	0,14
07.mai	Referanse	2	1 døgn	30,67		
07.mai	Referanse	3	1 døgn	30,4		
07.mai	0,36 wt%	1	1 døgn	29,35	29,92	0,54
07.mai	0,36 wt%	2	1 døgn	30,42		
07.mai	0,36 wt%	3	1 døgn	29,98		
07.mai	0,72 wt%	1	1 døgn	28,7	29,01	0,83
07.mai	0,72 wt%	2	1 døgn	28,37		
07.mai	0,72 wt%	3	1 døgn	29,95		
07.mai	1,08 wt%	1	1 døgn	29,41	29,28	0,58
07.mai	1,08 wt%	2	1 døgn	29,79		
07.mai	1,08 wt%	3	1 døgn	28,65		
09.mai	Referanse	1	3 døgn	38,81	38,75	0,86
09.mai	Referanse	2	3 døgn	37,87		
09.mai	Referanse	3	3 døgn	39,58		
09.mai	0,36 wt%	1	3 døgn	41,01	40,96	0,73
09.mai	0,36 wt%	2	3 døgn	40,21		
09.mai	0,36 wt%	3	3 døgn	41,67		
09.mai	0,72 wt%	1	3 døgn	38,04	39,34	1,99
09.mai	0,72 wt%	2	3 døgn	38,34		
09.mai	0,72 wt%	3	3 døgn	41,63		
09.mai	1,08 wt%	1	3 døgn	41,16	39,82	1,27
09.mai	1,08 wt%	2	3 døgn	38,63		
09.mai	1,08 wt%	3	3 døgn	39,68		

Dato	Resept	Nummer	Herdetid	Trykkfasthet	Gjennomsnitt	Standardavvik
13.mai	Referanse	1	7 døgn	44,09	44,74	0,57
13.mai	Referanse	2	7 døgn	45,16		
13.mai	Referanse	3	7 døgn	44,96		
13.mai	0,36 wt%	1	7 døgn	45,85	46,37	0,91
13.mai	0,36 wt%	2	7 døgn	45,85		
13.mai	0,36 wt%	3	7 døgn	47,42		
13.mai	0,72 wt%	1	7 døgn	44,91	45,66	0,84
13.mai	0,72 wt%	2	7 døgn	45,49		
13.mai	0,72 wt%	3	7 døgn	46,57		
13.mai	1,08 wt%	1	7 døgn	41,83	44,82	2,62
13.mai	1,08 wt%	2	7 døgn	46,68		
13.mai	1,08 wt%	3	7 døgn	45,96		
03.jun	Referanse	1	28 døgn	52,17	53,40	1,42
03.jun	Referanse	2	28 døgn	54,95		
03.jun	Referanse	3	28 døgn	53,07		
03.jun	0,36 wt%	1	28 døgn	54,57	53,66	1,19
03.jun	0,36 wt%	2	28 døgn	54,09		
03.jun	0,36 wt%	3	28 døgn	52,32		
03.jun	0,72 wt%	1	28 døgn	54,92	52,99	1,83
03.jun	0,72 wt%	2	28 døgn	51,28		
03.jun	0,72 wt%	3	28 døgn	52,76		
03.jun	1,08 wt%	1	28 døgn	51,29	53,91	2,27
03.jun	1,08 wt%	2	28 døgn	55,34		
03.jun	1,08 wt%	3	28 døgn	55,1		

Vedlegg J

Elastisitetsmodul, Spaltestrekkfasthet og Bøyestrekfasthet

Elastisitetsmodul	Referanse	0,36 wt%	0,72 wt%	1,08 wt%
Trykkfasthet [kN]	42,72	42,93	42,39	43,13
Øvre spenning [kN]	14,24	14,31	14,13	14,38
Nedre spenning [kN]	5,34	5,37	5,30	5,39
Forhåndslast spenning [kN]	2,92	2,93	2,90	2,95
Gjennomsnittstøyning ved øvre spenning for tredje lastsyklus [mm]	0,086	0,081	0,088	0,092
Gjennomsnittstøyning ved nedre spenning for andre lastsyklus [mm]	0,023	0,019	0,022	0,032
Avstand mellom tøyningmålere [mm]	200	200	200	200
Elastisitetsmodul [GPa]	28,25	28,85	26,76	29,95
Endring		2,1 %	-5,3 %	6,0 %

Spaltestrekkfasthet	Referanse	0,36 wt%	0,72 wt%	1,08 wt%
Bruddlast [kN]	193,12	195,68	197,45	206,95
Lengde [mm]	280	280	280	280
Diameter [mm]	150	150	150	150
Spaltestrekkfasthet [MPa]	2,93	2,97	2,99	3,14
Endring		1,3 %	2,2 %	7,2 %

Bøyestrekfasthet	Referanse	0,36 wt%	0,72 wt%	1,08 wt%
Bruddlast [kN]	7,71	8,22	8,34	7,3
Lengde [mm]	450	450	450	450
Tverrsnitt [mm]	100	100	100	100
Bøyestrekfasthet [MPa]	3,4695	3,699	3,753	3,285
Endring		6,6 %	8,2 %	-5,3 %

Vedlegg K

Porøsitet og herdet densitet

Resept /Prøvenummer	Referanse /1	Referanse /2	Referanse /3	0,36 wt%/1	0,36 wt%/2	0,36 wt%/3
G1 [kg]	0,2788	0,2764	0,2704	0,2799	0,2858	0,2745
G2 [kg]	0,2978	0,295	0,289	0,2972	0,3023	0,2908
G3 [kg]	0,1728	0,1715	0,168	0,1732	0,1763	0,1698
G4 [kg]	0,3001	0,2984	0,2921	0,3	0,3057	0,2937
Volum [m ³]	0,000125	0,000123 5	0,000121	0,000124	0,000126	0,000121
Tørr densitet [kg/m ³]	2230,40	2238,06	2234,71	2257,26	2268,25	2268,60
Fast-stoff densitet [kg/m ³]	2688,525	2723,153	2723,061	2693,936	2693,685	2696,464
Sug porøsitet	0,152	0,151	0,154	0,140	0,131	0,135
Makro porøsitet	0,018	0,028	0,026	0,023	0,027	0,024
Total porøsitet	0,170	0,178	0,179	0,162	0,158	0,159

Snitt	Referanse	0,36 wt%
Volum [m ³]	0,000	0,000
Tørr densitet [kg/m ³]	2234,389	2264,702
Endring		1,4 %
Fast-stoff densitet [kg/m ³]	2711,580	2694,695
Endring		-0,6 %
Sug porøsitet	0,152	0,135
Endring		-11,2 %
Makro porøsitet	0,024	0,025
Endring		2,8 %
Total porøsitet	0,176	0,160
Endring		-9,3 %

Porøsitet og herdet densitet, 0,72 wt% CO2 og 1,08 wt – PF-metoden, begrenset prosedyre

Resept /Prøvenummer	0,72 wt%/1	0,72 wt%/2	0,72 wt%/3	1,08 wt%/1	1,08 wt%/2	1,08 wt%/3
G1 [kg]	0,2778	0,2868	0,2684	0,2782	0,273	0,2757
G2 [kg]	0,2952	0,3045	0,2854	0,2964	0,2911	0,2935
G3 [kg]	0,1702	0,1795	0,1664	0,1734	0,1691	0,1705
G4 [kg]	0,298	0,3075	0,2886	0,2984	0,2947	0,2967
Volum [m ³]	0,000125	0,000125	0,000119	0,000123	0,000122	0,000123
Tørr densitet [kg/m ³]	2222,40	2294,40	2255,46	2261,79	2237,70	2241,46
Fast-stoff densitet [kg/m ³]	2650,763	2749,760	2716,599	2706,226	2721,834	2702,941
Sug porøsitet	0,139	0,142	0,143	0,148	0,148	0,145
Makro porøsitet	0,022	0,024	0,027	0,016	0,030	0,026
Total porøsitet	0,162	0,166	0,170	0,164	0,178	0,171

Snitt	0,72 wt%	1,08 wt%
Volum [m ³]	0,000	0,000
Tørr densitet [kg/m ³]	2257,421	2246,986
Endring	1,0 %	0,6 %
Fast-stoff densitet [kg/m ³]	2705,708	2710,334
Endring	-0,2 %	0,0 %
Sug porøsitet	0,141	0,147
Endring	-7,2 %	-3,3 %
Makro porøsitet	0,024	0,024
Endring	2,4 %	0,3 %
Total porøsitet	0,166	0,171
Endring	-5,9 %	-2,9 %

Vedlegg L

pH-verdi

	Referanse	0,36 wt%	0,72 wt%	1,08 wt%
pH-verdi	12,3	12,3	12,3	12,3

Vedlegg M

SEM



9 Jun 2020 15:29:28
Betong sample 0_09.06.20_16.tif

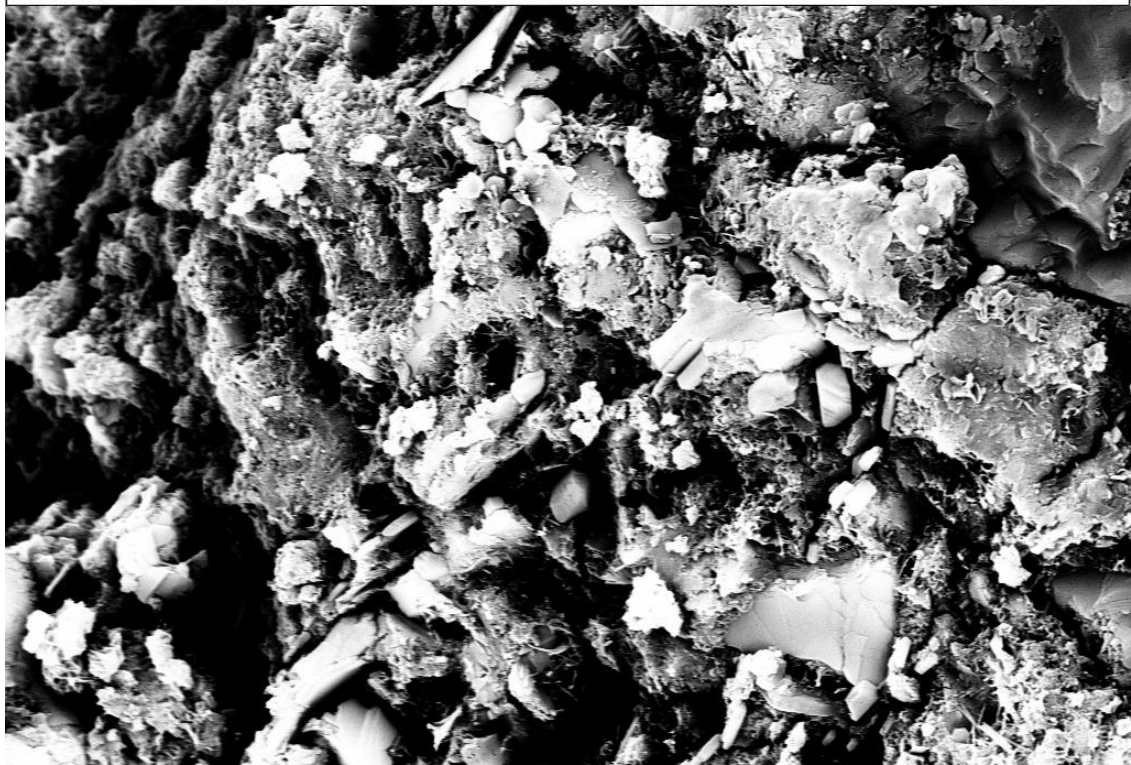
3 μm

Mag = 10.00 K X
Pixel Size = 36.725 nm

Brightness = 29.4 %
Contrast = 65.9 %

Aperture Size = 60.00 μm
EHT = 20.00 kV
WD = 13.4 mm

Scan Speed = 7
Signal A = QBSD



9 Jun 2020 15:12:07
Betong sample 1_09.06.20_15.tif

2 μm

Mag = 10.00 K X
Pixel Size = 36.725 nm

Brightness = 27.0 %
Contrast = 89.3 %

Aperture Size = 60.00 μm
EHT = 20.00 kV
WD = 12.8 mm

Scan Speed = 7
Signal A = QBSD



9 Jun 2020 15:21:46
Betong sample 2_09.06.20_26.tif

2 μ m

Mag = 10.00 K X
Pixel Size = 36.725 nm

Brightness = 28.4 %
Contrast = 96.2 %

Aperture Size = 60.00 μ m
EHT = 20.00 kV
WD = 14.1 mm

Scan Speed = 7
Signal A = QBSD



9 Jun 2020 15:04:27
Betong sample 3_09.06.20_11.tif

2 μ m

Mag = 10.00 K X
Pixel Size = 36.725 nm

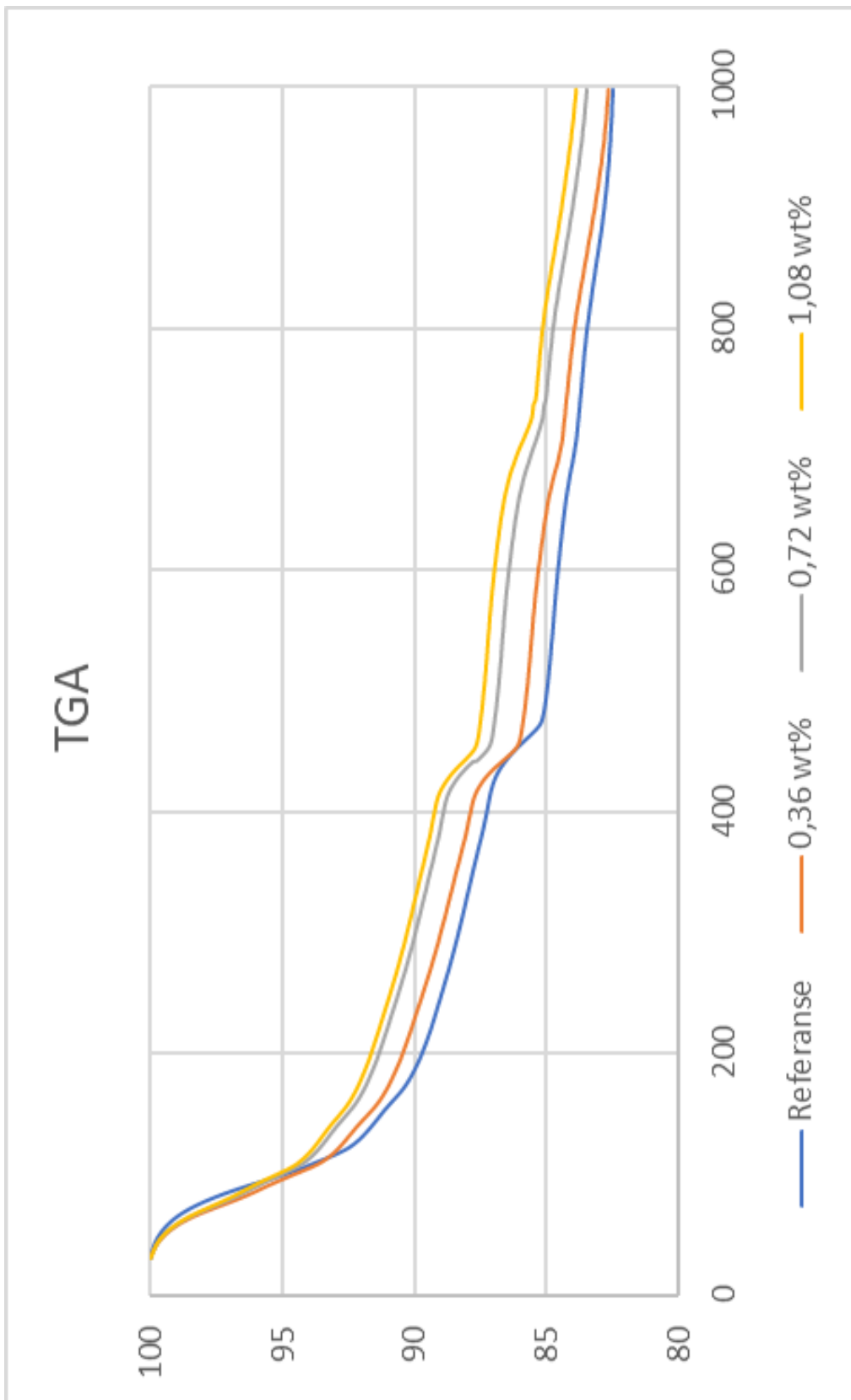
Brightness = 23.9 %
Contrast = 68.7 %

Aperture Size = 60.00 μ m
EHT = 20.00 kV
WD = 10.9 mm

Scan Speed = 7
Signal A = QBSD

Vedlegg N

TGA



Massetap	Referanse	0,36 wt%	0,72 wt%	1,08 wt%
180-400 °C	2,89 %	2,98 %	2,84 %	2,79 %
400-600 °C	2,69 %	2,57 %	2,48 %	2,27 %
600-900 °C	1,76 %	2,14 %	2,41 %	2,55 %
Andel CO2/Kalsiumkarbonat				
		0,36 wt%	0,72 wt%	1,08 wt%
CO2		0,39 %	0,66 %	0,79 %
Kalsiumkarbonat		0,88 %	1,49 %	1,79 %