



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og Materialer med byggkonstruksjoner som spesialisering	Vårsemesteret, 2020 Åpen
Forfattere: Glenn Østreim Levang og Ole Emil Karlsen	Signatur: <i>Glenn Levang</i> <i>Ole Emil Karlsen</i>
Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså Veileder(e): Kjell Tore Fosså og Tor Arne Hammer	
Tittel på masteroppgaven: Varmeherdning av UHPC – effekt av temperatureksponering og bindemiddeltype på trykkfasthet Engelsk tittel: Heat treatment of UHPC – effect of temperature exposure and binder composition on the compressive strength	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Betong / Concrete UHPC Varmebehandling / Heat treatment Trykkfasthet / Compressive strength	Sidetall: 102 + vedlegg/annet: 42 Stavanger, 13.06.2020 dato/år

Forord

Denne masteroppgaven ble gjennomført ved instituttet for maskin, bygg og materialteknologi på Universitetet i Stavanger våren 2020. Oppgaven ble utviklet i samarbeid med forskningsinstituttet SINTEF.

Den omhandler et materialkarakteriseringsprogram av ultra høyfast betong (UHPC). Oppgavens formål var å kartlegge hvilken effekt tidlig varmepåføring har for trykkfastheten til UHPC med ulike typer bindemiddel og ulikt pozzolan-innhold.

Vi har i løpet av et femårig studium ved Universitetet i Stavanger utviklet god teoretisk- og praktisk kunnskap innenfor betongteknologi grunnet et omfattende undervisningsprogram. Betongteknologi har vært en del av vår interesse de siste 5 årene ved Universitetet i Stavanger. Vi har tidligere utarbeidet en bacheloroppgave sammen, hvor oppgaven tok for seg glidestøp med selvkomprimerende betong (SKB).

Vi vil benytte anledningen å takke vår eksterne veileder fra SINTEF, Tor Arne Hammer, for veiledning og utvikling av denne oppgaven. Vi ønsker å takke Kjell Tore Fosså for hans gode veiledning og støtte igjennom hele oppgaveforløpet. Alt praktisk arbeid ble utført i betonglaboratoriet ved Ivar Langenes hus ved Universitetet i Stavanger. Nøye planlegging og alt av praktisk arbeid ble utført i tett samarbeid med overingeniør Jarle Berge, og vi ønsker rette vår takknemlighet for alt av veiledning og profesjonelt samarbeid.

Sammendrag

Ultra høyfast betong (UHPC) er karakterisert som en kompakt matriks med høy kompresjon- og strekkfasthet. UHPC har et lavt v/b-tall og støpeligheten blir kompensert ved tilsetning av supelastiserende midler (SP). Denne oppgaven tar for seg UHPC og hvordan tidlig påført varme påvirker trykkfastheten. Det ble totalt planlagt 16 batcher, hvor intensjonene ved de første 8 var å utvikle ulike referanseblandinger og inpsisere deres trykkfasthetsutvikling under standard herdebetingelser, plastiske egenskaper og varmeutviklingsforløp. De resterende 8 blandingene skulle ta for seg 7 ulike herdeforløp og hvordan dette påvirket trykkfastheten. På grunn av en uforutsett pandemi ble resultatene noe påvirket og de to siste blandingene utgikk fra denne oppgaven. Referanseblandingen tok utgangspunkt i 4 forskjellig bindemiddelkomposisjoner og to ulike mengder silika-tilsetninger. Resultatene viser store variasjoner knyttet til varmeutvikling for ulike bindemiddelkomposisjoner, og som følge store forskjeller knyttet til tidlig fasthet og fasthetsutvikling, men forskjellene ble mindre for slutfastheten. Effekten fra varmebehandlingen ble mindre enn forventet, men resultatene viser at økende mengde silika har større effekt av varmebehandlingen.

Innledning

Ultra høyfast betong (UHPC) har blitt utviklet over de siste tre tiårene, og kjennetegnes ved høy trykkfasthet og god durabilitet. Ved bruk av fiber refereres materialet ofte som ultra høyfast fiberbetong (UHPFRC), men i denne oppgaven benyttes UHPC. Fordelene ved å benytte UHPC kontra normal styrke betong er mange. En økning av mekaniske egenskaper som trykk- og strekkfasthet vil reduserer tverrsnittsarealer og igjen lede til mindre konstruksjoner; dette kan også bidra til å redusere CO₂-utslipp. UHPC har høy densitet som bidrar til god durabilitet, og sammenlignet med normal styrke betong øker motstanden mot brann og kjemiske angrep. Ved nåværende tidspunkt finnes det ingen norsk utviklet standard som tar for seg forskrifter ved bruken av UHPC.

Denne oppgavens mål var å se på varmebehandling av UHPC terninger og hvordan trykkfastheten ble påvirket. Den første fasen av oppgaven omhandler en litterær gjennomgang av bestanddelene benyttet i UHPC, deres påvirkning på mekaniske egenskaper som varmetvikling, plastiske egenskaper og trykkfasthet, og effekt fra varmebehandling. Videre bærer oppgaven frem en beskrivelse av utførelse, resultat av utførelse og en videre analyse av resultatene.

Innholdsfortegnelse

Forord	ii
Sammendrag	iii
Innledning	iv
Figurliste	viii
Tabell-liste	xi
Formelliste	xii
1 Teori	1
1.1 Historie	1
1.2 Betongens bestanddeler	3
1.2.1 Tilslag.....	4
1.2.2 Sement	5
1.2.3 Superplastiserende tilsetningsstoff	7
1.2.4 Fiber.....	8
1.2.5 Pozzolaner	9
1.3 Støpelighet	11
1.4 Hydratisering av sement	15
1.5 Pozzolan-reaksjon og dens temperatureffekt	21
1.6 Varmebehandling.....	23
1.7 Varmeutvikling	27
1.8 Autogent svinn	30
1.9 Trykkfasthet	33
1.10 Elastisitetsmodul.....	34
2 Metode	37
2.1 Tilslagetts fuktighet.....	37

2.2	<i>Betongens støpelighet</i>	37
2.3	<i>Densitet og luftinnhold</i>	38
2.4	<i>Referanseblandingens temperaturutvikling</i>	40
2.5	<i>Herdeforhold</i>	41
2.6	<i>Trykkfasthet</i>	42
2.7	<i>Sekantmodul for elastisitet under trykk</i>	44
2.8	<i>Autogent svinn</i>	46
3	Forskningsplan	49
3.1	<i>Prøvebetegnelser</i>	49
3.2	<i>Betongens innhold</i>	51
3.3	<i>Referanseblandinger</i>	53
4	Resultater	55
4.1	<i>Referanseblandingene</i>	55
4.1.1	Fersk fase.....	55
4.1.2	Varmeutvikling	56
4.1.3	Trykk test.....	62
4.2	<i>Varmebehandlede blandinger</i>	65
4.2.1	Fersk fase.....	66
4.2.2	Trykktest.....	67
4.2.3	Elastisitetsmodul	74
4.2.4	Autogent svinn	74
5	Analyse	76
5.1	<i>Betongens støpelighet</i>	76
5.2	<i>Varmeutvikling</i>	79
5.3	<i>Trykkfasthet</i>	85
5.4	<i>Autogent svinn</i>	93
6	Konklusjon	96

7	Forslag til videre forskning.....	98
8	Referanser	100
	Vedlegg	- 1 -

Figurliste

Figur 1 - Eksempel på blandeforhold per volum som sammenligner vanlig betong fra UHPC [2, p. 11].....	3
Figur 2 - Terminologi av betongtilslag [4, p. 1]	4
Figur 3 - De fire hovedmineralene i sement [4, p. 21].....	5
Figur 4 - Skisse som viser elektrostatisk frastøtning [8].....	7
Figur 5 - Skisse som viser stabilisering ved sterisk hindring [8].....	8
Figur 6 - Effekten materialsammensetning har på flyteskjærspenning(g) og plastisk viskositet(h) for en standard betong [11, pp. 2-23].....	14
Figur 7 - Karakteristiske trekk for bindemiddel komponentene [11, pp. 7-5]	14
Figur - 8 Bidrag av fasthet [MPa] til klinker over tid [dager] [5, p. 41]	19
Figur 9 - Sementpartiklenes finhet og effekten på temperaturutvikling og maksimaltemperatur [11, pp. 6-12].....	20
Figur 10 - hydratiseringsraten og utviklet varme for bindemiddel med v/b-tall lik 0.4 [11, pp. 11-6].....	25
Figur 11 - Konstantene brukt for å finne aktiveringsenergien [10, p. 328]	26
Figur 12 - En isoterm varmeutvikling for sementpastaen, q er faktisk temperatur, $dqdt$ er raten til varmeutviklingen [11, pp. 6-10]	29

Figur 13 - Typiske brudd for standard betong og UHPC [5, p. 272]	34
Figur 14 - Spenning/tøyning-diagram for et ulineært materiale, og hvordan sekant- og tangent modul bestemmes [24]	36
Figur 15 - slump test(mm) [11]	38
Figur 16 - Beholder med kjent volum og masse for densitet og luft	39
Figur 17 – Isolasjonskasse	40
Figur 18 - kube [28]	41
Figur 19 - Tilfredsstillende bruddformer for terningformede prøvelegemer [29]	43
Figur 20 - Lastsyklus for å beslutte elastisitetsmodulen [30]	45
Figur 21 - Komponentene brukt i dilatometeret AS-systemet (bildet er funnet fra http://germann.org/products-by-application/autogenous-shrinkage/autogenous-shrinkage)...	47
Figur 22 – Plan for prøvenavngivning	49
Figur 23 - Temperaturutvikling ANL FA med 16,5% og 8%	57
Figur 24 - Temperaturutvikling Hvitsement: 16.5% (25%), 8% (25%), 16.5% og 8%	58
Figur 25 - Temperaturutvikling Miljøsement med 16,5% og 8%	59
Figur 26 - Adiabatisk temperaturutvikling ANL FA 16.5%	61
Figur 27 - Adiabatisk temperaturutvikling ANL FA 8%	61
Figur 28 - Adiabatisk temperaturutvikling Hvitsement 16.5% (25% FA)	61

Figur 29 - Adiabatisk temperaturutvikling Hvitsement 8% (25% FA).....	61
Figur 30 - Adiabatisk temperaturutvikling Hvitsement 16.5%	61
Figur 31 - Adiabatisk temperaturutvikling Hvitsement 8%	61
Figur 32 - Adiabatisk temperaturutvikling Miljøsement 16.5%	62
Figur 33 - Adiabatisk temperaturutvikling Miljøsement 8%	62
Figur 34 - Fasthetsutvikling for ANL FA (referanseblandinger).....	63
Figur 35 - Fasthetsutvikling for Hvitsement (referanseblandinger)	63
Figur 36 - Fasthetsutvikling for Miljøsement (referanseblandinger).....	64
Figur 37 - Trykkfasthetsforskjeller innad i terningstrioene (referanseblandinger).....	65
Figur 38 - Trykkfasthet for varmebehandlede betongterninger med ANL FA 16,5%	67
Figur 39 - Trykkfasthet for varmebehandlede betongterninger med ANL FA 8%	68
Figur 40 - Trykkfasthet for varmebehandlede betongterninger med Hvitsement FA 16,5% ..	69
Figur 41 - Trykkfasthet for varmebehandlede betongterninger med Hvitsement FA 8%	69
Figur 42 - Trykkfasthet for varmebehandlede betongterninger med Hvitsement 16.5%	71
Figur 43 - Trykkfasthet for varmebehandlede betongterninger med Hvitsement 8%	71
Figur 44 - Trykkfasthetsforskjeller innad i terningstrioene	73
Figur 45 - Autogent svinn	74

Tabell-liste

Tabell 1-1 - Varmeutvikling ved tilbærmet fullstendig hydratasjon [10, p. 324].....	17
Tabell 3-1 - Sementtypenes klinkerinhold.....	53
Tabell 3-2 – Blanderesepter (kg/m ³).....	53
Tabell 4-1 – Verdiene målt under forsøkets ferskefase	56
Tabell 4-2 – Makstemperatur og tidspunkt for oppnåelse	60
Tabell 4-3 – verdiene registrert under prøvenes ferske fase	66

Formelliste

Formel 1	10
Formel 2	10
Formel 3	14
Formel 4	16
Formel 5	16
Formel 6	17
Formel 7	18
Formel 8	18
Formel 9	19
Formel 10	21
Formel 11	26
Formel 12	27
Formel 13	28
Formel 14	31

Formel 15	33
Formel 16	33
Formel 17	35
Formel 18	39
Formel 19	43
Formel 20	44
Formel 21	46

1 Teori

1.1 Historie

Ideen angående produksjon av betong med høy fasthet og tett mikrostruktur kom på 1980-tallet. Det banebrytende gjennombruddet for ultra høyfast betong kom først da utviklingen av en effektiv superplastisator kom på markedet. Det superplastiserende produktet muliggjorde at produksjon av betong med tettpakket ultrafiberpartikler og lavt vann/bindemiddelforhold (v/b-forhold) oppnådde en god flytende konsistens. Originalt ble denne betongen produsert med fine kornstørrelser opp til 1mm, men etter år med utvikling har man utviklet en ultra høyfast betong som oppnår samme styrke med kornstørrelser opp til 16mm. Derfor har ultra høyfast betong utviklet seg til å bli en mer gunstig økonomisk løsning. [1, p. 5]

I 1981 kom enda et gjennombrudd da forskeren Hans Hendrick Bache utviklet en kompakt fiber/armerings betong (CRC – Compact Reinforced Concret), som i tillegg til egenskapene forklart i forrige avsnitt, inneholdt store mengder fiber og armeringsjern. Tilsetningen av fiber økte trykkfastheten til mellom 150-200 MPa. I 1994 så to franske entreprenører, Richard- og Cheyrezy Bouygues, videre på Baches idé. De erstattet noen stålbjelker, grunnet korrosjon i et aggressivt miljø, med høystyrke betong. Det viste seg at betongen hadde god varighet og resisterte det aggressive miljøet svært bra. På grunn av disse gode egenskapene ble navnet ultra høystyrke betong ble erstattet med UHPC (ultra high performance concrete – ultra høyfast betong) en forkortelse som vil bli brukt igjennom denne oppgaven. [1, p. 2]

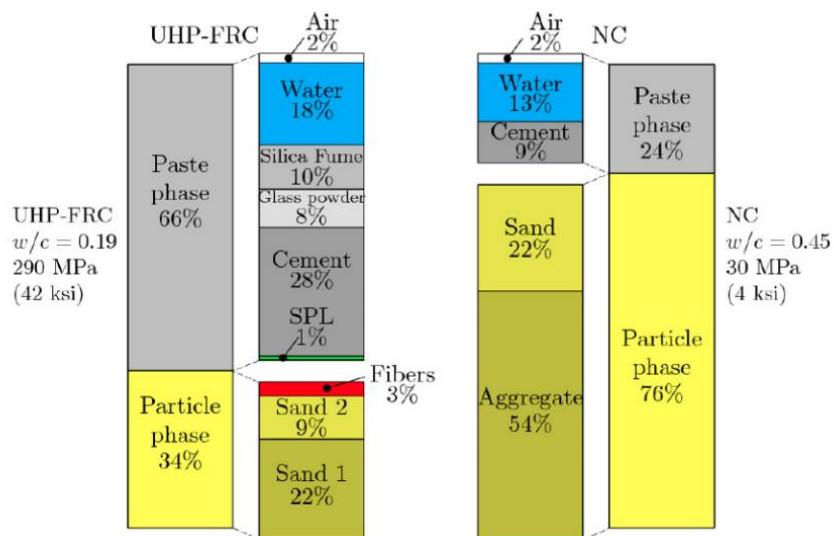
I begynnelsen var UHPC tilegnet et lite bruksområde på grunn av de høye produksjonskostnadene, men i 1997 ble det utført et sammenligningsprosjekt mellom produksjon av en UHPC bro mot kostandene til tilsvarende bro med normal betong. Prosjektet ble utført nær Amsterdam på broen Stichtse. Bruken av en B80/90 resulterte i en grensesnittreduksjon på 30% og samtidig minimerte armeringsbehovet med 26%. Den økende styrken førte også til at hvert individuelle ledd kunne øke sin lengde fra 3.5m til 5m, noe som forkortet prosjektets levetid med tre måneder. Etter en gjennomgang av prosjektet viste det seg at kostandene ikke ble noe høyere ved bruken av UHPC kontra en normal betong. [1, p. 1]

Etter prosjektet i 1997 kom det ett vidt spekter av innovative idéer og konsepter fra ingeniører. UHPC ble brukt av ingeniører i flere og flere prosjekter og det ble utviklet tre-lignende søyler for MuCEM i Marseille; Jean Bouin stadion i Paris er også et eksempel hvor kledningen består av 3500 UHPC elementer. I Japan, nærmere bestemt Haneda flyplass, ble det produsert en plattform bestående av 200 000 kvadratmeter med UHPC, noe som per dags dato er den største applikasjonen av UHPC noen gang. [1, p. 3]

Frankrike har viet mye forskning til UHPC og publiserte to ulike standarder ved begynnelsen av 2000-tallet. NFP18-470 som dekker test prosedyrene og NF18-710, som er et nasjonalt tillegg til Eurocode 2, som gir retningslinjer for designbruk i konstruksjoner. [1, p. 3]

1.2 Betongens bestanddeler

UHPC er sammensatt av tilslag, sement, vann, tilsetningsstoffer, pozzolaner, fillers og fiber og er ikke svært ulik fra en konvensjonell betongtype. Hovedforskjellen ligger i mengde matriksvolum, lavere v/b-tall, fiber-innhold og tilslagetets størrelse. Figur 1 fremstiller komposisjonen av en UHPC og en normal betong og viser at mengdeforholdene er svært ulike selv om de inneholder mye av de samme bestanddelene. UHPC inneholder en god mengde med superplastiserende tilsetningsstoff for å fremkalle god støpelighet. [2, p. 11]

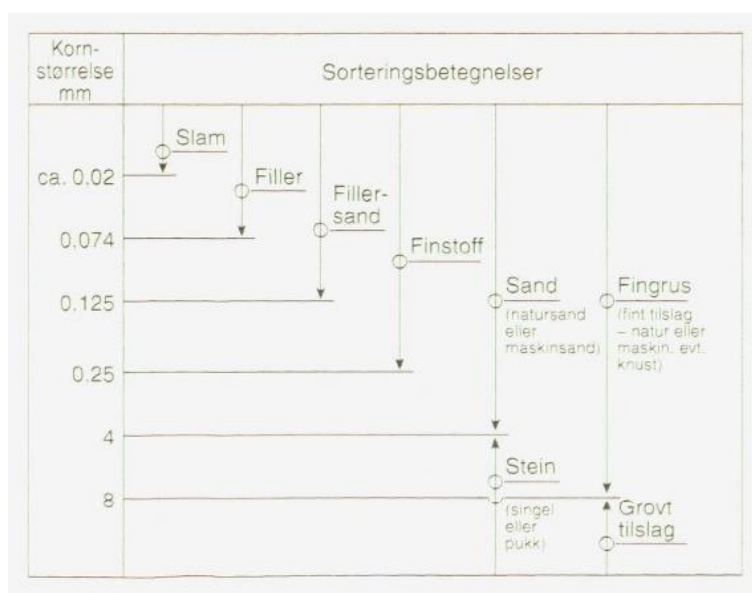


Figur 1 - Eksempel på blandeforhold per volum som sammenligner vanlig betong fra UHPC [2, p. 11]

Bestanddelene til en betong blir delt inn i to ulike faser, matriks fasen, som er alle partikler mindre enn 0.125mm, og partikkel fasen, som er alle partikler større enn 0.125mm. Figur 1 viser at normal betong har en overvekt av partikkel fasen, mens UHPC har en større andel liggende i matriks fasen. [3]

1.2.1 Tilslag

Betongens tilslag blir referert som volumets sand- og steininnhold og utgjør den største andelen av betongblandingen. [4, p. 15] For UHPC er det viktig å bruke et tilslag som oppnår høy pakningstetthet ved hjelp av en god distribusjon av kornstørrelser. Det er viktig for styrken til UHPC at tilslaget har en høy materialistisk styrke. Partikkelstørrelsen har tidligere ofte vært 1mm og mindre for UHPC, men det har senere blitt mer vanlig å bruke kornstørrelser fra 8- til 16mm for å redusere sementinnholdet, og følgende redusere autogent svinn og kostnadene. [2, p. 20]



Figur 2 - Terminologi av betongtilslag [4, p. 1]

Tilslagets effekt på betongens ferske- og plastiske fase: Oppførselen til den ferske betongen, altså flyten, kohesiviteten og reologien, blir hovedsakelig styrt av tilslagets mengde, type, form og korngradering. [5, p. 23]

Tilslag i størknet betong: Tilslaget har liten effekt på den kjemiske reaksjonen i sementpastaen, men i tillegg til kostnadsbesparelse, vil tilslaget redusere sammentrekningene i sementpastaen. Dessuten vil tilslaget påvirke egenskaper som fasthet, vekt, styrke, varmedistribusjon og durabilitet. [5, p. 23]

1.2.2 Sement

Portlandsement er en fellesbetegnelse for sementer som blir brukt i bygningsindustrien i Norge. Det er fire hovedmineraler i portlandsement og disse utgjør omtrent 90-95% av sementkomposisjonen. Hovedmineralene er sammensatt med oksider fra grunnstoffene kalsium (Ca), silisium (Si), jern (Fe) og aluminium (Al) og dannes av de kjemiske reaksjonene vist i Figur 3. De resterende komponentene i portlandsementen utgjøres av oksidene mangan (Mg), svovel (S), kalium (K) og natrium (Na). [4, p. 21]

Mineral	Navn	Kjemisk formel	Symbol
A	Trikalsiumsilikat	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
B	Dikalsiumsilikat	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
C	Trikalsiumaluminat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
D	Tetrakalsiumaluminatferritt	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Figur 3 - De fire hovedmineralene i sement [4, p. 21]

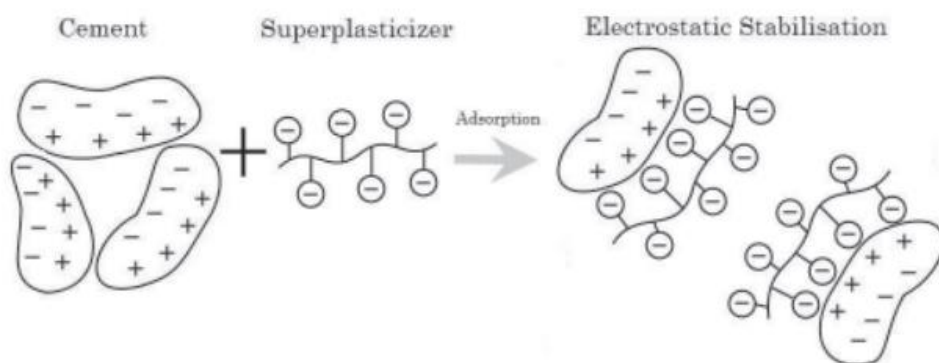
Klinkermineralene innvirker på betongens egenskaper som varmeutvikling, fasthetsutvikling, slutfasthet og bestandighet. De utøvende komponentene, spesielt alkaliene kalium- og natriumoksidene kan være viktige for sementens egenskaper ved å øke betongens tidlige fasthet og vil kunne reagere med silikaholdige bestanddeler, og med dette forårsake ekspansjon. [4, p. 21]

UHPC bruker en omtrentlig dobbel mengde sement sammenlignet med en konvensjonell betongtype. Sementinnholdet befinner seg normalt mellom 600- til 1000 kg/m³. UHPC opererer med et svært lavt v/b-forhold og det vil derfor være fordelaktig å benytte seg av en portlandsement med lavt C₃A-innhold på grunn av det lave vannbehovet. [2, p. 13] C₃A leder til hurtig hydratisering og hastigheten øker med overflatearealet til partiklene. Tidligere forskning viser at sement med < 8% C₃A-innhold har vært fordelaktig grunnet lav hydratiseringsvarme og forsinket tetthetsdannelse. C₃S og C₂S er fordelaktig å bruke når det skal fasiliteres for styrkeutvikling. [6] Dette vil også være gunstig med tanke på sekundær dannelse av ettringite. Det lave v/b-forholdet fører til en ufullstendig reaksjonsligning mellom vann og sement, hvor det vil være en mengde sementpartikler til overs. Sementpartiklene vil dermed virke inert i betongen og bidra positivt til partiklenes tetthet. [2, p. 13]

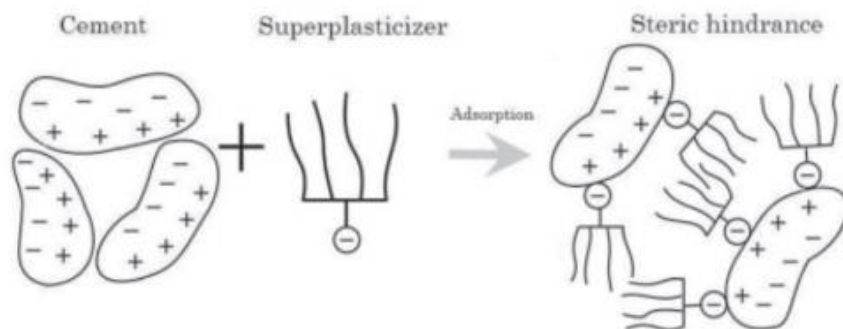
1.2.3 Superplastiserende tilsetningsstoff

Vannreducerende stoffer, også kalt plastiserende stoffer, er kjemiske produkter som kan lede til elektrostatisk stabilisering, sterisk hindring eller et flytende lag blant sementpartiklene.

Hovedpoenget med plastiserende stoffer er å redusere vannbehovet til betongblandingen for å forbedre støpeligheten og dermed øke stryken. Generelt vil et vanlig plastiserende stoff redusere vannbehovet med mindre enn 12%, men et superplastiserende (SP) stoff vil redusere vannbehovet med mer enn 12%. [7, p. 1]



Figur 4 - Skisse som viser elektrostatisk frastøtning [8]



Figur 5 - Skisse som viser stabilisering ved sterisk hindring [8]

For UHPC er bruken av SP-stoffer kritisk for å oppnå god støpelighet og tetthet grunnet det lave v/b-tallet; en god mengde, opp til 5 masseprosent av sementinnholdet, er nødvendig. [2, p. 21] Utviklingen av UHPC hadde stoppet helt opp uten SP som tilsetningsstoff. Det er den tredje generasjonen av det superplastiserende stoffet (polykarboksylateter, PCE) som tillater en lav nok vannmengde for å gjøre betongen støpelig. [9] Denne generasjonen av SP er basert på en kombinasjon av sterisk hindring og elektrostatisk stabilisering, vist i Figur 4 og Figur 5. Kam-lignende polymerer har karboksylsyregrupper i hovedkjeden, og kam-lignende SP fester seg til sementpartiklene. Karboksylsyregruppene av kam-lignende SP reagerer med Ca^{2+} -ioner på sementpartiklenes overflate. Utstikkerne fra hovedkjeden hindrer at sementpartiklene kommer nærme hverandre. Derav kombinasjonen av sterisk hindring og elektrostatisk stabilisering. [8]

1.2.4 Fiber

Fibers funksjon i betongkomposisjonen kan klassifiseres til to ulike kategorier:

kontrollere/reducere sprekkdannelse og forbedre de mekaniske egenskapene.

Fiberarmeringens egenskaper kan forbedre de mekaniske egenskapene ved å fremme betongens bøyning, øke motstanden mot laster og endre bruddegenskapene. [5, p. 251]

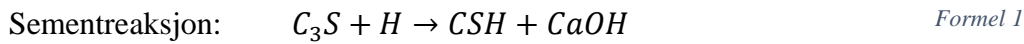
Fibrenes effekt på de mekaniske egenskapene kan begrenses hvis dem ikke er orientert og fordelt jevnt i betongen [10, p. 40]

For UHPC vil fiberfraksjonen endre matriksen seg fra sprø til duktil. [5, p. 252] Fiber øker strekkmotstanden og betongens tøyningsevne, men har liten effekt på betongens kompresjonsstyrke. [2, p. 21] Mengden fiber og dens dimensjon vil påvirke betongens støpelighet. Volumfraksjonen (V_f) sier noe om hvor stor prosentandel av betongblanding som består av fiber. Fibrenes fasong beregnes ved å dividere fiberlengden(l) med diameteren(d). Lengden og diameteren til fibre sier noe om hvilke sprekker de er i stand til å holde uten at det ender i en sprø kollaps. Stålfibre er beskyttet mot korrosjon på innsiden av betongen grunnet betongens alkaliske miljø, men dersom betongen har blitt karbonisert i det ytterste laget, vil fibre kunne ruste i et fuktig miljø. [2, p. 22]

1.2.5 Pozzolaner

Pozzolaner er materialer som inneholder reaktivt silika. [5, p. 8] Disse kan beskrives som aktive tilsetningsstoffer, som er reaktive i kombinasjon med portlandsement og dens produkt, kalsiumhydroksid (CaOH). Den påfølgende pozzolanreaksjonen danner ekstra sementholdig

materiale (C-S-H). Formel 1 og Formel 2 fremstiller dette. [11, pp. 7-3] Pozzolanreaksjonen er avhengig av vann tilstede, på samme måte som sementreaksjonen. [10, p. 94]



Silikastøv er et bi-produkt fra smelteprosessen av silisium i industrien. Silika er kjent for å utvikle høy styrke i betong, og blir brukt som en sementerstatte, hvor det trengs mindre sementmengder, eller som et tilleggsprodukt for å forbedre betongens egenskaper. [12] På grunn av silikapartiklernes størrelse, ca. 100 ganger mindre enn sementpartiklene, reduseres permeabiliteten til betongen. Dette fører til at armeringsjern blir bedre beskyttet mot vanngjennomtrenging og andre ytre faktorer som for eksempel karbonatisering. Silika vil også bidra til å bedre betongens durabilitet. [13]

Flygeaske er et bi-produkt fra kullkraftverk, og har i senere tid blitt brukt som et tilleggsmateriale i betong, uten å ha en innvirkning på slutfastheten. Det er en miljøgevinst å tilsette flygeaske, da det tidligere ble kjørt til fyllinger, blir det nå brukt som et supplement til sementinnholdet i betongen. Fordelen med å benytte flygeaske er at den sfæriske formen kan øke støpeligheten og pumpbarheten til betongen. Den kan også bidra til økt resistens mot sulfatangrep. Noen av ulempene med flygeaske, er at enkelte typer flygeaske kan gi lav tidligstyrke og redusere luftinnhold i betongen slik at frostmotstanden blir svekket. [13] Til tross for det trege reaksjonsmønsteret til flygeaske, vil betong med flygeaske vanligvis

utvikle høyere fasthet enn om det bare ble benyttet sement som bindemiddel, forutsatt at masseforholdet er det samme. [10, p. 102]

Slagg er et biprodukt fra jernproduksjon, hvor det dannes rundt 300 kg slagg for hvert tonn råjern. Slagg er i hovedsak en blanding av oksidene CaO, SiO₂ og Al₂O₃, som også utgjør de samme hovedbestanddelene i portlandsement og flygeaske. Partikkelformen til slagg er kantete, noe som er annerledes sammenlignet med den sfæriske formen til silikastøv og flygeaske. [14]

Filler er som vist i Figur 2 partikler med størrelse < 0.125 mm, og det resulterer i store overflatearealer. Ved økt mengden filler, økes matriksvolumet, som igjen gir en høyere flytemotstanden i matriksen grunnet absorpsjonen av vann til det store overflatearealet. Egenskapene til filler i fersk betong er avhengig av overflaten, form, korngradering og mineralogien. [11, pp. 4-30,4-31] Ulike mengder filler i betongblandingen kan gi forskjellig utslag. Brukes det riktig mengde, vil dette kunne redusere mengde bindemiddel, men brukes det for store mengder, kan det gi uheldige utfall i form av økt vannbehov, redusert fasthet og økt svinn. [15]

1.3 Støpelighet

Støpelighet omhandler egenskapene til fersk betong; evnen til å fylle en form og holde seg homogen og tett. Støpelighet kan forklares ved hjelp av de tre følgende begrepene:

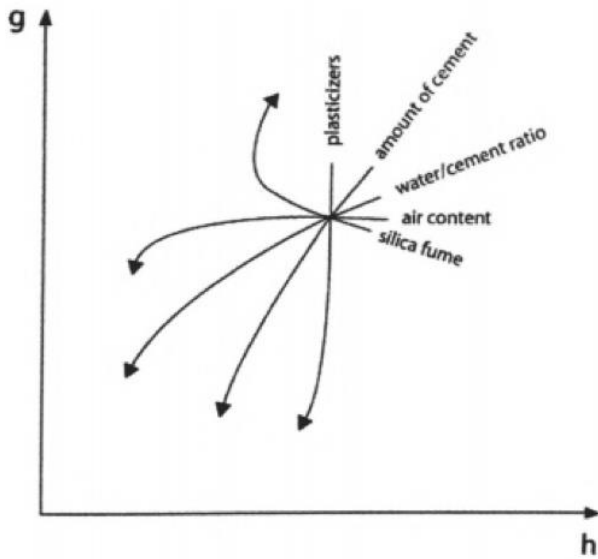
- Betongens mobilitet, kan defineres som betongmassens evne til bevegelse, enten av seg selv eller ved hjelp av komprimeringssutstyr.
- Betongens stabilitet, forklarer hvor lett betongen henger sammen uten at det oppstår separasjon i massen. Altså betongens evne til å beholde sin homogenitet gjennom den ferske fasen
- Betongens komprimerbarhet, forklarer betongens evne til å få fullstendig utfylling og tette overflater, da med og uten vibrering. [4, p. 39]

Motstand mot bevegelse avhenger av matriksens flytemotstand, betongens matriksoverskudd og friksjon og blokkeringstendenser i partikkelfasen. Høy mobilitet kan oppnås ved å gi betongen et stort matriksvolum med liten steinandel. Dette gir lav viskositet, liten motstand mot intern strømming og redusert friksjon og blokkering. Plastiserende tilsetningsstoff er en annen metode for å øke mobiliteten; slike stoffer reduserer flytemotstanden i matriksen. Generelt vil økende mobilitet resultere i redusert stabilitet, men som for UHPC, kan stabiliteten opprettholdes ved å øke fillerinnhold, øke plastiserende midler og holde en jevn siktekurve. Manglende stabilitet fører til separasjon i massen, og oppstår når summen av intern friksjon og kohesjon er for liten til å motvirke effekten av forskjellen i delmaterialenes densitet. [10, pp. 181-183]


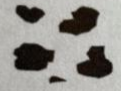
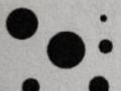
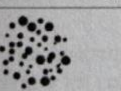
Hvor egnet betongen er til et formål, avhenger av hvordan den blir bearbeidet, og hva slags støpearbeid den skal brukes til. For å fastslå betongens støpelighet, finnes det flere objektive målemetoder. Den vanligste metode for å finne utflytningsegenskapene er ved bruk av utbredelses- og synkmål. (ytterligere utdypet i seksjon 2.2) [4, p. 40]

Den faktoren som har størst innvirkning på betongens konsistens, er betongens vannmengde. Med økende vannmengde vil avstanden mellom de faste partiklene bli større, og dermed flytter partiklene lettere om hverandre. Mengde tilslag, kornform og overflateareal har stor betydning for støpeligheten. Runde korn vil gli lettere om hverandre, mens kantete korn vil henge seg mer opp. For å bedre stabiliteten og redusere separasjonstendenser i betongen, kan sement- og fillerinnhold økes, og/eller benytte silikastøv. Det er viktig at det er en jevn og kontinuerlig korngradering i tilslaget. [4, pp. 41-45]

Betongens flyteskjærspenning(g) og plastisk viskositet(h) avhenger av flere faktorer, og blir demonstrert i Figur 6. Pilens retning demonstrer hvordan en økende mengde ulike stoffer påvirker flyteskjærspenningen og viskositeten til betongen. Figur 6 viser eksempelvis at et minkende v/b -forhold og et økende luftinnhold har tilnærmet motsatt effekt på plastisk viskositet, og at det resulterer i høyere stabilitet. [11, pp. 3-22 og 3-23] For UHPC er det nyttig å benytte seg av små runde partikler, som for eksempel silikastøv (ref. Figur 7), for å redusere betongens vannbehov. I en ren sementholdig betongblanding er det nødvendig med en stor nok vannmengde for å fylle hulrommene mellom sementpartiklene og gjøre utflytning bedre. SP-stoffer løser opp «sementflokene», reduserer størrelse og mengde hulrom og minsker dermed vannbehovet. Silikastøvet sine fine korngradering og sfæriske form reduserer vannbehovet videre på grunn av måten de fyller hulrommene. [11, pp. 3-23]



Figur 6 - Effekten materialsammensetning har på flyteskjærspenning(g) og plastisk viskositet(h) for en standard betong [11, pp. 2-23]

	Portlandcement	
Hydraulic (reacts directly with water)		Crystalline $\frac{CaO}{SiO_2} = 3$ CaO - 60% SiO ₂ - 20% 300-500 m ³ /kg
	1-100µm mean: 10-20µm	
	Blast - Furnace Slag	
Latent hydraulic (needs activation by lime or sulphate)		Amorphous $\frac{CaO}{SiO_2} = 1$ CaO - 35-45% SiO ₂ - 33-43% 300-500 m ³ /kg
	1-100µm mean: 10-20µm	
	Fly Ash	
		Amorphous $\frac{CaO}{SiO_2} = 0$ SiO ₂ - 45-55% Al ₂ O ₃ - 20-30% 300-500 m ³ /kg
	1-100µm mean: 10-20µm	
Pozzolanic (needs lime to react)	Silica Fume	
		Amorphous $\frac{CaO}{SiO_2} = 0$ SiO ₂ - 85-98% 20.000 m ³ /kg
	0,01-1µm mean: 0,1µm	

Figur 7 - Karakteristiske trekk for bindemiddel komponentene [11, pp. 7-5]

Betongens reologiske egenskaper som deformasjonshastighet og deformasjonsmotstand kan karakteriseres ved en lineær sammenheng, og kan beskrives ved hjelp av Formel 3.

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{d\gamma}{dt}$$

Formel 3

τ er skjærspenningen, τ_0 er betongens initielle elastiske motstand mot bevegelse (flyteskjærspenningen), μ er proporsjonalitetskonstanten (væskens viskositet) og $\frac{d\gamma}{dt}$ er gitt som skjærdeformasjonshastigheten, der γ er skjærdeformasjonen. [10, p. 178]

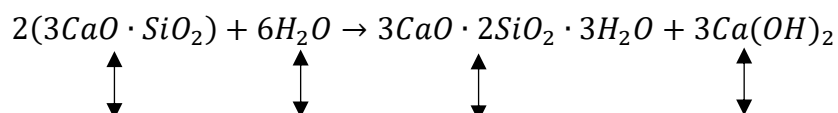
Pozzolaner som tilsetningsstoff eller komponent i bindemiddelet har påvirkning på betongens støpelighet:

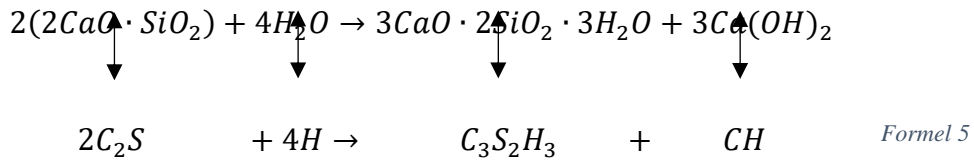
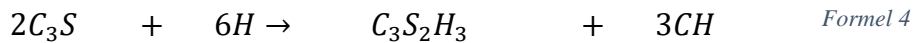
- Ved tilsetning av silikastøv vil konsistensen til den ferske betongen bli mer stiv. Benyttes det en høyfast betong med lite vann og mye sement, vil en derimot kunne oppleve motsatt effekt.
- Ved tilsetning av flygeaske vil det oppstå bedre støplighet, da de kuleformede partiklene fungerer som kulelagre i den ferske fasen.
- Slaggsement har vist seg å ha bedre støpelighetsegenskaper og redusert separasjon enn betong med ren portlandsement. [10, pp. 95, 102, 105]

1.4 Hydratisering av sement

Hydratisering av sement er en kjemisk reaksjon mellom sementpartikler og vann.

Egenskapene til den ferske betongen, slik som tetthets- og hardhetsdannelse, er direkte resultater av hydratiseringen. Selve hydratiseringsprosessen er veldig kompleks. For å forstå hydratiseringen av portlandsement, studeres hvert enkelt klinkermineral i sementen, og hvordan dette reagerer. Denne fremgangsmåten er ikke fullstendig korrekt, men er en nær tilnærming av den kjemiske prosessen. Hydratiseringen av trikalsiumsilikat (C_3S) og dikalsiumsilikat (C_2S) er støkiometriske like, bortsett fra mengde kalsiumhydroksid dannet, frigitt varme og reaksjonsraten, se Formel 4 og Formel 5: [5, p. 38]





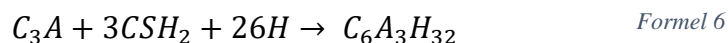
Hovedproduktet etter hydratiseringen er $C_3S_2H_3$, kalsiumsilikathydrat (C-S-H), og står for omtrent 50% av de oppbyggende komponentene i sementpastaen, og dannes direkte på overflaten til sementpartiklene. C-S-H antas å være den faktoren med høyest bidragsevne til betongens styrkedannelse på grunn av mengden dannet og den lille kornstørrelsen. [5, p. 38]

Det andre produktet som dannes ved hydratiseringen av kalsiumsilikatene er kalsiumhydroksid (CH). Dette produktet blir tydelig krystallisert, og danner ofte plateformede partikler. CH står for omtrent 25% av de oppbyggende komponentene i sementpastaen. [5, pp. 38-39] Kalsiumhydroksids styrke-, stivhet- og tetthetsbidrag er svært lite, men spiller en viktig rolle med tanke på betongens kjemiske egenskaper. CH bidrar blant annet til å holde pH-nivået høyt, og armeringen blir beskyttet med et tett og sterkt oksidsjikt på armerings overflaten. [10, p. 94] C_3S og C_2S spiller viktige roller hver for seg i betongens fasthetsutvikling. C_3S reagerer veldig hurtig i tidlig fase, og gir fra seg mye hydratiseringsvarme, ifølge Tabell 1-1 ca 500 kJ/kg ved full hydratisering, og bidrar i hovedsak til utvikling av tidlig fasthet i betongen. C_2S reagerer derimot veldig sakte, og gir ut mindre varme enn C_3S , ifølge Tabell 1-1 ca 260 kJ/kg ved full hydratisering. C_2S bidrar i hovedsak til utvikling av betongens slutfasthet. [5, pp. 38-39]

Tabell 1-1 - Varmeutvikling ved tilbærmet fullstendig hydratasjon [10, p. 324]

Klinker mineral	Varmeutvikling (kJ/kg)
C ₃ S	500
C ₂ S	260
C ₃ A	ca. 900
C ₄ AF	ca. 300

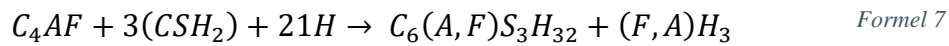
Trikalsiumaluminat (C₃A) reagerer raskt med vann, danner C₃AH₆, og har en hurtig styrkeutvikling, men bidrar lite til slutfastheten. C₃A bidrar hovedsakelig til fasthetsdannelse de første dagene (1-3 dager). Varmeutviklingen er høy, ca 900 kJ/kg. For å hindre for hurtig varmeutvikling, er det tilsatt gips i sementen. [16] Reaksjonslikningen for C₃A med vann og tilstrekkelig gips er gitt ved Formel 6:



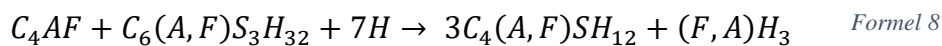
6-kalsiumaluminattrisulfat-32-hydrat er produktet av reaktantene, eller «Ettringitt», som også er et naturlig mineral med lik sammensetning. Når dette dannes, omkranser det C₃A på overflaten, og fungerer som en diffusjonsbarriere, slik at hydratiseringen av C₃A sakkess ned, og hindrer at den reagerer for hurtig. [5, p. 39] Ettringiten er kun stabil dersom det er gips og vann tilstede som en reaktant i C₃A reaksjonen. Dersom betongen blir eksponert for sulfat fra

en utenforstående kilde vil ettringiten igjen reagere med vann og aluminat for å danne monosulfat ($C_3A \cdot CS \cdot H_{12}$). [11, pp. 6-8]

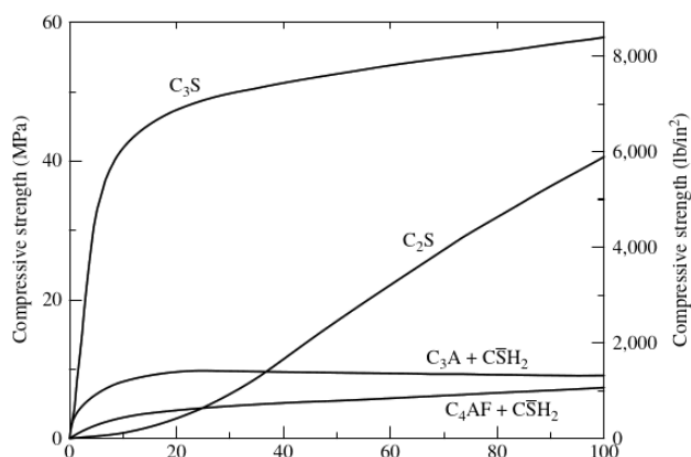
C_4AF er et klinkermateriale som danner lignende produkt som C_3A når det reagerer med vann og tilstrekkelig gips er tilgjengelig. [5, p. 40] Varmeutviklingen til C_4AF er lav, ca 300kJ/kg, og bidrar lite til slutfastheten. [16] Produktene fra reaksjonen er jernoksid og aluminiumoksid: [5, p. 40]



Videre kan $C_6(A,F)S_3H_{32}$ reagerer med tilgjengelig C_4AF og vann, slik at det oppstår mer jernoksid og aluminiumsoksid: [5]



I det store bildet er det C_2S som fører til utvikling av fasthet senere i utviklingsforløpet, mens C_3S utvikler betongens tidlige styrke. Styrkebidraget til C_3A og C_4AF er ikke betydelig stort. Figur - 8 viser hvordan de ulike klinkerne bidrar til fasthetsutviklingen over tid: [5, pp. 40-41]

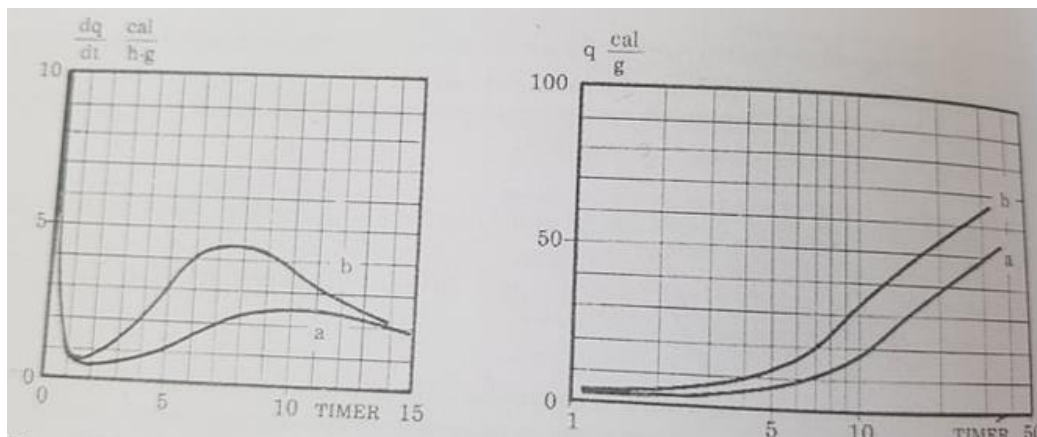


Figur - 8 Bidrag av fasthet [MPa] til klinker over tid [dager] [5, p. 41]

Innholdet av alkalioksider som Na₂O og K₂O er lavt, hvor Na₂O-innholdet normalt ligger under 1.2%. Selv om alkali-innholdet er lavt, vil innflytelsen være betydelig for fasthetsutvikling. Alkalioksidene vil akselerere tidlig fasthetsutvikling, men redusere utviklingen av slutfastheten. Alkali-innholdet er generelt referert som mengde Na₂O, og K₂O innholdet blir funnet ved å multiplisere mol-vekt ratioen, se Formel 9. [11, pp. 6-5]

$$\%Na_2O_{(ekv)} = \%Na_2O + 0.658 * \%K_2O \quad \text{Formel 9}$$

Finheten i sementpartiklene øker hydratiseringsraten og fremkaller en økning i makstemperatur. Figur 9 er delt inn i 2 grafer, hvor den venstre tar for seg temperaturutviklingsraten, og den høyre tar for seg betongens faktiske temperatur. Målingene er foretatt under forsøk med herdetemperatur på 20°C. «a» illustrerer en finhet på 310 m²/kg og «b» 484 m²/kg.



Figur 9 - Sementpartiklenes finhet og effekten på temperaturutvikling og maksimaltemperatur [11, pp. 6-12]

Sement vil generelt aldri bli fullstendig hydratisert, og graden av hydratisering avhenger hovedsakelig av sementpartiklenes finhet, v/b-forholdet og klinkersammensetningen. En annen påvirkende effekt vil være temperatur og fuktighet under herdeprosessen. Graden av hydratisering avhenger av mengden vann tilgjengelig under hydratiseringsprosessen. Høyere finhet i sementen vil føre til en høyere grad av hydratisering. Lavere v/b-tall enn 0.4 er for lavt for fullstendig hydratisering av sement, og redusert v/b-forhold vil lede til redusert varmeutvikling per kg sement. [11, pp. 11-4] Hydratisering av sementpartikler fører til en innkapsling av partiklene. Partiklene kapsles inn av en ytre C-S-H struktur, og denne ytre strukturen flettes inn i hverandre og gir et komplekst nettverk. Det er dette nettverket som binder sementlimet sammen, og de aller trangeste passasjene i dette nettverket kalles gelporer. Gelporene er fylt av vann som er fysisk bundet til C-S-H overflatene ved adsorpsjon; dette vannet er utilgjengelig for videre hydratasjon av sementen. Etter hvert blir C-S-H strukturen, sammen med gelporene, så tett at vannet i kapillærporene har vanskelig for å nå frem til uhydratisert sement (se seksjon 1.8 for forklaring av kapillærporer). Det er denne

effekten som senker farten på videre hydratisering og som til slutt resulterer i en hydratasjonsgrad lavere enn 100%. [10, pp. 58-59]

1.5 Pozzolan-reaksjon og dens temperatureffekt

De mest kjente pozzolane tilsetningsstoffer brukt i Norge er silikastøv og flygeaske. Silikastøv er i hovedsak rent silika (95-98%), mens flygeaske inneholder 45-55% silika i tillegg til 20-30% aluminiumoksid (Al_2O_3) og noe jernoksid (Fe_2O). Pozzolaner vil fungere som sementerstattere i betongen og vil påvirke v/b-forholdet. Formel 10 tar høyde for denne påvirkningen og endrer sementens innhold for å opprettholde det ønskede masseforholdet $((\frac{w}{c})_{eq})$. «k» er en aktivitetsfaktor som angir pozzolanenes effekt (innvirkning) på v/b-forholdet. [11, pp. 7-4 - 7-6]

Masseforhold: $[m] = (\frac{w}{c})_{eq} = [\frac{w}{c + kp}]$ *Formel 10*

Pozzolane materialer med høy pozzolanaktivitet, som for eksempel silikastøv, reagerer med kalsiumhydroksid (CH) frigitt fra hydratiseringen av portlandsement, og øker utviklingen av hydratiseringsvarme, på grunn av en eksoterm effekt fra den pozzolane-reaksjonen. Den pozzolane aktiviteten blir vanligvis adressert som en styrkeaktivitetsindeks funnet fra styrkeratioen mellom to ulike prøver, en med 20 prosent tilsetningsstoffer og en referanseprøve med 0 prosent tilsetningsstoffer. Dersom den pozzolane aktiviteten er stor,

kan det forekomme en negativ konsekvens som dårligere durabilitet, grunnet høyere sammentrekning og mikrosprekkdannelse i betongen. [17]

Resultatene i [17] viser at silika bidrar til en tidligere varmeutvikling. I betongens tidlige fase opptrer mikropartiklene av silika som heterogene kjerner hvor CH kan delta. Silikapartiklene deltar aktivt i sementens hydratiseringsprosess og den pozzolane reaksjonen konsumerer CH slik at reduksjonen av kalsiumionene stimulerer oppløsningen av sementpartiklene. [17].

En forutsetning for flygeaskens hydrasjonsstartidspunkt avhenger av at porevannets pH er høyt nok til å bryte ned glasspartiklene i flygeasken. For å oppnå høyt nok nivå, minst 13.2, må en stor del av portlandsementen være hydratisert. Det trege reaksjonsmønsteret til flygeaske vil resultere i en langsommere tilvekst av fasthet og tetthet i betongen.

Flygeaskepartiklene kan gi en positiv gevinst, da disse vil fungere som kjerner for utfelling av sementens hydrasjonsprodukter, en såkalt nukleeringseffekt. Isolert sett, vil denne effekten gi en økt hastighet for reaksjonen av portlandsement, og økt utfelling av CH i tidlig fase. [14, p. 32]

Portlandsement med slagginnhold, vil etter innblanding med vann, reagere og en liten del av slagget vil frigjøre kalsium- og aluminiumioner. I likhet med flygeaske, trengs det en pH-verdi høyt nok til å bryte ned glassfasen. For slaggligger denne verdien på ca. 12, noe som innebærer at en viss mengde med portlandsement må hydratiseres. Reaksjonshastigheten for slagget avtar ved økende slaggl/sement forhold, på grunn av lavere pH-verdi. Dette innebærer at

betong med høy slaggandel vil kunne resultere i en langsommere hydratisering, på grunn av minkende sementinnhold, og dermed lavere reaktivitet for slaggandelen.

Reaksjonshastigheten til slagg er mer temperaturfølsom enn det portlandsement er. Slagg reagerer sakte ved temperaturer under 15°C, men reaksjonshastigheten akselereres ved temperaturer over 27°C. En slaggbetong vil kunne få en økt mengde C-S-H og tettere porestruktur enn betong med kun portlandsement. Årsaken til dette er at kapillærporøsiteten blir kraftig redusert, og en bedre distribusjon av C-S-H-gelen forekommer. For portlandsement felles C-S-H direkte på sementkornenes overflate, mens for portlandsement med slagg felles C-S-H mellom slagg- og portlandsementkornene. [14, p. 35]

Pozzolanene flygeaske og slagg bidrar til en økt mengde C-S-H, redusert CH-innhold, lavere alkalinitet og en tettere porestruktur i betongen. Reaksjonsraten er langsommere for flygeaske enn for slagg, og flygeaske er mer egnet til å redusere herdevarmen. [14, p. 36] Erfaringer hentet fra «Bjørvikaprojektet» [14, p. 130], viser at tiden før betongblandingen nådde maksimaltemperatur, ble forskjøvet med tilsetning av flygeaske og slagg. Videre viser erfaringene at varmeutviklingen var mer langsom, som igjen bidro til redusert maksimaltemperatur.

1.6 Varmebehandling

I dagens samfunn er varmebehandling en begrenset metode. Det er vanlig at prefabrikkerte UHPC elementer blir varmebehandlet i temperaturer mellom 80-90°C. Styrken til betongen øker, og mikrostrukturen blir tettere enn om betongen hadde herdet under standard

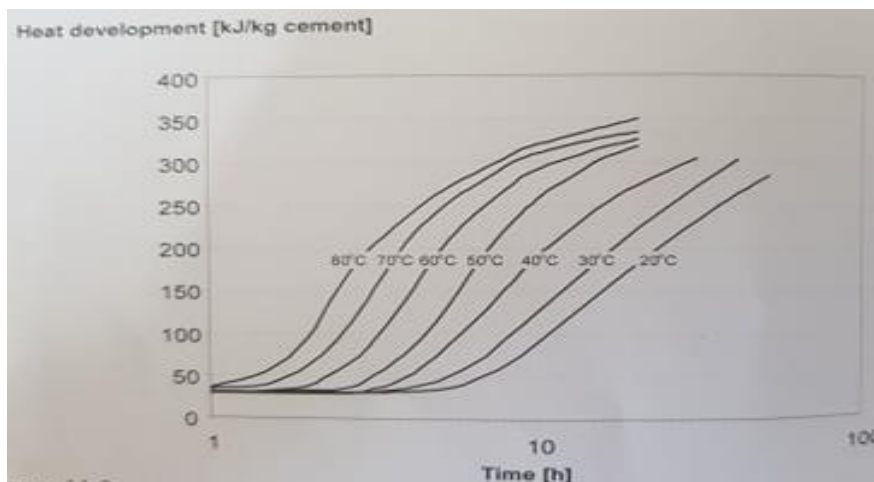
herdeforhold. Under varmebehandlingsprosessen av prefabrikkerte UHPC elementer støpes betongen ut i former, herdes under normale forhold i 24 timer (eller avbindingstidspunkt) og utsettes deretter for varmebehandling i 48 timer. Ifølge [1, p. 18] skal ytterligere varmebehandling ikke ha noe effekt på betongens fasthet. Etter varmebehandling er det viktig at betongelementet kjøles ned sakte, for å hindre dannelsen av mikrosprekker. [1, pp. 17,18]

Fasthets- og styrkedannelse for betong utvikles med en lav hastighet under standard herdeforhold. Det er derfor ønskelig, i enkelte tilfeller, å oppnå en høyere tidligstyrke, ved å akselerere fasthetsutviklingen ved ulike herdemetoder; varmebehandling er en metode for å oppnå dette. Utsettes betongen for varmebehandling i tidlig alder, vil det resultere i fysiske og kjemiske forandringer i mikrostrukturen, og dermed påvirkes betongens tidligstyrke. På grunn av betongens lave termiske ledningsevne, mellom 2.3 og 2.8 W/m i romtemperatur, kan det oppstå temperaturgradienter i betongen, som igjen kan føre til varierende volumendringer i betongen. Forekommer det ulik volumendring grunnet termisk spenning i ulike deler av betongen, kan det resultere i mikrosprekker. [18]

Fiber vil bedre betongens termiske ledningsevne og en mer homogen varmfordeling i massen vil oppstå. [18] Resultatene i [18] viser at deres varmebehandlede UHPC har en høyere 7-, 14- og 28 dagers trykkfasthet, uavhengig av fiber- eller silika innhold i blandingsene, enn betong utsatt for standard herdeforhold. Til forskjell viste resultatene at styrken, etter 56- og 90 dager, hadde en fallende tendens, og ble lavere for varmebehandlede prøver enn for prøver under normale herdeforhold. [18] formidler i sin konklusjon at dette

kan skyldes en ikke-uniform fordeling av hydratiseringsprodukter som igjen kan resultere i et større porevolum og dermed påvirke betongens senere fasthet.

Hydratiseringen av sement er veldig temperaturfølsom, og en høy varme vil akselerere de kjemiske prosessene og øke fastheten i tidlig fase. Derimot vil varmebehandling under høy varme ($>40^{\circ}\text{C}$) påvirker den strukturelle oppbygningen i den herdende betongen, noe som kan resultere i en lavere sluttfasthet enn for lavt tempererte herdeforhold. Herdetemperaturens effekt på betongens sluttegenskaper avhenger av bindemiddelkomposisjonen. Figur 10 viser hydratiseringshastigheten og varmeutviklingen, for sement med v/b-tall lik 0.4, ved ulike herdetemperaturer. Hydratiseringshastigheten er betydelig høyere for en herdetemperatur lik 80°C en for eksempel ved en normal herdetemperatur lik 20°C . [11, pp. 11-6 og 11-7]



Figur 10 - hydratiseringsraten og utviklet varme for bindemiddel med v/b-tall lik 0.4 [11, pp. 11-6]

Arrhenius' ligning forklarer sammenhengen mellom temperatur og kjemisk aktivitet for en termisk prosess, og sier noe om hydratiseringen for en gitt temperatur sammenlignet med en referansetemperatur lik 20°C .

$$H(\theta) = e^{\frac{E(\theta)}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+\theta} \right)}$$

Formel 11

$H(\theta)$ er hydratasjonshastigheten sammenlignet med referansetemperatur og er dimensjonsløs, R er gasskonstanten lik 8,314 J/mol og θ er herdetemperaturen.

- $E(\theta) = A + B(20 - \theta)$; $\theta \leq 20^\circ\text{C}$
- $E(\theta) = A$; $\theta > 20^\circ\text{C}$

$E(\theta)$ er aktiveringsenergien og er den faktoren som regulerer temperaturfølsomheten. I herdeteknologien forklares aktiveringsenergien ved en forenklet bilineær funksjon, noe som er en grov tilnærming, men gir akseptable resultater for brukt. [10, p. 327] A varierer mellom 20-40 kJ/mol, og verdien avhenger av sementtype, pozzolaninnhold og v/b-tall. B varierer mellom 1.0–1.5 kJ/mol. [11, pp. 11-7] Figur 11 illustrerer eksempler på verdier for A og B ved henholdsvis konstruksjonsbetong med ren portlandsement, og lavvarme betong basert på sement med flygeaske. [10, p. 328]

Betongtype	A (kJ/mol)	B (kJ/mol·°C)
Konstruksjonsbetong basert på ren portlandsement	32000	1200
Lavvarmebetong (30 % FA)	36000	200

Figur 11 - Konstantene brukt for å finne aktiveringsenergien [10, p. 328]

Pozzolanreaksjonen er temperaturavhengig, på samme måte som sementreaksjonen, bare i en enda sterkere grad. Pozzolanreaksjonen går svært sakte med lave temperaturer, men går raskere og raskere ved økende temperaturer. Høy herdetemperatur vil lede til høy tidligfasthet

for silikabetong. Fastheten etter 28 døgn, for betong uten silika, vil være lavere ved høye herdetemperaturer på grunn av de høye temperaturene vil utvikle andre og mer porøse reaksjonsprodukter enn herding under lave temperaturer. Silika resulterer i en betong som er mer robust overfor høye herdetemperaturer. [10, pp. 96-97]

1.7 Varmeutvikling

Varmeutvikling i betong kan beskrives ved hjelp av Formel 12:

$$Q(M) = Q_{\infty} \cdot e^{-(\frac{\tau_e}{M})^{\alpha}} \quad \text{Formel 12}$$

Hvor M er modenhet [t], Q_{∞} er total varmeutvikling [$\frac{kJ}{kg}$], τ_e er en retardasjonskonstant [t] og α er svingningskonstant. Konstantene varierer for ulike fasthetsklasser. [11, pp. 11-14]

Formel 12 kan brukes ved høy nøyaktighet i første del av herdefasen, rundt 100 modenhetstimer. Målinger fra varmeutvikling for en gitt betongblanding er vanligvis hentet fra forhold som er lavere enn de adiabatisk forholdene. Adiabatisk forhold betyr at det ikke forekommer noe varmeutveksling mellom omgivelsene og betongblandingen. I praksis vil adiabatisk forhold aldri oppnås, grunnet en konstant temperaturgradient mellom betongelementet og omgivelsene. Semi-adiabatisk forhold vil føre til varmetap, og varmeutviklingen til betongen vil bli noe lavere. I en situasjon med adiabatisk forhold, kan temperaturøkningen beskrives av Formel 13 [11, pp. 11-5]:

$$\Delta\theta = \frac{Q_{\infty}C}{\rho_r c_b} \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

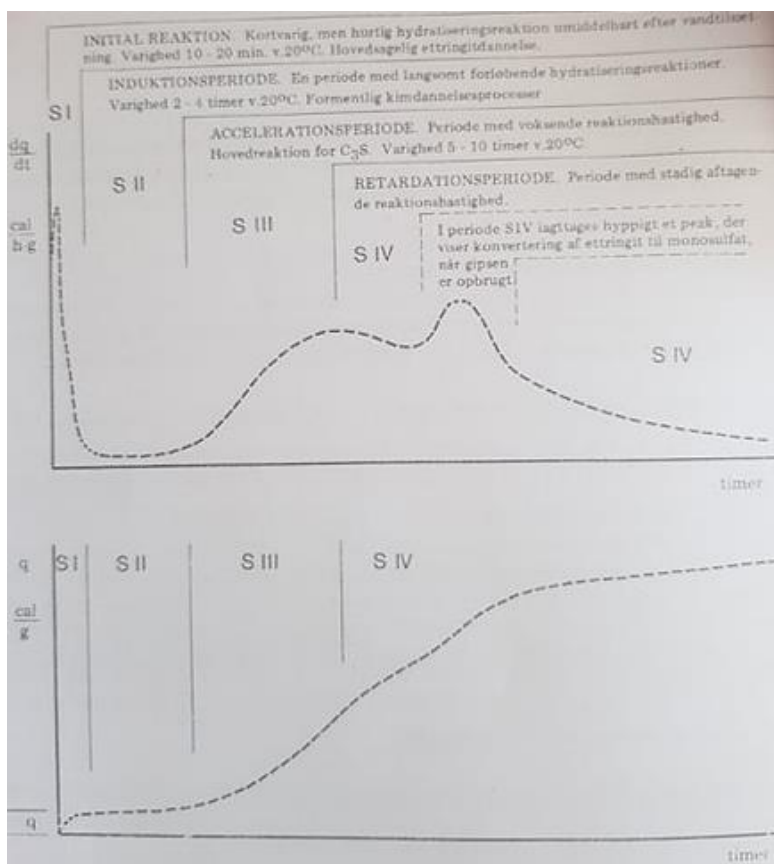
Formel 13

Hvor Q_{∞} er varmeutvikling per sementmengde [kJ/kg], C er mengde sement [kg/m^3], c_b er betongens spesifikke varmekapasitet [(kJ/kg)* $^{\circ}\text{C}$] og ρ_r er betongens densitet [kg/m^3].

En typisk varmeutvikling kan beskrives ved å dele varmeutviklingen inn i reaksjonsperioder. Figur 12 fremstiller hvordan en typisk varmeutvikling foregår og hvilke perioder som inngår i prosessen. Den første fasen (initialperioden) finner sted rett etter kontakten mellom vann og sement. Perioden varer normalt mellom 10-20 min og den viktigste bidragsfaktoren kommer fra ettringite formasjon (se Formel 6 under seksjon 1.4) fra klinkermineralet C_3A . Ettringite formasjonen utsetter videre hydratisering og denne perioden avgir normalt 20-30 kJ/kg. [11, pp. 6-10]

Formasjonen av ettringite leder videre til den neste fasen av temperaturutviklingen (den hvilende periode). Den hvilende periode varer mellom 2 til 4 timer hvor aluminat reaksjonen er kontrollert av ettringite gel som omkranser C_3A kornene og hindrer videre hydratisering mellom C_3A og vann. Resultatet av dette er lite varmeutvikling. Etter metning av poreløsningen med kalsiumioner, hovedsakelig fra oppløsningen av alitt (C_3S) og belitt (C_2S), begynner kalsiumsilikathydrat (C-S-H) og kalsiumhydrat (CH) å dannes. Dette er den tredje fasen (akselerasjonsperioden) og det er i hovedsak $\text{C}_3\text{S} \rightarrow \text{C-S-H}$ reaksjonen som forekommer i denne perioden og resultatet er en høy reaksjonshastighet og høy varmeutvikling. [19]

Den siste fasen (retardasjonsperioden) forekommer i det interaksjonen mellom C-S-H og CH med vann og uoppløst sementkorn sakker ned alitt-hydratiseringsreaksjonen. Reaksjonsraten synker, og temperaturøkningraten avtar. Det kan oppstå en liten akselerasjonsperiode i retardasjonsperioden dersom det dannes monosulfat (se seksjon 1.4). Belitt oppløses, frigir kalsium-ioner svært sakte, og produserer C-S-H og CH. Denne reaksjonen foregår mange dager etter blanding og gir ut lite varme. Så lenge det er vann, alitt og belitt tilstede i systemet vil silikatene fortsette å hydratisere. [19]



Figur 12 - En isoterm varmeutvikling for sementpastaen, q er faktisk temperatur, $\frac{dq}{dt}$ er raten til varmeutviklingen [11, pp. 6-10]

1.8 Autogent svinn

Betongens totale svinn er summen av flere ulike typer svinn; kjemisk-, autogent, uttørkings-, karbonatiserings- og plastisk svinn. Autogent svinn oppstår tidlig og stammer fra vanntap i kapillære porer grunnet hydratisering. I betong med lavt v/b-tall utvikles autogent svinn hurtig og blir den dominante faktoren for total svinn. [20] Generelt kan autogent svinn forklares ved at det dannes faste materialer i det sementen reagerer med vann (C-S-H og CH). Denne reaksjonen fører til volumendring på grunn av produktene (fast materiale) har et lavere volum enn reaktantene (sement + vann). Dette fenomenet er kjent som kjemisk svinn, og oppstår i det øyeblikket vann tilsettes blandingsprosessen. Kjemisk svinn vil foregå så lenge sementen reagerer inert i betongen, altså opptil flere måneder. Det er den eksterne effekten av kjemisk svinn som kalles for autogent svinn. [21]

Ifølge Powers [10, p. 58] er volumreduksjon tilsvarende 25.4% av volumet av den reagerte vannmengden, og det er denne reduksjonen som kalles kjemisk svinn. Det kjemiske svinnet fører ikke til en ytre volumreduksjon, men gir utslag ved indre poredannelse (kontraksjonsporer). Kontraksjonsporene i betongen utgjør vanligvis rundt 2% av volumet i en standard konstruksjonsbetong, og porene er i utgangspunktet tomme. Overskuddsvannet, vannet som ikke har deltatt i hydratiseringsprosessen, danner et finfordelt og kontinuerlig poresystem innad i betongen, kapillærporer. Overskuddsvannet fordeler seg alltid i de minste porene på grunn av de kapillære kreftene mellom vann og porer. [10, p. 58]

Store deler av porestrukturen som oppstår i betongen består av svært fine porer, mindre enn 1 μm . I slike porer kan det oppstå kapillæreffekter, noe som er et resultat av overflatespenninger mellom luft og vann. Overflatespenningen skaper et undertrykk i vannfasen, noe som igjen resulterer i strekkspenninger i faststoffstrukturen. Trykkendringene kan beskrives ved hjelp av Young Laplace-ligningen: [10, p. 65]

$$dp = -\frac{2\sigma^{lg}}{r}$$

Formel 14

dp er kapillært undertrykk, σ^{lg} er vannets overflatespenning og r er kapillærporens radius. Kontraksjonsporevolumet øker og kapillærporevolumet reduseres når sementen hydratiseres, men selv om volumet øker, blir porene finere fordi porene gradvis fylles av C-S-H og CH. Begge disse effektene resulterer i et økende kapillært undertrykk, og det oppstår et ytre volumtap i betongen, nemlig autogent svinn. [10, p. 65]

Dersom v/b-forholdet senkes vil autogent svinn øke, som igjen øker risikoen for dannelse av mikrosprekker. For blandinger med visse typer portlandsement og ved en gitt alder, observerte Baroughel-Bouny at mengden autogent svinn økte lineært med et minkende v/b-forhold. Denne sammenhengen fant sted for alle v/b-tall i regionen 0.2-0.6. Det finnes mange eksperimentelle forsøk som har vist en sterk sammenheng mellom autogent svinn og et fall i fuktigheten til poresystemet. [22, p. 5]

For betongblandinger med lavere v/b-forhold enn 0.36 vil densiteten til betongen være såpass høy at tilstedeværelsen av vann ikke er i stand til å hindre et markant dropp i relativ fuktighet, og sprekkdannelser i tidlig fase er uunngåelig. [22, p. 8]

Bruken av pozzolaner som tilsetningsmaterialer vil føre til endringer i porevolumet.

Pozzolanreaksjonen har dobbelt så stort kjemisk svinn som hydratiseringen av sement; det vil si at bruken av pozzolaner kan føre til at kontraksjonsporevolumet øker. Pozzolanreaksjonen binder ikke fritt vann på samme måte som sement-hydratasjonen, og kan dermed føre til en høyere porøsitet. Det at porøsiteten øker gir nødvendigvis ikke en negativ effekt på grunn av pozzolane-materialer resulterer i en finere porestruktur, og dermed et tettere materiale.

Hydrauliske tilsetningsmaterialer som slagg gir omtrent det samme kjemiske svinnet som portlandsement. Slagg hydratiserer på samme måte som sement og binder dermed vann, og den kapillære porøsiteten blir omtrent den samme i slaggsement som i portlandsement. Bruke av slagg gir derimot en finere porestruktur, og dermed en tettere betongstruktur. [10, p. 64]

En studie utført av National University of Singapore, så på effekten varierende v/b-tall (0.26 – 0.35) og silikainnhold (0% - 10%) hadde på autogent svinn for betong med portlandsement. Resultatene viste et økende autogent svinn for minkende v/b-tall og et økende silikainnhold. Eksempelvis var det autogene svinnet etter 98 døgn 0,197mm, 0.266mm og 0.282mm for henholdsvis 0%, 5% og 10% silikainnhold for prøvene med v/b-tall likt 0.26. [23, pp. 1687, 1693, 1694]

En viktig faktor som påvirker starttidspunktet for autogent svinn, er temperaturutviklingen i betongen. En temperaturøkning kan resulter i termisk ekspansjon, som vil øke det totale volumet til betongen. Er den termiske ekspansjonen like stort som det autogene svinnet i tidlig alder, vil det ikke være mulig å observere sammentrekningen fra svinnet. [23, pp. 1690, 1691]

1.9 Trykkfasthet

Styrke er definert som materialets evne til å motstå påførte spenninger, uten å gå i brudd. For betong er det sprekkedannelse som indikerer tegn til utvikling av brudd. For brudd er det ofte maksimal plastisk tøyning som er den begrensende faktoren, og ikke den påførte spenningen.

Nominell spenning er definert som last dividert på tverrsnittareal: [5, p. 164]

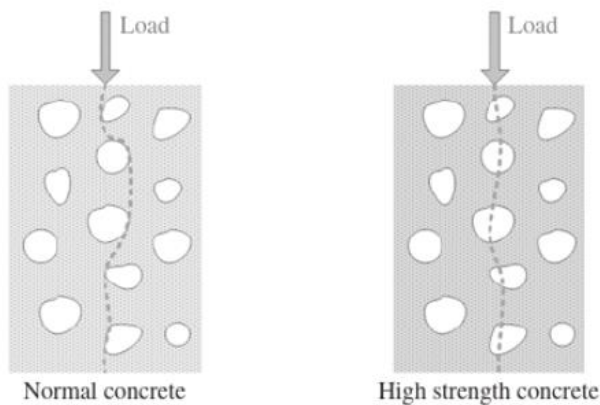
$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad [MPa] = \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad \text{Formel 15}$$

Konvensjonell tøyning er definert som endring i lengde, delt på opprinnelig lengde: [5, p. 164]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \quad \left[\frac{mm}{mm} \right] \quad \text{Formel 16}$$

28 dagers trykfasthet gjennomført i en standard aksial komprimeringstest, gir en universell betongegenskapsindeks for design av betongkonstruksjoner. Det vanligste er at det blir benyttet en komprimeringsmaskin, som klarer å lese av last eller tøyning. [5, p. 165]

Det er ikke bare styrken som er den vesentlige forskjellen mellom en standard betong og en UHPC, men også hvordan utviklingen av bruddene forekommer. UHPC's mikrostruktur er mer homogen enn strukturen til standard betong på grunn av større sementmengder, og tilslaget har ofte en vesentlig mindre kornfordeling. Det vil oppstå et mer sprøtt brudd hos UHPC, hvor sprekken er vertikal og går tvers gjennom tilslaget, enn ved standard betong, hvor bruddet vanligvis vil gå rundt det grove tilslaget; vist ved Figur 13. [5, pp. 271,272]



Figur 13 - Typiske brudd for standard betong og UHPC [5, p. 272]

1.10 Elastisitetsmodul

Elastiskmodulus er en betegnelse for hvor stivt, eller motstanden et materiale har mot deformasjoner. Dersom spenning og tøyingsforholdet er proporsjonalt, kan Hook's lov bestemme E-modulen hvis spenning og tøyning er kjent.

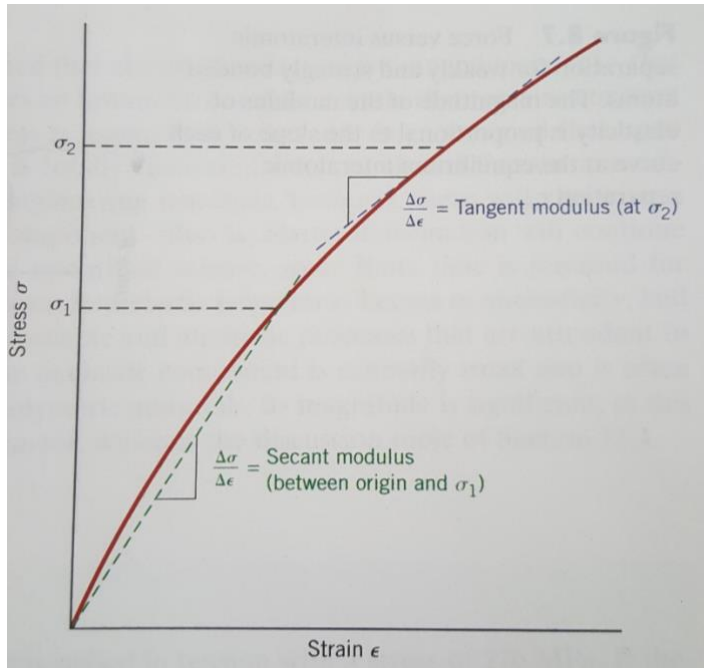
Hook's lov:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \text{ [Pa]}$$

Formel 17

Stigningen på kurven forteller noe om hvordan motstanden mot deformasjon(stivt) til materialet er, og en høyere verdi tilsier et stivere materiale. For et elastoplastisk materiale, som betong, vil ikke spenning- og tøyingskurven være lineær. Her må enten tangent- eller sekantmodulusen bli benyttet. Tangentmodulusen tar stigningen for et bestemt punkt på stress/tøyingskurven, mens sekantmodulusen tar stigningen fra origo til et bestemt punkt på kurven (skissert ved Figur 14). [24] Høyere E-modul tilsier en stivere betong.

Elastisitetsmodulen er nødvendig for å estimere deformasjonen til et element, og forsikre at SLS kravene er møtt. Tilslagets størrelse, form og fasthet er parametere som er svært betydningsfulle for elastisitetsmodulusen. [25]



Figur 14 - Spenning/tøyning-diagram for et ulineært materiale, og hvordan sekant- og tangent modul bestemmes [24]

2 Metode

Denne seksjonen forklarer hvordan de ulike testprosedyrene, knyttet til det praktiske arbeidet, ble utført.

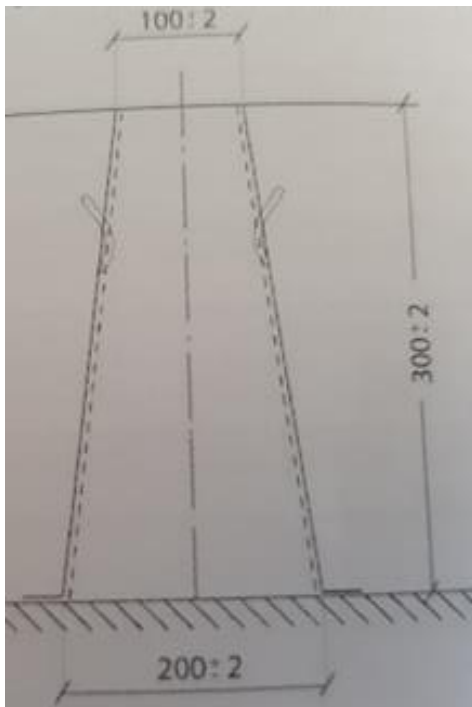
2.1 Tilslagets fuktighet

Fuktigheten i tilslaget er en viktig faktor i forhold til å justere vannmengden for å opprettholde det ønskede v/b-forholdet. Tilslagets vannmengde kan finnes ved hjelp av en fuktighetstest som måler gasstrykket inne i en beholder. En lufttettbeholder tilsettes en oppveid mengde med tilslag(20g) og pulverisert kalsiumkarbid. Beholderen ristes godt i omtrent 40 sekunder, hvor det innføres en liten pause etter 20 sekunder. Dette blir gjort for å blande sammen alt tilslagsmateriale og kalsiumkarbid for å sette i gang den kjemiske reaksjonen. En måler på undersiden av beholderen presenterer fuktprosenten til tilslaget.

2.2 Betongens støpelighet

Støpeligheten til en betong kan finnes ved hjelp av den empiriske slumpetest metoden. Slumpetest er uten rom for sammenligning den mest brukte metoden for å karakterisere betongens bearbeidelse. Testprosedyren utføres ved å fylle betong i en kjele, med mål fremstilt fra Figur 15, i tre lag, hvor hvert lag blir komprimert med en stålstang. [11] I denne

oppgaven utføres ikke komprimeringen grunnet antakelse om høye synkutbredelser. Kjeglen løftes vertikalt opp i en jevn og rolig bevegelse og idet kjeglen løftes startes det en stoppeklokke for å registrere T500. T500 er tiden det tar for betongmassen å flyte ut til 500mm sirkelen. [11] T500 skal i denne oppgaven tilfredsstillende kravet til stabilitetsklasse T2, nemlig at tiden det tar før 500mm utbredelse er nådd skal være ≥ 2 sekunder. [10] Etter full synkutbredelse måles diameteren over prøvens minimum- og maksimum utbredelse.



Figur 15 - slump test(mm) [11]

2.3 Densitet og luftinnhold

Den ferske betongens masse bestemmes ved hjelp av en beholder med kjent masse og volum.

Densiteten og luftinnholdet defineres i henhold til NS-EN 12350. [26] Beholderen, vist i

Figur 16, har en kjent masse m_1 ; den fylles opp i to lag hvor hvert av lagene komprimeres. For å fjerne luftlommer påføres beholderen lette slag med en gummihammer. Overflaten avrettes, utsiden rengjøres og beholderen veies for å finne m_2 . Densiteten regnes ut ved hjelp av Formel 18:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

Formel 18

Luftmålertoppen til beholderen klemmes på plass, hovedluftventilene stenges og de to sideventilene åpnes. Det føres vann ned i den ene av de to ventilen for å utligne mellomrommet mellom betongoverflaten og undersiden av luftmålertoppen. Mellomrommet er utlignet idet øyeblikket det tyder vann ut fra den andre ventilen. Ventilene stenges og luft pumpes inn i beholderen til trykkmåleren viser opprinnelig trykknivå. Hovedluftventilen åpnes og betongens luftandel avleses av trykkmåleren. [27]



Figur 16 - Beholder med kjent volum og masse for densitet og luft

2.4 Referanseblandingsens temperaturutvikling

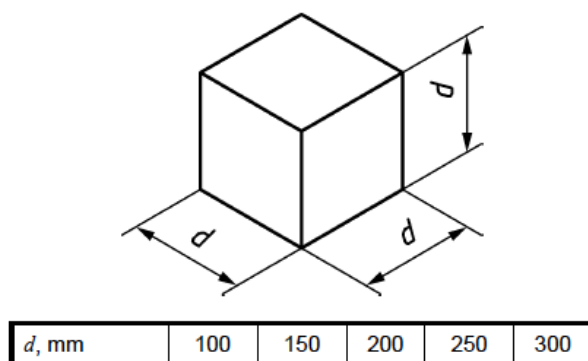
Adiabatiske forhold er uoppnåelige og det ble i denne oppgaven benyttet en semi-adiabatisk tilnærming. Semi-adiabatisk tilnærming er en vell-isolert boks hvor målet er å begrense varmetap til omgivelsene. Isolasjonsboksens oppsett brukt i denne oppgaven er presentert ved Figur 17. Det ble foretatt temperaturmålinger fra isolasjonsboksen, hvor målingene blir konvertert inn i et Excel-ark; varmetapet blir kompensert ved å anta en proporsjonal sammenheng mellom varmetap og forskjellen mellom betongens temperatur og omgivelsestemperatur. Proporsjonaliteten er kalt varmetapskoeffisienten, og kan måles eller regnes ut. Resultatet vil være temmelig nøyaktig for de første 100-200 timene, men programmet kan ikke gi det helt eksakte resultatet for varmeutvikling. [11] Excel-programmet benytter Formel 12 og Formel 13 for å omgjøre semi-adiabatiske målinger om til adiabatiske.



Figur 17 – Isolasjonskasse

2.5 Herdeforhold

Standard herdeforhold skal utføres i henhold til NS-EN 12390-2. Etter blanding skal betongen føres over i kubeformer som følger målene gitt i Figur 18. I denne oppgaven blir det benyttet former hvor d er lik 100mm. Formene lagres i minst 16 timer (etter avbindingstidspunkt), men ikke lenger enn tre døgn, ved en temperatur på $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ beskyttet mot støt, vibrasjon og uttørking. For å hindre uttørking inntulles terningsformene i plastfolie, og formene legges på en solid underflate for å hindre vibrasjon og støt. Etter avforming, herdes prøvelegemene frem til tidspunkt for prøving, i et vannbad med en temperatur på $20\pm 2^{\circ}\text{C}$.



Figur 18 - kube [28]

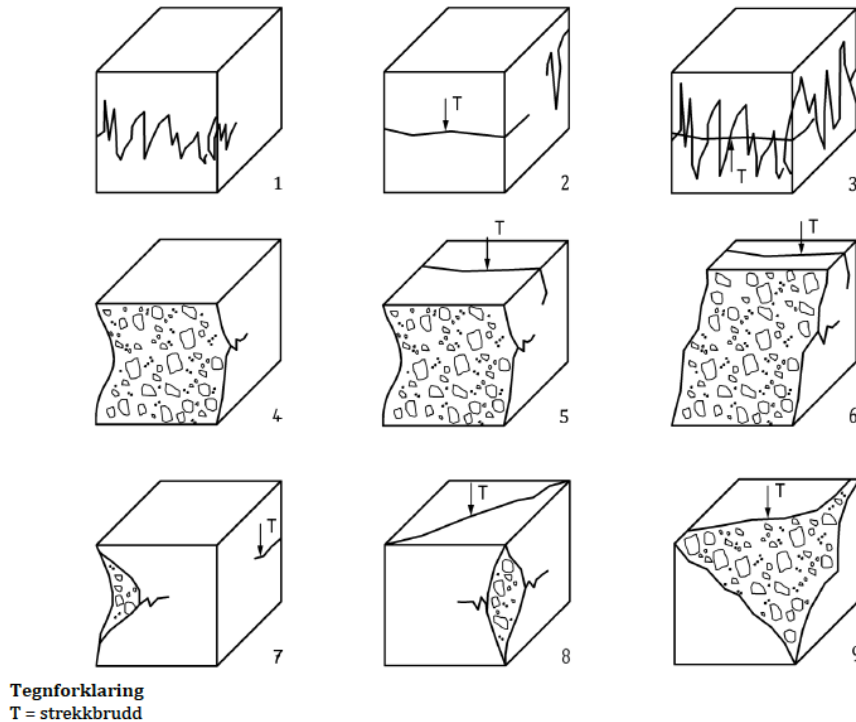
Herdeforhold under kontrollert temperaturutvikling er den andre herdeformen brukt i denne oppgaven. Temperaturutviklingsgrafene, forklart hvordan funnet i seksjon 2.4, programmeres inn i et dataprogram, CiD-Pro 4.01 fra CTS, som igjen er koblet opp mot et klimaskap (varmeskap) som følger temperaturutviklingsgrafene og holder fuktigheten $>95\%$.

Prøvene tas ut ved respektive 80- og 90°C, avformes og plasseres i vannfylte bøtter med temperaturer lik 80- og 90°C. Prøvene lagres i henholdsvis 1-, 2- og 3 døgn, deretter avkjøles prøvene kontrollert og plasseres i vannbad med en temperatur på $20\pm 2^\circ\text{C}$. Her fortsetter herdeprosessen frem til tidspunkt for prøving.

2.6 Trykkfasthet

For å finne legemets trykkfasthet skal prosedyren presentert i NS-EN 12390-3 følges.

Prøvelegemene(terningene) skal testes for fasthet så fort det lar seg gjør etter at terningene er fjernet fra herding. Prøvingslokalet skal ha en temperatur på $20\pm 5^\circ\text{C}$. Alle bærende overflater på trykkmaskinen skal børstes rene og overskuddsfuktighet fra terningene skal tørkes av før de plasseres i prøvingsmaskinen. Terningen plasseres slik at lasten påføres vinkelrett på støperetningen og velg en konstant pålastningshastighet lik $0.6\pm 0.2\text{MPa/s}$. Lasten påføres jevnt til et brudd oppstår i terningene og bruddkraften leses av trykkmaskinen. Brudd som viser at prøvingen av terningene er utført på en tilfredsstillende måte er vist i Figur 19.



Figur 19 - Tilfredsstillende bruddformer for terningformede prøvelegemer [29]

Hver gang et trykkfasthetstall blir oppgitt er det gjennomsnittsfastheten av tre terninger som blir presentert, og trykkfasthetsforskjellene som oppstår innad i terningstrioene blir statistisk behandlet ved hjelp av variasjonskoeffisienten. Variasjonskoeffisienten avhenger av faktorene standardavviket og gjennomsnittsverdiene i datasettet. Standardavviket er knyttet til spredningen i trykkfasthetsmålingene, og forteller hvor stor forskjell hver individuelle trykkfasthetsverdi normalt varierer fra snittfastheten. Standardavviket kan uttrykkes ved følgende formel (Formel 19).

$$S.D(\sigma) = \sqrt{\frac{\sum(x-\mu)^2}{n-1}}$$

Formel 19

$$\text{Variasjonskoeffisient} = \frac{S.D(\sigma)}{\mu} * 100$$

Formel 20

Hvor x uttrykker trykkfastheten til hver enkelt prøve, μ er gjennomsnittsfasthet av tre teststerner og n er totalt antall prøver.

Variasjonskoeffisienten uttrykkes ved Formel 20 og er definert som ratioen mellom standardavviket og gjennomsnittsverdien. Variasjonskoeffisienten blir oppgitt i prosent og uttrykker presisjonen av trykkfasthetsverdiene i forhold til gjennomsnittsverdien.

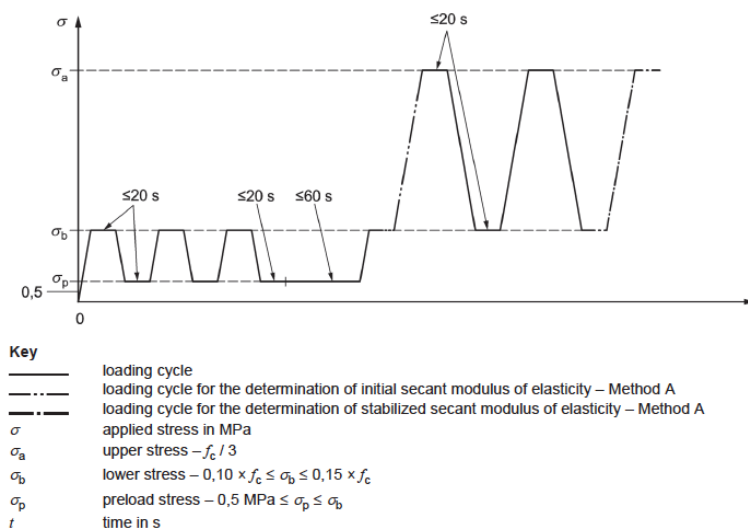
2.7 Sekantmodul for elastisitet under trykk

Elastisitetsmodulen til et prøvelegeme finnes ved å følge prosedyren gitt i NS-EN 12390-13. Det anbefales å bruke en sylinder med dimensjoner lik 150mm i diameter og 300mm i høyde, men i denne oppgaven blir sylindrene skåret/slipt ut i mindre høyder for å oppnå renere overflater. Kravet som må opprettholdes dersom prøvestykkene kuttet er at høyde/diameterforholdet er ≥ 2 og ≤ 4 . Testsyndrene skal følge standard herdeforhold gitt i 2.5.

Prøvelegemene påføres en aksial kompresjonskraft og det monteres et måleinstrument som registrerer tøyning i området $0\mu m/m$ og $1000\mu m/m$ (krav i samsvar med EN ISO 9513). Måleinstrumentet skal posisjoneres slik at avstanden fra instrumentet til henholdsvis toppen og bunnen skal være den samme. Lasten påføres testsylinderet i henhold til Figur 20 hvor

hastigheten påføres og avlastes med $0.6 \pm 0.2 \text{ MPa/s}$. Bruddstyrke, f_c , bestemmes i samsvar med NS-EN 12390-3 (forklart i 2.6), og det foretrukne er at dimensjonene for å finne bruddstyrken og sekantmodulen for elastisitet er de samme. I denne oppgaven bestemmes bruddstyrken ved å benytte terningformede prøvelegemer, og en konversjonsfaktor ved å se på forskjellen mellom den karakteristiske fastheten til henholdsvis sylindere og terning. De respektive karakteristiske fasthetene til sylindere og terninger presenteres i tabell NA.2 fra NS-EN 206:2013+A1:2016+NA2017. I og med at standarden ikke tar høyde for UHPC benyttes faktoren, 0.86, som er forholdet mellom den høyeste fastheten til henholdsvis sylindere og terninger, dvs. B95 trykkfasthetsklassen. I denne oppgaven settes:

- σ_p til 1MPa
- σ_b til en medianverdi av $0.1 \cdot f_c$ og $0.15 \cdot f_c$



Figur 20 - Lastsyklus for å beslutte elastisitetsmodulen [30]

Den stabiliserte sekantmodulen for elastisitet er definert av Formel 21.

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}}$$

Formel 21

hvor $\varepsilon_{a,3}$ er snitt tøyningen registrert ved tredje kurve for øvre spenning og $\varepsilon_{b,2}$ er snitt tøyningen gitt ved andre kurve for nedre spenning.

2.8 Autogent svinn

Hovedsakelig benyttes det to forskjellige målemetoder for autogent svinn; måling av volumetrisk endring eller måling av lineær deformasjon. Den lineære deformasjonen måles ved å plassere sementpastaen i et stivt rør med lav innvendig friksjon. Lengdeendringen til sementpastaen registreres av en forskyvningstransduser som er plassert i enden av prøven. Fordelen ved å benytte målemetoden lineær deformasjon er den faste forankringen fra målepunktet til sementpastaen, noe som reduserer sjansen for feilaktige målinger av indre volumreduksjoner som ytre volumendringer. Ved denne fordelene følger også en ulempe, nemlig at målingene ikke kan starte før sementpastaen har satt seg. Et tilleggsproblem som kan oppstå er for stor friksjon mellom røret og sementpastaen. Den volumetriske endringen måles ved å fylle sementpastaen i en tett gummiballong nedsenket i vann. Volumendringen av sementpastaen registreres ved å se på vannmengden fortrent fra den nedsenkede prøven, for eksempel ved å måle vektendringen av den nedsenkede prøven. Målemetoden brukt i denne oppgaven er en kombinasjon av lineær deformasjon og volumetrisk endring. «Auto-shrink-system» (AS-systemet) er et dilatometer for autogent svinn. Dilatometeret består av en måleramme og rør som innkapsler sementpastaen vist ved Figur 21. Plastrøret er laget av 0.5 mm polyetylen og er korrugert for å sikre uhindret langsgående deformasjon. Etter fylling av

røret festes propper (disker) i endene, og proppene fungerer som plane kontaktflater i begge ender. Røret hindrer tap av vann til omgivelsene, og forsøk utført fra [31] viser at vanntap grunnet fordamping var mindre enn 0.5%. Røret plasseres forsiktig i dilatometeret, transduseren kobles til en PC og resultatene registreres i Excel. Transduseren kalles «Transk-Tek 350-000» og tuppen er fjærlastet for å kunne følge lengdeendringene automatisk. [31]



Figur 21 - Komponentene brukt i dilatometeret AS-systemet (bildet er funnet fra <http://germann.org/products-by-application/autogenous-shrinkage/autogenous-shrinkage>)

AS-system metoden ble brukt som måleinstrument de første 48 timene, og videre autogent svinn måles ved hjelp av støpte prismer. Prismene støpes ut i former med dimensjoner lik 100 mm x 100 mm x 500 mm, hvor formene er spesialdesignede, slik at måleknaster kan støpes inn sentrisk på kortendene av prøvestykket. Etter ferdigstøpt betong fylles prismene, overflødig betongmasse pusses av for å gi en jevn overflate og prismene tildekkes med plast for å hindre fuktutslipp. Ett døgn etter støping, avformes prismene og legges i plastfolie for å hindre fukttap. Videre registreres lengde- og vektendring etter 1, 7, 14, 28, 56 og 91 døgn

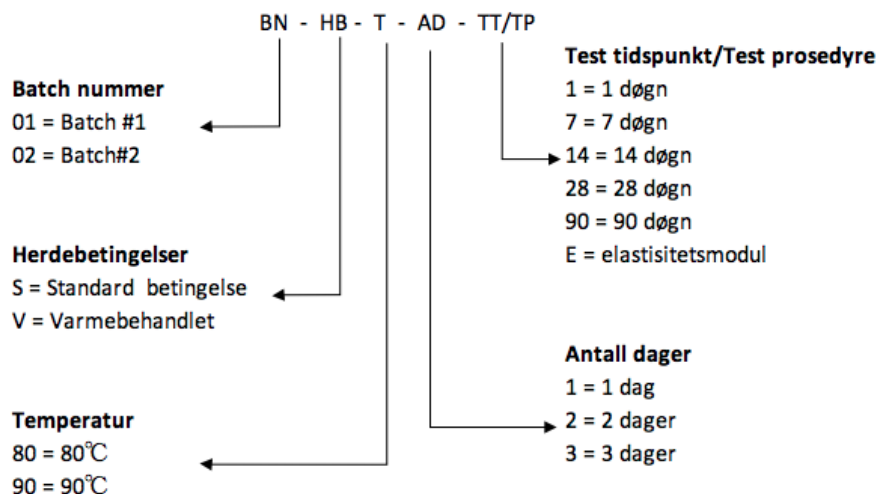
etter utstøping. Denne metoden skiller ikke autogent svinn fra uttørkingssvinn, men gir det totale svinnet av prøven. [32]

3 Forskningsplan

Målet med denne oppgaven er å kartlegge hvordan ulike herdebetingelser, samt hvordan ulike bindemidler, silikainnhold og mengde FA påvirker UHPC's trykkfasthet og temperaturutvikling. Dette er parametere som vil diskuteres grundigere senere i oppgaven.

3.1 Prøvebetegnelser

Denne forskningsoppgaven tar for seg 16 forskjellige betongbatcher, hvor de første 8 blir oppført som referanseblandinger, og de resterende batchene utsettes for ulike herdebetingelser.



Figur 22 – Plan for prøvenavngivning

Figur 22 danner en oversikt over hvordan de ulike blandinger refereres til med tanke på herdeforhold og testprosedyre. Det første initialleddet (BN) tar for seg blandingsnummer og vil gå fra 1-16, det andre leddet tar for seg herdebetingelsene som beskrevet i 2.5. For standard herdebetingelser tas ikke de to påfølgende initialleddene med i navngivningen, men går direkte til testtidspunkt/testprosedyre, som oppgir tidspunkt for kompresjonsstyrken eller om det er elastisitetsmodulen som har blitt testet. De to midtre leddene brukes dersom batchen har blitt varmebehandlet, og skal videre informere hvilken herdetemperatur prøvene har blitt eksponert for og for hvor mange døgn eksponeringen har forekommet for gitt temperatur.

To eksempler for hvordan en prøve refereres til kan være 03-S-14, 03 indikerer blanding nummer 3, S angir standard herdeforhold og 14 oppgir at kompresjonstesten ble utført 14 døgn etter produksjonsdag. Det andre eksempelet lyder 12-V-80-3-28. I dette eksempelet forekommer det herdeforhold eksponert for varme og det foreligger dermed to ekstra faktorer. Tallet 80 spesifiserer varmebehandling under 80°C og 3 informerer at prøvene har blitt eksponert for gitt varme i 3 døgn.

På grunn av en uforutsett hendelse i Covid19 oppstår det avvik i testtidspunkt for noen av prøvene. Det vil i disse tilfeller refereres som det faktiske testtidspunktet i antall dager. For eksempel kan en prøve refereres til slik: 09-V-80-1-[64]; her praktiseres de 4 første leddene på samme måte som nevnt i forrige avsnitt, mens det siste leddet [64], betyr at trykktesten ble gjennomført etter 64 dager.

Senere i oppgaven refereres det til batch-/blandingsparene under resultatpresentasjon og analyse for betongens ferske fase. Batch-/blandingsparene er blandingene som består av alle de samme komponentene med unntak av silika-innhold. Batch nummer 1 og 2 er et eksempel på et blandingspar, batch nummer 3 og 4 er et annet eksempel osv. I oppgaven vil det derfor kunne refereres til 8 blandingspar.

3.2 Betongens innhold

Det ble benyttet totalt tre ulike sementtyper, en silika-, FA-, fiber-, tilslags-, filler- og SP type. Komponentene og deres egenskaper er presentert i materialenes datablad, se Vedlegg A, og i følgende figurer:



Sement

CEM II/A-V 42,5 N

(Norcem Anleggssement FA)

Densitet: 3020 kg/m³

Finhet: 390 m²/kg



Sement

CEM I 52,5 R

(Schwenk Hvitsement)

Densitet: 3100 kg/m³

Finhet: 400 m²/kg



Sement

CEM II / B-S 52,5 N

(Schwenk Miljøsement)

Densitet: 3060 kg/m³

Finhet: 460 m²/kg



Pozzolan

Silikastøv

(Eikem microsilika U940)

Densitet: 2650 kg/m³



Pozzolan

Flygeaske

(Norcem flygeaske klasse A)

Densitet: 2300 kg/m³



Fiber

Weidacon FM 0,15/9

Lengde: 9 mm

Diameter: 0,15 mm



Tilslag

Årdal sand

Kornstørrelse: 0-8 mm

Densitet: 2680 kg/m³

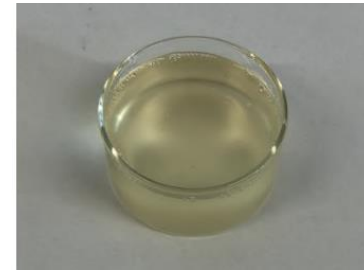


Filler

Millisil W12

Densitet: 2650 kg/m³

Silikastøv



Superplastisiser

Sika visco-crete UHPC-2

Densitet: 1,08 kg/L

Tørrstoff: 40 ± 1 %

Sementtypenes klinkerinnhold i forhold til totalt bindemiddel er fremvist i Tabell 3-1.

Tabell 3-1 - Sementtypes klinkerinnhold

Sementtype	Anleggssement FA (CEM II/A-V 42,5 N)	Hvitsement Rapid (CEM I/52,5 R)	Miljøsement (CEM II/B-S 52,5 N)
C ₃ S (%)	53	54	37
C ₂ S (%)	12	21	11
C ₃ A (%)	2	13	5
C ₄ AF (%)	11	1	5

3.3 Referanseblandinger

Referanseblandingen resept ble avklart i samråd med veileder og ble basert på tidligere UHPC resepter. UHPC reseptene denne oppgaven tar utgangspunkt i er basert på forskning fra en tidligere masteroppgave, hvor formålet med oppgaven var å kartlegge UHPC's støpelighet over tid. Etter utviklingen av referanseresepsten benyttet i denne oppgaven ble faktorer som bindemiddel, silikainnhold og mengde FA endret for å se hvilke utslag dette førte til. Mengden superplastiserende var en faktor som ble endret fra blanding til blanding for å oppnå ønsket støpelighet.

Tabell 3-2 – Blanderresepter (kg/m³)

Sement-silikainnhold% (FA%)	ANL - 16,5	ANL - 8	Hvit - 16,5 (25)	Hvit - 8 (25)	Hvit - 16,5	Hvit - 8	Miljø - 16,5	Miljø - 8
Batch nummer	1	2	3	4	5	6	7	8
CEM II/A-V 42,5 N (Anl-FA)	740,5	833,1						
CEM I/52,5R (Hvitsement-Rapid)			530,1	593	736,1	827,4		
CEM II/B-S 52,5 N (Miljøsement)							731,5	821,6
Fukt tilslag(%)	2,80 %	2,90 %	2,50 %	2,50 %	2,50 %	2,50 %	3,00 %	3,00 %
Aardal 0/8mm	1028,5	1028,5	1028,5	1028,5	1028,5	1028,5	1028,5	1028,5
Elkem microsilica 940 U	146,3	72,4	139,7	68,7	145,4	71,9	144,5	71,4
Millisil W12	217,7	217,7	217,7	217,7	217,7	217,7	217,7	217,7
Weidacon 0,15/9mm	157	157	157	157	157	157	157	157
Sika Visco-Crete UHPC-2	23,4	20,2	23,9	24,2	26,74	26,08	21,84	20,04
Norcem FA			176,7	197,7				
Vann	198,2	202,3	189,3	192,2	197	201	195,8	199,6
Totalt	2511,6	2531,2	2462,9	2479	2508,44	2529,58	2496,84	2515,84
v/b-forhold	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22

Blanderen som ble brukt var en Eirich R09t med en kapasitet opp til 150L eller 240kg.

Resultatene fra referansebatchene var lovende og reseptene fra Tabell 3-2 ble repetert for å følge herdeforholdene beskrevet i 2.5. Dvs. at resept 1 tilsvarer resept 9, resept 2 tilsvarer resept 10 osv.

4 Resultater

Denne seksjonen presenterer alle resultatene oppnådd under forsøkene, hvor en grundig analyse blir gjennomgått i seksjon 5. Den første resultatdelen består av resultatene fra referanseblandingen og den andre delene formidler de resterende blandinger som er utsatt for varmebehandling.

4.1 Referanseblandinger

Denne seksjonen presenterer alle innsamlede resultater for de første 8 blandinger (første forsøksdel).

4.1.1 Fersk fase

Tabell 4-1 viser resultatene som er tatt under utstøpingsprosessen av betongblandinger. De to tallene som er oppgitt under synk utbredelse er målingene fra den største og minste diameteren registrert fra utbredelsestestene.

Tabell 4-1 – Verdiene målt under forsøkets ferskefase

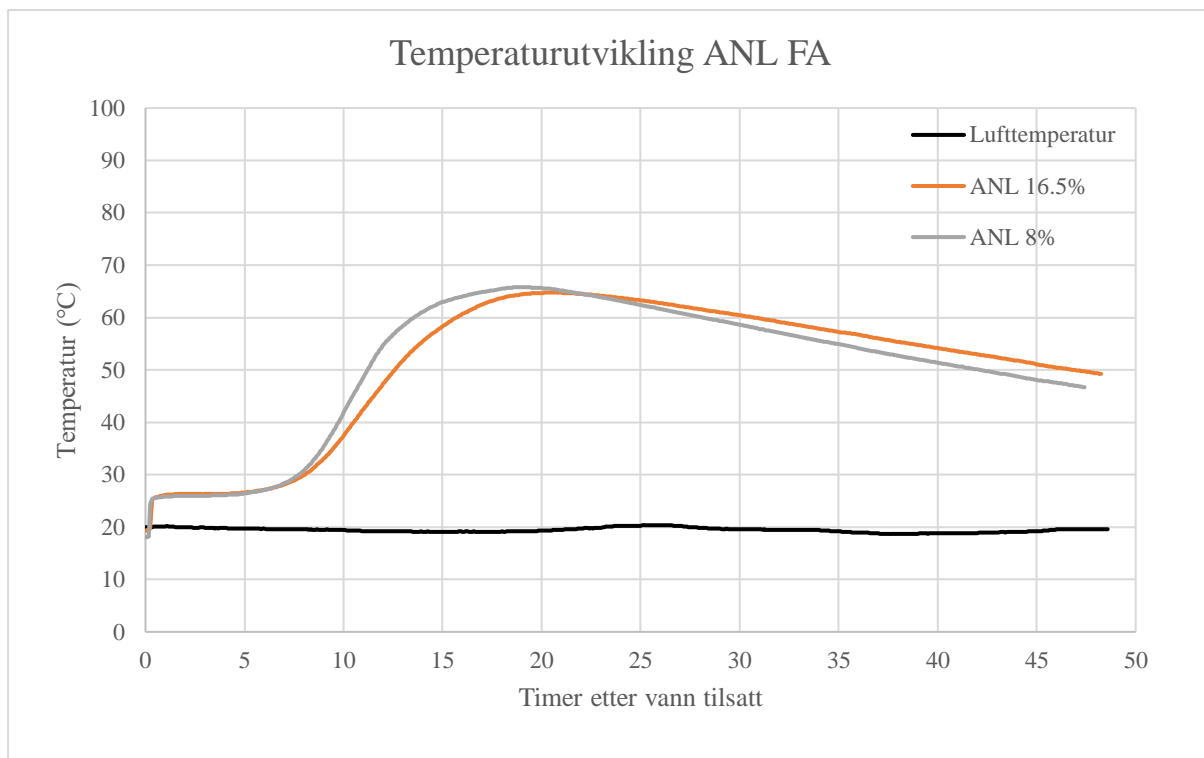
Batchpar	1		2		3		4	
Sement-silikainnhold% (FA%)	ANL - 16.5	ANL - 8	Hvit - 16.5 (25)	Hvit - 8 (25)	Hvit - 16.5	Hvit - 8	Miljø - 16.5	Miljø - 8
Luft (%)	1,70	1,00	1,75	1,40	1,80	Ble feil under forsøk	1,70	1,50
Synk utbredelse (mm)	850/700	910/870	770/720	910/880	740/720	810/720	810/800	970/830
SP(g)	932	1010	1195	1210	1337	1304	1092	1002
T500 (s)	3,15	6,20	4,53	2,40	3,75	2,97	2,59	2,64
Densitet (Kg/L)	2,45	2,48	2,41	2,43	2,42	2,44	2,44	2,46

Alle blandningene viser god stabilitet igjennom hele støpeprosessen (fra tilsatt vann til arbeid med fersk betong er ferdig). Det er observert en generelt bedre komprimerbarhet for batchene med lavere silikainnhold, og viser en bedre evne til å fylle ut støpeformene.

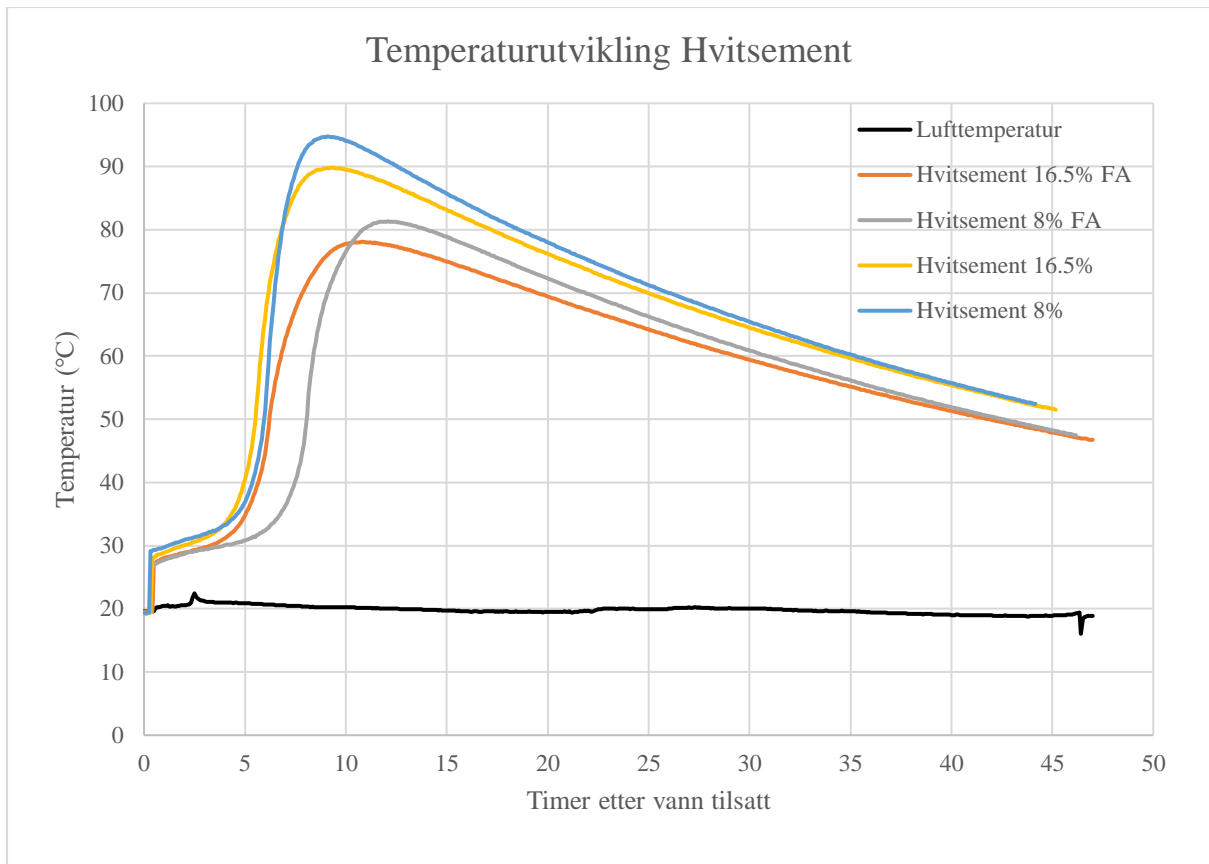
Flyteskjærspenningene er lavere for 8% silikainnhold, noe som kan observeres fra høyere utbredelsesmåler i Tabell 4-1. Mobiliteten er god (lav viskositet) og flyteskjærspenningene er lave for alle blandningene i tidlig fase, men en generell observasjon under forsøkene er at viskositeten og flyteskjærspenningene øker markant fra synkutbredelsestidspunktet til tidspunktet hvor alle støpeformene er fylt opp (ca.20 min); dette resulterer i en seigere og stivere masse. Resultatene knyttet til T500 forklares i analysedel 5.1.

4.1.2 Varmeutvikling

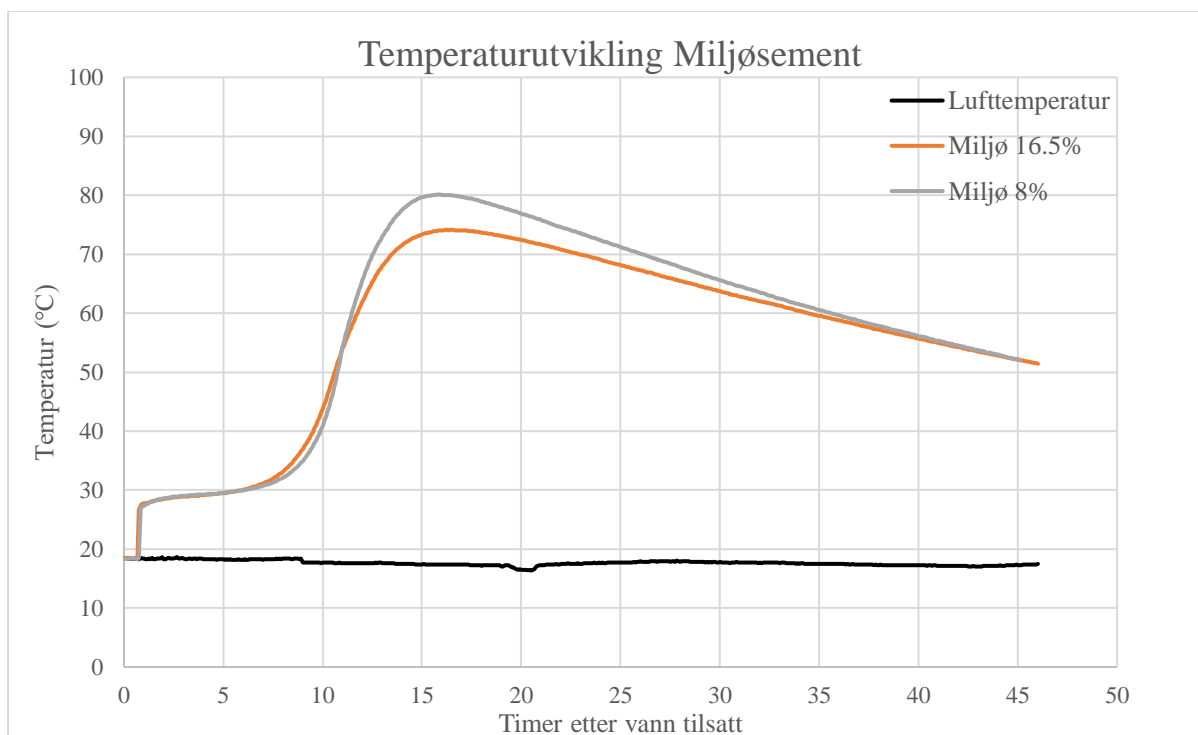
Figur 23 til Figur 25 viser temperaturutvikling for referanseblandningene og omgivelsestemperatur. Målingene er hentet fra betongblandningene herdet i isolasjonskasse, som vist i Figur 17 og forklart i seksjon 2.4. Oppnådd maksimaltemperatur varierer fra 95°C til 64°C for ulike sementtype og tilsetningsmaterialer.



Figur 23 - Temperaturutvikling ANL FA med 16,5% og 8%.



Figur 24 - Temperaturutvikling Hvitsement: 16.5% (25%), 8% (25%), 16.5% og 8%



Figur 25 - Temperaturutvikling Miljøsement med 16,5% og 8%.

I Figur 24 og Figur 25 starter temperaturutviklingen tidligere for de høye silika-innhold verdiene (16.5%), enn for blandingene bestående av 8% silika. Temperaturutviklingen starter omtrent samtidig for anleggssementtypene presentert i Figur 23. Tabell 4-2 presenterer alle de ulike batchene og deres respektive maksimal temperatur og tidspunkt maksimal temperatur registrert. Det er en tydelig sammenheng mellom høyest registrert temperatur og lavere silikaverdier, noe som kommer frem i Tabell 4-2. silika verdier. For hver respektiv sementtype er den høyeste temperaturen registrert for 8% silika. Selv om temperaturutviklingen starter tidligere for 16.5% silika, oppnår 8% silika maksimal temperatur ved et tidligere tidspunkt for alle sementparene med unntak av hvitsement med tilsatt FA.

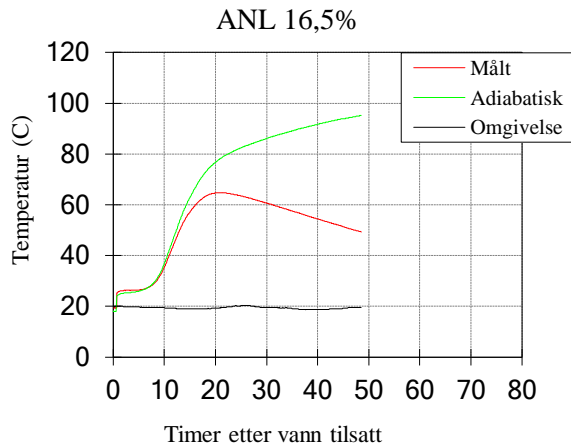
Tabell 4-2 – Makstemperatur og tidspunkt for oppnåelse

Sement-silikainnhold%(FA%)	ANL - 16.5	ANL - 8	Hvit - 16.5 (25)	Hvit - 8 (25)	Hvit - 16.5	Hvit - 8	Miljø - 16.5	Miljø - 8
Makstemperatur [°C]	64,4	65,78	78,07	81,32	89,8	94,73	74,12	80,1
Tidspunkt registrert [timer]	21,2	19,2	10,7	12,1	9,4	9,3	16,2	15,3

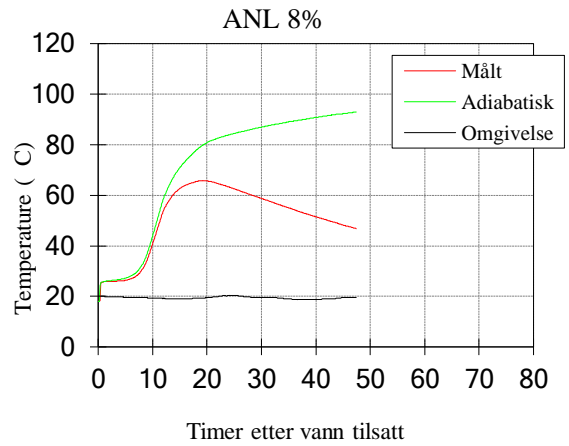
De registrerte temperaturdataene er importert inn i et Excel-ark og endret fra semi-adiabatiske resultater til adiabatiske resultater (nøyere forklart i seksjon 2.4).

Temperaturutviklingsgrafene til de adiabatiske resultatene er fremstilt i Figur 26 til Figur 33.

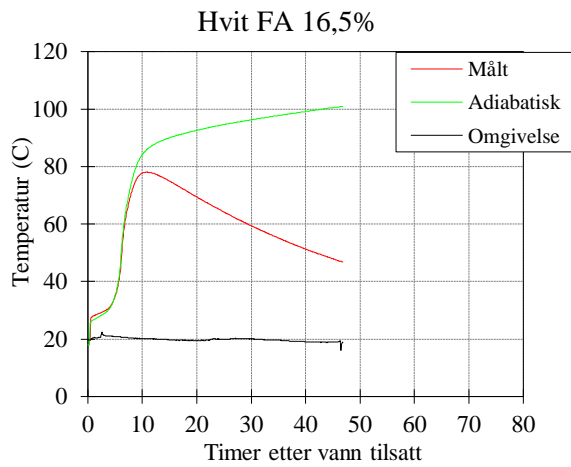
De respektive grafene programmeres inn i dataprogrammet CiD-Pro 4.01 og følger prosessene forklart i seksjon 2.4 og 2.5.



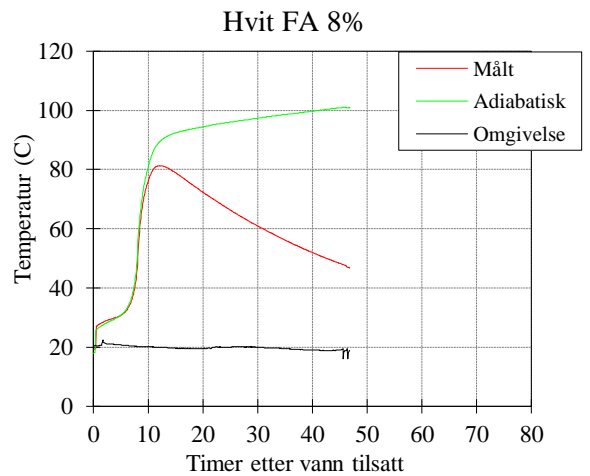
Figur 26 - Adiabatisk temperaturutvikling ANL FA 16.5%



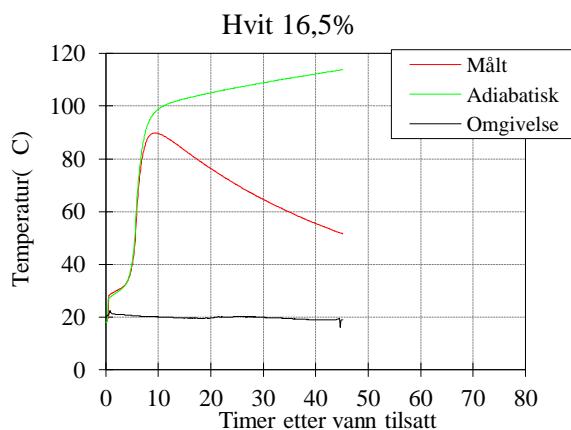
Figur 27 - Adiabatisk temperaturutvikling ANL FA 8%



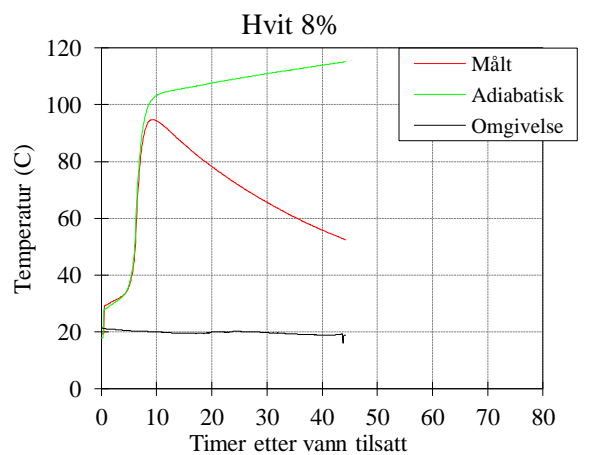
Figur 28 - Adiabatisk temperaturutvikling Hvitsement 16.5% (25% FA)



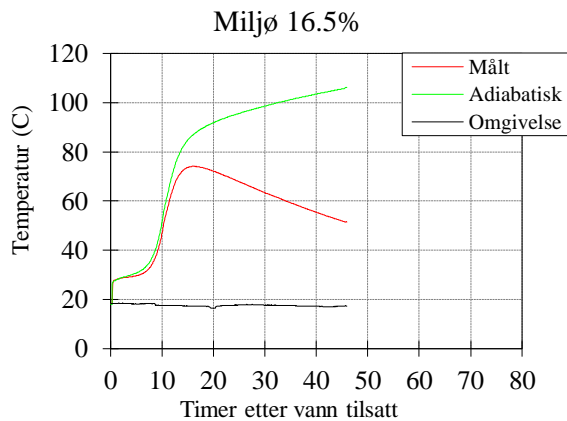
Figur 29 - Adiabatisk temperaturutvikling Hvitsement 8% (25% FA)



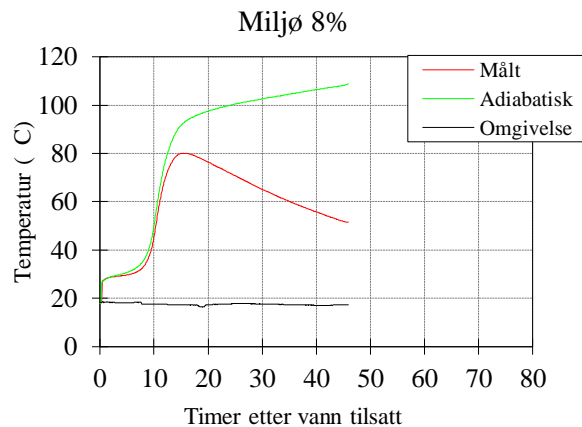
Figur 30 - Adiabatisk temperaturutvikling Hvitsement 16.5%



Figur 31 - Adiabatisk temperaturutvikling Hvitsement 8%



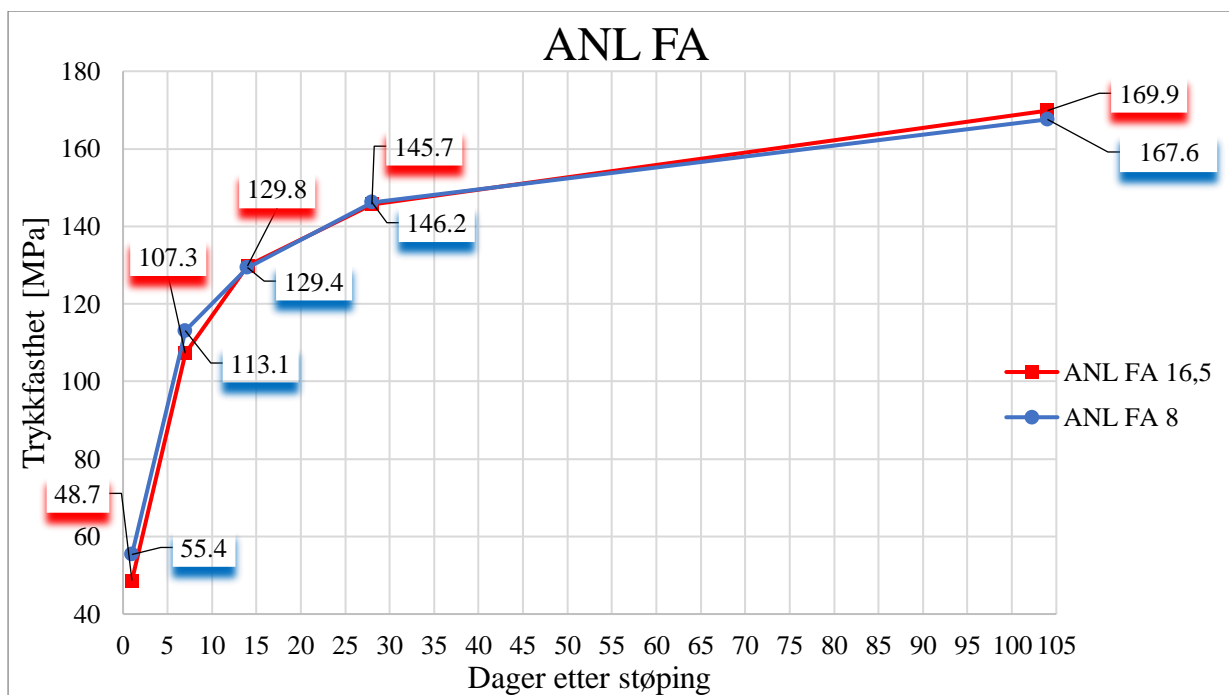
Figur 32 - Adiabatisk temperaturutvikling Miljøsement 16.5%



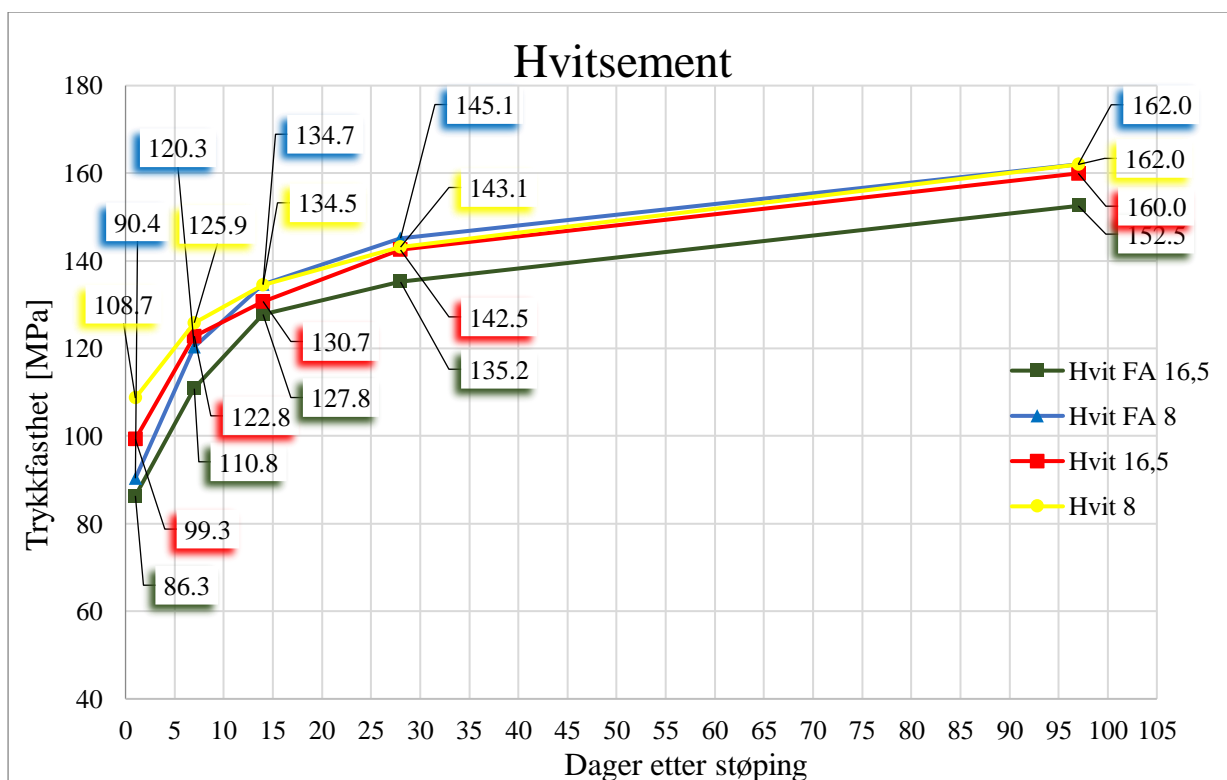
Figur 33 - Adiabatisk temperaturutvikling Miljøsement 8%

4.1.3 Trykk test

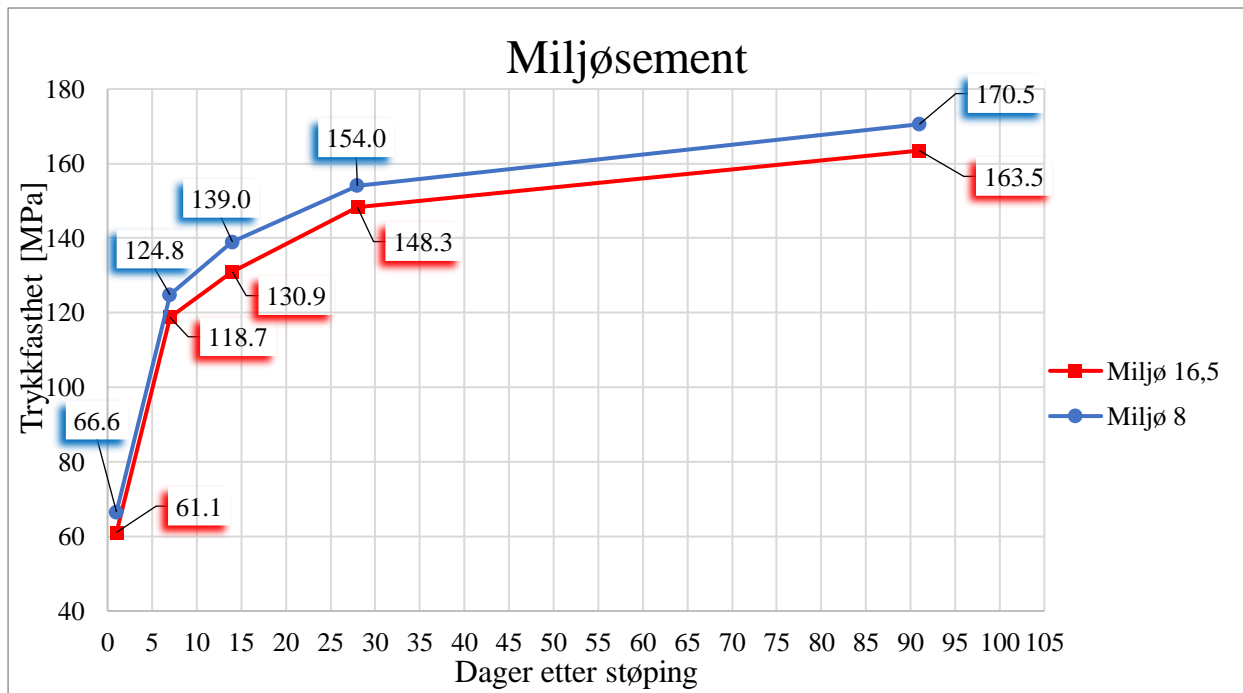
Det er utført trykktest i henhold til oppskriften beskrevet i seksjon 2.6. Alle referanseblandingene testes 1-, 7-, 14- og 28 dager etter utstøping. Planen var i utgangspunktet å teste alle referanseblandingene etter 90 dager, men på grunn av Covid19 og nedstengning av lab, er trykktestingen noe utsatt. For prøvene med ANL FA-sement er den siste trykktesten foretatt etter 104 dager, 97 dager for hvitsementen og 91 dager for miljøsementen. Figur 34 til Figur 36 illustrerer fasthetsutviklingen i MPa, etter antall dager, til de ulike referanseblandingene.



Figur 34 - Fasthetsutvikling for ANL FA (referanseblandinger)

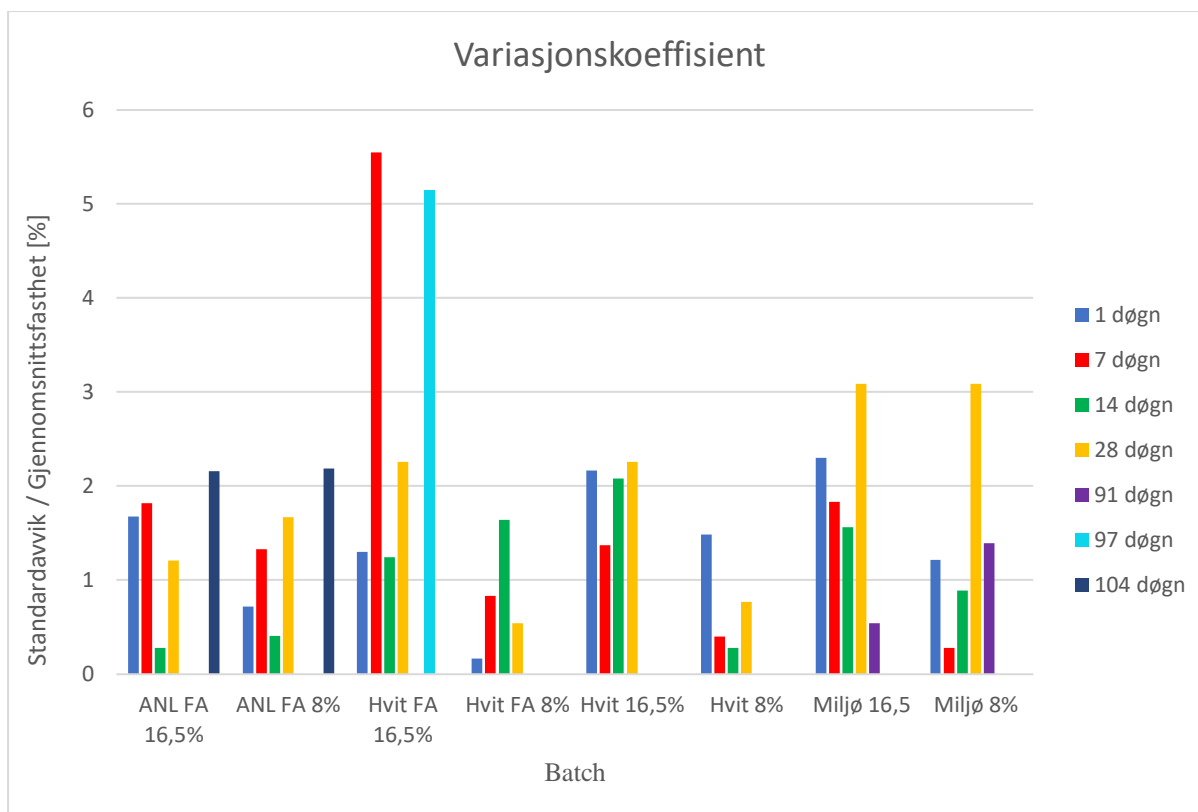


Figur 35 - Fasthetsutvikling for Hvitsement (referanseblandinger)



Figur 36 - Fasthetsutvikling for Miljøsement (referanseblandinger)

Figur 37 illustrerer variasjonskoeffisienten av trykkfasthet innad i terningstrioen; alle trykkfasthetsverdiene blir presentert i Vedlegg C. Det er to tall som skiller seg ut, og det er for batch 03-S-7 og 03-S-[97]. For 03-S-7 er grunnen til den høye variasjonskoeffisienten én høy verdi 117.9 MPa og to lavere verdier lik 108.1 MPa og 106.6 MPa. 03-S-[97] har to høye verdier lik 156.4 MPa og 157.7 MPa og én lav verdi lik 143.5 MPa.



Figur 37 - Trykkfasthetsforskjeller innad i terningstrioene (referanseblandinger)

4.2 Varmebehandlede blandinger

Alle registrerte målinger og resultater for varmebehandlede elementer blir fremstilt i denne seksjonen. Forskningsplanen i kapittel 3 fremstiller et opplegg hvor det totalt skulle blandes 16 batcher. På grunn av en uforutsett hendelse (Covid19), ble laboratoriet stengt ned dagen før miljøsementblandingene (batch 15 og 16) skulle blandes; dessverre er konsekvensen at batch 15 og batch 16 uteble. I seksjon 4.2 blir det dermed fremstilt resultater for batch 9 til og med batch 14.

4.2.1 Fersk fase

Tabell 4-3 er en oversiktlig fremstilling av synk utbredelse, mengde superplastiserende tilsetningsstoff og T500.

Tabell 4-3 – verdiene registrert under prøvenes ferske fase

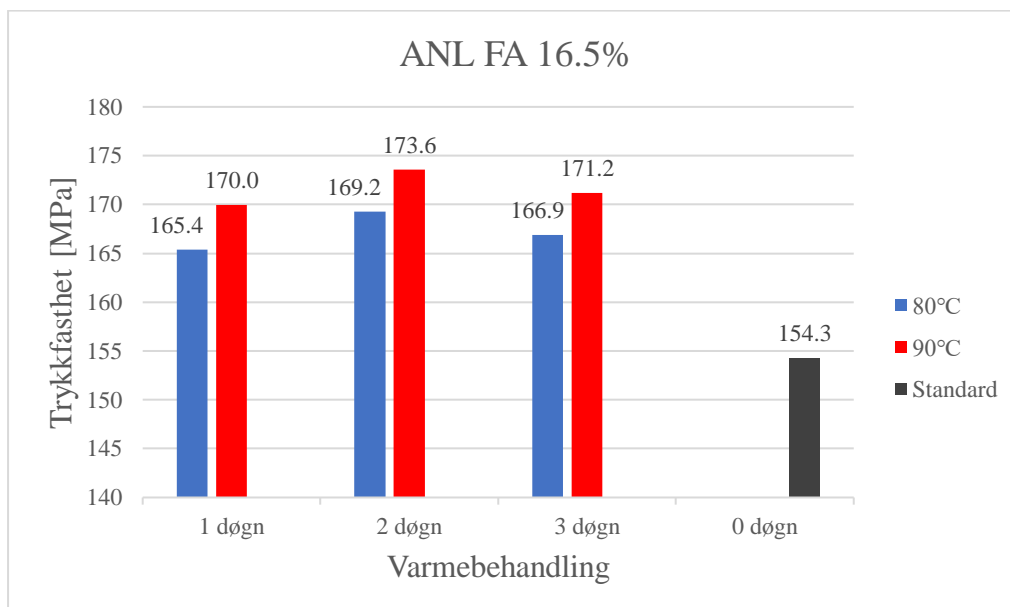
Batchpar	5		6		7	
Sement-silikainnhold% (FA%)	ANL - 16.5	ANL - 8	Hvit - 16.5 (25)	Hvit - 8 (25)	Hvit - 16.5	Hvit - 8
Synk utbredelse (mm)	900/900	890/860	650/650	880/830	600/550	810/760
SP(g)	1173	924	1089	1102	1349	1217
T500 (s)	2,38	2,18	2,23	2,9	4,21	2,77

Observasjonene beskrevet i seksjon 4.1.1 gjelder også for blandingene presentert i Tabell 4-3 med unntak av mobiliteten og til dels komprimerbarheten til spesielt batch 11 og batch 13. Resultatene for disse batchene er påvirket av en lang støpeprosess. Det superplastiserende tilsetningsstoffet tilsettes blandingene i doser og for de nevnte batchene er det foretatt en synk-test etter 831g og 1003g for batch 11 og batch 13. Utbredelsen registrert er såpass lav at blandeprosessen fortsetter og det tilsettes mer SP. Dette resulterer i en lang støpeprosess (synkutbredelsestallene fra Tabell 4-3 for batch 11 og 13 er tatt etter ca.25 min) og mobiliteten er dermed redusert. Under fylling av støpeformene ble viskositeten, samt flyteskjærspenningene høyere og høyere og de respektive batchene ble komprimert ved hjelp av komprimeringsstav for å oppnå en fullstendig utfylling av formene. Resultatene knyttet til T500 forklares i analysedel 5.1.

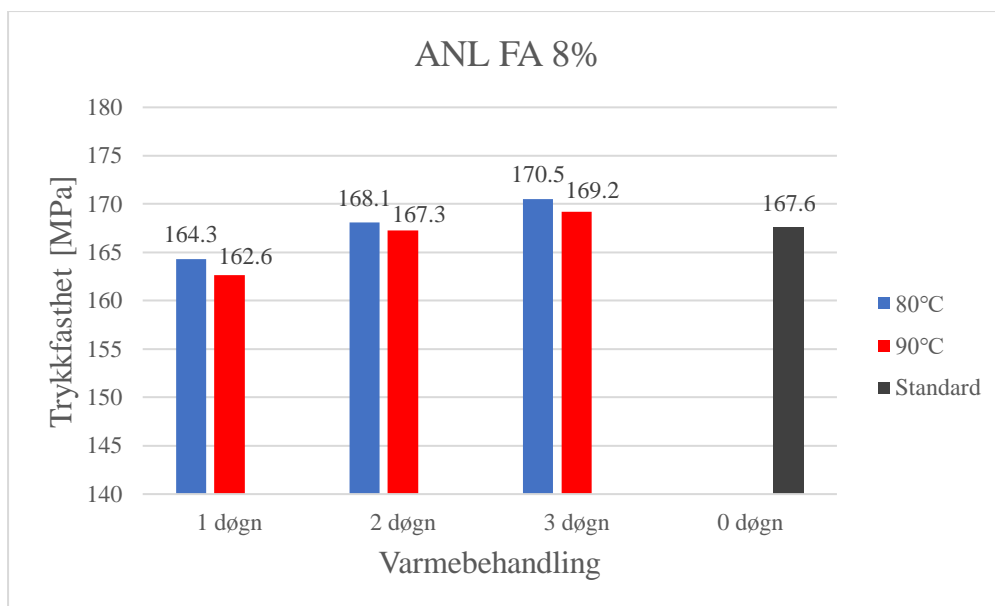
4.2.2 Trykktest

Planen for oppgaven er å se på varmebehandlingens effekt på trykkfastheten ved 28 dager. På grunn av nedstenging av laboratoriet ble trykkfasthetstidspunktet flyttet til 64 dager. Figur 38 til Figur 43 viser varmebehandlingens effekt på batch 9 til og med batch 14.

Trykkfasthetstallene presenteres i Figur 38 til Figur 43, og er gjennomsnittsfastheten av tre terninger. Alle trykkfasthetstallene er vedlagt i Vedlegg C.

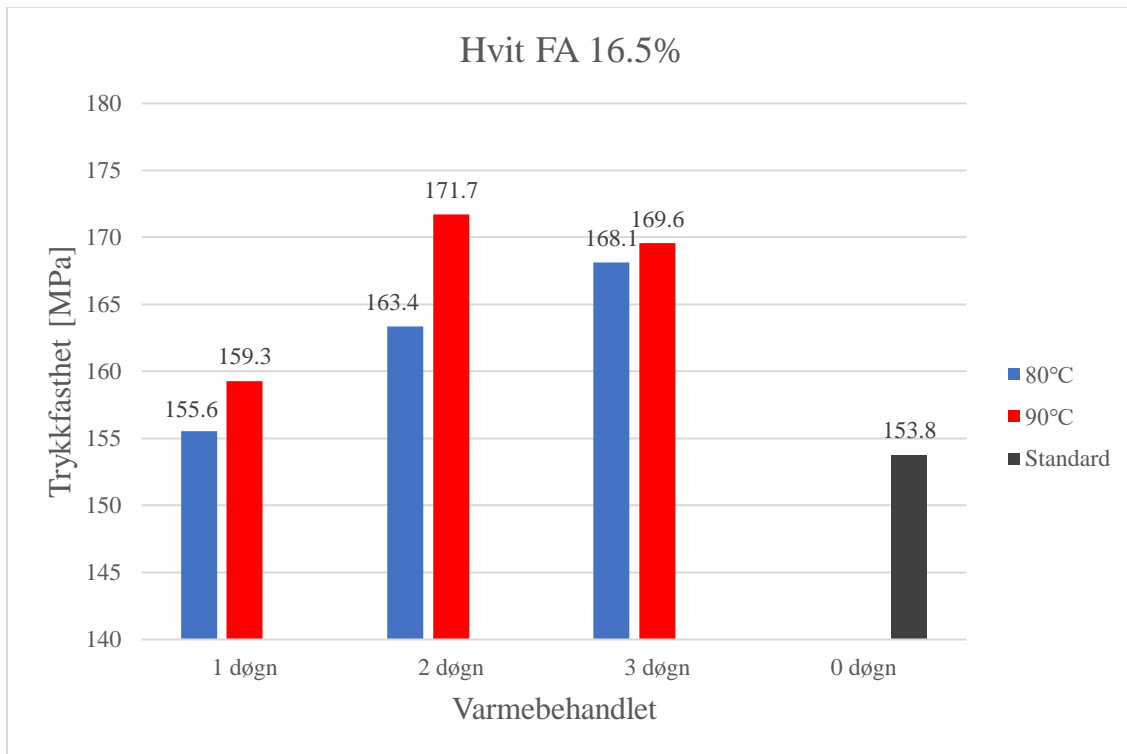


Figur 38 - Trykkfasthet for varmebehandlede betongterninger med ANL FA 16,5%

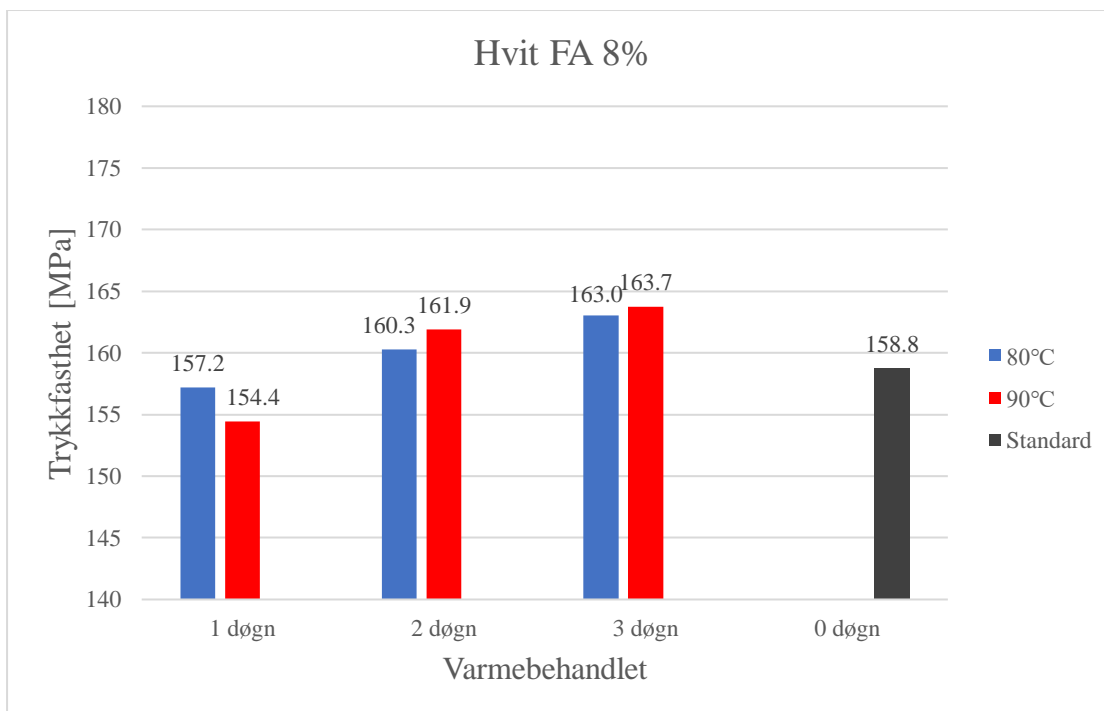


Figur 39 - Trykkfasthet for varmebehandlede betongterninger med ANL FA 8%

Figur 38 og Figur 39 presenterer trykkfastheten oppnådd etter 64 dager for blandingene med sementtypen ANL FA. For ANL FA med 16.5% silika er forskjellen mellom varmebehandling og standard herdeforhold tydelig. Trykkfastheten øker mellom 7- til 11% for de varmebehandlede terningene og effekten er størst ved 2 døgn, både for 80°C og for 90°C. I tillegg viser Figur 38 en større effekt for varmebehandling ved 90°C. ANL FA med 8% silika oppfører seg annerledes enn ANL FA med 16.5% silika. Figur 39 viser et resultat, hvor terningene utsatt for standard herdebetingelser har en høyere trykkfasthet enn for 1 døgn varmebehandling, og hvor trykkfastheten er omtrent den samme som ved 2 og 3 døgn varmebehandling. Til skilnad for ANL FA med 16.5% silika, er det varmebehandling ved 80°C som gir en høyere trykkfasthet.

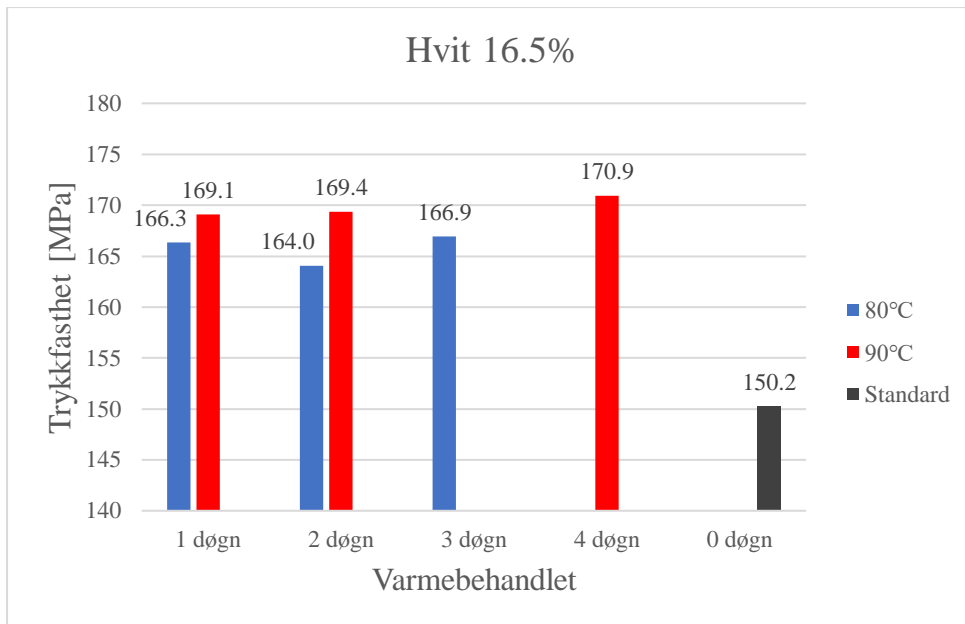


Figur 40 - Trykkfasthet for varmebehandlede betongterninger med Hvitsement FA 16,5%

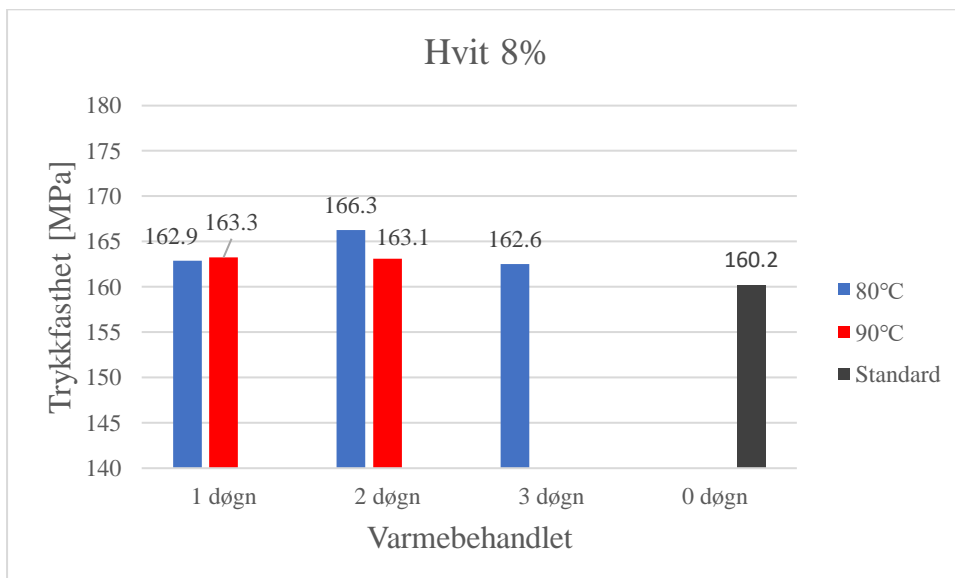


Figur 41 - Trykkfasthet for varmebehandlede betongterninger med Hvitsement FA 8%

Batchene 11 til 14 inneholder alle hvitsement, og Figur 40 og Figur 41 presenterer trykkfastheten til hvitsement med tilsatt flygeaske og to ulike mengder silika-innhold. I Figur 40 forekommer det en høyere trykkfasthet for alle typer varmebehandling. Trykkfastheten har lavest effekt etter 1 døgn, hvor den øker med 1% for 80°C og 3.6% for 90°C. To døgns varmebehandling er der forskjellen mellom 80°C og 90°C er størst; her er forskjellen mellom dem 8.35 MPa. Samtidig er det for to døgns varmebehandling ved 90°C den største økningen, i forhold til standard herdeforhold, er registrert; økningen er ca. 11.7%. Figur 40 viser den samme tendensen som Figur 38, nemlig at varmebehandling ved 90°C gir en høyere trykkfasthet enn ved 80°C. Figur 41 viser mye av det samme som Figur 39, standard herdebetingelser gir en høyere fasthet enn ved ett døgns varmebehandling. Fastheten er ganske lik for to døgns varmebehandling og øker med 2.7% for tre døgn. Forskjellen er at 80°C resulterer i en høyere trykkfasthet igjennom hele Figur 39, mens 90°C gir en høyere fasthet etter 2- og 3 døgns varmebehandling i Figur 41.



Figur 42 - Trykkfasthet for varmebehandlede betongterninger med Hvitsement 16.5%



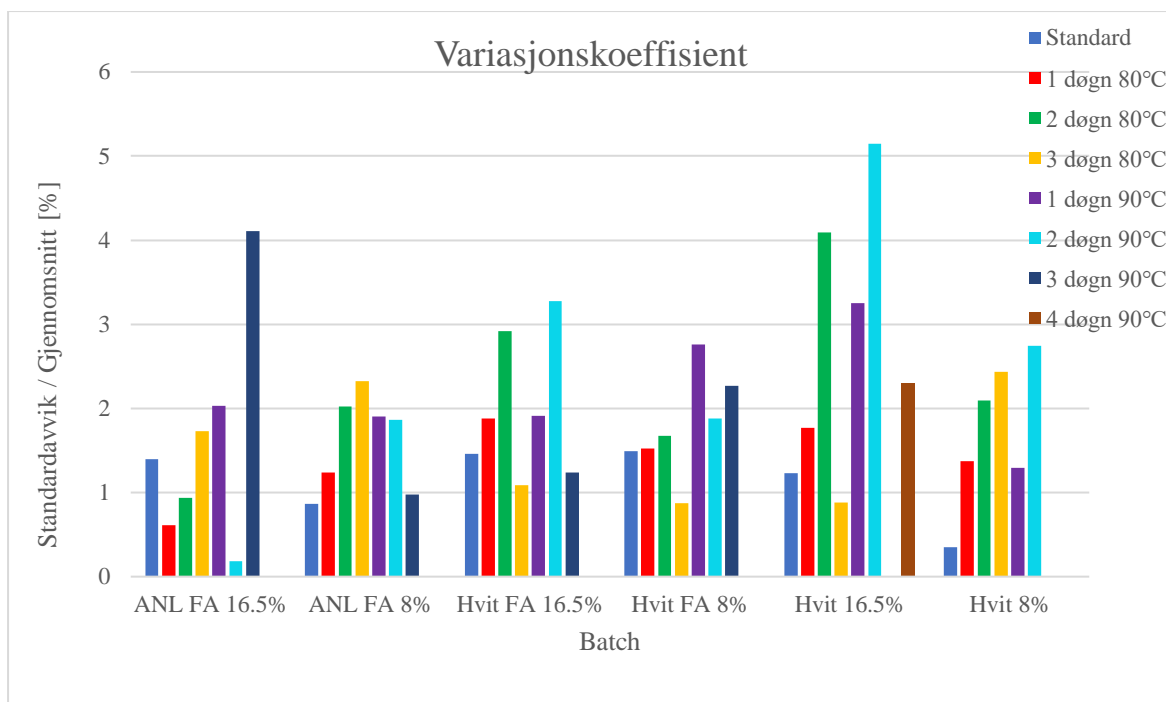
Figur 43 - Trykkfasthet for varmebehandlede betongterninger med Hvitsement 8%

Figur 42 og Figur 43 tar for seg de to siste hvitsementblandingene. Begge de nevnte figurene er bygget opp noe annerledes enn Figur 38 til Figur 41. Under nedstenging av laboratoriet

pågikk varmebehandlingsprosessen for batch 13 og batch 14, og det var 6 bølter gjenværende i varmeskapene. 4 av bøttene, 2 døgns behandling for hvitsement med 8% silika og 3 døgns behandling for hvitsement med 16.5% silika, skulle vært tatt ut dagen nedstengingen kom. De to siste, 3 døgns behandling for hvitsement med 8% silika, skulle vært tatt ut dagen etter. Resultatet ble som følger: det ble tatt ut 2 bølter med 8% silika-innhold fra varmeskapet med 90°C, og 3 døgns varmebehandling for 16.5% silika i 90°C ble dermed liggende ett døgn ekstra. Figur 42 har dermed ett ekstra ledd i x-aksen, som er 4 døgns varmebehandling under 90°C, og mangler 3 døgns varmebehandling under 90°C. I tillegg ble seks terninger, med 8% silika, varmebehandlet i 2 døgn under 90°C, og Figur 43 presenterer dermed snittet av 6 terninger istedenfor 3.

Figur 42 presenterer omtrent like tall for alle terningene behandlet under 90°C uavhengig av behandlingstid (på det mest 1 MPa forskjell). For 80°C faller fastheten med omtrent 2.5 MPa fra 1 døgn til 2 døgn og stiger tilsvarende opp igjen etter 3 døgn. For 80°C øker trykkfastheten med mellom 9.2 – 10.7% og mellom 12.6 – 13.8% for 90°C i forhold til standard herdebetingelser.

Figur 43 viser til en mindre forskjell mellom standard herdebetingelser og varmebehandling. Resultatene viser en lik økning i trykkfasthet på ca. 2% for samtlige prøver, med unntak av 2 døgns varmebehandling under 80°C, som har 4% høyere trykkfasthet i forhold til standard herdebetingelser.



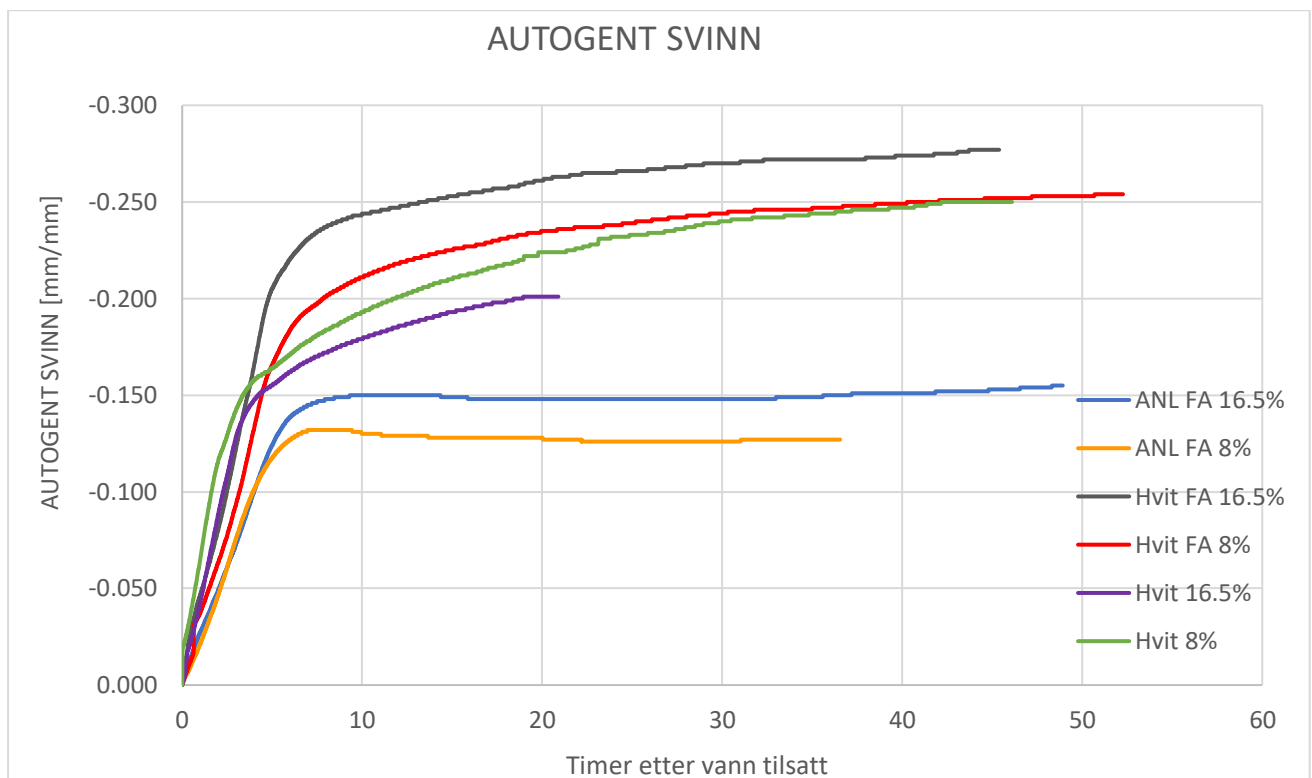
Figur 44 - Trykkfasthetsforskjeller innad i terningstrioene

Vedlegg C presenterer alle trykkfasthetstallene for alle terningene som har blitt testet i denne oppgaven. Det oppstår variasjoner innad i terningstrioene, og Figur 44 presenterer variasjonen i trykkfasthet for terningene. Det er i hovedsak tre høye variasjonskoeffisientverdier, og det er for batchene 09-V-90-3-[64], 13-V-80-2-[64] og 13-V-90-2-[64]. De høye verdiene skyldes to høye verdier lik 175.9 og 174.6 og en lav verdi lik 163.1 for 09-V-90-3-[64], det samme for både 13-V-80-2-[64] og 13-V-90-2-[64] hvor verdiene er [168.2, 167.6, 156.3] og [174.5, 174.3, 159.3].

4.2.3 Elastisitetsmodul

Resultater for elastisitetsmodul er vedlagt i Vedlegg D på grunn av tallene ikke tilfører oppgaven noe. Forsøkene er ikke utført i henhold til planlagt metode grunnet Covid19, og en grundigere forklaring er presentert i Vedlegg D.

4.2.4 Autogent svinn



Figur 45 - Autogent svinn

Resultatene fra Figur 45 demonstrerer autogent svinn for batch 9 til og med batch 14.

Resultatene kommer fra AS-system (ref. 2.8), og videre resultater fra uttørkingssvinnet uteble på grunn av pandemien (Covid19).

5 Analyse

Kapittel 5 presenterer analyser av betongens støpelighet, varmeutviklingen til betongen, betongens trykkfasthet og det autogene svinnet. Analysen tar utgangspunkt i resultatene (kapittel 4) og relevant teori (kapittel 1).

5.1 Betongens støpelighet

Synkutbredelsene registrert i oppgaven ligger mellom 720 og 960mm for alle blandinger, med unntak av batch 11 og 13 som har utbredelse helt ned i 550mm. Unntakene skyldes antagelig lang støpeprosess og gjentagende påfylling av SP og disse resultatene danner derfor dårlig sammenligningsgrunnlag (utdypet i seksjon 4.1.1). Gjentagende for alle batchparene, med unntak av par 5, er en høyere registrert synkutbredelse for blandinger med lavere silika-innhold (se seksjon 3.1 for batchpar forklaring). SP reduserer hovedsakelig flyteskjærspenningene i betongmassens ferske fase, og for blandingsparene 1-4 er SP-innhold omtrent det samme innad i parene; største forskjellen er 90g. På grunn av en omtrentlig lik mengde SP, vil hovedforskjellen i synkutbredelsene innad i parene skyldes ulik silika- og sementmengde. Ifølge Figur 6 vil en større mengde silikastøv øke flyteskjærspenningene, noe som vil redusere utbredelsen av betongmassen, og økende sementmengde reduserer flyteskjærspenningen og vil bidra til en større utbredelse. Resultatene presentert i Tabell 4-1 og Tabell 4-3 viser til den samme effekten, foruten batchpar 5. Forskjellen i SP-innhold for batchpar 5 er 249g (høyest SP-innhold for batchen med 16.5% silika), noe som er en

vesentlig større forskjell enn for de øvrige parene, og dette kan være den avgjørende faktoren til et større utbredelsesmål for blandingen med 16.5 % silika.

Sammenlignes batch 3 med batch 5 og batch 4 med batch 6 er hovedforskjellen mellom bindemiddelkomposisjonene knyttet til 25% sementerstattet flygeasketilsetning for batch 3 og 4. Fra Tabell 4-1 kommer det frem høyere utbredelsesmål for blandingene med tilsatt FA, og dette er tilfellet selv om SP-innholdet er 142g og 94g høyere ved batch 5 og batch 6. Fra teori (ref. seksjon 1.3) forbedrer sementerstattet flygeaske støpeligheten på grunn av FA-partiklene i hovedsak er kuleformede og fungerer som «kulelagre». Sammenlignes batch 11 med batch 13 og batch 12 med batch 14 oppstår den samme tendensen, nemlig at batchene med FA-innhold får en økning i utbredelse (ref. Tabell 4-3).

Batchpar 1 og batchpar 3 inneholder begge portlandsement, henholdsvis ANL FA og Hvitsement (ref. seksjon 3.2 for utvidet sement informasjon). Tabell 4-1 og Tabell 4-3 viser at tallene fra synkutbredelsen for batchpar 1 har høyere verdier, samtidig er SP tilsetningen lavere for batchpar 1. Den avgjørende faktoren til denne forskjellen er antagelig anleggssementens FA-innhold i og med at sementfinheten til ANL FA og hvitsementen er den samme (390 m²/kg og 400 m²/kg). Sammenlignes batchpar 1 med batchpar 2 fra Tabell 4-1 strykes denne antagelsen; nå er det tilsatt 25% FA som en hvitsementerstatte, og synkutbredelsesmålene er nokså like. Derimot kommer ikke det samme frem fra Tabell 4-3, og dette skyldes antagelig en dårlig blande-prosess (utdypet i seksjon 4.2.1) for batch 11 og 13.

Slaggsement har en tendens til å oppnå bedre støpelighet enn ren portlandsement (ref. seksjon 1.3), og resultatene fra Tabell 4-1 ser ut til å vise den samme tendensen. Det kommer tydelig frem at batchpar 4 med miljøsement (slaggsement) har høyere utbredelsesmål enn batchpar 3 med hvitsement (ren portlandsement). Utbredelsesmålene er derimot jevnere mellom batchpar 4 og batchpar 1; her kan det se ut til at utbredelsesmålene er nokså like, og dette skyldes nok at anleggsementens FA-innhold øker utbredelsen. Miljøsementen har også noe finere finhet (460 m²/kg) kontra de to andre sementtypene, og dette gir antagelig en tilleggseffekt til økt utbredelse.

Resultatene for T500 (ref. Tabell 4-1 og Tabell 4-3) knyttet til batch 2 og batch 3 kan forkastes, og grunnen til dette er feil utførelse ved laboratoriet. Under testing av T500, for batch 2 og 3, ble det registrert tidspunkt, utbredelsen nådde 600mm istedenfor 500mm, og dette ble oppdaget etter utførelse av batch 3. Sammenlignes batch 2 med batch 10 og batch 3 med batch 11 er det store forskjeller knyttet til T500 resultatene selv om resepten mellom de respektive batchene er den samme (foruten SP-innhold som er høyere for batch 2 og 3). T500 for de resterende ble utført i henhold til riktig metode (ref. seksjon 2.2). Figur 6 viser at tilsetning av silika vil redusere viskositeten sammenlignet med en referanseblanding uten tilsetning av silika, og følgende reduseres T500. Samtidig kommer det frem fra Figur 6 at dersom silika-innholdet overstiger en viss mengde begynner viskositeten å øke igjen. T500 resultatene gir ikke noe klart bilde med hensyn til silika-innholdet. Samtidig er det antagelig knyttet stor usikkerhet rundt T500 resultatene på grunn av at målemetoden brukt i denne oppgaven krever øyemål og en stoppeklokke, noe som kan resultere i redusert nøyaktighet. Derimot viser alle resultatene at blandingene tilfredsstillende kravene spesifisert i seksjon 2.2.

5.2 Varmeutvikling

Varmeutviklingen til de ulike batchparene varierer stort med tanke på avbindingstidspunkt, makstemperatur og tidspunkt for oppnådd makstemperatur. Innad i batchparene er variasjonene mindre.

Ifølge teori (ref.) seksjon 1.2.5 og 1.5 kan den pozzolane reaksjonen starte først i det sementreaksjonen har dannet produktet CH. Formel 4 og Formel 5 er de to hydratiseringsreaksjonene inert i en betong som produserer reaksjonsproduktet, CH, til den pozzolane reaksjonen. Det vil si at det er sementens konsentrasjon, og tilhørende hydratiseringsgrad, av C_3S og C_2S som avgjør hvor mye CH det dannes. Ifølge resultatene fremstilt ved Figur 23 til Figur 25, spesielt batchpar 2 til batchpar 4, later det til at en høyere konsentrasjon av silika reagerer raskere med reaksjonsproduktene fra sementreaksjonen enn for lavere silika konsentrasjon. Følgende utvikles det derfor mer C-S-H tidlig i hydratiseringsprosessen, og dette resulterer i en tidligere varmeutvikling på grunn av silika-reaksjonen avgir 860 kJ/kg [17] ved full hydratisering. Derimot oppnår batchene med 8% silika en høyere maksimaltemperatur enn batchene med 16.5% silika. Dette skyldes nok en hårfin balanse mellom sement/silika-forholdet. Det kan virke som 16.5% silika er en litt for stor tilsetning i form av at det blir en overmetning med silika i forhold til sement. Reduksjon av sement leder til færre klinker-reaksjoner, som igjen vil gi en redusert varmeutvikling, men dersom silika tilsetningen er «perfekt» balansert vil silika reagere med kalsiumhydroksid å gi en høyere varmeutvikling enn uten tilsatt silika. Uten tilsetning av silika blir det i hovedsak hydratisering av sement som skaper varmeutviklingen, med «perfekt» tilsetning oppstår det en

pozzolan-reaksjon som komplementerer tapet av sement og vil kunne resultere i en høyere temperaturutvikling.

Sammenlignes C₃S og C₂S er det i hovedsak C₃S reaksjonen som forekommer i tidligfase (ref. seksjon 1.7). På grunn av dette vil sementtyper med høyere konsentrasjon av C₃S kunne gi en tydeligere skilnad mellom varmeutviklingstidspunkt for ulikt silika-innhold. Batchpar 2 og 3, og deres temperaturutviklingskurver (Figur 24), viser en mer markant forskjell for ulikt silika-innhold. Hvitsementen har den høyeste konsentrasjonen av C₃S (ref. Tabell 3-1), og fra Figur 24 kommer det tydelig frem at temperaturutviklingen forekommer tidligere der silika-innholdet er 16.5%.

Sammenlignes makstemperatur for batchpar 3 og batchpar 2, synker makstemperatur med 11,7°C for 16,5% silika, og 13,4°C for 8% silika ved 25% tilsatt FA. FA benyttes som sementerstatter i batchpar 2, noe som resulterer i et mindre sementinnhold, og det kan følgende resultere i en lavere maksimaltemperatur. Figur 24 viser en forskjøvet varmeutvikling for tilsatt FA. En mulig årsak for en tregere varmeutvikling kan bygges videre på forklaringen om varmereduksjon ved tilsetning av FA (ref. seksjon 1.5). FA er avhengig av en pH på minst 13,2 for å reagere med CH og det er alkalinitivået i betongen som gir høyere pH-verdier. I og med at silika reaksjonen er hurtig, vil silika reagere raskt med CH og hindre at pH-verdien stiger, som igjen vil utsette hydratiseringen av FA. Resultatene registrert i denne oppgaven samsvarer med resultatene fra «Bjørkvikaprojektet» [14]. FA resulterer i en forsinket varmeutvikling og en lavere maksimaltemperatur. Samtidig vil et lavere

sementinnhold reduserer det totale C₃S og C₃A innholdet i betongen, som er avgjørende faktorer for tidlig varmeutvikling.

Hydratiseringsprosessen til ulike sementtyper er svært kompleks og i denne oppgaven vil prosessen forklares ved å se på de ulike varmeutviklingsperiodene (ref. seksjon 1.7). De 4 periodene deles inn i initialperioden, den hvilende periode, akselerasjonsperioden og retardasjonsperioden.

Initialperioden:

Batchpar 1, 3 og 4 tar for seg ulike sementtyper. For batchpar 3 blir det benyttet hvitsement, som fra Tabell 3-1 viser til det høyeste totale innhold av C₃A, C₂S og C₃S. Hvitsementen har det høyeste C₃A-innholdet og utvikler den høyeste varmen i initialperioden; Figur 24 viser at batchpar 3 oppnår en varme på ca. 30°C. For batchpar 1 benyttes det ANL FA, hvor innholdet av C₃S er omtrent det samme som for hvitsement, men innholdet av C₃A er nesten helt fraværende (2%) og konsentrasjonen av C₂S er lavere. C₃A er avgjørende for en rapid og høy varmeutvikling, og fra Figur 23 blir temperaturen omtrent 25 °C i initialperioden. Batchpar 4, hvor bindemiddelet består av miljøsement, plasserer seg mellom ANL FA og hvitsement, både med tanke på makstemperatur og tidspunkt denne nås. Miljøsement har det laveste C₃S-innholdet, men til gjengjeld inneholder den et høyere C₃A innhold (5%) enn ANL FA (2%). Batchene med miljøsement oppnår en høyere temperatur, omtrent 28°C, i initialperioden. Batchpar 2 benytter seg av 25% FA som sementerstatter, og konsentrasjonen av C₃S og C₃A reduseres sammenlignet med ren hvitsement. Dette kan muligens være en grunn til at temperaturen oppnådd i initialperioden er noe lavere for batchpar 2 kontra par 3. Det kan

virke som temperaturen nådd i initialperioden avhenger av C_3A -innholdet og friksjonen som oppstår under blandingsprosessen. I initialperioden er ettringite dannelse en viktig bidragsyter til temperaturøkningen (ref. seksjon 1.7)

Den hvilende periode:

Den hvilende perioden kommer etter initialperioden og fra Figur 23 til Figur 25 varer perioden omtrent 5.5 timer for batchpar 1 og 4, og 3.5 time for batchpar 3. For batchpar 2 er det en større forskjell innad i paret, 3-3.5 timer for 03-S og 6 timer for 04-S.

Temperaturutviklingen er minimal for de fire nevnte batchparene, selv om varigheten er noe ulik. Varigheten påvirkes av stabiliteten til ettringite, som er avhengig av gips som en reaktant, og hvor lang tid det tar før poreløsningen oppnår metning av kalsium-ioner.

Kalsium-ionene dannes hovedsakelig av alitt (C_3S) og belitt (C_2S), og metningen forekommer raskere dersom C_3S og C_2S konsentrasjonen er høyere. Dette kan være en mulig forklaring til 2-3 timers skilnad mellom batchpar 3 og de to andre parene (+ batch 04-S) i og med at konsentrasjonen er høyere for hvitsementen uten tilsatt FA.

Akselerasjonsperioden:

Dette er perioden hvor det skjer mest med tanke på temperaturutvikling, og det er i denne perioden forskjellene blir størst fra batchpar til batchpar. Fokuset legges først på batchpar 3 og hvitsementen uten FA, hvor makstemperaturene ligger rundt $90^{\circ}C$ og temperaturen nås etter litt i overkant av 9 timer (ref. Tabell 4-2). Sammenlignet med de andre batchene forekommer utviklingen ekstremt hurtig og makstemperaturen er høyere. I

akselerasjonsperioden er det i hovedsak alitt som reagerer og er den avgjørende faktoren for temperaturutviklingen. Fra Tabell 3-1 er C₃S innholdet til hvitsementen 54% og den høye bestanddelen fører til en hurtig reaksjon og dermed en hurtig varmeutvikling.

ANL FA er den sementtypen som utvikler minst varme i den akselererende perioden. Tabell 4-2 presenterer en maksimaltemperatur på ca. 65°C etter mellom 19 til 21 timer for batchpar 1. Som for hvitsementen, er alitt innholdet høyt, omtrent 53%, og dette skal i utgangspunktet tilsi en høy og rapid temperaturutvikling. En mulig årsak til den lave og sakte temperaturutviklingen kan skyldes sementens høye FA bestanddel. I og med at FA-reaksjonen forekommer svært sakte og har en retarderende effekt på herdevarme (ref. seksjon 1.5), og konsentrasjonen av FA i sementen er 15%, vil dette kunne påvirke temperaturutviklingen i akselerasjonsperioden. Dette resulterer i en langsommere varmeutvikling, og på grunn av semi-adiabatiske forhold vil varmetapet til omgivelsene foregå over et lenger tidsintervall; dette kan være med å påvirke maksimaltemperaturen negativt. Den samme effekten oppstår for batchpar 2, hvor 25% hvitsement er erstattet med FA. En annen påvirkende årsak kan være at det totale C₃A, C₂S og C₃S-innholdet er lavere for ANL FA sammenlignet med hvitsementen. Dette kan muligens føre til en saktere oppløsning av kalsium-ionene som påvirker C₃S reaksjonen. C₃S reaksjonen er avhengig av metning i porestrukturen, og uten fullstendig metning kan C₃S reaksjonen gå noe saktere.

Miljøsement inneholder den laveste C₃S-konsentrasjonen (ref. Tabell 4-2), men batchpar 4 når en høyere makstemperatur ved et tidligere tidspunkt enn ANL FA. Til forskjell for ANL FA inneholder miljøsementen ca. 33% slagg istedenfor anleggssementens 15% FA. Slaggs

reaksjonshastighet er hurtigere enn FA's, selv om økende slagg/sement-forhold resulterer i en saktere hydratiseringsprosess (ref. seksjon 1.5). Det ser ut til at slagg-reaksjonen forekommer hurtigere enn reaksjonen til flygeaksen, noe som resulterer i en hurtigere hydratisering for miljøsementen. Reaksjonshurtigheten til slagg øker ved økende temperaturer, og på grunn av den økende temperaturen i betongsystemet, vil slagg bidra til å akselerere temperaturutviklingen. En annen påvirkende effekt for en hurtigere og høyere varmeutvikling for batchpar 4 sammenlignet med batchpar 1, kan være på grunn av finheten til sementen. En større finhet vil gi en større grad av hydratisering, og derfor en raskere og høyere temperaturutvikling (ref. seksjon 1.4).

Forventningen fra batchpar 2 var å se en nokså lik temperaturutviklingskurve som for ANL FA, på grunn av 25% sementerstattet FA som igjen reduserer mengden C₃S i bindemiddelet. Resultatet fra Figur 24 viser derimot at batchpar 2 har en høyere og tidligere varmeutvikling enn både batchpar 1 og batchpar 4. Dette skyldes nok hvitsementens egenskap til hurtig hydratisering på grunn av det høye C₃A-innholdet, og selv med 25% sementerstattet FA vil C₃A konsentrasjonen være 9.75%, noe som er høyere enn ANL FA.

Retardasjonsperioden:

Figur 23 til Figur 25 viser nokså like tendenser. Alitt-reaksjonen avtar, temperaturutviklingen stopper opp og varmeutvekslingen grunnet semi-adiabatiske forhold blir tydeligere. Fra teorikapittel (ref. seksjon 1.7) kan det oppstå en kort periode hvor varmeutviklingen akselererer på grunn av ettringite reagerer og danner monosulfat. Fra temperaturutviklingsgrafene presentert i Figur 23 til Figur 25 later det til at denne reaksjonen

uteblir på grunn av det konstante temperaturfallet. Resultatene fra Figur 23 til Figur 25 viser at temperaturen faller raskere for blandingene med høyere makstemperatur. Dette er nok et resultat av de termiske lovene som sier at forandringen i varmen er proporsjonal mellom betongen og omgivelsene rundt. Det vil si at jo større forskjellen er, desto større blir forandringen.

En tilleggs observasjon fra temperaturutviklingen (ref. Figur 23 til Figur 25) er en tydelig sammenheng mellom utviklet varme (makstemperatur og tidspunkt dette oppnås) og C₃A-innholdet til batchene. Sammenlignes de ulike batchparene og tilhørende C₃A-innhold kan det observeres en hurtigere og høyere temperaturutvikling for stigende C₃A-innhold (ref. Tabell 3-1 som presenterer C₃A-innholdet og Tabell 4-2 som viser makstemperatur og tilhørende tidspunkt for oppnåelse). Teorien sier at C₃A forårsaker en hurtig- og høy varmeutvikling, og avgir en varme tilsvarende ca. 900 kJ/kg (ref. seksjon 1.4).

5.3 Trykkfasthet

- Referanseblandingene

Fra Figur 34 til Figur 36 er det en tydelig sammenheng mellom tidlig fasthetsutvikling og temperaturutviklingen (ref. Figur 23 til Figur 25) til de ulike batchparene. Ett døgn trykkfasthet er betydelig høyere for alle fire hvitsementbatchene enn for de fire andre batchene med ANL FA- og miljøsement. Samtidig viser trykkfasthetsresultatene i Figur 36 at miljøsementen oppnår en høyere trykkfasthet etter ett døgn, enn batchene med ANL FA-

sement. Dette stemmer godt overens med temperaturutviklingen; batchene med hvitsement har en hurtigere og høyere temperaturutvikling enn de fire andre, og hydratiseringsprosessen er kommet lenger. Miljøsementblandingene har igjen en hurtigere og høyere temperaturutvikling enn ANL FA. Det er hovedsakelig hydratiseringsreaksjonene med C₃S og C₃A som resulterer i tidlig styrkedannelse, hvor C₃A har stor effekt de første 1 til 3 dagene (ref. Figur - 8)

Forskjellene i fastheten mellom de ulike batchparene reduseres etter 7 døgn. Batchpar 1 har fremdeles en noe lavere trykkfasthet enn de andre batchparene, med unntak av batch 3 som har den samme fastheten, mens batchpar 4 utligner fastheten til hvitsementblandingene. C₂S bidrar lite til fasthetsutvikling de første 20 dagene (ref. Figur - 8), og mye tyder på at det er de pozzolane reaksjonene som resulterer i en reduksjon i forskjellene. ANL FA inneholder 15% flygeaske og miljøsementen har en slaggandel lik 33%. Flygeaske og slagg har et tregt reaksjonsmønster og bidrar til en senere fasthetsutvikling (ref. seksjon 1.5). C-S-H andelen i betongen økes, CH andelen reduseres og porestrukturen i betongen blir tettere, disse effektene vil øke fastheten, og er antagelig en stor bidragsyter til de reduserende forskjellene. Teori hentet fra seksjon 1.5 sier at flygeaske har en senere reaksjonsrate enn slagg, og dette kan være en påvirkende faktor til en høyere fasthet for miljøsementen i forhold til ANL FA de første ukene.

Den samme tendensen fortsetter for 14-, 28- og 90+ døgn; batchpar 1 og batchpar 4 opprettholder en høyere fasthetsutviklingsrate, og etter 14 døgn er forskjellene mellom batchpar 1 og hvitsementblandingene utlignet, mens batchpar 4 har en høyere fasthet.

Sannsynligvis skyldes dette en videre pågående pozzolan effekt. Etter 28 døgn passerer batchpar 1 hvitsementblandingene, og miljøsementen øker fasthetsforskjellen sammenlignet med hvitsementblandingene. 28 døgn inn i hydratiseringen skal C₂S begynne å få en innvirkning på styrkedannelse (ref. seksjon 1.4 og Figur - 8). Perioden hvor C₂S har størst innvirkning er fra ca. 28 døgn og utover til 100 døgn, og fra Tabell 3-1 er C₂S-innholdet 21% for hvitsement, ca. 16% for hvitsement med 25% sementerstattet FA, 12% for ANL FA og 11% for miljøsement. Isolert sett bør dette bety at fasthetsutviklingen for batchpar 2 og 3 skal ha en raskere fasthetsutvikling fra dette punktet og ut, men resultatene viser at utviklingen forekommer hurtigere for batchpar 1 og 4. Dette kan skyldes hvitsementens raske hydratisering; den raske hydratiseringen kan akselerere effekten fra C₂S i tidlig fase, som følgende resulterer i et tettere C-S-H- og gelporennettverk, og det frie vannet i kapillærporene vil «slite» med å nå frem til uhydratisert-sement(ref. seksjon 1.4). Dette resulterer i tregere hydratisering av sement, og dette er muligens en årsak til lavere fasthetsutviklingsrate. Batchpar 1 og 4 oppnår en høyere slutfasthet enn batchene med hvitsement, og dette skyldes antagelig at de pozzolane materialene får en større innflytelse over lang tid.

Batchpar 1 viser en jevn fasthetsutvikling innad i paret. Den største forskjellen i fasthet er etter 1- og 7 døgn, henholdsvis 14% og 5% høyere fasthet for 8% tilsatt silika. Forskjellen henger antagelig sammen med høyere og tidligere varmeutvikling grunnet alitt-reaksjonen, noe som resulterer i mer C-S-H i tidlig fase. Videre viser Figur 34 at forskjellene i fasthet ved 14-, 28- og 104 døgn avtar og utlignes til slutt. Dette skyldes nok en hyppigere pozzolan-reaksjon for 16,5% tilsatt silika, hvor resultatet blir mer C-S-H. Denne effekten ser ut til å ha størst innvirkning mellom 7- og 14 døgn, hvor Figur 34 viser en hurtigere fasthetsutvikling for blandingen med 16.5% silika. Figur 37 viser til gjennomgående lave

variasjonskoeffisienter innad i batchparet, og trykkfasthetsverdiene presentert i Figur 34 har derfor god presisjon.

Batchpar 2 og batchpar 3 viser en bemerkelsesverdig forskjell i fasthet etter 1 døgn. Fastheten er 20% og 15% mindre for henholdsvis 8% og 16,5% silika ved tilsatt flygeaske; dette skyldes kombinasjonen av flygeaskens negative effekt på betongens tidligfasthet og en reduksjon i sementinnhold (ref. seksjon 1.5). Reduksjonen av sementinnholdet vil resultere i en lavere konsentrasjon av klinkermaterialene, og det vil derfor forekomme mindre sementhydratiseringsreaksjoner. Videre illustrerer Figur 35 at fasthetene utlignes over tid for 8% silika med FA i forhold til 8% silika uten FA, noe som antagelig skyldes effekten fra FA-innholdet. Flygeasken reagerer med CH og danner mer C-S-H, og følgende forekommer det en fasthetsøkning. Batch 3 har gjennom hele løpet en lavere fasthet, og slutfastheten er lavere i forhold til de andre blandningene (ref. Figur 35). 03-S-14 viser at fastheten er nær ved å utligne fastheten til de resterende blandningene, men for 03-S-28 og 03-S-[97] øker forskjellene. Det kan virke som den høye konsentrasjonen av de pozzolane materialene (16.5% silika og 25% FA) har en negativ effekt på slutfastheten i forhold til de andre hvitsementblandningene. Batchpar 3 viser en høyere fasthetsutvikling fra 7 til 14 døgn i forhold til batchpar 4, og denne perioden preges antagelig sterkt av FA-reaksjonene. Etter 20 døgn og utover starter C₂S reaksjonen (ref. Figur - 8), og fasthetsutviklingen grunnet sementhydratiseringen skyldes i hovedsak denne reaksjonen. Det ser ut til at den høye konsentrasjonen av de pozzolane materialene er i «overvekt» for batch 3. «Overvekt» vil si at CH dannet fra hydratiseringen av sement blir «brukt opp» av de pozzolane materialene, den pozzolane reaksjonen stopper opp og dersom det er gjenværende pozzolan-innhold forblir disse ureagert; konsentrasjonen av C-S-H er følgende lavere. Derimot kan det finnes grunner

til å stille spørsmålstegn til en lavere slutfasthet for batch 3; dette på grunn av en høy variasjonskoeffisient for terningstrioene etter 97-døgn (ref. Figur 37 og videre utdypning i tilhørende figurpresentasjon). Her bør det derfor utføres flere trykkfasthetsforsøk for å bedre presisjonen rundt trykkfastheten etter 97 døgn presentert i Figur 35.

Figur 36 illustrerer fasthetsutviklingen til batchpar 4. Raten for fasthetsutvikling er lik for både 16.5%- og 8% silika, men batch 7 (16.5% silika) har en konstant lavere fasthet. Dette kan nok knyttes til en lavere konsentrasjon av sement-innholdet, og følgende færre sementreaksjoner. Miljøsementen har det laveste klinkerinnholdet av de tre sementtypene brukt i denne oppgaven, men har til gjengjeld høy konsentrasjon pozzolanreaktivt slagg. Den høye andelen slagg leder antagelig til en nokså lik fasthetsutvikling for både 16.5%- og 8% silika på grunn av tilstrekkelig mengde pozzolane stoffer til å reagere med bi-produktet, CH, som dannes fra alitt- og belitt reaksjonene.

En observasjon gjort fra Figur 34 til Figur 36, er effekten av hvordan pozzolane tilsetningsstoffer påvirker fasthetsutviklingen til de ulike sementtypene. Det figurene viser er at sementtypene med høy andel klinker gir størst utslag i fasthetsutvikling ved tilsettelse av pozzolane stoffer. For eksempel kan vi se fra Figur 35 at det forekommer store utslag knyttet til fasthetsutviklingen for ulike pozzolane kombinasjoner, mens det fra Figur 36 omtrent ikke finnes utslag knyttet til forskjell i utviklingen. Fra Figur 34 observeres det større utslag enn det gjør for miljøsementen, noe som styrker observasjonen.

- Varmebehandlede blandinger

En tendens som utarter seg fra Figur 38 til Figur 43 er varmebehandlingens effekt for ulikt silika-innhold. Som forventet, fra teori (ref. seksjon 1.6), later det til at batchene med høyt silika-innhold får en større positiv gevinst med tanke på fastheten ved 28 døgn (tilfellet i denne oppgaven var etter 64 døgn), enn ved lavere silika-innhold. En mulig årsak til dette fenomenet er at temperaturpåføringen akselererer hydratiseringen av sement, frigjør mer CH, og øker den pozzolane reaksjonsaktiviteten, og en høyere andel silika kan dermed reagere.

Som for referanseblandningene, er det batchene med 8% silika-innhold som gir høyest slutfasthet av prøvene under standard herdeforhold, men Figur 38 til Figur 43 viser at 16.5% batchene innhenter 8% batchene etter varmebehandling, og oppnår en høyere slutfasthet.

Den høyest registrerte effekten fra varmebehandlingen lå på 13.8%, og resultatene kan late til å oppleve den samme tendensen som resultatene fra tidligere forskning, beskrevet i seksjon 1.6, nemlig at effekten i forhold til standard herdeforhold avtar med tiden. Selv om det ikke presenteres noen resultater som viser den tidlige (28 døgn) effekten av varmebehandling, kan det antas fra teori (ref. seksjon 1.6) og de relativt lave effektene i denne oppgavens resultater, at den nevnte påstanden stemmer. Varmebehandling akselererer hydratiseringshastigheten til sement, og andre kjemiske prosesser som følge av dette, og maksimal hydratisering vil kunne nås ved et tidligere tidspunkt. Under standard herdebetingelser vil ikke hydratiseringen akselereres noe særlig, med unntak av det første døgnet før terningene legges i vannbad, og hydratiseringen vil forekomme langsommere enn for varmebehandling. Det første døgnet vil betongen få en naturlig egenutviklet temperaturøkning som følge av hydratiseringen, og hydratasjonshastigheten vil øke.

For batchene med 16.5% silika viser resultatene fra Figur 38 og Figur 40 at varmebehandling i 2 døgn under 90°C ga høyest fasthet, mens fastheten er den samme for 1-, 2- og 4 døgns varmebehandling under 90°C i Figur 42. Felles for 09-V-90-2-[64] og 11-V-90-2-[64] er et høyt pozzolan-innhold, henholdsvis 31.5% (16.5% silika og 15% flygeaske) og 41.5% (16.5% silika og 25% flygeaske), mens batch 13-V-90-2-[64] har et pozzolan-innhold lik 16.5%. Det er dermed innholdet av FA som virker å være den utslagsgivende faktoren med tanke på forskjell i varmebehandlingens effekt. FA har en «treg» reaksjonsrate (ref. seksjon 1.5) og det kan virke som 2 døgns varmebehandling har ført til en høy hydratasjonshastighet og dermed økt FA's påvirkning på slutfastheten. For 13-V-90-2-[64] består bindemiddelet av hvitsement og silika, materialer som begge reagerer hurtig, og det kan late til at varmebehandling ved 90°C i ett døgn er tilstrekkelig for å oppnå lik slutfasthet som behandling under 2- og 4 døgn. En mulig årsak til en lavere gjennomsnittsfasthet for 09-V-90-3-[64] og 11-V-90-3-[64] kan være at en høy hydratasjonshastighet over for lang tid vil gi en ikke-uniform fordeling av hydratiseringsprodukter og dermed øke porestørrelse og porevolum [18]. Den andre årsaken, og den mest sannsynlige, er at slutfastheten i utgangspunktet ikke er noe lavere, fra Figur 44 og videre utdypning i tilhørende figurpresentasjon, er det presentert en høy variasjonskoeffisient for 09-V-90-3-[64]. Dette kan tyde på at trykkfastheten potensielt er den samme for 3 døgns behandling som ved 2 døgns behandling, noe som stemmer godt overens med Figur 38.

Batchene med 16.5% silika, behandlet i 80°C, oppfører seg alle forskjellig. 09-V-80 følger den samme tendensen som ved 90°C behandling, nemlig at 2 døgn har størst effekt. 11-V-80 opplever en trappetrinneffekt, hvor det største utslaget forekommer etter 3 døgns behandling. 13-V-80 viser en omtrent lik fasthet uavhengig av lengde på varmebehandlingen, noe som er den samme tendensen som for 90°C behandling. Det ser ut til at det kreves lenger

varmebehandling for synkende herdetemperatur dersom innholdet av FA øker; for 25% sementerstattet FA-innhold er det 3 døgn varmebehandling under 80°C som gir høyest trykkfasthet, 2 døgn for 15% FA-innhold og 1 døgn for 0% FA.

Som forventet, ga 90°C varmebehandling en større trykkfasthet enn 80°C behandling for batchene med 16.5% silika. Et høyere silika-innhold gjør betongen mer robust overfor høye herdetemperaturer, og høyere temperaturer akselererer pozzolanreaksjonen (ref. seksjon 1.6). Lavere silika-innhold gjør betongen mindre robust for høye herdetemperaturer, og det vil oppstå mer porøse reaksjonsprodukter ved for høye herdetemperaturer der silika-innholdet er 8% kontra 16.5% (ref. seksjon 1.6). Denne effekten vises fra resultatene i Figur 39 og Figur 43, nemlig at behandling ved 80°C er mer effektivt enn 90°C. I Figur 41 er 90°C mer effektiv, noe som kan skyldes det høye FA-innholdet. Flygeaske har den samme effekten som silika for høye herdetemperaturer, og for batch 12 består bindemiddelkomposisjonen av 25% FA, noe som vil gjøre betongen mer robust for å tåle 90°C bedre enn batch 10 og 14.

Effekten av varmebehandling er mindre signifikant for batchene med 8% silika, og den største effekten er 3.8% i forhold til standard herdeforhold; den største effekten er for 14-V-90-2-[64]. Hydratisering av sement og pozzolanreaksjonen er reaksjoner som er temperaturfølsomme, pozzolanreaksjonen mer enn sementreaksjonene (ref. seksjon 1.6), men det kan late til at type og mengde produkter dannet for batchene med 8% silika blir omtrent den samme etter 64 dager, uavhengig av herdetemperatur. Selv om varmebehandlingen for 8% generelt gir liten effekt i forhold til standard herdeforhold, viser resultatene at lengden på varmebehandlingen spiller en rolle. Der FA er tilsatt (Figur 39 og Figur 41) øker trykkfastheten ved økende tidsintervall med varmebehandling. Dette kan ha noe med det

trege reaksjonsmønsteret til FA, og hvordan høye herdetemperaturer akselerer denne reaksjonen. Batch 14 (Figur 43) er uten FA-innhold, og her er tendensene noe av det samme som for batch 13 (Figur 42), nemlig at økende tidsintervall med varmebehandling gir liten effekt. Selv om 14-V-80-2-[64] gjør et positivt utslag (2% økning) i forhold til 1 døgn og 3 døgn, noe som unnviker fra de resterende hvitsement med varmebehandling resultatene.

Generelt er det lave variasjonskoeffisientverdier knyttet til blandingene utsatt for varmebehandling (ref. Figur 44), og trykkfasthetsverdiene fremstilt i Figur 38 til Figur 43 gir god presisjon. For de tre høye variasjonskoeffisientverdien bør det utføres flere trykkfasthetsprøver for å øke presisjonen rundt fastheten.

5.4 Autogent svinn

Autogent svinn er hentet fra blandingene tilknyttet varmebehandling, altså batch 9 til og med batch 14. Batch 9 har den samme resepten som batch 1, batch 2 den samme som batch 10 osv. Dermed antas det at temperaturutviklingsgrafene (ref. Figur 23 og Figur 24) og trykkfasthetsutvikling (ref. Figur 34 og Figur 35) er sammenlignbare med batch 9 til og med batch 14. Det er viktig å bemerke at grunnet Covid19 er alle resultatene for autogent svinn hentet fra de første 20 til 48 timene, og analysen omhandler denne perioden.

Sammenlignes resultatene for autogent svinn (ref. Figur 45), varmeutvikling for batch 1 til 6 (ref. Figur 23 og Figur 24) og trykkfasthetsutvikling (ref. Figur 34 og Figur 35), er det

enkelte sammenhenger. Det kjemiske svinn oppstår når hydratisering av sement og den pozzolane reaksjonen danner produkter som er mindre enn reaktantene, og den eksterne effekten av dette er det autogene svinn (ref. seksjon 1.8). Kontraksjonsporevolumet øker, kapillærporevolumet reduseres, men porestørrelsene minker, og dette resulterer i et økende kapillært undertrykk, som igjen vil kunne gi en reduksjon i betongens ytre volum (ref. seksjon 1.8). For batchpar 1, forekommer hydratiseringen langsomt, noe som gjenspeiles i temperaturutviklingen og den tidlige fastheten (1 døgn); batchpar 1 har lavere verdier kontra batchpar 2 og 3. Det ser ut til at det er en lavere hydratiseringshastighet for batchpar 1, og det dannes følgende mindre mengder C-S-H og CH; dette er antagelig en påvirkende årsak til et lavere autogent svinn for batchpar 1.

Ifølge varmeutviklingsgrafene til batchpar 6 og 7 (ref. Figur 24), oppnår batchpar 7 en hurtigere temperaturutvikling, samt en høyere maksimaltemperatur, som igjen ga en høyere tidligfasthet (1 døgn ref. Figur 35). Antagelig er dette et resultat av en høyere hydratiseringshastighet som følgende resulterer i flere produkter (C-S-H og CH) fra sementreaksjonen. Isolert kan dette bety at batchpar 7 skulle oppnådd et større autogent svinn enn batchpar 6, men autogent svinn er komplekst og avhenger av mange faktorer, og resultatene fra Figur 45 viser at motsatte skjer, nemlig høyere registrert autogent svinn for batchpar 6. En mulig årsak til den motsatte effekten kan være det høye FA-innholdet for batchpar 6; FA gir grunnlag for et større kjemisk svinn på grunn av den pozzolanske reaksjonen har ifølge [10] et dobbelt så stort kjemisk svinn i forhold til hydratiseringen av sement. Dette bidrar til et økende kontraksjonsporevolum samtidig som porene blir finere og følgende økes det kapillære undertrykket (ref. seksjon 1.8).

Innad i batchparene er variasjonen knyttet til mengde silika. For batchpar 5 og 6, øker det autogene svinnet med økt mengde silika. Ifølge resultatene fra [23], oppstod det et høyere autogent svinn med en økt mengde silika, noe resultatene for batchpar 5 og 6 gjenspeiler. Derimot skjer det motsatte for batchpar 7, nemlig at autogent svinn øker med lavere silika-innhold. Muligens dette skyldes det manglende FA-innholdet og forskjellen innad i paret bærer sterke preg av sement-reaksjonen. Sammenlignes temperaturutviklingen og den tidlige trykkfastheten (1 døgn) viser figurene (Figur 24 og Figur 35) at det er batch 14 (8%-silika) som oppnår høyest temperatur og fasthet ved 1 døgn.

6 Konklusjon

Denne masteroppgaven forsøkte og ta for seg ulike UHPC-sammensetninger og hvilken effekt ulike typer varmebehandling i forhold til standard herdebetingelser ville ha på trykkfastheten. Ved å ta utgangspunkt i en referanseresept, funnet i samråd med veileder og tidligere utført arbeid, og videre forandre parametere som sementtype, silika- og flygeasketilsetning, ble det mulig å se på hvilken effekt ulike herdebetingelser hadde for ulike UHPC komposisjoner. Resultatene presentert i oppgaven viser til variert effekt av herdebetingelsene for ulike typer UHPC sammensetninger. Effekten fra varmebehandlingen var størst ved økende silika-innhold, og resultatene viser til en betydelig større effekt fra 16.5% silikatilsetning i forhold til 8% silikatilsetning. All form for varmebehandling ga en økende respons i trykkfasthet for UHPC blandingene med 16.5% silika-innhold, mens effekten var lav og tidvis fraværende for 8% silikatilsetning. Varmebehandling ved 90°C ga en høyere effekt i forhold til 80°C for 16.5% silika, og sementtypene med FA-innhold hadde størst effekt ved 2 døgns behandling, mens blandingen uten FA i bindemiddelet oppnådde maksimal effekt etter ett døgn. Videre behandling utover dette viste ingen effekt, og ved enkelte tilfeller en negativ effekt.

For blandingene med 8% silika ble det, ved økende mengde FA-tilsetning, registrert en stigende effekt av å forlenge varmebehandlingen. Blandingene uten FA i bindemiddelet ga størst effekt etter 2 døgns varmebehandling i 80°C, blandingen med 15% FA i sementensammensetningen ga størst effekt etter 3 døgns varmebehandling i 80°C/90°C og blandingen med 25% FA i bindemiddelet ga størst effekt etter 3 døgns varmebehandling i 80°C/90°C. Det er verdt å bemerke at det kun er resultatene med størst effekt som ga positiv

effekt i forhold til standard herdebetingelser; de resterende herdemetodene resulterte i ingen, tidvis negativ, effekt på trykkfastheten.

Resultatene viser at det vil være fordelaktig å varmebehandle UHPC blandinger med høyt silik-innhold (16.5%), mens hensikten vil være liten og derfor ikke til å anbefale for UHPC blandinger med lavere silika-innhold (8%). Det er derimot viktig å bemerke følgende: Hensikten ved oppgaven var å se på varmebehandlingens effekt ved 28 døgn, men trykkfasthetstestene til de varmebehandlede elementene ble utført ved 64 døgn grunnet Covid19. Tidligere forskning viser til en høyere effekt av varmebehandling ved tidlig fasthet kontra senere fasthet (ref. seksjon 1.6 og [18]), noe resultatene og konklusjonen presentert i denne oppgaven muligens bærer preg av.

7 Forslag til videre forskning

Oppgaven tok for seg ulike UHPC-sammensetninger og hvilken effekt ulike herdeforhold har på trykkfastheten. Grunnet Covid19 og nedstengning av laboratoriet, ble ikke alle forsøk utført, og ikke fullstendig i henhold til plan. Oppgaven forklarer innledningsvis at varmebehandling skulle gi en gevinst på 20-30% økning i trykkfasthet for UHPC etter 28 døgn. Resultatene fra oppgaven indikerer derimot at varmebehandling gir en mindre gevinst i forhold til standard herdeforhold etter 64 døgn, høyest registrert fra resultatene er en økning på 13,8%. Videre arbeid burde ta for seg den planlagte 28 døgn testingen som ikke ble utført som planlagt, og/eller et tidligere tidspunkt, da varmebehandlingens effekt muligens er høyere ved en tidligere alder etter støping. Grunnet Covid19 ble ikke slaggsementen, CEM II/B-S 52,5 N - CEMEX miljøsement, testet for varmebehandling. Sementtypen har en høy andel slag (33%) og var sementtypen presentert i oppgaven med lavest klinker-innhold. Videre arbeid burde utforske effekten en slaggsement har av ulik varmebehandling. Cemex Miljøsement med ulikt silika-tilsetning hadde moderat varmeutvikling under semi-adiabatiske forhold fra oppgaven (maksimaltemperatur på 74 og 80°C), og viste til høy fasthetsutvikling. Som forklart i seksjon 1.5, er pozzolanreaksjonen svært temperaturfølsom, noe som vil tilsa at varmepåføring vil kunne gi en høy effekt for fasthetsutviklingen på gjeldene sement. For å få et tydeligere bilde på effekten ulike pozzolantyper har av varmebehandling, burde videre arbeid med UHPC se på hvordan ulike pozzolantyper isolert sett har av varmebehandling. Grunnet Covid19 og konsekvensene som følge av dette, ble ikke utførelsen i henhold til planen. Avvikene ble som følger: Planlagt trykkfasthetstidspunkt for varmebehandlede elementer var ved 28 døgns alder, men tidspunktet for testingen ble ved 64 døgns alder. Videre forskning bør se på trykkfastheten ved 28 døgns alder (og/eller tidligere fasthet) for å se den tidlige effekten av varmebehandling; dette vil være spennende på grunn

av tidligere forskning viser til svært lovende effekter ved tidlige trykkfastheter (ref. seksjon 1.6.)

Det andre avviket ble som følger: De to siste blandinger med slaggsementen CEM II/B-S 52,5 N - CEMEX miljøsement ble ikke gjennomført i henhold til planlagt herdebetingelser med varmebehandling. Videre forskning bør dermed se på varmebehandlingens effekt på nevnte slaggsement. Cemex Miljøsement med ulikt silika-tilsetning hadde moderat varmeutvikling under semi-adiabatiske forhold fra oppgaven (maksimaltemperatur på 74 og 80°C), og viste til høy fasthetsutvikling. Slaggsement er svært temperaturfølsom, enda mer en ren portlandsement, og økende temperatur akselerer reaksjonshastigheten noe som vil kunne resultere i en god effekt på trykkfastheten ved varmebehandling.

Tidligere forskning viser at UHPC-blandinger herdet under standard herdeforhold i 24 timer for å deretter påføres varmebehandling; UHPC-blandingene ble oppvarmet til 90°C med en konstant rate lik 9°C per time. Effekten av varmebehandlinger ble en økning i trykkfastheten tilsvarende 30%. [33] En videre anbefaling til forskning vil derfor være å se på effekten av standard herdebetingelser i ett til to døgn før varmebehandlingen starter.

8 Referanser

- [1] E. Fehling, M. Schmidt, J. Walraven, T. Leutbecher and S. öhlich, Ultra-High Performance Concrete UHPC, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag fur Architektur und Technische, 2015.
- [2] M. Bøhnsdalen Eide og J.-M. Hisdal, «Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of the art,» SINTEF Building and Infrastructure 2012, Oslo, 2012.
- [3] E. Mørstell, S. Smeplass og M. Maage, «A particle-matrix model for prediction of workability of concrete,» i *Production methods and workability of concrete*, Scotland, Rilem, 1996, pp. 429-438.
- [4] P. Gjerp og M. Opsahl , Grunnleggende betongteknologi, Oslo: BA forlaget, 1998.
- [5] Z. Li og W. Liang, Advanced Concrete Technology, Wiley, 2011.
- [6] Y.-S. Tai og S. El-Tawil , «Effect of component materials and mixing protocol on the short-term performance of generic ultra-high-performance concrete,» i *Construction and Building Materials*, Elsevier , 2019.
- [7] G. Yu, B. Li, W. Haisong, C. Liu og X. Mu, «Preperation of concrete superplaticizer by oxidation-sulfomethylation of sodium lignosulfonate,» BioResources, 2012.
- [8] S. Kubens, «Effect of chemical admixture on hydration,» i *Interaction of cement and admixtures and its influence on rheological properties*, Göttingen, Tyskland , Cuvillier Verlag, 2010, pp. 38-45.
- [9] R. Deeb, A. Ghanbari og B. Karihaloo, «Development of self-compacting high and ultra high performance concretes with and without steel fibres,» i *Cement and concrete composites* , UK , Cardiff university , 2012, pp. 185-190.

- [10] M. Maage, *Betong - Regelverk, teknologi og utførelse*, Oslo: Byggnæringens Forlag AS, 1 utgave 2015, 2 opplag 2017.
- [11] S. Jacobsen , M. Maage, S. Smeplass, K. Kjellsen, E. Sellevold, J. Lingård , R. Cepuritis, R. Myrdal, Ø. Bjøntegaard og M. Geiker, *Concrete Technology*, Trondheim : NTNU, 2016.
- [12] T. Nochaiva, W. Wongkeo og A. Chaipanich, «Utilization of fly ash with silica fume and poperties of Portland cement-fly-ash-silica fume concrete,» Elsevier Ltd., Chiang Mai, 2009.
- [13] R. Rajapakse, «Cement additives,» *Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids (Second Edition)*, 2015.
- [14] B. Pedersen, «Sementer med flygeaske og slagg: Lab- og felterfaringer,» Statens vegvesen, 2016.
- [15] J. V. Thue, «Store norske leksikon,» 27 juli 2019. [Internett]. Available: <https://snl.no/filler>. [Funnet 19 mars 2020].
- [16] K. T. Fosså, *Cement hydration 2*, Stavanger: Universitetet i Stavanger, 2019.
- [17] E.-H. Kadri, S. Kenai, K. Ezziane, R. Siddique og . G. De Schutter, «Influence of metakaolin and silica fume on the heat of hydration and compressive strength development of mortar,» i *Applied Clay Science*, Elsevier , 2011, pp. 704-708 .
- [18] H. Maan S., A.-a. Zeyad M. og T. Muntadher J., «Complementary Effect of Heat Treatment and Steel Fibers on Mechanical and Microstructural Properties of High-Performance Concrete,» King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahran, 2016.

- [19] F. Moghaddam, V. Sirivivatnanon og K. Vessalas, «The effect of fly ash fineness on heat of hydration, microstructure, flow and compressive strength of blended cement pastes,» i *Construction materials*, Sydney , Elsevier Ltd, 2018.
- [20] P. Shen, L. Lu, Y. He, M. Rao, Z. Fu, F. Wang og S. Hu, «Experimental investigation on the autogenous shrinkage of steam cured ultra-high performance concrete,» i *Construction and Building Materials*, China, Elsevier, 2017, pp. 512-522.
- [21] K. T. Fosså, *Curing technology*, Stavanger: UiS, 2019.
- [22] G. Peng, T. Yu Hao, F. Guang Leng og J. Zhang, High Performance Concrete - Innovation and Utilization : Selected, Peer Reviewed Papers from the 10th International Symposium on High Performance Concrete - Innovation & Utilization (HPC 2014), Beijing, Kina: Trans Tech Publications, 2014.
- [23] M. Zhang, C. Tam og M. Leow, «Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete,» i *Cement and concrete research*, Singapore, Department of Civil Engineering, National University of Singapore, 2003, pp. 1687-1694.
- [24] W. D. J. Callister og D. G. Rethwisch, «Material Science, ninth edition,» John Wiley & Sons, 2015, pp. 214, 215.
- [25] A. Alsalman, C. N. Dang, G. S. Prinz og W. Micah Hale, «Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete,» i *Construction and building materials*, Elsevier, 2017, pp. 918-928.
- [26] Statens vegvesen , «Densitet av fersk betong,» i *Håndbok 014 Laboratorieundersøkelser*, Statens vegvesen, 2005 .
- [27] Statens vegvesen , «Luftinnhold,» i *Håndbok 014 Laboratorieundersøkelser* , Statens vegvesen , 2005.

- [28] Standard Norge, «NS-EN 12390-1:2012: Prøving av herdnet betong del 1: Form, mål og andre krav til prøvelegemer og former,» Standard Norge, Norge, 2012.
- [29] Standard Norge, «NS-EN 12390-3:2019: Prøving av herdnet betong, del 3: prøvelegemers trykkfasthet,» Standard Norge 2019, Norge, 2019.
- [30] Standard Norge, «NS-EN 12390-13: Prøving av herdnet betong del 13: Bestemmelse av sekantmodul for elastisitet under trykk,» Standard Norge, Norge, 2013.
- [31] O. M. Jensen og P. F. Hansen, «A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste,» i *Materials and Structures*, Danmark , 1995, pp. 406-409.
- [32] SINTEF , «520.031 Kvalitetskontroll og dokumentasjon av herdnet betong. Laboratoriemetoder,» *Byggforskserien*, pp. 41-47, August 2015.
- [33] J. Evert, S. Lehmborg, M. Krauß og H. Budelmann, «Early Age Properties of Ultra-High Performance Concrete,» i *Sustainable Building with Ultra-High Performance Concrete* , Kassel, kassel university press GmbH, 2014, pp. 219-240.
- [34] M. N. Hassoun og A. Al-Manaseer, «Structural concrete theory and design, sixth edition,» John Wiley & Sons, Incorporated, 2015, p. 22.
- [35] J.-M. Torrenti, G. Pijaudier-Cabot og J.-M. Reynouard, *Mechanical behavior of concrete*, John Wiley & Sons, 2013.

Vedlegg

Vedlegg A.	Datablad	- 4 -
Vedlegg B.	Excel-ark for adiabatisk forhold.....	- 15 -
Vedlegg C.	Trykkfasthet [MPa]	- 23 -
Vedlegg D.	E-modul.....	- 28 -

Vedlegg: Figur 1A - Sement - CEM II/A-V 42.5 N - Norcem ANL FA.....	- 4 -
Vedlegg: Figur 2A – Sement – CEM I 52,5 R – CEMEX Hvitsement	- 5 -
Vedlegg: Figur 3A - Sement - CEM II/B-S 52,5 N - CEMEX Miljøsement.....	- 6 -
Vedlegg: Figur 4A - Pozzolan - Elkem Microsilica 940U – Side 1/2	- 7 -
Vedlegg: Figur 5A - Pozzolan - Elkem Microsilica 940U – Side 2/2	- 8 -
Vedlegg: Figur 6A - Pozzolan - Norcem Flygeaske	- 9 -
Vedlegg: Figur 7A - Filler - Millisil W12 - Side 1/2	- 10 -
Vedlegg: Figur 8A - Filler - Millisil W12 - Side 2/2	- 11 -
Vedlegg: Figur 9A - Superplastiserende - Sika ViscoCrete PC-35	- 12 -
Vedlegg: Figur 10A - Fiber - Weidacon 0,15/9	- 13 -
Vedlegg: Figur 11A - Årdal 0/8 sand	- 14 -
Vedlegg: Figur 12B - Adiabatisk temperaturutvikling ANL FA 16.5%	- 15 -
Vedlegg: Figur 13B - Adiabatisk temperaturutvikling ANL FA 8%	- 16 -
Vedlegg: Figur 14B - Adiabatisk temperaturutvikling Hvit FA 16.5%	- 17 -
Vedlegg: Figur 15B - Adiabatisk temperaturutvikling Hvit FA 8%	- 18 -
Vedlegg: Figur 16B - Adiabatisk temperaturutvikling Hvit 16.5%	- 19 -
Vedlegg: Figur 17B - Adiabatisk temperaturutvikling Hvit 8%	- 20 -

Vedlegg: Figur 18B - Adiabatisk temperaturutvikling Miljø 16.5%	- 21 -
Vedlegg: Figur 19B - Adiabatisk temperaturutvikling Miljø 8%	- 22 -
Vedlegg: Figur 20C - Trykkfasthet for referanseblandingene	- 25 -
Vedlegg: Figur 21C - Trykkfasthet for varmebehandlede blandinger	- 27 -

Vedlegg A. Datablad

PRODUCT DATA SHEET

ANLEGGSEMENT FA

CEM II/A-V

LAST REVISION MARCH 2019

The cement satisfies the requirements according to NS-EN 197-1:2011 to Portland-fly ash cement CEM II/A-V 42.5 N.

Properties		Declared values	Requirements according to NS-EN 197-1:2011
Fineness (Blaine m ² /kg)		390	
Specific weight (kg/dm ³)		3.02	
Soundness (mm)		1	≤ 10
Initial setting time (min)		165	≥ 60
Compressive strength (MPa)	1 day	12	
	2 days	21	≥ 10
	7 days	37	
	28 days	53	≥ 42,5 ≤ 62,5
Sulfate (% SO ₃)		≤ 3,5	≤ 3,5
Chloride (% Cl ⁻)		≤ 0,085	≤ 0,10
Water soluble chromium (ppm Cr ⁶⁺)		≤ 2	≤ 2 ¹
Alkalies (% Na ₂ O _{eq}) ²		0,9	
Clinker (%)		81	80-94
Fly ash (%)		15	6 - 20
Limestone (minor additional constituents %)		4	< 5

1. According to EU regulation REACH Annex XVII point 47 Chromium VI compounds.
2. Total alkali content of the cement.

NORCEM
HEIDELBERGCEMENT Group

Norcem AS, P.O Box 142, Lilleaker, N-0216 Oslo
Tlf. 22 87 84 00 firmapost@norcem.no www.norcem.no

Vedlegg: Figur 1A - Sement - CEM II/A-V 42.5 N - Norcem ANL FA



Teknisk datablad

Hvitsement

CEM I 52,5 R

Bunol

Sammensetning:	Portlandsement
Bruk:	Til bruk i betongproduksjon. Elementindustri og ferdigbetong.
Egenskaper:	Hvit farge og rask herdeutvikling.

Tilfredsstiller kravene ihht. EN 197-1: CEM I 52,5 R
Produktet er sertifisert (CE-merket) ihht. EN 197-1 av AENOR, Spania

Typiske data:

Fysiske data

Finhet(blaine)	4000 cm ² /g
Densitet	3,10 g/cm ³
Bulkdensitet	1,25g/cm ³
Bindetid	140 min
Ekspansjon	1,0 mm

Trykkfasthet

1d	32 Mpa
2d	45 Mpa
28d	65 MPa

Kjemiske data

		vekt %
Kalk	(CaO)	65
Silisium	(SiO ₂)	22
Aluminium	(Al ₂ O ₃)	5,1
Sulfat	(SO ₃)	3,7
Jern	(Fe ₂ O ₃)	0,2
Magnesium	(MgO)	0,8
Kalium	(K ₂ O)	0,6
Natrium	(Na ₂ O)	0,2
Alkali ekv.	(Na ₂ Oekv)	0,55
(C ₃ S)		54
Glødetap	(L.O.I)	2,4
Uløselig rest	(i.r)	0,1
Vannløslig klorid	(Cl)	0,05
Vannløslig krom	Cr ^(VI)	< 2 mg/kg



Teknisk spørsmål:
Lars Busterud, tel 908 90 668
• E-Mail lars.busterud@schwenk.no

Versjon August 2019

SCHWENK Norge AS
Grønland 70A, 3045 Drammen
Telefon: +47 31 02 10 11
E-Mail: info@schwenk.no · www.schwenk.no

Informasjonen i denne publikasjonen er basert på gjeldende kunnskap og erfaring. De gir en referanseverdi for grunnleggende egnethet og må matches av tester og forsøk av prosessoren til den spesifikke applikasjonen. For dette må de tilsvarende gyldige lover, standarder og retningslinjer samt de generelt anerkjente reglene for byggtteknikk overholdes. Ved publisering av dette tekniske databladet mister tidligere tekniske datablad deres gyldighet. Endringer i rammeproduktet og applikasjonsteknikk utviklingen er reservert. Våre salgs- og leveringsbetingelser i gjeldende versjon gjelder for alle forretningsforbindelser.

1/2



Teknisk datablad

Miljøsement

CEM II/B-S 52,5 N
Rüdersdorf

Sammensetning:	Slaggsement
Bruk:	Til bruk i betongproduksjon. Elementindustri, ferdigbetong og injeksjon.
Egenskaper:	Universalsement.

Tilfredsstill kravene ihht. EN 197-1: CEM II/B-S 52,5 N
Produktet er sertifisert (CE-merket) ihht. EN 197-1 av VDZ, Tyskland

Typiske data:

Fysiske data

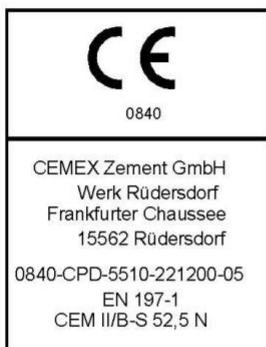
Finhet(blaine)	4600 cm ² /g
Densitet	3,06 g/cm ³
Bulkdensitet	1,1 g/cm ³
Andel slagg	Ca 33%
Bindetid	170 min
Ekspansjon	1,0 mm

Trykkfasthet

1d	16 Mpa
2d	28 Mpa
28d	59 MPa

Kjemiske data

		vekt %
Kalk	(CaO)	56
Silisium	(SiO ₂)	25
Aluminium	(Al ₂ O ₃)	6,3
Magnesium	(MgO)	4,0
Sulfat	(SO ₃)	3,1
Jern	(Fe ₂ O ₃)	2,1
Kalium	(K ₂ O)	0,8
Natrium	(Na ₂ O)	0,3
Alkali ekv.	(Na ₂ Oekv)	0,85
(C ₃ A)		5,3
Glødetap	(L.O.I)	1,7
Uløselig rest	(i.r)	0,6
Vannløslig klorid	(Cl ⁻)	0,07
Vannløslig krom	Cr ^(VI)	< 2 mg/kg



Teknisk spørsmål:
Lars Busterud, tel 908 90 668

- E-Mail lars.busterud@schwenk.no

Versjon August 2019

SCHWENK Norge AS
Grønland 70A, 3045 Drammen
Telefon: +47 31 02 10 11
E-Mail: info@schwenk.no · www.schwenk.no

Informasjonen i denne publikasjonen er basert på gjeldende kunnskap og erfaring. De gir en referanseverdi for grunnleggende egnethet og må matches av tester og forsøk av prosessoren til den spesifikke applikasjonen. For dette må de tilsvarende gyldige lover, standarder og retningslinjer samt de generelt anerkjente reglene for byggteknikk overholdes. Ved publisering av dette tekniske databladet mister tidligere tekniske datablad deres gyldighet. Endringer i rammeproduktet og applikasjonsteknikk utviklingen er reservert. Våre salgs- og leveringsbetingelser i gjeldende versjon gjelder for alle forretningsforbindelser.

1/2

Product Data Sheet

Elkem Microsilica® Grade 940 for fibre cement

Elkem Microsilica® Grade 940 is a dry silica fume available in two main forms: Undensified (U) and Densified (D)

Description

Elkem Microsilica® Grade 940 is a dry silica fume available in two main forms: Undensified (U) and Densified (D). In use, it acts physically as a filler and chemically as a highly reactive pozzolan. A key ingredient in many construction materials, Elkem Microsilica® is used in fibre cement products as a process aid, to improve ingredient dispersion and to improve hardened properties and overall durability.

Packing

The product is available in:

- 25 kg paper bags

- Big bags in various designs & sizes
- Bulk road tanker

Please contact our representative for more details.

Storage & handling

Elkem Microsilica® Grade 940 should be stored in dry conditions and not exposed to moisture.

Quality assurance & quality control

Elkem Silicon Materials' Management System for development, processing and supply of Elkem Microsilica® is certified to ISO 9001. The chemical and physical properties of Elkem Microsilica® are regularly tested.

Chemical and physical properties

Properties	Unit	Specification
SiO ₂	%	> 90
Retention on 45µm sieve	%	≤ 1.5 ¹
H ₂ O (when packed)	%	≤ 1.0
Bulk Density (U)	kg/m ³	200 – 350
Bulk Density (D)	kg/m ³	500 – 700

¹Tested on Undensified.
 Test methods are available on request.

This product data sheet is the property of Elkem AS and may not, without written permission, be used, copied or made available to others. The receiver is responsible for any misuse.

Revised December 2017

©Copyright 2018, Elkem AS

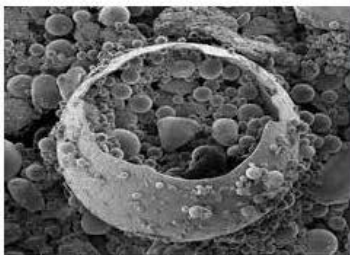
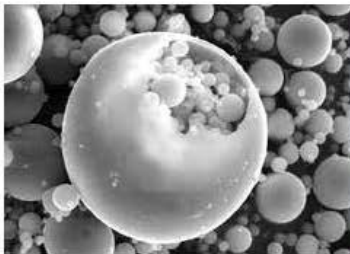
Norcem AS ivaretar salg av flygeaske til sement- og betongproduksjon. Flygeasken er sertifisert i overensstemmelse med kravene i NS-EN 450-1, klasse A.

Flygeaske er et bearbejdet restprodukt fra kull brukt i kullkraftverk. Flygeaske er slikatholdig og er et pozzolan som sammen med sement og vann gir en tettere betong. Kombinert med sement har flygeaske vært brukt i Norge siden 80-tallet. Norcem FA-sementer inneholder flygeaske.

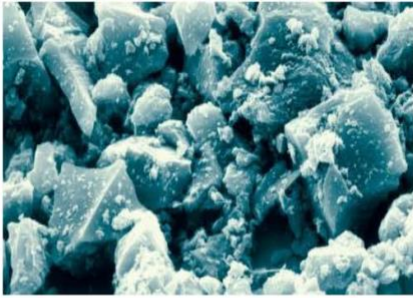
DEKLARERTE VERDIER

Flygeasken er sertifisert i overensstemmelse med kravene i NS-EN 450-12012, klasse A.

Egenskap	Deklarerte verdier	Krav i henhold til NS-EN 450-1
Glødetap (%)	≤ 5,0	Tilfredsstiller kravene gitt NS-EN 450-1
Klorid (% Cl ⁻)	≤ 0,10	Tilfredsstiller kravene gitt NS-EN 450-1
Sulfat (% SO ₃)	≤ 3,0	Tilfredsstiller kravene gitt NS-EN 450-1
Fritt kalsiumoksid (% fri CaO)	≤ 1,5	Tilfredsstiller kravene gitt NS-EN 450-1
Reaktivt kalsiumoksid (% reaktiv CaO)	≤ 10	Tilfredsstiller kravene gitt NS-EN 450-1
Partikkeldensitet (kg/m ³)	2300	Dekl.verdi +/- 200 kg/m ³
Øvrige kjemiske og fysiske parametere		Tilfredsstiller kravene gitt NS-EN 450-1



Vedlegg: Figur 6A - Pozzolan - Norcem Flygeaske



Stoffdaten | *Product data*

MILLISIL®-Mehle Werk Frechen | *MILLISIL® Flours Frechen plant*

MILLISIL®-Mehle werden durch eisenfreie Mahlung mit nachfolgender Windsichtung aus aufbereitetem Quarzsand hergestellt

MILLISIL® flours are produced from processed silica sand by iron-free grinding with subsequent air separation.

Typische Korngrößenverteilung und Körnungswerte | *Typical grain size and grain characteristics*

		MILLISIL® Frechen <i>MILLISIL® Frechen</i>				
		W 3	W 6	W 8	W 10	W 12
Obere Korngröße	<i>Upper grain size</i> $d_{95\%}$ in μm	220	120	90	70	50
Mittlere Korngröße	<i>Average grain size</i> $d_{50\%}$ in μm	90	40	30	20	16
Lichte Maschenweite	<i>Mesh size</i> in μm	Rückstand in Gew.-% <i>Residue in weight-%</i>				
Alpine Luftstrahlsieb	<i>Alpine air jet sieve</i>					
	400	0,1				
	315	0,3	0,1			
	200	7	0,5	0,1		
	160	18	1	0,5	0,1	
	125	32	4	1	0,5	0,1
	100	42	7	3	1	0,5
	63	62	28	15	6	2
	40	75	49	34	21	12
Korndurchmesser	<i>Grain diameter</i> in μm	Rückstand in Vol.-% <i>Residue in volume-%</i>				
Cilas Granulometer	<i>Cilas Granulometer</i>					
	32	71	52	48	38	22
	16	82	71	68	63	50
	8	90	81	80	78	69
	6	92	85	83	82	75
	4	94	88	87	86	81
	2	97	94	93	92	90

<1201> 1/2 (10/15)

Typische körnungsabhängige Eigenschaften | Typical grain size related properties

		MILLISIL® Frechen MILLISIL® Frechen					
		W 3	W 6	W 8	W 10	W 12	
Schüttdichte (DIN EN ISO 60)	Bulk density	g/cm ³	1,35	1,2	1,1	1,0	0,9
Stampfvolumen (DIN ISO 787-11)	Tapped bulk volume	ml/100 g	52	60	65	72	75
Spez. Oberfläche (DIN 66126-2) (DIN ISO 9277)	Spec. surface	Blaine	1000	1800	2200	2800	3800
		BET	0,3	0,5	0,6	0,8	0,9
Ölzahl (DIN ISO 787-5)	Oil absorption	g/100 g	14	16	18	19	21
Normfarbwert (DIN 5033)	Tristimulus values	X	62	71	73	75	77
		Y	64	73	75	77	79
		Z	69	79	82	86	89

Typische physikalische Eigenschaften | Typical physical properties

Dichte (DIN EN ISO 787-10)	Density	g/cm ³	2,65
pH-Wert (DIN ISO 10390)	pH-value		7
Mohs Härte (Literaturwert Literature value)	Hardness		7
Linearer Ausdehnungskoeffizient (DIN 51045)	Linear coefficient of thermal expansion	α 20-300°C	14 · 10 ⁻⁶ K ⁻¹

Typische chemische Analyse | Typical chemical analysis

		Gew.-% weight-%	
SiO ₂		99	
Al ₂ O ₃		0,3	
Fe ₂ O ₃		0,05	
CaO + MgO		0,1	
Na ₂ O + K ₂ O		0,2	
Glühverlust (DIN EN ISO 3262-1)	Loss on ignition	1.000°C	0,25
Feuchtigkeit werksfrische Ware (DIN EN ISO 787-2)	Moisture Material fresh from production		0,1

Allgemeine Informationen | General information

HS-Nummer	HS number	2530 9000
Fremdüberwacht nach DIN 4226		
Alle MILLISIL®-Sorten entsprechen DIN EN ISO 3262-13 Qualitätsgruppe A		

MILLISIL® wird aus aufbereiteten natürlichen Rohstoffen hergestellt. Alle Daten sind Richtwerte mit vorkommens- und produktionsbedingter Toleranz. Sie dienen nur zur Beschreibung und stellen keine zugesicherten Eigenschaften dar. Größere Anteile sind in Spuren möglich.
Dem Benutzer obliegt es, die Tauglichkeit für seinen Verwendungszweck zu prüfen. Wir geben auf Wunsch gerne Auskunft über Toleranzbreiten und anwendungstechnische Erfahrungen. Verkäufe erfolgen gemäß unseren Verkaufs- und Lieferbedingungen.

MILLISIL® is produced from prepared natural raw minerals. All data are approximate values with tolerances depending on occurrences and production. They only serve as description and do not represent any warranty concerning the existence of specific characteristics. Traces of coarser particles may be possible.

It applies to the user to test the suitability for his purposes. If wanted, we are prepared to give further information on tolerances and on our experience in technical applications. Sales are subject to our sales and delivery conditions.

<1201> 2/2 (10/15)

Sika ViscoCrete® PC-35

Superplastiserende tilsetningsstoff for produksjon av betong med høy tidligfasthet

Produktbeskrivelse Sika ViscoCrete® PC-35 er et siste generasjon superplastiserende tilsetningsstoff med begrenset åpen tid og meget god fasthetsutvikling. Effekten avhenger av doseringsmengden. Sika ViscoCrete® PC-35 er aktiv selv ved lave doseringer. Den vannreducerende effekten oppnås meget raskt slik at blandetiden kan minimaliseres.

Anvendelsesområder

- Sika ViscoCrete® PC-35 er spesielt beregnet for produksjon av betong til elementindustrien. Sika ViscoCrete® PC-35 gir høy vannreduksjon og utmerkede flyteegenskaper også ved lav dosering. Produktet kan med fordel benyttes til:
- Prefabrikerte betongelementer
- Selvkomprimerende betong (SKB)
- Betong med høyt sement- og silikainnhold

Produktegenskaper Sika ViscoCrete® PC-35 virker gjennom flere mekanismer. Ved overflateabsorpsjon og sterisk dispergering av sementpartiklene parallelt med hydrasjonsprosessen oppnås en betong med økt viskositet og redusert flyteskjærspenning. Dette gir bedre egenskaper som følger:

- Høy vannreducerende effekt
- Meget rask plastiseringseffekt muliggjør kort blandetid
- Utmerkede flyteegenskaper, også for betong med høyt bindemiddelinnhold
- Gir en robust betong med god mobilitet
- Forbedret luftporestruktur gir redusert "fish-eye"-tendens på elementoverflater
- Begrenset åpen tid reduserer ventetiden før glatting
- Høy tidligfasthet

Produktdata

Tekniske data	Type	Væske på basis av modifiserte polykarboksylater
	Farge	Gulbrun
	Densitet	1,04 ± 0,02 kg/l
	Viskositet	Lettflytende
	Tørrstoff	20,0 ± 1,0 %
	pH	7 ± 1
	Kloridinnhold (Cl)	< 0,01 % (vekt)
	Alkaliinnhold (Na ₂ O ekv.)	< 1,0 % (vekt)
	Normaldosering:	0,4 – 2,0 % av sementvekt. For optimal dosering anbefales for-forsøk.



WEIDACON
Stahldrahtfaser
aus patentiertem Kohlenstoffdraht,
nass, messing gezogen



Technische Daten

Fasertyp: Weidacon FM 0,15/9

Fasereigenschaften:

Material: Stahldraht Werkstoffnummer nach DIN EN 10016-2
Farbe: metallisch messing
Form: Querschnitt: rund / Länge: gerade
Abmessungen: d= 0,15mm, l= 9mm oder nach Wahl
Toleranzen: Länge: +/- 0,9mm vom Einzelwert und
 (gemäß DIN EN 14889-1) +/- 1,5mm vom Mittelwert
 Durchmesser: +/- 0,015mm vom Einzelwert und
 +/- 0,015mm vom Mittelwert
Dichte: 7,85 kg/dm³
Zugfestigkeit: 2800 N/mm² im Mittel
E-Modul: 200.000MPa

Chemische Analyse[Gew.%]:

	min.	max.
C	0,05	0,95
Mn	-	0,80
Si	-	0,30
P	-	0,035
S	-	0,035
Cr	0,15	0,20
Ni	0,20	0,25
Cu	0,25	0,35
Mo	0,05	0,08



Grafische Darstellung



Abbildung 1: Fasertyp Weidacon FM

Betoneigenschaften: Diese Stahldrahtfasern sind nach der gültigen DIN EN 14889-1 System 3 zertifiziert und überwacht.

Verpackungseigenschaften:

Losgröße: Kartons oder Säcke á 20 oder 25 kg auf Einwegpalette zu je 1.000 Kg in Folie eingeschweißt, spritzwassergeschützt



1111

NorStone Ardal, 4137 Ardal, Norge

19

NS-EN 12620:2002+A1:2008+NA:2016

Tilslag for betong

Ytelseserklæring nr / Entydlig identifikasjonskode			
164102 001	NK 60-20-20	0/8mm (B)	Gneis-Granitt
<u>Standarder</u>		<u>Verdier</u>	<u>Kategorier</u>
NS EN 933-1	Kornstørrelse Gradering Toleransekategori		0/8 G _{NG90} -
NS EN 933-3	Kornform Flisighetsindeks	-	
NS EN 1097-6	Komdensitet	2,68 Mg/m ³	2,66 Mg/m ³ - 2,70 Mg/m ³
NS EN 1097-6	Vannabsorpsjon	0,3%	WA ₂₄₁
NS-EN12620 F.2.3	Motstand mot frysing og tining	0,3	F ₁
NS EN 933-1	Renhet Finstoffinnhold	3%	f ₁₀
NS EN 933-7	Skjellinnhold		-
NS EN 933-5	Prosentandel knuste korn		C _{IK}
NS EN 1744-1§ 7	Sammensetning / innhold Klorider	0	
NS EN 1744-1§ 11	Totalt innhold av svovel	0,02	
NS EN 1744-1§ 12	Syreløselige sulfater	0,01	AS _{0,1}
NS-EN 1744-1§ 15	Bestanddel som endrer størknings- og herdingstiden av betong		Lysere
NB 21	Alkalireaktivitet (sammelningsverdi)	4,8%	
ASTM C1260-14	Accelerert tryttestrømsvekst	0,01%	<0.10%
NS EN 932-3	Petrografisk beskrivelse	Sand med knuste korn fra løssmasseforekomst. Hovedsakelig sammensatt av kubisk rundede/skarpkantede korn av granitt, gneis, feltspatiske bergarter og mørke bergarter. Løst belegg på kornoverflater, enkelte forvitrede korn og enkelte meget svake korn.	

Vedlegg: Figur 11A - Ardal 0/8 sand

Vedlegg B. Excel-ark for adiabatisk forhold

Adiabatic temperature and isothermic heat

Concrete parameters

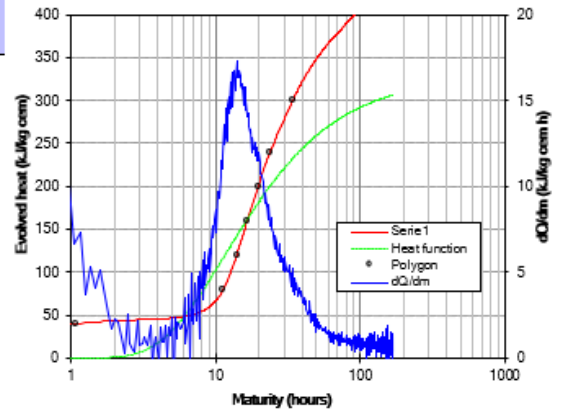
Temp. trans. coeff.	0,0309
Density	2541
Heat capacity (fresh)	1,09
Heat capacity (hardened)	1,04
Cement content	450
Set time	4,8
A - set time	30000
B - set time	1400
A - hydration	30000
B - hydration	1400
Adia. start temperature	18

Temp. trans. coeff.

dQ/dm	0,1
$m>$	150
$m<$	200

Heat function

M-limit	200
Q_0	329
τ	11,73
α	0,99
R^2	0,9160
$\Sigma \Delta_0$	6013337



Heat polygon

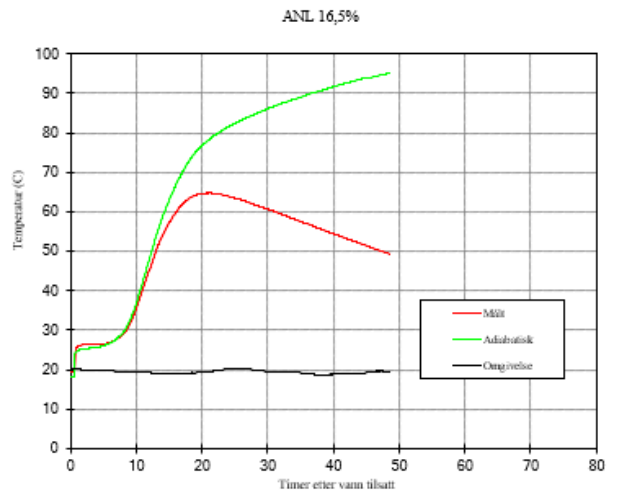
Reference heat (kJ/kg cem)	Corresp. maturity (h)
0	0,0
10	0,7
20	0,7
40	1,1
80	11,3
120	14,0
160	16,6
200	19,7
240	23,9
300	34,2

Adapt the temperature transmission coefficient: $\langle Cr \rangle t$
Adapt the heat function: $\langle Cr \rangle h$



Project

Name	Masteroppgave UHPC
Test id	ANL FA 16,5%
Perf. by	Glenn Levang og Ole Emil Karlsen
Date	24.02.2020



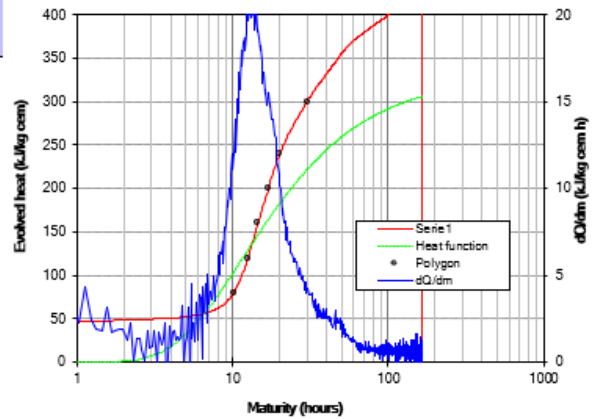
Vedlegg: Figur 12B - Adiabatisk temperaturutvikling ANL FA 16,5%

Adiabatic temperature and isothermic heat

Concrete parameters	
Temp. trans. coeff.	0,0309
Density	2482,5
Heat capacity (fresh)	1,09
Heat capacity (hardened)	1,04
Cement content	450
Set time	4,8
A - set time	30000
B - set time	1400
A - hydration	30000
B - hydration	1400
Adia. start temperature	18

Temp. trans. coeff.	
dQ/dm	0,1
m ₀	160
m _c	200

Heat function	
M-limit	200
Q ₀	329
τ	11,73
α	0,99
R ²	0,9292
ΣΔ ₀	5351710

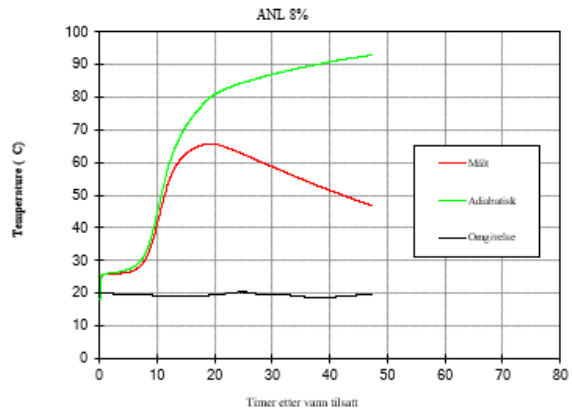


Heat polygon	
Reference heat (kJ/kg cem)	Corresp. maturity (h)
0	0,0
10	0,3
20	0,4
40	0,4
80	10,2
120	12,5
160	14,8
200	17,0
240	20,1
300	30,0

Adapt the temperature transmission coefficient: **<C>D> t**
 Adapt the heat function: **<C>D> h**



Project	
Name	Masteroppgave UHPC
Test id	ANL FA 8%
Perf. by	Glenn Levang og Ole Emil Karlsen
Date	02.03.2020



Vedlegg: Figur 13B - Adiabatisk temperaturutvikling ANL FA 8%

Adiabatic temperature and isothermic heat

Concrete parameters

Temp. trans. coeff.	0,0309
Density	2407,875
Heat capacity (fresh)	1,09
Heat capacity (hardened)	1,04
Cement content	450
Set time	4,8
A - set time	30000
B - set time	1400
A - hydration	30000
B - hydration	1400
Adia. start temperature	18

Temp. trans. coeff.

dQ/dm	0,1
m	150
m_c	200

Heat function

M-limit	200
Q_c	329
τ	11,73
α	0,99
R^2	0,9670
$\Sigma \Delta_a$	9059035

Heat polygon

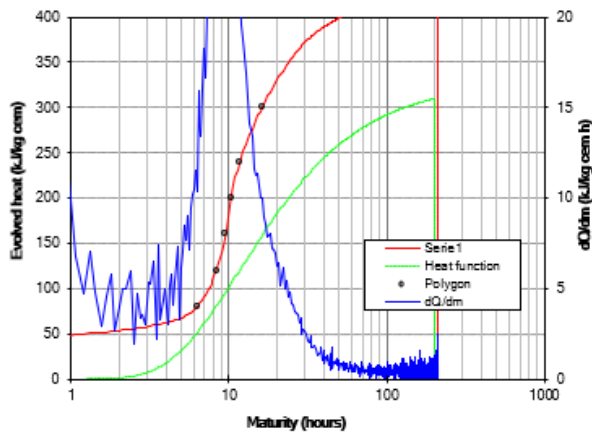
Reference heat (kJ/kg cem)	Corresp. maturity (h)
0	0,0
10	0,4
20	0,5
40	0,6
80	6,3
120	8,3
160	9,5
200	10,3
240	11,7
300	16,2

Adapt the temperature transmission coefficient:
Adapt the heat function:



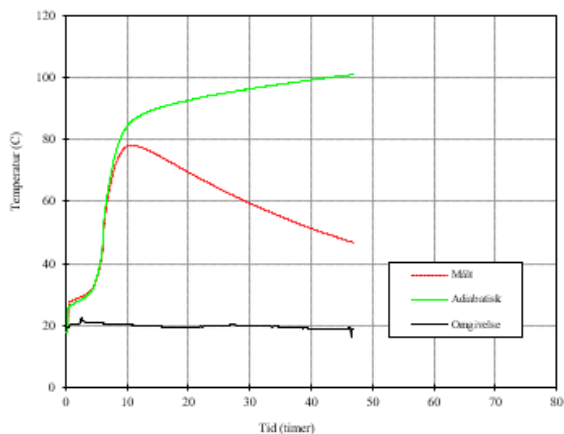
Project

Name	Masteroppgave UHPC
Test id	HVIT 16,5% (25%)
Perf. by	Glenn Levang og Ole Emil Karlsen
Date	04.03.2020



Maturity (hours)

Hvit FA 16,5%



Vedlegg: Figur 14B - Adiabatisk temperaturutvikling Hvit FA 16.5%

Adiabatic temperature and isothermic heat

Concrete parameters

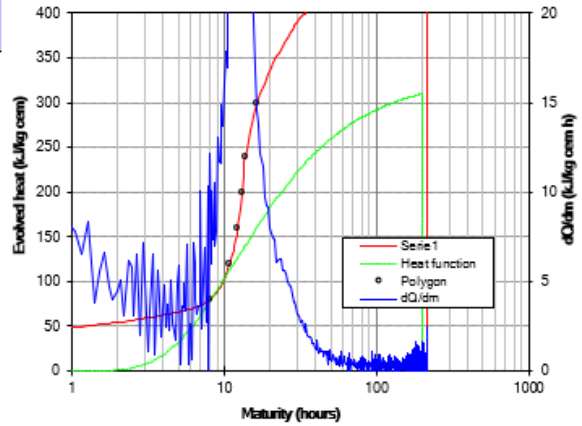
Temp. trans. coeff.	0,0309
Density	2431,625
Heat capacity (fresh)	1,09
Heat capacity (hardened)	1,04
Cement content	450
Set time	4,8
A - set time	30000
B - set time	1400
A - hydration	30000
B - hydration	1400
Adia. start temperature	18

Temp. trans. coeff.

dQ/dm	0,1
m	150
m<	200

Heat function

M-limit	200
Q	329
τ	11,73
α	0,99
R ²	0,8926
$\Sigma \Delta_e$	9781288



Heat polygon

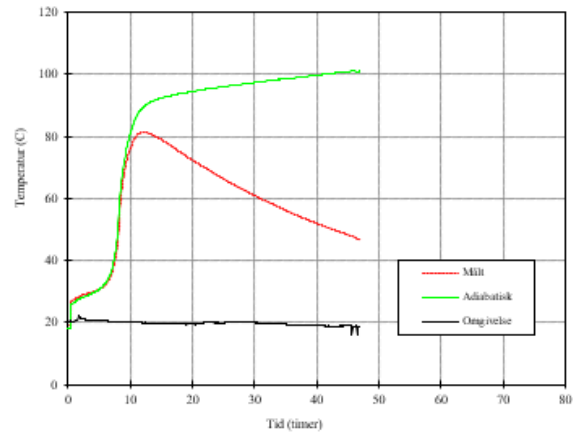
Reference heat [kJ/kg cem]	Corresp. maturity [%]
0	-0,3
10	0,4
20	0,4
40	0,5
80	8,1
120	10,9
160	12,3
200	13,1
240	13,8
300	16,5

Adapt the temperature transmission coefficient: **<C>T**
Adapt the heat function: **<C>h**



Project

Name	Masteroppgave UHPC
Test id	HVIT 8% (25%)
Perf. by	Glenn Levang og Ole Emil Karlsen
Date	06.03.2020



Vedlegg: Figur 15B - Adiabatisk temperaturutvikling Hvit FA 8%

Adiabatic temperature and isothermic heat

Concrete parameters

Temp. trans. coeff.	0,0309
Density	2420,125
Heat capacity (fresh)	1,09
Heat capacity (hardened)	1,04
Cement content	450
Set time	4,8
A - set time	30000
B - set time	1400
A - hydration	30000
B - hydration	1400
Adia. start temperature	18

Temp. trans. coeff.

dQ/dm	0,1
m ₀	150
m _c	200

Heat function

M-limit	200
Q ₀	329
z	11,73
α	0,99
R ²	0,9536
E _{act}	12284720

Heat polygon

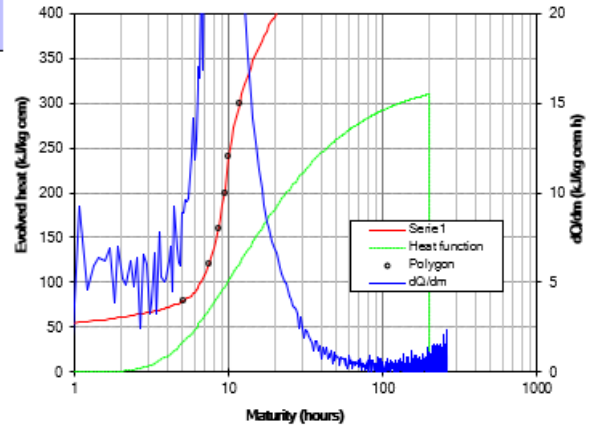
Reference heat [kWh/cem]	Corresp. maturity [h]
0	0,0
10	0,4
20	0,4
40	0,5
80	5,2
120	7,5
160	8,6
200	9,4
240	10,1
300	11,8

Adapt the temperature transmission coefficient: <Cr> t
Adapt the heat function: <Cr> h

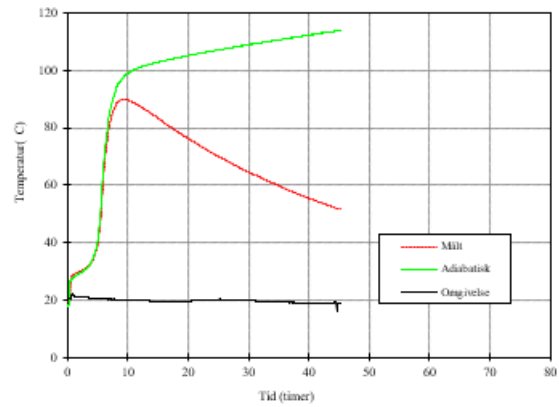


Project

Name	Masteroppgave UHPC
Test id	Hvit 16,5%
Perf. by	Glenn Levang og Ole Emil Karlsen
Date	09.03.2020



Hvit 16,5%



Vedlegg: Figur 16B - Adiabatisk temperaturutvikling Hvit 16,5%

Adiabatic temperature and isothermic heat

Concrete parameters

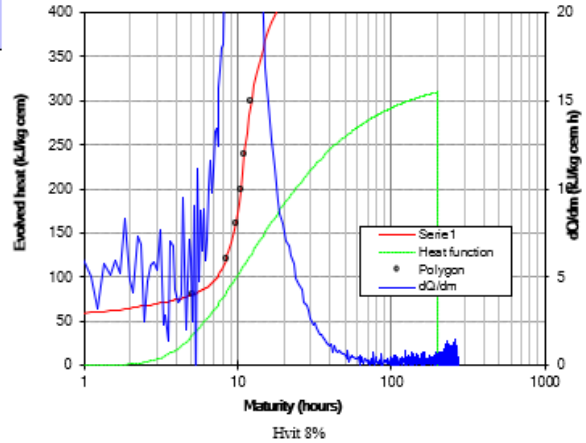
Temp. trans. coeff.	0,0309
Density	2420,125
Heat capacity (fresh)	1,09
Heat capacity (hardened)	1,04
Cement content	450
Set time	4,8
A - set time	30000
B - set time	1400
A - hydration	30000
B - hydration	1400
Adia. start temperature	18

Temp. trans. coeff.

dQ/dm	0,1
m	160
m_c	200

Heat function

M-limit	200
Q	329
τ	11,73
α	0,99
R^2	0,9260
E_{a_0}	12556357



Heat polygon

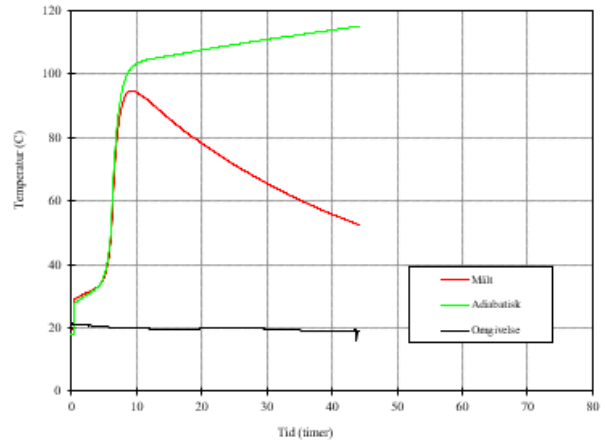
Reference heat [kWh/kg cem]	Corresp. maturity [h]
0	0,1
10	0,4
20	0,4
40	0,5
80	5,1
120	8,4
160	9,7
200	10,5
240	11,0
300	12,3

Adapt the temperature transmission coefficient: $\langle Cr \rangle t$
Adapt the heat function: $\langle Cr \rangle h$



Project

Name	Masteroppgave UHPC
Test id	HVIT 8%
Perf. by	Glenn Levang og Ole Emil Karlsen
Date	10.03.2020



Vedlegg: Figur 17B - Adiabatisk temperaturutvikling Hvit 8%

Adiabatic temperature and isothermic heat

Concrete parameters

Temp. trans. coeff.	0,0309
Density	2477
Heat capacity (fresh)	1,03
Heat capacity (hardened)	1,04
Cement content	450
Set time	4,8
A - set time	30000
B - set time	1400
A - hydration	30000
B - hydration	1400
Adia. start temperature	18

Temp. trans. coeff.

dQ/dm	0,1
m>	150
m<	200

Heat function

M-limit	200
G ₀	329
t ₀	1179
α	0,33
R ²	0,9246
ΣΔ ₀	12192763

Heat polygon

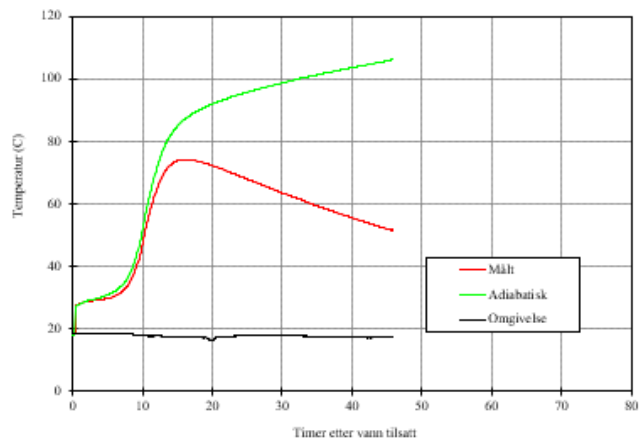
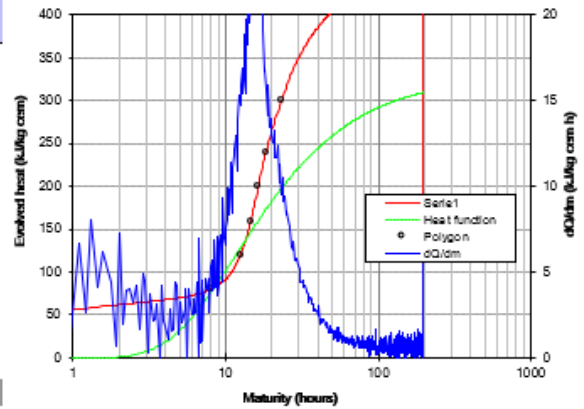
Reference heat	Corresp. maturity
0	0,0
10	0,3
20	0,3
40	0,4
80	0,8
120	12,4
160	14,6
200	16,3
240	18,4
300	23,2

Adapt the temperature transmission coefficient: $\langle C_{tr} \rangle t$
 Adapt the heat function: $\langle C_{tr} \rangle h$



Project

Name	Masteroppgavs UHPC
Test id	Miljø 16.5%
Perf. by	Glenn Levana, og Ole Emil Karlsen
Date	16.03.2020



Vedlegg: Figur 18B - Adiabatisk temperaturutvikling Miljø 16.5%

Adiabatic temperature and isothermic heat

Concrete parameters

Temp. trans. coeff.	0,0309
Density	2438
Heat capacity (fresh)	1,03
Heat capacity (hardened)	1,04
Cement content	450
Set time	4,8
A - set time	30000
B - set time	1400
A - hydration	30000
B - hydration	1400
Adia. start temperature	18

Temp. trans. coeff.

dQ/dm	0,1
m ²	150
mC	200

Heat function

M-limit	200
Q ₀	329
z	11,73
s ₀	0,33
R ²	0,9013
ΣΔ ₀	13768223

Heat polygon

Reference heat MWh/m ³	Corresp. maturity h ^{0,5}
0	1,3
10	0,3
20	0,3
40	0,4
80	0,8
120	12,3
160	14,3
200	16,3
240	17,6
300	20,3

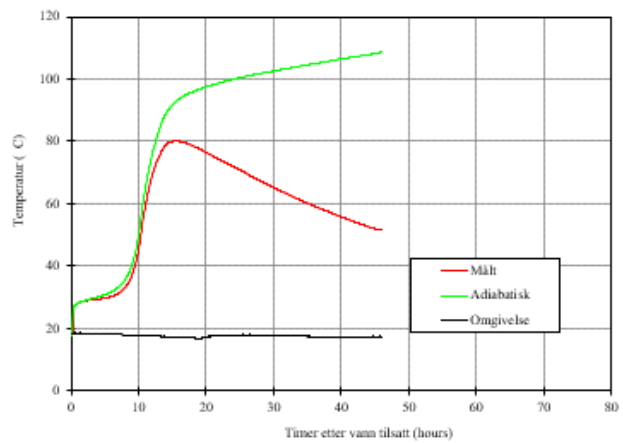
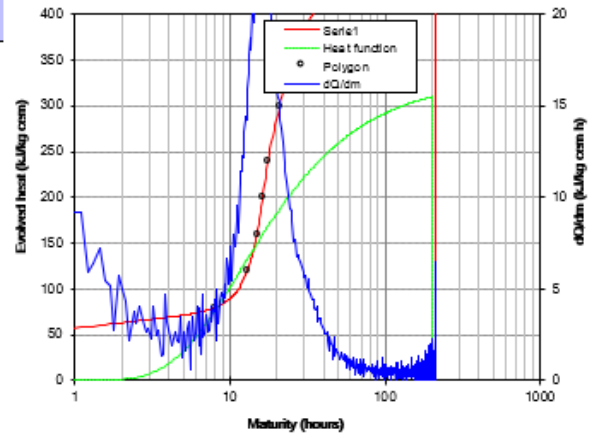
Adapt the temperature transmission coefficient:

Adapt the heat function:



Project

Name	Masteroppgavs UHPC
Test id	Miljø 8%
Perf. by	Glenn Levsnes og Ole Emil Karlsen
Date	16.03.2020



Vedlegg: Figur 19B - Adiabatisk temperaturutvikling Miljø 8%

Vedlegg C. Trykkfasthet [MPa]

- Referanseblandinger

B2:E239 Nr	Date	ID	{sigma}{lo m} N/mm
1	16.01.2020	Prove_ANL_16.5_1	47,76
2	16.01.2020	Prove_ANL_16.5_2	48,83
3	16.01.2020	Prove_ANL_16.5_3	49,36
4	16.01.2020	Prove_ANL_8_1	55,26
5	16.01.2020	Prove_ANL_8_2	55,79
6	16.01.2020	Prove_ANL_8_3	55,01
7	22.01.2020	Prove_ANL_16.5_1_7	109,11
8	22.01.2020	Prove_ANL_16.5_2_7	105,22
9	22.01.2020	Prove_ANL_16.5_3_7	107,43
10	22.01.2020	Prove_ANL_8_1_7	111,69
11	22.01.2020	Prove_ANL_8_2_7	112,95
12	22.01.2020	Prove_ANL_8_3_7	114,68
13	23.01.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_1	86,1
14	23.01.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_2	87,56
15	23.01.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_3	85,35
16	23.01.2020	Prove_Hvit_8_FA_1	90,53
17	23.01.2020	Prove_Hvit_8_FA_2	90,27
18	23.01.2020	Prove_Hvit_8_FA_3	90,27
19	23.01.2020	Prove_Hvit_16.5_1	98,68
20	23.01.2020	Prove_Hvit_16.5_2	101,66
21	23.01.2020	Prove_Hvit_16.5_3	97,48
22	23.01.2020	Prove_Hvit_8_1	109,14
23	23.01.2020	Prove_Hvit_8_2	110,01
24	23.01.2020	Prove_Hvit_8_3	106,88
25	29.01.2020	Prove_ANL_16.5_1_14	129,63
26	29.01.2020	Prove_ANL_16.5_2_14	130,18
27	29.01.2020	Prove_ANL_16.5_3_14	129,5
28	29.01.2020	Prove_ANL_8_1_14	129,62
29	29.01.2020	Prove_ANL_8_2_14	128,76
30	29.01.2020	Prove_ANL_8_3_14	129,72
31	29.01.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_1_7	117,85
32	29.01.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_2_7	108,05
33	29.01.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_3_7	106,52
34	29.01.2020	Prove_Hvit_8_FA_1_7	119,18
35	29.01.2020	Prove_Hvit_8_FA_2_7	120,93
36	29.01.2020	Prove_Hvit_8_FA_3_7	120,89
37	29.01.2020	Prove_Hvit_16.5_1_7	120,89
38	29.01.2020	Prove_Hvit_16.5_2_7	123,49
39	29.01.2020	Prove_Hvit_16.5_3_7	124,04
40	29.01.2020	Prove_Hvit_8_1_7	125,73
41	29.01.2020	Prove_Hvit_8_2_7	126,42
42	29.01.2020	Prove_Hvit_8_3_7	125,44
43	29.01.2020	Prove_Cemex_16.5_1	61,41
44	29.01.2020	Prove_Cemex_16.5_2	59,53
45	29.01.2020	Prove_Cemex_16.5_3	62,28
46	29.01.2020	Prove_Cemex_8_1	65,92
47	29.01.2020	Prove_Cemex_8_2	67,47
48	29.01.2020	Prove_Cemex_8_3	66,3

49	04.02.2020	Prove_Cemex_16.5_1_7	116,25
50	04.02.2020	Prove_Cemex_16.5_2_7	119,6
51	04.02.2020	Prove_Cemex_16.5_3_7	120,33
52	04.02.2020	Prove_Cemex_8_1_7	124,85
53	04.02.2020	Prove_Cemex_8_2_7	124,41
54	04.02.2020	Prove_Cemex_8_3_7	125,1
55	05.02.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_1_14	129,43
56	05.02.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_2_14	126,27
57	05.02.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_3_14	127,57
58	05.02.2020	Prove_Hvit_8_FA_1_14	132,13
59	05.02.2020	Prove_Hvit_8_FA_2_14	135,73
60	05.02.2020	Prove_Hvit_8_FA_3_14	136,15
61	05.02.2020	Prove_Hvit_16.5_1_14	133,33
62	05.02.2020	Prove_Hvit_16.5_2_14	127,9
63	05.02.2020	Prove_Hvit_16.5_3_14	130,95
64	05.02.2020	Prove_Hvit_8_1_14	134,66
65	05.02.2020	Prove_Hvit_8_2_14	134,83
66	05.02.2020	Prove_Hvit_8_3_14	134,11
67	11.02.2020	Prove_Cemex_16.5_1_14	129,12
68	11.02.2020	Prove_Cemex_16.5_2_14	133,15
69	11.02.2020	Prove_Cemex_16.5_3_14	130,47
70	11.02.2020	Prove_Cemex_8_1_14	137,97
71	11.02.2020	Prove_Cemex_8_2_14	140,35
72	11.02.2020	Prove_Cemex_8_3_14	138,58
73	12.02.2020	Prove_ANL_16.5_1_28	145,99
74	12.02.2020	Prove_ANL_16.5_2_28	147,27
75	12.02.2020	Prove_ANL_16.5_3_28	143,79
76	12.02.2020	Prove_ANL_8_1_28	144,89
77	12.02.2020	Prove_ANL_8_2_28	144,71
78	12.02.2020	Prove_ANL_8_3_28	149,02
79	19.02.2020	Prove_Hvit_FA_16.5_1_28	139,3
80	19.02.2020	Prove_Hvit_FA_16.5_2_28	127,32
81	19.02.2020	Prove_Hvit_FA_16.5_3_28	138,86
82	19.02.2020	Prove_Hvit_FA_8_1_28	144,44
83	19.02.2020	Prove_Hvit_FA_8_2_28	145,99
84	19.02.2020	Prove_Hvit_FA_8_3_28	145
85	19.02.2020	Prove_Hvit_16.5_1_28	144,98
86	19.02.2020	Prove_Hvit_16.5_2_28	143,59
87	19.02.2020	Prove_Hvit_16.5_3_28	138,84
88	19.02.2020	Prove_Hvit_8_1_28	144,18
89	19.02.2020	Prove_Hvit_8_2_28	143,24
90	19.02.2020	Prove_Hvit_8_3_28	141,99
91	25.02.2020	Prove_Cemex_16.5_1_28	147,09
92	25.02.2020	Prove_Cemex_16.5_2_28	144,48
93	25.02.2020	Prove_Cemex_16.5_3_28	153,39
94	25.02.2020	Prove_Cemex_8_1_28	155,66
95	25.02.2020	Prove_Cemex_8_2_28	157,71
96	25.02.2020	Prove_Cemex_8_3_28	148,76
97	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_1_104	166,94
98	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_2_104	173,97

99	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_3_104	168,65
100	28.04.2020	Prove_ANL_8_1_104	170,25
101	28.04.2020	Prove_ANL_8_2_104	169,12
102	28.04.2020	Prove_ANL_8_3_104	163,41
103	28.04.2020	Prove_Hvit_FA_16.5_1_97	156,4
104	28.04.2020	Prove_Hvit_FA_16.5_2_97	143,5
105	28.04.2020	Prove_Hvit_FA_16.5_3_97	157,74
106	28.04.2020	Prove_Hvit_FA_8_1_97	162,07
107	28.04.2020	Prove_Hvit_FA_8_2_97	161,15
108	28.04.2020	Prove_Hvit_FA_8_3_97	162,87
109	28.04.2020	Prove_Hvit_16.5_1_97	154,77
110	28.04.2020	Prove_Hvit_16.5_2_97	162,33
111	28.04.2020	Prove_Hvit_16.5_3_97	162,8
112	28.04.2020	Prove_Hvit_8_1_97	165,3
113	28.04.2020	Prove_Hvit_8_2_97	158,44
114	28.04.2020	Prove_Hvit_8_3_97	162,24
115	28.04.2020	Prove_Cemex_16.5_1_91	164,26
116	28.04.2020	Prove_Cemex_16.5_2_91	162,51
117	28.04.2020	Prove_Cemex_16.5_3_91	163,66
118	28.04.2020	Prove_Cemex_8_1_91	172,16
119	28.04.2020	Prove_Cemex_8_2_91	167,82
120	28.04.2020	Prove_Cemex_8_3_91	171,66

Vedlegg: Figur 20C - Trykkfasthet for referanseblandningene

- Varmebehandlet

121	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_Standard_1_64	154,13
122	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_Standard_2_64	152,32
123	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_Standard_3_64	156,55
124	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_80_1dogn_1_64	166,5
125	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_80_1dogn_2_64	164,47
126	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_80_1dogn_3_64	165,25
127	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_80_2dogn_1_64	167,82
128	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_80_2dogn_2_64	170,95
129	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_80_2dogn_3_64	168,97
130	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_80_3dogn_1_64	166,38
131	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_80_3dogn_2_64	164,32
132	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_80_3dogn_3_64	170,03
133	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_90_1dogn_1_64	169,78
134	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_90_1dogn_2_64	173,49
135	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_90_1dogn_3_64	166,59
136	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_90_2dogn_1_64	173,86
137	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_90_2dogn_2_64	173,65
138	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_90_2dogn_3_64	173,23
139	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_90_3dogn_1_64	175,88
140	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_90_3dogn_2_64	174,61
141	28.04.2020	Prove_ANL_16.5_90_3dogn_3_64	163,12
142	05.05.2020	Prove_ANL_8_Standard_1_64	168,8
143	05.05.2020	Prove_ANL_8_Standard_2_64	167,91
144	05.05.2020	Prove_ANL_8_Standard_3_64	165,96
145	05.05.2020	Prove_ANL_8_80_1dogn_1_64	165,82
146	05.05.2020	Prove_ANL_8_80_1dogn_2_64	165,08
147	05.05.2020	Prove_ANL_8_80_1dogn_3_64	161,99
148	05.05.2020	Prove_ANL_8_80_2dogn_1_64	166,83

149	05.05.2020	Prove_ANL_8_80_2dogn_2_64	171,91
150	05.05.2020	Prove_ANL_8_80_2dogn_3_64	165,45
151	05.05.2020	Prove_ANL_8_80_3dogn_1_64	170,22
152	05.05.2020	Prove_ANL_8_80_3dogn_2_64	174,63
153	05.05.2020	Prove_ANL_8_80_3dogn_3_64	166,71
154	05.05.2020	Prove_ANL_8_90_1dogn_1_64	159,26
155	05.05.2020	Prove_ANL_8_90_1dogn_2_64	163,26
156	05.05.2020	Prove_ANL_8_90_1dogn_3_64	165,36
157	05.05.2020	Prove_ANL_8_90_2dogn_1_64	163,72
158	05.05.2020	Prove_ANL_8_90_2dogn_2_64	169,53
159	05.05.2020	Prove_ANL_8_90_2dogn_3_64	168,56
160	05.05.2020	Prove_ANL_8_90_3dogn_1_64	170,53
161	05.05.2020	Prove_ANL_8_90_3dogn_2_64	169,74
162	05.05.2020	Prove_ANL_8_90_3dogn_3_64	167,35
163	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_Standard_1_64	154,47
164	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_Standard_2_64	151,25
165	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_Standard_3_64	155,58
166	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_80_1dogn_1_64	152,2
167	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_80_1dogn_2_64	157,54
168	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_80_1dogn_3_64	156,93
169	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_80_2dogn_1_64	158,41
170	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_80_2dogn_2_64	163,77
171	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_80_2dogn_3_64	167,92
172	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_80_3dogn_1_64	166,81
173	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_80_3dogn_2_64	167,37
174	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_80_3dogn_3_64	170,22
175	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_90_1dogn_1_64	162,78
176	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_90_1dogn_2_64	158,01
177	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_90_1dogn_3_64	157,1
178	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_90_2dogn_1_64	178,09
179	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_90_2dogn_2_64	167,47
180	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_90_2dogn_3_64	169,59
181	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_90_3dogn_1_64	171,82
182	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_90_3dogn_2_64	167,68
183	07.05.2020	Prove_Hvit_16.5_FA_90_3dogn_3_64	169,17
184	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_Standard_1_64	156,68
185	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_Standard_2_64	161,34
186	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_Standard_3_64	158,27
187	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_80_1dogn_1_64	154,72
188	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_80_1dogn_2_64	159,51
189	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_80_1dogn_3_64	157,33
190	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_80_2dogn_1_64	157,83
191	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_80_2dogn_2_64	163,15
192	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_80_2dogn_3_64	159,86
193	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_80_3dogn_1_64	163,97
194	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_80_3dogn_2_64	161,41
195	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_80_3dogn_3_64	163,75
196	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_90_1dogn_1_64	159,07
197	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_90_1dogn_2_64	153,48
198	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_90_1dogn_3_64	150,71

199	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_90_2dogn_1_64	164,62
200	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_90_2dogn_2_64	158,63
201	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_90_2dogn_3_64	162,53
202	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_90_3dogn_1_64	167,64
203	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_90_3dogn_2_64	160,24
204	09.05.2020	Prove_Hvit_8_FA_90_3dogn_3_64	163,31
205	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_Standard_1_64	148,7
206	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_Standard_2_64	149,73
207	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_Standard_3_64	152,29
208	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_80_1dogn_1_64	165,33
209	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_80_1dogn_2_64	164
210	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_80_1dogn_3_64	169,63
211	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_80_2dogn_1_64	156,29
212	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_80_2dogn_2_64	167,64
213	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_80_2dogn_3_64	168,18
214	12.05.2020	Prove_Hvit_8_80_1dogn_1_63	162,97
215	12.05.2020	Prove_Hvit_8_80_1dogn_2_63	165,08
216	12.05.2020	Prove_Hvit_8_80_1dogn_3_63	160,6
217	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_90_1dogn_1_64	168,99
218	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_90_1dogn_2_64	174,65
219	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_90_1dogn_3_64	163,66
220	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_90_2dogn_1_64	159,3
221	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_90_2dogn_2_64	174,5
222	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_90_2dogn_3_64	174,3
223	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_90_4dogn_1_64	169,29
224	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_90_4dogn_2_64	175,38
225	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_90_4dogn_3_64	168,03
226	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_80_3dogn_1_64	165,37
227	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_80_3dogn_2_64	168,3
228	12.05.2020	Prove_Hvit_16.5_80_3dogn_3_64	167,12
229	13.05.2020	Prove_Hvit_8_Standard_1_64	160,2
230	13.05.2020	Prove_Hvit_8_Standard_2_64	160,75
231	13.05.2020	Prove_Hvit_8_Standard_3_64	159,64
232	13.05.2020	Prove_Hvit_8_80_2dogn_1_64	169,19
233	13.05.2020	Prove_Hvit_8_80_2dogn_2_64	162,44
234	13.05.2020	Prove_Hvit_8_80_2dogn_3_64	167,28
235	13.05.2020	Prove_Hvit_8_80_3dogn_1_64	159,27
236	13.05.2020	Prove_Hvit_8_80_3dogn_2_64	161,44
237	13.05.2020	Prove_Hvit_8_80_3dogn_3_64	166,95
238	13.05.2020	Prove_Hvit_8_90_1dogn_1_64	163,58
239	13.05.2020	Prove_Hvit_8_90_1dogn_2_64	161
240	13.05.2020	Prove_Hvit_8_90_1dogn_3_64	165,18
241	13.05.2020	Prove_Hvit_8_90_2dogn_1_64	157,68
242	13.05.2020	Prove_Hvit_8_90_2dogn_2_64	162,01
243	13.05.2020	Prove_Hvit_8_90_2dogn_3_64	168,01
244	13.05.2020	Prove_Hvit_8_90_2dogn_4_64	159,32
245	13.05.2020	Prove_Hvit_8_90_2dogn_5_64	168,7
246	13.05.2020	Prove_Hvit_8_90_2dogn_6_64	162,79

Vedlegg: Figur 21C - Trykfasthet for varmebehandlede blandinger

Vedlegg D. E-modul

Batch	Prøve nr.	Vekt [kg]	E-modul [GPa]{64}
ANL 16.5%	1	13,01	42,92
	2	13,09	44,37
ANL 8%	1	13,38	43,29
	2	13,30	47,37
Hvit FA 16.5%	1	12,84	38,21
	2	12,92	43,07
Hvit FA 8%	1	13,06	42,23
	2	13,00	45,67
Hvit 16.5%	1	12,92	40,24
	2	12,98	44,65
Hvit 8%	1	13,16	56,17
	2	13,26	51,31

Vedlegg: Tabell 1D - Elastisitetsmodul

Tabellen over viser resultatene hentet fra e-modul test. Det ble støpt ut 2 sylindre for hver batch (fra batch 09 til og med batch 14), og tallene presentert i tabellen er E-modulen til de ulike batchene. Grunnen til at tallene blir lagt frem i Vedlegg D, og ikke i resultat, er på grunn av store avvik i forhold til planlagt utførelse av arbeid (metode utdypet i seksjon 2.7). Planen var at testing skulle bli utført etter 28 døgns herding, men grunnet nedstenging av laboratoriet, ble testene forskjøvet til 64 døgn. Under utstøping ble ikke overflatene til sylindrene behandlet (rettet av). Planen var å slipe/kutte overflatene jevne slik at trykket påført fra testmaskinen hadde en uniform fordeling. Nedstengingen førte til at sliping/kuttingen ikke kunne utføres på grunn av manglende personell for tilhørende utstyr. På grunn av de 2 årsakene forklart over knyttet det stor usikkerhet til resultatene i tabellen over.