



UIT

NORGES
ARKTISKE
UNIVERSITET

Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi

Effekt av å bruke retarderende stoff (R-stoff) i herdingsprosessen i store betongkonstruksjoner i kaldt klima

Retarder in larger concrete construction in cold clima

Roy Kristian Tingvoll Hansen

Masteroppgave i SHO6261, Mai 2017



MASTEROPPGAVE

for

Roy Tingvoll Hansen

(Studentnummer 82440)

Vår 2017

Effekt av å bruke superplastiserende (SP-stoff) i herdingsprosessen i store betongkonstruksjoner i kaldt klima

(SP in larger concrete construction in cold clima)

Bakgrunn

I kaldt klima som i Norge, vi er interessert i varmeutvikling når sementens reaksjon med vann (hydratiseringsprosessen). Varme utvikling har både positive og negative konsekvenser. I massive betongkonstruksjoner får man en betydelig temperaturstigning i det indre. Under uheldig ytre klimaforhold (lav temperaturen) kan dette føre til oppsprekking av betongen. Det mest positive ved varmeutviklingen er at støping kan foregå ved lavere temperaturen. De kjemiske reaksjoner stanser opp når temperaturen kommer under °C.

I denne master thesis, vi skal se på effekt av SP-bruk på varme utvikling. Har SP bidrag eller reduser varmeutvikling. Denne tema er veldig relevant i betong teknologi. Det er gjort lite forskning med bruk av SP i massiv betongkonstruksjoner i kaldt klima. Hva er konsekvensen av bruk av SP i stor betongkonstruksjoner?. Oppgaven består følgende to hoved tema

- 1) Matematiske beregninger av Fysikk modell om varmeutvikling i herding processprosessen og en praktisk test med måling av energi nivå.
- 2) Lab-forsøk: Vi skal måle varmeutvikling med og uten SP

Begrensning av oppgaven

Varmeutvikling er en komplett problem. Hvor temperaturen økning er avhengig med mange fysikk parameters som sement type, temperaturen, tilsetningsstoffer, binder midler. Siden, i denne oppgaver vi fokus på effekt av SP på varmeutvikling, derfor begrenser vi av å bruk del-materialer til betong. For eks. vi bruk ikke tilsetningsstoffer og/eller binder midler (pozzolant – materialer)

Arbeidet skal omfatte (men nødvendigvis ikke begrenses til)

1. Innledende arbeid/litteraturstudium med avgrensninger og definisjoner.
2. Teori rundt effekt av SP på indre energi i hydratiserende prosess, betongkonstruksjoner i kaldt klima.
3. Teoretisk energi-nivå og analyse av processet
4. Lab-arbeid test med måling av energi-nivå i full skala hvis mulig
5. Sammenligne teori og lab resultater.
6. Se om resulater av teori er samstemme med lab data (støpe betong med/og uten SP).
7. Det skal utarbeides en vitenskapelig artikkel/paper basert på besvarelsen, maks 6 sider. (Artikkelen kan sees på som er kortversjon av hele besvarelsen.)

Samarbeidspartner

Oppgaven gjennomføres i samarbeid med Vesterålsbetong AS, Kristian Tingvoll

Generelt

Senest 14 dager etter at oppgaveteksten er utlevert skal resultatene fra det innledende arbeid være ferdigstilt og levert i form av en forstudierapport. Forstudierapporten skal godkjennes av veileder før kandidaten har anledning til å fortsette på resten av hovedoppgaven. Det innledende arbeid skal være en naturlig forberedelse og klargjøring av det videre arbeid i hovedoppgaven og skal inneholde:

- Generell analyse av oppgavens problemstillinger.
- Definisjon i forhold til begrensninger og omfang av oppgaven.
- Klargjøring/beskrivelse av de arbeidsoppgaver som må gjennomføres for løsning av oppgaven med definisjoner av arbeidsoppgavenes innhold og omfang.
- En tidsplan for framdriften av prosjektet.

Sluttrapporten skal være vitenskapelig oppbygget med tanke på litteraturstudie, arbeidsmetodikk, kildehenvisninger etc. Alle beregninger og valgte løsninger må dokumenteres og argumenteres for. Besvarelsen redigeres som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, referanser, innholdsfortegnelse etc. Påstander skal begrunnes ved bevis, referanser eller logisk argumentasjonsrekke. I tillegg til norsk tittel skal det være en engelsk tittel på oppgaven. Oppgaveteksten skal være en del av besvarelsen (plasseres foran Forord).

Materiell som er utviklet i forbindelse med oppgaven, så som programvare/kildekoder eller fysisk utstyr, er å betrakte som en del av besvarelsen. Dokumentasjon for korrekt bruk av dette skal så langt som mulig også vedlegges besvarelsen.

Dersom oppgaven utføres i samarbeid med en ekstern aktør, skal kandidaten rette seg etter de retningslinjer som gjelder hos denne, samt etter eventuelle andre pålegg fra ledelsen i den aktuelle bedriften. Kandidaten har ikke anledning til å foreta inngrep i den eksterne aktørs informasjonssystemer, produksjonsutstyr o.l. Dersom dette skulle være aktuelt i forbindelse med gjennomføring av oppgaven, skal spesiell tillatelse innhentes fra ledelsen.

Eventuelle reiseutgifter, kopierings- og telefonutgifter må bæres av studenten selv med mindre andre avtaler foreligger.

Hvis kandidaten, mens arbeidet med oppgaven pågår, støter på vanskeligheter som ikke var forutsatt ved oppgavens utforming, og som eventuelt vil kunne kreve endringer i eller utelatelse av enkelte spørsmål fra oppgaven, skal dette umiddelbart tas opp med UiT ved veileder.

Besvarelsen leveres digitalt i MUNIN.

Utleveringsdato:	09.01.2017
Innleveringsdato:	15.05.2017
Kontaktperson bedrift:	Vesterålsbetong AS Kristian Tingvoll Telefon: 951 94 932 E-post: kristian@vesteralsbetong.no
Veileder UiT - IVT:	1. am. Hung Thanh Nguyen Telefon: 76 96 62 49 E-post: hung.thanh.nguyen@uit.no

UiT – Norges Arktiske Universitet
Institutt for bygg, energi og materialteknologi



Hung Thanh Nguyen
Faglig ansvarlig/veileder

Endring av oppgaven.

Etter drøfting med Boy-Arne Boyle og Hung Thanh Nguyen ved UIT, fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi og Vesterålen Betong kom vi fram til at det er gjort en del arbeid på dette området allerede og med bakgrunn av dette ble det vedtatt at oppgaven ble endret til om å omhandle retarderende stoff fremfor superplastiserende stoff.

Ny tittel på oppgaven: Effekten av å bruke retarderende (R-stoff) i herdingsprosessen i store betongkonstruksjoner i kaldt klima.

Selve oppgave teksten blir lik opprinnelig tekst, superplastiserende stoff blir erstatt med retarderende stoff.

Det skal ikke utredes noe vitenskapelig artikkel, Punkt 7 i oppgave teksten. Dette fordi veileder Hung Thanh Nguyen mener rapporten ikke har tilstrekkelig laboratorieresultater til at det kan skrives en god vitenskapelig artikkel. På grunn at det er gjennomført for få prøver i forbindelse laboratoriearbeidet, slik at det var vanskelig å gjennomføre de planlagte matematiske beregning med god nøyaktighet.

Sammendrag

Varmeutviklingen i betong avgjøres mye av sement sammensetningen. Sementen er sammensatt av forskjellige klinker som har mye å si for varmeutviklingen, ettersom de har forskjellige energiutvikling og reaksjonshastighet når de kommer i kontakt med vann. Pozzolan er et stoff som kan brukes til å erstatte en vis mengde av sementen, som flygeaske som gir en reduksjon i varmeutviklingen og har mindre innvirkning på betongen egenskaper er ofte brukt i Norge. Varmeutviklingen i betongen spiller direkte inn på størrelsen til temperaturgradienten. Når herdetemperaturen blir for høy kan det bli for stor forskjell mellom kjernen (spenning) og overflaten (strekk) slik at det dannes riss og kvaliteten på betongen blir dårligere. Målsetningen i denne oppgaven er å kartlegge om bruk av retarderende stoffer kan gi en redusere varmeutviklingen i betongen ved bruk av Norcem Standard FA sement. Dette i forbindelse med vindmølleparken som skal bygges i Åndstadblåheia som det var først planlagt å bruke Norcem Standard FA sement.

Litteraturstudiet omfatter hydratiseringsgrad, hastighetsfunksjon, modenhetsprinsippet og varmeutvikling. Det praktiske arbeid som ble gjort i forbindelse med oppgaven var blanding av reseptene, konstruksjon av herdekasser og kobling av målepunkter for temperaturmålingene og det ble tatt trykkfasthet prøver for hver blanding. Det er gjort noen enkle beregninger av stigningstallet til varmeutviklingen og teoretisk maksimum temperaturer i blandingene som ble brukt.

Ved måling av temperaturutviklingen i herdekassene ble det laget grafer som viser temperaturutviklingens forløp og hvordan ytre romtemperatur kan påvirke temperaturen i herdingsprosessen. Simuleringsprogramet Hett 97 er brukt til å simulere forskjellige konstruksjoner for å kartlegg temperaturutviklingen i større konstruksjoner. Dette for å kunne sammenligne med oppnådd temperatur i herdekassene og beregnet temperaturer.

Summary

The heat development in concrete is largely determined by the cement composition. The cement is made up of different clinker that has a lot to say about heat development, as they have different energy development and reaction rate when they come into contact with water. Pozzolan is a substance that can be used to replace a certain amount of cement, such as fly ash which gives a deterioration in heat development and has less impact on concrete properties are often used in Norway. The heat output in the concrete plays directly into the size of the temperature gradient. When the tempering temperature becomes too high, there may be too much difference between the core (tension) and the surface (tension) to produce a scratch and the quality of the concrete becomes weaker than intended. The purpose of this task is to determine whether the use of retarding can reduce heat-generating in the concrete using Norcem Standard FA cement. This in connection with the wind farm that is going to be built in Åndstadblåheia. It was first planned to use Norcem Standard FA cement for the fundamentals.

The literature study includes hydration, speed function, maturity principle and heat development. The practical work that was done in connection with the assignment was the mixing of the respirations, the construction of sheath boxes and the coupling of measurement points for the temperature measurements and pressure-tightness tests were taken for each mixture. Some simple calculations have been made of the increase in heat development and theoretical maximum temperatures in the mixtures used.

By measuring the temperature development in the curing cages, graphs were made showing the evolution of temperature evolution and how outer room temperature can affect the temperature in the curing process. The Hett 97 simulation program is used to simulate different constructions to map the temperature development in major contractions. This in order to be able to compare with the obtained temperature in the casing and calculated temperatures.

Forord

I utgangspunktet skulle oppgaven omhandle vannreducerende stoff i betongen, for å se om det hadde noe å si for temperaturutviklingen, men siden det er gjort mye forskning på dette området tidligere. Ble oppgaven endret til bruk av retarderende stoff i betongen i kaldt klima. Gjennom oppgavene fikk jeg godt innblikk i hvor omfattende betong faktisk er og hvor mange faktorer som faktisk spiller inn når man skal se på temperaturutviklingen i herdingsfasen til betong.

Jeg vil takke:

- Veileder Hung Thanh Nguyen, som i stor grad ga meg godt innblikk i det matematiske rundt betongteknologien og alle de gode diskusjoner vi hadde.
- Boy-Arne Boyle, som har gitt meg mange gode innspill og kunnskap innen betongteknologien.
- Bengt Øverås som har bistått på betonglaboratoriet.
- Nils Andreassen for opplæring og bruk av måleutstyret som ble brukt i forbindelse med oppgaven.
- Vesterålen Betong for veiledning og økonomisk støtte

Innhold

1	Innledning.....	10
1.1	Hensikt.....	10
1.2	Materialer.....	10
2	Betong Teori	11
2.1	Sementsammensetning	11
2.2	Hydratiseringsprosessen	13
2.2.1	Hydratiseringsreaksjoner klinkermineralene i portlandsement	13
2.2.2	Hydratiseringsvarme	19
2.2.3	Hydratiseringsgrad	21
2.2.4	Pozzolan.....	21
2.3	Varmeutvikling i betong.....	25
2.3.1	Hastighetsfunksjonen.....	32
2.3.2	Modenhetsbegrepet	35
2.3.3	Fasthetsutvikling.....	37
2.3.4	Varmeutvikling.....	38
2.3.5	Begrensninger i formlene	40
2.4	Varmetap fra konstruksjoner.....	41
2.4.1	Varmeledning	41
2.4.2	Konveksjon	43
2.4.3	Stråling.....	44
2.4.4	Varmetap ved fordamping.....	44
2.4.5	Effekten av konstruksjonsforhold	45
2.4.6	Modenhetsmodell.....	46
2.4.7	Egenskapsmodeller	46
2.4.8	Hett 97 – planleggingsverktøy	48

2.5	Temperaturforskjeller i herdingsprosessen	48
2.5.1	Temperaturoyning.....	49
2.5.2	Spenningsoppbygging, indre og ytre fastholding	49
2.6	Tilsetningsstoffer	52
2.6.1	Vannreduserende/plastiserende stoff.....	53
2.6.2	Luftinnførende stoff	56
2.6.3	Størkningsakselererende stoff	56
2.6.4	Størkingsretarderende stoff.....	57
2.6.5	Andre tilsetningsstoffer	59
3	Laboratoriarbeid.....	61
3.1	Forutsetninger	61
3.2	Målemetoder.....	62
3.2.1	Temperaturmåling.....	62
3.2.2	Trykktesting	64
3.3	Betongblandinger	64
4	Beregninger.....	64
5	Resultater.....	71
5.1	Betongblanding.....	71
6	Diskusjon.....	80
6.1	Mapei Retarder R.....	81
6.2	Sika Retarder	81
7	Konklusjon.....	82
8	Videre arbeid	83
9	Referanser.....	84
10	Vedlegg.....	86

1 Innledning

1.1 Hensikt

Betong er et av de mest brukte byggemateriale i dag og det er ingen grunn til å tro at det blir endret med det første. I dag er det mange forskjellige type sementer, som Norcem Standard, Anlegg, Industri og mange flere. I mange av disse erstattes en del av sementen med pozzolan slik at man kan redusere sementmengden i betong uten å miste egenskapene og i tillegg gjøre sementen mer miljøvennlig med at det blir redusert CO^2 -utslipp. I tillegg er det mange forskjellige type tilsetningsstoffer som brukes i betongen i dag for å endre betongen sin egenskap, som retarderende-, akselerende, vannreducerendestoff for å nevne noen. I større betongkonstruksjoner blir ofte varmeutviklingen veldig høy og dette kan føre til redusert betongkvalitet og riss.

Målsetningen for oppgaven er å se hvilken effekt retarderende stoffer har på temperaturutviklingen i herdefasen og om det er mulig å utnytte dens effekt i store betongkonstruksjoner og om dens egenskap kan utnyttes i det kaldere klima som vi har i Norge. Før man skal støpe en betongkonstruksjon kan det være gunstig å gjøre beregninger på varmeutviklingen i betongen. I forbindelse med oppgaven ble det utført med hjelp fra et regneark levert fra Norcem, som gir oss varmekapasiteten til betongen (vedlegg A), simulering i Hett 97 og målt temperaturutviklingen i et semi-adiabtisk miljø. Dette for å avgjøre om sementen og blandingen er egnet til formålet. Det er blitt sett på Norcem sin Standard FA sement (vedlegg B).

1.2 Materialer

Denne oppgaven tar for seg en litteratursøk i første periode, hvor fokuset er rundt betong teorien og hva av teori som det er å finne rundt tilsetningsstoffet med retarderende effekt i betongen og hvilken faktor den spiller inn på varmeutviklingen i betongen. Resten av oppgaven går ut på laboratorieforsøk, hvor det skal støpes større former som det blir målt temperaturutviklingen. I tillegg vil det bli støpt terninger og sylindere for trykktesting.

Følgende blanding vil bli brukt:

Norcem Standard FA sement (inneholder 20% flygeaske)

Tilslag

- pukk 8-16 mm
- grus 0.01-8 mm (vedlegg C)

Tilsetningsstoffer

- Mapei Retard R (vedlegg D)
- Sika Retarder (vedlegg E)

2 Betong Teori

Teorien til Portlandsement omfatter hvordan den er satt sammen, de kjemiske reaksjonene, hastigheten til hydratisering, fasthetsutvikling og varmeutviklingen. Hvilken tilsetningsstoffer som finnes og hvilken funksjon dem har og andre stoffer som kan erstatte en del av sement.

2.1 Sementsammensetning

Portlandsement er en sement framstillet ved maling av portlandklinker, en liten mengde gips eller små mengder av ikke skadelig uorganiske materialer. Portlandklinker er et mellomprodukt, det i det vesentlige består av calciumsilikater, og som er fremstillet ved brenning og til delvis smeltning av et homogen blanding av stoffer som i hovedsak inneholder kalsium, silikon, aluminium og jern. [1]

Portlandsement har kjemisk sammensetning som vist i tabell 1. En vanlig sammensetning av klinkere til Portlandsement er gitt i tabell 2. I tillegg inngår kalsiumsulfat CaSO_4 (2–5 %) som males inn sammen med klinkeren i mølla. Alkaliinnhold angis i ekvivalent Na_2O . Ekvivalent mengde Na_2O beregnes i masseprosent som $\text{Na}_2\text{O} + 0,66 \text{K}_2\text{O}$. Ekvivalent Na_2O varierer mellom sementtypene,

avhengig av råmaterialenes alkaliinnhold og produksjonsprosess (våt eller tørr, eventuelt anlegg for lavalkalisement). Alkaliinnholdet kan komme opp mot 1,3 %. I Norge produseres det sement med bade lavt ($\leq 0,6\%$) og høyt alkaliinnhold. Den kjemiske sammensetningen blir bestemt ved kjemiske analyser. [2]

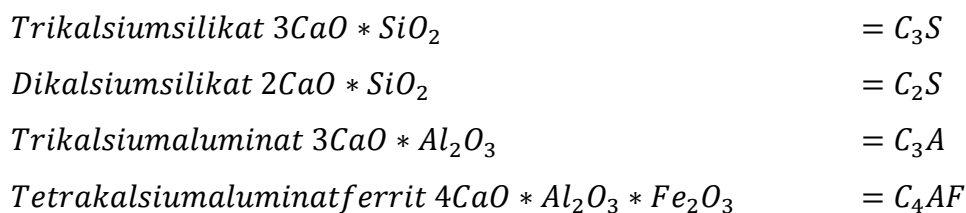
Tabell 1: Størrelsesorden for kjemisk sammensetning av portlandsement. [2]

Kjemisk forbindelse	Mengde
<i>C</i> (CaO – kalsiumdioksid)	62 – 67%
<i>S</i> (SiO_2 – silisiumdioksid)	20 – 25%
<i>A</i> (Al_2O_3 – aluminiumoksid)	3 – 7%
<i>F</i> (Fe_2O_3 – jernoksid)	2 – 5%

Tabell 2: Typiske mineralsammensetning i klinker til portlandsement. [2]

Klinkertype	Mengde
C_3S (alitt)	45 – 65%
C_2S (belitt)	15 – 30%
C_3A (trikalsiumaluminat)	1 – 8%
C_4AF (feritt)	8 – 15%

Portlandsement består av følgende klinkermineraler: [3]



2.2 Hydratiseringsprosessen

Hydratiseringsprosessen er en kjemisk prosess som utvikler varme og den skjer helt vann blir tilført sementen som er størkningsprosessen (sement lim er en plastisk) og igjennom herdningsprosessen (sementlimet er regnet som fast). Normalt sier man at man har oppnådd optimal herding etter 28 dager, men den kan fortsette i flere år framover.

«På grunn av at det i dag bare produseres FA sement i Norge og denne har en retarderende effekt vil dagen optimale herding ikke oppstå før etter ca. 56 døgn», ifølge Overingeniør B-A. Boyle ved UIT (2017 personlig meddelelse).

Sementens reaksjon med vann er en oppløsnings- og utfellingsprosess.

Sementmineralene oppløses i vann og utfelles som hydratiserte forbindelser. Siden sement inneholder flere mineraler som omsettes med vann samtidig regner man med disse interferer med hverandre og det sammensatte redaksjonssystem blir veldig komplisert. Derfor har man valgt å studere reaksjonene enkeltvis. [4]

2.2.1 Hydratiseringsreaksjoner klinkermineralene i portlandsement

Tabell 3: Trikalsiumsilikat (C_3S) hvor idealreaksjonen danner C-S-H-gel: [3][5]

$2(3CaO * SiO_2 + 6H_2O)$	→	$3CaO * 2SiO_2 * 3H_2O + 3Ca(OH)_2$
$2C_3S + 6H$	→	$C_3S_2H_2 + 3CH$
<i>trikalsiumsilikat + vann</i>	→	<i>C – S – H + kalsiumhydroksyd</i>

Ved full hydratisering binder C_3S altså ca. 24% vekt-% vann kjemisk, og det dannes ca. 75 vek-% C-H-S gel + ca. 49% vekt-% kalsiumhydroksyd, regnet i forhold til C_3S .

Tabell 4: Dikalsiumsilikat (C_2S) hvor idelreaksjonen danner C-S-H-gel: [3][5]

$2(2CaO * SiO_2) + 4H_2O$	→	$3CaO * 2SiO_2 * 3H_2O + Ca(OH)_2$
$2C_2S + 4H$	→	$C_3S_2H_3 + CH$
<i>dikalsiumsilikat + vann</i>	→	<i>C – S – H + kalsiumhydroksyd</i>

Ved hydratisering binder altså C_2S ca. 21 vekt-% vann kjemisk, og det dannes ca. 99 vekt-% C-H-S gel + ca. 22 vekt-% kalsiumhydroksyd, regnet i forhold til C_2S .

Tabell 5: C_3A danner ettringitt: [3]

$C_3A + 6H$	→	C_3AH_6
$3CaO * Al_2O_3 + 6H_2O + CaSO_4 * 2H_2O$	→	$C_3A * CaSO_4 * 12H_2O$
<i>Trikalsiumaluminat + vann + gips</i>	→	<i>Ettringitt</i>

Tabell 6: C_3A danner monosulfat: [3]

$C_3A + H_2O + C_3A * CaSO_4 * 31H_2O$	→	$C_3A * CaSO_4 * 12H_2O$
<i>Trikalsiumaluminat + Ettringitt + vann</i>	→	<i>Monosulfat</i>

C_3AF er på mange måter like med C_3A 's reaksjoner, men langsommere og det antas at den ikke har samme herdeproblemer som C_3A . [3]

Klinkeren har en veldig lav løselighet i vann og det er en eksoterm prosess når den kommer i kontakt med vann, som betyr at det produserer varme.

Hovedreakjonsproduktet er kalsium silikat hydrat som også blir kalt C-S-H. Det er dette som gir produktet høy mekanisk styrke og tetthet i herdet betong. [3]

2.2.1.1 Hydratiseringshastighet

Varmeutviklingen i portlandsement påvirker hydratiseringshastigheten. Hydratisering skjer først når det blir tilført vann til sementen. [3]

De viktigste faktorene er: [3]

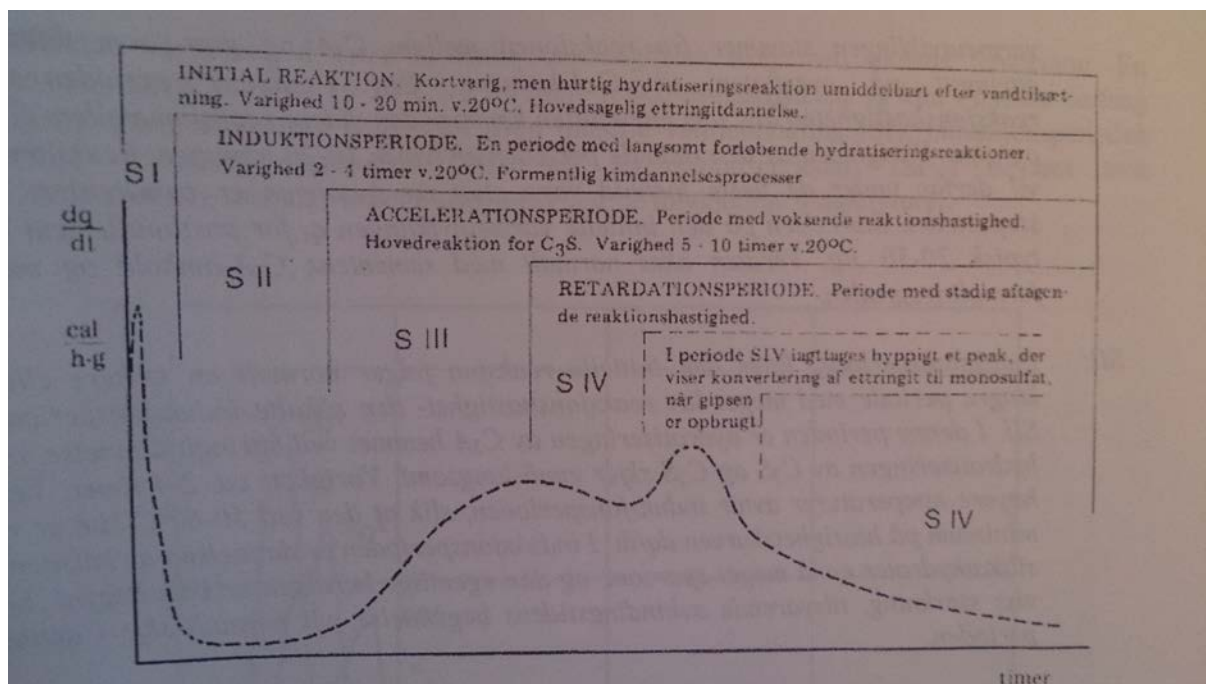
1. sementens kjemiske sammensetning
2. sementens finhet
3. temperaturen

Varmeutviklingsforløpet ved hydratisering av Portland sement kan i høy grad bli påvirket av tilleggsstoffer, som flygeaske (som blir forklart senere). [3]

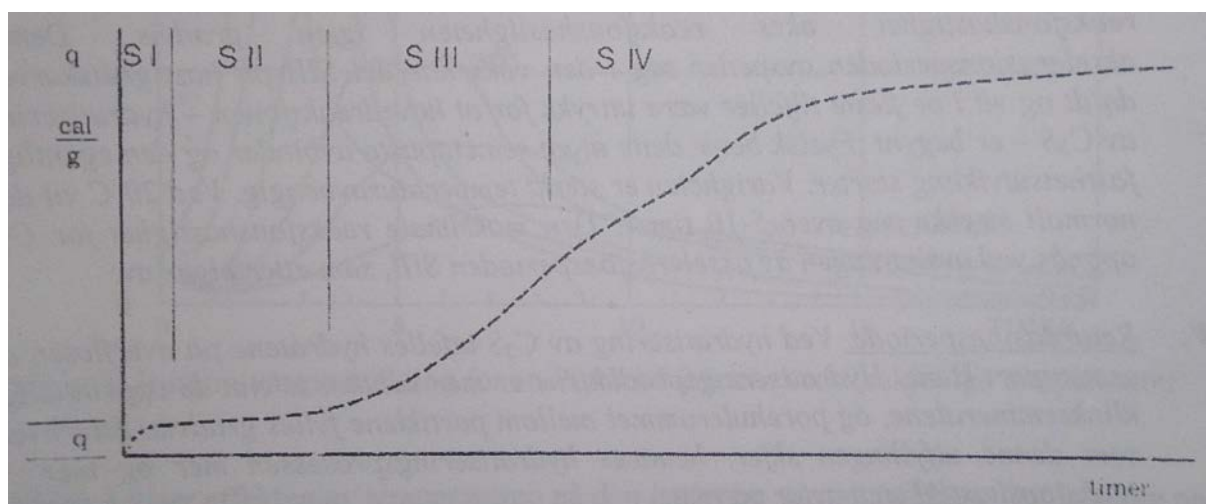
Sementsammensetningen har stor betydning for energiutviklingen i herdingsprosessen og størkningsprosessen. Som nevnt før består Portlandsement i hovedsak av 4 typer klinker. Sementens finhet er også med på å påvirke hydratiseringsprosessen. Finere sement gir en større reaktiv overflateareal som er tilstede når vann blir tilsatt, som gir økt reaksjonshastighet og energiutvikling. Det er enklere å kontrollere hydratiseringshastigheten ved å skape et mer kontrollert miljø, som å dekke til ny støpt betong slik at man begrenser vindens effekt og at vannet som dannes på overflaten ikke fordamper. [1, 3]

2.2.1.2 Karakteristisk energiutvikling i de forskjellige klinkerne

Man kan ved vurdering fordele sements energiutvikling opp i 4 forskjellige perioder, se figur 1 og 2. Denne oppdeling viser seg å avspeile visse karakteristiske trekk ved de enkelte klinkermineralers reaksjoner. [3]



Figur 1. Skjematisk gjengivelse av varmeutviklingshastighet dq/dt som en funksjon av tiden ved hydratisering av portlandsement ved konstant temperatur. [3]



Figur 2. Skjematisk gjengivelse av total varmeutvikling q som en funksjon av tiden ved hydratisering av Portlandsement ved konstant temperatur. [3]

Initiell reaksjon (SI): [3]

Når man tilsetter vann i betongen kan man registrere en hurtig energiutvikling som kommer fra at C_3A og gips, som danner ettringitt på overflaten til C_3A -kornene. Typisk varer den fra 10 til 20 minutter. Vanlig energiutvikling for Portland sement er 20-30 J/g, dette er avhengig av sementens innhold av C_3A og formalingsgraden.

Induskjonsperioden (SII): [3]

Etter den initielle reaksjoner kommer induskjonsperioden som er preget av en lav reaksjonshastighet. Den er nå ettringittdannelse rundt C_3A -kornene, slik at hydratiseringen av C_3A og C_2A skjer langsomt. Typisk varighet er 2-4 timer, jo høyere temperatur jo raskere skjer induskjonsperioden. Herdingen er ikke påbegynt og dannelsen av kalsiumsilikathydrater er liten. En viss form for styrking skjer i denne perioden.

Akselerasjonsperioden (SIII): [3]

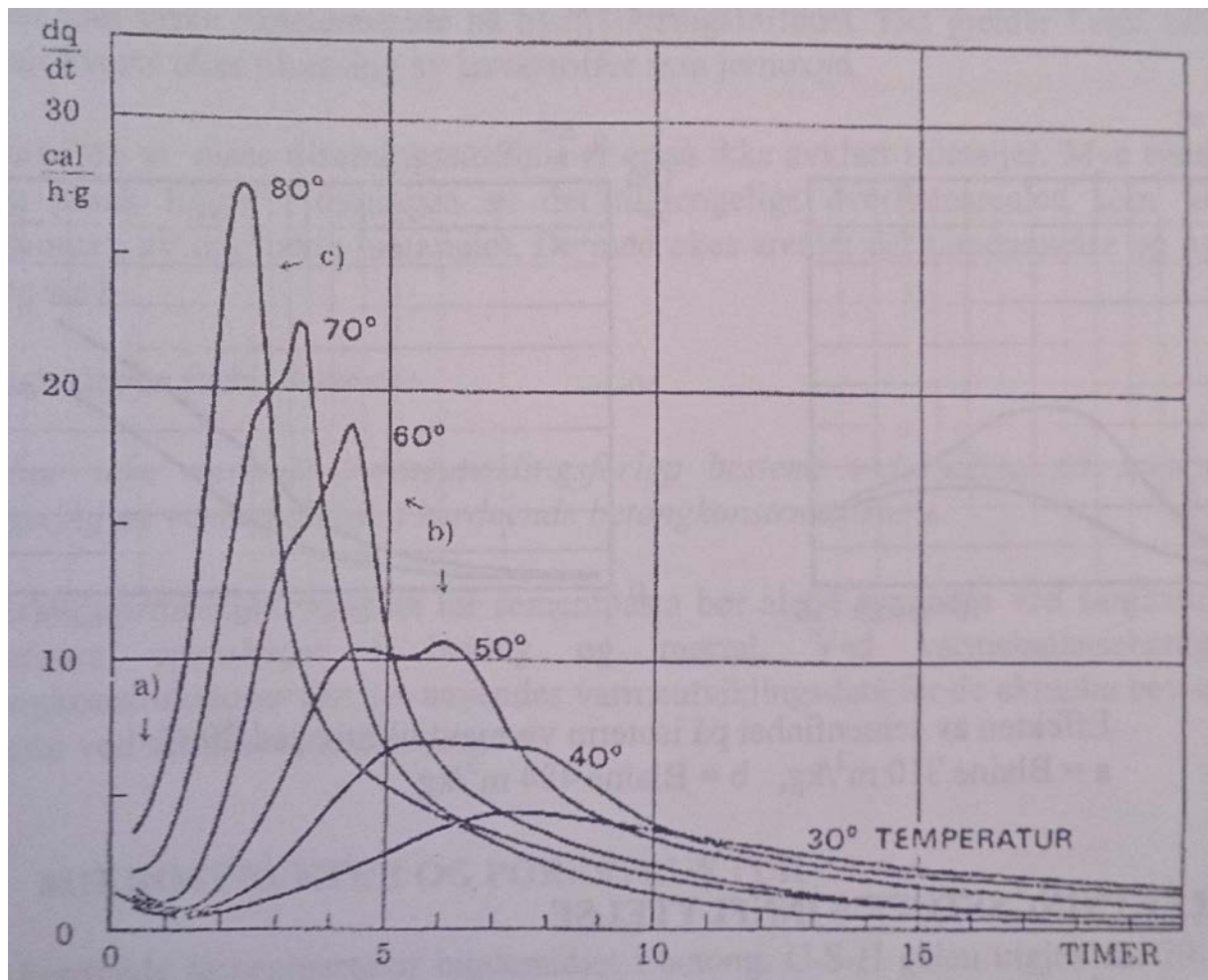
Nå økes reaksjonshastigheten gradvis igjen. I de fleste tilfeller er hovedreaksjon – hydratisering av C_3A begynt. Nå avbinder sementpastaen og den virkelige fasthetsutviklingen starter. Ved en temperatur på $20^{\circ}C$ varer den normalt 5-10 timer.

Retardasjonsperioden (SIV): [3]

Ved hydratisering av C_3A utfelles hydratene på overflaten av sementpartiklene. Hydratiseringsproduktene er mer voluminøse enn de opprinnelige klinkermineralene, og porehulerommet mellom partiklene fylles gradvis. Dette fører til at hydratiseringsprosessen avtar. Det vil være et såkalt C_3A -peak når all gips er brukt opp ved ettringittdannelse. Den vil nå bli ustabil og reagerer med uomsatt C_3A -korn og det blir dannelse av monosulfat. Hvis peaket skjer i starten sier man at det riktig gipsdosering.

2.2.1.3 Temperaturenns Innflytelse i hydratiseringsprosessen

Temperaturen har stor innvirkning på hydratiseringshastigheten. En temperaturstigning på 10-20°C vil fordoble reaksjonshastigheten (Van Hoff's regel) og kun i mindre omfang endre arten av reaksjoner som skjer. De 4 periodene nevnt før bevares som karakteristiske avsnitt i reaksjonsforløpet ved forskjellige temperaturer, se figur 3. Bli brukt senere i forbindelse med laboratorieprøvene. [1, 3]



Figur 3. Isoterm varmeutvikling for en Portland sement ved forskjellige temperaturer. [3]

Figur 3 viser effekten av temperaturen på den isoterme varmeutvikling. Den initielle reaksjon er ikke tegnet inn av på grunn av overskuelig peaket. En økt reaksjonshastighet

vil føre til en raskere egenskapsutvikling for betongen. Som betyr at betongen for en fastere form tidligere ved høyere temperatur. [3]

2.2.2 Hydratiseringsvarme

Klinkerne i Portland sement har alle forskjellige energiutvikling når dem kommer i kontakt med vann: [1]

$$C_3S: 500 \text{ J/g}$$

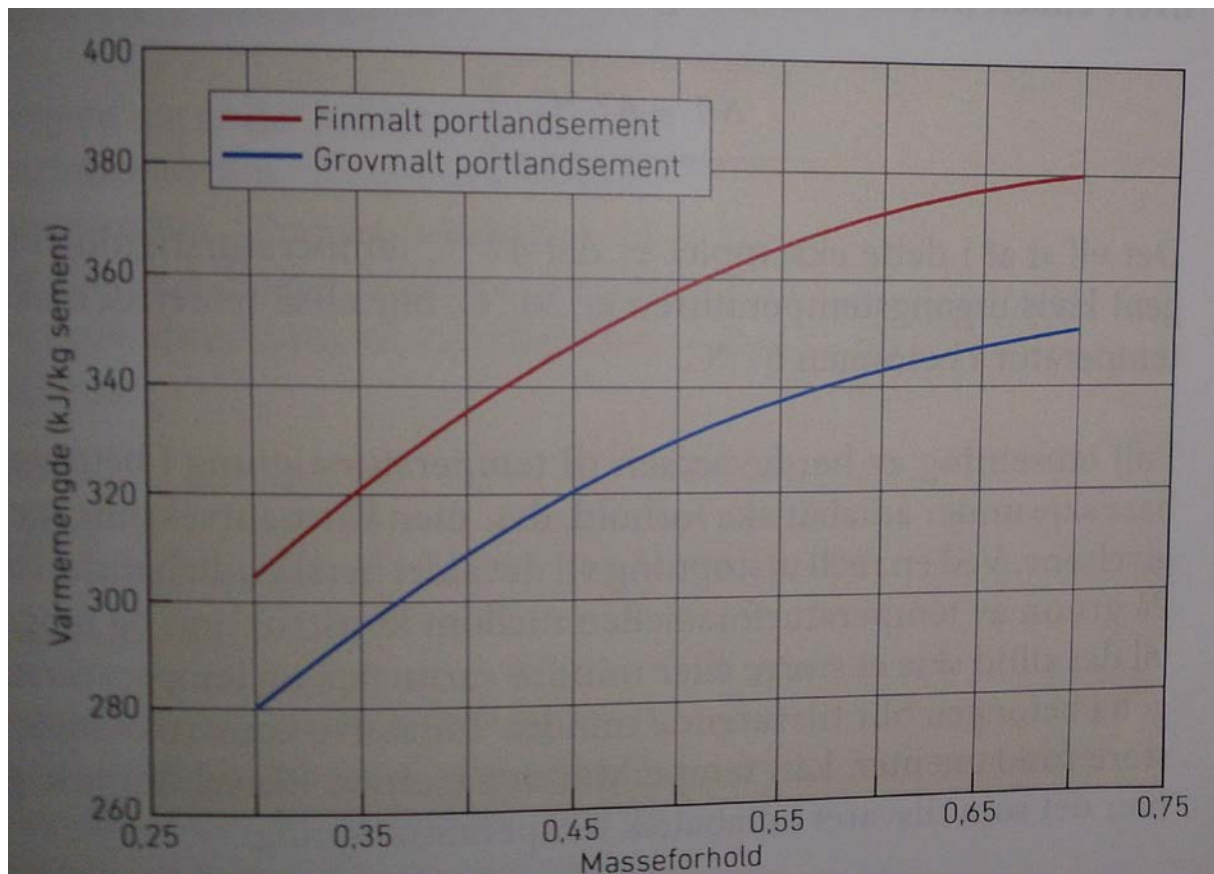
$$C_2S: 260 \text{ J/g}$$

$$C_3A: 870 \text{ J/g}$$

$$C_4AF: 420 \text{ J/g}$$

En fullstendig hydratisering av sement kan gi så mye som 500 J/g. Når man beregner varmeutvikling er den totale varmeutviklingen som er viktig. Som når man støper spesielt større konstruksjoner i varmt vær og kaldt vær. Allerede ved en herdetemperatur på $> 40^\circ\text{C}$ blir strukturdannelsen påvirket. I store konstruksjoner er krav til at herdetemperaturen ikke skal overstige 70°C . Dette for å forhindre forsinket ettringtdannelse. Og ved store temperaturforskjeller i betongen kan gi riss. [1, 6, 7]

Eksempel på en varmeutvikling i betong med masseforhold 0.45 med 350 kg/m^3 standard portlandsement ved 20°C i 200 timer, se figur 4. [6]



Figur 4. Betong med v/c-0.45 og 350 kg/m³ standard Portland sement, herdet i 200 timer ved 20 °C. [6]

Hvis vi forutsetter at hele denne varmemengde omsettes til en temperaturstigning $\Delta\theta$ i betongen, får vi: [6]

$$\Delta\theta = \frac{Q_{\infty} * C}{\rho_r * c_b} \quad (1)$$

Hvor:

$\Delta\theta$: er temperaturstigning, målt i °C

Q_{∞} : utviklet varmemengde per sementenhet, $\frac{kJ}{kg}$ sement

C : sementmengde, kg/m³

c_b : betongens spesifikke varmekapasitet, kJ/(kg * °C)

ρ_r : betongens densitet, kg/m³

Betongens spesifikke varmekapasitet avhenger hovedsakelig av vanninnhold. Ut i fra resepttallene og antar vannet i betongen har en spesifikke varmekapasitet på $4.2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ og alle andre delmaterialer har en varmekapasitet på $0.8 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$. For konstruksjonsbetong bruker vi en varmekapasitet på $1.05 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$. Når det gjelder lett betong og tung betong bør varmekapasitet beregnes for vært tilfelle. Norcem har gitt meg et Excel regneark som blir brukt senere til å regne ut den spesifikke varmekapasiteten (vedlegg A) som skal brukes med likning 1. [6]

2.2.3 Hydratseringsgrad

Hydratiseringsgraden til et gitt tidspunkt defineres som den foreløpige brøkdel av hydratiseringsprosessen. Definisjonen gjelder altså prinsipielt den omsatte brøkdel av opprinnelige sementmengde, men som tidligere nevnt kan den beskrives som en enkel reaksjon med vann. Prosessen uttrykkes ved at det ikke fordampes vann eller hydratiseringsvarmen. Da kan man uttrykke hydratiseringsgraden med følgende likning: [1]

$$\alpha = \frac{\text{masse av omsatt sement}}{\text{masse av opprinnelig sement}} = \frac{m_{W_n}}{m_{W_{n,slutt}}} = \frac{Q}{Q_{slutt}} < 1$$

Hydratiseringsgraden vokser med hydratiseringshastigheten og hydratiseringstiden. Faktorene som avgjør hydratiseringshastigheten vil også bestemme hydratiseringsgraden som oppnås etter en gitt tid og hvor lang tid man trenger for å oppnå en viss hydratiseringsgrad. Hydratseringsgrad er så stor at man i praksis foretrekker å skrive den om til betong teknologiske parametere med mindre teoretisk tilslutning. [1]

2.2.4 Pozzolan

Pozzolan blir kalt latent hydraulisk materialer og blir brukt for å erstatte en del av sementmengden i sementen. Dette for å kunne redusere varmeutviklingen. Fellesbegrep for pozzolan er materialene har evne til å reagere kjemisk med alkalier og

reaksjonsproduktet kalsiumhydroksid ($Ca(OH)_2$) etter reaksjon mellom vann og sement. Disse trenger ikke sement for å reagere, men det kreves en høy pH for den kjemiske prosessen skal skje. [6]

Flere av disse materialene forekommer som et naturlig biprodukt fra industrien. Som flygeaske, silikastøv og råjernslag. [3, 6]

Tabell 7: Pozzolanreaksjon. [3]

$2SiO_2 + 3Ca(OH)_2$	→	$3CaO * 2SiO_2 * 3H_2O$
$2S + 3CH$	→	$C_3S_2H_3$
<i>Silika + Kalsiumhydroksyd</i>	→	<i>C – S – H</i>

2.2.4.1 Silikastøv

Silikastøv er et restprodukt ved produksjon av silisium- og ferrosilisiummetall. Det kom fra rensing av spesielle filter for røykgass. Det kom miljøkrav i 1970-årene som gjorde at denne rensingen måtes gjøres og silikastøv ble lettere tilgjengelig da. Silikastøv har vært brukt i betong i Norge siden slutten av 1970-tallet. Det var gjort forsøk med bruk av silikastøv i 1940-årene men da var det lite tilgjengelig. [6]

Størrelsen på silikastøv er 1/100 av sementpartikkene (0.1-0.5 mikrometer) som tilsvarer en spesifikk overflate på ca. $20m^2/gram$ og har en densitet på ca. $2200 kg/m^3$. I naturlig form med løs romdensitet $200 - 300 kg/m^3$, dvs ukomprimert. men i denne formen tar den stor plass, så det er vanlig å komprimere den slike at den har en løs densitet på $400 - 600 kg/m^3$. Dette krever noe lengre blandetid og det kan føre til problemer hvis romdensiteten blir over $600 kg/m^3$. Den kan også bli levert i slurryform og 50/50 forhold med vann er normalt.

Kjemisk består støvet av 85-98% SiO_2 (silisiumdioksid) i glassaktig form, i motsetning til kvarts som har samme kjemiske sammensetning. I dag ligger størrelsesorden på 3-5% av sementmengden. [6]



Figur 5. Silikastøv [8]

Når silikastøvet blir brukt, oppstår det en kjemisk reaksjon mellom SiO_2 (silikastøvet) og $Ca(OH)_2$ (kalsiumhydroksidet). Reaksjonen kalles pozzolanreaksjon og reaksjonsproduktet blir kalsiumsilikathydrat, eller C-S-H.

Pozzolanreaksjonen skjer ikke før det er blitt dannet $Ca(OH)_2$, det tar noen døgn før fasthets- og tetthetsgevinsten ved bruk av silikastøv. Det er viktig at det er nok vann tilstede slik at pozzolanreaksjonen kan utvikle seg. Reaksjonen går langsom ved lave temperaturer og hurtigere ved høye temperaturer. Det må brukes plastiserende tilsetningsstoff i kombinasjon med silikastøv. [6]

2.2.4.2 Flygeaske

Flygeaske er et restprodukt fra rensing av røykgassene i kullfyrte varmekraftverk. Derfor er produksjon av flygeaske vesentlig større enn silikastøv. Det finnes 2 typer flygeaske, en silikatholdig og en kalsiumholdig. I Norge bruker vi kun den silikatholdige flygeasken. [6]

Partiklene i flygeaske er omtrent like store som sementkornene og er stort sett kuleformet. Densiteten er ca. 2200 kg/m^3 , men siden kornene ofte er åpne innvendig økes densitet litt når dem knuses ned i sementmølla. 40 – 70% av innholdet er SiO_2 , avhengig av kulltype og fyring. Silisiumoksidet er amorft (glassaktig) og har derfor pozzolane egenskaper. Flygeaske inneholder også en god del Al_2O_3 (aluminiumsoksid), Fe_2O_3 (jernoksid) og CaO (kalsiumoksid). Flygeaske inneholder vanligvis litt karbon. Karbonet kan absorbere noe av tilsetningsstoffer, slik at effekt blir redusert. [6]



Figur 6. Flygeaske. [8]

I prinsippet har flygeaske samme kjemiske effekt som silikastøv, dette på grunn av amorfe silisiumoksidet. Den kan ha større variasjon i egenskaper enn silikastøv og den har mindre kjemisk aktivitet i forhold til silikastøv. Dette er på grunn av partiklene er grovere og flygeaske har lavere innhold av SiO_2 . De positive effektene av flygeaske utvider seg derfor langsommere, og det kan ta måneder før egenskapene oppnås fullt ut. Den kjemiske prosessen til flygeaske er lavere enn vanlig sement, i en typisk CEM I-sement utvikler den 320-360 kJ/kg, masseforhold og finhetsgrad er avgjørende. Med 20% flygeaske i sementen, reduserer energiutviklingen med ca. 15% og derfor kalles sement med større innhold av flygeaske for lavvarmebetong. I Norge inneholder nesten all sement flygeaske. Blant annet har Norcem AS dokumentert at at k-verdien for flygeaske kan økes fra 0.7 til 1.0 i bestandighetsklassen M45/MF45 og M40/MF40. Som gir et grønnere utslipp i og med at det betongen da gir lavere klimagassutslipp og ikke minst lavere varmeutvikling. Det skal nevnes at flygeaske har litt retarderende effekt på betongen, som blitt utdypet senere. [6, 10]

2.2.4.3 Slagg

Slagg er et restprodukt fra produksjon av råjern. Det er normalt at partiklene er såpass store at de må knuses og males ned til samme størrelse som sementkorn før de kan blandes inn i sementen. Slagg er egentlig ikke et pozzolant material, men det har samme

egenskap som pozzolan. Slagg er ikke avhengig av sement for å reagere kjemisk, er pH-verdien høy nok så vil den få en kjemisk reaksjon. [6]

Så tidlig som 1920-tallet ble slagg brukt i sement og det med et slagg-innhold på 70%. Slaggsement har meget gode egenskaper når det kommer maritime miljøer og årsaken er at slaggsement inneholder aluminater, som binder kloridene. Slagg inneholder i størrelsesorden 30-50% CaO , 30-40% SiO_2 , 10-25% Al_2O_3 i tillegg til en del andre oksider. Dette er avhengig av sammensetning av malmen og av produksjonsprosessen. For å få slagg til å være kjemisk aktiv må det kjøles raskt ned slik at det ikke krystalliseres og da blir strukturen glassaktig eller amorf. Densiteten er ca. 2900 kg/m^3 . [6]



Figur 7. Slagg. [11]

Slagg aktiveres av sulfater, alkalier og $Ca(OH)_2$. Reaksjonsproduktene er av samme type som utvikles i reaksjonene mellom portlandsement og vann. Det er forskjell mellom de ulike oksidene og slagget reagerer langsommere enn portlandsement. Mengde $Ca(OH)_2$ avtar med økende mengde slagg i sementen. [6]

2.3 Varmeutvikling i betong

Varmeutvikling i betongen kommer fra hydratisering som skjer når sementen kommer i kontakt med vann. Normalt vil denne varmeutviklingen forekomme i løpet av de første døgnene etter støpning. Minste temperatur betongen kan ha er $5 \text{ }^\circ\text{C}$, noe lavere enn

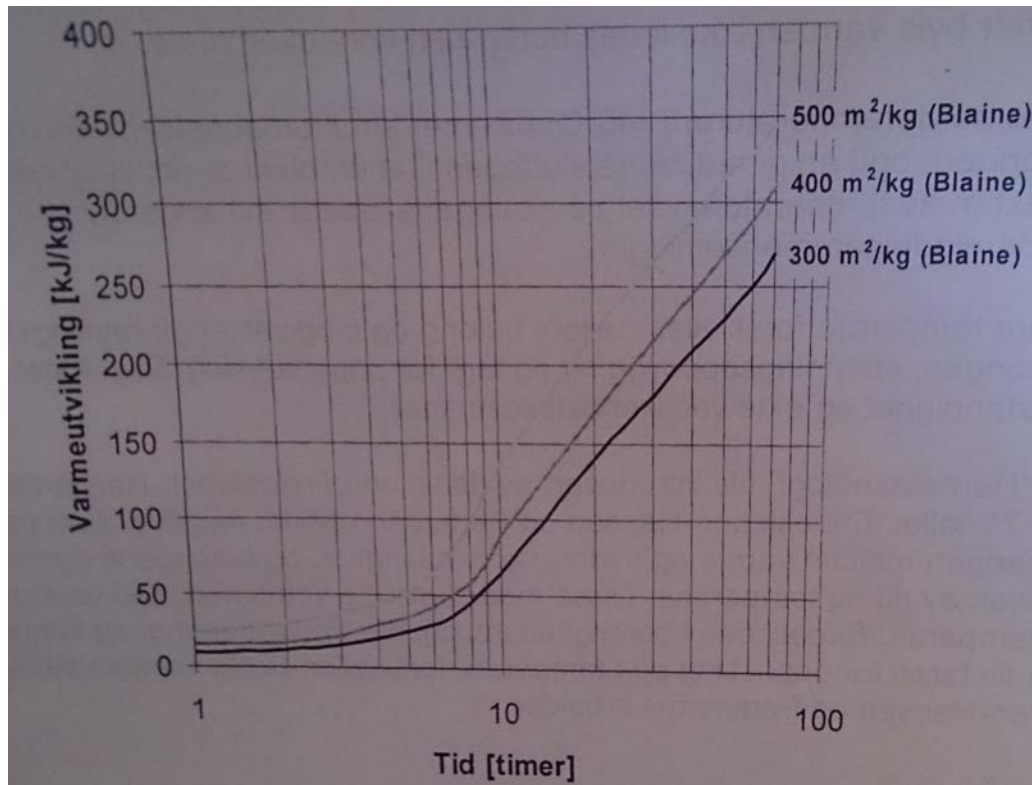
dette kan før til store konsekvenser, som lav trykkfasthet, frost skader, riss og oppsmuldring. Dette kan gi produksjonstekniske fordeler men også ulemper med hensyn på fasthetsutvikling, ved frost kommer konsekvenser som lav trykkfasthet, frost skader, riss og oppsmuldring. [6]

Utfordring er at det oppstår temperaturforskjeller i betongen og mellom omgivelsene som kan føre til ulemper. Økning temperatur i betongen gir raskere hydratasjon, som kan i større konstruksjoner føre til at temperaturdiffereansen gjennom betongen blir for stor, blir forklart senere i ytre- og indrespennning. I utgangspunktet er temperatur økingen i betongen uniform, men omgivelse temperatur kan både være en fordel og en ulempe. Er varmetapet for stort til omgivelsen slik at for eksempel betong får frost skader før den har oppnådd tilstrekkelig styrke, minimum 5 MPa trykkfasthet. Og andre enden kan for høy varmeutvikling føre til skader, riss og redusert egenskap i betongen. [6]

Temperaturer over $> 40^{\circ}\text{C}$ påvirker struktur dannelsen i den herdede betongen og kan føre til redusert sluttegenskaper, som redusert styrke. Mindre konstruksjoner oppnår normalt rundt $40 - 50^{\circ}\text{C}$ (avhengig av dimensjon) ved en referanse temperatur for omgivelsene på 20°C og det bør aldri da være større temperaturforskjell mellom indre og ytre fastholdning på 20°C , indre og ytre fastholdning blir forklart senere. Som nevnt tidligere skal betongen aldri overstige 70°C i herdingsprosessen. Typisk problem ved store dimensjoner hvor det ofte må ente brukes en lavvarme sement eller det må gjøres tiltak for å holde temperaturen under 70°C . Ved temperaturer over 70°C blir struktur dannelsen så mye påvirket at at sluttegenskapen til betongen at den blir for stor, eksempel lav trykkfasthet. Effekten av temperaturnivået på sluttegenskapene avhenger av bindemiddelsammensetningen. Den kan bli fare for oppsprekking når temperaturforskjellen mellom betong og omgivelse er for stor, som kan føre tøyingsforskjeller i betongen og spenningsoppbygging som i verste fall føre til oppsprekking i betongen. [6]

En typisk vanlig sammensatt Portland sement utvikler $400-500\text{ kJ/kg}$ ved full hydratasjon. Som nevnt tidligere har de vanlige klinkermineraler i sementen forskjellig varmeutvikling. Og temperatur spiller en stor rolle når det kommer til hydratiseringshastigheten som igjen spiller en stor rolle i varmeutviklingen i betongen.

Klinkersammensetningen, sementens finmalingsgrad, se figur 8 og v/c-forhold bestemmer hydratasjonsgraden, som fører til varmetviklingen og i praktisk vil aldri sementen aldri omsettes fullt ut. Man skal heller ikke glemme at fuktforhold og temperatur også spiller en rolle. [1, 6]

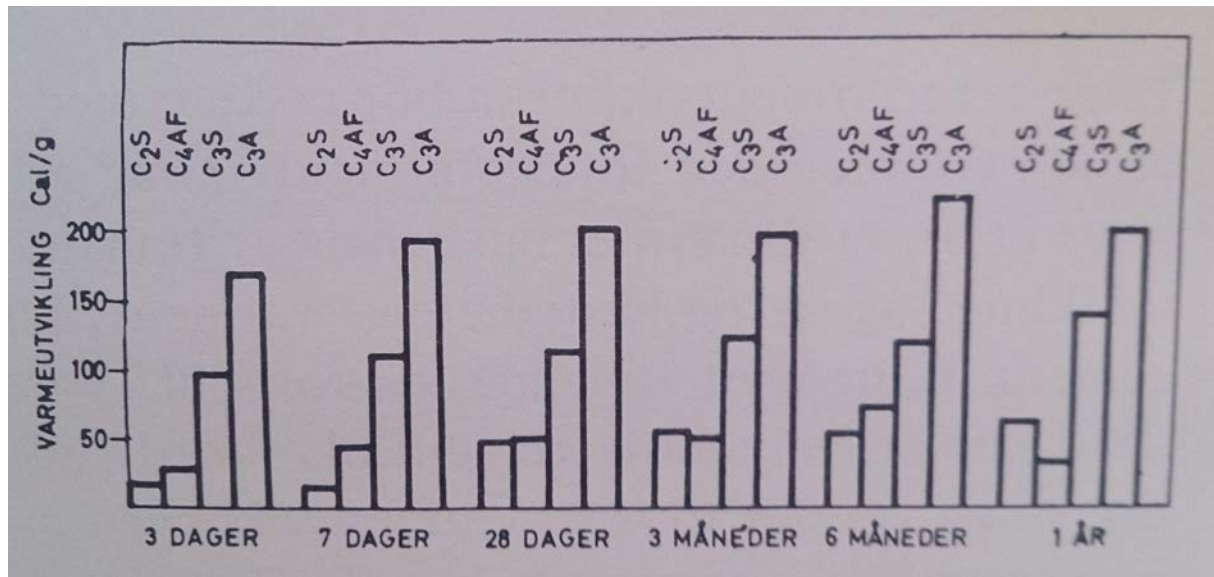


Figur 8. Varmeutvikling for sement med forskjellig finhet. Figuren gjelder sementpasta ved v/c-forhold 0,40, herved ved 20°C. [6]

Med lavere V/C-tall avtar porestørrelsene i betongen, som gjør at en større del av porevannet bindes absorptivt i gelporene og der blir det mindre for hydratasjon av sementen. Ved V/C-tall lavere enn 0.4 vil det totale vanninnholdet være for liten for at sementen skal fullstendig hydratiserte. Derfor kan man si at lavere V/C-forhold gir enn lavere temperaturutvikling, v/c-forholdet er lavere enn 0.4. [6]

Det er kun under adiabatisk forhold at man for full omsetning av herdevarme. I praksis vil det skje større eller mindre varmetap med omgivelsene. [6]

De kjemiske reaksjoner som finner sted under sementens størking og herding er eksoterme. Med en gang man tilsetter vann i sementen stiger temperaturen med 1 – 3°C, avhengig av V/C og sements karakter. Så vil den følge de 4 periodene som er nevnt under kapitelett under Karakteristisk energiutvikling. [4]



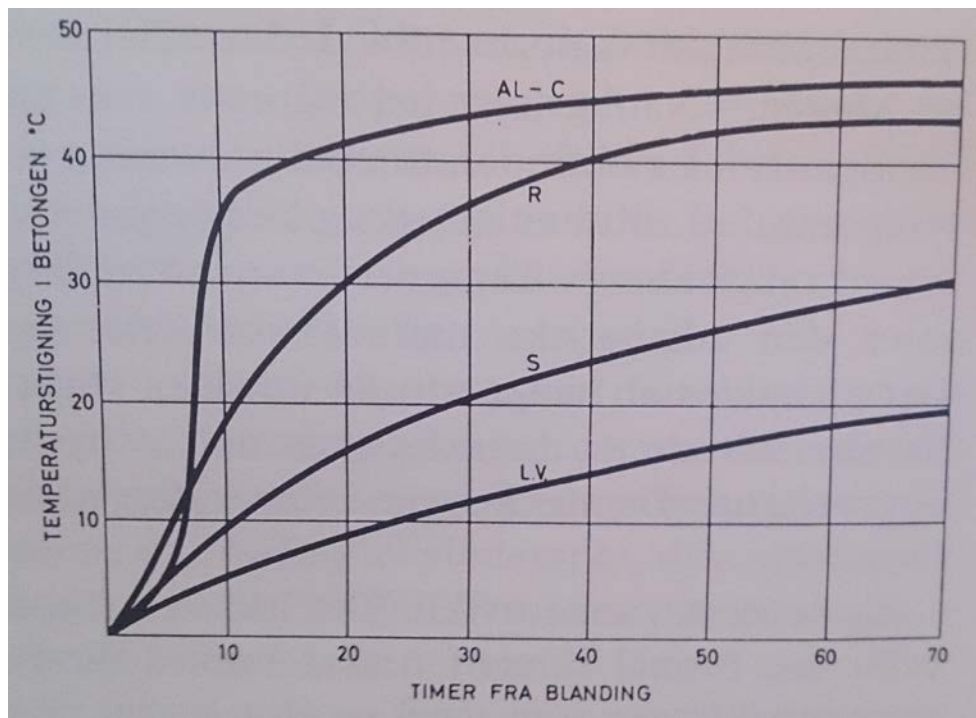
Figur 9. De enkelte sementmineralers bidrag til varmeutvikling (Woods, Steinour og Starke). [4]

Disse dataene som kommer fra i figur 9 kan anses som tilnærmet riktig, avvik forkommer av flere faktorer som V/C-forhold, temperatur og den form mineralene foreligger i. Som man ser er det ikke store endringer fra dag 3 til et helt år. Normalt oppnår betong av Portlandsement 60% slutfasthet i løpet av de første 72 timene, vil dette være forsinket ved bruk av flygeaske (FA) i sementen. [4, 12]

Tabell 8: De enkelte sementmineralers og oksyderts bidrag til sementens varmeutvikling. Cal. pr % innhold av mineral, resp. oksyd. [4]

Mineraler	3 dager	28 dager	1 år
C_3A	1.70 ± 0.02	2.02 ± 0.20	2.00 ± 0.12
C_3S	0.983 ± 0.054	1.142 ± 0.054	1.362 ± 0.033
C_4AF	0.29 ± 0.18	0.48 ± 0.18	0.30 ± 0.11
C_2S	0.195 ± 0.046	0.436 ± 0.045	0.621 ± 0.028
Oksyder	3 dager	28 dager	1 år
CaO	+3.40	+3.31	+3.64
SiO_2	-5.79	-4.93	-5.01
Fe_2O_3	-3.2	-3.1	-3.8
Al_2O_3	-1.1	-0.1	-0.7

Varmeutvikling etter 28 dager pr. vektenhet sement øker med 15-20% når V/C-forholdet stiger fra 0.4 til 0.8. Den totale varmeutvikling etter et år er tilnærmet uavhengig av finheten. [4]

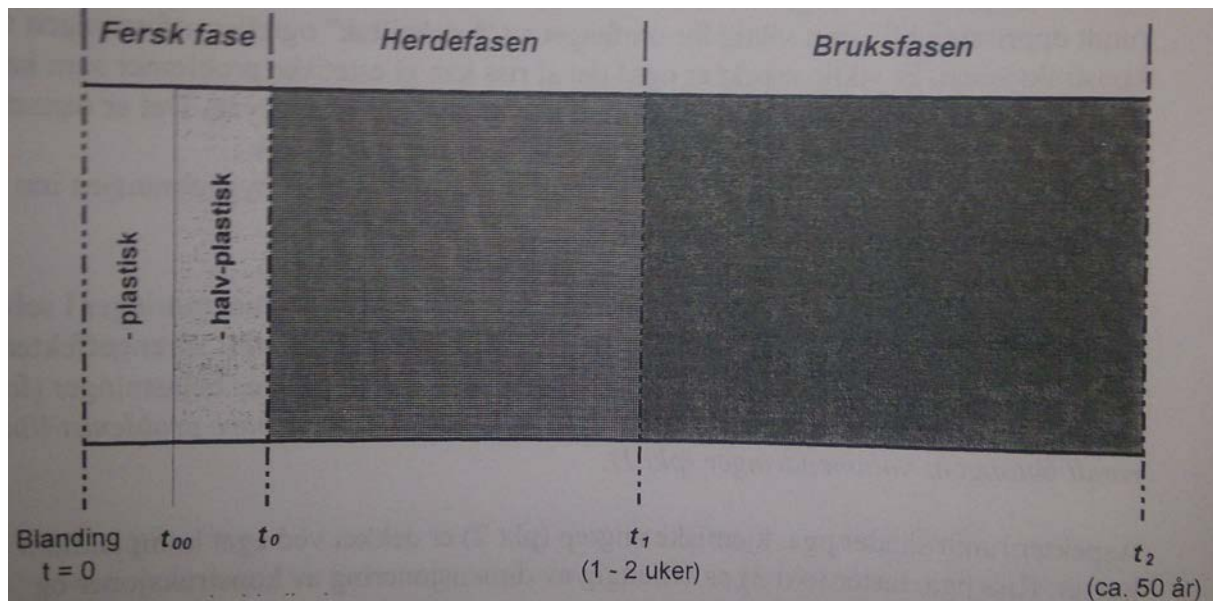


Figur 10. Varmeutvikling for forskjellige sementer. Al-c = Al-sement, R = Rapisement, S = Standardsement, Lv = Lav-varme sement. [4]

Figur 10 viser adiabatisk temperaturstigning i de forskjellige type sementer som er nevnt.

Betongens egenskap utvikling eller livsløp kan deles inn i 3 faser: ferske fasen, herdefasen og bruksfasen, se figur 10. I motsetning til hydratisering som vi dele inn i 4 perioder. Formelapparatet tar ikke hen syn til at det som det er normalt at betong herdet ved 50 °C har lavere fasthet enn betong herdet på 20 °C. [3]

Egenskapsutviklingen bør kartlegges slik at temperaturen er i området til den reale prosessen for at beregninger av herdeforløp skal gi gode resultater. [3]



Figur 11. Betongens ulike faser. [3]

Fersk fase (fra 0 til 6-12 timer):

Periode $t = 0$ til t_{00} opptrer betongen som flytende material. I den perioden er betongen plastisk og støpbar kalles åpen tid. Denne tiden varierer fra betong til betong. Typisk vil man at den skal være fra 1 til 4 timer. I denne perioden har den evne til å fylle støpeform/forskalling. Betongen vil gradvis miste sin flytbarhet fordi sementpartikkene gradvis vokser sammen. [3]

Mekanismer som kan bidra til opprissing i den ferske fasen er: [3]

- plastisk svinn
- Plastisk setning

Periode t_{00} til t_0 : betongen nå tøyer lite tøyning og har svært lav tøyingskapasitet i denne halv-plastiske fasen. Dette skyldes at betongen har såkalt tiksotropisk oppførsel og/eller at de tidlige hydrasjonsproduktene som forbinder sementpartikkene er svært svake. I denne fasen vil betongen ha et avtagende trykk på forskalingen og nærmer seg selvbærende mot slutten av fasen. [3]

Mekanismer som kan forårsake opprissing i herdefasen er: [3]

- termisk ekspansjon/kontraksjon (herdetemperatur)
- autogent svinn
- uttørkingsvinn

Herdefasen:

Periode t_0 til t_1 kan også kalles termofasen. I denne perioden skjer er både varme- og styrkningsoppbygning. Det er helt normalt at massive betongkonstruksjoner (tykkere enn $> 50\text{ cm}$) varmes opp til $30 - 40^\circ\text{C}$. Normalt oppnås maksimal temperatur etter 1 – 2 dager. Hydratisering prosessen vil da avta og omgivelse temperaturene vil i tillegg kjøle ned betongkonstruksjonen. Helt vanlig at det tar 1-2 uker før betongen har samme temperatur som omgivelse temperaturen. I konstruksjoner, som damkonstruksjoner og brukonstruksjoner kan det ta flere måneder før betongen er avkjølt til omgivelse temperaturen. [3]

Bruksfasen:

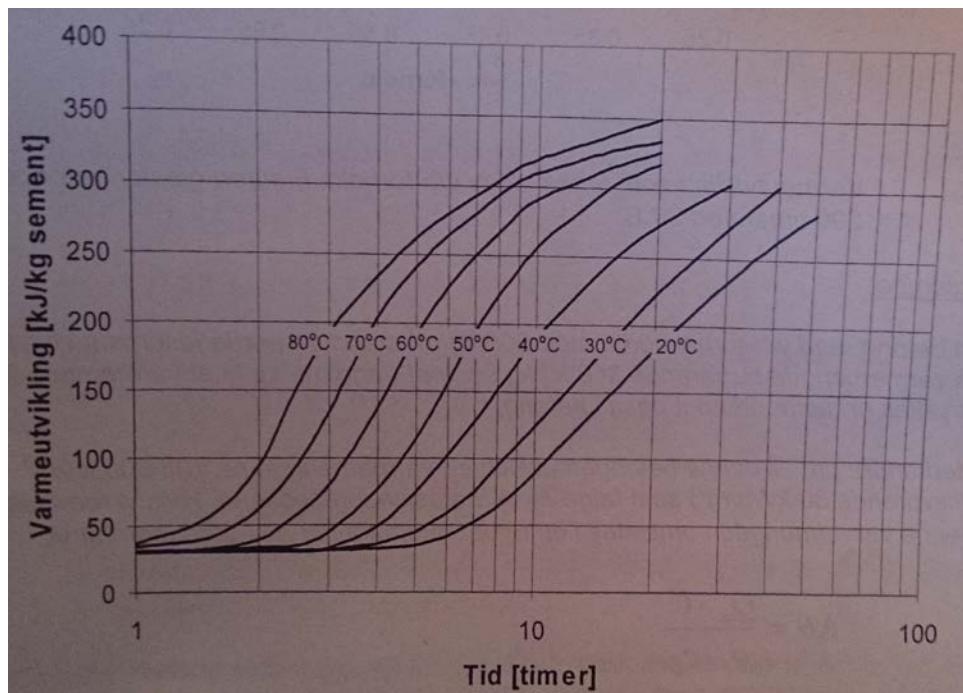
Periode t_1 til t_2 . I denne vil det var en moderat styrkeoppbygging, spesielt hvis det er fukt tilgjengelig og nå er betongen er avkjølt. [3]

Mekanismer som kan forårsake opprissing i bruksfasen er:

- uttørkingsvinn (fordampet vann)
- termisk ekspansjon/kontraksjon (dag/natt-variasjoner)

2.3.1 Hastighetsfunksjonen

Hydratasjonshastigheten varier sterkt med temperaturnivået i betongen, se figur 12.



Figur 12. Varmeutvikling som funksjon av temperatur. Sementlim basert på ren Portland sement, V/C-forhold 0.4. [6]

Arrhenius' ligning brukes for å beskrive sammenheng mellom temperatur og den kjemiske aktiviteten for en termisk aktivert prosess. Utgangspunktet for hastighetsfunksjonen $H(\theta)$ er basert på Arrhenius ligning for å beskrive hydratasjonshastigheten for sement. Ved at funksjonsverdien $H(20)$ er lik 1 og dette er en dimensjonsløs verdi, det vil si en referanse temperatur på 20 °C i betongen. [6]

$$H(\theta) = e^{\frac{E(\theta)}{R} * (\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + \theta})} \quad (2)$$

Hvor:

$E(\theta)$: aktiveringsenergi, kJ/mol

θ : temperatur, °C

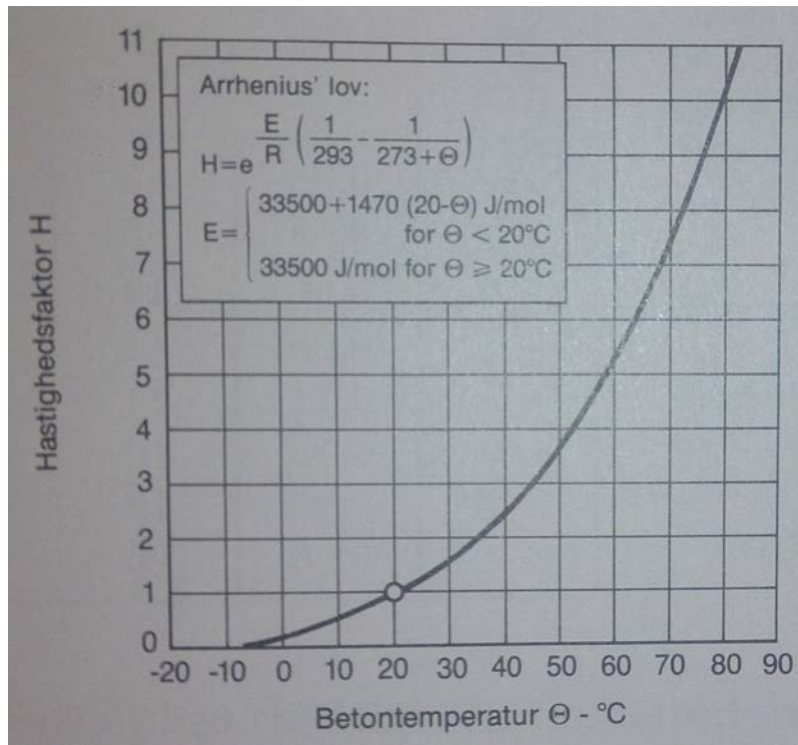
R : gasskonstanten, $8,314 \frac{J}{mol} * ^\circ C$

I Freiesleben-Hansen og Pedersens modell er aktiveringsenergien $E(\theta)$, eller «temperaturfølsomheten», som også blir kaldt Freieslebens temperaturfunksjon er gitt ved: [6]

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

$$E = A \quad \theta > 20^\circ\text{C}$$

Konstantene A og B er avhengig av sementtype, eventuelt pozzolaninnhold og til en viss grad V/C-forholdet. [1, 3, 6]



Figur 13. Hastighetsfaktor H er avhengig av betongens temperatur. [1]

Figur 13 viser relativ hydratiseringshastighet med 20 °C som referansetemperatur og aktiveringsenergien E.

Tabell 9: Hastighetsfakter etter Freieslebens temperaturfunksjon. [1]

θ (°C)	$H(\theta)$	θ (°C)	$H(\theta)$
-10	0.03	30	1.57
-6	0.06	35	1.95
0	0.15	40	2.41
6	0.33	50	3.59
10	0.50	60	5.22
20	1.00	70	7.42
25	1.26	80	10.35

Fra ca. 5 °C til 25 °C stemmer hastighetsfaktoren med Van't Hoff's regel som sier prosessen fordobles ved en temperaturstigning på 10 °C. [1]

2.3.2 Modenhetsbegrepet

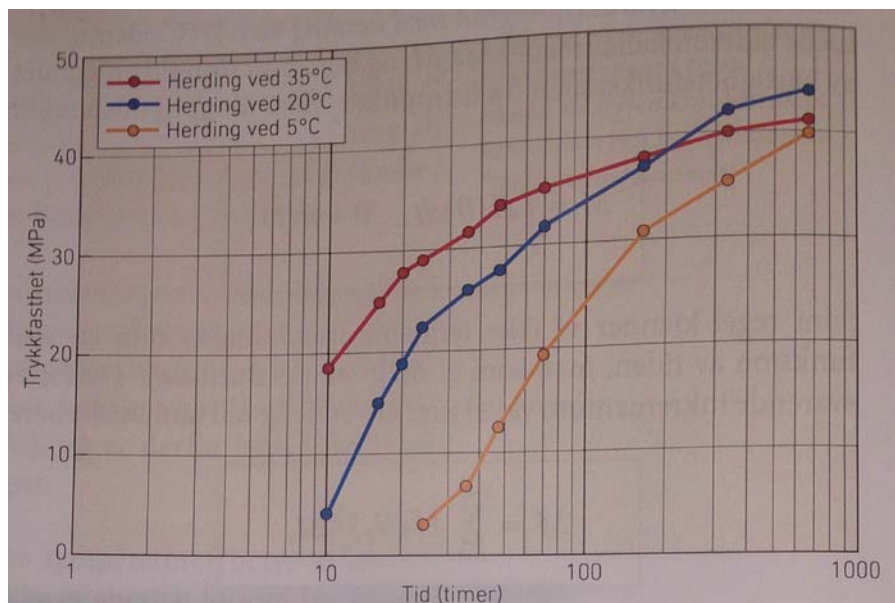
Siden sement hydratisering er avhengig av både tid og temperatur kan den bli evaluert med hensyn på modenhet, se figur 14 og 15. Som er skrevet som en funksjon av tid og temperatur i herdingen. Ved hjelp av hastighetsfunksjonen $H(\theta)$ er det mulig å sammenlikne herdeforløp med forskjellige temperaturhistorier. Dette gjøres ved å beregne betongens ekvivalente alder ved 20 °C, det vil si den herdetiden den aktuelle betongen måtte ha hatt hvis den skulle oppnådd samme hydratasjonsgrad ved herding i 20 °C. All herding i laboratorieforsøk angående terninger og sylindere blir herdet i et 20 °C vannbad. Derfor fungerer 20 °C som en referanse enhet. Denne virtuelle alderen kalles modenhet, M , og beregnes som tidsintegralet av hastighetsfunksjonen fra tidspunkt t_0 (blanding) til tidspunkt: [3][5]

$$\int_{t_0}^t H(\theta) dt, \quad \theta = \theta(t)$$

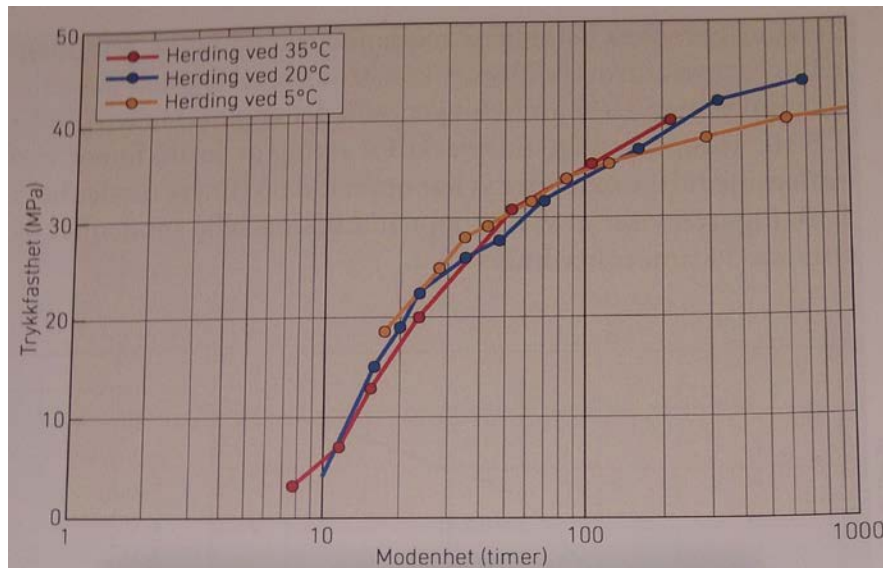
Vi har et målt temperaturforløp siden vi ikke kjenner til temperaturutviklingen som en matematisk funksjon av tiden. Slik at det inkrement uttrykket blir mer anvendelig ved numeriske beregninger. [3]

$$M = \sum_{i=1}^{i=n} H(\theta)_i * \Delta t_i$$

De numeriske beregningene av M utføres ved at et målt temperaturforløp deles opp i n tidsintervall av lengde Δt_i . Det bestemmes middeltemperatur θ_i for hvert intervall. Så beregnes den tilsvarende verdien av hastighetsfunksjonen, $H(\theta_i)$. Tilveksten i betongens modenhet ΔM_i i tidsintervallet Δt_i bestemmes som produktet $H(\theta_i) * \Delta t_i$. Oppnådd modenhet bestemmes ved å summere de beregnede modenhetstilvekstene for hvert tidsintervall. [6]



Figur 24. Fasthetsutvikling som funksjon av tid ved ulike temperaturnivå for en B30 M60 betong med 20% flygeaske. [6]



Figur 15. Fasthetsutvikling som funksjon av modenhhet ved forskjellige temperaturnivåer, samme betong som figur 14. [6]

2.3.3 Fasthetsutvikling

Som vist i figur 16 er fasthetsutviklingen i herdende betong tilnærmet entydig avhengig av modenheten. Med rimelig god nøyaktighet kan man bruke følgende empiriske funksjonsuttrykk for å beskrive sammenhengen. [3]

$$f_c(M) = f_{c\infty} * e^{-(\frac{\tau_e}{M})^\alpha}$$

Hvor:

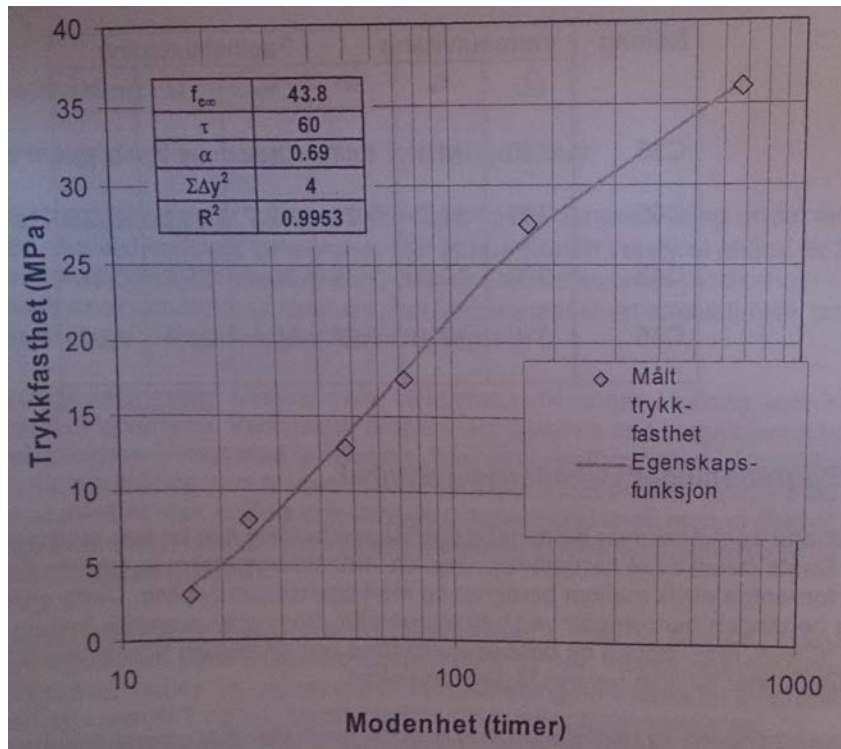
$M = \text{modenhhet (h)}$

$f_{c\infty} = \text{sluttfasthet (MPa)}$

$\tau_e = \text{retardasjonsparameter (h)}$

$\alpha = \text{krumningsparameter}$

Konstantene i funksjonen ($f_{c\infty}$, τ_e og α) kan bestemmes ved en kurvetilpasning av måledata slik det er vist i figur x. Hver enkelt betongresept vil få sitt eget parametersett. Se tabell 8 for konstantene. [3]



Figur 16. Eksempel på bestemmelse av konstantene i egenskapsfunksjonene ved hjelp av kurvetilpasning (minste kvadratsums metode). [3]

2.3.4 Varmeutvikling

Varmelikning gjennom et element kan enkelt beskrives med Fourier's lov: [13]

$$\dot{Q}_{\text{konduksjon}} = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\dot{Q}_{\text{konveksjon}} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

$$\dot{Q}_{\text{stråling}} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{omgivelser}}^4)$$

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{konduksjon}} + \dot{Q}_{\text{konveksjon}} + \dot{Q}_{\text{stråling}}$$

Hvor:

k : termisk ledningsevne [W/mK]

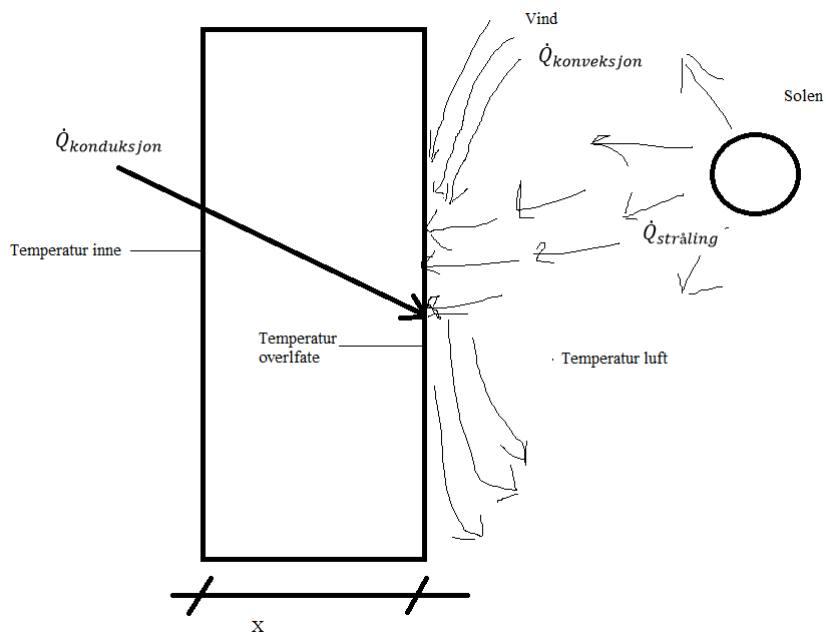
A : Overflate [m^2]

T : Temperatur [K]

h : konveksjons koeffisient [W/m^2K]

ε : emissivitetstall

σ : $5.670 \times 10^{-8} W/m^2K^4$



Figur 17. Forenklet skisse av varmeutvikling i 1-dimensjon.

Funksjonsuttrykket til fasthetsutvikling kan også beskrive varmeutviklingen: [3]

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

Hvor:

Q_{∞} : totalvarmeutvikling (kJ/kg sement)

τ_e : retardasjonsparameter (h)

α : krumningsparameter

Konstantene vil være forskjellige i forhold til fasthetsutvikling, se tabell 10. [3]

Tabell 10. Typiske verdier for konstantene i egenskapsfunksjonene. [3]

Betong	Varmeutvikling			Fasthetsutvikling		
	Q_{∞}	τ_e	α	$f_{c^{\infty}}$	τ_e	α
C25	345	13.1	1.17	29.2	35.7	0.59
C35	325	14.2	1.22	42.7	31.3	0.63
C45	320	12.8	1.25	50.4	25.5	0.65
C55	315	12.4	1.27	60.5	22.0	0.66

2.3.5 Begrensninger i formlene

I de første 100 timene i herdeforløpet kan disse funksjonene (modenhetsbegrepet, varmeutvikling og fasthetsutvikling) beskrive egenskapene til utviklingen i betong med god nøyaktighet. Avvik vil forekomme etter perioden, spesielt hvis herdningen har foregått med høy temperatur. Når man skal for eksempel beregne herdeprosessen i en konstruksjon hvor temperaturen varierer fra 30 – 70 °C, bør man kartlegge fasthetsutviklingen som funksjon av modenhet ved hjelp av prøvestykker lagret ved 40 °C, eventuelt 50 °C. Generelt gjelder det at nøyaktigheten av funksjonene avtar når forskjellen mellom aktuell herdetemperatur og temperatur i referanseforsøket øker.

Man bruker tilnærmet adiabatisk forhold for å måle varmeutvikling for en gitt betongsammensetning. Siden vi har lite kontroll over varmeutviklingen i betongen ved støpning av store konstruksjoner er det blitt mer vanlig å støpe inn temperaturføler inn stor konstruksjoner for å følge med temperaturutviklingen under herding, slik at man kan sette i gang tiltak før å unngå for høy differanse mellom kjernen og overflaten (overflaten er ytre del av betong konstruksjonen, ikke selve overflaten til konstruksjonen) eller at temperaturen i kjernen overstiger 65°C, slik at man kan gjøre tiltak hvis temperaturdifferansen er på tur til å bli for stor. [3, 14, 15]

2.4 Varmetap fra konstruksjoner

I støpning av betongkonstruksjoner vil det alltid være temperaturdifferanse, i selve betong konstruksjonen og med forskaling og omgivelsene. Varmetransport skjer igjennom 3 forskjellige transportmekanismer: [14]

- Varmeledning (konduksjon)
- Konveksjon
- Stråling

2.4.1 Varmeledning

Varmeledningsmotstanden er konstant størrelse for en gitt konstruksjon. Type konstruksjonsmateriale, tykkelse på de enkelte material lagene er med på å bestemme motstanden. [14]

Varmeledningsmotstanden:

$$m = d/k$$

$$d = \text{lagtykkelsen [m]}$$

$$k = \text{varmeledningssevnen for materialet [kJ/mh°C]}$$

Varmeledningsevne for materialet er i stor grad avhengig av materialets porøsitet og fuktinnhold. [14]

Tabell 11: Materialenes varmeledningsevne, k_1 ($\text{kJ}/\text{mh}^\circ\text{C}$). [14]

Stål	209
Fersk betong	8.4
Herdet betong	5.9
Lettbetong	2.9
Treverk (fuktig)	0.67
Vanlig isolasjonsmaterialer	0.15

Ofte vil en konstruksjon være satt sammen med flere forskjellige lag og den totale varmeledningsmotstanden er satt sammen av motstand for de enkelte lag. Fourier's lov. Typiske forskaling material og dens varmeledningsmotstand, vist i tabell 12. Høyere tall vil si bedre evne til å holde på varmen. [14]

Tabell 12: Varmeledningsmotstand, m_1 ($\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kJ}$). [14]

Stålforskaling	0.00005
Finér 15 mm	0.022
Finér 22 mm	0.033
Etafoam 10 mm	0.067
Vintermatte 50 mm	0.330
Stål + etafoam 10 mm	0.067
Finér 15 mm + skumplast 10 mm	0.089

2.4.2 Konveksjon

Den varmen luften som ligger inntil forskaling blir skiftet ut med kald luft, avhengig av lokalevindforhold og lufttemperaturen. Den konvektive varmestrømmen øker med økende temperaturdifferanse mellom materialets overflatetemperatur og lufttemperaturen, øker med økende overflateareal og avtar med økende motstand mot konveksjon. Varmekonveksjonsmotstanden (m_k) avhenger av hvor raskt varmeovergangen kan skje i selve overflatesiktet. [14]

$$m_k = \frac{1}{a_k}$$

Konvektivt varmeovergangstall a_k ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$).

Man kan i tabell 13 se at varmekonveksjonsmotstand varierer med flere faktorer. Lavere tall gir reduksjon i varmekapasitet. Eksempel når du kjører slalåm, høyere hastighet gir mer avkjøling.

Tabell 13: Varmekonveksjonsmotstand, m_k ($\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kJ}$). [14]

Faststoff til luft	
Vindhastighet:	Varmekonveksjonsmotstand m_k
0 m/s	0.050
2 m/s	0.021
5 m/s	0.011
10 m/s	0.006
20 m/s	0.0004
Faststoff til vann	
Stille vann	0.0005
Strømmende vann	0.00005

2.4.3 Stråling

Et godt eksempel er når solen varmer opp en falte, lufttemperatur kan være lav å allikevel blir flaten varmet opp til en høyere temperatur en lufttemperaturen. Hvor mye et legeme blir varmet opp av stråling kommer an på absorpsjonstallet til legeme som angir hvor stor evne legemet har til å ta opp varme fra stråling. Tabell 14 viser et par materiellers absorpsjonstall. Absorpsjon tallet fortell hvor godt et legeme blir varmet opp av stråling, høyere tall gir bedre oppvarming fra stråling. [13]

Tabell 14: Absorpsjonstall ved stråling. [14]

Betong	$a = 0.93$
Vann	$a = 0.92$
Treverk	$a = 0.85$
Kobber blankt	$a = 0.04$
Kobber oksydert	$a = 0.73$

Det er vanskelig å beregne varmetap/varmetilførsel siden dette i stor grad er avhengig av sol- og værforhold.

2.4.4 Varmetap ved fordamping

Ved støpning av dekker hvor det ikke benyttes noen form for tildekking vil uttørkingen fra overflaten gi vesentlig bidrag til varmetap. Når man støper vil dannes overflatevann på overflaten av støpen og på grunn av varmeutviklingen i betongen vil vannet fordampe, noe som fører til mindre vann i betongen til hydratisering, som igjen fører til mindre varmeutvikling, som også kan føre til riss på grunn av at v/c-tallet blir lavere enn hva minimum betongen trenger for å få «full» hydratisering. Et par faktorer som spiller inn her er, lufttemperatur, fuktforhold i luften, vindhastighet og ikke minst betongens overflatetemperatur. [14]

2.4.5 Effekten av konstruksjonsforhold

Når man skal se på det totale varmetap i en konstruksjon må man ta hensyn til geometri og dimensjon. En god overflateisolasjon vil gjøre at arealflaten på konstruksjon ha mindre innvirkning enn hvor det er lite eller ingen isolasjon. [14]

$$a = \frac{\sum(k * A)}{V * R * c} * h^{-1}$$

Hvor:

a: avkjølingstall

k: transmisjonstall i overflaten

A: overflateareal

V: volum

R: romvekt

c: varmekapasitet

Med et høy avkjølingstall vil varmetapet til omgivelsen være stor. Transmisjonstallet K for en forskalingsløsning når man ikke tar hensyn til varmetapet fra stråling og fordamping: [14]

$$K = \frac{1}{m} = \frac{1}{m_f + m_i + m_k}$$

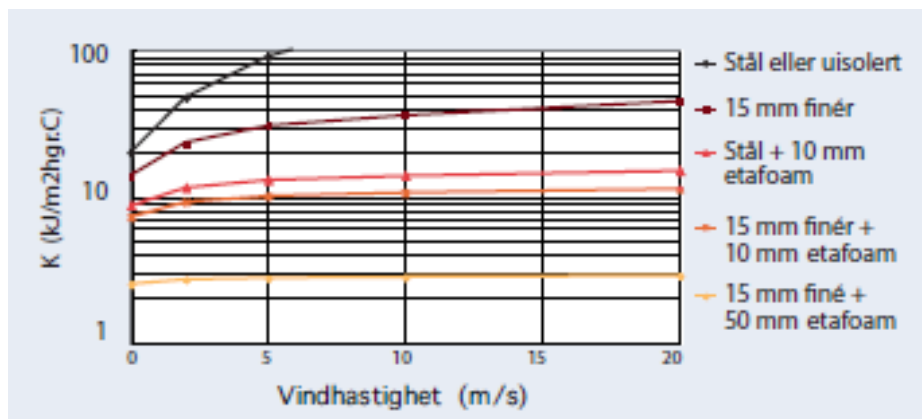
Hvor:

m_f: motstandstall for forskaling

m_i :: motstandstall for isolasjon

m_k konvektivt motstandstall

I figur 18 ser man størrelsen på K ved typisk vanlig forskalingsløsninger.



Figur 18. Transmisjonstallet K for enkel forskalingsløsninger. [14]

2.4.6 Modenhetsmodell

Ved bruk av Arrhenius funksjon kan man uttrykke en funksjon for modenhetsgraden i betongen, likning 2. Denne modellen gjør det mulig å sammenligne herdeprosessen som foregår under forskjellige tid-/temperaturhistorier og sammenholde denne ved ekvivalent herdetid ved 20 °C. For å kunne gjøre dette må man kjenne til sementens reaksjonshastighet med vann ved forskjellige temperaturer. [14]

A og B er empiriske konstanter bestemt ved kuvetilpasning av fasthetsutvikling ved 20 °C opp til ca. 50% av 28 døgns fasthet. Hastighetsfunksjonen $H(T)$ er vist i et tidligere avsnitt, fig. 6. En betong som har herdet ved temperaturen T_1 i en tid Δt_1 , har da modenhet $M_1 = H(T_1) * \Delta t_1$. Den totale modenheten kan vi finne ved å dele herdeforløpet inn i intervaller ved konstant temperatur. [14]

2.4.7 Egenskapsmodeller

Den adiabatisk varmeutviklingen og isoterme fasthetsutviklingen beskrives ved hjelp av en generell egenskapsutviklingsfunksjon. Som kan brukes til å simulere betong konstruksjonens temperaturutvikling. [14]

$$y = y_u * \exp \left[\left(\frac{t_e}{M} \right)^a \right]$$

Hvor:

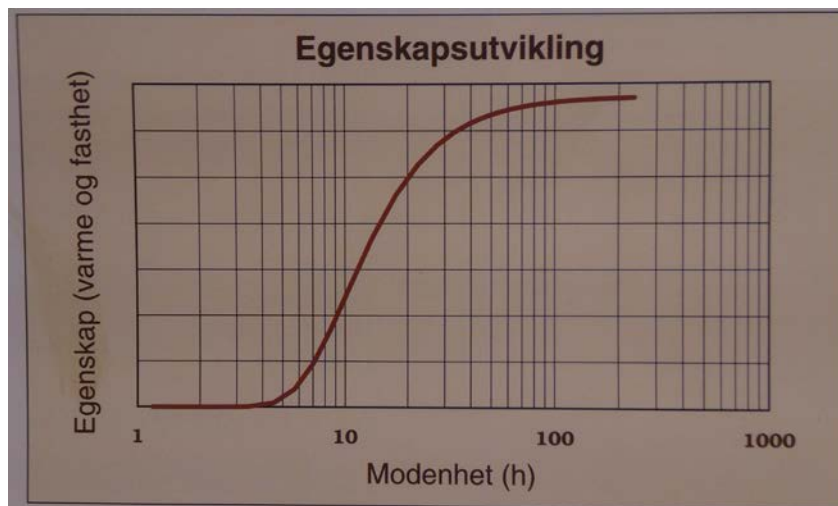
y : egenskapsverdi

y_u : sluttverdi (asymptoteverdi for egenskapen)

t_e : en konstant med dimensjon timer, karakteristisk for betongen

a : krumningsparameter, en konstant karakteristisk for betongen

I et logaritmelineært diagram vil egenskapsutviklingen avbildes som en S-kurve. Parametersettet vil avhenge av betongens delmaterialsammensetning. Det må derfor bestemmes et sett for hver betongresept. For fasthet bestemmes parameterne når en kjenner fasthetsutviklingen. Slik at når man kjenner den adiabatisk varmeutviklingen, konstruksjonens varmetapegenskaper og antar lufttemperatur og vind i herdeperioden kan man simulere varmeutviklingen i en gitt konstruksjon. [14]



Figur 19. Sammenheng egenskap/modenhets. [14]

2.4.8 Hett 97 – planleggingsverktøy

Hett 97 er et planleggingsverktøy som man simulerer temperatur og fasthetsutvikling i en betong konstruksjon. I store deler av året i Norge vil temperaturen være under 5 °C og da vil det være behov for å kunne simulere støpearbeidet. Konsekvensen ved feil under støpning kan fort bli en veldig kostbar løsning. Det brukes både til å simulere støpning i minus grader som å simulere store konstruksjoner hvor temperatur og temperaturgradient kan bli for store. Programmet tar hensyn til betongsammensetningens varme- og fasthetsutvikling, og betingelser på byggeplassen som konstruksjonstype, dimensjoner, forskalingstyper, lufttemperatur og vindforhold. Hett 97 gir deg informasjon om følgende: [16]

- Når kan forskalingen rives
- Hva må eventuelt gjøres for å rive etter fremtidsplan
- Bør vi bruke en annen sementtype
- Bør vi bruke mer sement
- Bør betongtemperaturen økes
- Bør vi bruke en annen type forskaling
- Er det fare for at betongen fryser
- Bør betongen tildekkes
- Hvor lenge bør den i så fall være tildekket
- Vil det ved formriving være fare for opprissing

2.5 Temperaturforskjeller i herdingsprosessen

Temperaturforskjeller i herdingsprosessen gir en del utfordringer og problemer som kan oppstå. Som nevnt tidligere vet vi at i et adiabatisk miljø vil betongens temperatur være uniform. Siden det er helt vanlig at det støpes i isotherm eller semi-adiabatiske forhold må vi derfor ta hensyn til temperaturforskjellen i betongen ved støpning slik at differansen mellom trykkspenningen og strekkspenningen i betongen ikke blir for stor, som kan føre til oppsprekking på grunn av temperaturforskjeller i betongen.

2.5.1 Temperaturtøyning

En temperaturendring $\Delta\theta$ gir en temperaturtøyning ε_θ som er styrt av betongens temperaturutvidelseskoeffisient α_θ etter følgende enkle likning: [6]

$$\varepsilon_\theta = \alpha_\theta * \Delta\theta$$

Temperaturutvidelseskoeffisienten α_θ er avhengig av flere parameter, men i hovedsak tilslagstype. Tilslagstypen vi har i Norge vi gi en temperaturutvidelsekoeffisient i områder $0.7 - 1.2 * 10^{-5}/^\circ\text{C}$. Betongens temperaturnivå, modenhet og fuktinnhold spiller også en rolle i temperaturutvidelsekoeffisient. Det er vanlig å anta at den er $1.0 * 10^{-5}/^\circ\text{C}$. [6]

2.5.2 Spenningsoppbygging, indre og ytre fastholding

Som nevnt tidligere vil en betongkonstruksjon under herding ikke ha en jevn temperaturfordeling. Mye av varmen som utvikles ved hydratasjon går tapt til omgivelsene og temperaturen i kjerne er høyere enn flatene som er i kontakt med fundamentet og omgivelsene. Figur 20 viser en typisk temperaturfordeling etter 1 time. [6]



Figur 20. Typisk temperaturfordeling gjennom en 200 mm vegg ca. 1 time etter avforming. Lufttemperatur er 5 °C. [6]

2.5.2.1 Indre fastholding

Det oppstår en en tøyingsforskjell når den kjernen er varmere enn overflaten og dette danner spenning i betongkonstruksjon. Det blir trykkspenning i kjerne og strekkspenning i overflaten. Det som vi kaller indre fastholding er fordi kjerne hindrer overflaten å trekke seg sammen. Hvis vi ser på figur 20 har indre kjerne en temperatur på *ca.* 28 °C og overflatetemperaturen er *ca.* 18 °C, da blir gjennomsnitt temperaturen *ca.* 22 °C. Vi har da nøytral tøyningstilstand *ca.* 25 mm fra overflaten. Hvis vi bruker likning x, så får vi: [6]

$$\varepsilon_{\theta} = \alpha_{\theta} * \Delta\theta = 1.0 * 10^{-5} / (22^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}) = 1.2 * 10^{-4} = 0.12 \text{ ‰}$$

Hvis vi da antar en E-modul på 15000 MPa vil vi få en strekkspenning i overflaten på:

$$\sigma_t = E * \varepsilon_{\theta} = 15000 \text{ MPa} * 1.2 * 10^{-4} = 1.8 \text{ MPa}$$

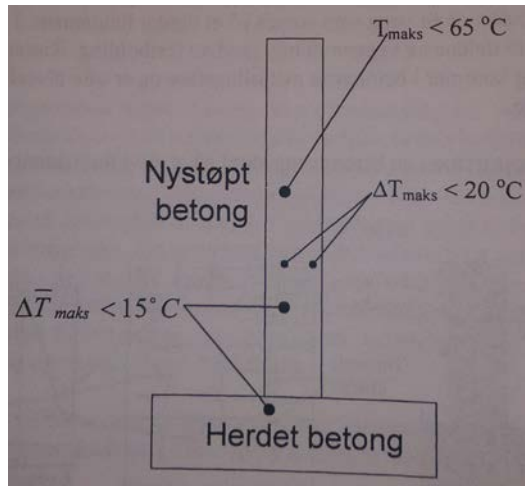
Vi kan anta at denne spenningen er nokså nær betongens strekkfasthet i denne fasen og en liten økning i temperaturforskjellene kan føre til fare for opprissing i overflaten. [5]

Ved en temperatur differanse på over 20 °C mellom overflaten og kjerne er det stor risiko for opprissing. I en vegg på 200 mm er temperaturforskjellen sjeldent mer enn 15 – 20 °C, men i stor konstruksjoner kan temperaturforskjeller fort blir over 40 °C. Det er ofte etter avforming at rissene oppstår, da kjernen har høy temperatur, mens overflaten for en rask avkjøling. Normalt er ikke disse overflate rissen farlig etter som de vil lukke seg når konstruksjonen kjøles ned. Likevel er det ikke ønsket å få overflate riss ettersom de kan fungere som riss anvisere ved andre påkjenninger. [6]

2.5.2.2 Ytre fastholding

Ytre fastholding er fastholding fra tilstøtende konstruksjon eller fra underlaget, se figur 21. Et klassisk eksempel er en vegg som støpes på et herdet fundament. Den nedre delen av veggen vil få en høy grad av fastholding. Varmen fra den ferske betongen vil utvide seg, mens betongen som det støpes mot vil fastholde denne kontraksjonen. Rissene som utvikles ved ytre fastholding kommer i betongens avkjølingsfase og er ofte alvorlige og

gjennomgående. Ved å varme opp den herdet betongen minsker man risikoen for at det dannes riss. [3, 6]



Figur 21. Typisk tilfelle med høy grad av ytre fastholding - Vegg på fundament. [3]

2.5.2.3 Tiltak mot spenningsoppbygging på grunn av temperaturforskjeller

For å løse temperaturforskjellen er det forskjellige tiltak som kan gjøres: [6]

- Bruk av lavvarmebetong
- Levert kald betong fra blandeverk, i større leveranser kan det være aktuelt å bytte ut vann med knust is.
- Forskaling kan rives på mest mulig gunstig tidspunkt, må beregnes i vært tilfelle.
- Den kalde betongen kan varmes opp
- Isoleres slik at det reduserer temperaturforskjellen innenfor støpe avsnitt
- Innstøping av rør, slik at man kan kjøre kaldt vann igjennom for å kjøle ned betongen.

2.6 Tilsetningsstoffer

Siden 1960-tallet har tilsetningsstoff vært brukt i betongen. Tilsetningsstoffer er en stor gruppe stoffer som man tilsetter betongen for å endre dens egenskap, slik at at det blir mer egnet til den type konstruksjon som skal støpes eller miljøet konstruksjonen skal støpes i og henhold til NS-EN 934-2/3/ skal tilsetningsstoffet ikke overstige 5% av sementinnholdet. Det er mange grunner til å bruke tilsetningsstoff i betongen ved støpning, dette for å kunne beholde betongen gode egenskaper og unngå de uheldige. [3, 6]

Tabell 15: Klasseinndeling og definisjon av tilsetningsstoffer i henhold til NS-EN 934-2. [3]

Klasse tilsetningsstoff	Definisjon/beskrivelse av virkemåte
Vannreducerende/ plastiserende tilsetningsstoff	Stoff som - gjør det mulig å redusere vanninnholdet i en gitt betongblanding uten å påvirke konsistensen. - eller som øker synkmålet/utbredningsmålet uten å påvirke vanninnholdet. - eller som har begge virkningene samtidig.
<u>Sterkt</u> vannreducerende/ superplastiserende tilsetningsstoff	Stoff som - gjør det mulig å redusere vanninnholdet <u>vesentlig</u> i en gitt betongblanding uten å påvirke konsistensen - eller som øker synkmålet/utbredningsmålet <u>vesentlig</u> uten å påvirke vanninnholdet - eller som har begge virkningene samtidig.
Tilsetningsstoff for redusert vannutskillelse	Stoff som reduserer vanntapet ved å redusere vannutskillelsen.

Luftinnførende tilsetningsstoff	Stoff som gjør det mulig å tilføre en kontrollert mengde av små, jevnt fordelte luftbobler under blanding, som blir værende etter herdning.
Størkningsakselererende tilsetningsstoff	Stoff som <u>reduserer</u> tiden før blandingens overgang fra plastisk til stiv tilstand.
Herdningsakselererende tilsetningsstoff	Stoff som gir raskere utvikling av tidlig fasthet i betong, med eller uten innvirkning på størkningstiden.
Størkningsretarderende tilsetningsstoff	Stoff som <u>øker</u> tiden for blandingens overgang fra plastisk til stiv tilstand.
Vannavstøtende tilsetningsstoff	Stoff som reduserer det kapillære vannopptaket i herdnet betong.
Størkningsretarderende og <u>sterkt</u> vannreduserende/ superplastiserende tilsetningsstoff	Stoff som gir de kombinerte virkningene av et vannreduserende/plastiserende tilsetningsstoff (primærfunksjon) og et størkningsretarderende tilsetningsstoff (sekunder funksjon).
Størkningsretarderende og <u>sterkt</u> vannreduserende/ <u>superplastiserende</u> tilsetningsstoff	Stoff som gir de kombinerte virkningene av et <u>sterkt</u> vannreduserende / <u>superplastiserende</u> tilsetningsstoff (primærfunksjon) og et størkningsretarderende tilsetningsstoff (sekunder funksjon).
Størkningsakselererende og vannreduserende/ plastiserende tilsetningsstoff	Stoff som gir kombinerte virkningene av et vannreduserende/plastiserende tilsetningsstoff (primærfunksjon) og et Størkningsakselerende tilsetningsstoff (sekndærfunksjon).

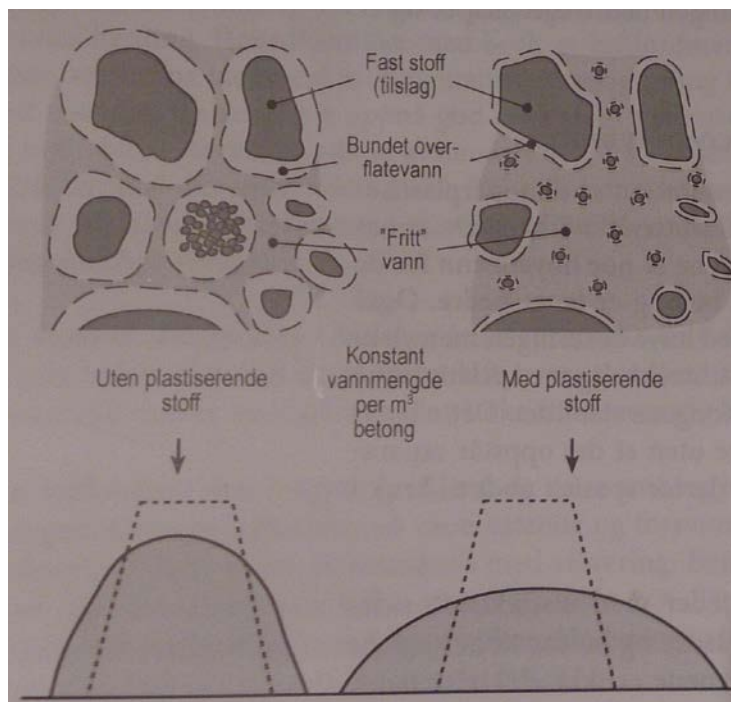
2.6.1 Vannreduserende/plastiserende stoff

Plastiserende og superplastiserende utgjør ca. 95% av totalforbruket av tilsetningsstoffer i Norge og mesteparten av sementen som blir produsert i Norge

inneholder en hvis % vannreducerende stoff. Ved å bruke P- eller SP-stoffer oppnår man samme konsistent ved bruk av mindre mengde vann. [3, 6]

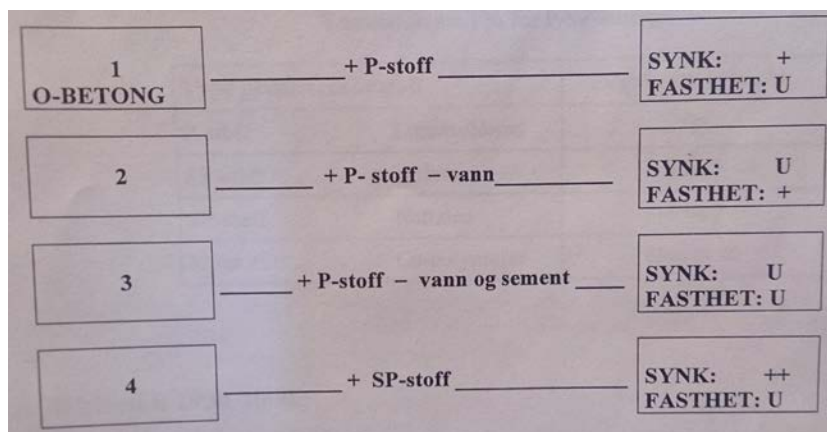
«I gamle dager ble Zalo brukt som et vannreducerende stoff», ifølge Overingeniør B-A. Boyle, UIT (2017 personlig meddeles).

Lignosulfonat er et biprodukt fra celluloseindustrien og er den billigste formen for vannreducerende tilsetningsstoff, men disse har en bieffekt at ved høy dosering virker sterkt retarderende også. Andre produkter som brukes er Sulfonert naftalen (syntetisk fremstilt), Sulfonert melamin (syntetisk fremstilt) og Co-polymerere (syntetisk fremstilt). [3, 14]



Figur 22. Effekt av P-stoff på vannets overflatekrefter og dermed på betongens støpelighet når alle andre faktorer er uendret. [5]

Hovedfunksjon til P/SP-stoff er å dispergere sementklumper og nøytralisere elektrisk ladede sementpartikler, dette gjør at overflatekreftene og friksjon mellom sementpartikkene reduseres. [3]



Figur 23. 0-betong er betong uten P/SP-stoff, U = uforandrede egenskap. [3]

Forklaring figur 23: [3]

1. Konstant fasthetsnivå og vanntilsetning. Ved tilsetning av et P-stoff kan det for samme vanntilsetning oppnås bedre støpelighet og uendret fasthetsnivå.
2. Konstant konsistensnivå og sementinnhold. Ved tilsetning av et P-stoff kan konsistensnivået beholdes ved å redusert vannmengde – resultatet er redusert v/c-forhold og dermed økt fasthetsnivå.
3. Konstant konsistens- og fasthetsnivå. Ved tilsetning av et P-stoff kan konsistens- og fasthetsnivå beholdes ved redusert vann og sementmengde – resultat er en mer økonomisk betongsammensetning.
4. Økt konsistens. Tilsetning av SP-stoff øker konsistensen mens fasthetsnivået forblir uforandret.

Tabell 16: I grove trekk maksimal vannreduskjon ved brukt av P/SP-stoffer. [3]

Type plastiserende stoff	Vannreduskjon %
Lignosulfonat (P-stoff)	8
Melamin (SP-stoff)	15-17
Naftalen (SP-stoff)	17-19
Co-polymerer (SP-stoff)	Opp til 40

2.6.2 Luftinnførende stoff

Hovedformålet for bruk av luftinnførende stoff er å gjøre betongen mer motstandsdyktig mot frost. Luftbobblene bør være mindre enn 0.3 mm for at de skal være mest effektive, i hovedsak for at avstand mellom luftboblene blir liten. Det er viktig at luftboblene er fordelt jevt ut i betongen, større luftbobler blir som regel borte ved vibrering av betongen. Dagens L-stoffer som normalt brukes består av syntetiske tensider, dette er et stoff som bidrar til å dispergere større luft porer og innføre luftbobler med mest effektiv størrelse for å øke frostbestandigheten. Normalt vil betong innehold ca. 2 % luft, men når man vil øke frostbestandigheten er det vanlig at man har 5 ± 1.5 % luftinnhold. Man sier 4 – 6 % målt på byggeplassen er frostbestandig. Som en tommelfinger regel sier man at hver prosent luft i betongen gir 5 % nedsettelse av trykkfastheten. [3, 6, 17]

«Siden det er vanskelig å kontrollere luft mengde og fordelingen av luften i betongen bør det kun brukes ved behov», ifølge B-A. Boyle ved UIT (2017 personlig meddelelse).

2.6.3 Størkningsakselererende stoff

«Før i tiden ble det salt brukt som størkningsakselererende stoff, men er ikke vanlig å bruke lenger da det er utviklet bedre stoffer som er lettere å kontrollere», ifølge Overingeniør B-A. Boyle ved UIT (2017 personlig meddelelse).

Det er 2 typer størkningsakselererende stoff (A-stoff), hvor den ene gir umiddelbar størking og den er kan man dosere slik at man oppnår ønsket størkingstid. Som vi deler inn i 2 grupper: [6]

- Størkingsakseleratorer
- Herdningsakseleratorer

Størkingsakselerator er et stoff som først og fremst innvirker på reaksjonen mellom C_3A -mineralene og vann. Ved bruk av Størkingsakselerator reduseres slutfastheten. Stoffer som natrium- eller kaliumhydroksider, -aluminater, -silikater eller karbonater er størkingsakseleratorer for en betong blanding. Vanlig bruksområde er i sprøytebetong, hvor vannglass (natriumsilikat) ofte tilsettes. [3, 6]

Herdningsakseleratorer er et A-stoff som reduserer tiden fra plastisk til fast tilstand. Dette A-stoffet er ofte basert på natriumticocyanat, kalsiumformiat, kalsiumnitritt, kalsiumnitrat. Kalsiumsaltene forhøyer konsentrasjonen av kalsiumioner i vannet, som akselerer hydratiseringen av C_3S . Typiske plasser man ønsker økt tidligfasthet; systemforskaling, elementproduksjon, vinterstøp og taksteinproduksjon. Andre metoder for å øke tidligfasthet er: oppvarmet betong, bruk av mer finmalt sement, øke betongkvaliteten (erstatte B25 med B35) og isolering av støpe avsnitt. Disse har normalt en vannreducerende effekt. [3, 6, 17]

2.6.4 Størkingsretarderende stoff

Retarderende tilsetningsstoff (R-stoff) som bruke til å utsette betongens tid fra plastisk til fast tilstand. Den fungere slik at det legger seg en hinne rundt sementkornene for å forsinke den kjemiske prosessen når vann og sement kommer i kontakt. «Før i tiden ble sukker brukt som et størkingsretarderende stoff», ifølge B-A. Boyle ved UIT (2017 personlig meddelelse). Noen typiske kjemiske forbindelser i R-stoff er: [3, 6, 17]

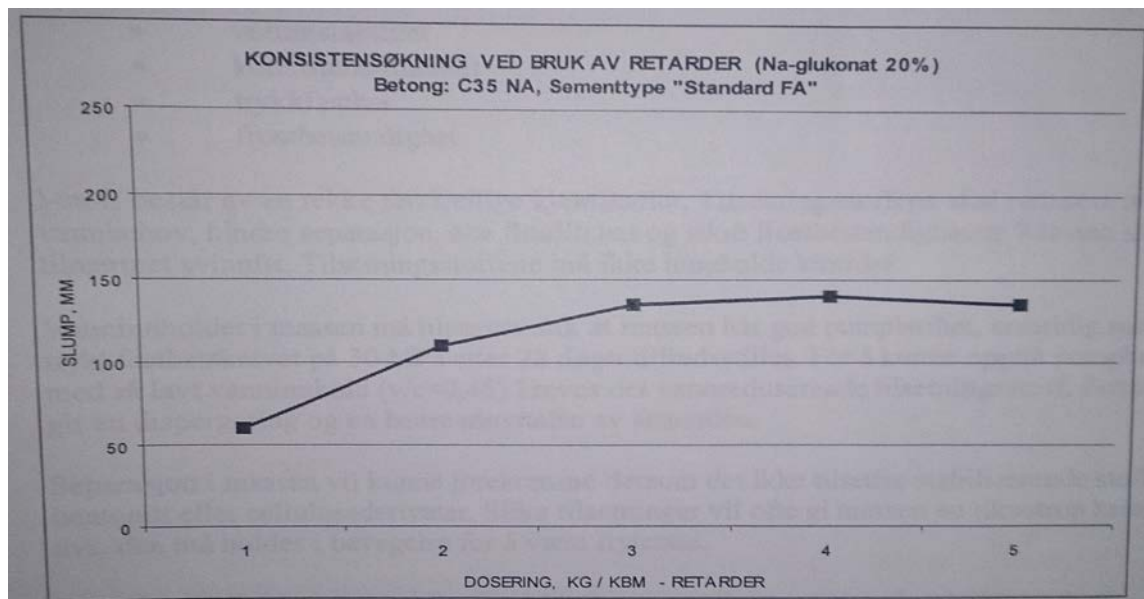
- fosfater
- hydroksykarboksylsyresalter (f.eks. natriumglukonat)
- lignosulfonater

Det er vanskelig å styre retardering lengre enn et døgn ved bruk av glukonat og man anbefaler da å bruke fosfatbaserte produkter, siden disse har et mer lineært forhold mellom retardering og økende dosering. Det er flere faktorer som spiller inn når man bruker R-stoff i betongen, som: [3, 6, 17]

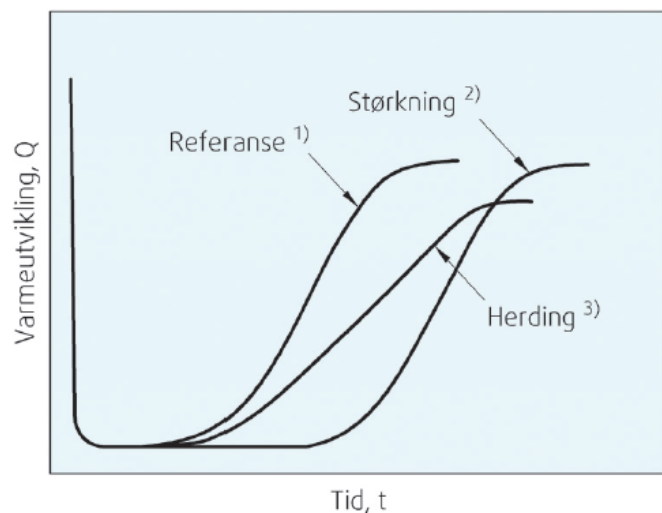
- doseringstidspunkt og mengde
- betongtemperatur
- sementtype
- sementmengde
- betongens konsistens
- nærvær av andre tilsetningsstoff

Normalt vil R-stoff gi en raskere fasthetsutvikling etter at størkningstiden er forbi og trykkfastheten til retardert betong vil normalt være høyere etter 3 døgn enn trykkfastheten til ikke retardert betong. Man kan si at den både er størkningsretarderende og litt herdningsakselerende. [3, 6]

Glukonater virker vannreducerende i betongen, se figur 24, mens fosfatbaserte retardere ikke har samme grad vannreducerende effekt. [3]



Figur 24. Konsistens økning med glukonater i betong (kilde: Norcem FoU, Brevik). [3]



Figur 25. Virking av størknings- herdingsretarderer på betongens varmeutvikling under hydrasjonsforløpet. 1) Betong uten retarder, 2) Betong med størkningsretarder og 3) Betong med herdingsretarder. [18]

Som man ser i figur 25 så er det forskjell i varmeutviklingen til størkningsretarderende (glukonat) og herdingsretarderende (fosfat), hvor en herdingsretarderende stoff har lavere varmeutvikling, men reaksjonene er mellom retarder og sement er ikke helt kart lagt enda. [18]

Typiske bruksområder: [3]

- ved lang transport
- ved støp i varmt vær for å unngå hurtig størking
- ved pumpearbeider for å beholde støpeligheten
- ved undervannsarbeid
- ved glidestøp
- ved støp av massive konstruksjoner

2.6.5 Andre tilsetningsstoffer

Andre tilsetningsstoffer som brukes ved spesielle situasjoner eller omstendigheter.

2.6.5.1 Injeksjonsstoffer

Injeksjonsstoff brukes blant annet i sementbaserte injiseringsmasser, kalt grout. Som er ekspanderende og godt egnet til injisering av spennkabler, reparasjon og tetting av sprekker i betongkonstruksjoner o.l. Det stille flere krav til massen som vannutskillelse, volumstabilitet, konsistens/fluiditet, trykkfasthet og frostbestandighet. [3, 17]

2.6.5.2 Antiutvaskingsstoff

Antivaskingsstoff gjør at betongen blir svært kohesiv og viskøs og motstandsdyktig mot utvasking. Selv om det er veldig motstandsdyktig mot utvasking i vann i bevegelse flyter den godt ut over i form. Normalt brukt ved støpe arbeid i vann. [6, 17]

2.6.5.3 Antifroststoff

Antifroststoff senker frysepunktet til vann. Slik at hydratisering og fastheten i betongen kan utvikles i temperaturer under 0 °C. Det kan være fare for at betongen tørker ut før den fastheten er utviklet nok og den vil da aldri oppnå tiltenkt fasthet. Typisk brukt i murmørtel og betong/mørtel for støpning av fuger mellom betongelementer i kaldt vær. [3, 6].

2.6.5.4 Ekspanderende stoff

Mest vanlig i ferdigmørtel som brukes til innstøping av bolter o.l. men kan også brukes i betong. Vanligvis er det aluminiums pulver som brukes og det reagerer i det alkaliske miljøet i den ferske betongen og utvikler gassbobler. For å få best mulig effekt bør man blande i små mengder av gangen. [6]

2.6.5.5 Stabiliserende stoff

I hovedsak for å gjøre fersk betong mer viskøs, men noen kan også bidra til at man får økt flyteskjærspenning. Typisk brukt ved pumping for å unngå propp. [6]

2.6.5.6 Korrosjonsinhibitorer

Typisk stoff for å gjøre ståloverflaten mer motstandsdyktig mot nedbryting er kalsiumnitrat (kunstgjødsel). [6]

3 Laboratoriearbeid

3.1 Forutsetninger

Formålet med denne oppgaven er å kartlegge temperaturutviklingen i betongen med retarderende tilsetningsstoff fra Mapei (vedlegg D) og Sika (vedlegg E) i store konstruksjoner og om det er mulig å utnytte egenskapene til retarderende stoff i kaldt klima og om det retarderendestoffer kan senke temperaturutviklingen i herdefasen, slik at den kan være mulig å bruke Norcem Standard FA sement i store konstruksjoner. I utgangspunktet var plan å bruke Portlandsement, men på grunn av tidspress og leveringstid ble valgt Norcem Standard FA sement brukt, ettersom det var dette Vesterålen Betong AS skulle bruke til vindmølleparken, men for vindmølleparken er det blitt endret til Anlegg FA på grunn av temperaturutviklingen i slike store konstruksjoner. Standard FA er den sementen som produseres hos Norcem i Kjøpsvik og den sementtypen som brukes desidert mest i Nord-Norge.

I forbindelse med at Vesterålen Betong AS støper store fundamenter til Åndstadblåheia vindmøllepark ble oppskriften til betongen etter deres ønske, som tilfredsstiller kravene til en B35/MF45 betong med Norcem Standard FA sement.

V/C-forhold = 0.5

Mengde Norcem Standard FA = 410 kg/m³

Sand = 920 kg

Pukk 8-16 mm = 825 kg

Vann = 170 liter + 4% fuktinnhold i sanden

3.2 Målemetoder

For alle blandningene ble det gjort synkprøve, men det ble ikke gjort noe densitet sjekk siden man ikke hadde noe vekt som kan måle over 125 kg på UIT avd. Narvik. Men for hver herdekasse som ble laget ble det tatt terninger og sylinder prøver for trykktesting. Herdekassenes formål var til å måle temperaturutviklingen i et semi-adiabatisk miljø. I utgangspunktet var planen å gjøre målingene i klimarommet til UIT avd. Narvik, men på grunn av praktiske forhold og omstendighetene ble dem støp og temperaturutvikling logget i betong laboratoriet. [15]

3.2.1 Temperaturmåling

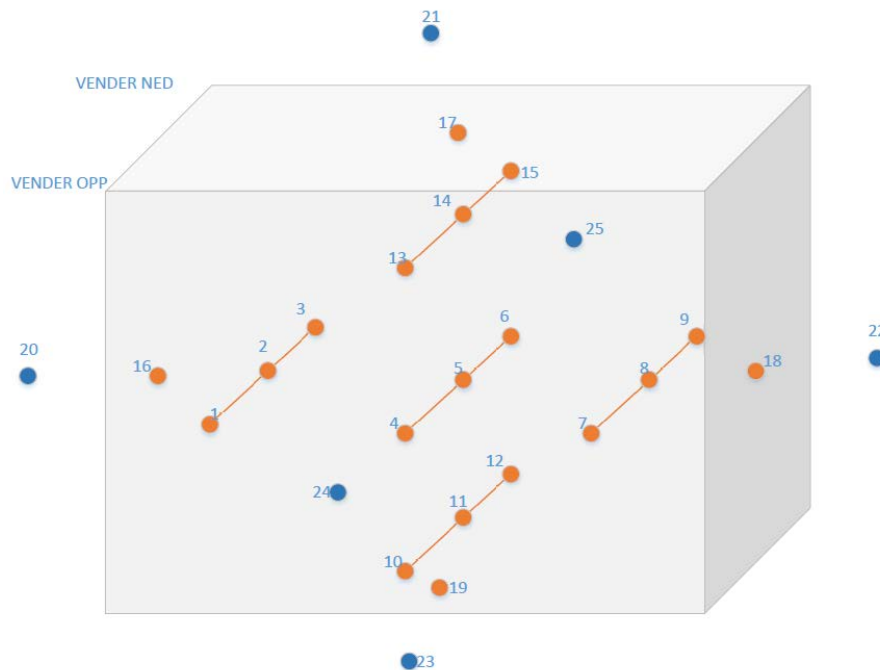
Temperaturmåling ble gjort i 3-dimensjoner for å kunne kartlegge om blant annet om temperaturutviklingen var uniform i et semi-adiabatisk miljø og om luft temperaturendring ga utslag under herdeprosessen.

For å måle temperaturutviklingen i herdekassene ble det brukt T3 TERMOTRÅD "T" TYPE: T102T Ø=0,5x1,2mm WT300 (vedlegg F) som har en feil margin på ±0.7 °C og loggingen ble utført med Hioki LR8202-20 logger og National Instruments cDAQ-9172 logger som var koblet til en datamaskin med programvare Labview 2013 v13.0f1 fra National Instruments. Herdekassene er godt isolert med Sundolitt EPS S80 plater (vedlegg G) og hver kasse rommer 100 liter, se figur 26. Innvendige mål på herdekassene er 1 m x 1 m x 0.1 m og det er isolert med 100 mm EPS. Til hver herdekasse ble det brukt 25 målepunkter for å måle temperaturutviklingen. Hvorav 19 av målepunktene var inne i herdekassene. De siste 6 punktene var for å måle overflate

temperatur på utsiden av herdekassene, se figur 27. Videre var herdekassene forseglet med ducttape og plast slik at fuktigheten ikke gikk tapt til omgivelsene. Det ble ikke gjort noe form for kalibrering av måletrådene bortsett fra å teste dem manuelt. Fingeren på tråden for å se om det ble temperaturutvikling og avlesning i romtemperatur for å se om det var store temperatur sprik mellom trådene.



Figur 26. Herdekasse A forseglet.



Figur 27. Plassering av målepunktene i herdekassene.

3.2.2 Trykktesting

Det ble støpt 4 stykker terninger med målene 100x100 mm og 4 sylindrer for hver blanding med målene med en diameter på 99.7 mm for å gjøre trykktesting etter henholdsvis 7 og 28 døgn. Treningene og sylindrene ble kun tildekket slik at fuktighet ikke gikk tapt til omgivelsene. Etter 24 timer med herding ble (fra hydratisering startet) ble dem tatt ut av formen og plassert i et vannbad med temperatur på 20 °C.

3.3 Betongblandinger

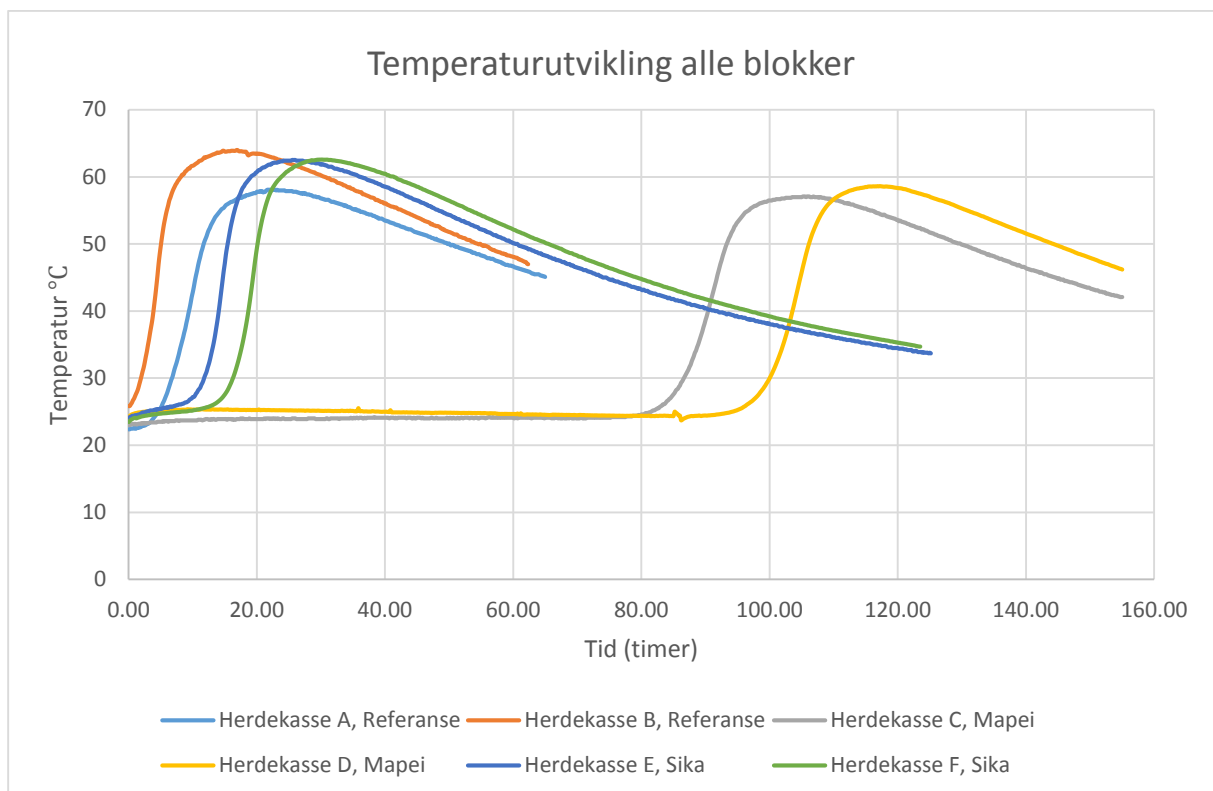
På grunn av kapasiteten til blanderen på betong lab ble det gjort 6 blandinger, mot 3 som var planlagt. Hver blanding besto av 50 kg Norcem standard FA klasse CEM II A-V 42.5 R, 100 pukk, 110 kg sand m/ca. 4% fuktighet og 20 liter vann. Det oppstod et problem ved blanding av referanse blandingen, hvor plan var at man skulle blande 100 kg sement, men underveis klarte ikke blanderen å dra rundt slik at det ble stillstand. Så V/C-forholdet til herdekasse A er noe høyere enn beregnet og på grunn av omstendighetene ble det ikke tatt synkprøve før blander var operativ igjen og det var mulig å blande resten av blandingen. Første blanding ble bestående av 75 kg sement, 150 kg pukk, 165 kg sand og 30 liter vann. Etter vi hadde fått tatt ut nok av betong blandingen til at blanderen klarte å dra rundt blanding fylte vi i resten og det ble tatt synkprøve etter støpning av herdekasse B. Resterende blandinger ble da delt opp i mindre mengder (6 blandinger) og det ble tilsatt 1% Mapei Retarder R til blanding C og D. Og 1% sika til blanding E og F. Excel ark for utvikling diagram for herdekasse A-F ligger i vedlegg H.

4 Beregninger

Beregninger av temperaturforløpet i herdekassene ble gjort ved logging av hvor det ble generert 2 type filer, en med Labview 2013 som har innebygget funksjoner som gjorde

at dataen kunne konverteres til leselig Excel ark, men fra Hioki LR8202-20 logger ble dataen hentet ut fra logger og konvertert til Excel ark på pc 'en gjennom programvaren Logger Utility v1.80 fra Hioki.

Siden temperaturforskjellen i herdekassene er lav i tillegg til feil margin toleransen i måletrådene kan man si at temperaturutviklingen i herdekassene var tilnærmet uniforme. Dette fordi det er flere faktorer som spiller inn på de ytre målepunktene, som blant annet var det vanskelig å få komprimert betongen, som kan føre til at det var luftbobler rundt målepunktene eller at en av de større fraksjonene fra tilslag lå måt målepunktet og at feil margin på måletrådene. Figur 28 viser varmeutviklingen i herdekassen i punktet som oppnådde høyeste temperatur i herdeprosessen, som var målepunkt 5, bortsett fra i herdekasse B hvor målepunkt 5 ikke registrerte noe varme og målepunkt 6 oppnådde høyest temperatur.



Figur 28. Temperaturutvikling i målepunkt 5, bortsett fra herdekasse B der det var fra punkt 6 på grunn av feil på sensor og fra tidspunkt når herdekassene var forseglet.

Tabell 17 viser den høyeste temperatur som ble oppnådd i herdekassene og temperatur i de ytre punktene i herdekassen. Figur 27 viser hvor punktene er plassert i herdekassene.

Tabell 17. Temperaturdifferanse ved maksimum oppnådd temperatur i herdekasser.

Herdekasse	Max. Temp.	Punkt 16	Punkt 17	Punkt 18	Punkt 19
A	58.1	55.3	55.6	54.9	55
B	64	61.01	60.82	60.47	61.04
C	57.1	52.8	53.6	50.4*	53.8
D	58.63	55.54	55.40	55.92	55.78
E	62.5	59.1	59	59.8	60
F	62.6	59.81	59.89	59.32	60.48

* feil på sensor, kan sees i Excel ark til herdekasse C.

I tabell 17 er det maksimal temperatur i herdekassene som er i målepunkt 5 og temperaturene ved samme tidsintervall i målepunkt 16-19, se figur 27.

Ved å simulere en vegg på 1 meter (figur 29) og annen 5 meter (figur 30) i Hett 97, med 25 bordskalling isolert kan vi finne ut nær maksimal temperatur som kan oppnås i betong konstruksjonen, i tillegg simulerer vi også et dekke støpt på 100 mm EPS og tildekket med 2x50 mm vintermatter (figur 31). Alle med følgende parameterer:

Stimuleringstid: 10 døgn

Betong: Norcem Standard FA B35-M(F)45 uten P-stoff

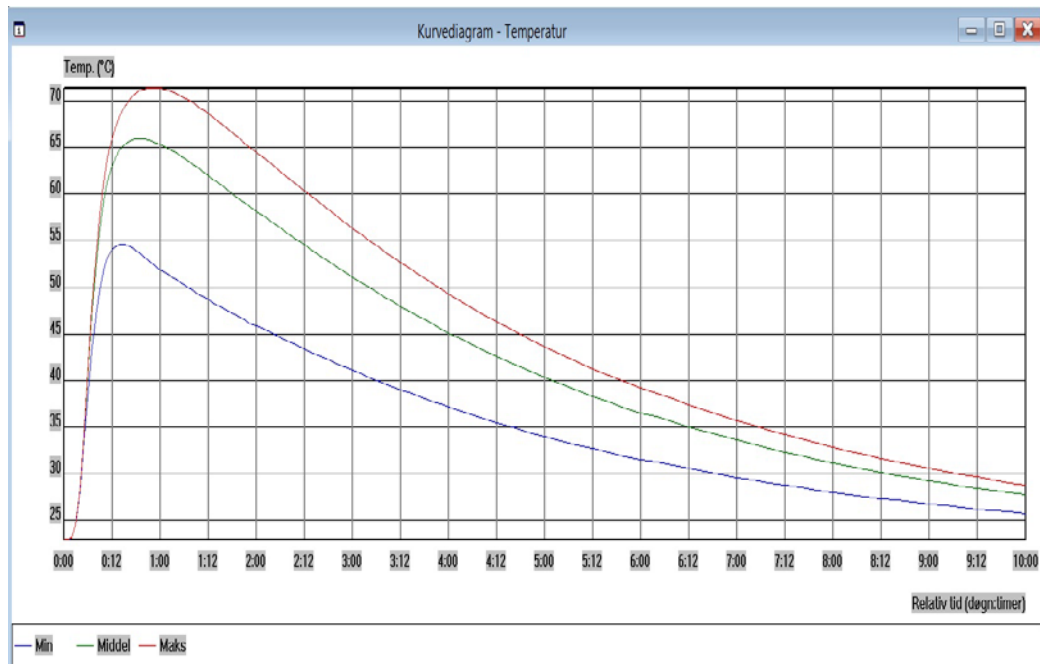
Sement + silika innhold (kg/m^3): 410

28-døgns trykkfasthet (MPa): 45.0

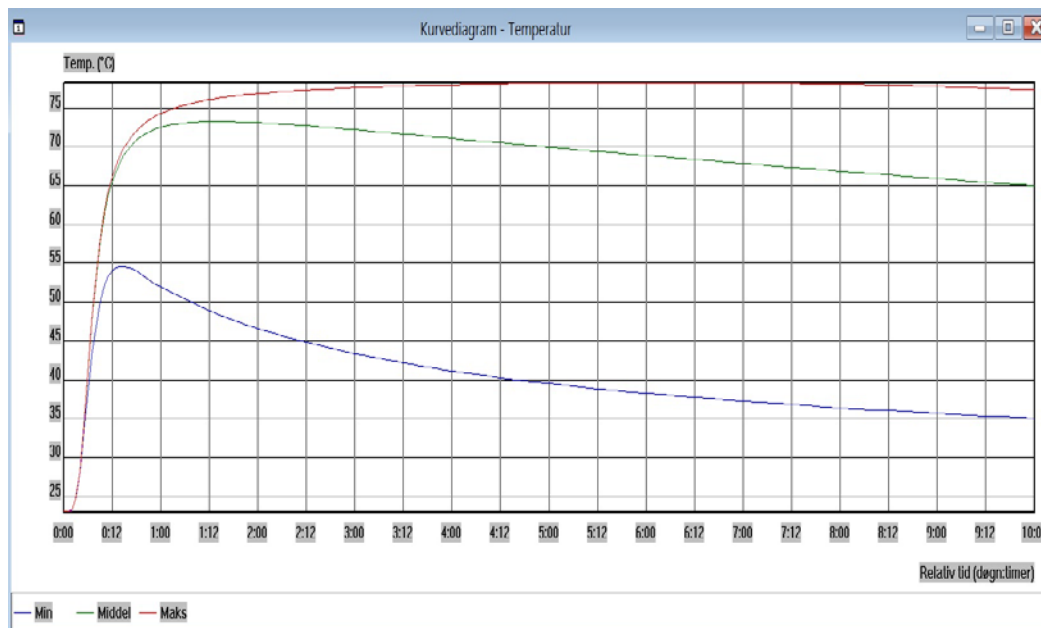
Betongtemperatur (°C): 23

Lufttemperatur (°C): 22

Rivning Trykkfasthet (MPa): 5



Figur 29. Simulering av en 1 meter tykk vegg i Hett 97. Blå viser overflatetemperatur til betongen, grønn viser ytterste laget i betong konstruksjonen og rød viser temperaturen i kjernen til betong konstruksjonen, luft temperatur på 22 °C.



Figur 303. Simulering av en 5 meter tykk vegg i Hett 97. Blå viser overflatetemperaturen til betongen, grønn viser ytterste laget i betong konstruksjonen og rød viser temperaturen i kjernen til betong konstruksjonen, luft temperatur på 22 °C.

Ut i fra figur 30 kan vi lese at maksimal temperatur som kan oppnås i konstruksjonen er 77 °C og i figur 29 er maksimal temperatur 71 °C. Når konstruksjonen er så stor som 5 meter tykkelse kan vi forvente at denne temperaturen er nært den teoretiske maksimale temperaturen som denne blandingen kan få.

Ved å beregning varmeutviklingen med likning 1 kan vi finne en indikasjon på hvor høy den maksimale temperaturutvikling blir. Ved å bruke Excel arket (vedlegg A) , får vi følgende $c_b = 1.05 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$.

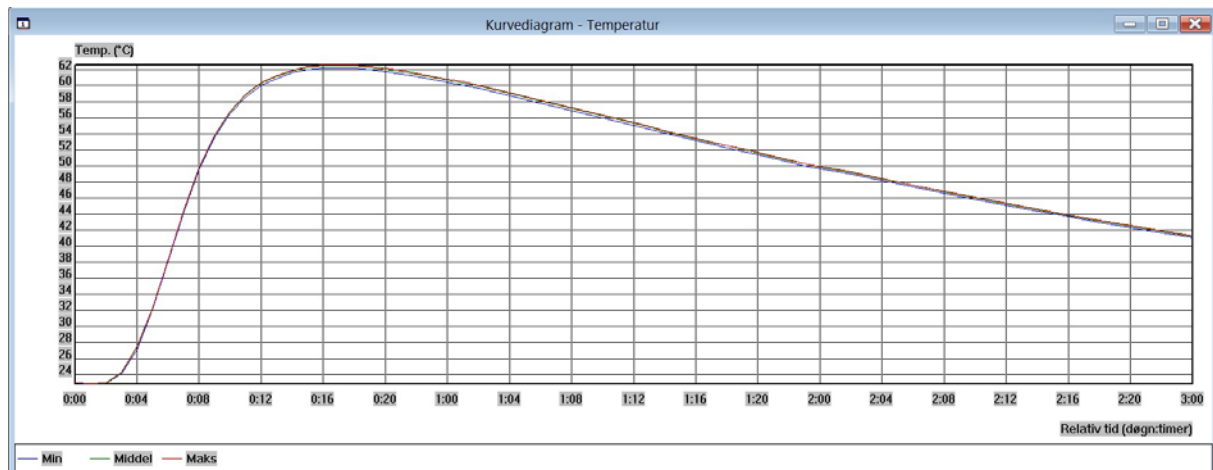
Antar at 410 Norcem standard FA gir en varmeutvikling på 400 kJ/kg sement .

$$\Delta\theta = \frac{Q_\infty \cdot C}{\rho_r \cdot c_b} = \frac{400 \text{ kJ/kg} \cdot 328 \text{ kg/m}^3}{1.05 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \cdot 2400 \text{ kg/m}^3} = 52.06 \text{ }^\circ\text{C} \quad (1)$$

Legg til romtemperatur: $22 \text{ }^\circ\text{C} + 52.06 \text{ }^\circ\text{C} = 74.06 \text{ }^\circ\text{C}$

Flygeasken sin effekt er ikke tatt med i likning 1 som er en veldig forenklet formel for å beregne maksimal temperaturutvikling for en gitt betongblanding.

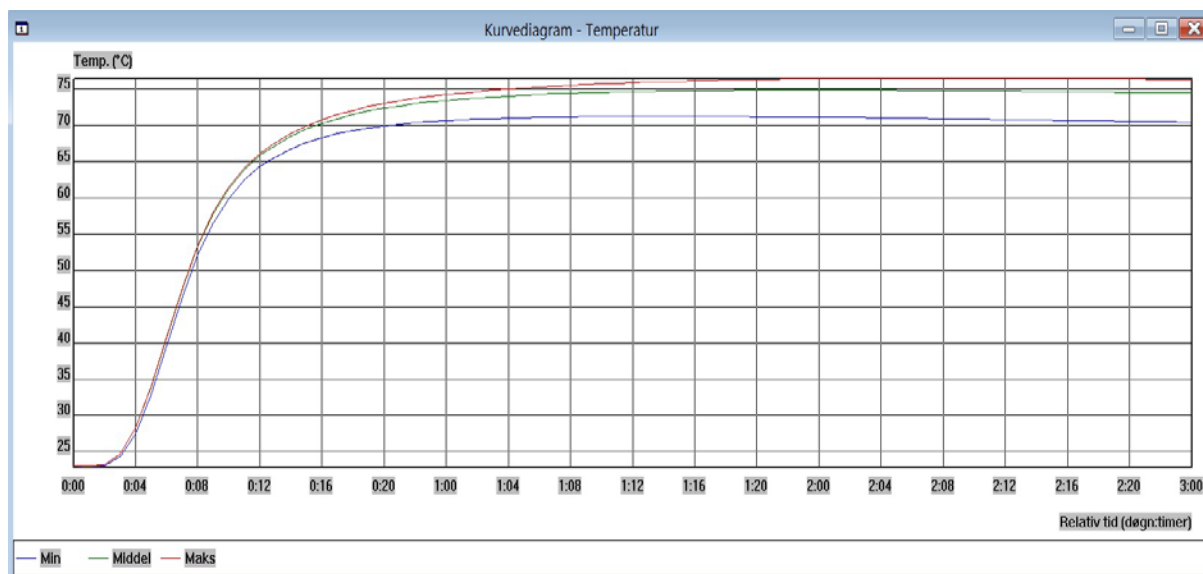
Ut i fra Hett 97 får vi ca. 77 °C som maksimal temperatur og ved å bruke den forenklet metoden med en antatt varmeutvikling for vi ca. 74 °C.



Figur 31. Hett 97 simulering av dekke på mark, men 100 mm ekspandert polystyren mellom betong og mark, samt overside dekket med 2x50mm vintermatter med en ute temperatur på 22 °C.

Ut i fra figur 31 kan vi se at maksimal temperatur er ca. 62.5 °C som er veldig nært laboratorie resultatet til herdekasse B, E og F, se tabell 17.

Ved å simulere et dekke på 1.60 meter vil man oppnå en temperatur på 76 °C (figur under), når man bruker samme parameterer som oppgitt tidligere.



Figur 32. Simulering av dekke på 1.60 meter, Betong B35 med temperatur på 23 °C, lufttemperatur 22 °C, underside dekket med 100 mm eps og tildekket med 2x50 mm vintermatter.

Ved å bruke en enkel matematisk formel kan vi beregne stigningsgrad i forskjellige

faser. $a = \frac{\Delta T}{\Delta t}$, hvor T=temperatur og t=tid.

Tabell 18: Tatt fra når betongen i hver herdekasse hadde oppnådd en temperatur på 25 °C og i løpet av en periode på 20 timer hvor alle herdekassene hadde oppnådd maksimal temperatur

Herdekasse	0-5 timer	5-10 timer	10-15 timer	15-20 timer
A	0.56	0.44	0.073	0.01
B	0.833	0.367	0.0667	-0.0133
C	0.19	0.5167	0.2967	0.0467
D	0.1567	0.5267	0.3633	0.06
E	0.0367	0.44	0.673	0.09
F	0.003	0.773	0.33	0.0467

Som vi ser fra stigningsgraden er det vanskelig å gi en eksakt stigning for et tidsintervall på grunn av når faktisk hydratisering startet og variasjon i sementen, som pH-verdien til flygeasken som er tilsatt sementen.

5 Resultater

5.1 Betongblanding

For å oppnå mest mulig likt resultat ble det ikke brukt noe ekstra vannreducerende stoff for å gi betongen mer flyt. Og siden laboratoriet ikke hadde vibrer så ble det gjort manuelt. Det ble ikke tatt noen trykktest for blanding C.

Tabell 19: Blanding og synkmål.

Blanding	Synkmål (mm)	Tilsetningsstoff	Mengde (% av sementvekt)
B	20	Ingen	-
C	180	Mapei Retard R	1
D	120	Mapei Retard R	1
E	12	Silka Retarder	1
F	30	Silka Retarder	1

Tabell 20: Betongegenskaper til blanding A.

Type	Lengde [mm]	Diameter [mm]	Vekt [g]	Volum [cm ³]	Densitet [kg/m ³]	Bruddlas t [kN]	Alder [døgn]
Terning 1	100x100		2328.1	993.8	2343	342.5	7
Terning 1	100x100		2341.4	995.6	2352	501.8	28
Sylinder 1	196.1	99.7	3738.1	1532.5	2439	300	7
Sylinder 1	124.5	99.7	2224.2	953.8	2332	310.5	28

Tabell 21: Betongegenskaper til blanding B.

Type	Lengde [mm]	Diameter [mm]	Vekt [g]	Volum [cm ³]	Densitet [kg/m ³]	Bruddlas t [kN]	Alder [døgn]
Terning 1	100x100		2528.2	1026.1	2439	402.6	7
Terning 1	100x100		2466.8	1003.4	2458	522.5	28
Sylinder 1	198.5	99.7	3594.6	1552.1	2312	270.6	7
Sylinder 1	199.2	99.7	3785.1	1550.9	2441	382.0	28

Tabell 22: Betongegenskaper til blanding D – Tilsetningsstoff, Mapei.

Type	Lengde [mm]	Diameter [mm]	Vekt [g]	Volum [cm ³]	Densitet [kg/m ³]	Bruddlast [kN]	Alder [døgn]
Terning 1	100x100		2312.6	967.5	2390	467.2	7
Terning 1	100x100		2338.7	976.6	2395	556.2	28
Sylinder 1	197.3	99.7	3638.1	1496.2	2432	350.8	7
Sylinder 1	179.7	99.7	3613.6	1504.4	2402	412.3	28

Tabell 23: Betongegenskaper til blanding E – Tilsetningsstoff, Sika

Type	Lengde [mm]	Diameter [mm]	Vekt [g]	Volum [cm ³]	Densitet [kg/m ³]	Bruddlast [kN]	Alder [døgn]
Terning 1	100x100		2400.9	992.6	2419	460.2	7
Terning 1	100x100		2392.1	990.1	2416	563.5	28
Sylinder 1	190.6	99.7	3761.2	1545.7	2433	352.7	7
Sylinder 1	180.1	99.7	3757.2	1550.3	2424	411.7	28

Tabell 24: Betongegenskaper til blanding F – Tilsetningsstoff, Sika

Type	Lengde [mm]	Diameter [mm]	Vekt [g]	Volum [cm ³]	Densitet [kg/m ³]	Bruddlast [kN]	Alder [døgn]
Terning 1	100x100		2437.5	1005.2	2425	485.1	7
Terning 1	100x100		2419.7	1003.5	2411	551.9	28
Sylinder 1	194.3	99.7	3777.4	1558.6	2424	342.2	7
Sylinder 1	114.3	99.7	2402.9	992.2	2422	378.4	28

I figur 28 ser at det er stor temperaturforskjell på referansekassene. Det kan vi trygt si er på grunn av problemene som oppsto rundt blanding av betongen. Blandingen som ble brukt til herdekasse A var veldig bløt og på grunn av still stand i blanderen ble det ikke tatt synkprøve av den blandingen. Det er mulig at den lave temperaturen skyldes bl.a. et høyt v/c-tall, men det også være at sementinnholdet er lavere enn forventet siden denne blandingen stoppet opp kort tid etter alt av indigrienser var tilsatt blanderen. Vi ser i tabell 20 og 21 at det er forskjell på densitet og bruddlast for blanding A og B. Fra figur 33 kan vi se at blanding B er i konsistensklasse S1.



Figur 33. Synkprøve blanding B. 2 cm synk.

I blanding C og D ble det tilsatt 1% Mapei retarder. Det ble tilsatt retarder i vannet før det ble blandet med betongen i blanding C, mens i blanding D ble det tilsatt etter vannet var blandet inn i betongen. Mapei Retard R er basert på glukonat forbindelse, som er vanskelig å kontrollere over et døgn, den har også en mye høyere vannreducerende effekt enn Sika. Mapei sin Retard R er anbefalt dosering 0.2-1% og den skal blandes i vannet før det tilsettes betongblandingen. I testen ble den tilsatt etter vannet var tilsatt betongblandingen. I henhold til tabellen til Mapei, vedlegg D. Skal 1% utsette hydratiseringen med 20 timer med v/c-tall 0.6. Som vi kan se fra synkprøvene til C og D er det vesentlig mer synk (figur 34 og 35) enn både B, E og F. Henholdsvis S3 og S4 konsistensklasse. Noe som bekrefter at den vannreducerende effekten er stor med Mapei sin retarderende stoff. Ved bruk av Mapei skjedde det ingen form for hydratisering før etter ca. 3 døgn hvor det var forventet at den skulle starte etter ca. 1 døgn, noen som bekrefter hvor viktig det er når man bruker en retarder glukonat forbindelser at man blander den ut i vannet før den tilsettes til betongblandingen. Ut i fra målingene kan vi se at vi har en lavere temperatur utvikling med Mapeien, som vi kan sammenligne med blanding A, som var veldig bløt.



Figur 34. 18 cm synk, betongblanding C.



Figur 35. 12 cm synk, betongblanding D.

Sika er en fosfat basert retarder som er bedre når man ønsker utsettelse over 1 døgn. Ved bruk av Sika sin retarderende stoff kan vi stor forskjell på hvordan den oppfører seg, selve hydratiseringsprosessen stopper aldri helt opp slik som med Mapeien. Helt fra herdekassene var lukket kunne man registrer en svak varmeutvikling frem til henholdsvis 10 og 15 timer hvor varmeutviklingen steg raskere enn standard betongblanding med flygeaske. I blanding C ble Sika retarder tilsatt i vannet før det ble

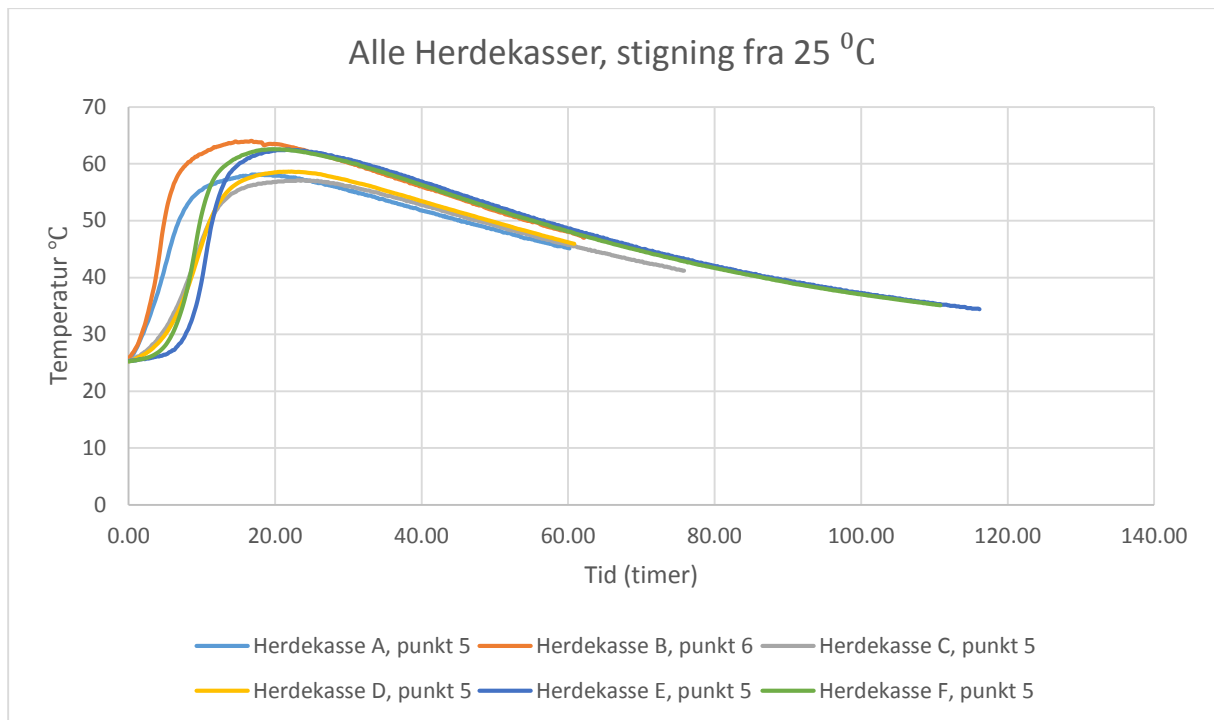
blandet med betongblandingen (10 timer utsettelse), mens i D (15 timer utsettelse) ble det tilsatt tilslutt. Vi ser også at temperaturen går nesten like høyt som en vanlig betongblanding med flygeaske. I vedlegg E kan vi se at 1% Sika retarder i Norcem Standard FA B30 gir 15 timer utsettelse. Vi kan også se med Sika sin retarder at vi har variasjon på når hydratisering setter i gang. Ved å tilsette retarderen tilslutt får vi en økning på 5 timer og synken er konsistensklasse S1 (figur 36 og 37), samme som blanding B. Dette forteller oss at Sika sin retarder har veldig liten eller ingen vannreducerende effekt.



Figur 36. 1.2 cm synk i blanding E med Sika.

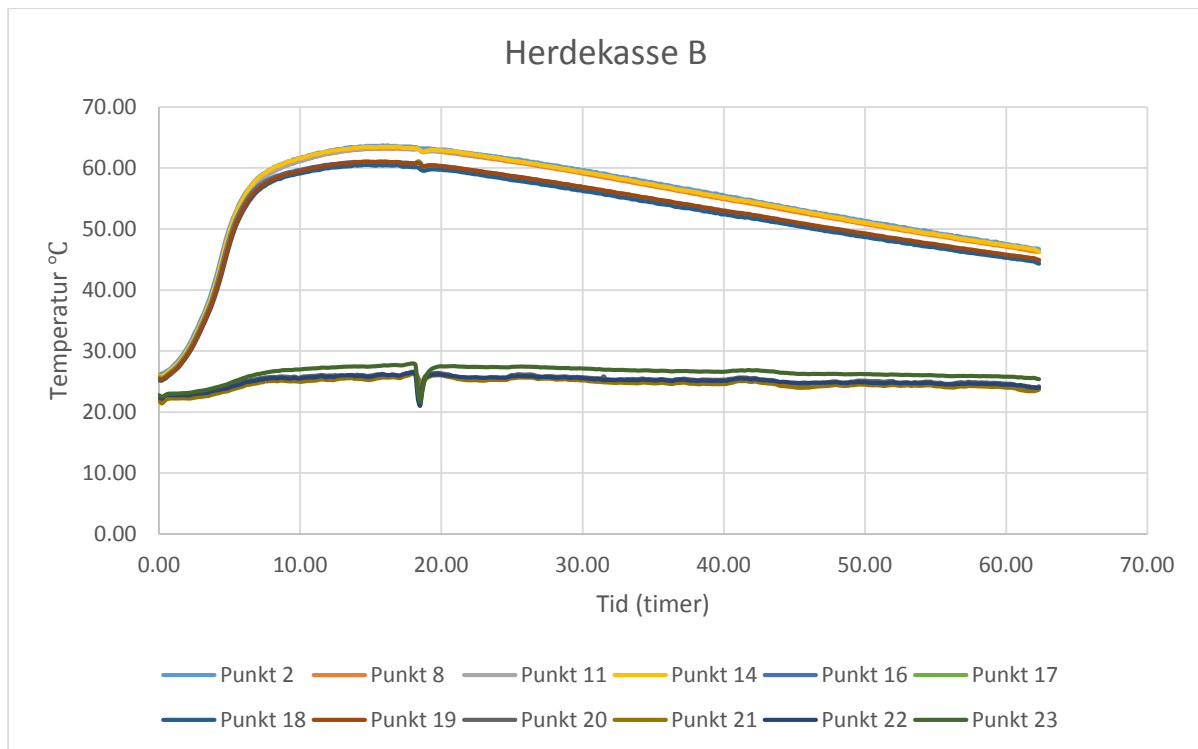


Figur 37. 3 cm synk i blanding F med Sika.



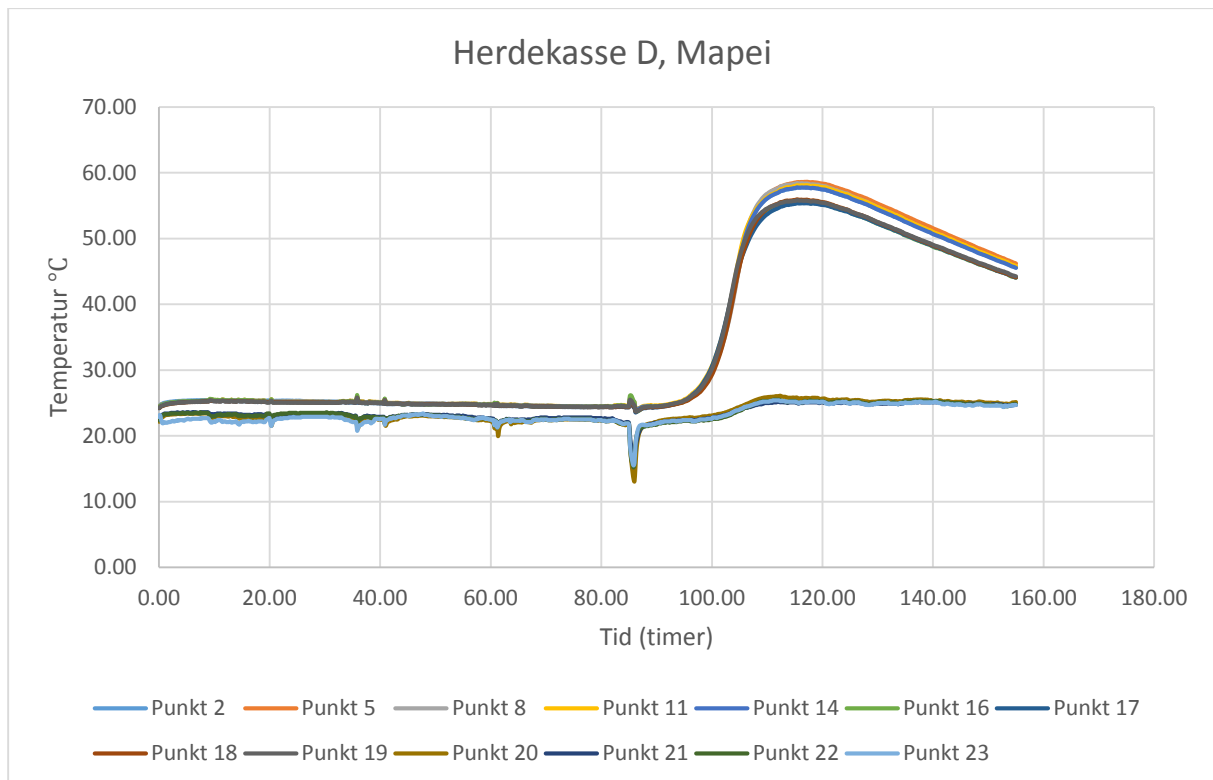
Figur 38. Viser temperaturutvikling til alle herdekassene. Tatt fra når hydratiseringen har fått fotfeste.

Ut i fra figur 38 kan vi si at temperaturutviklingen med Sika og referanse B er har relativ lik stigningsgrad, men ved bruk av Mapei har vi en lavere stigningsgrad og lavere maksimum temperatur. I tabell 18 er stigningstallene for hver herdekasse beregnet i 5 timers intervaller. Dette er til dels i samsvar med teorien rundt fosfat basert retarderende stoff.



Figur 39. Temperatur utviklingen med hensyn på tiden. Målepunktene 20-23 er overflate temperatur til isoporen.

I figur 39 ser vi en dropp i temperaturen etter ca. 18 timer. Det var porten til betong laben som sto åpent i ca. 30 min slik at luft temperaturen inne på laben sank betraktelig, vi kan se at i ytre overflate av herdekassen sank temperaturen 6 – 8°C. Vi kan også se at temperaturen inne i betongen falt, selv om det var isolert med 100 mm isopor. Gir oss et god innblikk i hvor mye di ytre temperaturene påvirker temperaturen i hydratiseringsprosessen.



Figur 40. Porten sto åpen i ca. 1 timer, som vi kan se i figuren i tidsrommet rundt 85 timer.

I figur 40 kan vi se at når selv hydratiseringsprosessen ikke er startet, at kan vi se at vi få en liten økning i temperaturen i betongen når eps-isolasjonen blir kjølt ned, ytre temperatur faller kraftig rundt 85 timer etter målingen var startet, porten til laboratoriet var åpen i ca. 1 time. Man kan se at denne effekten er kortvarig før betong begynner å kjøles ned.

6 Diskusjon

Ut i fra laboratoriearbeidet kan man se at det helt klar burde gjort flere prøver. 2 av hver blir for lite for å kunne gi en rett konklusjon, men uten tvil at resultatene som ble oppnådd ga innblikk i temperaturforløpet i herdeprosessen.

Blant annet kunne vi se at selv når herdekassene var isolert med 100 mm EPS plater så tok det ikke lange tiden når lufttemperaturen endret seg til at det temperaturen i betong kjernen endret seg, figur 39 og 40.

Ut i fra resultatene og problemene som oppstå under blanding av betongen kan man sette et spørsmåltegn på hva har v/c-tallet å bety for varmeutviklingen. Hvor prøvene ga en liten indikasjon på at et v/c-tall høyere enn 0.5 faktisk kan gi mindre varmeutvikling. Vi vet fra teorien at v/c-tallet må være 0.4 eller høyere for å få tilnærmet full hydratisering. Prøvene og simuleringene gir en indikasjon på at et v/c-tall på 0.4 – 0.5 gir høyest varmeutvikling og blanding A gir oss en liten indikasjon på at et høyere v/c-tall enn 0.5 kan gi lavere varmeutvikling.

6.1 Mapei Retarder R

Ut i fra test resultatene kan vi se at Mapei sin retard har en lavere varmeutvikling enn referanse betongen (herdekasse B) og Sika sin retard. Maksimal temperaturen er ca. 4 °C lavere. Siden betongen brukte henholdsvis 75 (herdekasse C) og 93 timer (herdekasse D) før hydratiseringen startet. I dette tidsrommet gikk temperaturen i herdekasse C fra 23 – 24.1 °C og i herdekasse D 24.3 – 25 °C. Og siden lufttemperaturen i rommet er 22 °C sier det oss at det forgikk en veldig liten kjemiskprosess og siden herdetemperaturen aldri ble like høy som referanse verdien og Sika prøvene, vi kan anta at dette er fordi Mapei Retard R er en glukonater basert retarderende stoff som har som funksjon å virke størkningsretarderende.

6.2 Sika Retarder

Ut i fra lab dataene kan man se at Sika sin retarder ikke sinker hydratisering i nærheten av det som ble registret med Mapei sin retarder. Altså den har en mindre utsettende effekt, slik at hydratisering skjer, men i mye mindre skala i forhold til referanse kassen B og den oppnår tilnærmet samme maksimum temperatur. Siden Sika er en fosfater basert retarder som fungerer herdingsretarderende, det vil si den bremser hydratisering.

7 Konklusjon

Ut i fra forsøkene som er gjort er det vanskelig å gi et godt svar på hvilken effekt retarder har på temperaturforløpet til betongen og maksimal energiutvikling i betongen. Men vi ser helt klart at det er forskjeller mellom produsentene. Hvor den ene er fosfater basert (herdingsretarder) og den andre er glukonater basert (størkingsretarder), som også gir en vannreducerende effekt. Vi kan konkludere med at det kan få fatale følger når man bruker Mapei sin Retard R feil, da selv 1% av sementvekten kan føre til en forsinkelse på 3 til 4 døgn, når man hadde forespeilet en forsinkelse på rundt 18 timer. Dette er beskrevet i databladet til Mapei.

Sika sin retarder fikk en utsettelse på ca. 15 timer i forhold til avlest forsinkelse når den ble tilsatt i betongblandingen tilslutt. I henhold til databladet tilsvarer dette Norcem standard FA B30/M60. Når retarderen ble tilsatt i vannet hadde den en forsinkelse på ca. 10 timer.

Vi kan anta ut i fra dataene og databladene at ente er det konsentrasjon av retarderen eller kjemiske basert stoffene som gir forskjellige utsettelse ved samme mengde retarder i betongen. Uansett er alltid viktig å ta et par prøver med retarder i betongblandingen som skal brukes for å få en mer nøyaktig forsinkelse.

Når det gjelder bruk av retarder til å redusere varmeutviklingen i betongen må det gjøre flere prøver enn hva som ble gjort slik at man kan få et større og bedre bilde av effekten. Ut i fra prøvene vet vi at Mapei sin retarder redusere varmeutviklingen, men om dette er på grunn av den vannreducerende effekten eller retarderende middel vet vi ikke med 100 % sikkerhet.

8 Videre arbeid

Videre arbeid bør være å kartlegge hvor mye v/c-forholdet har av betydning for varmeutviklingen, spesielt i området 0.4 til 0.8. Slik at det blir enklere å kartlegge hvor stor effekt en glukonater basert retarder (størkingsretarder) har for varmeutviklingen, spesielt men tanke på at den også har en vannreducerende effekt. Hvor vi vet at plastiserende stoff har også en retarderende effekt og superplastiserende stoff har mye mindre retarderende effekt. Det er mange faktorer som må tas hensyn til når man skal vurdere forskjellige tilsetningsstoffer effekt på betongen og som gjør det vanskelig å komme frem til en god konklusjon.

9 Referanser

- [1] Portland, A. (1985), Beton- bogen 2. utgave. ISBN 87-980816-2-4.
- [2] SINTEF, B.K., Sement, Typer, egenskaper og bruksområder. Byggforskblad 572.204, 2016.
- [3] Stefan Johansen, TKT 4215 Concrete Technology 1, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim 2009.
- [4] Johs. Rutle. (1981), Cements: fremstilling og egenskaper, andre hjelpestoffer for betongarbeider.
- [5] Metha, P.K. (2006), Concrete, Microstructure, Properties and Materials 3. utgave. ISBN 0-07-146289-9.
- [6] Maage, M. (2017), Betong, Regelverk, teknologi og utførelse 2. utgave. ISBN 978-82-8021-126-2.
- [7] Utførelse av betongkonstruksjoner, NS-EN 13670:2009+NA:2010, Norsk standard.
- [8] <http://www.sunmixchina.com/product/UndensifiedSilicaFume>, [Nedlastet Mars 2017].
- [9] <http://cornerstonemag.net/commercial-recovery-of-metals-from-coal-fly-ash> , [Nedlastet Mars 2017].
- [10] Norcem AS, <http://www.norcem.no/no/flygeaske>, [Nedlastet Mai 2017]
- [11] <http://www.slagcement.org/Sustainability/whatisslag.html>, [Nedlastet Mars 2017]
- [12] Gjerp, P. (2009), Grunnleggende betongteknologi 2. utgave, 5. opplag. ISBN 978-82-8021-035-7.
- [13] Cengel, Y.A. (2011), Heat and mass transfer, fundamentals and applications 4. utgave. ISBN 978-1-259-25377-5.

- [14] Norcem AS, Herdeteknologi, http://www.norcem.no/en/system/files_force/assets/document/bb/11/herdeteknologi_lav.pdf?download=1, [Nedlastet Mars 2017]
- [15] Norcem AS, Hett 97, <http://www.norcem.no/no/kundesenter>, [Nedlastet April 2017]
- [16] Norcem AS (2004), Betongboka 2. Utgave, 1. Opplag. ISBN 82-05-31372-5
- [17] Statens Vegvesen 2014, , Laboratorieundersøkelser, Håndbok R210. ISBN 978-82-7207-668-8.
- [18] SINTEF, B.K., Tilsetningsstoffer for betong. Byggforskblad 572.207, 2010.

10 Vedlegg

- A. **Regneark fra Norcem for beregninger av varmekapasitet i betong.**
- B. **Norcem Standard FA Produktinformasjon**
- C. **Siktekurve sand**
- D. **Mapei Retarder R Produktinformasjon**
- E. **Sika Retarder Produktinformasjon**
- F. **Varmetråder**
- G. **Sundunit EPS S80 Produktinformasjon**
- H. **Data herdekasser**