



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og Materialer/ Bygg	Vårsemesteret, 2012. Åpen / Konfidensiell
Forfatter: Espen Skogen	..... (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså Veileder(e): Kjell Tore Fosså	
Tittel på masteroppgaven: Temperaturutvikling i betong	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Betong Temperaturutvikling Varmeutvikling Varmetap Temperaturgradient Hydratisering	Sidetall: 113 + vedlegg/annet: 16 + CD Stavanger, 15.06.12 dato/år

Temperaturutvikling i betong

Sammendrag

Egenskapene i en betongkonstruksjon avgjøres i stor grad av bindemiddelet. Når deler av sementen byttes ut med pozzolan er det mulig å påvirke varmeutviklingen og dermed også temperaturutviklingen i herdefasen. Dette er igjen med å avgjøre egenskapene til betongen. Varmeutviklingen er direkte avgjørende for størrelsen på temperaturgradienter innad i konstruksjonen. Ved høye herdetemperaturer får man tilsvarende høye temperaturgradienter som gjør at det oppstår spenningsoppbygging i betongen. Resultatet av økt spenning kan være riss og dårligere betongkvalitet. Målsetningen med oppgaven er å se på ulike betongblandinger med forskjelling mengde pozzolan. Påvirkningen betongsammensetningen og konstruksjonens utforming har på herdetemperaturen vil bli diskutert.

Med hensyn til målsetningen vil Arrhenius-funksjonen, modenhetsprinsippet og beregningsmodell for varmeutvikling inngå i et litteraturstudium. Praktisk arbeid på laboratoriet vil inkludere blanding av betongresepter, måling av temperatur- og fasthetsutvikling i tillegg til en rekke andre viktige betongegenskaper. Resultater brukes videre til å beregne dansk egenskapsfunksjon og tilhørende varmeutvikling i betong.

Gjennom opparbeidet kunnskap fra litteraturstudium skal et temperatursimuleringsprogram lages i Excel. Dette programmet skal gjennom matematiske formler simulere temperaturutviklingen for ulike betongresepter. Teorien som ligger til grunn for utvikling av regneark skal belyses. Egenskapsfunksjonene innhentet fra de forskjellige betongblandingene vil videre bli brukt som inngangsparameter i utviklet regneark. Temperaturutviklingen for ulike betongblandinger vil deretter bli simulert. De ulike betongreseptenes simulerte temperaturutvikling sammenliknes deretter med temperaturmålinger gjennomført på laboratoriet.

Forord

Jeg valgte å skrive masteroppgave om «temperaturutvikling i betong». Praktisk arbeid på laboratoriet, teoristudie i tillegg til beregninger virket som en spennende og utfordrende kombinasjon som kunne gi meg både utfordringer og variasjon i arbeid, noe som viste seg å stemme med mine antakelser. Selve blandingen på laben var spesielt viktig for å få innblikk i hvordan betongarbeid foregår i praksis og ikke kun ha kunnskap om hvordan det fungerer i teorien. Gjennom studiet har jeg lært mye og opparbeidet meg en hel del kunnskaper og forståelse innenfor herde- og betongteknologi.

Jeg vil takke:

- Veilederen min, Kjell Tore Fosså, som i stor grad har bidratt til det endelige resultatet på oppgaven. Gjennom samtaler og diskusjoner har han med sin store kunnskap om herde- og betongteknologi hjulpet og ledet meg inn på riktig spor.
- Samdar Kakay for hjelp på betonglaboratoriet.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	3
Forord	4
1. Innledning.....	7
1.1 Hensikt.....	7
1.2 Materialer.....	8
2. Teori.....	9
2.1 Sementsammensetning	9
2.2 Hydratisering	10
2.2.1 Hydratisering av klinker	10
2.2.2 Hydratiseringshastighet	11
2.2.3 Hydratiseringsgrad	13
2.2.4 Hydratiseringsvarme.....	13
2.2.5 Pozzolan	14
2.3 Temperaturutvikling i betong.....	18
2.3.1 Varmeutvikling i betong.....	19
2.3.2 Adiabatisk temperaturutvikling.....	22
2.3.3 Varmetap	23
2.3.5 Fourier´s likning	25
2.3.6 Arrhenius- funksjon.....	29
2.3.7 Hastighetsfunksjon	29
2.3.8 Modenhetsprinsippet	31
2.3.9 Temperaturpåvirkning	32
2.4 Innvirkning temperaturutvikling har i betong	34
2.4.1 Spenninger.....	34
2.4.2 Egenskaper	36
2.4.3 Riss	36
2.4.4 Tiltak	37
3. Laboratoriearbeid.....	38
3.1 Forutsetninger.....	38
3.2 Målemetoder.....	38
3.2.1 Temperaturmåling	39
3.2.2 Trykktesting.....	39
3.3 Betongblandinger	39

Temperaturutvikling i betong

3.4	Oppsett for blanding	42
4.	Herdekasseprogram	43
5.	Utvikling av regneark	44
5.2	Regneark.....	44
5.2.1	Funksjonsområdet	44
5.2.2	Forutsetninger.....	44
5.2.3	Beregningsmetode	51
6.	Resultater.....	68
6.1	Resultater innhentet fra laboratoriearbeid	68
6.1.1	Betongblandinger	68
6.1.2	Temperaturmålinger	69
6.1.2	Trykktesting.....	81
6.2	Resultat varmeutviklingsparameter	82
6.2.1	Egenskapsfunksjon	82
6.3	Temperatursimuleringsprogram i Excel	83
6.3.1	Industri (Forsand)	83
6.3.2	Industri (Leca)	85
6.3.3	Standard (Forsand)	87
6.3.4	Standard (Leca)	90
6.3.5	Temperaturgradienter	92
7.	Diskusjon.....	95
7.1	Temperaturutvikling	95
7.2	Trykkfasthet.....	100
7.3	Egenskapsfunksjoner.....	102
7.4	Regneark.....	103
7.4.1	Simulert temperaturutvikling.....	103
7.4.2	Temperaturdifferanse mellom utstøpings- og maks temperatur	106
7.4.3	Temperaturgradienter	107
7.5	Herdekassetemperatur sammenliknet med simulert temperatur.....	108
7.5.1	Adiabatisk- og simulert temperaturutvikling.....	108
8.	Konklusjon	110
9.	Referanser.....	111
10.	Vedlegg.....	113

1. Innledning

1.1 Hensikt

Fra gammelt av har det å optimere betongblandinger vært av interesse. Ved å tilsette en rekke ulike tilsetningsstoffer er det mulig å påvirke egenskapene til betongen. Spesielt er det ved å endre mengde og type bindemiddel man i størst grad kan påvirke betongegenskapene. Ved tilsetning av pozzolaner kan sementmengden reduseres og dermed er det mulig å påvirke temperaturutviklingen i betongen slik at den blir lavere eller høyere etter ønske. Høye herdetemperaturer gir store temperaturgradienter innad i konstruksjonen. Dette kan igjen føre til økt fare for riss og dårligere betongkvalitet.

Målsetningen for oppgaven er at det gjennom et litteraturstudium skal bli økt kunnskap rundt bindemiddelets effekt på temperaturutvikling i herdefasen. I tillegg skal det utvikles et regneark som tar for seg temperaturutviklingen i herdefasen. Før betongutstøping er det gunstig å kunne simulere temperaturforløpet under herding, slik at betongblandingene kan optimeres. Både med tanke på å tilpasse herdetemperaturen ut ifra formål konstruksjonen skal ha, samtidig som det kan tas hensyn til forholdene utstøpingen foregår i.

1.2 Materialer

Oppgaven tar for seg et litteraturstudium i tillegg til en praktisk del hvor første periode av arbeidet vil bli brukt på betong laboratoriet. Her skal det blandes flere ulike betongblandinger for videre bruk i oppgaven. Ut fra disse prøvene skal det støpes terninger for trykktesting samtidig som en del av betongblandingene skal brukes i herdekasser for måling av temperaturutvikling under herdefasen.

For blanding av betong skal det benyttes en rekke materialer:

Sement

- Norcem Industri
- Norcem Anlegg

Pozzolan

- Elkem Microsilica
- Flygeaske

Vanlig Tilslag

- Forsand 0-5mm
- Forsand 5-8 mm
- Forsand 8-11 mm
- Forsand 11-16 mm

Lett Tilslag

- Leca 3-6 mm
- Leca 4-8 mm

Tilsetningsstoffer

- Dynamon SX-N

2. Teori

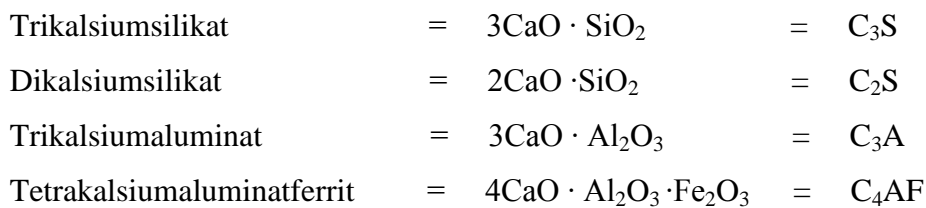
2.1 Sementsammensetning

Portlandsement er en sement fremstilt ved formaling av portlandsklinker, en liten mengde gips i tillegg til små mengder ikke skadelige uorganiske materialer. Portlandsklinker er et mellomprodukt som hovedsakelig består av kalsiumsilikater fremstilt ved brenning og delvis smelting av en homogen blanding stoffer. I hovedsak inneholder blandingen forbindelser av kalsium, silisium, aluminium og jern. [2]

Tabell 1: Kjemisk sammensetning Portland sement. [1]

Oksider		Symbol	Andel
Kalsiumoksid	CaO	C	60-67 %
Silisiumoksid	SiO ₂	S	17-24 %
Aluminiumoksid	Al ₂ O ₃	A	4-7 %
Jernoksid	Fe ₂ O ₃	F	1,5 – 5 %
Svoveltrioksid	SO ₃	S	0,5 – 3,5 %
Magnesiumoksid	MgO	M	1 – 5 %
Alkalioksid	K ₂ O + Na ₂ O	K	0,2 – 1,5 %

En typisk klinkermineralsammensetning for alminnelig Portland sement er [1]:



2.2 Hydratisering

2.2.1 Hydratisering av klinker

Når sement og vann reagerer med hverandre endrer klinkermineralene seg til nye komplekse forbindelser. De viktigste av disse reaksjonene er reaksjonen til kalsium silikat hydrater, $C_3S_2H_3$. Sementens bindemiddelegenskaper kommer frem og er knyttet til dette stoffet som fremstår når klinkermineralene C_3S og C_2S reagerer med vann (hydratiseringsprosess). De aluminiumholdige klinkermineralene bidrar i liten grad til sementens sluttstyrke, men har mer betydning i overgangen fra mer eller mindre flytende/plastisk materiale til faststoff (avbindingen).

Hydratiseringsreaksjon til de fire klinkermineralene er som følger: [2]

Tabell 2: c_3s : [1]

$2(3Ca \cdot SiO_2) + 6H_2O$	→	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2$
$2C_3S + 6H$	→	$C_3S_2H_3 + 3CH$
<i>Trikalsiumsilikat + Vann</i>	→	<i>C-S-H + Kalsiumhydroksid</i>

Tabell 3: c_2s : [1]

$2(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O$	→	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2$
$2C_2S + 4H$	→	$C_3S_2H_3 + CH$
<i>Dikalsiumsilikat + Vann</i>	→	<i>C-S-H + Kalsiumhydroksid</i>

Tabell 4: c_3A Danner enttringitt: [1]

$C_3A + 6H$	→	C_3AH_6
$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O + CaSO_4 \cdot 2H_2O$	→	$C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$
<i>Trikalsiumaluminat</i>	→	<i>Enttringitt</i>

Tabell 5: C_3A Danner monosulfat: [1]

$C_3A + H_2O + C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 31H_2O$	→	$C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$
<i>Trikalsiumaluminat + Vann + Ettringitt</i>	→	<i>Monosulfat</i>

C_4AF vil ha de samme reaksjonene som C_3A , se tabell 4 og 5. Reaksjonene vil imidlertid gå saktere.[1]

Størstedelen av de ulike delene i Portlandsklinkeren er reaktiv med vann. Klinkeren danner reaksjonsprodukter med vann som har veldig lav løselighet i nettopp vann. Reaksjonen med vann er eksoterm, som innebærer at varme blir generert. Hovedreaksjonsproduktet er kalsium silikat hydrat også kalt C-S-H. Dette produktet er hovedårsaken for den høye mekaniske styrken og tettheten til herdet betong. [1] [2]

2.2.2 Hydratiseringshastighet

Hydratiseringshastigheten varierer ved ulike parameter: [2]

- Sementsammensetning
- Sementens finhet
- Temperatur

Den er derimot ikke avhengig av betongens v/c-tall dersom ikke det er av ekstreme verdier. Dette viser ganske klart forskjellen mellom hydratisering og herding. Herding er avhengig av betongens v/c-tall, mens hydratisering ikke påvirkes av den i nevneverdig grad. Ved å benytte ulike tilsetningsstoffer kan hydratiseringsforløpet til en viss grad tilpasses etter ønske. Under vil det bli kort redegjort for de ulike parametrene og deres innvirking på hydratiseringshastigheten. [2]

2.2.2.1 Sementsammensetning:

Sementens kjemiske sammensetning er svært innflytelsesrik på betongens varmeutvikling. Som tidligere nevnt består Portlandssement hovedsakelig av 4 hovedtyper av klinker. C_3A har en veldig hurtig varmeutvikling mens C_3S gir en relativt rask varmeutvikling. Ved å ha høye andeler av disse to klinkermineralene i sementen bidrar det til raskere varmeutvikling og

Temperaturutvikling i betong

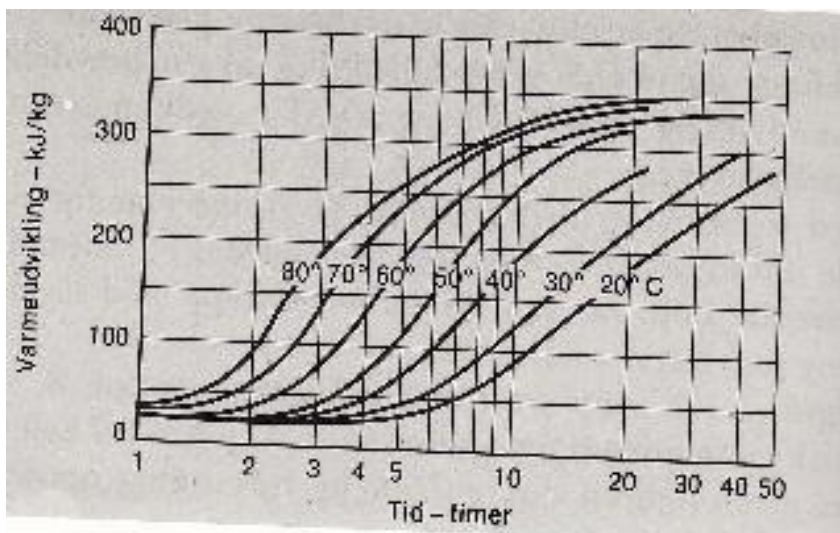
høyere varme. For C_2S og C_4AF er varmeutviklingen mye lavere. Ved å ha høye andeler av disse i sementen oppnår man tregere varmeutvikling og lavere total varme. Siden hydratiseringshastigheten er avhengig av temperatur ser vi at også hydratiseringshastigheten vil bli påvirket av sementsammensetningen pga dens innvirkning på varmeutvikling. [2]

2.2.2.2 Sementens finhet:

Sementens finhet er med å påvirke hydratiseringsprosessen. Desto finere sementen er desto større reaktivt overflateareal er tilstedet til å reagere med vann som gir økt reaksjonshastighet og dermed økt varmeutviklingshastighet. [2]

2.2.2.3 Temperatur:

Hydratiseringshastigheten øker betraktelig med økt temperatur. Tiden det tar å oppnå en gitt varmeutvikling er vesentlig kortere for betong ved f.eks 80°C enn den er for betong ved 20°C. [2]



Figur 1: Varmeutviklingskurver. [2]

Fra figur 1 kan man se og nærmest anta en parallellforskyvning av kurvene når temperaturen endrer seg. Siden x-aksen, som indikerer tiden, er logaritmisk inndelt kan man si at forholdet mellom hastighetene for to forskjellige kurver med ulik temperatur er konstant gjennom hele

prosessforløpet. Denne sammenhengen mellom temperatur og hydratiseringshastighet kan uttrykkes ved en hastighetsfaktor, H . Hastighetsfaktoren forteller noe om reaksjonshastigheten ved en vilkårlig men konstant temperatur i forhold til reaksjonshastigheten ved en referansetemperatur. Hastighetsfaktoren, H , tillater omregning av prosessstider ved én temperatur til den ekvivalente prosessstiden ved en annen temperatur. [2]

2.2.3 Hydratiseringsgrad

Del kapittel er skrevet av [2]

Hydratiseringsgraden ved et gitt tidspunkt defineres som den foreløpige brøkdel av hydratisering. Definisjonen gjelder i prinsippet den omsatte brøkdel av opprinnelige sementmengden, men siden hydratiseringsprosessen mer eller mindre kan uttrykkes ved en enkelt komponents reaksjon med vann, kan hydratiseringsgraden uttrykkes ved hjelp av det ikke-fordampelige vannet eller som hydratiseringsvarmen.

Hydratiseringsvarmen kan uttrykkes på 3 ulike måter: [2]

$$\text{Hydratiseringsgrad, } \alpha = \frac{\text{reagert sement}}{\text{total sement}} = \frac{w_n}{w_n(\infty)} = \frac{w_n}{0.23} = \frac{Q}{Q_{\text{slutt}}}$$

Hydratiseringsgraden vokser med hydratiseringshastigheten og hydratiseringstiden. De faktorene som influerer hydratiseringshastigheten, vil derfor også være bestemmende for hvilken hydratiseringsgrad som oppnås etter en gitt tid, og hvilken hydratiseringstid som er nødvendig for å oppnå en gitt hydratiseringsgrad. [2]

2.2.4 Hydratiseringsvarme

Når vann og sement reagerer utvikles varme. De forskjellige klinkermineralene har en varmeutvikling som utgjør:

- C_3S : 500 J/g
- C_2S : 260 J/g
- C_3A : 900 J/g

Temperaturutvikling i betong

- C_4AF : 300 J/g

Trikalsiumsilikat, C_3S , gir en hurtig styrkeutvikling og en høy 28 døgns fasthet.

Varmeutviklingen er også relativt rask og ved full hydratisering er den opp mot 500 kJ/kg. [1]

Dikalsiumsilikat, C_2S , reagerer mye saktere enn C_3S . Når man har en treg styrkeutvikling vil man til gjengjeld få et betraktelig større bidrag til slutfastheten. For C_2S er dette bidraget svært høyt. Varmeutviklingen for denne klinkeren er lav og ligger rundt om 260 kJ/kg ved full hydratisering. [1]

Trikalsiumaluminat, C_3A , bidrar til en meget hurtig fasthetsutvikling, men selve bidraget til den totale fasthetsutviklingen er lav. Varmeutviklingen pga C_3A er rask og stiger til totalt 900 kJ/kg. I enkelte tilfeller tilsettes sementen gips for å bremse størkningen og dermed oppnå et høyere bidrag til fasthetsutviklingen over tid. Når gips tilsettes oppnår man et enttringittlag rundt klinkeren som igjen har en retarderende effekt på reaksjonen. [1]

Tetrakalsiumaluminatferrit, C_4AF , bidrar ikke i nevneverdig grad til fasthetsutviklingen i betong. Varmeutviklingen går sakte og ender på ca 300 kJ/kg. [1]

2.2.5 Pozzolan

Ved å tilsette pozzolan i betong kan man redusere mengde sement som kreves. I så måte er det gunstig både med tanke på miljø og økonomiske aspekter. Man kan redusere mengde CO_2 utslipp betraktelig ved reduksjon av portlandssement. [1]

Pozzolan er et naturlig eller et kunstig materiale som inneholder silikat i en reaktiv form. En mer formell definisjon er at pozzolan er en silisiumholdige eller silisium og aluminiumholdig materiale som i seg selv besitter lite eller ingen sementbaserte egenskaper, men vil i finmalt form og ved tilstedeværelse av fuktighet, oppnå en kjemisk reaksjon med kalsiumhydroksid ved ordinære temperaturer og forme forbindelser som igjen besitter sementbaserte egenskaper. [8]

Silikat i kombinasjon med kalsiumhydroksid og ved tilstedeværelse av vann vil forme stabile kalsiumsilikater som har sementbaserte egenskaper. [8]

Under vises hvordan reaksjonen foregår: [1]

Tabell 6: Pozzolanreaksjon. [1]

$2SiO_2 + 3Ca(OH)_2$	→	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$
$2S + 3CH$	→	$C_3S_2H_3$
Silika + Kalsiumhydroksyd	→	C-S-H

Generelt sett bidrar pozzolaner til saktere styrkeutvikling. Man får en styrkeutvikling med lav tidligfasthet og høy slutfasthet. Dette fører også en sakte og lav temperaturutvikling. [9]

2.2.5.1 Flygeaske

Flygeaske er det mest brukte sementbaserte materialet som suppleres i betong. Det er et biprodukt av forbrenning av kull i elektriske kraftverk. Flygeaske er et finfordelt pulver som likner Portlandssement vist i figur 2. [7]



Figur 2: Flygeaske [7]

Flygeaske er grå farget og består av massive og kuleformede partikler. Partikkel størrelsen varierer fra mindre enn 1 μm (mikrometer) til mer enn 100 μm med typisk partikkel mål på under 20 μm . Overflatearealet ligger stort sett mellom 300-500 m^2/kg . Densiteten ligger et sted mellom 1900-2800 kg/m^3 . [7]

Flygeaske er primært silikat glass som inneholder silikat, aluminium, jern og kalsium. Dosering av flygeaske i betongblandingen varierer med reaktiviteten til flygeasken og den ønskede effekten man ønsker på betongen. [7]

Temperaturutvikling i betong

Flygeaske har en lavere varme ved hydratisering enn det portlandssement har. Konsekvensen ved bruk av flygeaske blir dermed en redusert mengde av varme som bygger seg opp i en betongkonstruksjon. [7]

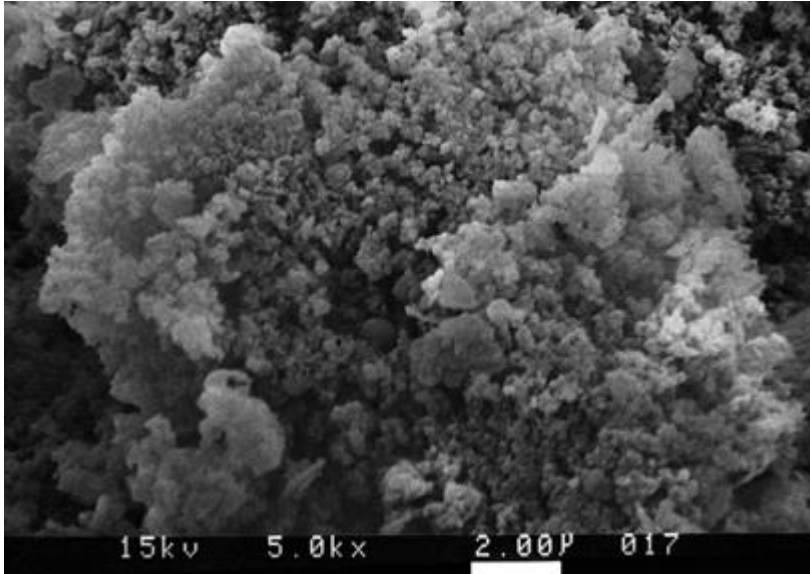
2.2.5.2 Silikastøv

Silikastøv, også kalt mikrosilika eller kondensert silikastøv er et biproduktmaterial som blir brukt som pozzolan. [7]



Figur 3: Silikastøv [7]

Dette biproduktet er et resultat av reduksjonen av høyrent kvarts med kull i en lysbueovn i produksjon/fremstilling av silisium ferrosilisium legering. Kondensert silikastøv egentlig silisiumdioksid (vanligvis mer enn 85 %) i ikke krystallisk form. Siden det er et luftbåret materiale som flygeaske, har det en kuleformet form. [7]



Figur 4: Kuleformet silikat [7]

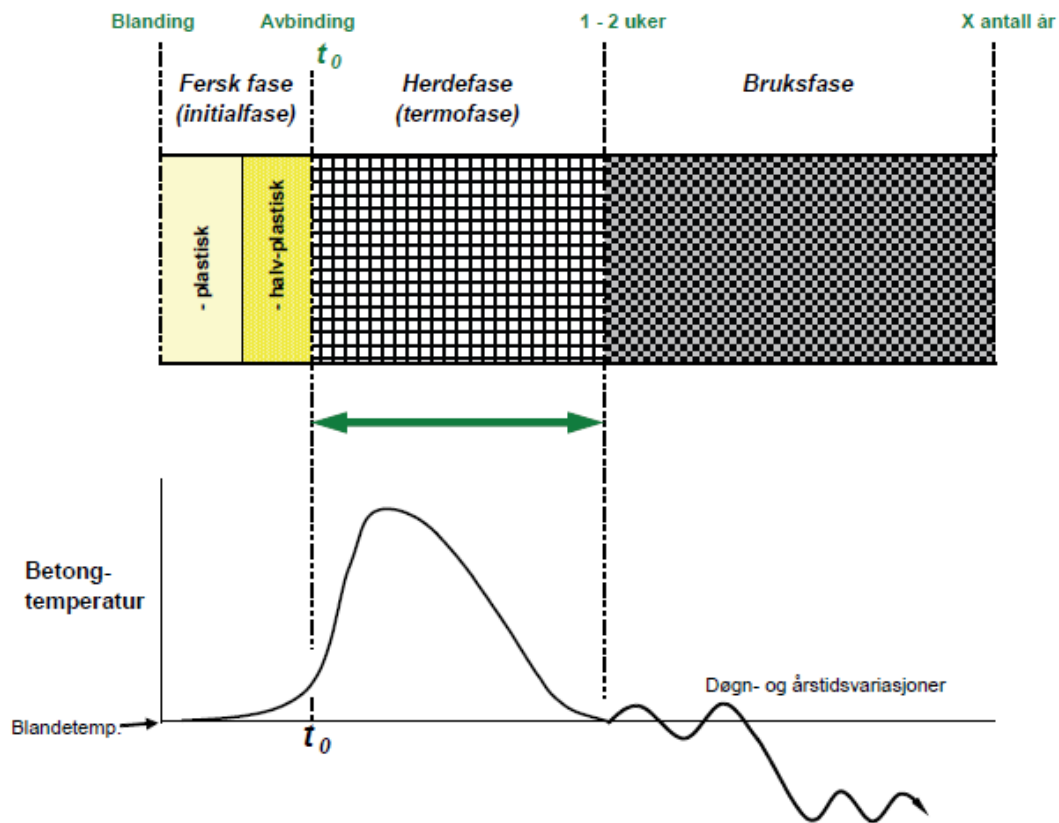
Silikastøv består av ekstremt finmalte partikler som er mindre enn $1 \mu\text{m}$ i diameter og med en gjennomsnittlig diameter på ca $0,1 \mu\text{m}$. Dette er omtrent 100 ganger mindre enn en gjennomsnittlig sement partikkel. Kondensert silikastøv har et overflateareal på ca $20\,000 \text{ m}^2/\text{kg}$. Gjennomsnittlig densitet på silikastøv partikler er generelt på et sted mellom 2,2 og 2,5. Densiteten på selve pulveret i ukomprimert enhetsvekt varierer fra $130\text{-}430 \text{ kg}/\text{m}^3$. Silikastøv fås både i pulverform og i flytende form. Støvet blir brukt i en mengde på ca 5-10 % av massen til det totale sementbaserte materialet. Bindemiddelet blir benyttet i bruksområder der det er nødvendig med høy grad av tetthet i betong og når man trenger en høyfast betong. [7]

2.3 Temperaturutvikling i betong

Temperaturutviklingen i en betongkonstruksjon avgjøres ut ifra produsert varme pga sementens reaksjon med vann i tillegg til varmetap som oppstår ved temperaturforskjeller mellom systemet og omgivelsene.

Ved økt kunnskap rundt betongens varmeutvikling og varmetap kan man lettere unngå store temperaturgradienter innad i konstruksjonen og på den måten forebygge spenningsoppbygging og tilsvarende riss i betong grunnet temperaturforskjeller.

Av figur 5 kan man se temperaturutviklingen i betong fra tidspunkt ved miksing og flere år frem i tid. Man kan dele inn i 3 faser som betongen går igjennom. [12]



Figur 5: Betong som utvikler seg og går igjennom de 3 fasene. [12]

Tid t_0 er ved miksing av betong. Når vann tilsettes blanding starter den ferske fasen (initialfasen). Denne fasen varer til betongen har steget ca 2°C utover utstøpingstemperaturen.

Temperaturutvikling i betong

Når betongen er ferdig med den ferske fasen, kommer man til avbindigs tidspunkt. Dette tidspunktet kan variere, men ligger som regel mellom 1,0-3,5 timer etter miksing. Her stater herdefasen som egentlig varer hele betongens levetid.

Etter 1-2 uker har betongen som regel opparbeidet seg nok styrke til å bli brukt til det aktuelle bruksområdet. Her begynner bruksfasen som varer til betongen rives.

2.3.1 Varmeutvikling i betong

Det er ulike faktorer som har innvirkning på varmeutviklingen i betong. De viktigste er: [1]

1. Sementsammensetning/komposisjon
2. Sementens finhet
3. Type og dosering av tilsetningsstoffer (SP-stoff)
4. Temperatur
5. Pozzolan (Silikastøv og/eller Flygeaske)

Varmeutvikling bestemmes ut ifra hydratiseringsvarme, se 2.2.4. Dersom man ser på sementen som helhet vil en fullstendig hydratisering av Portlandssementen føre til en varmeutvikling på ca 400-500 kJ/kg. Som en grov retningslinje kan man tenke seg at hydratisering av sement genererer en temperaturstigning på omtrent 4,7-7,0°C per 50 kg sement per m^3 betong i 18-72 timer. [6] [1]

En fullstendig hydratisering vil imidlertid være vanskelig å oppnå. Hydratiseringsgraden er avhengig av mengde vann tilgjengelig. Etersom hydratiseringsprosessen pågår vil klinkermineralene innkapsles i C-S-H. Vann vil ikke i samme grad komme i kontakt med sementkornene. Diffusjonstettheten i sementpastaen er avgjørende for den videre hydratisering. [1]

Økt finhet i sement gir økt overflateareal som kan bløtes. Dette resulterer i en akselerasjon av reaksjonen mellom sement og vann som igjen forårsaker en økt hastighet på varmefrigjøring i tidlig alder. Dette trenger ikke å påvirke den totale styrken som utvikles over tid, men hydratiseringsgraden blir fremmet og derfor også varmeutviklingen og tidlig styrkeutvikling. [1][2][5]

Generelt sett vil høyere innhold av sement resultere i høyere temperaturutvikling. Når man sammenlikner betonger med samme mengde sement, men ulikt v/c-tall vil blandingene med

Temperaturutvikling i betong

høyere v/c-tall ha mer vann og mikrostrukturelt rom ledig til hydratisering av sement. Dvs. mer av sementen blir hydratisert og hydratisering vil bli hurtigere. Dette resulterer i en økt hastighet på varmeutviklingen. Lavt v/c-tall fører til redusert grad av hydratisering. [1] [2][5]

Sementsammensetning påvirker hydratiseringsvarmen. Sement med høyt innhold av trikalsiumsilikat og trikalsiumaluminat vil produsere mer varme enn andre sementer. C_3S og C_3A genererer mer varme, og ved en høyere hastighet enn C_2S , eller andre sement forbindelser.. [5]

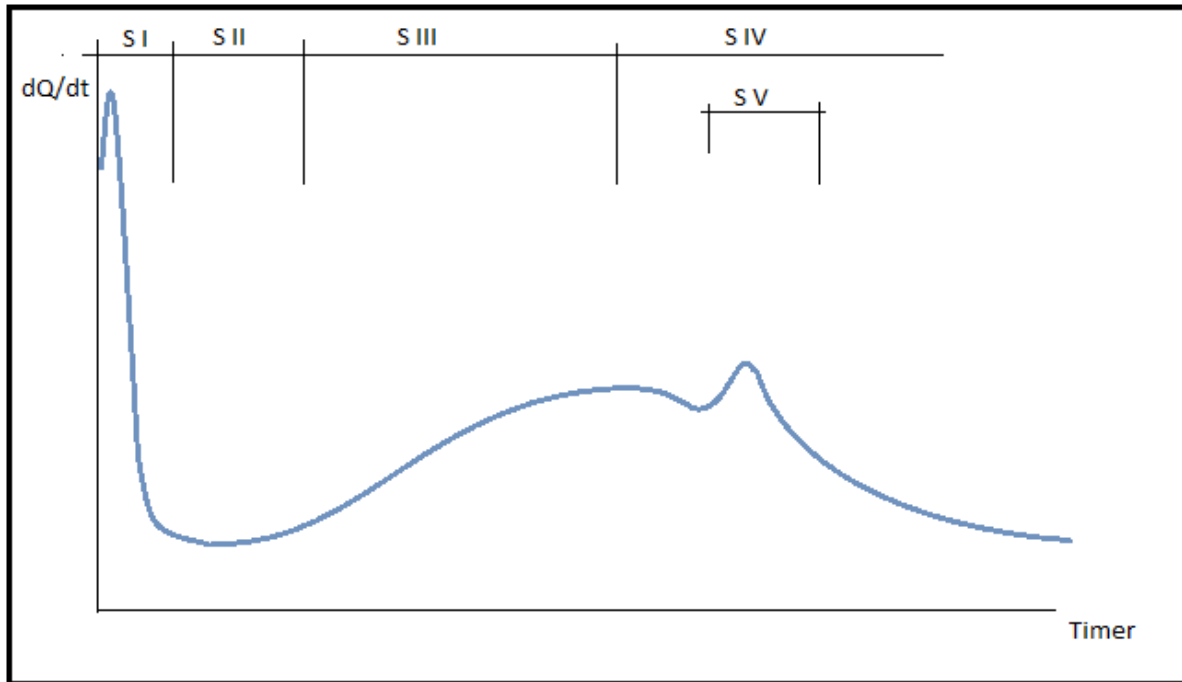
Herdebetingelser som fuktighetsforhold, herde- og omgivelsestemperatur har også innvirkning på varmeutviklingen. Høyere temperaturer akselererer hastigheten betraktelig på hydratisering og varmegjennomføring ved tidlig alder (mindre enn 7 dager). [1] [2][5]

Kjemiske tilsetningsstoffer som akselererer hydratiseringen vil også akselerere varmegjennomføringen, mens tilsetningsstoffer som retarderer hydratiseringen vil forsinke varmeutviklingen.

Ved å bytte ut deler av sementen med pozzolan kan både hastigheten og mengde varmeutvikling reduseres betraktelig. [5]

Temperaturutvikling i betong

Siden sementen inneholder klinkermineraler med ulike egenskaper vil varmemengden som produseres under herding variere med tiden. Ut ifra figur 6 ser vi hvordan varmeutviklingen er delt opp i 5 reaksjonsperioder. [1]



Figur 6: Indikerer varmeutviklingens 5 hovedfaser. [1]

S I: Dette er den innledende reaksjonen som oppstår når sement kommer i kontakt med vann. Fra figur 6 kan man se at kurven har en topp som varer i ca 10-20 min ved 20 °C. Denne stigningen reflekterer varmen av løsnings i tillegg til tidlig overflatereaksjoner av klinkermineralene. I denne fasen foregår det i hovedsak dannelse av ettringitt. Innledende varme ligger vanligvis fra 20-30 kJ/kg. [1]

S II: Perioden/fasen blir kalt den sovende fasen og varer som regel i 2-4 timer. Denne tidsperioden kan til en viss grad styres ved bruk av tilsetningsstoffer. Oppløsning fortsetter til kalsiumhydroksidoppløsningen når et kritisk nivå som setter i gang hydratiseringen av C_3S . Lengden på denne perioden er veldig avhengig av temperaturen. Betongen vil i denne fasen begynne å størkne. [1]

Temperaturutvikling i betong

S III: Kalles for akselerasjonsfasen. I denne fasen øker reaksjonshastigheten gradvis i hovedsak pga reaksjonen hvor $C_3S \rightarrow C-S-H$. Betongen setter seg og begynner og utvikle styrke. Fase 3 varer som regel i 5-10 timer ved 20 °C, men er veldig avhengig av temperatur. [1]

S IV: I denne fasen binder C-S-H mer vann. Reaksjonsraten er retarderende og avtar gradvis siden interne transportprosesser går tregere pga diffusjon kontroll. [1]

S V: Sement som inneholder C_3A kan oppnå S V toppen vist I figur 6. Toppen viser omdanning av enttringitt til monosulfat som har blitt nevnt tidligere i denne oppgaven. [1]

2.3.2 Adiabatisk temperaturutvikling

En adiabatisk prosess er en termodynamisk prosess hvor det ikke blir utvekslet noe varme mellom systemet og omgivelsene. Ingen varme slipper unna prøven under målingene ($Q=0$). Dvs. temperaturen på prøven øker jevnt. Dermed foregår hydratiseringen under økende temperatur. I virkeligheten vil det alltid være varmetap til omgivelsene uansett hvor god isolering man har. En adiabatisk temperaturstigning på 50°C er normalt. Den kan allikevel stige over 60°C. Isolasjonstype og tykkelse samt konstruksjonstykkelse vil alle være med å bestemme det totale varmetapet.

I teorien regnes den adiabatisk temperaturøkningen ved: [1]

$$\Delta\theta = \frac{Q_{\infty} \cdot C}{\rho_r \cdot C_b}$$

$\Delta\theta =$ temperaturøkning, (°C)

$Q_{\infty} =$ mengde varmeutvikling per enhet sement, (kJ/kg sement)

$C =$ mengde sement, (kg/m³)

Temperaturutvikling i betong

$C_b = \text{betongens spesifikke varmekapasitet, (kJ/kg}^\circ\text{C)}$

$\rho_r = \text{betong densitet, (kg/m}^3\text{)}$

Det som er av enda større interesse enn den totale varmeutviklingen i betong er tidsforløpet til varmeutviklingen, da denne er den bestemmende faktoren for temperaturgradienter og temperaturen i betongen.

2.3.3 Varmetap

Varmetapet oppstår når man har temperaturforskjeller i systemet og omgivelsene rundt systemet. Det vil alltid være transport av varme fra et sted med høy temperatur til områder med lav temperatur. [3]

Varmetap i betong er mer avansert enn selve varmeutviklingen og krever at det tas hensyn til flere parametere. I hovedsak er det tre ulike parametere som har noe å si for det totale varmetapet:

- Varmeledning
- Konveksjon
- Stråling

2.3.4.1 Varmeledning

Varmeledning motstand er en konstant størrelse for en gitt konstruksjon og er avhengig av 2 parameter. Den bestemmes ut ifra type materiale konstruksjonen består av samt tykkelsen på de ulike lagene. [3]

Varmeledning motstanden kan skrives slik:

$$m = d/k$$

$d = \text{lagtykkelse, m}$

$k = \text{varmeledningsevnen til materialet, kJ/mh}^\circ\text{C0,}$

Temperaturutvikling i betong

$m = \text{varmeledningsmotstand, } m^2 h^\circ C / kJ$

Tabell 7: Eks på varmeledningsevne, k , i ulike materialer. [3]

Fersk betong	8,4
Herdet betong	5,9
Lett betong	2,9
Treverk (fuktig)	0,67

Den totale varmeledningsmotstanden finnes ved å legge sammen motstanden fra ulike materialsjikt en konstruksjon er satt sammen av.

Tabell 8: Eks på varmeledningsmotstand, m , for finérplate. [3]

Finér 22 mm	0,033
-------------	-------

2.3.4.1.1 Avkjølingstall

Avkjølingstallet bestemmes ut fra forholdet mellom varmekapasiteten til et gitt volum og varmetapet fra den totale overflaten. Dersom man tar utgangspunkt i enn bjelke og enn vegg, vil bjelken bli lettere avkjølt siden den har større overflateareal i forhold til det totale volumet. Dersom man har god overflateisolasjon vil målene på konstruksjonen ha mindre innvirkning enn tilfellet vil være ved liten, eller ingen isolasjon. [3]

Avkjølingstallet uttrykkes gjennom likning:

$$a_k = \frac{\sum(K \cdot A)(h^{-1})}{V \cdot \rho \cdot C_p}$$

$a_k = \text{avkjølingstall}$

$K = \text{transmisjonstall i overflaten}$

$A = \text{overflateareal}$

$V = \text{volum}$

Temperaturutvikling i betong

$\rho = \text{romvekt}$

$C_p = \text{varmekapasitet}$

Ved stort avkjølingstall får man økt varmetap til omgivelsene rundt. Transmisjonstallet kan skrives som: [3]

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

$m_f = \text{motstandstall, forskaling}$

$m_i = \text{motstandstall, isolasjon}$

Dette er når man ser bort ifra varmetap pga stråling, konveksjon og fordamping.

2.3.4.1.2 Avkjølingstall ved endimensjonal betraktning

Avkjølingstallet vil se noe annerledes ved endimensjonal betraktning. Volumet det blir delt på i avkjølingslikning blir erstattet med en bredde, d . Vi får en ny avkjølingsformel.

Avkjølingstall for endimensjonal betraktning:

$$a = \frac{\sum K}{d \cdot \rho \cdot C_p}$$

2.3.5 Fourier's likning

I en betongkonstruksjon hvor varme produseres vil det alltid forekomme varmeoverføring, Q , mellom konstruksjonen og omgivelsene rundt systemet. Ved å integrere varmeoverføringen med hensyn på tiden, t , kan man finne ut hvor store mengder varme som går tapt.

Den totale varmeoverføringsmengden, Q , over et gitt tidsintervall kan uttrykkes: [15]

Temperaturutvikling i betong

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt \quad (kJ)$$

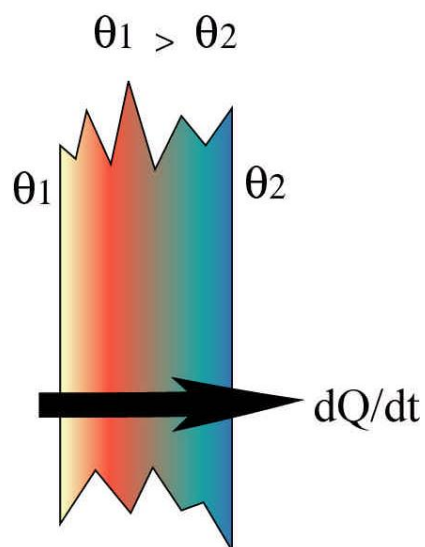
Ved stasjonær varmeledning hvor $\frac{d\theta}{dt} = 0$, får man $Q = \text{konstant}$. [15]

$$\Rightarrow Q = \dot{Q} \cdot \Delta t$$

Ved å derivere varmeoverføringsmengden med hensyn på tiden vil man kunne innhente data for hastigheten på varmetransporteringen.

Varmeoverføringshastighet:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$$



Figur 7: Varme som går fra varm til kald sone [13]

Temperaturutvikling i betong

dQ/dt fra figur 7 viser varmestrøm per tidsenhet. Varmen strømmer fra varmt til kaldt område slik pilen indikerer. [15]

Høy temperatur assosieres med høy molekylære energi. Når nabomolekyler kolliderer, som de konstant gjør, vil det være overføring av energi fra molekyler med mer energi til molekyler med lavere energi. Dersom det i tillegg er tilstedeværelse av temperaturgradienter må energi overføring ved varmeledning oppstå i retning av den avtakende temperaturen.

Varmeoverføringen kan uttrykkes ved hjelp av Fourier's likning. [14]

Fourier's lov i en dimensjon blir da: [17]

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = -k \frac{dT}{dx}$$

k = termisk konduktivitet (W/mK)

A = Massens areal (m^2)

\dot{Q} = varmeoverføringshastighet

\dot{q} = varmefluks/varmeoverføring (W/m^2)

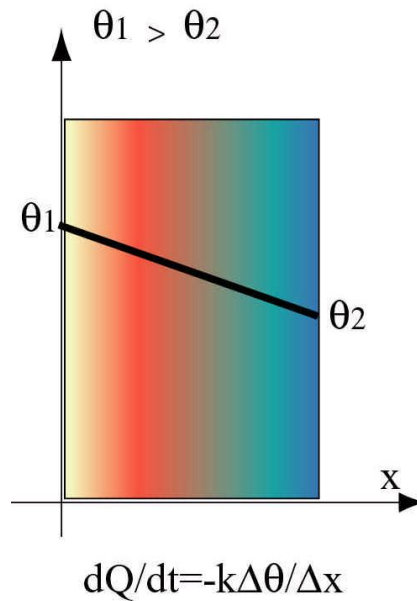
T = temperatur ($^{\circ}C$)

x = bredde (m)

Minustegnet i Fourier's lov kommer av positiv varmeledning ved avtagende temperatur.

Minustegnet viser at varme strømmer fra kaldere til varmere området i betongen. Dersom temperaturen avtar med x vil \dot{q} bli positiv og flyte i x -retning. Dersom temperaturen øker med x vil \dot{q} bli negativ og vil dermed flyte i motsatt retning av x . [15] [17]

Temperaturutvikling i betong



Figur 8: Negativ temperatur-derivert i positiv x-retning [13]

Figur 8 viser et snitt fra vegg. Ut fra formel $dQ/dt = -k\frac{\Delta\theta}{\Delta x}$, ser man at det er nødt til å være temperaturgradienter i vegg for å få varmflyt gjennom konstruksjonen. [13]

Når betong har områder med ulik temperatur vil varme fra området med høy temperatur strømme til området med lavere temperatur. På denne måten vil temperaturen i betongen jevne seg ut. Varmestrømmen kan gjennom forsøk vises å være proporsjonal med første potens av temperaturfallet. Dvs. varmestrømmen øker proporsjonalt med den romlig deriverete av temperaturen. [13]

Fouriers likning i 2 dimensjoner:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{Q}$$

ρ = Betongdensitet

C_p = varmekapasitet betong

k = termisk konduktivitet

T = temperatur

$t = \text{tid}$

$\dot{Q} = \text{indre varmeutvikling}$

2.3.6 Arrhenius- funksjon

Kjemisk intuisjon og sunnfornuft tilsier at desto høyere temperatur som forekommer i betong desto raskere vil en gitt kjemisk reaksjon foregå. Rent kvantitativt kan dette forholdet mellom hastigheten på reaksjonen som foregår og temperaturen bli bestemt ved hjelp av Arrhenius-funksjon. Ved høyere temperaturer vil sannsynligheten for at to molekyler krasjer være større enn ved lavere temperatur. Denne høye kollisjonsfrekvensen resulterer i en økt kinetisk energi som igjen har en effekt på aktiveringsenergien til reaksjonen. Aktiveringsenergien er mengde energi som kreves for å sikre at en reaksjon skjer. [4]

Arrhenius- funksjon er en modell som kan benyttes til å beregne temperaturforløp og/eller effekten temperaturen har på reaksjonshastigheten. Den er med på å beskrive relasjonen mellom kjemisk aktivitet og temperatur i en reaksjon. Ut i fra denne funksjonen kan du finne hydratiseringshastigheten, $H(\theta)$ og aktiviseringsenergi, $E(\theta)$ ved en gitt temperatur (θ) og modenhet, M .

Arrhenius- funksjon: [4]

$$k = A \times e^{-\frac{E_a}{R \times T}}$$

$k = \text{Hastighetskonstant}$

$A = \text{Frekvens faktor}$

$E_a = \text{aktiviseringsenergien}$

$R = \text{Universal gasskonstant, } 8,314 \text{ J/mol} \cdot ^\circ\text{C}$

$T = \text{temperatur i kelvin}$

2.3.7 Hastighetsfunksjon

Hastighetsfunksjonen, $H(\theta)$, bygger på Arrhenius- formel. Denne formelen forteller noe om hydratiseringshastigheten ved en gitt temperatur, θ , i forhold til hydratiseringshastigheten ville vært ved 20°C. Dette gjør at Arrhenius- funksjon kan omskrives. [1]

Temperaturutvikling i betong

Når man ser nærmere på Arrhenius- funksjonen kan man gjøre enkelte forenklinger. Temperaturutviklingen i betongen måles over 3-4 døgn og spenner over ett avgrenset temperatur området. Med utgangspunkt i dette kan man anta frekvensfaktor A som en konstant.

Hastighetskonstanten k er den samme som hydratiseringshastigheten, $H(\theta)$. E_a er avhengig av temperaturen og skrives dermed som, $E(\theta)$

$$k=H(\theta).$$

$$E_a=E(\theta)$$

Hydratiseringshastigheten vil videre bli definert som 1,0 ved 20°C. For at dette skal la seg gjøre må $A=1,0$ og $T=0$.

$$T = \theta = \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + \theta} \right)$$

$$A = 1,0$$

$$\Rightarrow H(20) = 1,0$$

Hastighetsfunksjonen uttrykkes ved likning:

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

Temperaturutvikling i betong

$E(\theta) = \text{aktiviseringsenergi, J/mol}$

$\theta = \text{temperatur, } ^\circ\text{C}$

$R = \text{gasskonstant, } 8,314 \text{ J/mol} \cdot ^\circ\text{C}$

$E(\theta) = A + B(20 - \theta) \text{ for } \theta < 20^\circ\text{C}$

$B = 0 \text{ for } \theta > 20^\circ\text{C}$

A og B er empiriske konstanter som bestemmes ved hjelp av kurvetilpasning av fasthetsutvikling ved 20°C og opp til omtrent 50 % av 28 døgns fasthet. A og B styres av v/c-tall, type- og mengde pozzolan og sementtype. Normale verdier ligger på ca 33500 J/mol og 1000-1500 J/mol $^\circ\text{C}$ for henholdsvis A og B. [1][3]

2.3.8 Modenhetsprinsippet

Tid og temperatur er de to viktigste parametrene som påvirker fasthetsutviklingen. Den kombinerte effekten av tid og temperatur blir kalt modenhet. Modenheten, M, blir også kalt for den virtuelle alderen til betongen. Konseptet modenhet fungerer slik at dersom du har en bestemt modenhet vil du ha samme fasthet, uavhengig av hvordan tidsforløpet eller temperaturforløpet har utartet seg. [3]

Ut i fra hydratiseringshastigheten, $H(\theta)$, er det mulig å kalkulere fremgangen til hydratiseringen for ulike temperaturmålinger. Dette blir gjort ved å kalkulere betongens tilsvarende alder ved 20°C . Dvs. herdetiden som er nødvendig for å oppnå samme grad av hydratisering ved 20°C som observert i det faktiske tilfellet.

Modenheten blir beregnet ved tidsintegralet av hydratiseringshastigheten fra miksing av betongblanding, (t_0) til tiden t . Funksjonen blir integrert med hensyn på tiden. [1]

Vi får da likning for modenhet:

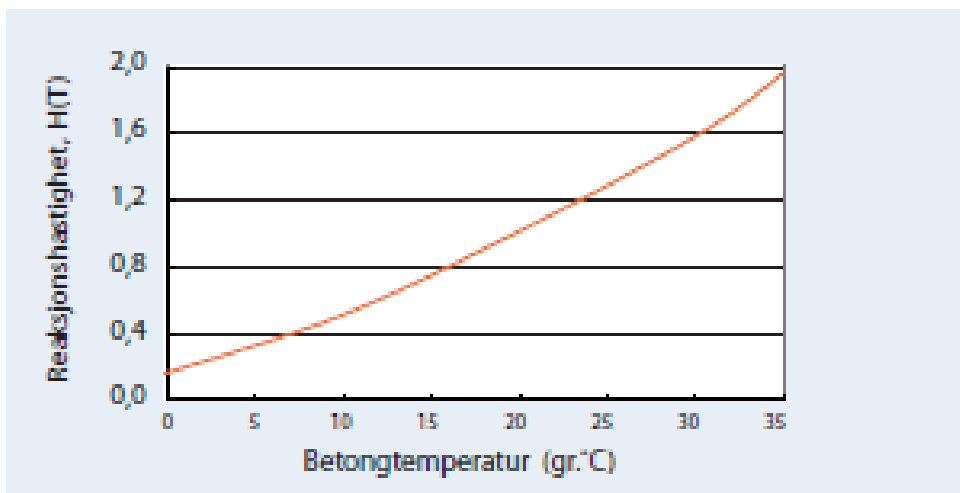
$$M = \int_{t_0}^t H(\theta) dt, \quad \theta = \theta(t)$$

$$\Rightarrow M = \sum_{i=1}^{i=n} H(\theta) \cdot \Delta t$$

2.3.9 Temperaturpåvirkning

Hydratiseringshastigheten øker og minker med omgivelsestemperaturen. Øker temperaturen rundt konstruksjonen vil også hydratiseringshastigheten øke og motsatt. Figur 9 viser dette.

[1]



Figur 9: Relativ reaksjonshastighet H(T) ved ulike betongtemperaturer [3]

Ved utførelse av støpearbeid vil det alltid være en balansegang mellom for høy og for lav herdetemperatur. Det er i hovedsak høye herdetemperaturer som ønskes å unngås. Store temperaturgradienter forårsaker riss som kan være med å svekke konstruksjonens styrke. Adiabatiske temperaturstigninger opp mot 50 °C og høyere vil føre til hurtig fasthetsutvikling. Dette kan også føre til lavere bidrag til slutfastheten som er viktig for styrke i betong. Det ideelle scenarioet er en adiabatiske temperaturstigning på ca 35°C.

Det er en rekke tiltak man kan gjøre uten å endre på betongsammensetningen for å påvirke herdetemperaturen.

2.3.9.1 Isolering

En betongkonstruksjon vil alltid avgi varme til sine omgivelser. Ved å isolere konstruksjonen kan man redusere det totale varmetapet. Temperaturgradienter mellom omgivelsene og betong samt temperaturgradienter innad i betongen kan også reduseres ved god isolering.

Vinterstøping kan føre til ekstreme herdeforhold. Omgivelsestemperaturer under 0°C kan føre til at vannet i betongen fryser til is før blandingen har oppnådd tilstrekkelig hydratisering. Isolasjonsmaterialer med høyere motstandsdyktighet mot kulde benyttes i slike tilfeller. Det kan også tilsettes luft i betongen som gjør at den blir mer motstandsdyktig mot frost. Stillestående luft er det som gir best isolerende effekt av samtlige isolasjonstyper og er dermed svært effektivt. [10] [1]

Bruk av forskaling på hver side av en støpt betongvegg er det mest normale. Dette vil være med å holde betongblandingen på plass i tillegg til at det vil ha en viss effekt mot vind og kulde fra omgivelsene slik at temperaturgradienter blir ikke blir for store.

2.3.9.2 Nedkjøling

Ved høyere herdetemperatur enn ønsket kan vannet i betongen fordampe før ønsket hydratisering er oppnådd. Betongen kan kjøles ned på en rekke måter. Ved å legge kjølerør inni betongen kan man ved å lede kaldt vann gjennom rørene senke temperaturen i betongen. Det er også mulig å bruke kaldt vann i betongblandingen eller avkjøle betongoverflaten under herding. [1]

Når betongen kjøles ned vil temperaturutviklingen bli lavere. Dersom temperaturen styres til en ideell verdi, vil det gi en sterkere betong med redusert spenning og rissdannelser.

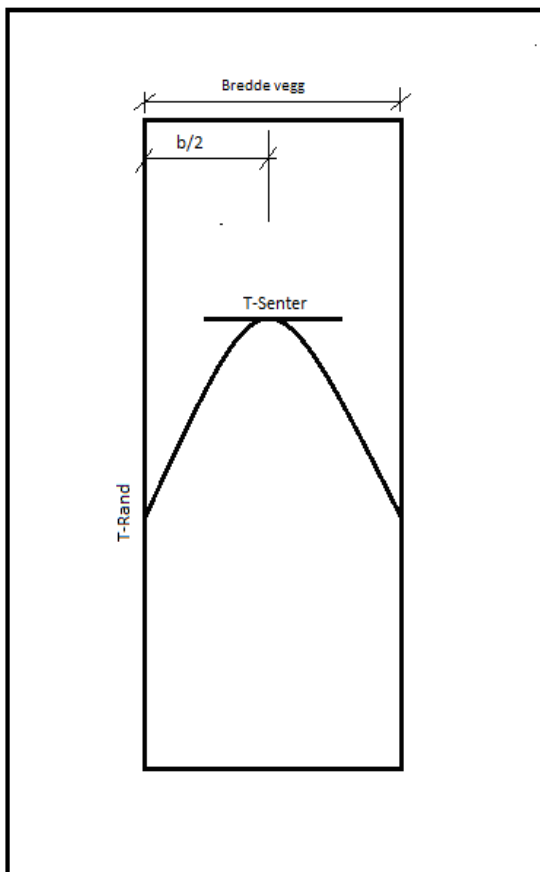
En kombinasjon av isolering og nedkjøling kan være gunstig. Relativt lav temperaturutvikling i tillegg til små temperaturgradienter mellom betong og omgivelsene vil være det beste og vil gi sterkest betong.

2.4 Innvirkning temperaturutvikling har i betong

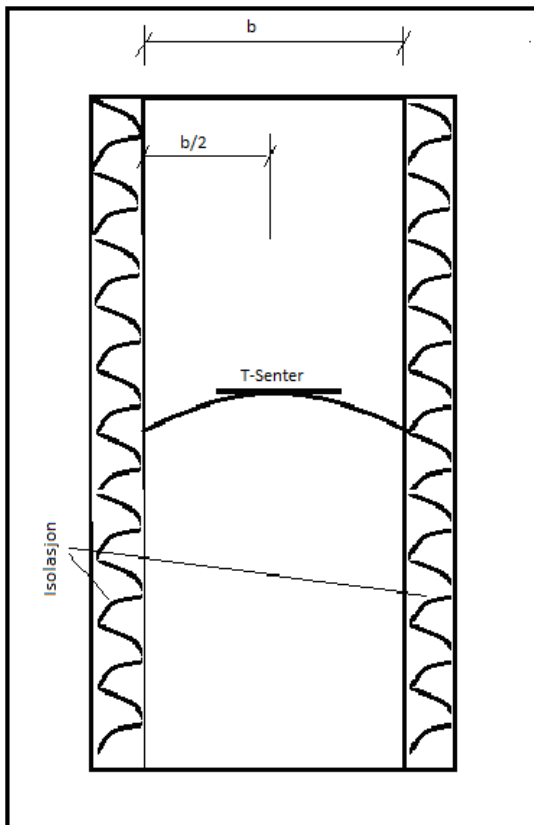
2.4.1 Spenninger

Betong oppfører seg som de fleste andre materialer. Ved oppvarmingen vil betong utvide seg, mens ved nedkjøling vil betongen trekke seg sammen. Dersom noe skulle holde betongen igjen i nedkjølingsprosessen vil dette føre til strekkspenninger i betongen som igjen kan føre til sprekker i betongen. [11]

Når betongkonstruksjoner oppnår svært høye temperaturer som 70-80°C er det mange som tror det er de høye temperaturene som forårsaker sprekker i betongen. Dette viser seg imidlertid ikke å stemme. Det er den høye temperaturdifferansen samt fastholding ved temperaturbevegelse av betong som gjør at betongen sprekker. [11]



Figur 10: Temperaturgradient i et uisolert betongverrsnitt.



Figur 11: Temperaturgradient i isolert betongtverrsnitt

Figur 10 viser hvordan temperaturgradienter oppstår i et tilfeldig uisolert betongtverrsnitt. Høy temperaturutvikling i tillegg til en åpen betongoverflate fører til store temperaturgradienter innad i konstruksjonen. Figur 11 viser samme tverrsnitt, men her er konstruksjonen isolert. I dette tilfellet blir temperaturgradientene redusert pga mindre forskjeller mellom omgivelsestemperatur og betong.

Man kan skille mellom indre og ytre fastholding.

Indre fastholding: Når varme utvikler seg i betong vil alltid kjernen være varmest. Den ytterste delen av betongen vil være vesentlig kaldere grunnet omgivelsestemperatur, vær og vind. Dermed vil denne overflaten konstant være under nedkjøling. Dette fører til at betongkjernen utvider seg mer enn betongoverflaten og dermed holder overflaten kjernen igjen fra å utvide seg. En fersk tåler kun små strekkspenninger og vil derfor mest sannsynlig spreke i overflaten. Slike sprekker oppstår i starten av varmeutviklingsfasen og som oftest lukkes disse sprekkene når betongen avkjøles igjen. [11]

Temperaturutvikling i betong

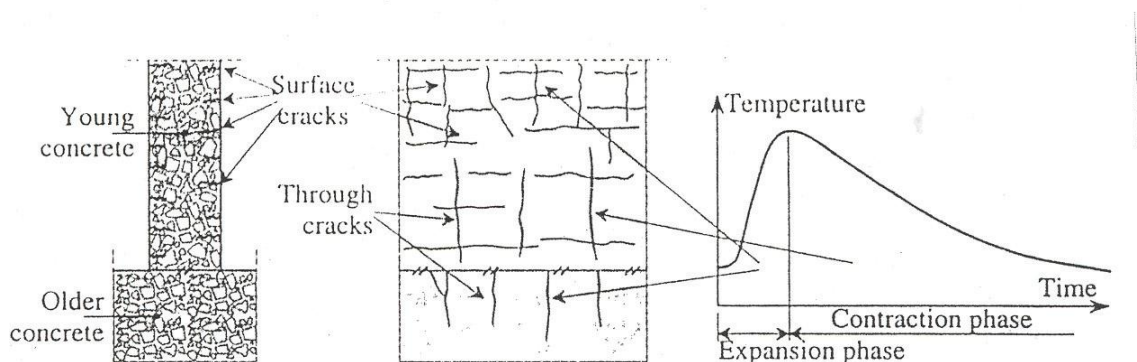
Ytre fastholding: Dersom det støpes mot noe som allerede er fast. Dvs. mot et fundament, et dekke eller en vegg må man ta hensyn til oppsprekking pga ytre fastholding. Når den ferske betongen støpes vil det utvikles varme som igjen fører til at betongen utvider seg. Når så betongen går over i nedkjølingsfasen vil betongen forsøke å trekke seg sammen, men konstruksjonen som betongen er støpt mot vil fastholde denne kontraksjonen. Resultatet av dette vil være oppsprekninger i den støpte betongen som vil være vinkelrett på kontaktflaten. Slike riss oppstår i nedkjølingsfasen og er ofte gjennomgående. [11]

2.4.2 Egenskaper

Høye herdetemperaturer kan føre til dårligere betongkvalitet. Betongstrukturen kan endre seg slik at betongen får redusert styrke. Temperaturutviklingen kan føre til forsinket ettringittdannelse. Dette kan resultere i volumutvidelse og oppsprekking i betong. [1]

2.4.3 Riss

Når moment, skjær og/eller strekk overskrider kapasiteten i konstruksjonen oppstår riss. Riss som oppstår under herding blir ofte kalt for svinriss. Riss forårsaket ved høy herdetemperaturer oppstår pga ettringittdannelse, indre/ytre fastholding og/eller ved store temperaturgradienter. [1] [18]



Figur 12: Riss i betong forårsaket av herdetemperatur. [12]

Temperaturutvikling i betong

Riss vil gjøre betongkvaliteten dårligere. Både estetisk- og styrke egenskaper vil bli svekket. I figur 12 kan man se hvordan riss ser ut. Man skiller i hovedsak mellom overflate- og gjennomgående riss.

I henhold til BS EN ISO 19903:2006 skal ikke temperaturdifferansen mellom et 100 mm bredt betongtverrsnitt overstige 10 °C. Maks temperaturen i betongen skal ikke overskride 70 °C og temperaturen i overflaten av betongen skal ikke synke under 0 °C.

2.4.4 Tiltak

For å oppnå best mulig betongkvalitet er det gunstig med lav temperaturutvikling og lave temperaturgradienter. Ved å isolere betongkonstruksjon reduseres temperaturgradientene, men temperaturen i betongen stiger. Kjøles betongen i tillegg ned får man det beste resultatet. Dersom betongen ikke avkjøles vil større andel pozzolan og redusert mengde sement være å anbefale slik at den totale varmeutviklingen reduseres.

3. Laboratoriearbeid

3.1 Forutsetninger

Formålet med denne oppgaven er å se på temperaturutvikling for blandinger med ulike mengder sement og pozzolan, i tillegg til å se på forskjeller mellom prøver med vanlig og lett tilslag. For at det skal være mulig å sammenligne disse prøvene vil det være gunstig å holde de andre komponentene faste, slik at ikke disse vil være med på å gi utslag på varmeutviklingen.

Betongkomponenter som vil være lik for samtlige blandinger:

$$\frac{v}{c+\sum kp} = 0,4$$

$$\text{Mengde sementlim} = 300 \quad [l/m^3]$$

$$\text{Matriksmengde} = 325 \quad [l/m^3]$$

$$\text{Ønsket volum} = 35 \quad [liter]$$

$$\text{Synkmål} = 180 \pm 20 \quad [mm]$$

Ved å holde disse komponentene konstante, vil de ulike blandinger kun variere med mengde sement og pozzolan.

3.2 Målemetoder

For de ulike betongmatriksene blandet på laboratoriet skal det gjøres en rekke forsøk og tester. For alle prøvene skal synkmål, luftinnhold og densitet sjekkes og tilpasses slik at blandinger er tilfredsstillende i henhold til krav satt av NS- EN 12350. For hver prøve som støpes skal det lages 10 stk terninger for trykktesting i tillegg til en herdekasse som skal fylles med betong for måling av herdetemperatur.

3.2.1 Temperaturmåling

Målingene for temperaturutvikling blir utført ved bruk av et semi- adiabatisk- kalorimeter. Denne form for målig foregår ved å bruke en velisolert herdekasse med plass til betongblanding på ca 5-15 liter. Temperaturutviklingen i betongen blir målt og registrert for hver halvtime og blir deretter konvertert til varmeutvikling som en funksjon av modenheten. I kalkulasjonene vil varmetapet til omgivelsene bli kompensert for ved å anta at varmestrømmen ut av herdekassen er proporsjonal med temperaturdifferansen mellom betongen og omgivelsene. Selve proporsjonalitetskoeffisienten blir kalt «varmetapskoeffisienten» og kan enten bli målt eller regnet ut. Denne metoden er godt egnet for målinger de første 100-200 modenhetstimene. Utover dette vil metoden bli mer unøyaktig og blir derfor ikke brukt når et større tidsspekter er påkrevd. For dette arbeidet vil temperaturutviklingen bli loggført i 60 timer etter avbindingstidspunktet. Temperaturføleren rer satt til å registrere temperaturutvikling hver halve time. [1]

3.2.2 Trykktesting

10 stk terninger med målene 100 x 100 mm vil bli støpt ut for trykktesting etter 1,2,3,7 og 28 døgn. Terningene vil det første døgnet etter utstøpingen herde ved kun en lett tildekning. Etter dette skal terningene tas ut av formen og plasseres i et vannbad som holder 20 °C. Det vil bli testet 2 terninger for hvert av trykktestingstidspunktene. Dette for å ha muligheten til å sammenlikne prøvene. Ved store avvik vil man lettere oppdage feil enn dersom man bare har et prøvestykke per test.

3.3 Betongblandinger

For å gjøre arbeidet på betong lab noe enklere og mer oversiktlig er det greit å ha forkortelser for de ulike betongblandingene. Siden blandningene har lik og konstant mengde tilslag vil det i forkortelsene angis hvilken type sement som er brukt (Industri/ Standard) og type- /mengde pozzolan blandingen inneholder. Tabell 9 og 10 viser forkortelsene for de ulike betongmatriksene.

Tabell 9: Forkortelse betongmatriks (Forsand).

Pozzolaner		Sement	
Type	Andel	Standard	Industri
Mikrosilika	10 %	S-S10	I-S10
Flygeaske	20 %	-	-
	50 %	S-F50	I-F50
Mikrosilika + Flygeaske	10% + 20%	S-S10F20	I-S10F20
Mikrosilika + Flygeaske	10% + 50%	S-S10F50	I-S10F50
Mikrosilika + Flygeaske	0 %	S-0	I-0

Tabell 10: Forkortelse betongmatriks (Leca).

Pozzolaner		Sement	
Type	Andel	Standard	Industri
Mikrosilika	10 %	-	I-S10 L
Flygeaske	20 %	-	-
	50 %	-	I-F50 L
Mikrosilika + Flygeaske	10% + 20%	S-S10F20 L	I-S10F20 L
Mikrosilika + Flygeaske	10% + 50%	S-S10F50 L	I-S10F50 L
Mikrosilika + Flygeaske	0 %	S-0 L	I-0 L

Ved å benytte regneark tildelt av veileder har det vært mulig å få ut blandeskjema for de ulike betongmatriksene. Blandeskjemaet har vært med å gjøre det lettere og mer oversiktlig å se hvordan materialsammensetningene er. Tabell 11 og 12 viser mengde av de ulike komponentene i hver enkelt blanding. Alle mål er gitt i kg per kubikkmeter.

Mengde Dynamon SX-N er ikke oppgitt i tabellen under, men vil bli vist i tabell senere. Dynamon SX-N vil maksimalt være på 2% av silikat- og sementmengde og tilsettes blanding for å oppnå ønsket synkmål.

Temperaturutvikling i betong

Tabell 11: Betongsammensetning (Forsand).

Prøve	Sement	Silika	FA	Vann	Dynamon SX-N	Forsand 0-8 mm	Forsand 5-8 mm	Forsand 8-11 mm	Forsand 11-16 mm
	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3
S-S10	355,4	35,5	-	170,5	-	838,0	169,8	60,1	754,5
S-F50	190,7	-	190,7	152,5	-	838,0	169,8	60,1	754,5
S-S10F20	278,0	27,8	76,5	164,0	-	838,0	169,8	60,1	754,5
S-S10F50	168,1	16,8	185,0	154,6	-	838,0	169,8	60,1	754,5
S-0	417,5	-	-	167,0	-	838,0	169,8	60,1	754,5
I-S10	354,6	35,5	-	170,2	-	838,0	169,8	60,1	754,5
I-F50	190,4	-	190,4	152,3	-	838,0	169,8	60,1	754,5
I-S10F20	277,4	27,7	76,3	163,7	-	838,0	169,8	60,1	754,5
I-S10F50	167,9	16,8	184,7	154,5	-	838,0	169,8	60,1	754,5
I-0	416,3	-	-	166,5	-	838,0	169,8	60,1	754,5

Tabell 12: Betongsammensetning (Leca).

Prøve	Sement	Silika	FA	Vann	Dynamon SX-N	Leca 3-6 mm	Leca 4-8 mm	Forsand 0-5 mm
	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3
S-0 L	431,6	-	-	172,6	-	178,2	403,5	699,2
S-S10F20 L	287,2	28,7	79	169,5	-	178,2	403,5	699,2
S-10F50 L	173,7	17,4	191,1	159,8	-	178,2	403,5	699,2
I-0L	430,7	-	-	172,3	-	178,2	403,5	699,2
I-S10 L	366,6	36,7	-	175,9	-	178,2	403,5	699,2
I-F50 L	196,8	-	196,8	157,5	-	178,2	403,5	699,2
I-S10F20 L	286,8	28,7	78,9	169,2	-	178,2	403,5	699,2
I-S10F50 L	173,6	17,4	190,9	159,7	-	178,2	403,5	699,2

Temperaturutvikling i betong

3.4 Oppsett for blanding

Blandingsdato	Blanding		Innhenting av temperaturdata	trykktesting				
	Forsand	Leca		3 døgn	1 døgn	2 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn
13.02.12	S-0		16.02.12	14.02.12	15.02.12	16.02.12	20.02.12	12.03.12
	S-S10							
	S-F50							
17.02.12	S-S10F20		20.02.12	18.02.12	19.02.12	20.02.12	24.02.12	16.03.12
	S-S10F50							
20.02.12	I-0		23.02.12	21.02.12	22.02.12	23.02.12	27.02.12	19.03.12
	I-S10							
22.02.12	I-F50		25.02.12	23.02.12	24.02.12	25.02.12	29.02.12	21.03.12
	I-S10F20							
01.03.12		S-S10F20 L	04.03.12	02.03.12	03.03.12	04.03.12	08.03.12	29.03.12
05.03.12		S-0 L	08.03.12	06.03.12	07.03.12	08.03.12	12.03.12	02.04.12
		S-S10F50 L						
06.03.12		I-S10 L	09.03.12	07.03.12	08.03.12	09.03.12	13.03.12	03.04.12
		I-F50 L						
07.03.12		I-S10F20 L	10.03.12	08.03.12	09.03.12	10.03.12	14.03.12	04.04.12
		I-S10F50 L						
08.03.12	I-S10F50		11.03.12	09.03.12	10.03.12	11.03.12	15.03.12	05.04.12
		I-0 L						

Figur 13: Oversikt over blandings- og test dager.

4. Herdekasseprogram

Alle temperaturmålingene som har blitt registrert fra de ulike betongmatriksene plottes inn i et herdekasseprogram. Dette er et regneark i Excel hvor du enkelt å greit kan overføre data fra temperaturfølerne til programmet. Ved å plote inn temperaturer innhentet fra et tidsintervall kan du gjennom herdekasseprogrammet finne adiabatisk varmeutvikling, isotermisk varmeutvikling samtidig som du kan få ut betongparameter som temperaturtransmisjonskoeffisient.

I tillegg til dette beregner programmet den danske egenskapsfunksjonen og den svenske egenskapsfunksjonen. Variablene i den danske egenskapsfunksjonen skal videre brukes i et eget utviklet regneark i Excel for simulering av varmeutvikling i betong.

Dansk egenskapsfunksjon: [1]

$$Q = Q_{\infty} \times e^{(-\frac{\tau}{M})^{\alpha}}$$

Svensk egenskapsfunksjon: [1]

$$Q = W_c \times e^{(-\lambda_1 \times \ln(1 + \frac{t_e}{t_1}))^{-K_1}}$$

5. Utvikling av regneark

5.2 Regneark

5.2.1 Funksjonsområdet

Regnearket som skal utvikles skal kunne simulere temperaturforløpet i en betongvegg under herding. Regnearket skal beregne temperaturutviklingen fra avbindingstidspunktet og 60 timer frem i tid. Ved å legge inn en rekke inngangsparameter redegjort for senere i denne oppgaven skal man kunne få opp tabell og graf som viser temperaturutviklingen som funksjon av tiden ved ulike punkter inni betongen. Dette kan være et nyttig verktøy til å forutse temperaturforløpet for gitte betongblandinger. Temperaturforløpet er viktig for sluttegenskapene i betongen. Ved å benytte et slikt program i forkant av et støpearbeid vil det være mulig å optimere betongblandingen med hensyn på støpeforhold og støpearbeidets formål.

5.2.2 Forutsetninger

En rekke forutsetninger må ligge til grunn for simulering av herdeforløp i regnearket.

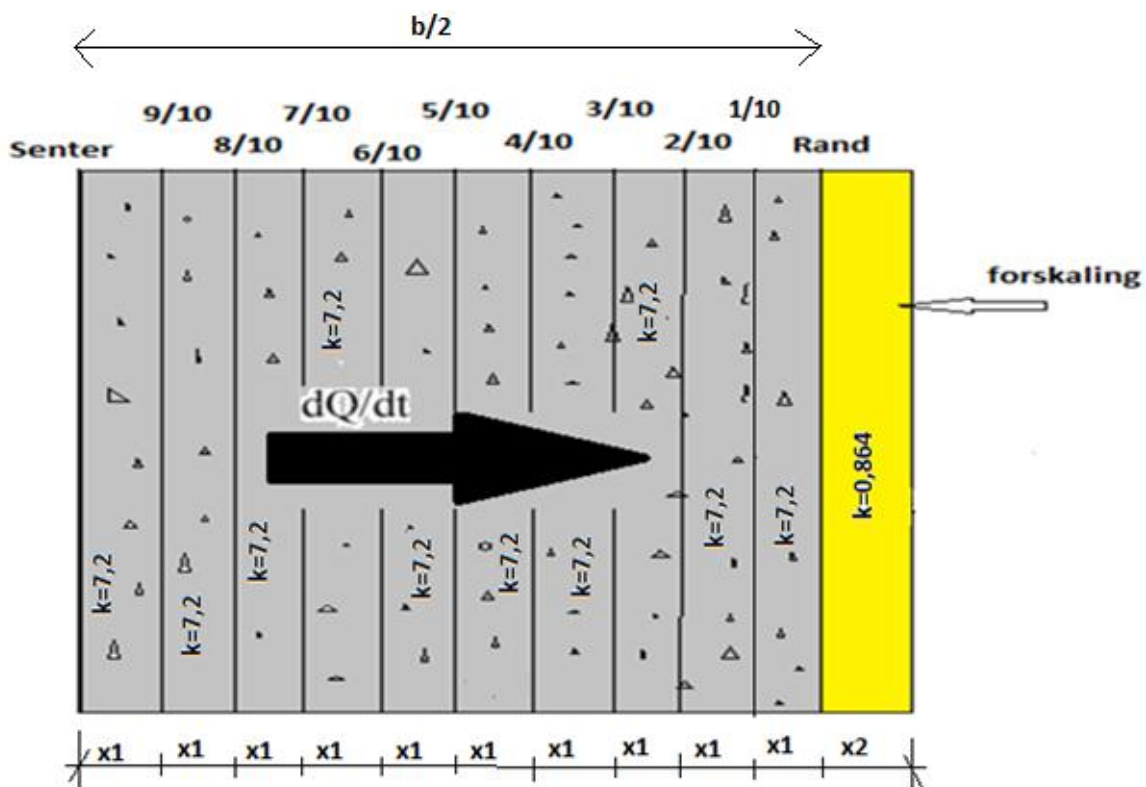
- Geometri
 - veggtykkelse
 - forskalingstykkelse
- Inngangsparameter
 - Betongegenskaper:
 - varmekapasitet
 - varmeledningsevne
 - densitet
 - varmeutviklingsparameter (Q_{∞} , τ og α)
 - sement + silika
 - Randbetingelser:
 - utstøpingstemperatur i betong
 - omgivelsestemperatur
 - isolasjon

5.2.2.1 Geometri

Geometrien på konstruksjonen vil ikke kunne varieres. Regnearket vil ta utgangspunkt i beregninger for en betongvegg. Veggens antas uendelig høy og bred, hvor det kun vil være muligheter til å endre tykkelsen.

For å kunne utføre beregninger er det nødvendig med kjennskap til varmebalansen internt i konstruksjonen samt i de ytre omgivelsene. Under ser man hvordan tverrsnittet av en betongvegg tenkes inndelt i seksjoner for å få et mer nøyaktig beregningsverktøy. Desto flere seksjoner konstruksjonen er delt inn i, presisere blir beregningene.

Siden veggens vil være symmetrisk fra senter og ut til rand i begge retninger, vil det kun være nødvendig å utføre beregninger for halve tverrsnittet som vist i figur 14. Veggens vil ha totalt 11 punkter fra senter og ut til rand. Alle disse punktene skal registrere temperaturutvikling underveis i herdefasen.



Figur 14: snitt av halv betongvegg med forskaling

Temperaturutvikling i betong

For en vegg med bredde, b , vil det totalt deles inn i 22 seksjoner når veggen deles opp slik figur 14 indikerer. 11 seksjoner får vi da for halve tverrsnittet. Dette vil gi en rekke punkter inni betongen for temperaturberegning slik at nøyaktigheten av temperatursimuleringen blir tilfredsstillende. Bredden på hver seksjon betongen er delt inn i vil da bli:

$$d = \frac{b_{vegg}}{22}$$

5.2.2.1.1 Veggtykkelse

Tykkelse av betongvegg vil bli satt til 0,8 m. Dersom man tar utgangspunkt i en vanlig betongvegg vil slike tykkelser være sjeldne. Tenker man seg denne tykkelsen for en betongkonstruksjon i sammenheng med brobygging, er plutselig slike dimensjoner av stor aktualitet. Det viktigste er uansett at tykkelsen på veggen holdes konstant for samtlige blandinger slik at de blir mest mulig sammenlignbare.

5.2.2.1.2 Forskalingstykkelse

Ved utvikling av regneark er det tatt med i betraktning at konstruksjonen skal ha forskaling på hver side. I programmet skal det være mulig å endre forskalingstykkelse etter ønske. I hensikt å kunne sammenlikne resultatene best mulig for de forskjellige betongblandingene vil det bli brukt forskaling av 22 mm finérplater som plasseres på hver side av betongveggen.

5.2.2.2 Inngangsparameter

Under vises inngangsparametrene i regnearket. Disse vil være mulige å endre og bestemme ut ifra hvilke forhold og forutsetninger som ønskes å støpes ved. Temperaturutviklingen skal automatisk oppdatere seg når disse parametrene endrer seg.

Inngangsparameter		
Utstøpingstemperatur	[°C]	-
Lufttemperatur	[°C]	-
τ (varme)	[kJ/kg]	-
α (varme)	[kJ/kg]	-
Q (varme)	[kJ/kg]	-
Sement +silika	[kg/m ³]	-
k	[kJ/mh°C]	-
C_p	[kJ/kg°C]	-
Isolasjon	[kJ/mh°C]	-
Vegg tykkelse	[m]	-
Isolasjonstykkelse	[m]	-
Densitet	[kg/l]	-

Figur 15: Inngangsparameter.

Temperaturdata innhentet fra forsøk utført på laboratoriet skal benyttes for å se om regnearket fungerer slik det skal. Ved å sammenlikne simulert temperaturutvikling fra regneark med den temperaturutvikling fra temperaturmålingene vil det være mulig å trekke konklusjoner på selve programmet og dets pålitelighet.

5.2.2.2.1 Betongegenskaper

5.2.2.2.1.1 Varmekapasitet

Varmekapasiteten, C_p , for et material blir definert som den varmemengden i Joule det kreves for å varme opp 1 m³ av det gitte materialet 1°C. Enheten for varmekapasitet blir dermed J/m³°C. Det er også mulig å se på varmekapasiteten som varmemengde per masseenheter av materialet per °C. Dette gir benevnningen J/kg°C. Det er denne formen for varmekapasitet som vil bli benyttet i formel for temperaturutvikling siden det er denne som gir riktig benevning for resten av regnestykket. [2]

Betongens varmekapasitet er kun til en viss grad avhengig av type materialsammensetning og blandingsforholdet mellom de ulike materialene (sement, sand og grovere tilsag). Grunnen til det er at de nesten har den samme varmekapasiteten. Det som er avgjørende for varmekapasiteten til materialet er vanninnholdet i betongen. Kapasiteten vil øke ved økt vanninnhold. [2]

Temperaturutvikling i betong

Materialet	Varmekapasitet	
	$\text{kJ}/\text{m}^3\text{°C}$	$\text{kJ}/\text{kg}\text{°C}$
Vann	4200	4,2
Sement	2500	0,8
Tilslag	2100	0,8
Fersk betong (Forsand)	2300-2600	1,0-1,1
Herdet betong (Forsand)	1900-2300	0,8-1,0
Herdet betong (Leca)	500-1800	1,0-1,3

Figur 16: Varmekapasitet for betongmaterialer og betong [2]

Under herding vil en del av vannet binde seg til sementens hydratiseringsprodukter. Dette fører til en reduksjon av varmekapasiteten på et sted mellom 10 og 20 prosent. [2]

Man ser ut av tabell 16 at varmekapasiteten varierer for fersk og herdet betong. Det vil derfor være naturlig at varmekapasiteten endrer seg ettersom betongen herder. Endringene underveis vil imidlertid ikke være av stor betydning for temperaturutviklingen og for enkelthets skyld vil denne holdes konstant gjennom hele herdeforløpet. Da data fra temperaturfølerne ble lagt inn i herdekasseprogram og egenskapsfunksjonene ble beregnet, var varmekapasiteten for samtlige blandinger satt til $1,09 \text{ kJ}/\text{kg}\text{°C}$. Med denne bakgrunn settes varmekapasiteten til det samme ved temperatursimulering i regneark.

5.2.2.2.1.2 Varmeledningsevne

Varmeledningsevnen, k , i betong settes til $2,0 \text{ W}/\text{m}\text{°C}$. [11]

Omregnet til $\text{kJ}/\text{mh}\text{°C}$ får vi da:

$$W = J/s \Rightarrow 2,0 J/\text{ms}\text{°C}$$
$$k = 2,0 \frac{J}{\frac{1}{3600} \text{ hm}\text{°C}} = 7,2 \text{ kJ}/\text{hm}\text{°C}$$

Varmeledningsevnen tar utgangspunkt i en betongdensitet på ca $2400 \text{ kg}/\text{m}^3$.

5.2.2.2.1.3 Densitet

Densiteten til betongprøvene vil bli satt til 2,395 kg/l. Dette var også tilfellet ved herdekasseberegningene. Det ideelle hadde vært å bruke densiteten fra de ulike betongblandingene innhentet fra laboratoriet. Siden disse ikke ble brukt da egenskapsfunksjonene ble satt, vil denne densiteten også bli benyttet for temperatursimuleringen.

5.2.2.2.1.4 Varmeutviklingsparameterne Q_{∞} , τ , α

Ut fra semi-adiabatiske kalometrimålinger får man ut varmeutviklingsparameterne Q_{∞} , τ og α . De innhentes for hver enkelt av betongblandingene utført på laboratoriet. Ved å legge temperaturdata loggført av temperaturfølerne inn i herdekasseprogram finner regnearket ved bruk av kurvetilpasning disse parametrene. Parameterne vil variere for de ulike blandinger og skal videre benyttes i regnearket for temperatursimulering. Q_{∞} , τ og α er redegjort for under kapitlet 6.

5.2.2.2.1.5 Sement + Silika

Sement- og silikamengde må legges med som inngangsparameter. Denne faktoren skal multipliseres med i beregninger av varmeutvikling. Sement og silika er med å produsere varme. Mengden av disse i en betongblanding er avgjørende for hvor stor varmeutvikling vil bli. Begge har nesten tilsvarende lik varmemengde per kg/m^3 og vil derfor slås sammen. Flygeaske blir ikke tatt med som inngangsparameter da dens bidrag til varmeutviklingen er så liten at den kan neglisjeres. Mengde sement + silika blir satt til $433 kg/m^3$ for samtlige blandinger, da dette også ble gjort i herdekasseprogram.

5.2.2.2.2 Randbetingelser

5.2.2.2.2.1 Utstøpingstemperatur

Utsøpingstemperatur, $\theta_{utstøping}$, er temperaturen i betongen ved utstøping. Denne vil settes til 20°C for samtlige blandinger.

Temperaturutvikling i betong

5.2.2.2.2.2 Lufttemperatur

Lufttemperaturen vil variere med årstiden støpearbeidet blir utført. For betongblandinger simulert vil denne temperaturen settes på 10°C. Lufttemperaturen vil ikke kunne varieres med tiden og vil dermed være konstant for samtlige 60 timer av herdeforløpet.

5.2.2.2.2.3 Isolasjon

Varmeledningsevnen for finérplater øker ved økt tetthet på platene. For mer kompakte plater vil det være mindre stillestående luft i materialet enn for plater med lavere densitet. Siden stillestående luft er det som isolerer best, vil materialer med redusert luftmengde dermed føre til høyere varmeledningsevne. [11]

Det vil bli brukt finérplater med tetthet 1000 kg/m^3 . [11]

Disse platene vil gi varmeledningsevne:

$$0,24 \text{ J/sm}^\circ\text{C} = 0,864 \text{ kJ/hm}^\circ\text{C}$$

En varmeledningsevne på $0,864 \text{ kJ/hm}^\circ\text{C}$ vil bli brukt som inngangsparameter for samtlige betongblandinger.

Ut fra forutsetningene som er satt for inngangsparameterne får vi følgende verdier:

Inngangsparameter		
Utstøpingstemperatur	[°C]	20
Lufttemperatur	[°C]	10
τ (varme)	[kJ/kg]	x
α (varme)	[kJ/kg]	x
Q (varme)	[kJ/kg]	x
Sement +silika	[kg/m ³]	433
k	[kJ/mh°C]	7,2
C _p	[kJ/kg°C]	1,09
Isolasjon	[kJ/mh°C]	0,864
Vegg tykkelse	[m]	0,8
Isolasjonstykkelse	[m]	0,022
Densitet	[kg/l]	2,395

Figur 17: Inngangsparameter

De inngangsparameterne som er merket, x , er de som varierer fra blanding til blanding. De resterende er konstante for alle betongblandinger som simuleres. Vi ser fra tabell 17 at varmeutviklingsparameterne er de eneste som endres fra blanding til blanding.

5.2.3 Beregningsmetode

Når man tar utgangspunkt i et beregningsprogram som skal simulere temperaturutviklingen i betong som funksjon av tiden er det i hovedsak to punkter man må ta hensyn. På den ene siden er man nødt til å ta hensyn til den produserte varmen i betongen. På den andre siden er man nødt å ta hensyn til varmetap i konstruksjonen. I kommende avsnitt vil matematiske formler brukt i regneark bli forklart. Eksempler for en tilfeldig blanding, I-0 L, vil bli benyttet i forsøk på å redegjøre for regnearkets oppbygging.

5.2.3.1 Produsert varme

5.2.3.1.1 Modenhetsberegninger

Ved å integrere hastighetsfunksjonen med hensyn på tiden t , vil man kunne innhente data angående modenheten. Disse formlene vil inngå i regnearket og vil bli beregnet slik at varmeutviklingen skal kunne bestemmes.

Beregningene som utføres i regnearket vil ta utgangspunkt i tidsintervaller på 10 minutter. Dvs. at det vil foretas beregninger for hver $\frac{1}{6}$ time. Ved kortere intervaller oppnår man økt nøyaktighet på beregningene. Man kunne alltid ha valgt enda kortere tidsintervaller, men 10 minutter virket som et fornuftig valg.

Man får følgende modenhetsberegning:

$$M = \int_0^{\frac{1}{6}} e^{\frac{E(\theta)}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+\theta} \right)} dt$$

Temperaturutvikling i betong

$$\Rightarrow \left[e^{\frac{E(\theta)}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+\theta} \right)} \cdot t \right]_0^{\frac{1}{6}}$$

$$M = e^{\frac{E(\theta)}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+\theta} \right)} \cdot \frac{1}{6}$$

De første 3 timene av herdefasen vil modenhetsberegningene for en tilfeldig valgt blanding, I-0 L, se ut slik tabell 18 viser. Utklippet er fra regneark hvor varmeutviklingsparametrene for blanding, I-0 L, er plottet inn som inngangsparameter.

Tid (Timer)	Modenhet										
	Senter	9/10	8/10	7/10	6/10	5/10	4/10	3/10	2/10	1/10	Rand
0,00	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
0,17	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
0,33	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,49
0,50	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,66	0,65
0,67	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,81
0,83	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96
1,00	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,16	1,15	1,11
1,17	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,31	1,26
1,33	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,49	1,47	1,41
1,50	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,66	1,65	1,62	1,56
1,67	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84	1,83	1,82	1,78	1,71
1,83	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	2,00	1,98	1,94	1,86
2,00	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,18	2,17	2,15	2,10	2,01
2,17	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,36	2,36	2,35	2,32	2,26	2,16
2,33	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,54	2,52	2,49	2,43	2,32
2,50	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,73	2,72	2,70	2,67	2,60	2,47
2,67	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93	2,91	2,89	2,85	2,77	2,63
2,83	3,14	3,14	3,14	3,13	3,13	3,12	3,11	3,08	3,03	2,94	2,80
3,00	3,34	3,34	3,34	3,34	3,34	3,33	3,31	3,28	3,22	3,12	2,97

Figur 18:Utklipp fra regneark viser modenhet for I-0 L.

Temperaturutvikling i betong

Ettersom modenheten beregnes må hele tiden modenheten fra forrige tidsintervall legges til. Dette for at den totale modenheten til ethvert tidspunkt skal bli brukt til beregning av varmeutvikling.

Ved avbindingstidspunkt representerer θ fra modenhetsformel, temperaturen i betongen ved utstøpning, $\theta_{utstøpning}$. Ettersom tiden går representerer θ i likningen, temperaturen i betongen ved forrige tidsintervall. Dette fordi temperaturen gradvis utvikles i respektive områder i betongen. Denne utviklingen skal tas videre med i beregningene.

Eksempel

I senter av betong vil beregninger av modenhet etter 3 timer herding bli som følger:

$$M = \sum_{i=0}^{i=3} H(\theta_i) \cdot \Delta t_i$$

$$\Rightarrow M = e^{\frac{33500}{8,314} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+24,9} \right)} \cdot \frac{1}{6} + 3,14 \approx 3,34$$

Faktoren 3,14 er den sammenlagte modenheten etter 2,83 t. Omregnet er dette tidspunktet etter 2 timer og $\frac{5}{6}$ time. Dvs. etter 2 timer og 50 minutter. Fra modenhet vist i figur 11 er det mulig å se hvordan regneprogrammet har lagt til modenheten fra forrige tidsintervall. Denne legges til for å få den totale modenheten i betongen til enhver tid. Siden regnearket er satt opp slik at modenheten registreres hvert tiende minutt vil da tidsintervallet før 3 timer være 2 timer og 50 min og dermed er det modenheten etter dette tidspunktet som legges til modenheten etter 3 timer.

Det blir delt opp i tidsintervall $\Delta t = 10 \text{ min} = \frac{1}{6} \text{ time}$. Dette er grunnen til at modenheten multipliseres med en $\Delta t = \frac{1}{6}$. Ved å dele opp i intervaller på 10 minutter hver måling vil man oppnå økt nøyaktighet på beregningene enn dersom det bare var målinger vær time.

Temperaturutvikling i betong

Ut fra likningen i eksempelet ser man at temperaturen θ er satt til 24,9°C. Dette er temperaturen i senter av betongen etter 2t 50min. Denne vil selvsagt også endre seg etter hvilken modenhet som skal finnes, men det vil alltid være temperaturen i det forrige tidsintervallet som benyttes i formelen.

Siden betong temperaturen er over 20°C ser man at aktiviseringsenergien automatisk blir 33 500 J/mol.

5.2.3.1.1.1 Aktiviseringsenergi

Aktiviseringsenergien, $E(\theta)$, som benyttes ved utregning av modenhet vil bli regnet ut for hvert tidsintervall og for hver seksjon. På den måten vil den varierer ved økende og avtakende temperatur i herdefasen. $E(\theta)$ er konstant for temperaturer over 20°C. Synker temperaturen under denne verdi vil aktiviseringsenergien øke. Figur 19 viser aktiviseringsenergi de første 2 timene for I-0 L.

Timer	Aktiviseringsenergi										
	Senter	9/10	8/10	7/10	6/10	5/10	4/10	3/10	2/10	1/10	Rand
0,00	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500
0,17	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	34514
0,33	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33868	35089
0,50	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33634	34178	35549
0,67	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33547	33782	34477	35922
0,83	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33506	33604	33939	34740	36236
1,00	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33648	34067	34954	36486
1,17	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33642	34138	35097	36662
1,33	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33556	34122	35147	36749
1,50	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	34002	35092	36737
1,67	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33770	34927	36620
1,83	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	34651	36401
2,00	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	33500	34268	36084

Figur 19: Utklipp fra regneark viser aktiviseringsenergi for I-0 L.

Figur 19 viser hvordan aktiviseringsenergien endrer seg de første 2 timene av herdefasen. Vi kan se at aktiviseringsenergien er lik i alle punkter ved tid 0. Dette er ved utstøpingstidspunkt og dermed holder samtlige punkter i betongen en temperatur tilsvarende utstøpingstemperatur.

Temperaturutvikling i betong

I dette tilfellet er den satt til 20 °C. Siden utstøpingstemperaturen er satt forholdsvis høy vil ikke aktiviseringsenergien endre seg nevneverdig. Ved 20°C og høyere temperatur ser vi at vi får konstant 33 500 J/mol. Det er kun i ytterkant av betongkonstruksjon verdiene vil variere noe. Lufttemperatur på 10°C fører til temperaturer under 20 grader for punkter nær rand de første timene.

Eksempel

Dersom utstøpingstemperatur ble satt til 15°C ville vi fått følgende aktiviseringsenergi til videre bruk i modenhetsformel ved tid 0:

$$E(\theta) = E(15) = 33500 + 1470 \cdot (20 - 15) = 40850 \text{ J/mol}$$

Etter hvert som tiden går endrer aktiviseringsenergien. Dette er fordi temperaturen i betongen stiger ettersom herdeprosessen kommer i gang. Når temperaturen i enkelte punkter stiger over 20°C vil aktiviseringsenergi formelen automatisk endre seg og gi ut svaret 33500 J/mol.

5.2.3.1.2 Varmeutvikling i betong

For at det skal være mulig å simulere temperaturutviklingen for en gitt betongblanding må man ta hensyn til varmeutvikling i betongen pga sementens reaksjoner med vann under hydratisering. Denne varmeutviklingen blir fremstilt som en adiabatisk prosess der det ikke er noe varmetap. [3]

Varmeutvikling kan skrives ved formelen [1]:

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

Q_{∞} = Total varmeutvikling, kJ/kg sement

τ = Retarderende parameter, timer

Temperaturutvikling i betong

α = *Krumningsparameter*

M = *Modenhets*

Dersom τ er liten vil man oppnå en tidligere start for den aktuelle varmeutviklingskurven. Motsatt får man da en tregere start på varmeutviklingskurven ved høyere verdi av τ . α påvirker kurvens bratthet. Ved høy α får man en slakere stigning på varmeutviklingskurven enn tilfellet er ved en lavere verdi av α . [16]

Fra formel kan man se at den inneholder tre av inngangsparametrene som skal brukes i regnearket Q_∞ , τ og α . Modenheten, M , er derimot ikke inngangsparameter og varierer med tiden, t . Derfor er det nødvendig å ta med modenheten i beregningene som en forutsetning for å beregne varmeutviklingen $Q(M)$.

Det er nødvendig å multiplisere formel for varmeutvikling med mengde tilsatt sement og silika. Mengden av disse står for største del av bidraget i varmeutviklingen.

Benevning for mengde sement og silika er kg/m^3 . For å gjøre denne om til kg/m^2 vil bredden på en seksjon i betongen også multipliseres med den aktuelle formelen for varmeutvikling.

Man sitter da igjen med formel for varmeutvikling:

$$Q(M) = Q_\infty \cdot e^{-\left(\frac{\tau}{M}\right)^\alpha} \cdot S \cdot \frac{b}{22}$$

Temperaturutvikling i betong

Timer	Varmeutvikling										
	Senter	9/10	8/10	7/10	6/10	5/10	4/10	3/10	2/10	1/10	Rand
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,06
0,67	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,76	0,72	0,58
0,83	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,41	3,19	2,55
1,00	10,10	10,10	10,10	10,10	10,10	10,10	10,09	10,05	9,84	9,14	7,38
1,17	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,49	22,46	22,31	21,75	20,13	16,40
1,33	41,95	41,95	41,95	41,95	41,95	41,93	41,84	41,46	40,27	37,19	30,60
1,50	69,13	69,13	69,13	69,13	69,12	69,07	68,84	68,09	65,96	60,88	50,57
1,67	104,25	104,25	104,25	104,24	104,21	104,09	103,64	102,32	98,93	91,32	76,53
1,83	147,16	147,16	147,16	147,14	147,08	146,83	146,05	143,95	138,98	128,39	108,48
2,00	197,55	197,55	197,54	197,51	197,38	196,94	195,71	192,62	185,74	171,78	146,26
2,17	254,99	254,99	254,97	254,90	254,67	253,98	252,15	247,86	238,77	221,11	189,62
2,33	319,02	319,02	318,98	318,87	318,49	317,45	314,88	309,16	297,59	275,94	238,24
2,50	389,18	389,16	389,10	388,91	388,34	386,85	383,38	376,02	361,71	335,82	291,78
2,67	464,99	464,96	464,86	464,55	463,72	461,69	457,17	447,97	430,68	400,32	349,86
2,83	546,00	545,95	545,79	545,34	544,19	541,50	535,77	524,52	504,05	469,03	412,06
3,00	631,77	631,70	631,46	630,82	629,27	625,82	618,73	605,25	581,39	541,55	478,00

Figur 20: Utklipp fra regneark som viser varmeutviklingen de første 3 timer

Eksempel

Ved å bruke varmeutviklingsparameter fra laboratorieforsøkene får vi følgende inngangsparameter for I-0 L:

Inngangsparameter		
Utstøpingstemperatur	[°C]	20
Lufttemperatur	[°C]	10
τ (varme)	h	7,07
α (varme)		1,02
Q (varme)	[kJ/kg]	343
Sement +silika	[kg/m ³]	433
k	[kJ/mh°C]	7,2
C _p	[kJ/kg°C]	1,09
Isolasjon	[kJ/mh°C]	0,864
Vegg tykkelse	[m]	0,8
Isolasjonstykkelse	[m]	0,022
Densitet	[kg/l]	2,395

Figur 21: Inngangsparameter for I-0 L

Dersom man tar utgangspunkt i modenhetsberegningene for blanding I-0 L vil man få en varmeutvikling i senter av betong etter 3 timer:

$$Q(3,34) = 343 \cdot e^{\left(-\left(\frac{7,07}{3,34}\right)^{1,02}\right)} \cdot 433 \cdot \frac{0,8}{22} \approx 631,77 \text{ kJ/m}^2$$

5.2.3.2 Varmetap i konstruksjon

Varmeledning står for mesteparten av varmetapet i herdefasen og er det eneste som vil bli tatt hensyn til i utvikling av regneark.

Varmetap pga konveksjon neglisjeres. Vind vil i utgangspunktet ikke komme til konstruksjonen i nevneverdig grad grunnet forskaling og dermed vil ikke konveksjon ha særlig høy grad av innflytelse på varmetapet og dermed heller ikke på den totale temperaturutviklingen.

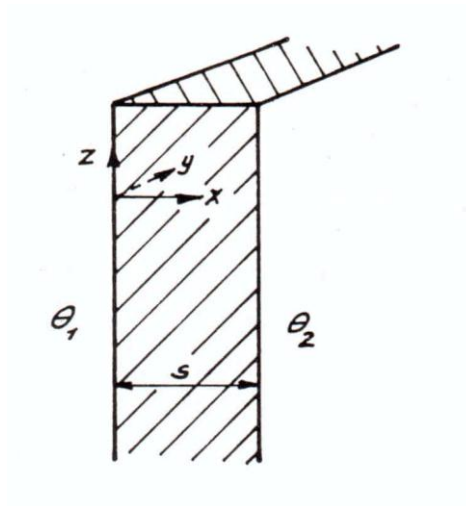
Varmetap fra stråling blir ikke tatt hensyn til. Når man ser på vertikale vegger med forskaling vil ikke bidraget fra stråling være nevneverdig og kan dermed neglisjeres. Dersom det hadde vært et beregningsprogram som skulle tatt for seg horisontale utildekkede betongdekker ville bidraget fra stråling vært vesentlig høyere. I et slikt tilfelle hadde det vært viktig for nøyaktigheten til programmet at denne faktoren hadde blitt tatt hensyn til. [3]

Ved hjelp av Fouriers likning i en dimensjon vil varmetapet i regnearket beregnes. Det vil med andre ord kun bli tatt hensyn til varmetap i en retning.

5.2.3.2.1 Endimensjonal betraktning:

Ved varmeledning i en dimensjon vil den dominerende konveksjonen foregå i en retning. Dersom man tar utgangspunkt i en plan betongvegg som er uendelig lang og uendelig høy kan varmen i prinsippet kun bevege seg i x-retning som vist på figur under. [15] [13]

Temperaturutvikling i betong



Figur 22: betongvegg for endimensjonal betraktning. [16]

For en vegg med disse forutsetningene kan man sette temperaturen som konstant i y-retning og z-retning, se figur 15. Når denne forutsetningen er satt kan man forenkle likning til: [13]

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0$$

Ved dobbelintegrasjon kan man oppnå likning for temperaturfordeling: [13]

$$\theta = Ax + B$$

Ut ifra likningen ser man at den har en lineær økning. Dersom man bruker temperauren θ_1 og θ_2 som angitt på figur 22 vil man kunne sette opp:

$$B = \theta_1 \quad \text{ved } x = 0$$

$$\Rightarrow A = \frac{\theta_2 - \theta_1}{s}$$

Temperaturutvikling i betong

Når temperaturfordelingen er fastsatt er det mulig å beregne varmemengden som strømmer gjennom vegg.

Vi får da: [13]

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = A = \frac{\theta_2 - \theta_1}{x}$$

Ved å sette $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ inn i fourier`s lov:

$$dQ = -k \cdot dA \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot dt$$

får vi:

$$dQ = k \cdot dA \cdot \frac{\theta_1 - \theta_2}{x} \cdot dt$$

Varmetapet for den endimensjonale veggkonstruksjonen kan da skrives:

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\theta_1 - \theta_2}{x} \cdot t$$

Varmeoverføringen per areal enhet blir:

$$q = \frac{Q}{A} = k \cdot \frac{\theta_1 - \theta_2}{x} \cdot t$$

Temperaturutvikling i betong

Fra likning for varmeoverføring kan man trekke ut:

$$\frac{k}{x} = \frac{k}{d} = K$$

$$K = \frac{1}{m} = \frac{1}{\frac{d}{k}} = \frac{k}{d}$$

Siden veggen er delt inn i 22 seksjoner som skal måles må man ta hensyn til en bredde $\frac{d}{22}$ i tillegg til bredden av hele betongveggen d . Dette gir en likning for transmisjonstallet:

$$K = \frac{k}{\frac{d}{22}} + \frac{k}{d}$$

Eksempel

For en betongkonstruksjon med bredde 0,8m og varmeledningsevne på 7,2 kJ/m²h°C får vi følgende transmisjonskoeffisient for hvert punkt innad i konstruksjonen:

$$K = \frac{7,2}{\frac{0,8}{22}} + \frac{7,2}{0,8} = 207 \text{ kJ/mh}^\circ\text{C}$$

For rand får man en annen utregning. Det avgjørende for transmisjonstallet ved randen er isolasjonstykkelse og varmeledningsevnen, k , til isolasjonen. Ved bruk av kryssfinérplater med tykkelse 0,022m og varmeledningsevne 0,864 kJ/m²h°C får vi:

$$K = \frac{0,864}{0,022} = 39,27 \text{ kJ/mh}^\circ\text{C}$$

Temperaturutvikling i betong

Figur 23 viser transmisjonstallet for de ulike beregningspunktene i betongen:

For varmetap	
	Transmisjonstallet, K
Rand	39,27
1/10	207,00
2/10	207,00
3/10	207,00
4/10	207,00
5/10	207,00
6/10	207,00
7/10	207,00
8/10	207,00
9/10	207,00
senter	207,00

Figur 23: Transmisjonstall

Transmisjonstallet, K, vil bli brukt i regnearket ved utregning av Fourier`s formel. Regnearket vil dermed beregne varmetapet i konstruksjonen fra likningen:

$$Q = K \cdot (\theta_1 - \theta_2) \cdot t + \dot{Q}$$

Fra følgende formel oppnår man et varmetap for de første 3 timene som vist i figur 24.

Temperaturutvikling i betong

Timer	Varmetap										
	Senter	9/10	8/10	7/10	6/10	5/10	4/10	3/10	2/10	1/10	Rand
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	65,45
0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,79	126,40
0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,65	52,43	184,78
0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,14	21,42	84,62	241,11
0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,14	8,64	37,74	118,53	295,77
0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	3,45	16,50	56,54	153,64	349,05
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	1,37	7,09	26,33	77,35	189,60	401,20
1,17	0,00	0,00	0,00	0,05	0,54	3,01	12,02	37,96	99,86	226,35	452,58
1,33	0,00	0,00	0,02	0,21	1,26	5,40	18,23	51,23	123,92	263,95	503,56
1,50	0,00	0,01	0,08	0,52	2,39	8,59	25,69	66,09	149,51	302,54	554,61
1,67	0,00	0,03	0,22	1,04	3,98	12,63	34,43	82,50	176,65	342,28	606,17
1,83	0,01	0,09	0,45	1,82	6,10	17,58	44,46	100,48	205,39	383,37	658,70
2,00	0,04	0,19	0,82	2,90	8,81	23,46	55,81	120,06	235,80	425,99	712,65
2,17	0,08	0,37	1,36	4,34	12,14	30,34	68,52	141,27	267,93	470,32	768,43
2,33	0,16	0,63	2,11	6,18	16,17	38,27	82,65	164,16	301,87	516,55	826,40
2,50	0,27	1,01	3,09	8,47	20,95	47,30	98,22	188,79	337,71	564,84	886,92
2,67	0,45	1,52	4,36	11,26	26,53	57,49	115,31	215,20	375,55	615,35	950,28
2,83	0,68	2,20	5,95	14,60	32,97	68,89	133,94	243,45	415,46	668,26	1016,77
3,00	1,00	3,07	7,89	18,55	40,33	81,56	154,19	273,61	457,55	723,75	1086,60

Figur 24: Varmetap, I-0 L.

Eksempel

Ved utregning av varmetap i senter av betong etter 3 timer har vi fra regnearket følgende konstanter:

$$K = 207 \text{ kJ/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$$

$$\theta_{\text{senter}} \approx 25,744^\circ\text{C}$$

$$\theta_{9/10} \approx 25,735^\circ\text{C}$$

$$t = \frac{1}{6} \text{ h}$$

$$\dot{Q} \approx 0,68 \text{ kJ}$$

\dot{Q} , er det totale varmetapet i tidsintervallet før det som skal beregnes. For dette eksempelet er det varmetapet etter 2 timer og 50 minutter som legges til.

varmetapet blir da:

Temperaturutvikling i betong

$$Q = 207 \cdot (25,744 - 25,735) \cdot \frac{1}{6} + 0,68 \approx 1,0 \text{ kJ}$$

Ved utregning av varmetap ved randen etter 3 timer får vi følgende:

$$K \approx 39,27 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$\theta_{Rand} \approx 20,670^\circ\text{C}$$

$$\theta_{Luft} = 10^\circ\text{C}$$

$$t = \frac{1}{6} \text{ h}$$

$$\dot{Q} = 1016,77 \text{ kJ}$$

$$Q = 39,27 \cdot (20,670 - 10) \cdot \frac{1}{6} + 1016,77 \approx 1086,6 \text{ kJ}$$

5.2.3.3 Temperaturutvikling

Ved å utføre beregninger av varmeutvikling og varmetap for den endimensjonale veggkonstruksjonen vil man tilslutt kunne simulere temperaturutviklingen i konstruksjonen. Temperaturdata vil være tilgjengelig i både grafisk- og tabell form. Herdetemperaturen blir simulert de første 60 timene. Resultatene vil kunne leses av for senter, 6/10, 3/10 og randen. Det som er mest aktuelt for denne oppgaven vil imidlertid være temperaturutviklingen i senter av betongen, da det er denne temperaturen som også har blitt målt for de ulike prøvene utført på laboratoriet.

Figur 25 viser utklipp fra regneark. Temperaturutviklingen de første 3 timene kommer frem av denne figuren.

Temperaturutvikling i betong

Timer	Temperaturutvikling										
	Senter	9/10	8/10	7/10	6/10	5/10	4/10	3/10	2/10	1/10	Rand
0,00	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
0,17	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	19,3
0,33	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	19,7	18,9
0,50	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	19,9	19,5	18,6
0,67	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	19,8	19,3	18,4
0,83	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	19,9	19,7	19,2	18,1
1,00	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	19,9	19,6	19,0	18,0
1,17	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,0	19,9	19,6	18,9	17,8
1,33	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,1	20,0	19,6	18,9	17,8
1,50	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,3	20,1	19,7	18,9	17,8
1,67	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,5	20,3	19,8	19,0	17,9
1,83	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,0	20,9	20,6	20,1	19,2	18,0
2,00	21,6	21,5	21,5	21,5	21,5	21,4	21,3	20,9	20,4	19,5	18,2
2,17	22,1	22,1	22,1	22,1	22,0	21,9	21,7	21,4	20,7	19,8	18,5
2,33	22,7	22,7	22,7	22,7	22,6	22,5	22,3	21,8	21,2	20,2	18,9
2,50	23,4	23,4	23,3	23,3	23,2	23,1	22,8	22,4	21,7	20,6	19,2
2,67	24,1	24,1	24,1	24,0	24,0	23,8	23,5	23,0	22,2	21,1	19,7
2,83	24,9	24,9	24,9	24,8	24,7	24,5	24,2	23,7	22,8	21,7	20,2
3,00	25,7	25,7	25,7	25,7	25,5	25,3	25,0	24,4	23,5	22,3	20,7

Figur 25: Temperaturutvikling, I-0 L

Ved 0 timer holder betongen utstøpingstemperatur. Dette gjelder for samtlige punkter i betongen. Etter hvert som tiden går vil temperaturutviklingen beregnes etter formelen:

$$\theta = \theta_{utstøping} + \frac{Q_{utv.} - Q_{tap}}{C_p \cdot \rho \cdot 1000 \cdot d}$$

Varmeutviklingen og varmetapet for likningen gitt over, vil alltid bli trukket ut fra tidsintervallet før tidspunktet for den aktuelle temperaturberegningen.

Parametrene på undersiden av brøkstreken er de samme som man ville benyttet seg av dersom man skulle finne avkjølingstallet.

$$a = \frac{\sum K}{d \cdot \rho \cdot C_p}$$

Temperaturutvikling i betong

I stedet for å regne ut avkjølingstall, a , er det i stedet transmisjonstallet beregnet separat fra avkjølingstallet og dermed har de resterende parametrene havnet under temperaturutviklingsberegningene.

Eksempel

Temperaturutvikling i senter av betong ved 3 timers herding:

$$\theta_{senter} = 20 + \frac{546 - 0,68}{1,09 \cdot 2,395 \cdot 1000 \cdot \frac{0,8}{22}} \approx 25,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Fra figur 25 er det mulig å se at utregningene stemmer. Varmeutviklingen og varmetapet for dette eksempelet er tatt fra senter av betongen etter 2 timer og 50 minutter.

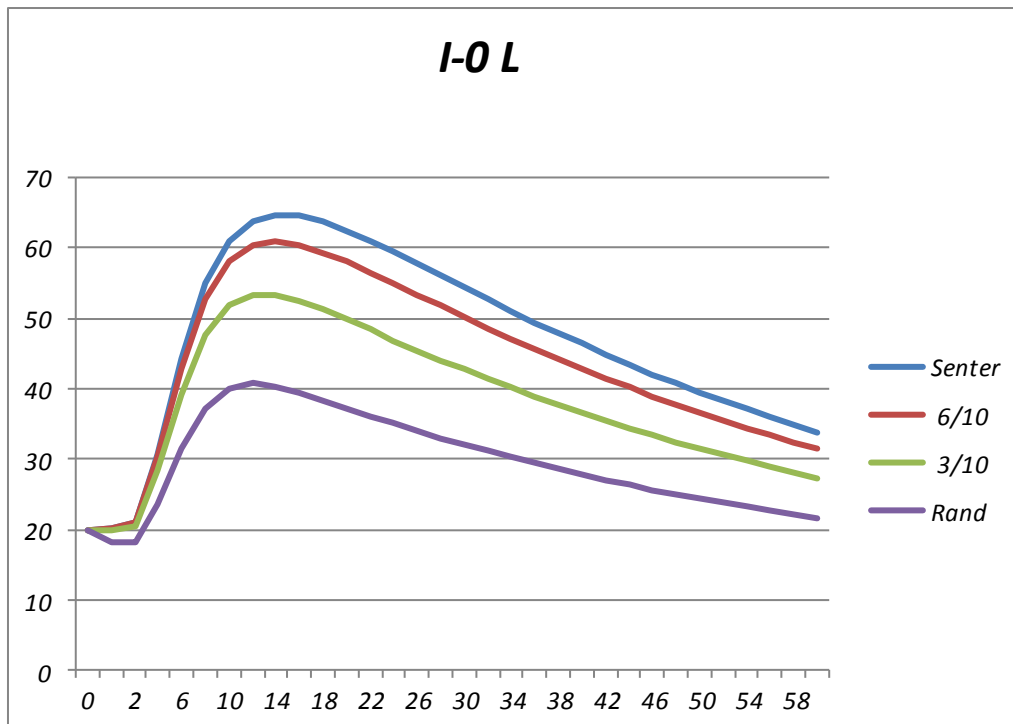
For punktene 9/10 til Randen vil temperaturutviklingen se litt annerledes. For samtlige av disse punkter vil beregningene bli like. Dersom man bruker punkt 6/10 som eksempel, får vi etter 3 timers herding en temperaturutvikling:

$$\theta_{6/10} = 20 + \frac{544,19 - 32,97 + 14,60}{1,09 \cdot 2,395 \cdot 1000 \cdot \frac{0,8}{22}} \approx 25,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Av figur 25 ser vi at også dette resultatet stemmer. Vi ser at vi får et ekstra ledd på oversiden av brøkstreken. Dette leddet kommer fra varmetapet i punktet 7/10. Varmetapet fra seksjonen innenfor vil hele tiden legges til.

Etter at disse beregningene er gjennomført for 60 timers herding, sitter vi tilslutt igjen med en temperaturutviklingsgraf for blanding I-0 L som følger:

Temperaturutvikling i betong



Figur 26: Temperaturutvikling, I-0 L.

Fra graf får man den simulerte temperaturutviklingskurven for blanding I-0 L. Det er mulig å følge temperaturutviklingen i senter, 6/10, 3/10 og rand. Ved å endre inngangsparametrene til å tilfredsstille kravene for de øvrige blandingene som er utført på laboratoriet, vil også disse kunne simuleres og sammenliknes med resultatene fra forsøkene.

6. Resultater

6.1 Resultater innhentet fra laboratoriearbeid

6.1.1 Betongblandinger

Ved utførelse av betongarbeid var det nødvendig å tilsette plastiserende tilsetningsstoff for å oppnå ønsket flyt. Data for mengde tilsetningsstoff, sementinnhold, sement og silika, sement + pozzolan (silika og flygeaske) i tillegg til testresultater innhentet i forkant av utstøpingen for å sikre korrekt betongblandinger, kan leses fra tabell 13:

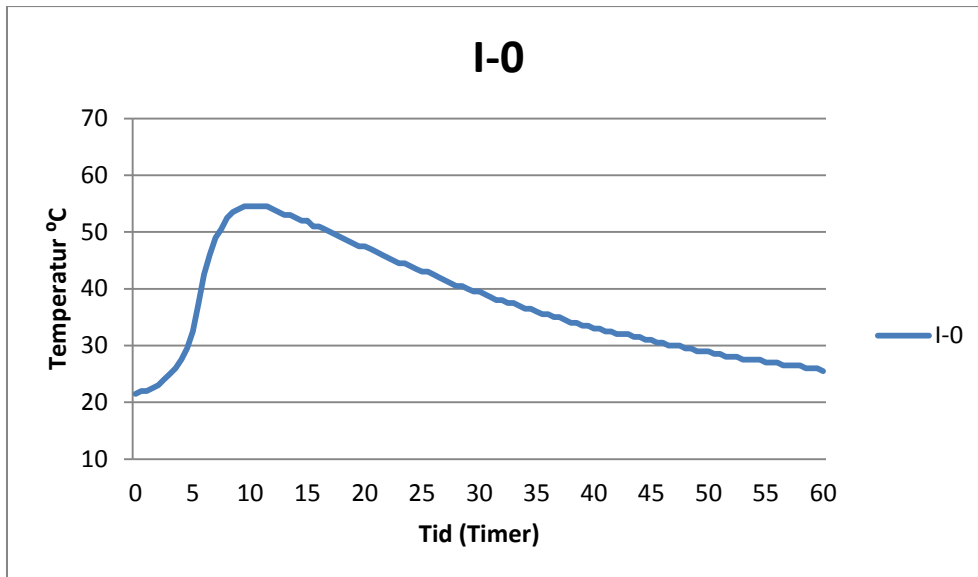
Tabell 13: Betongegenskaper.

Blanding	SP [g]	Synkmål [mm]	Luftinnhold [%]	Egenvekt fersk [kg/m ³]	Sementmengde [kg/m ³]	Sement + Silika [kg/m ³]	Sement + Pozzolan
I-0	117	160	1,2	2478	416,3	416,3	416,3
I-S10	105	195	1,5	2408	354,6	390,1	390,1
I-F50	80	210	1,7	2434	190,4	190,4	380,8
I-S10F20	116	180	1,3	2444	277,4	305,1	381,4
I-S10F50	71	190	2,0	2386	167,9	184,7	369,4
I-0 L	30	170	2,3	2054	430,6	430,6	430,6
I-S10 L	51	170	3,0	2013	366,6	403,3	403,3
I-F50 L	21	190	1,3	2023	196,8	196,8	393,6
I-S10F20 L	50	200	2,0	2032	286,8	315,5	394,4
I-S10F50 L	30	200	1,5	2043	173,6	191,0	381,9
S-0	167	190	2,0	2453	417,5	417,5	417,5
S-S10	155	170	2,1	2422	355,2	390,7	390,7
S-F50	107	205	1,6	2385	190,6	190,6	381,2
S-S10F20	83	170	1,8	2404	278,0	305,8	382,3
S-S10F50	82	210	1,5	2415	168,1	184,9	369,8
S-0 L	30	190	2,0	2077	431,8	431,8	431,8
S-S10F20 L	85	190	1,7	2014	287,2	315,9	394,9
S-S10F50 L	52	200	2,0	2031	173,7	191,1	382,2

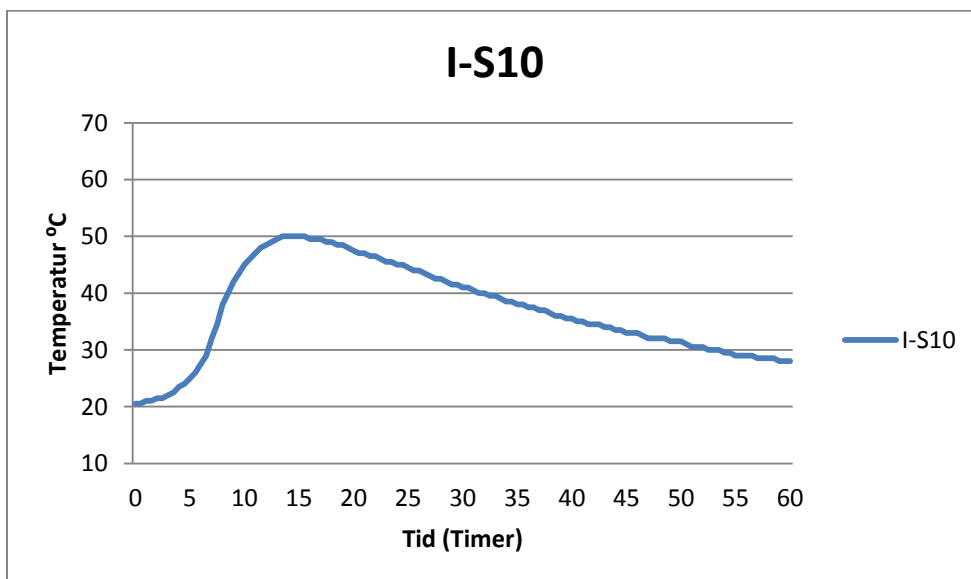
6.1.2 Temperaturmålinger

6.1.2.1 Industri (Forsand)

Figur 27-30 viser grafisk temperaturmålingene utført i herdekasser for blandinger med kombinasjon, vanlig tilslag (Forsand) og industrisement. Temperaturdata for I-S10F20 mangler pga feil på temperaturføler.

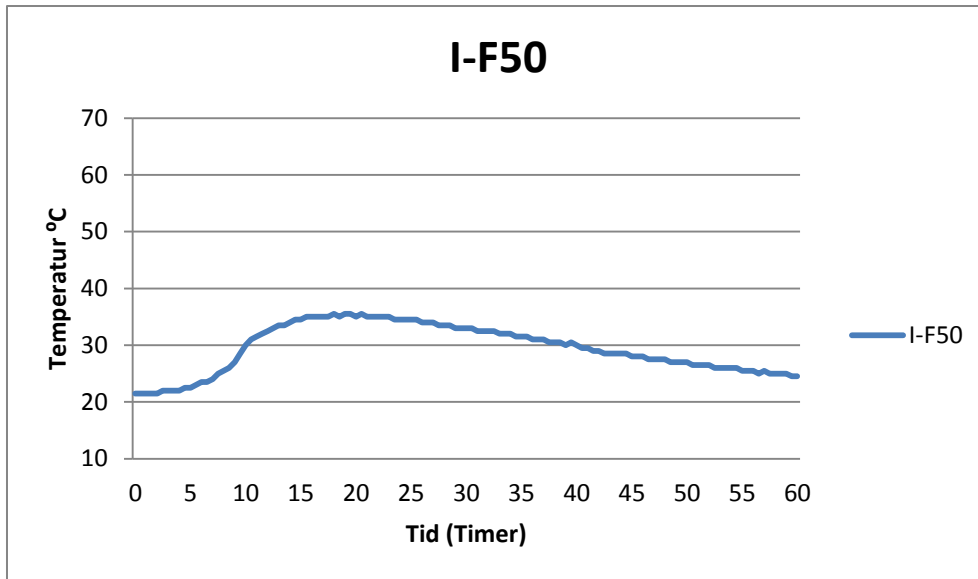


Figur 27: Temperaturutvikling i herdekasse.

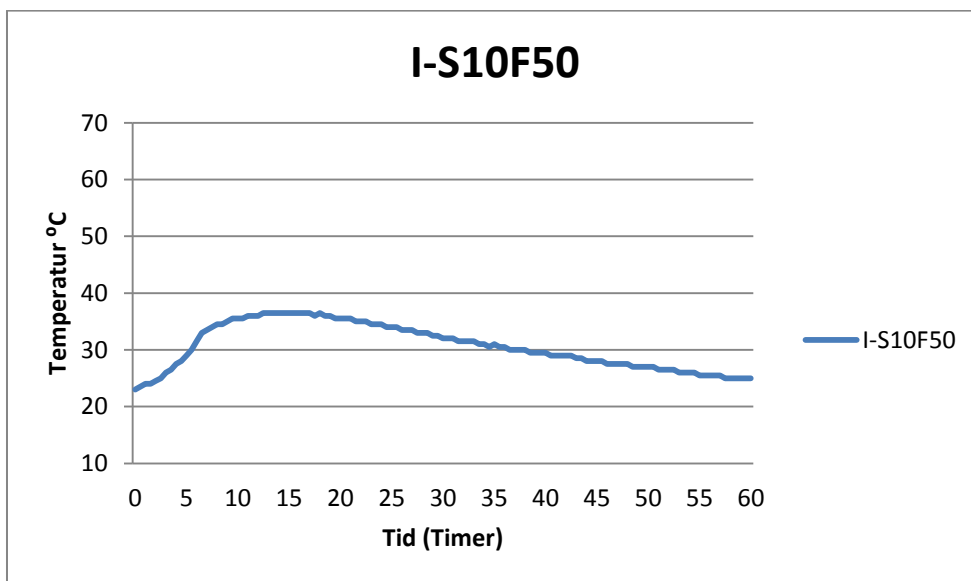


Figur 28: Temperaturutvikling i herdekasse.

Temperaturutvikling i betong



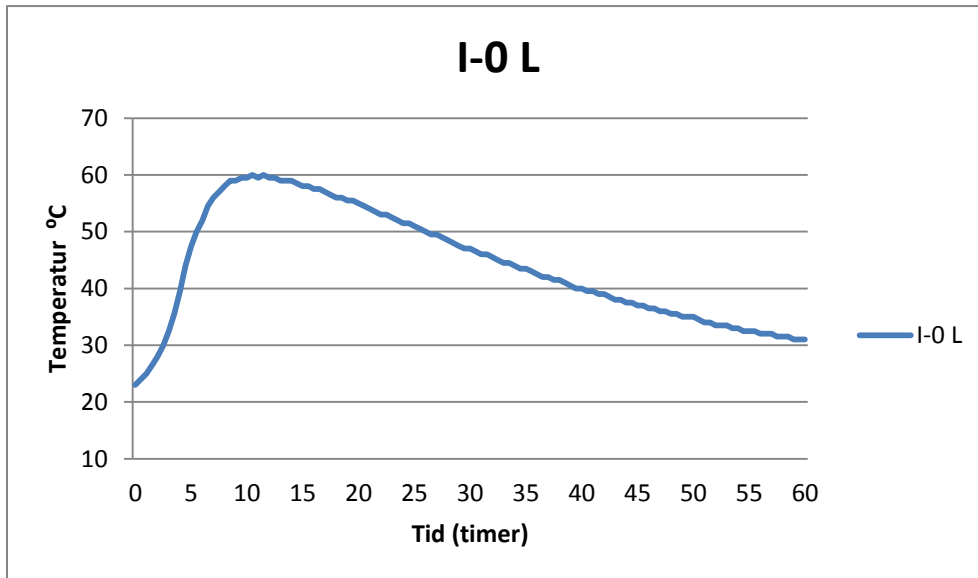
Figur 29: Temperaturutvikling i herdekasse.



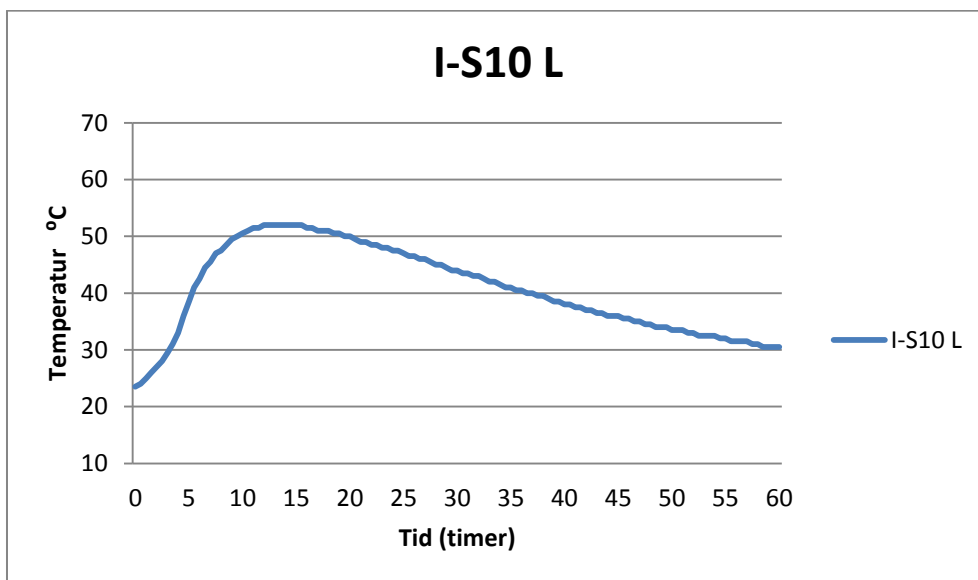
Figur 30: Temperaturutvikling i herdekasse.

6.1.2.2 Industri (Leca)

Figur 31-35 viser grafisk temperaturmålingene utført i herdekasser for blandinger med kombinasjon lett tilslag (Leca) og industrisement.

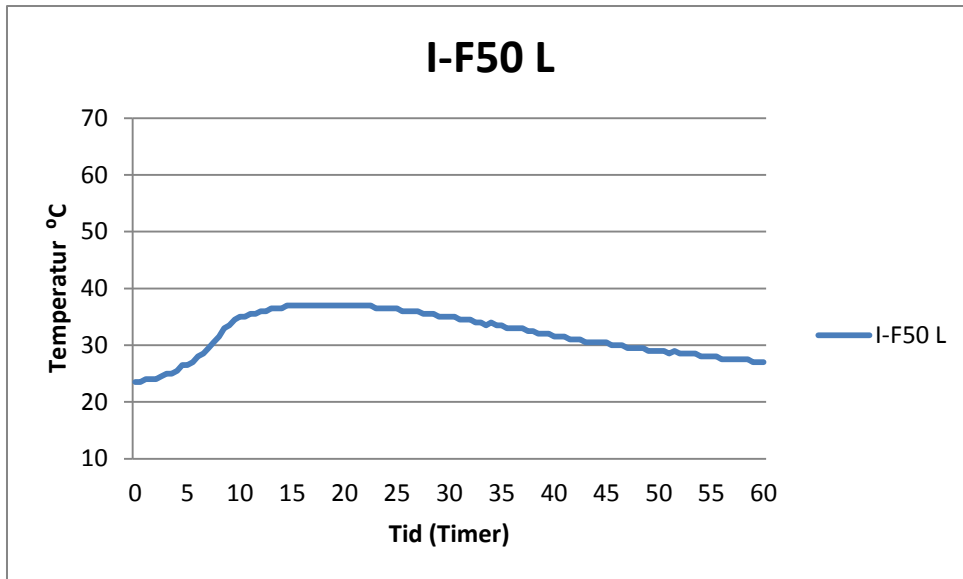


Figur 31: Temperaturutvikling i herdekasse.

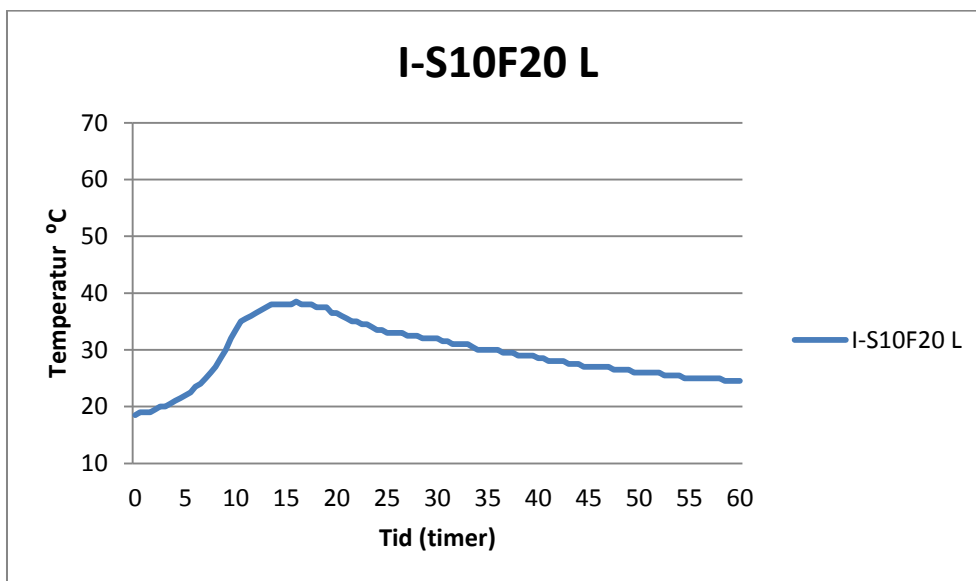


Figur 32: Temperaturutvikling i herdekasse.

Temperaturutvikling i betong

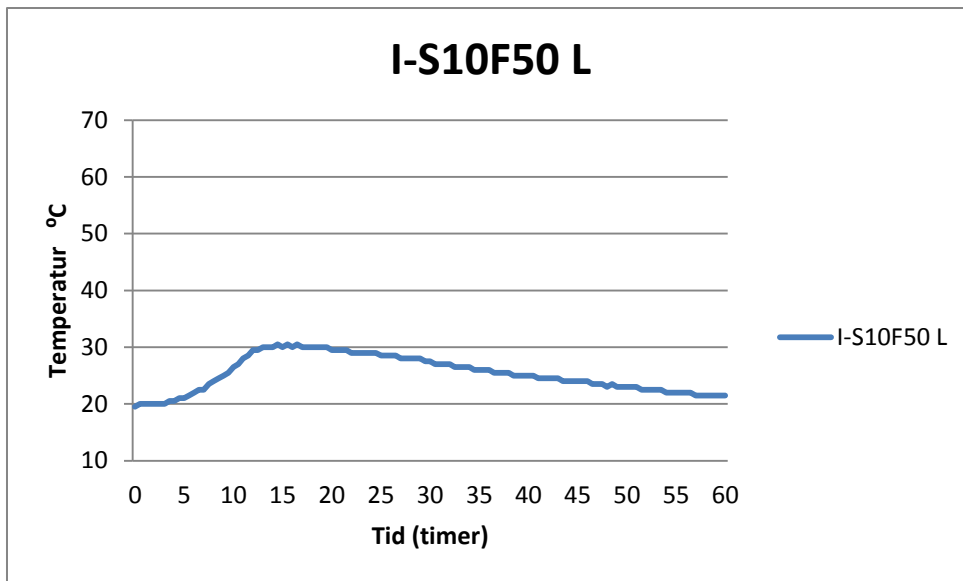


Figur 33: Temperaturutvikling i herdekasse.



Figur 34: Temperaturutvikling i herdekasse.

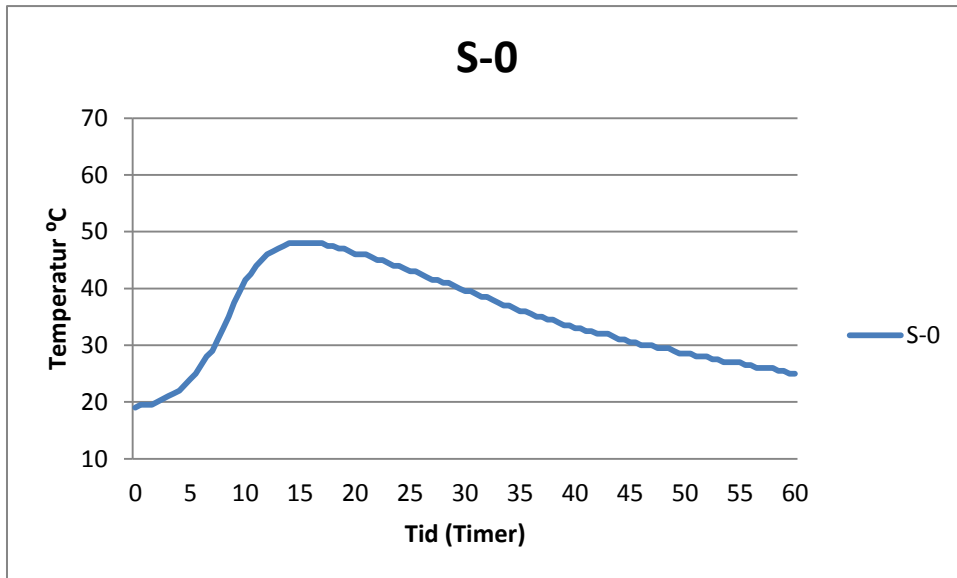
Temperaturutvikling i betong



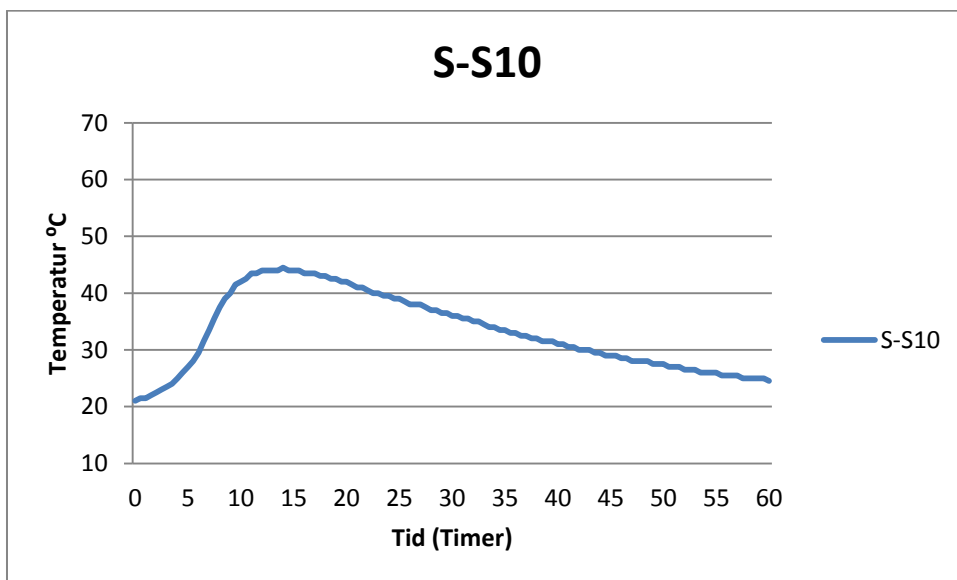
Figur 35: Temperaturutvikling i herdekasse.

6.1.2.3 Standard (Forsand)

Figur 36-40 viser grafisk temperaturmålingene utført i herdekasser for blandinger med kombinasjon vanlig tilslag (Forsand) og standardsement.

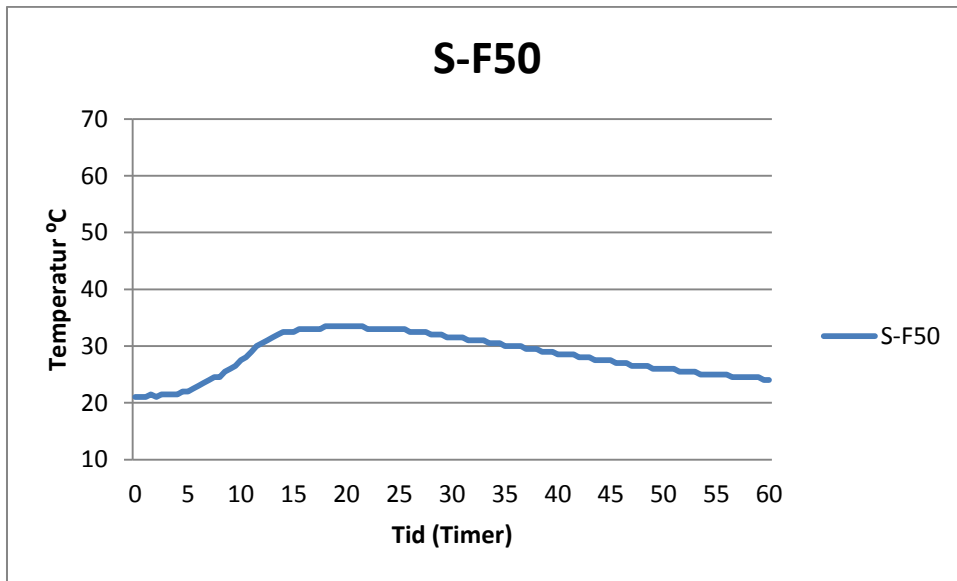


Figur 36: Temperaturutvikling i herdekasse.

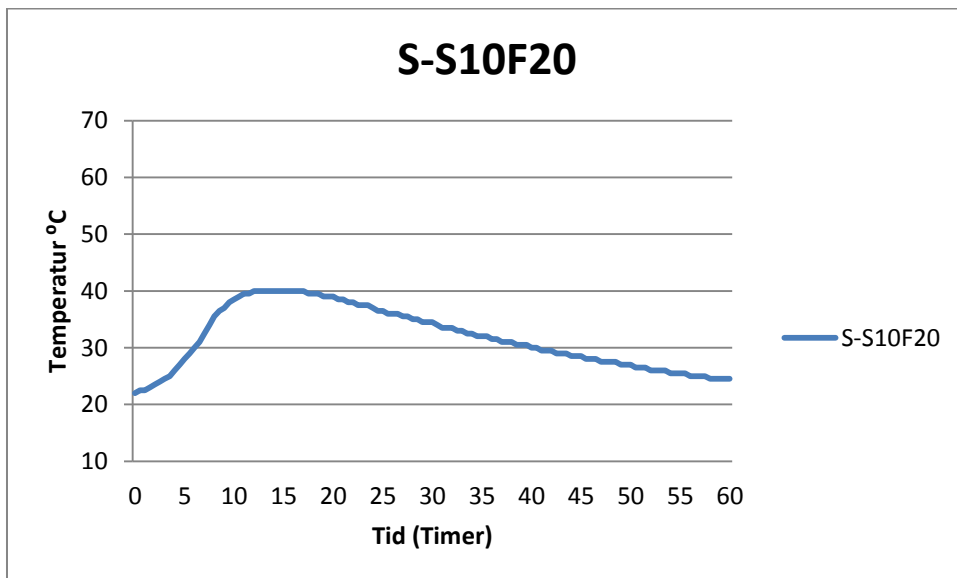


Figur 37: Temperaturutvikling i herdekasse.

Temperaturutvikling i betong

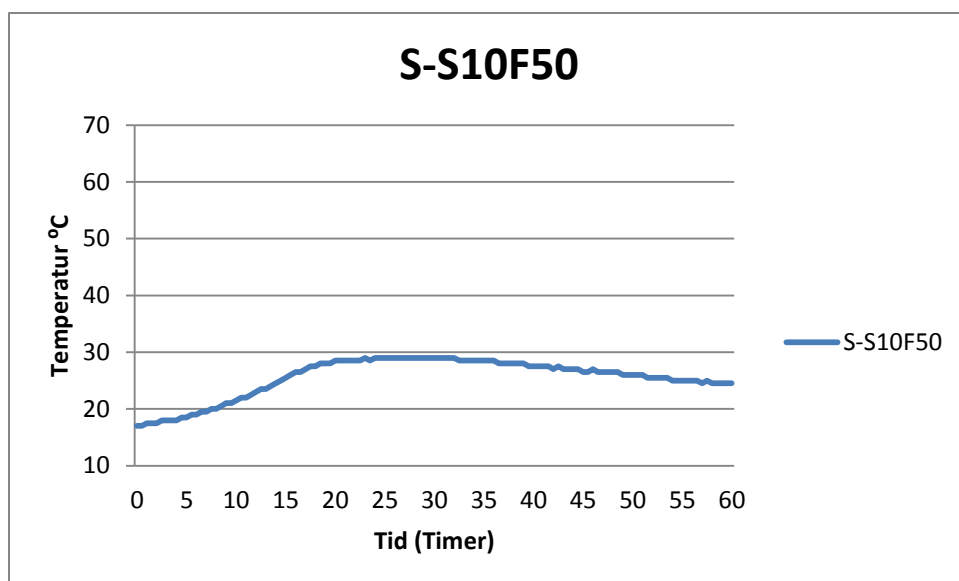


Figur 38: Temperaturutvikling i herdekasse.



Figur 39: Temperaturutvikling i herdekasse.

Temperaturutvikling i betong

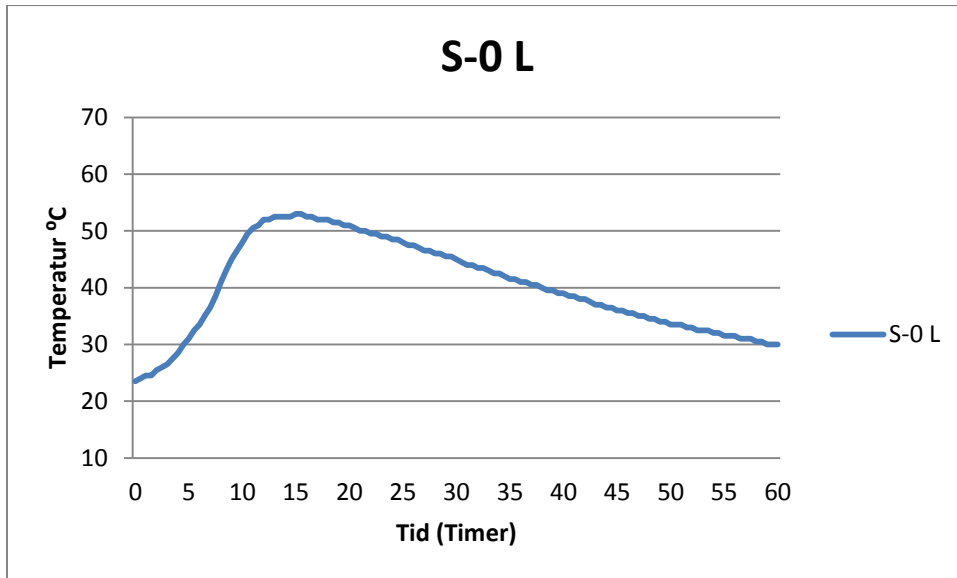


Figur 40: Temperaturutvikling i herdekasse.

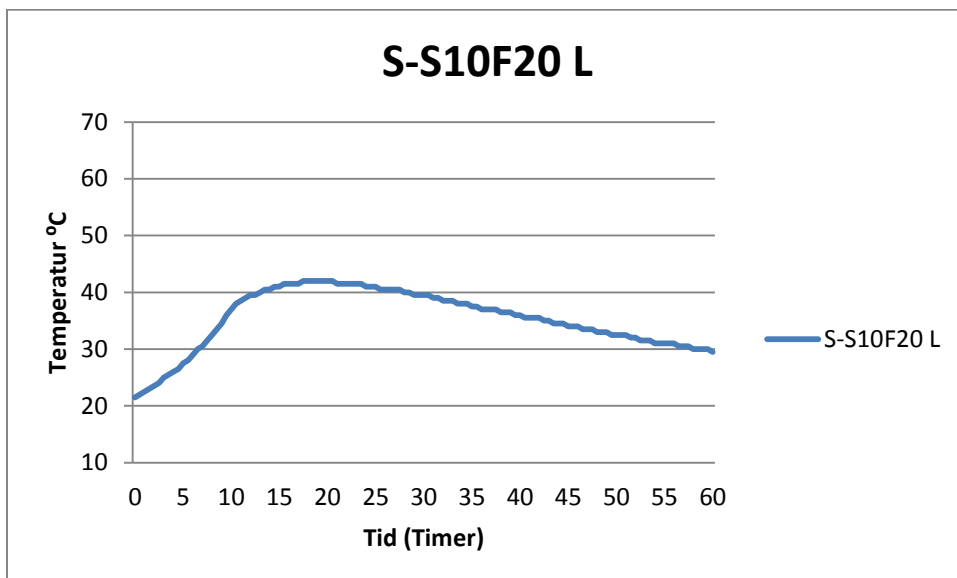
Temperaturutvikling i betong

6.1.2.4 Standard (Leca)

Figur 41-43 viser grafisk temperaturmålingene utført i herdekasser for blandinger med kombinasjon lett tilslag (Leca) og standardsement.

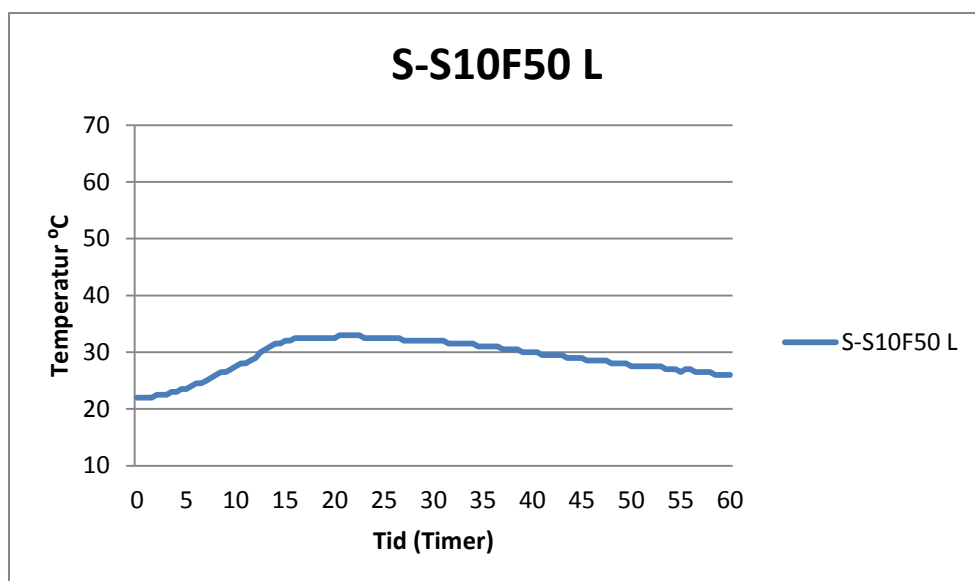


Figur 41: Temperaturutvikling i herdekasse.



Figur 42: Temperaturutvikling i herdekasse.

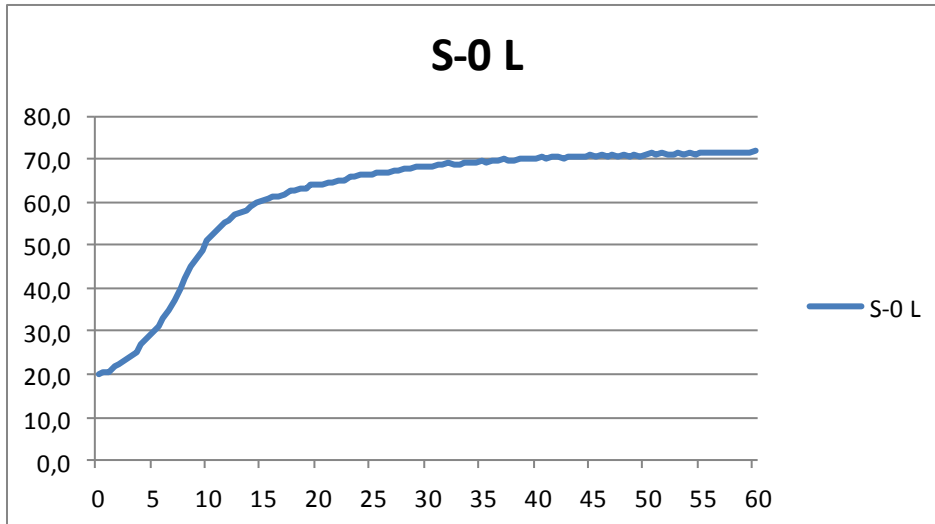
Temperaturutvikling i betong



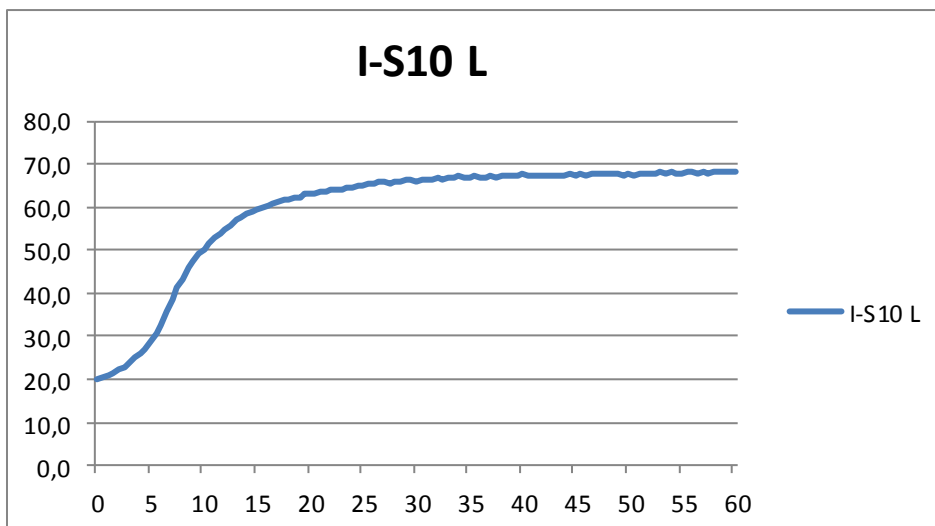
Figur 43: Temperaturutvikling i herdekasse.

6.1.2.5 *Adiabatisk temperaturutvikling*

Figur 44-47 viser den adiabatiske temperaturutvikling for fire tilfeldig valgte betongblandinger.

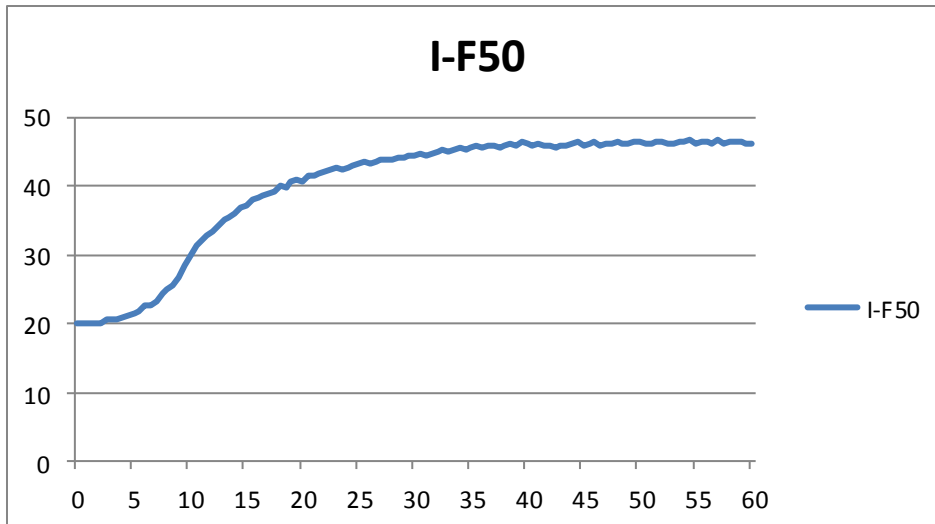


Figur 44: Adiabatisk temperaturutvikling.

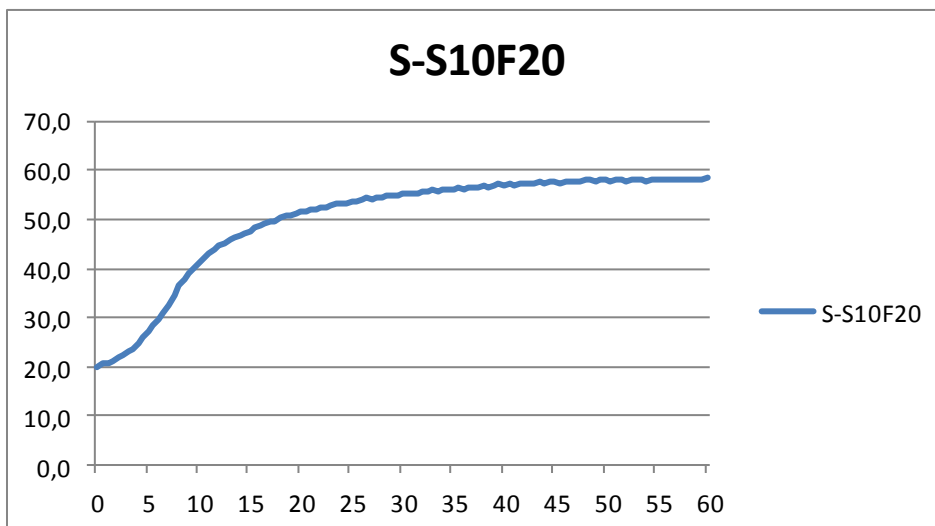


Figur 45: Adiabatisk temperaturutvikling.

Temperaturutvikling i betong



Figur 46:Adiabatisk temperaturutvikling.



Figur 47:Adiabatisk temperaturutvikling.

6.1.2 Trykktesting

Resultatene fra trykktesting utført på laboratoriet er vist for de ulike betongblandingene i tabell 14. Fra tabell er det mulig å lese av verdier for trykkfasthet etter 1, 2, 3, 7 og 28 døgn.

Det er testet 2 terninger for hver testblanding ved de ulike tidspunktene. Dette for å ha mulighet til å oppdage eventuelle avvik.

Tabell 14: Trykkfasthet etter 1, 2, 3, 7 og 28 døgns fasthetsutvikling.

Trykktesting										
Prøve	1 døgn [MPa]		2 døgn [MPa]		3 døgn [MPa]		7 døgn [MPa]		28 døgn [MPa]	
I-0	41,12	42,43	51,59	52,89	60,59	56,57	67,04	66,17	77,14	76,16
I-0 L	34,23	34,24	45,09	43,34	48,83	46,32	56,04	55,37	63,20	63,70
I-F50	11,70	11,53	21,82	21,12	26,30	24,98	32,71	31,31	46,22	45,94
I-F50 L	7,73	7,64	15,65	15,40	18,76	18,50	24,37	23,94	36,60	37,57
I-S10	27,02	28,17	40,00	41,27	47,86	46,91	57,00	57,33	73,47	73,15
I-S10 L	26,48	27,89	39,56	39,12	43,77	42,93	53,75	51,19	68,89	70,29
I-S10F20	17,27	18,45	31,60	31,99	38,11	37,53	46,18	45,25	63,77	66,43
I-S10F20 L	15,80	16,05	24,37	25,60	30,81	30,09	38,92	36,62	54,55	52,98
I-S10F50	14,04	14,18	17,81	17,57	20,57	20,51	24,29	23,62	37,16	39,11
I-S10F50 L	6,12	6,01	10,29	10,68	12,83	13,58	16,81	17,10	29,47	29,76
S-0	11,32	10,45	35,11	36,06	44,66	45,96	61,68	62,02	75,17	72,99
S-0 L	22,51	23,63	30,59	34,61	39,09	38,96	48,27	48,29	59,74	59,43
S-S10F20	17,90	17,29	31,28	31,23	35,43	34,98	45,52	45,21	67,45	67,44
S-S10F20 L	6,96	7,09	11,97	11,86	14,96	15,03	19,56	19,00	31,49	32,39
S-S10F50	4,16	3,85	11,23	10,77	14,16	14,34	21,76	20,36	37,39	37,43
S-S10F50 L	5,78	5,42	8,87	9,34	11,79	11,00	15,71	16,01	30,05	28,98
S-S10	28,44	28,81	44,32	46,17	48,93	49,70	61,84	62,67	78,89	82,96
S-F50	8,93	8,01	19,68	20,02	23,94	22,04	31,30	29,35	44,82	48,66

6.2 Resultat varmeutviklingsparameter

6.2.1 Egenskapsfunksjon

Ved å legge data loggført av temperaturfølerne inn i herdekasseprogram, kan den adiabatiskke varmeutviklingen i betongen finnes. Ut ifra de ulike målingene er det mulig å finne den danske og svenske egenskapsfunksjonen.

Den danske egenskapsfunksjonen er spesielt interessant. Her kan varmeutviklingsparameterne Q_{∞} , τ og α som listet i Tabell 15 finnes. Disse parameterne skal benyttes som en del av inngangsparameterne i regnearket utviklet i Excel.

Tabell 15: Verdier tilhørende Dansk egenskapsfunksjon.

Blanding	Q_{∞} kJ/kg sement	τ	α
I-0	303	7,64	1,40
I-S10	269	8,85	1,39
I-F50	166	12,30	1,46
I-S10F20			
I-S10F50	146	6,98	1,11
I-0 L	343	7,07	1,02
I-S10 L	297	9,41	1,12
I-F50 L	325	21,39	0,68
I-S10F20 L	808	42,46	0,55
I-S10F50 L	135	10,26	1,17
S-0	350	9,95	0,94
S-S10	273	9,72	1,10
S-F50	277	20,07	0,87
S-S10F20	253	10,50	0,96
S-S10F50	149	12,04	0,84
S-0 L	337	11,96	0,98
S-S10F20 L	273	13,11	0,82
S-S10F50 L	321	29,09	0,69

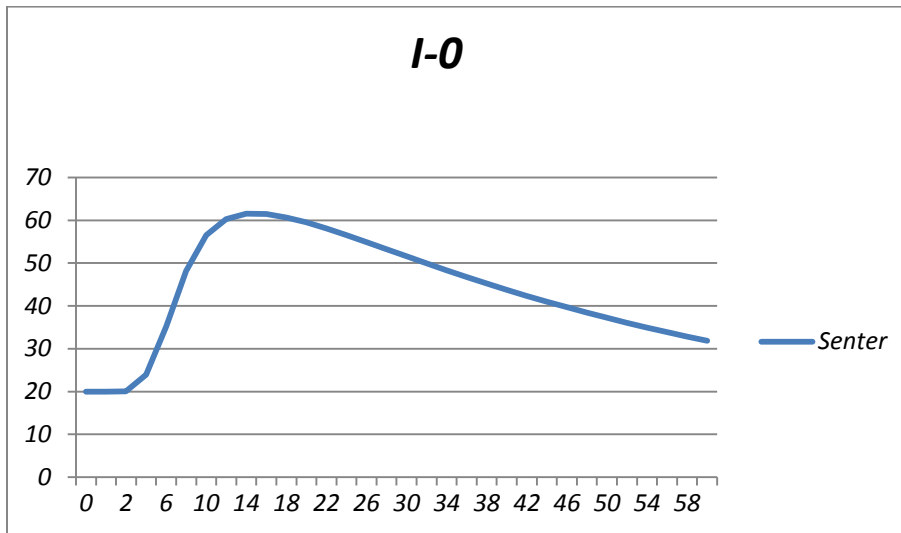
Ved temperaturmåling av betongblanding I-S10F20, registrerte aldri temperaturføleren temperaturen ved de ulike intervallene. Temperaturmåleren fungerte ikke som den skulle.

For I-S10F20 ble registreringer av temperaturdata gjort i ca 12 timer. Etter dette sluttet føleren å fungere. Dermed var innhold av datamålinger ikke tilstrekkelige for å kunne få riktige varmeutviklingsparameter.

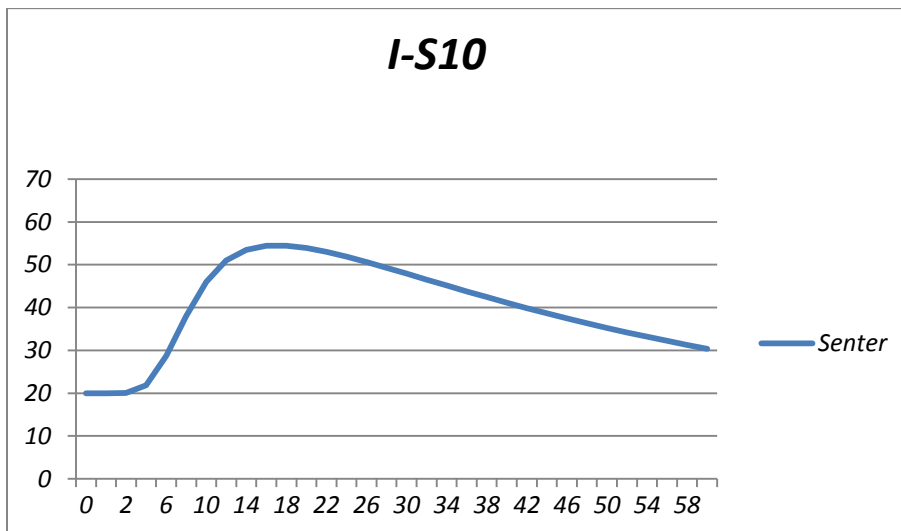
6.3 Temperatursimuleringsprogram i Excel

6.3.1 Industri (Forsand)

Figur 48-51 viser resultater fra temperatursimulering av betongblanding med industrisement og vanlig tilslag i utviklet regneark.

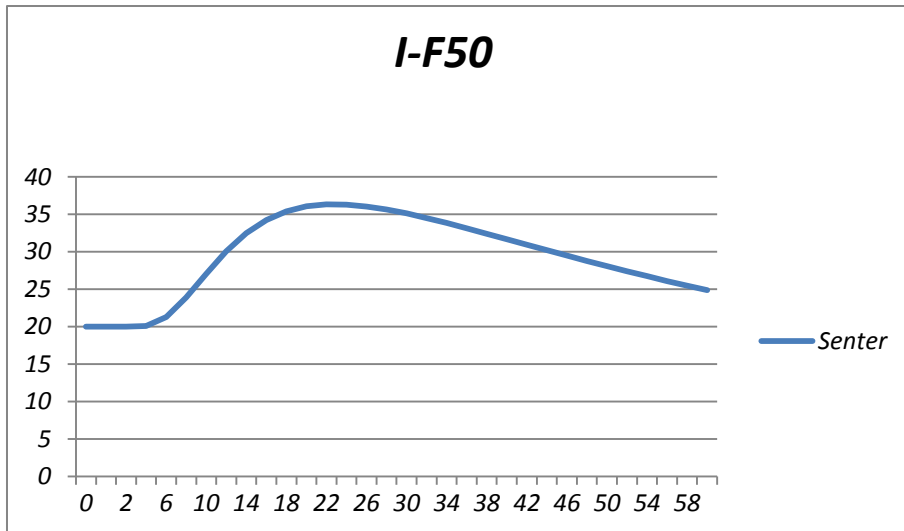


Figur 48: Temperatursimulering fra regneark.

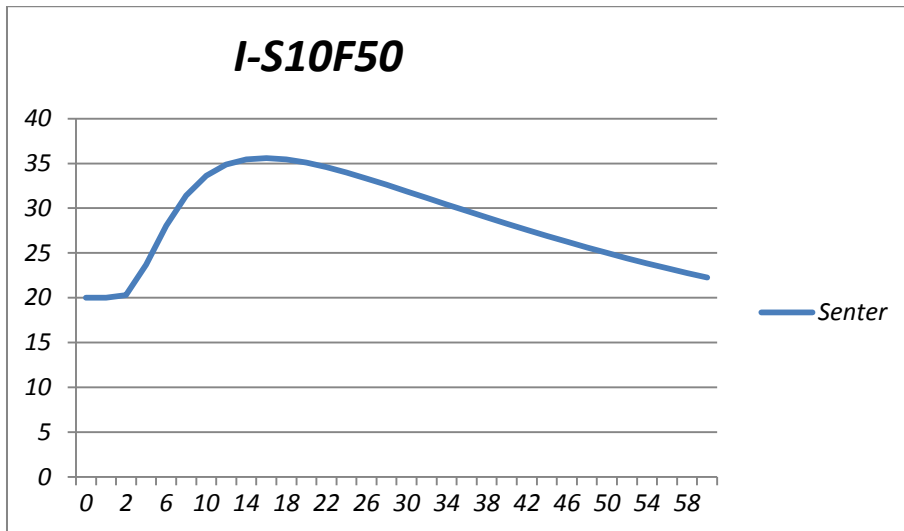


Figur 49: Temperatursimulering fra regneark.

Temperaturutvikling i betong



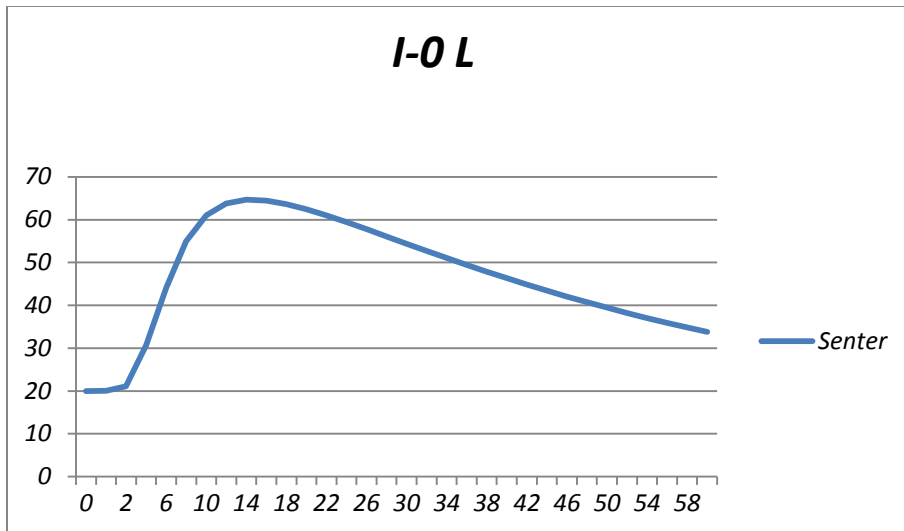
Figur 50: Temperatursimulering fra regneark.



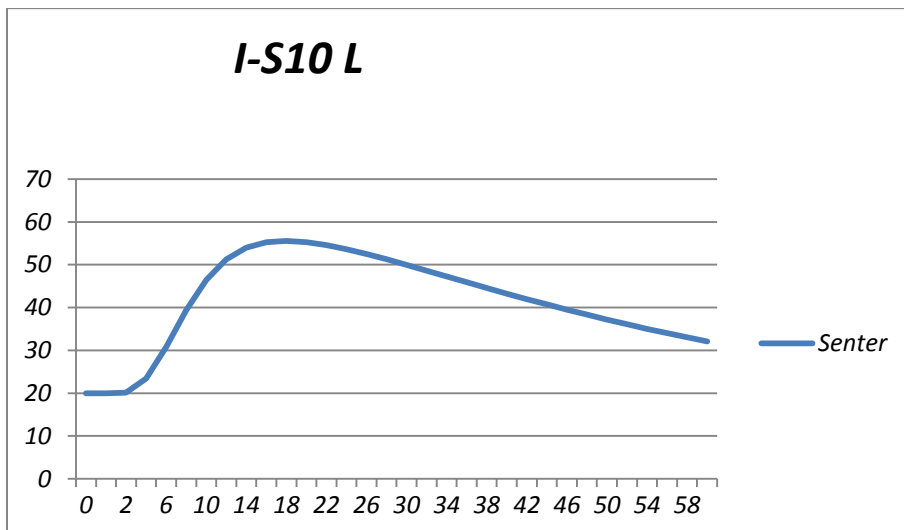
Figur 51: Temperatursimulering fra regneark.

6.3.2 Industri (Leca)

Figur 52-55 viser resultater fra temperatursimulering av betongblanding med industrisement og lett tilslag i utviklet regneark.

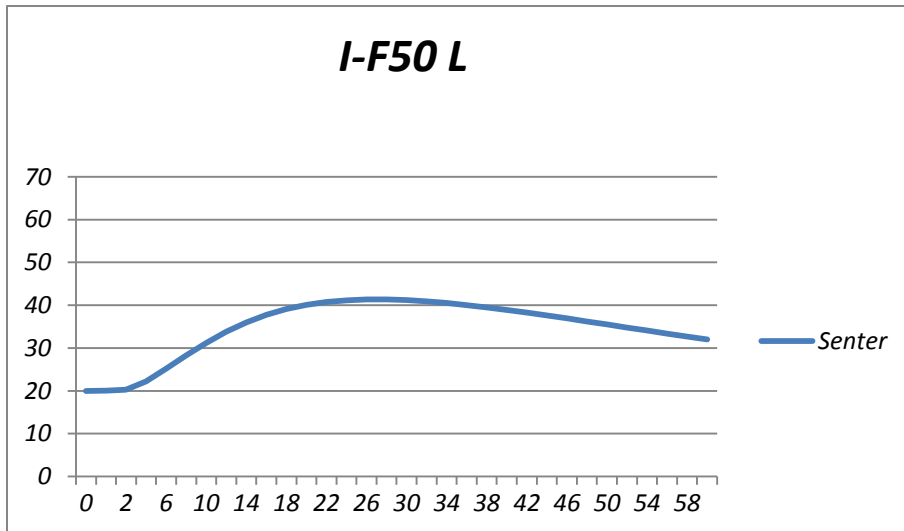


Figur 52: Temperatursimulering fra regneark.

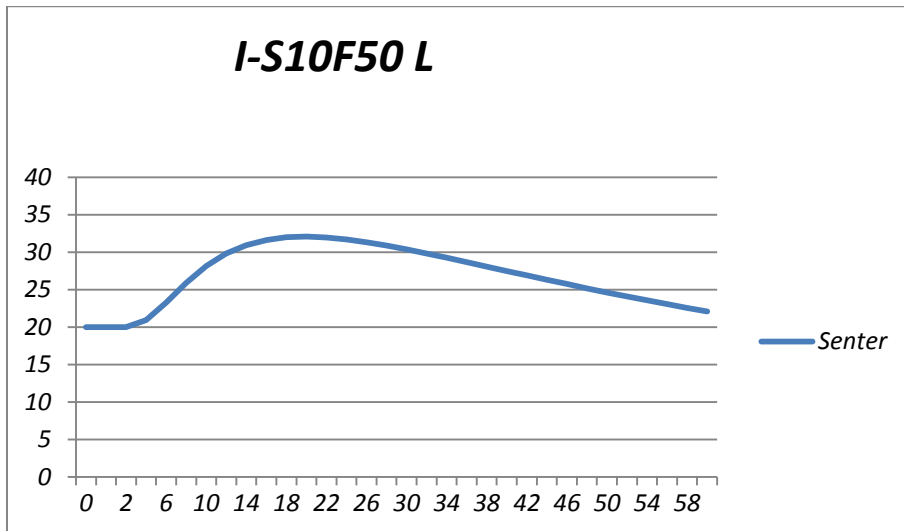


Figur 53: Temperatursimulering fra regneark.

Temperaturutvikling i betong



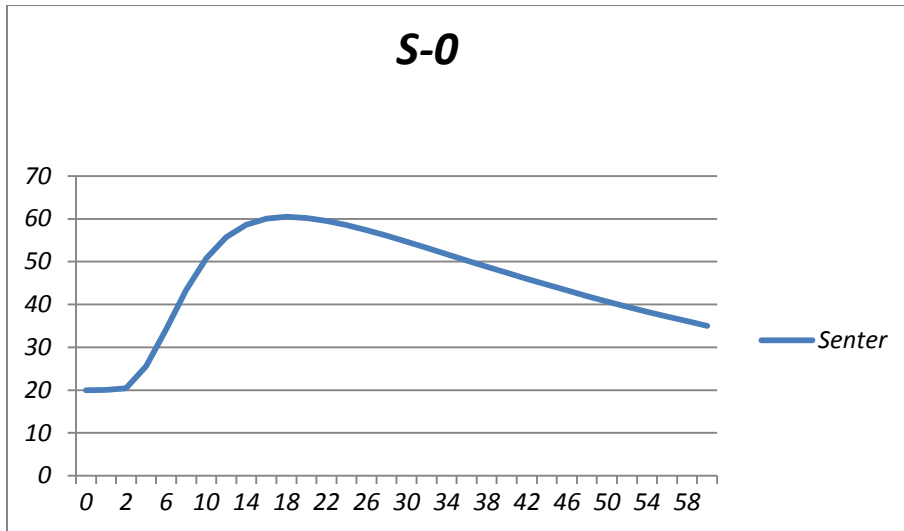
Figur 54: Temperatursimulering fra regneark.



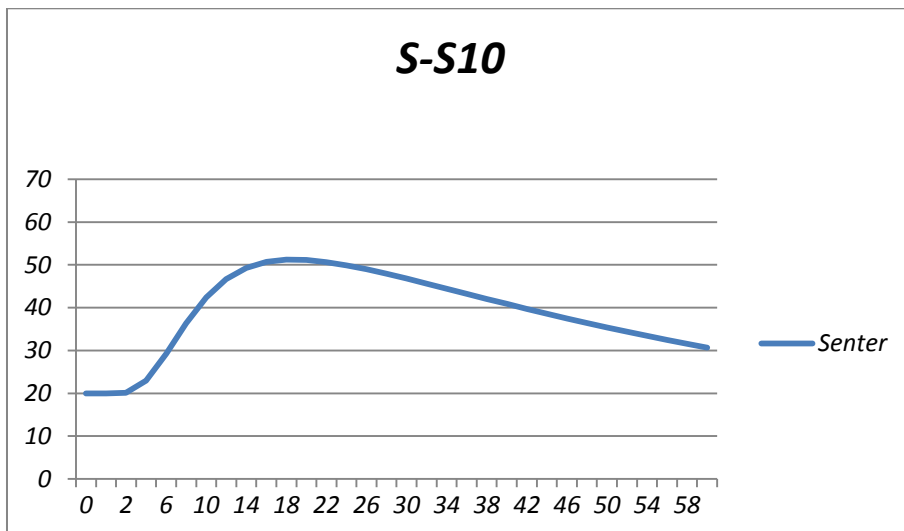
Figur 55: Temperatursimulering fra regneark.

6.3.3 Standard (Forsand)

Figur 56-60 viser resultater fra temperatursimulering av betongblanding med standardsement og vanlig tilslag i utviklet regneark.

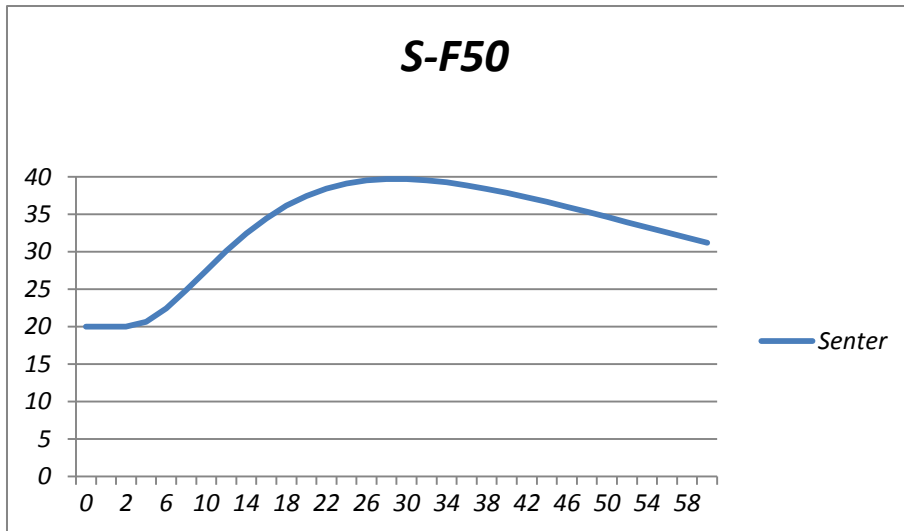


Figur 56: Temperatursimulering fra regneark.

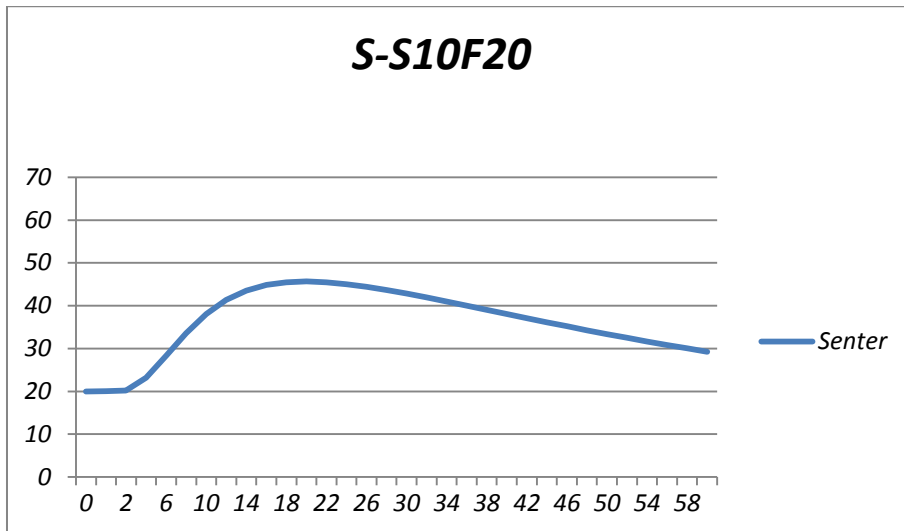


Figur 57: Temperatursimulering fra regneark.

Temperaturutvikling i betong

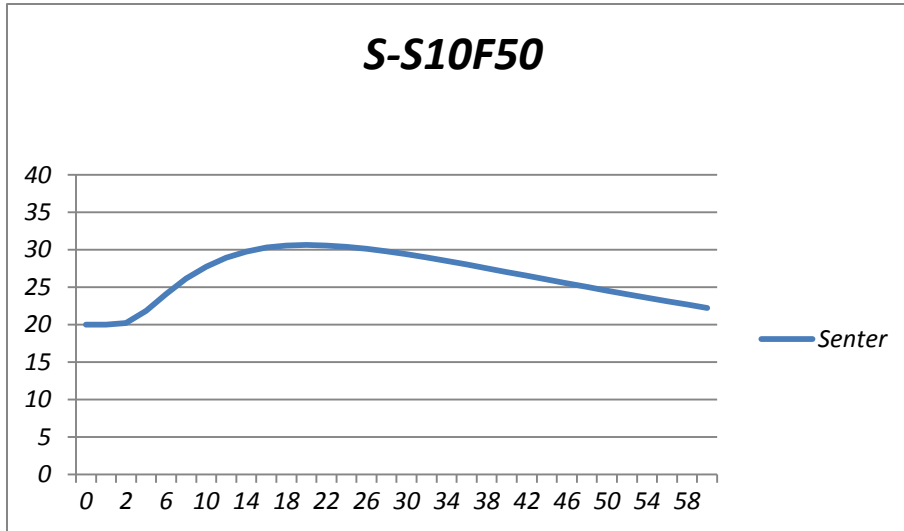


Figur 58: Temperatursimulering fra regneark.



Figur 59: Temperatursimulering fra regneark.

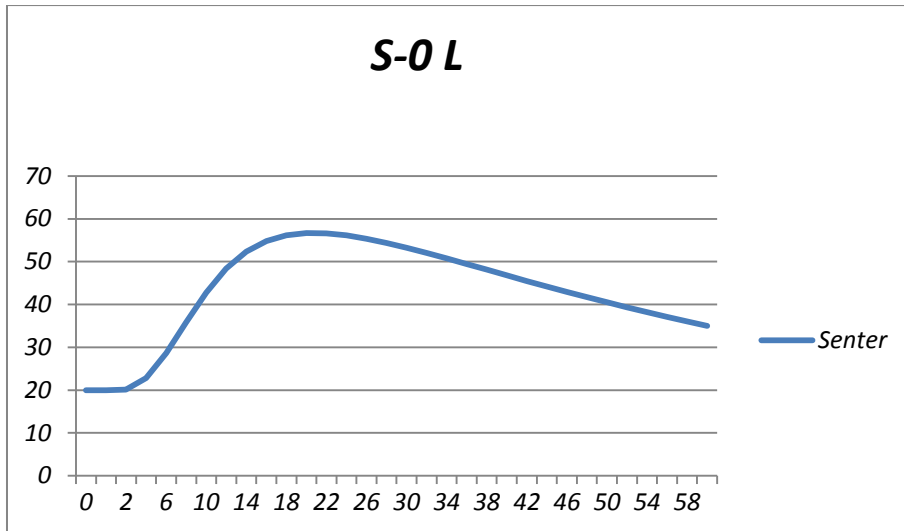
Temperaturutvikling i betong



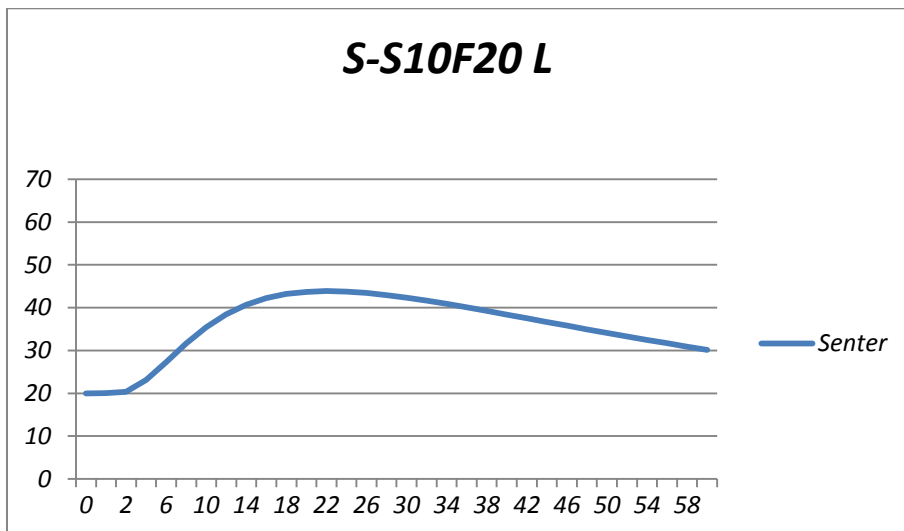
Figur 60: Temperatursimulering fra regneark.

6.3.4 Standard (Leca)

Figur 61-63 viser resultater fra temperatursimulering av betongblanding med standardsement og vanlig tilslag i utviklet regneark.

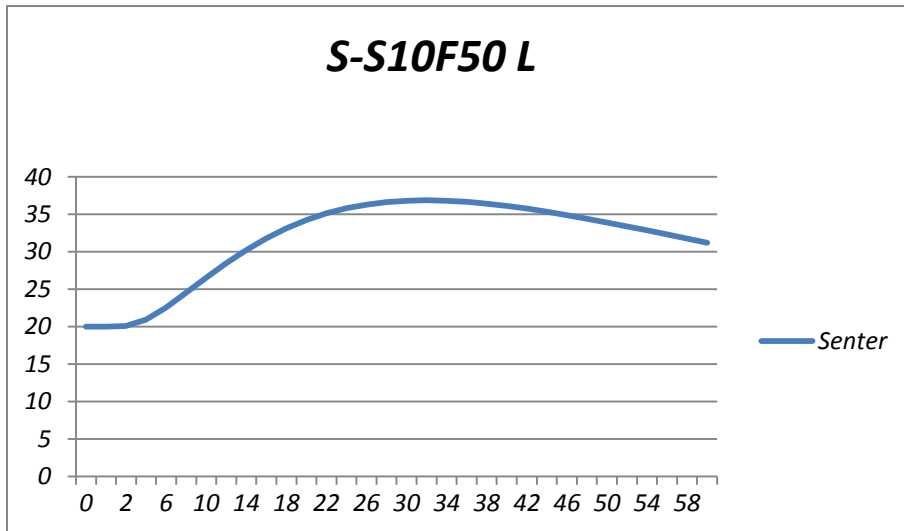


Figur 61: Temperatursimulering fra regneark.



Figur 62: Temperatursimulering fra regneark.

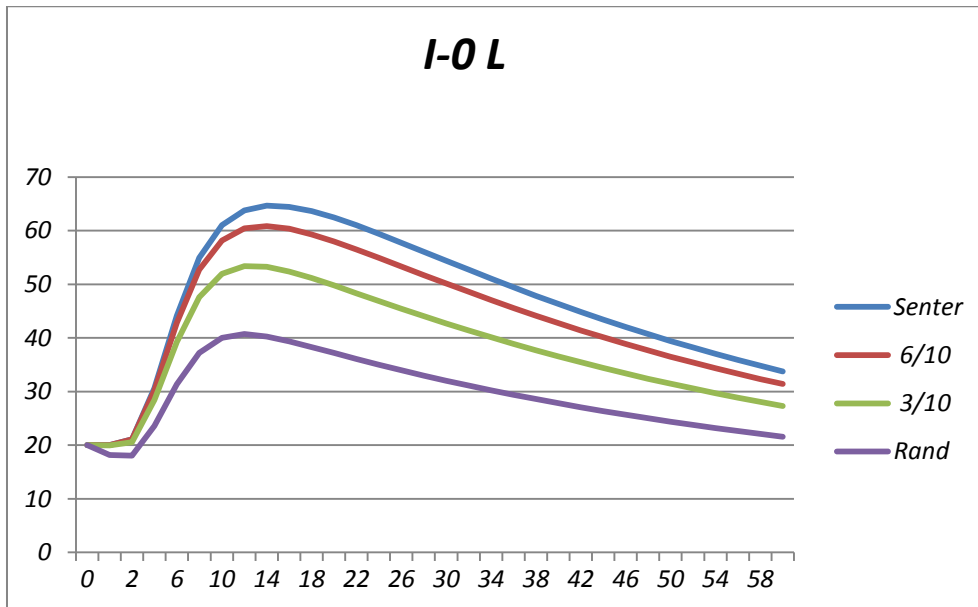
Temperaturutvikling i betong



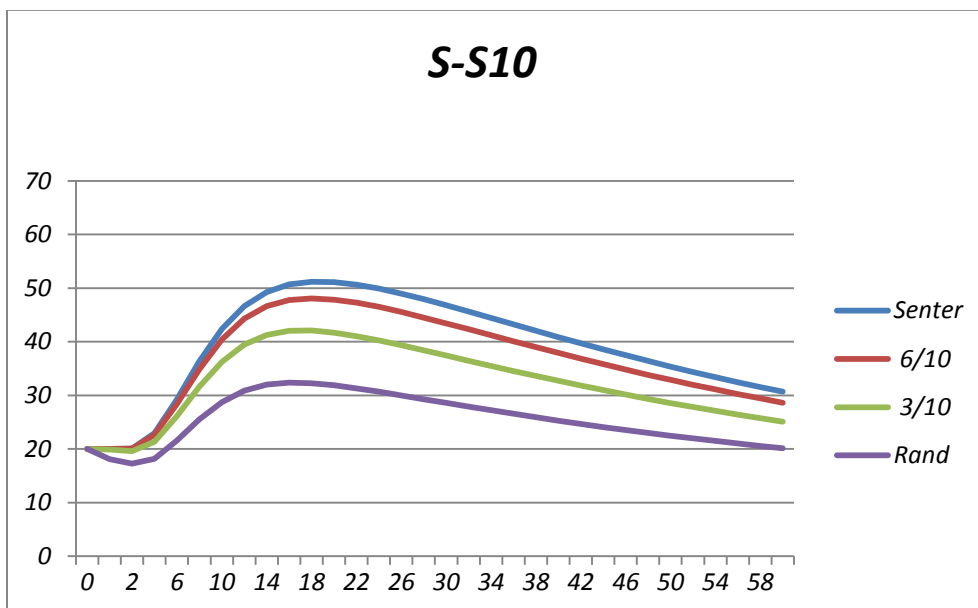
Figur 63: Temperatursimulering fra regneark.

6.3.5 Temperaturgradienter

Noen tilfeldig valgte betongblandinger er plukket ut for å se nærmere på forskjeller i temperatur innad i konstruksjonen. På den måten er det mulig å sammenligne temperaturgradienter for blandinger med ulik mengde og type pozzolan, tilslag og sement.

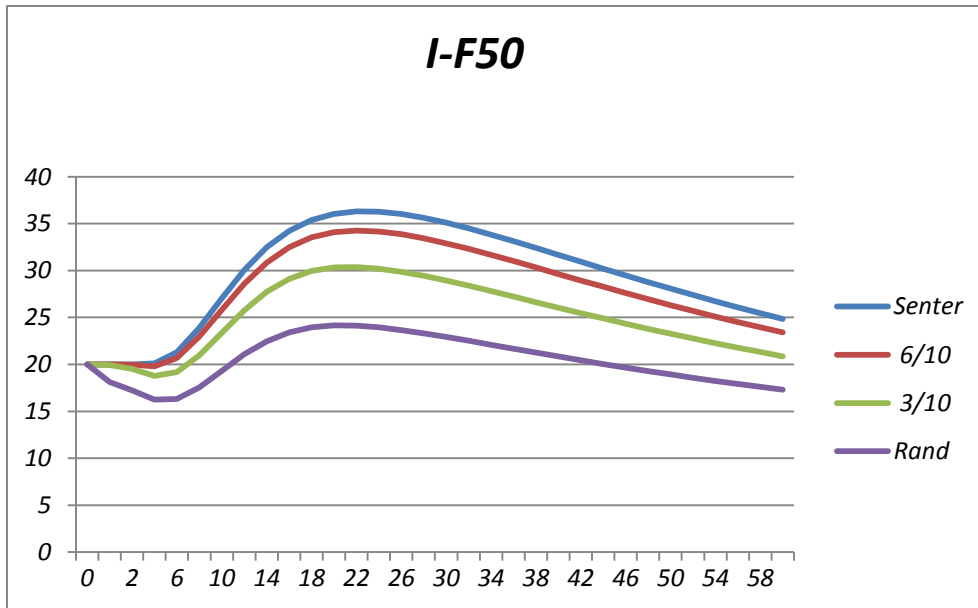


Figur 64: Temperaturutvikling.

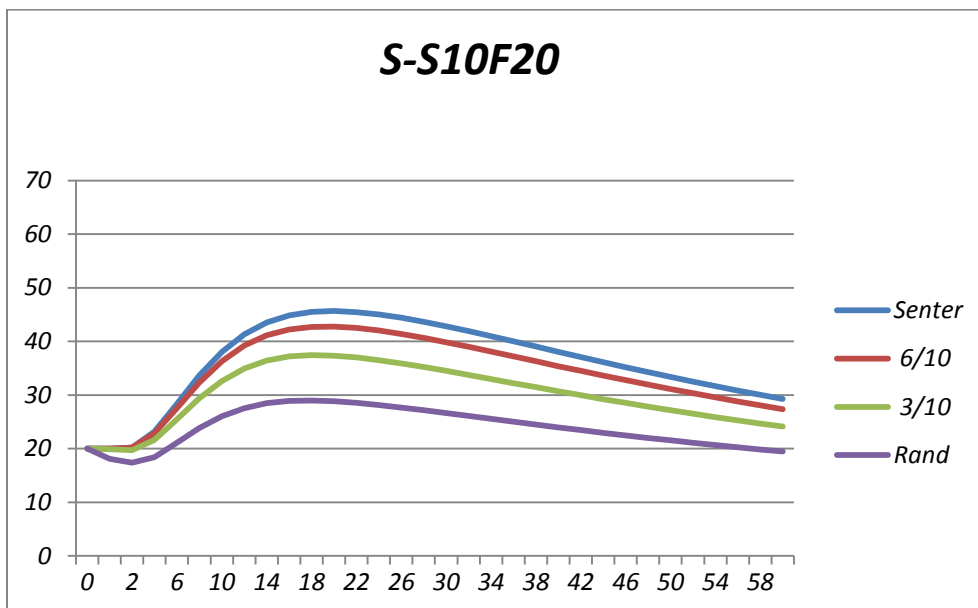


Figur 65: Temperaturutvikling.

Temperaturutvikling i betong

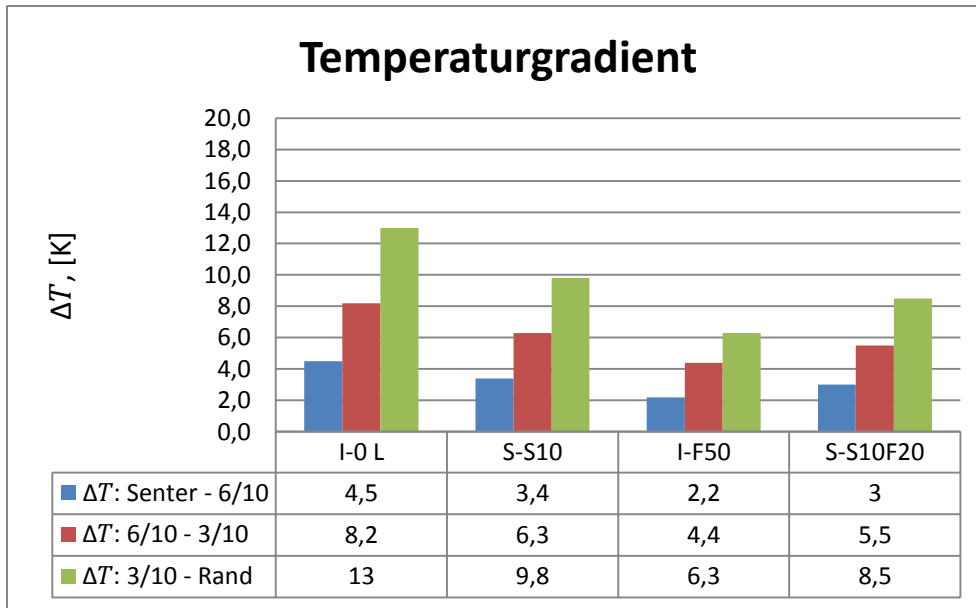


Figur 66: Temperaturutvikling.



Figur 67: Temperaturutvikling.

Temperaturutvikling i betong



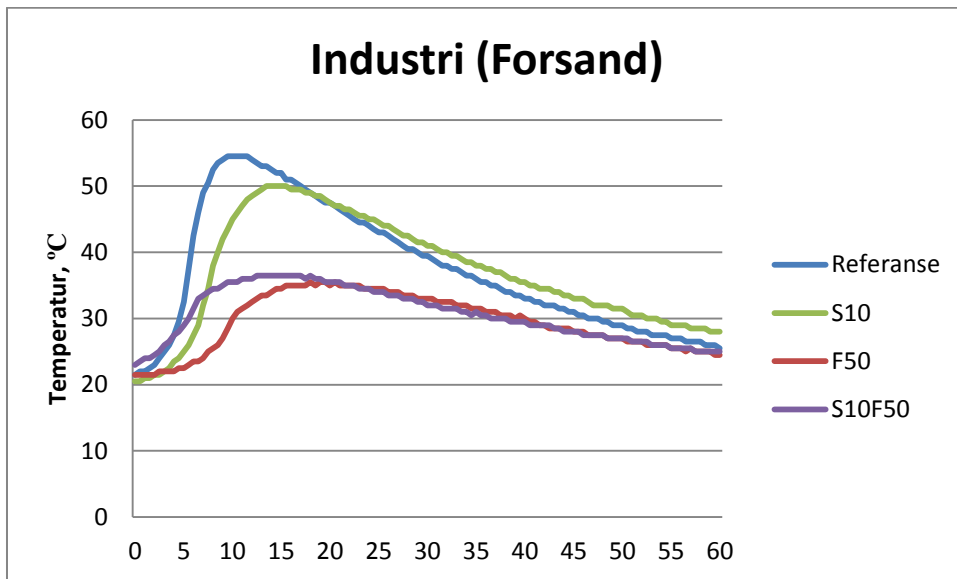
Figur 68: Temperaturgradienter.

Figur 68 gir et bedre bilde på temperaturgradientene innad i konstruksjonene.

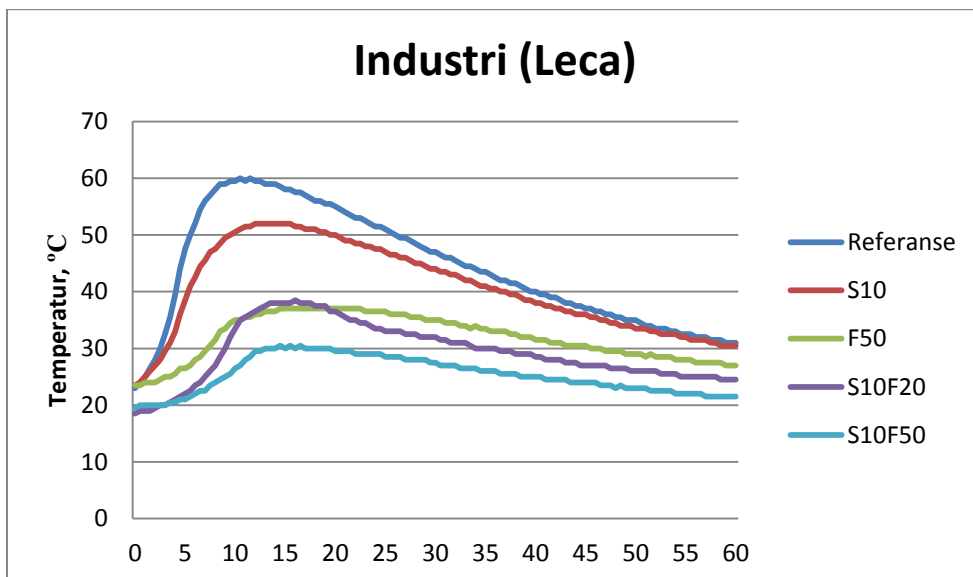
Temperaturgradientene er tatt der de har den største temperaturdifferansen uavhengig av tidspunkt disse opptrer.

7. Diskusjon

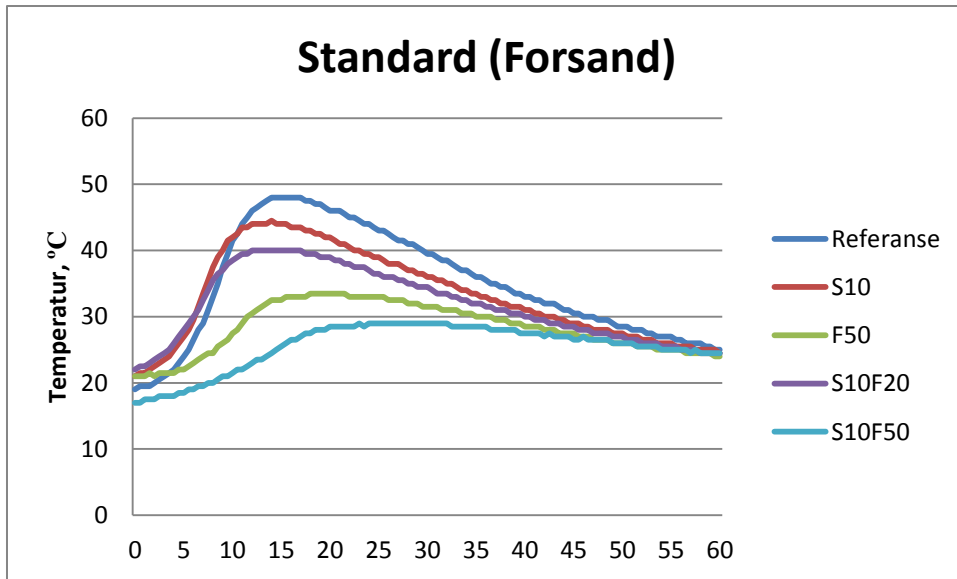
7.1 Temperaturutvikling



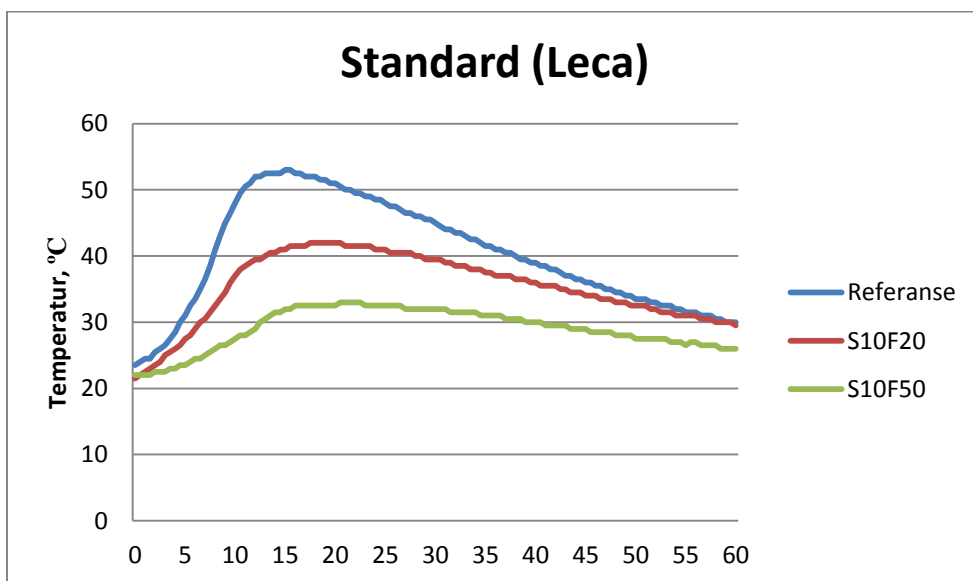
Figur 69: Temperaturutvikling i herdekasse.



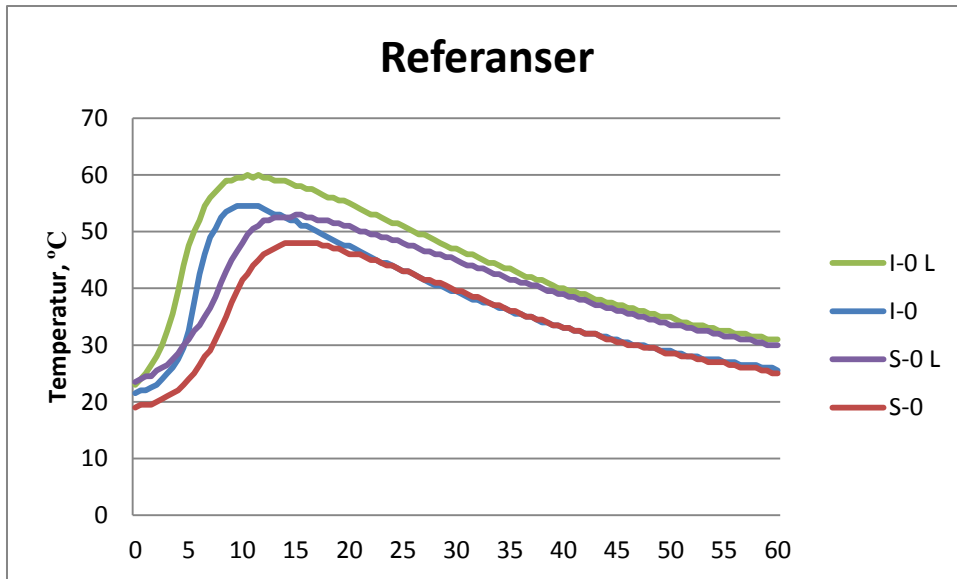
Figur 70: Temperaturutvikling i herdekasse.



Figur 71: Temperaturutvikling i herdekasse.



Figur 72: Temperaturutvikling i herdekasse.



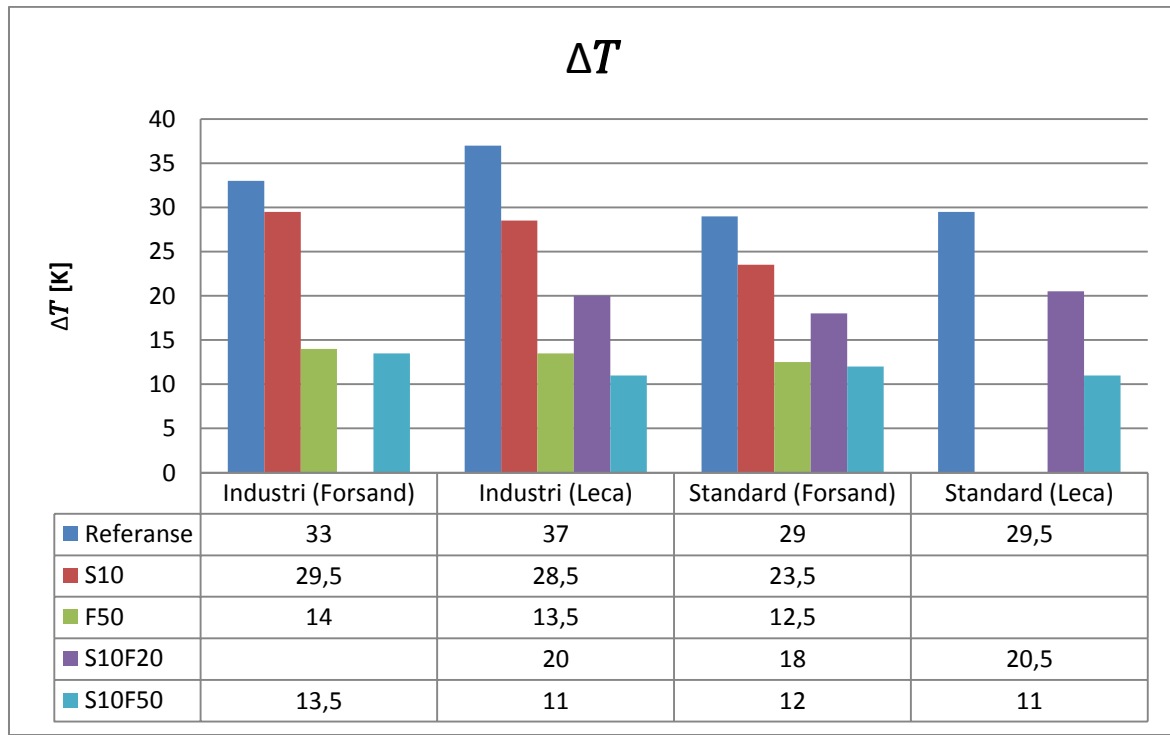
Figur 73: Temperaturutvikling i herdekasse.

Figur 69-73 viser temperaturutviklingen til et utvalg betongblandinger. Ut ifra grafene er det mulig å gjøre sammenlikninger. Fra grafer ser vi at ved økt mengde pozzolan får man lavere maks temperatur. Spesielt ved høy dosering med flygeaske får man redusert herdetemperatur. Ved betydelige mengder pozzolan går temperaturen slakere mot sin maksimale verdi og maks temperaturen oppnås ved et senere tidspunkt enn for blandinger med mindre eller ingen pozzolan tilsetning.

Pga varierende omgivelsestemperatur for de ulike betongblandingene vil allikevel ikke sammenlikningene bli helt presise. Omgivelsestemperaturen har imidlertid ikke ekstreme variasjoner og har ligget rundt $\pm 20^{\circ}\text{C}$. I tillegg har herdingen tatt sted i store herdekasser. Disse gir økt isolasjonseffekt og mindre påvirkning fra omgivelsene.

Temperaturutvikling i betong

Stolpediagram som viser temperaturredifferansen mellom utstøpingstemperatur og maksimal temperaturen vil være å foretrekke for mest nøyaktig sammenlikning av data.

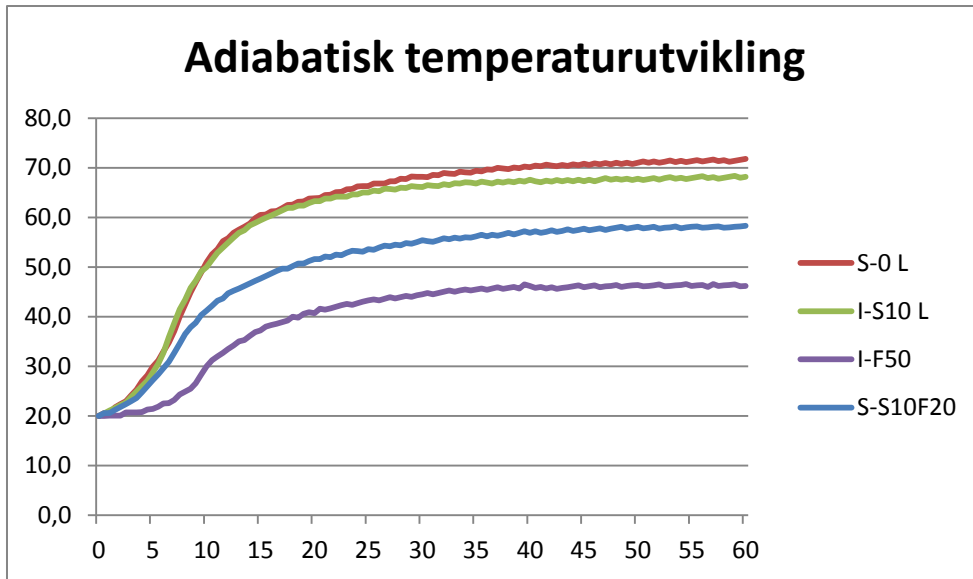


Figur 74: Temperaturdifferanse mellom temperatur ved utstøping og maks temperatur.

Figur 74 viser at mengde pozzolan er direkte avgjørende for størrelsen på temperaturutvikling i betong. Ved økt pozzolan mengde vil herdetemperaturen få redusert maksimalverdi. For blanding F50 og S10F50 ser man at temperaturendringene nesten er like selv om S10F50 blandingene inneholder større mengder pozzolan. Når mikrosilika tilsettes vil mengde SiO_2 øke under hydratisering. Trolig er dette årsaken til at temperaturen ikke faller nevneverdig.

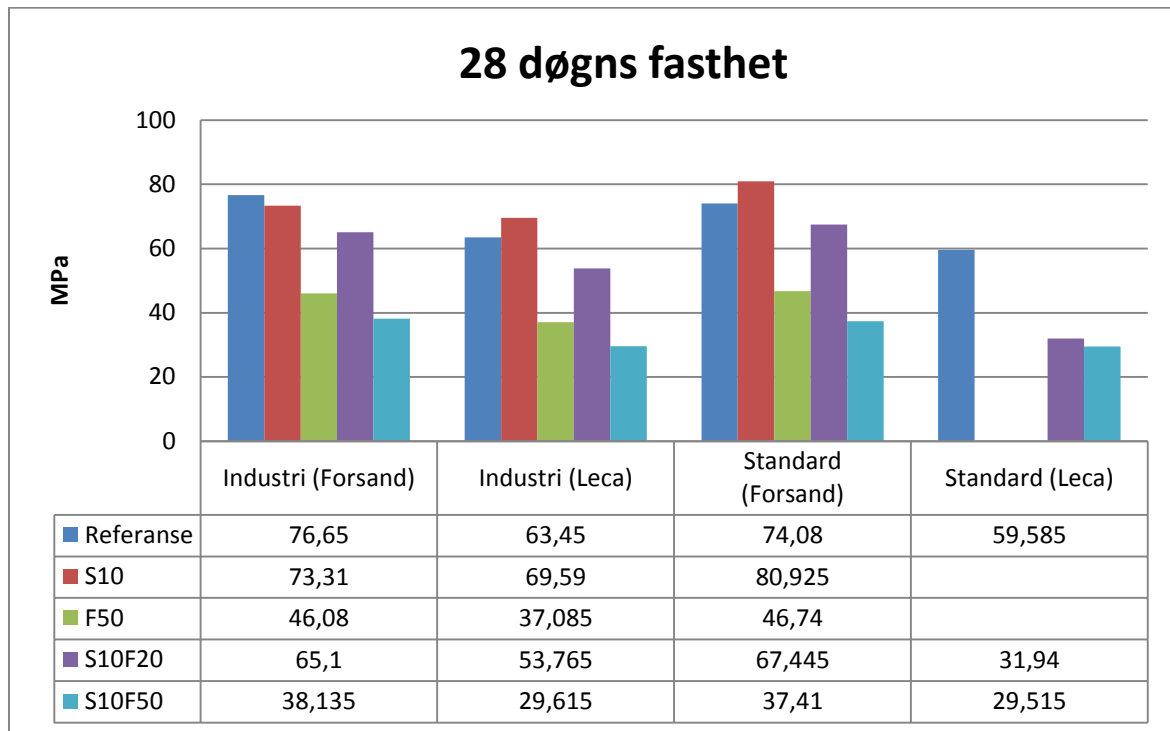
Ved å sammenlikne blandingene med lett og vanlig tilslag ser man at de er relativt like. For noen blandinger er den ene høyere enn den andre og omvendt. Dette indikerer at type tilslag har liten til ingen innvirkning på temperaturstigningen i herdefasen.

Industrisement viser seg også å ha høyere temperaturutvikling enn tilfellet er for standardsement.



Figur 75: Adiabatisk temperaturutvikling.

7.2 Trykkfasthet



Figur 76: 28 døgns trykkfasthet

Figur 76 gir et godt bilde på sementens, pozzolanets og tilslagets innvirkning på trykkfastheten etter 28 døgn.

Ved 28 døgns trykkfasthet viser det seg at type sement utgir svært liten forskjell på hvor stor trykkfasthet betongen har. Dersom man sammenlikner Industrisement og Standardsement for vanlig tilslag kan man se en relativ lik fasthetsutvikling. Ved sammenlikning av Industrisement og Standardsement for lett tilslag ser vi også en liknende trend. Unntaket er for blanding S10F20 hvor vi får et større sprik mellom industri (Leca) og standard (Leca). Det ser ut som det er S-S10F20 L som avviker fra normalen. Den er betraktelig lavere enn for I-S10F20 L. Ved å sammenlikne herdetemperatur for S10F20 blandingene med lett tilslag ser vi at de begge ligger rundt 40 °C, se figur 34 og 42. S-S10F20 L har maksimal temperatur i overkant av 40 °C, mens I-S10F20 L ligger rett under. Fra tabell 14 ser vi at S-S10F20 L har lav trykkfasthet i tidlig alder og frem til 28 døgns fasthet. Dermed er det ikke temperaturutviklingen som står for ulikheten i trykkfasthet. Sammenliknes synkmål, SP-stoff og luftinnhold, se tabell 13, for de ulike blandingene ser man heller ikke tegn til nevneverdig

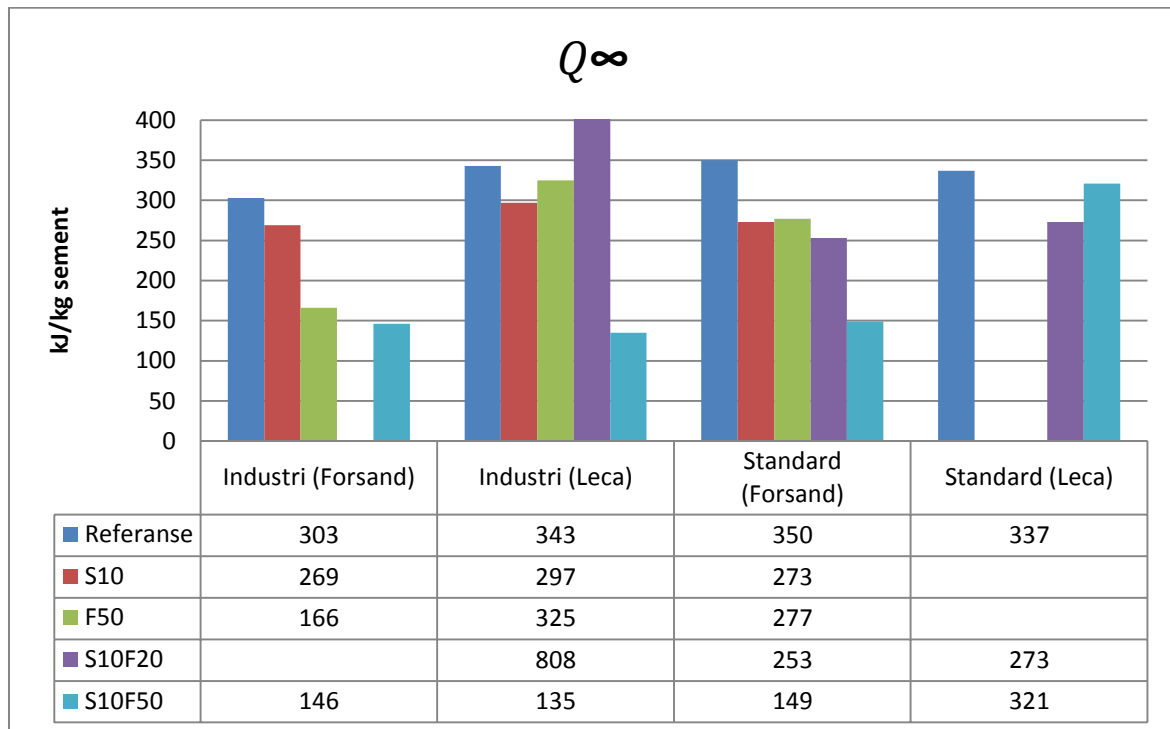
Temperaturutvikling i betong

avvik. Det kan dermed være mulighet for ulik vannmengde i sanden. Når man har redusert vanninnhold får man lavere v/c-tall, som kan ha innvirkning på trykkfasthet i betongen.

Av figur 76 går det tydelig frem at ved økt mengde flygeaske reduseres trykkfastheten. Dette stemmer godt overens med antagelsene, da større mengder flygeaske gir mindre sementinnhold i blandingene. Ved små tilsetninger av silika vil ikke trykkfastheten bli påvirket i nevneverdig grad. For blanding S10 er trykkfastheten for Industri (Leca) og Standard (Forsand) høyere enn tilsvarende referanseverdi. Nesten all mikrosilikaen vil ha reagert etter 28 døgns fasthet. Flygeasken er derimot ikke ferdig etter 28 døgn og vil fortsette å reagere etter denne tiden er passert. Sementens reaksjon med vann er ikke ferdig etter 28 døgn. Dette gjør at pozzolanet vil ha tilgang på reaksjonsproduktet kalsiumhydroksid til sine pozzolan reaksjoner. Når betongen har herdet i ca 90 dager vil flygeasken være tilnærmet ferdig reagert. Etter 90 dager vil også blandingene med store mengder flygeaske ha oppnådd tilnærmet lik trykkfasthet som referanseblandingene.

Det er brukt både lett og vanlig tilslag i de forskjellige blandingene. Trenden trykkfastheten viser er at det ved bruk av vanlig tilslag gir høyere 28 døgn trykkfasthet. Trykkfastheten blir for nesten samtlige blandinger ± 10 MPa større for blandingene med Forsand. Blandinger med forsand har høyere tetthet, noe som gir økt styrke.

7.3 Egenskapsfunksjoner



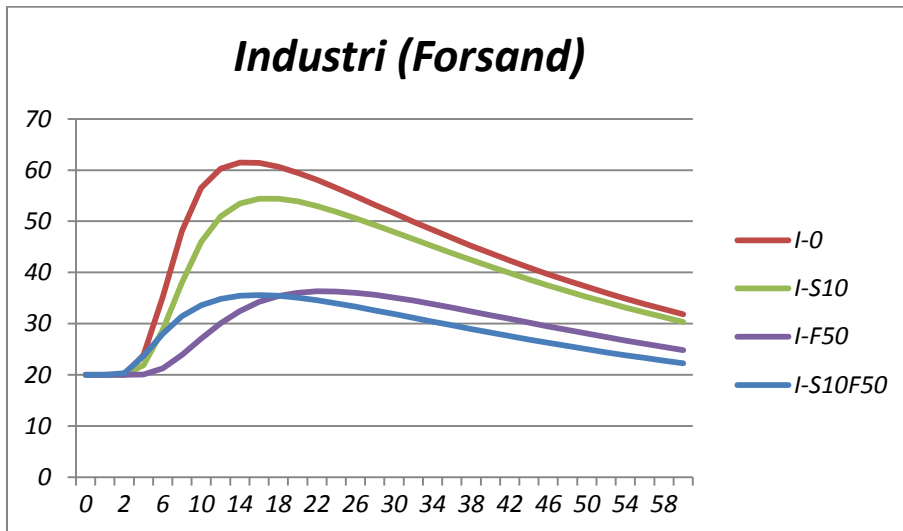
Figur 77: Egenskapsfunksjon for de ulike betongblandingene.

Fra figur 77 er det mulig å se sammenhengen på varmeutviklingen, Q_{∞} , for de ulike blandingene. Stolpediagrammet gjør det lettere å se trender og avvik fra de forventede verdier. Ved økt andel pozzolan i tillegg til redusert sementmengde ser man at Q_{∞} er avtagende. Dette er i tråd med teoristudiet som sier at sement i reaksjon med vann vil generere mer varme i betong enn pozzolan som reagerer med kalsiumhydroksid vil gjøre.

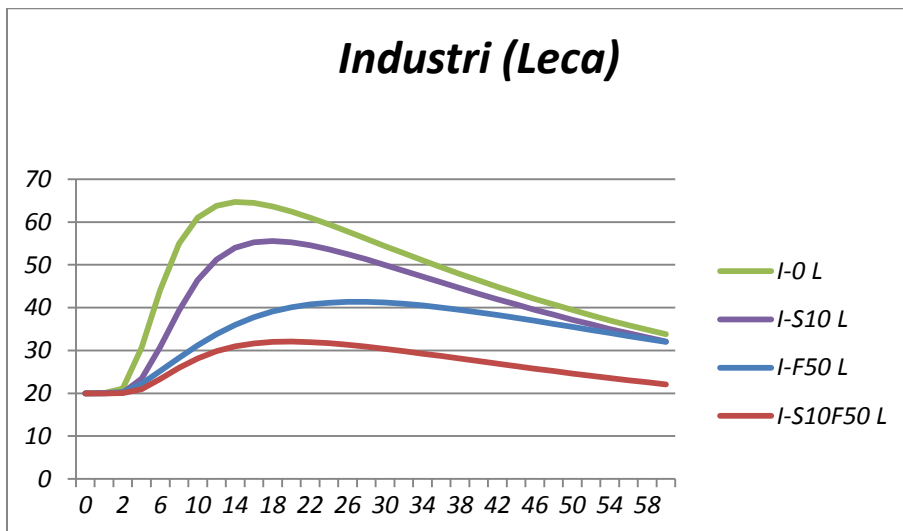
Ut fra figur observeres det avvik for I-F50 L, I-S10F20 L, S-F50 og S-S10F50 L i forhold til forventede verdier. Avvikene kan være et resultat av manglende målinger av omgivelsestemperatur under herding, eller det kan skyldes temperaturmålinger over for kort herdeperiode. Noen av blandingene fikk bare 2,5 døgns herding som kan være i korteste laget for temperaturmålingene. Vi ser at avvikene oppstår ved høye mengder flygeaske/ pozzolan. Disse krever lengre tid før varmeutvikling trer i kraft som kan være grunnen til de noe ujevne resultatene.

7.4 Regneark

7.4.1 Simulert temperaturutvikling

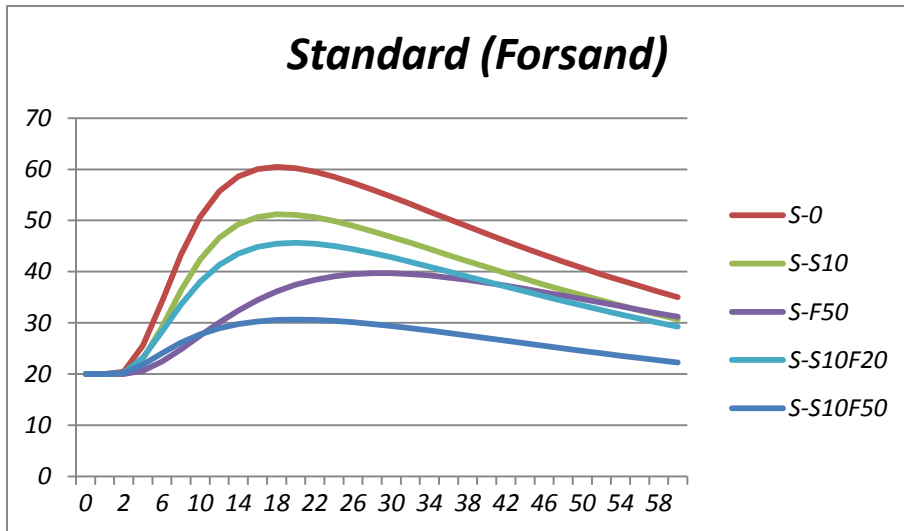


Figur 78: Temperatursimulering fra regneark.

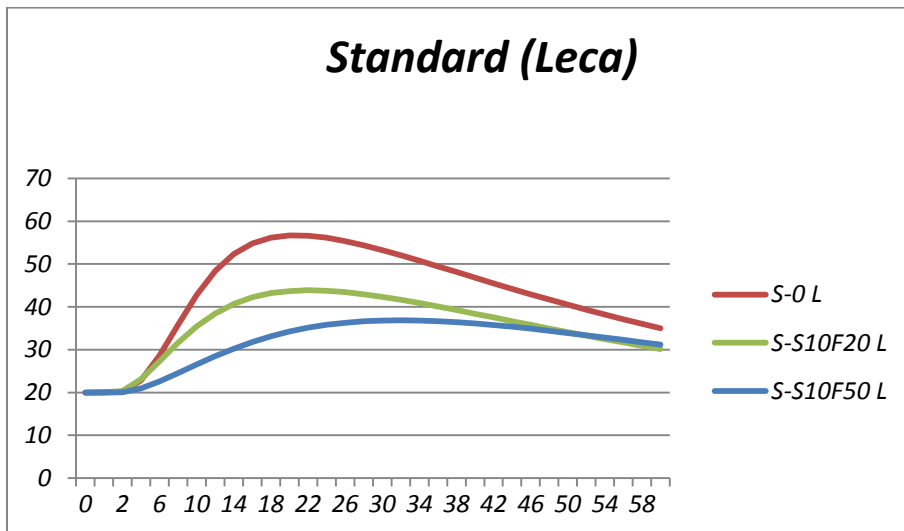


Figur 79: Temperatursimulering fra regneark.

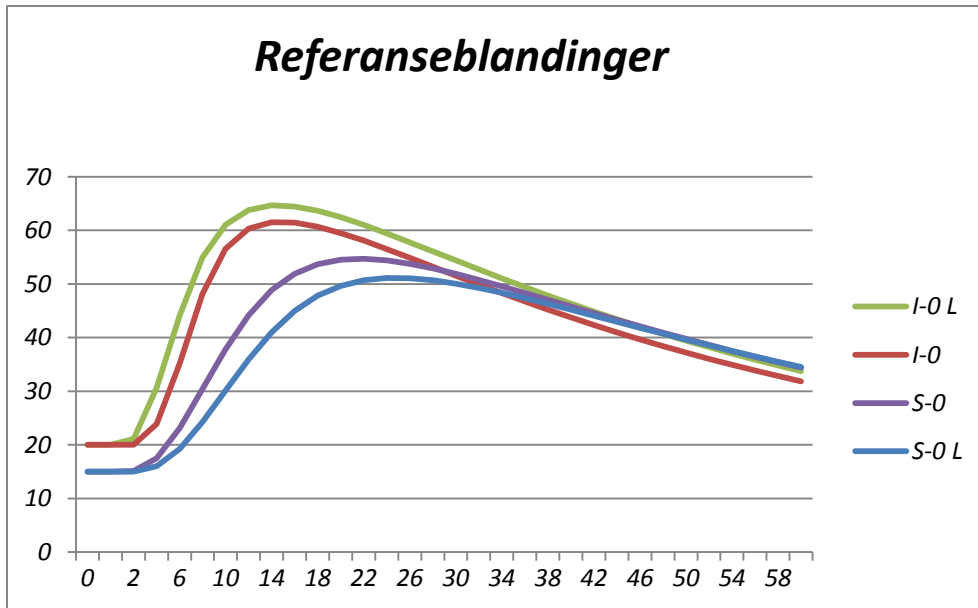
Temperaturutvikling i betong



Figur 80: Temperatursimulering fra regneark.

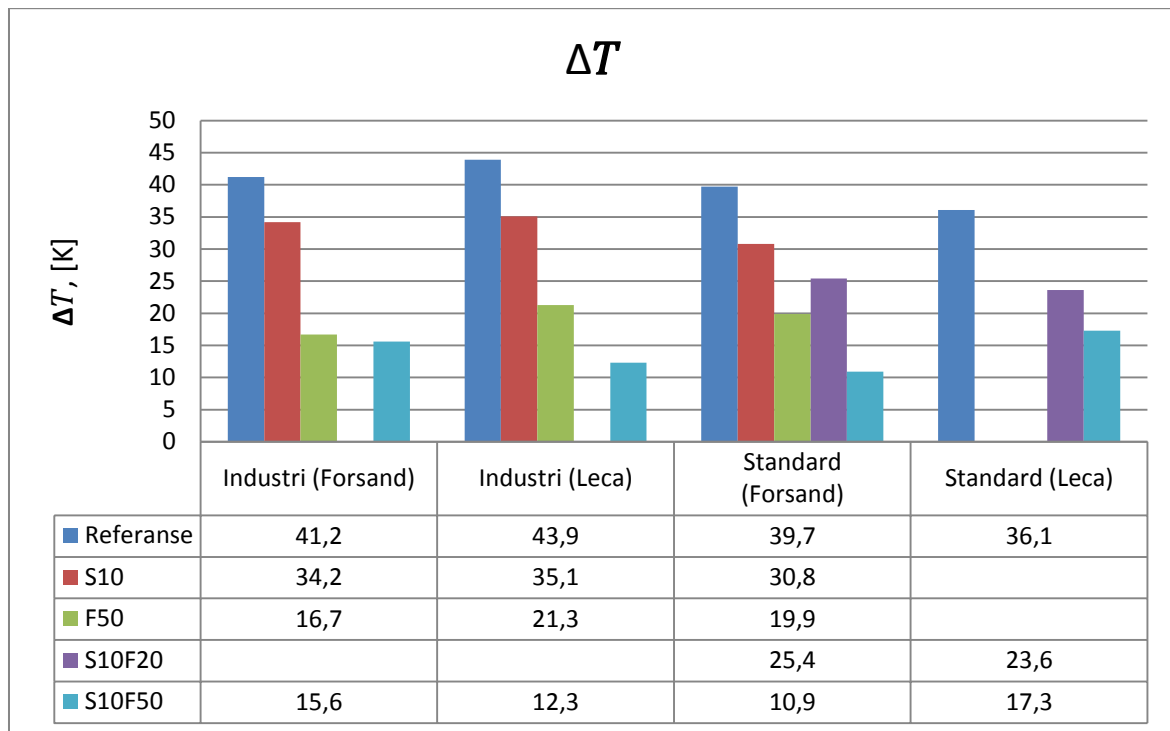


Figur 81: Temperatursimulering fra regneark.



Figur 82: Temperatursimulering fra regneark.

7.4.2 Temperaturdifferanse mellom utstøpings- og maks temperatur



Figur 83: Temperaturdifferanse mellom utstøpingstemperatur og maks temperatur.

Ved å studere temperaturdifferansen fra figur 83 er det mulig å gjøre sammenlikninger for de ulike blandingene. I tillegg kan dataen sammenliknes med de tilsvarende temperaturdifferanser beregnet for herdekassemålingene. Dette kan være med å støtte opp under simuleringsprogrammets nøyaktighet.

Fra figur 83 ser man mye av det samme som ble observert for temperaturdifferanser i herdekassemålingene. Ved økt pozzolan mengde vil temperaturutviklingen bli lavere. Type tilslag ser heller ikke i dette tilfellet ut til å ha særlig innvirkning på maksimal temperaturutvikling. Jevnt over har industrisement høyere herdetemperaturer enn tilfellet er for standardsement.

Verdiene for temperaturdifferanse i regneark er større enn for herdekasse resultatene. I herdekassemålingene vil det være mindre varmetap pga god isolasjon i tillegg til en mild omgivelsestemperatur. For prøveblandingene i simuleringsprogrammet vil varme tapet være større. Omgivelsestemperaturen er satt relativt kjølig i tillegg til lett isolering. Allikevel gir disse resultatene høyere verdier. Grunnen til dette er nødt til å ligge i tykkelsen på

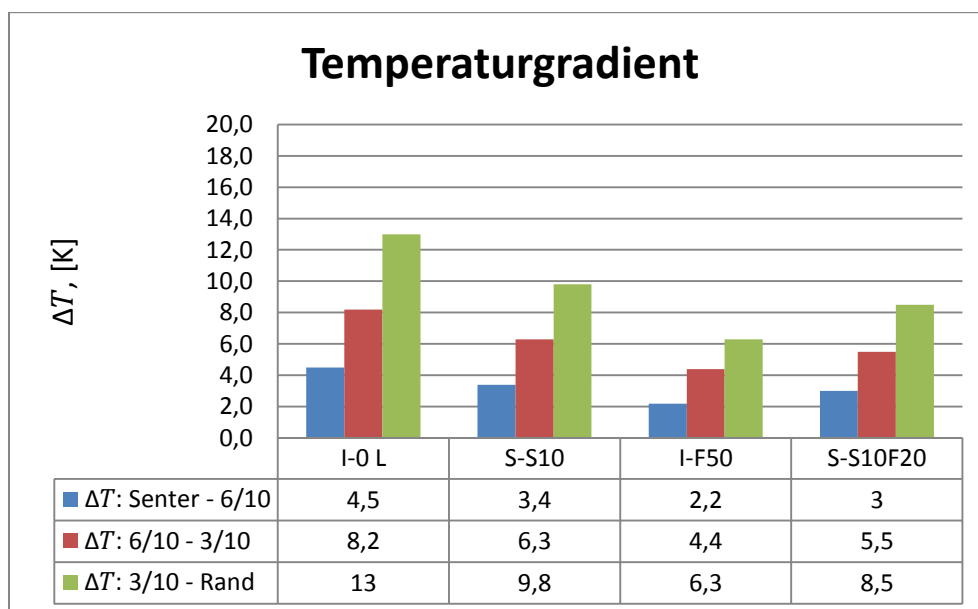
Temperaturutvikling i betong

konstruksjonen. En vegg med tykkelse 0,8 m vil generere større mengder varme enn tilfellet er for herdekasse målingene. Varmetapet for betongkjernen blir lavere pga økt isolasjonseffekt fra utenforliggende betong.

Herdekassemålingene vil selv om godt isolert, avgi en del varme pga varmetap i 3 dimensjoner. Varmetapet utregnet i regneark tar bare høyde for tap i en dimensjon. Dette kan også være en av faktorene som er med å gjøre temperaturdifferansene for regnearkmålingene høyere enn herdekassemålingene.

7.4.3 Temperaturgradienter

Ved å regne ut de maksimale temperaturgradientene som oppstår under herding mellom punktene, Senter - 6/10, 6/10 - 3/10 og 3/10 - Rand er det mulig å finne ut hvor de største temperaturgradientene oppstår og hvor store de er. For et 0,8 m bredt betongtverrsnitt vil vi få en bredde på 0,4 m for halve tverrsnittet. Avstanden mellom senter og punkt 6/10 blir da 160 mm. Fra punkt 6/10 til 3/10 vil det være en distanse på 120 mm. Tilsvarende avstand får vi mellom punkt 3/10 og rand.



Figur 84: Temperaturgradienter innad i konstruksjonen

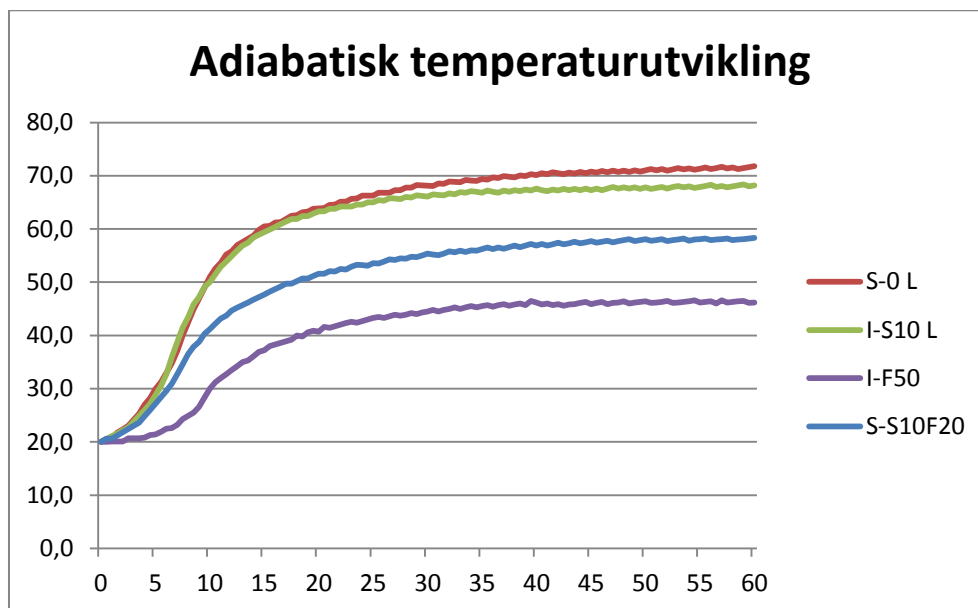
I henhold til BS EN ISO 19903:2006 skal ikke temperaturdifferansen mellom et 100 mm bredt betongtverrsnitt overstige 10°C. Vi ser fra figur at temperaturgradientene er avhengig av

Temperaturutvikling i betong

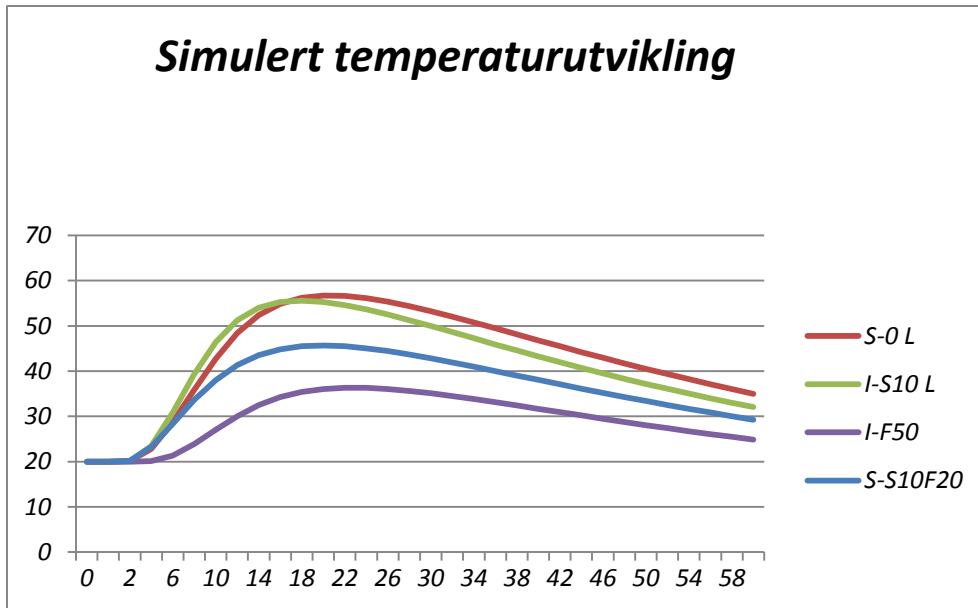
temperaturutviklingen i betongen. Ved økt herdetemperatur får man større temperaturgradienter. Ved senter av betong får man klart minst forskjeller i temperatur. Jo lenger ut mot rand man kommer desto større blir forskjellen. Blanding I-0 L er den blandingen som produserer mest varme. Dette er også den eneste blandingen som overstiger en temperaturgradient på 10 °C. Mellom punkt 3/10 og rand får vi en differanse på 13 °C over en avstand på 120 mm. Dette vil tilsvare en temperaturgradient på over 10°C for 100mm avstand. Dermed overstiger denne krav satt av standard. Blandingen må vurderes å støpes med erstatning av sement med pozzolan. Eventuelt kan bedre isolering mot omgivelsene være et gunstig tiltak. Avkjøling av betong kan også være med å redusere temperaturgradienter.

7.5 Herdekasetemperatur sammenliknet med simulert temperatur

7.5.1 Adiabatisk- og simulert temperaturutvikling



Figur 85: Adiabatisk temperaturutvikling.



Figur 86: Simulert temperaturutvikling.

Ved å sammenlikne den adiabatisk temperaturutviklingen med den simulerte temperaturutviklingen er det mulig å se hvor stort varmetapet er for de ulike blandinger. Redusert temperatur pga varmetap ligger på mellom 10-15 °C. For blandinger med høyt pozzolan innhold observeres det at temperaturtapet ligger nærmere 10°C, mens betongblandinger med lite eller ingen pozzolan tilsetning har større temperaturfall. Prosentvis i forhold til produsert varme er resultatene for varmetap relativt like. Vi ser at temperaturmålingene fått fra regneark stemmer overens med resultater fra adiabatisk temperatur. S-0 L har høyest temperaturutvikling i begge grafene. Rekkefølgen på de øvrige blandinger stemmer også med målte verdier.

8. Konklusjon

Ved å bytte ut deler av sementen med pozzolan, er det liten tvil om at trykkfastheten blir påvirket. Ved å tilsette flygeaske vil trykkfastheten utvikle seg saktere og etter 28 døgns fasthetsutvikling vil den være lavere. Silikastøv har samme innvirking som flygeaske og gir betong lavere trykkfasthet. Reduksjonen er ikke like stor som tilfellet er med flygeaske. Etter 28 døgn vil nesten all silika reagert og dermed vil sluttfastheten være relativt høy.

Når pozzolan tilsettes betongblandinger vil temperaturutviklingen reduseres. Sementmengden reduseres som igjen fører til lavere varmeutvikling. Gjennom resultater vises det at temperaturutvikling konsekvent er lavere for blandinger med store mengder pozzolan. Spesielt ved tilsetning av flygeaske synker herdetemperaturen betraktelig.

Ut fra sammenlikninger mellom resultatene i utviklet regneark og herdekassemålinger er det mulig å konkludere med at simuleringsprogrammet fungerer tilfredsstillende. Nøyaktigheten til programmet er vanskelig å fastslå, men som et verktøy til å anslå temperaturutvikling vil det fungere utmerket.

Ved å benytte regneark er det mulig å anslå temperaturutvikling for betongblandinger. Simuleringsprogrammet baserer seg på varmetap og varmeutvikling. Ved å benytte regneark i forkant av støpearbeid er det mulig å velge den best egnede betongblandingen i forhold til støpeformål og forhold. På den måten kan for høye herdetemperaturer forebygges med å bytte ut deler av sementen med silika og/eller flygeaske. Dette vil være med å redusere spenninger i betongkonstruksjon som fører til riss og dårligere betongkvalitet.

9. Referanser

- [1] Stefan Johansen, *TKT 4215 Concrete Technology 1*, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim 2009
- [2] Portland, A. (1985). Beton-bogen 2.utgave. ISBN 87-980816-2-4
- [3] Norcem, *Herdeteknologi*,
< http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/FECC97E1-A475-4324-8074-6A3D4A10C082/0/Herdningsteknologi_net.pdf >, [Nedlastet Februar 2012]
- [4] Internettside utviklet av Shodor i samarbeid med Department of chemistry, The University of North Carolina at Chapel Hill, The Arrhenius equation,
< <http://www.shodor.org/unchem/advanced/kin/arrhenius.html> > [Nedlastet Mars 2012]
- [5] Concrete technology today. Volume 18/Number 2. July 1997
<<http://www.cement.org> > [Nedlastet Mars 2012]
- [6] Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete (ACI 211.1-91), Reported by ACI committee 211, Godkjent på nytt 1997. < <http://www.Yimg.com> > [Nedlastet Mars 2012]
- [7] Chapter 3. Fly Ash, Slag, Silica Fume and Natural Pozzolans
< http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/PCA_manual/Chap03.pdf >
[Nedlastet Mars 2012]
- [8] Neville, A. M. (1986). Properties of concrete 3.utgave. Harlow, Longman.
- [9] **Grinding of Clinker Replacement Materials**. Soeren Worre Joergensen, General Manager, Grinding Technology, F.L.SMIDTH.
<http://www.cementdistribution.com/industryinfo/articles/grinding_clinker_replacement_materials.pdf > [Nedlastet Mars 2012]

Temperaturutvikling i betong

- [10] Edvardsen, K. I., T. Ø. Ramstad, et al. (2006). Trehus. Oslo, Instituttet.
- [11] Gjerp, P., M. Opsahl, et al. (2004). Grunnleggende betongteknologi. Lillestrøm, Byggenæringens forl. 2. oppl. med 191 s. Opplagshistorikk: 2. oppl. 2005.
- [12] Volumendringer og risstendens i betong. Tunnel- og betongseksjonen
Dato: 2009-09-07. Teknologivdelingen Nr. 2565.
<<http://svvgw.vegvesen.no/http://svvbibsys01.vegvesen.no/epublisher/document.asp?func=show&id=1349&type=0&service=0>> [Nedlastet Mars 2012]
- [13] Kapittel 7, Varmeoverføring
<http://www.elkraft.ntnu.no/~kvitass/SIE1040/Last%20ned/Termisk_kap7.PDF>
[Nedlastet Mars 2012]
- [14] Incropera, F. P. and D. P. DeWitt (2007). Introduction to heat transfer. Hoboken, N.J., Wiley.
- [15] Forelesningsnotater, SMN 6194, Varmelære, Varmetransport, Bjørn R. Sørensen, Integret Bygningsteknologi, Høgskolen i Narvik
<<http://ansatte.hin.no/brs/fag/emner/tdyn/docs/Varmel%C3%A6re%20del%202.pdf>>
[Nedlastet Mars 2012]
- [16] SINTEF, B.K., *Styring av betongens herdneforløp*. Byggforskblad 520.030, 1994.
- [17] The One Dimesional Heat Conduction Equation, Dr. Crystal Cooper
<<http://www.brighthub.com/engineering/mechanical/articles/54035.aspx>> [Nedlastet Mars 2012]
- [18] Spenncon, <<http://www.consolis.com/Spenncon/?node=1.0.2.7#arsaker-til-opprissing>> [Nedlastet Mars 2012]

10. Vedlegg

- A. Norcem Standard Produktinformasjon**
- B. Norcem Industri Produktinformasjon**
- C. Forsand 0-8 Siktekurve**
- D. Forsand 5-8 Siktekurve**
- E. Forsand 8-11 Siktekurve**
- F. Forsand 11-16 Siktekurve**
- G. Sammensatt Tilslag**
- H. Leca 3-6 Siktekurve**
- I. Leca 4-8 Siktekurve**
- J. Sammensatt Tilslag**

VEDLEGG A-1

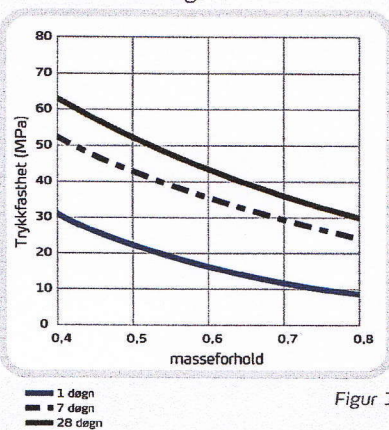
PRODUKTINFORMASJON

Standardsement



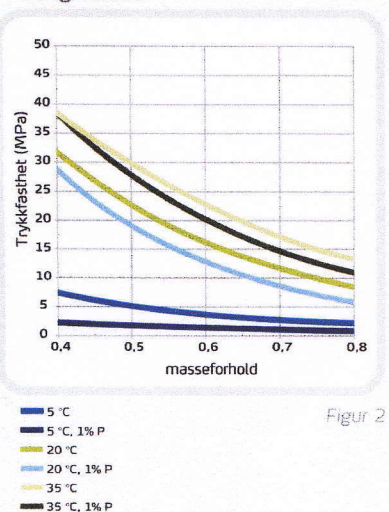


Fasthetsutvikling



Figur 1

Tidligfasthet



Figur 2

Fasthetsutvikling

Fasthetsutvikling er en sentral egenskap for planlegging, styring og utførelse av alle betongarbeider. Fasthetsutvillingen er avhengig av sementtype, tilslag, masseforhold, herdeforhold (temperatur, tid og fuktighet), og eventuell bruk av tilsetningsmaterialer eller -stoffer. I figur 1 er vist et eksempel på trykkfasthetsutviklingen som funksjon av masseforhold og alder ved 20°C vannlagring for betong med Norcem Standardsement.

Tidligfasthet

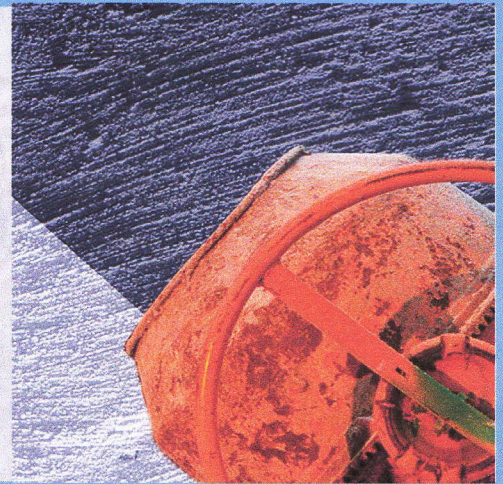
Tidligfastheten i betong er avhengig av temperatur og eventuell dosering av tilsetningsstoff med retarderende effekt. I figur 2 er vist trykkfasthet for betong etter 1 døgn med forskjellig masseforhold med og uten 1% plastiserende tilsetningsstoff (P-stoff) med Standardsement. Prøvene er lagret ved 95% luftfuktighet ved varierende temperatur.

Fasthetsklasse - masseforhold

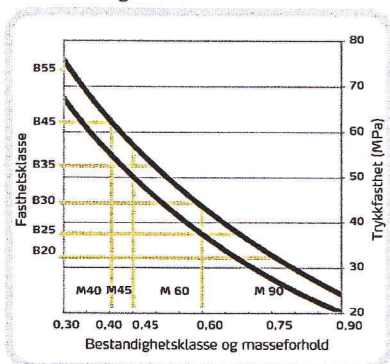
Med normal, god styring av betongproduksjonen, er det behov for en overhøyde på ca 7 MPa ved de ulike fasthetsklassene for å produsere med tilstrekkelig sikkerhet mot undermålere. Standardsement gir følgende retningssgivende verdier for minste og største masseforhold i ulike fasthetsklasser for betong uten luftinnføring.

Fasthetsklasse	B20	B25	B30	B35	B45
Minste - største masseforhold	0,68 - 0,76	0,57 - 0,68	0,51 - 0,57	0,42 - 0,51	0,35 - 0,42

Norcem Standardsement er tilpasset norske forhold og kan benyttes til betong i alle eksponerings-, bestandighets- og fasthetsklasser. Standardsementen har en fasthetsprofil som er tilpasset minimum sementbehov for konstruksjoner i bestandighetsklasse M60. Sementen har relativt høy tidligfasthet, moderat slutfasthet, moderat varmeutvikling, god støpelighet og veldokumenterte bestandighetsegenskaper.



Bestandighetsklasse



Figur 3

Bestandighetsklasse

NS-EN 206-1 klassifiserer betongens miljøpåvirkninger i eksponeringsklasser. I nasjonalt tillegg til denne standarden er de ulike eksponeringsklassene gruppert i seks bestandighetsklasser med krav til betongens maksimale masseforhold (se tabell 3). Tabell 2 viser anbefalte kombinasjoner av bestandighets- og fasthetsklasser. Retningsgivende verdier for største masseforhold i de ulike fasthetsklassene er gitt i tabell 1. I figur 3 er vist sammenhengen mellom bestandighetsklasse og fasthetsklasse i et variasjonsbelte forårsaket av ulike produksjonsforutsetninger. Figuren gjelder for betong med Standardsement uten luftinnføring.

Anbefalte kombinasjoner	
Bestandighetsklasse M90	Fasthetsklasse B20 el høyere
Bestandighetsklasse M60	Fasthetsklasse B25 el høyere
Bestandighetsklasse M45	Fasthetsklasse B35 el høyere
Bestandighetsklasse M40	Fasthetsklasse B45 el høyere

Valg av bestandighetsklasse (nasjonale krav)						
Eksponeringsklasse	M90	M60	M45	MF45*	M40	MF40*
X0	.	.	.	.	.	.
XC1, XC2, XC3, XC4, XF1		.	.	.	.	.
XD1, XS1, XA1, XA2, XA4			.	.	.	.
XF2, XF3, XF4				.		.
XD2, XD3, XS2, XS3, XA3					.	.
XSA	Betongsammensetning og beskyttelseiltak fastsettes særskilt. Betongsammensetningen skal minst tilfredsstille kravene til M40.					
Største masseforhold $v/(c + E_{kp})$	0,90	0,60	0,45	0,45	0,40	0,40

* Minst 4% luft

Deklarerte data

Norcem Standardsement tilfredsstiller kravene til Portlandsement
EN 197-1-CEM I 42,5R

Kjemiske data		
Egenskap	Deklarerte data	Krav iflg NS-EN 197-1
Finhet (Blaine)	370 m ² /kg i) / 380m ² /kg ii)	
Trikalsiumaluminat C ₃ A	7 %	
Alkali (ekv Na ₂ O, NB21)	1,3% i) / 1,3% ii)	Deklarert verdi iht NB21
Mineralske tilsetninger	4%	≤ 5%
Glødetap	2,5%	≤ 5%
Uløselig rest	1%	≤ 5%
Sulfat (SO ₃)	3-4%	≤ 4%
Klorid	< 0,085%	≤ 0,1%
Vannløselig Cr ⁶⁺	< 2 ppm	≤ 2 ppm *)
Spesifikk vekt	3,15 kg/dm ³	

i) Brevik-produsert

ii) Kjøpsvik-produsert

*) I henhold til Forskrift om vannløselige kromater i sement- og betongrelaterte materialer

Fysikalske data		
Egenskap	Deklarerte data	Krav iflg NS-EN 197-1
Trykkfasthet 1 døgn	21 MPa	
Trykkfasthet 2 døgn	32 MPa	≥ 20 MPa
Trykkfasthet 7 døgn	42 MPa	
Trykkfasthet 28 døgn	52 MPa	≥ 42,5 MPa ≤ 62,5 MPa
Begynnende bindetid	130 min i) / 125 min ii)	≥ 60 min
Ekspansjon	1 mm	≤ 10 mm

i) Brevik-produsert

ii) Kjøpsvik-produsert

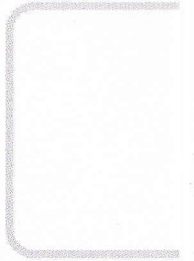
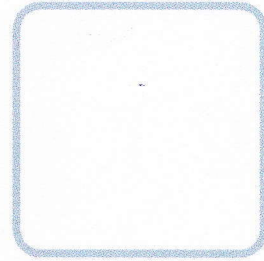
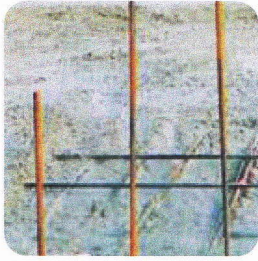


VEDLEGG B-1

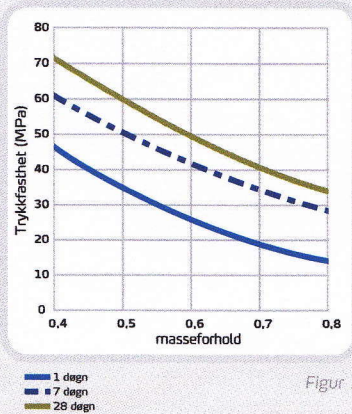
PRODUKTINFORMASJON

Industrisement





Fasthetsutvikling

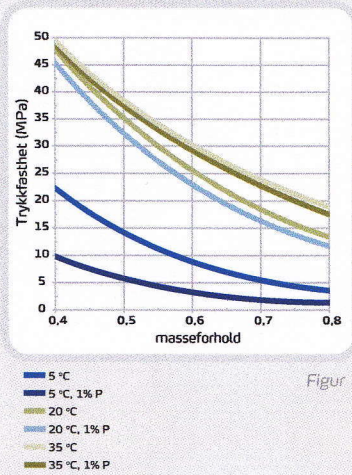


Figur 1

Fasthetsutvikling

Fasthetsutvikling er en sentral egenskap for planlegging, styring og utførelse av alle betongarbeider. Fasthetsutviklingen er avhengig av sementtype, masseforhold, herdeforhold (temperatur, tid og fuktighet) og eventuell bruk av tilsetningsmaterialer eller -stoffer. I figur 1 er vist trykkfasthetsutviklingen som funksjon av masseforhold og alder ved 20°C vannlagring for betong med Industrisement.

Tidligfasthet



Figur 2

Tidligfasthet

Tidligfastheten i betong er meget avhengig av temperatur og eventuell dosering av tilsetningsstoff med retarderende effekt. I figur 2 er vist trykkfasthet i betong etter 1 døgn med forskjellig masseforhold med og uten 1% plastiserende tilsetningsstoff (P-stoff) med Norcem Industrisement. Prøvene er lagret ved 95% luftfuktighet ved varierende temperatur.

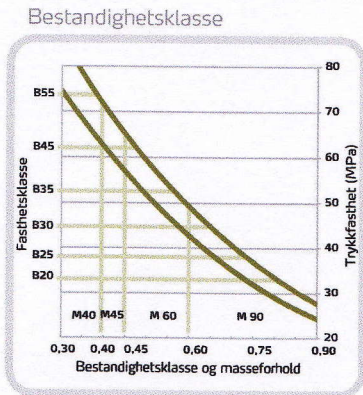
Fasthetsklasse – masseforhold

Med normal, god styring av betongproduksjonen er det behov for en overhøyde på ca. 7 MPa ved de ulike fasthetsklassene for å produsere med tilstrekkelig sikkerhet mot undermålere. Industrisement gir følgende retningsgivende verdier for største masseforhold i ulike fasthetsklasser for betong uten luftinnføring, se tabell 1.

Fasthetsklasse	B20	B25	B30	B35	B45	B55
Største masseforhold	0,82	0,75	0,66	0,57	0,48	0,38

Tabell 1

Norcem Industrisement er en spesialsement tilpasset norsk byggepraksis ved vinterarbeid. Sementen gjør det mulig å gjennomføre støpearbeider vinterstid i Norge på en rasjonell og økonomisk måte. Med sin raske fasthetsutvikling er den i tillegg velegnet for bruk ved produksjon av betongelementer og betongvarer.



Figur 3

Bestandighetsklasse

NS-EN 206-1 klassifiserer betongens miljøpåvirkninger bl.a. i eksponeringsklasser. I nasjonalt tillegg til denne standarden er de ulike eksponeringsklassene gruppert i seks bestandighetsklasser med krav til betongens maksimale masseforhold (se tabell 3). Tabell 2 viser anbefalte kombinasjoner av bestandighets- og fasthetsklasser. Retningsgivende verdier for største masseforhold i de ulike fasthetsklassene er gitt i tabell 1. I figur 3 er vist sammenhengen mellom bestandighetsklasse og fasthetsklasse, i et variasjonsbelte forårsaket av ulike produksjonsforutsetninger. Figuren gjelder for betong med Industrisement uten luftinnføring.

Anbefalte kombinasjoner

Bestandighetsklasse M90	Fasthetsklasse B20 eller høyere
Bestandighetsklasse M60	Fasthetsklasse B30 eller høyere
Bestandighetsklasse M45	Fasthetsklasse B35 eller høyere
Bestandighetsklasse M40	Fasthetsklasse B45 eller høyere

Tabell 2

Valg av bestandighetsklasse (nasjonale krav)

Eksponeringsklasse	M90	M60	M45	MF45*	M40	MF40*
X0	▪	▪	▪	▪	▪	▪
XCI, XC2, XC3, XC4, XF1		▪	▪	▪	▪	▪
XD1, XS1, XA1, XA2, XA4			▪	▪	▪	▪
XF2, XF3, XF4				▪		▪
XD2, XD3, XS2, XS3, XA3					▪	▪
XSA	Betongsammensetning og beskyttelsestiltak fastsettes særskilt. Betongsammensetningen skal minst tilfredsstille kravene til M40.					
Største masseforhold $v/(c + \Sigma kp)$	0,90	0,60	0,45	0,45	0,40	0,40

*Minst 4% luft

Tabell 3

Deklarerte data

Norcem Industrisement tilfredsstiller kravene til Portlandsement
EN 197-1-CEM I 42,5 R og NS 3086-CEM I-42,5 RR

Kjemiske data

Egenskap	Deklarerte data	Krav i følge NS-EN 197-1 og NS 3086
Finhet (Blaine)	550 m ² /kg	
Trikalsiumaluminat C ₃ A	7 %	
Alkali (ekv Na ₂ O)	1,3% (B) & 1,2% (K)	
Mineralske tilsetninger	4 %	≤ 5%
Glødetap	2,5%	≤ 5%
Uløselig rest	1%	≤ 5%
Sulfat (SO ₃)	3 - 4 %	≤ 4%
Klorid	< 0,08%	≤ 0,1%
Vannløselig Cr ⁶⁺	< 2ppm	≤ 2 ppm
Spesifikk vekt (kg/dm ³)	3,13(B) / 3,11 (K)	

Fysiske data

Egenskaper	Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1 og NS 3086 *
Trykkfasthet 1 døgn	32 MPa	≥ 20 MPa
Trykkfasthet 2 døgn	40 MPa	≥ 40 MPa
Trykkfasthet 7 døgn	49 MPa	
Trykkfasthet 28 døgn	57 MPa	≥ 42,5 MPa ≤ 62,5 MPa
Begynnende bindetid	100 min	≥ 60 min
Ekspansjon	1 mm	≤ 10 mm

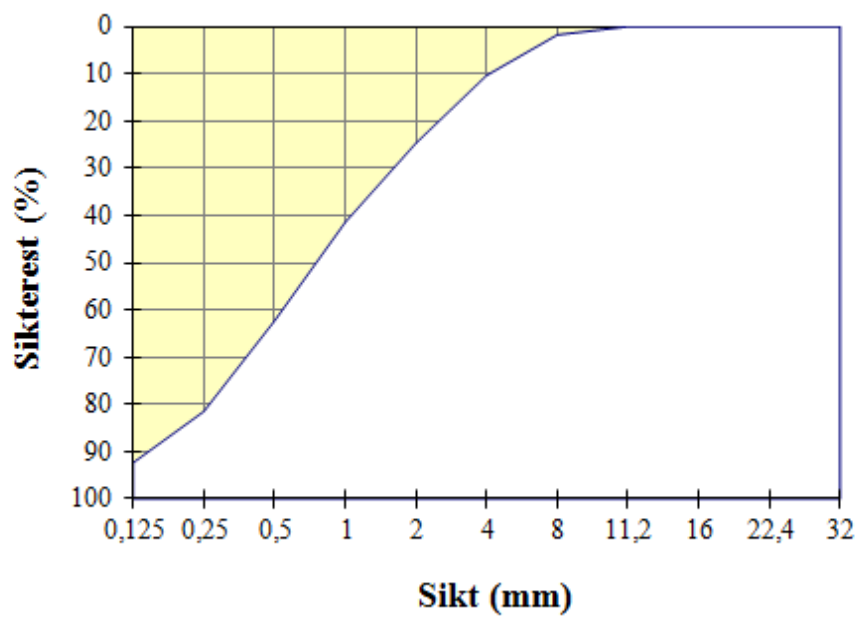
*Karakteristiske verdier



Siktekurve (Forsand)

Type:	0-8 mm
Dato:	#####
FM =	2,68

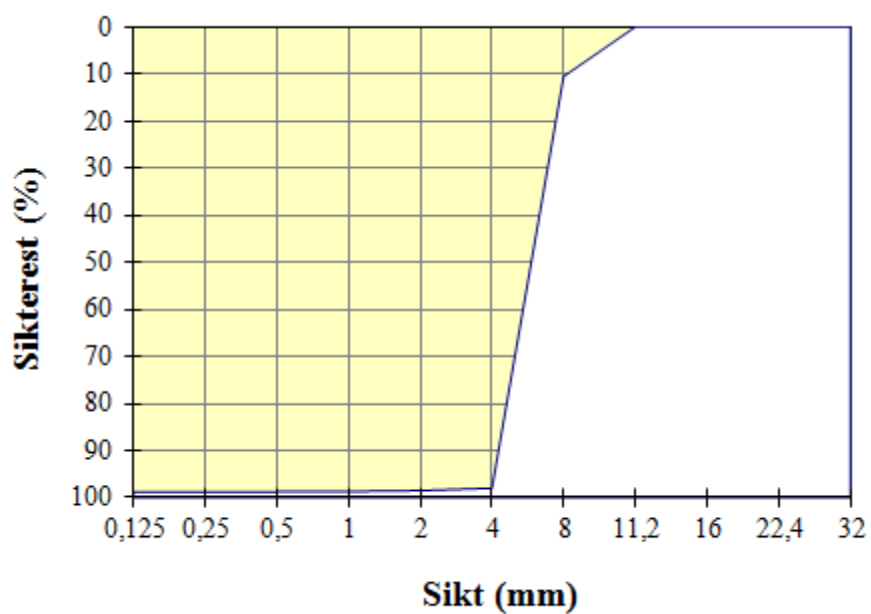
Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)
	1	2	
32	0	0	0,0
22,4	0	0	0,0
16	0	0	0,0
11,2	0	0	0,0
8	9	9	1,7
4	53,4	53,4	10,3
2	127,5	127,5	24,7
1	214	214	41,4
0,5	321,8	321,8	62,3
0,25	420,9	420,9	81,5
0,125	477	477	92,3
Bunn	517	517	



Siktekurve (Forsand)

Type:	5-8 mm
Dato:	#####
FM =	5,53

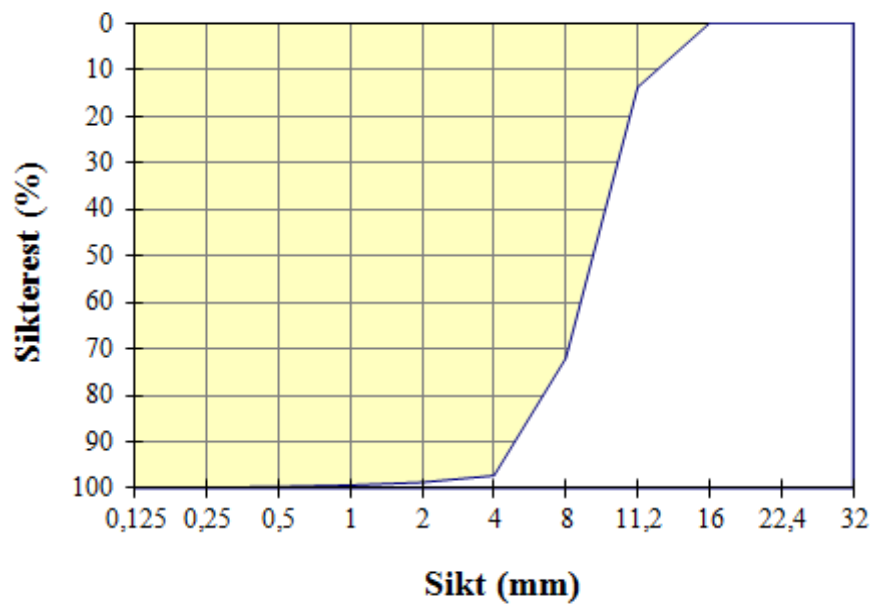
Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)
	1	2	
32	0	0	0,0
22,4	0	0	0,0
16	0	0	0,0
11,2	0	0	0,0
8	53	53	10,5
4	489	489	98,0
2	492	492	98,5
1	493	493	98,7
0,5	493	493	98,7
0,25	493	493	98,8
0,125	494	494	98,8
Bunn	499	499	



Siktekurve (Forsand)

Type:	8-11 mm
Dato:	#####
FM =	6,17

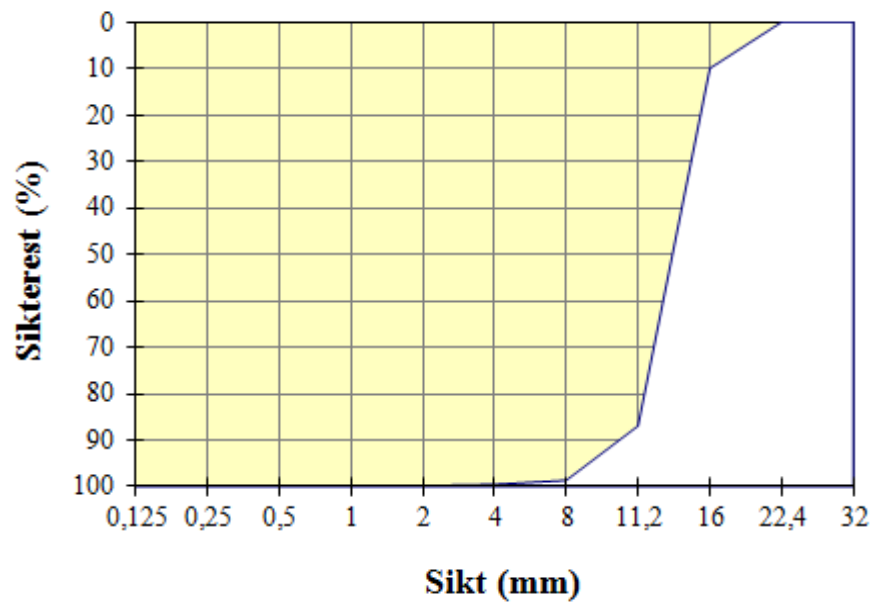
Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)
	1	2	
32	0	0	0,0
22,4	0	0	0,0
16	0	0	0,0
11,2	68,6	68,6	13,8
8	358,9	358,9	72,0
4	485	485	97,3
2	492	492	98,7
1	495	495	99,3
0,5	497	497	99,6
0,25	497	497	99,8
0,125	498	498	99,9
Bunn	498	498	



Siktekurve (Forsand)

Type:	11-16 mm
Dato:	#####
FM =	6,58

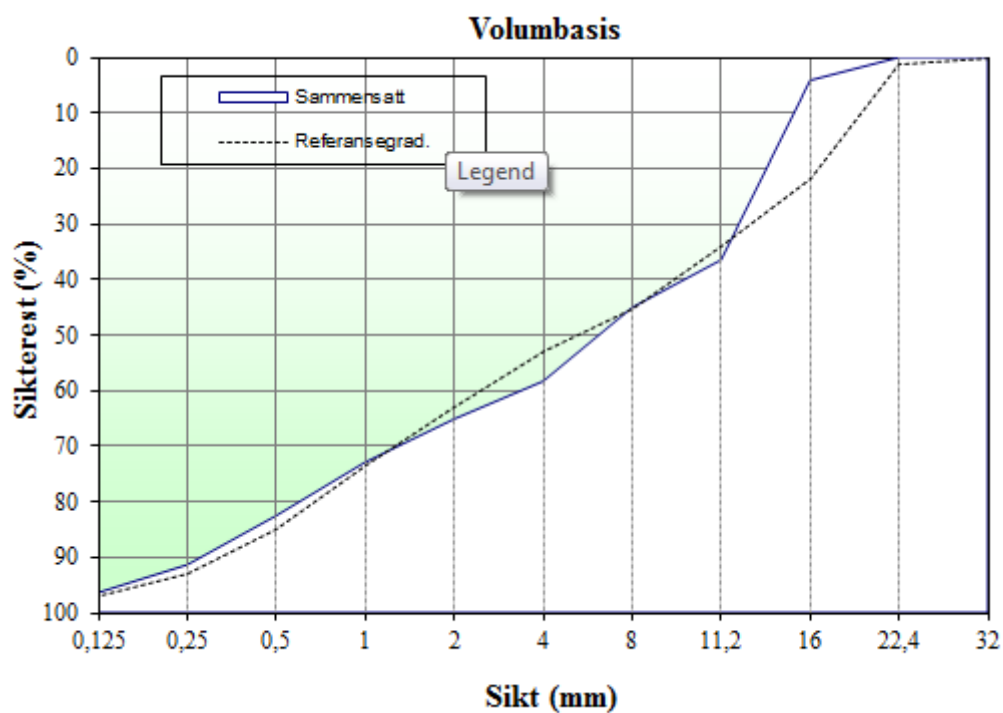
Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)
	1	2	
32	0	0	0,0
22,4	0	0	0,0
16	49,9	49,9	10,0
11,2	436	436	86,9
8	494,7	494,7	98,6
4	499,1	499,1	99,5
2	500,4	500,4	99,8
1	500,7	500,7	99,8
0,5	500,9	500,9	99,9
0,25	501,1	501,1	99,9
0,125	501	501	99,9
Bunn	502	502	



Sammensatt tilslag (Forsand)

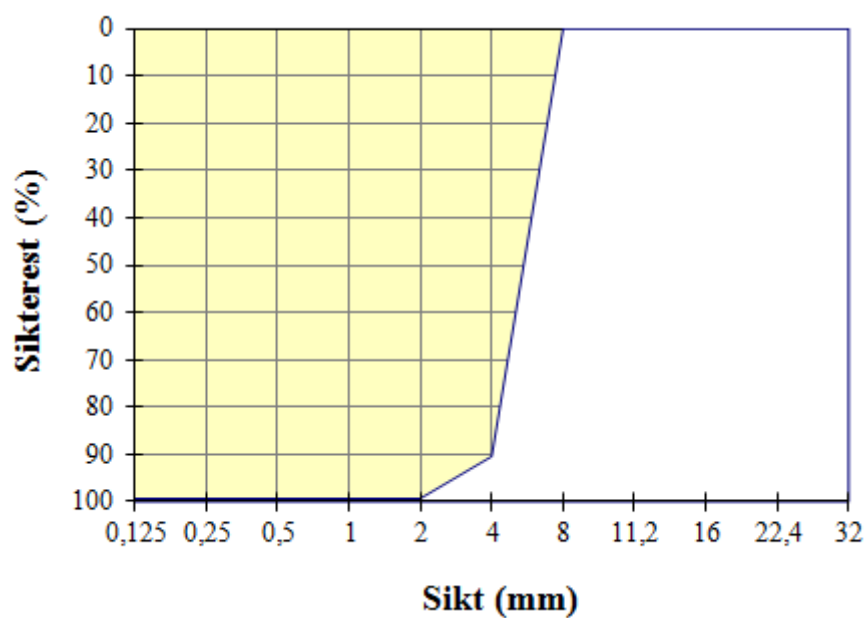
Sammensatt tilslag

Fraksjon	Navn	Densitet [kg/m ³]	Abs. fukt [%]	Akk. moekt [%]	Klorider [%]	Andel		Bruk
						volum	vekt	
I	0-8 mm	2680	0,8	0,0	0,00	0,460	0,460	ok
II	5-8 mm	2680	0,8	0,0	0,00	0,093	0,093	ok
III	8-11 mm	2680	0,5	0,0	0,00	0,033	0,033	ok
IV	11-16 mm	2680	0,5	0,0	0,00	0,414	0,414	ok
V		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VI		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VII		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VIII		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
IX		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
X		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
Sammensatt		2680		0,0	0,00	1,000	1,000	



Siktekurve (Leca)

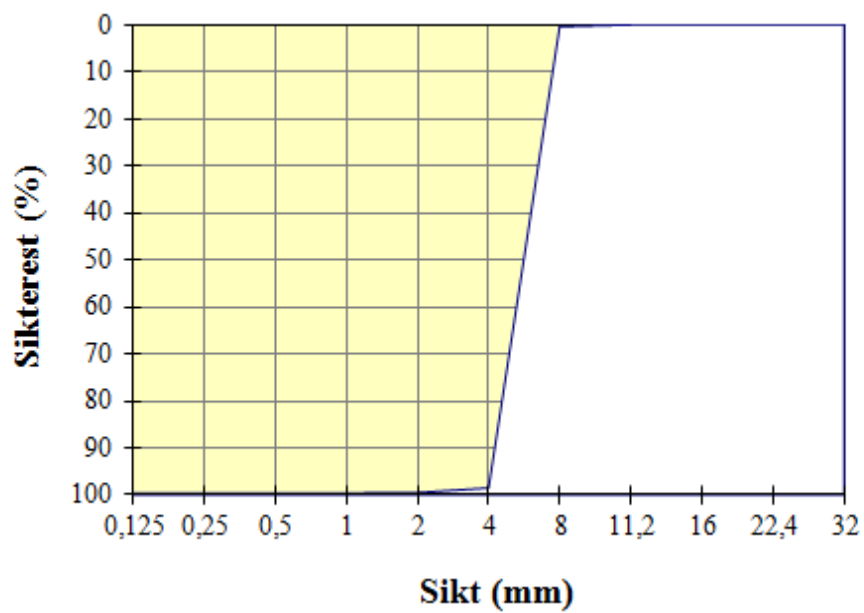
Type:	Leca 3-6		
Dato:	01.04.2001		
FM =	5,37		
Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)
	1	2	
32	0	0	0,0
22,4	0	0	0,0
16	0	0	0,0
11,2	0	0	0,0
8	0	0	0,0
4	448	448	90,4
2	492	492	99,3
1	492	492	99,3
0,5	492	492	99,3
0,25	492	492	99,3
0,125	492	492	99,3
Bunn	496	496	



Siktekurve (Leca)

Type:	Leca 4-8
Dato:	#####
FM =	5,47

Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)
	1	2	
32	0	0	0,0
22,4	0	0	0,0
16	0	0	0,0
11,2	0	0	0,0
8	2	2	0,4
4	496	496	98,5
2	501	501	99,5
1	501	501	99,6
0,5	501	501	99,6
0,25	501	501	99,6
0,125	501	501	99,6
Bunn	503	503	



Sammensatt tilslag (Leca)

Sammensatt tilslag

Fraksjon	Navn	Densitet [kg/m ³]	Abs. fukt [%]	Akk. rest [%]	Klorider [%]	Andel		Bruk
						volum	vekt	
I	Leca 3-6	1450	10,0	0,0	0,00	0,183	0,139	ok
II	Leca 4-8	1400	11,0	0,0	0,00	0,430	0,315	ok
III		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
IV		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
V		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VI		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VII		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VIII		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
IX	Forsand Forsøk 0-5	2700	0,0	0,0	0,00	0,386	0,546	ok
X		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
Sammensatt		1912		0,0	0,00	1,000	1,000	

