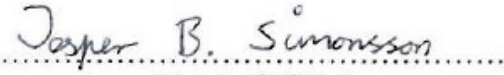




Universitetet  
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

## MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og materialer / Bygg	Vårsemesteret, 2014  Åpen
Forfatter: Jesper Bruneau Simonsson	 (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså Veileder: Kjell Tore Fosså	
Tittel på masteroppgaven: <b>Pozzolaner i høyfast betong</b>  Engelsk tittel: Pozzolanic materials in high-strength concrete	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Høyfast Betong E-modul Trykkfasthet Strekkfasthet Temperatur Pozzolaner	Sidetall: 75  Vedlegg: 12  Stavanger, 16.6.2014



# Pozzolaner i høyfast betong



16. juni 2014

Universitetet i Stavanger

Det teknisk-naturvitenskapelige fakultetet

Jesper Bruneau Simonsson



Universitetet  
i Stavanger

## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet i forbindelse med masterstudiet i Bygg, med fordypning i konstruksjoner og materialer ved Universitetet i Stavanger våren 2014 og avslutter et femårig sivilingeniørstudie.

Det har vært en spennende prosess å fordype seg i høyfast betong. Når muligheten dukket opp var jeg veldig klar på at det var dette jeg ville skrive om.

Prosesen har til tider vært veldig krevende, med mange timer i laboratoriet og lesesal med bratt læringskurve. Det har vært veldig lærerikt og et privilegium å bruke et helt semester på dette temaet.

Med god hjelp fra medstudenter på laboratoriet og veileder har jeg fått et resultat jeg er stolt av og en god avslutning av sivilingeniørstudiet på Universitetet i Stavanger.

Jeg vil spesielt takke min veileder Kjell Tore Fosså, for god hjelp og gode innspill. Vil også takke Samdar Kakay for hjelp på laboratoriet.

Til slutt vil jeg takke mine medstudenter ved Universitetet i Stavanger for noen fine år, og ønske dem lykke til videre i arbeid eller studier.

Stavanger, 16. juni 2014

Jesper Bruneau Simonsson

## Sammendrag

Fastheten styres av temperatur og egenskapene i bindemiddelet. Ved å kombinere sement og pozzolaner er det mulig å få en relativ lav varmeutvikling i betongen.

Det er gjennomført totalt syv betongblandinger med bindemiddelforhold på 0.3 og forskjellige mengder flyveaske og mikrosilika. For hver serie har trykkfasthet-, strekkfasthet- og e-modulutviklingen blitt målt i laboratoriet.

Resultatene har deretter blitt brukt i en beregningsdel, som er et regneark som simulerer temperatur og fasthetsutviklingen i en konstruksjon.

Litteraturdelen dekker den nødvendige teorien som ligger bak prøving, beregningene og utviklingen i betongen.

Det viser seg at pozzolaner kan brukes med gode resultater i høyfast betong for å oppnå ønskede egenskaper som tregere temperaturøkning og en lavere maksimumstemperatur.

## Innholdsfortegnelse

Forord .....	i
Sammendrag .....	ii
Innledning .....	v
Formål .....	v
Bakgrunn .....	v
Avgrensning .....	vi
1. Teori .....	1
1.1. Historie .....	1
1.2. Hydratisering av sement .....	3
1.3. Hydratisering av pozzolan .....	5
1.4. Flyveaske .....	6
1.5. Mikrosilika .....	7
1.6. Tilslag .....	8
1.7. Temperatur .....	9
1.7.1. Utviklingsforløpet .....	9
1.7.2. Adiabatisk temperaturutvikling .....	10
1.7.3. Gradienter .....	11
1.7.4. Riss .....	12
1.7.5. Spenning og volumendring .....	13
1.8. Formler til regneark .....	14
1.8.1. Innledning .....	14
1.8.2. Hastighetsfunksjon og aktiveringsenergi .....	14
1.8.3. Modenhetsprinsippet .....	15
1.8.4. Varme og fasthetsutvikling .....	16
1.8.5. Varmetap .....	17
1.8.6. Kurvetilpasning .....	18
2. LAB arbeid .....	19
2.1. Gjennomføring .....	19
2.2. Testing av fersk betong .....	21
2.2.1. Luftmåling .....	21
2.2.2. Densitet .....	21
2.2.3. Synktest .....	22

2.3.	Testing av herdet betong.....	23
2.3.1.	Trykkfaset.....	23
2.3.2.	Strekkfaset.....	23
2.3.3.	E-modul.....	24
2.3.4.	Temperaturutvikling.....	25
3.	Resultater.....	26
3.1.	Innledning.....	26
3.2.	20% Flyveaske.....	27
3.3.	30% Flyveaske.....	30
3.4.	60% Flyveaske.....	33
4.	Beregninger.....	36
4.1.	Innledning.....	36
4.2.	Egenskapsfunksjoner.....	36
4.3.	Regneark.....	38
4.3.1.	Inngangsverdier.....	40
4.3.2.	Temperaturberegninger regneark.....	42
4.3.3.	Fasthetsberegninger regneark.....	47
4.3.4.	Grafisk fremstilling.....	49
4.4.	Temperatur gradienter.....	50
4.5.	Adiabatisk temperaturutvikling.....	50
5.	Diskusjon.....	51
5.1.	Innledning.....	51
5.2.	Trykkresultater.....	51
5.3.	Strekkresultater.....	54
5.4.	E-modul resultater.....	57
5.5.	Temperaturresultater.....	60
6.	Konklusjon.....	62
7.	Feilkilder.....	63
8.	Videre arbeid.....	64
9.	Litteraturliste.....	65
10.	Figurliste.....	67

## Innledning

### Formål

Formålet med denne oppgaven er å undersøke temperatur- og egenskapsutviklingen til høyfast betong, ved forskjellige doseringer av flyveaske og silikastøv i laboratoriet.

Oppgaven består av et litteraturstudie, som tar for seg den generelle teorien om temperatur- og egenskapsutvikling.

Basert på teori og eksperimentering i laboratoriet, benyttes måledataene i beregninger og simuleringer av betongens egenskaper.

### Bakgrunn

Betonglignende materialer har blitt brukt siden oldtiden. På 1800-tallet kom sement og betong til Norge. I dag blir det hele tiden bygget mer komplekse og avanserte konstruksjoner. Det gjør også at kravene til materialene øker. Betong er et spennende materiale, som med sine egenskaper åpner mange muligheter i byggeindustrien.

Delmaterialene i betong er mange, så muligheten for å optimalisere til ønskede egenskaper er store.



## Avgrensning

På grunn av begrenset tid og ressurser må denne oppgaven begrenses. Oppgaven belyser i hovedsak temperatur- og fasthetsutviklingen til høyfast betong med forskjellige mengder pozzolaner.

Betongfeltet er stort og det finnes nesten ubegrenset med studier, litteratur og forsøk. Det var derfor mest naturlig å fordype seg i kildene vi har vært innom gjennom studiene.

I laboratoriet er test- og reseptmulighetene mange. Det falt naturlig å fordype seg i det mest grunnleggende egenskapene som fasthet-, strekk-, e-modul og temperaturutvikling, da god kunnskap om dette vil gjøre mulighetene for andre forsøk enklere.

Rissdannelse er et sentralt problem i industrien i dag og henger ofte sammen med temperatur- og fasthetsutviklingen.

Ved å fokusere på disse temaene, belyses veldig realistiske og vanlige problemer i industrien.

# 1. Teori

## 1.1. Historie

I 1924 tok den engelske mureren Joseph Aspdin patent på Portlandsement. Produktet var brent kalkstein og leire malt sammen til et fint pulver. Produktet ble kalt portlandsement fordi det hadde lik fasthet og farge som den naturlige steinen på halvøya Portland i Dorsetshire [15].

Med høyfast betong mener vi betong med fasthetsklasse B85 eller høyere. Det vil si betong med terningfasthet på 100 MPa eller høyere. Det blir hele tiden gjort nye fremskritt for en høyere trykkfasthet i betong. Tilsetningsstoffer gjør lavere og lavere masseforhold mulig. Sementene blir mer finmalte og tilslaget optimaliseres. Ulempen med den økende styrken i betongen er at temperaturutviklingen også øker. Dette gir større muligheter for rissutvikling.

Høyfast betong er mest brukt til skyskrapere, broer og offshore konstruksjoner på grunn av sin høye tidligfasthet og enorme sluttfasthet, eksempler på noen prosjekter i høyfast betong [14]:

- Petronas Towers – Verdens høyeste betongbygg (452m, Kuala Lumpur, 1996)
- Lake Point Tower ( 197m, Chicago, 1965)
- Hardangerbroa - Brotårn (201,5m, Hardangerfjorden, 2011)
- Troll A – plattform for gassproduksjon (472m, Nordsjøen, 1996)

I Norge har oljeplattformene i Nordsjøen bidratt mye til den teknologiske utviklingen av høyfast betong. Når konseptet ble introdusert sent på 1960-tallet ble det møtt med stor skepsis i fagmiljøet. Utfordringene stod i kø. Betongen måtte tåle tøffe krav som 30 meter høye bølger, enorme vindkrefter, frost og kloridangrep fra saltvann.

Samtidig ble det lansert en stor feltundersøkelse av 200 betongkonstruksjoner langs kystlinjen i Norge. Rapporten viste at disse klarte seg svært godt, selv etter 50-60 år. For å løse problemet med klorid inntrengning fra saltvann, ble det introdusert strengere krav til overdekning (DNV 1974). Trykkfasthet har utviklet seg fra ca 40 MPa i 1972 til rundt 80-90 i dag. Med så høye krav til sluttproduktet, ble også de ferske- og herdingsegenskapene satt på prøve. For eksempel stilles det store krav til den ferske betongen når man har gigantiske tverrsnitt med enorme armerings mengder som skal dekkes med god heft. Herdetemperaturen må heller ikke overstige kritiske verdier. Blanding av is med tilslaget og innstøpte rør hvor det blir sirkulert kjølevæske er metoder som har blitt brukt på de største konstruksjonene mot høye temperaturer.

I perioden 1973 til 1995 ble det bygget 28 betongplattformer som bestod av over 2.5 millioner kubikkmeter med høyfast betong, hvorav flesteparten ble produsert i Norge [14].



*Figur 1: Troll A 245 000 kubikkmeter høyfast betong*

## 1.2. Hydratisering av sement

Betongen stivner og herder på grunn av en kjemisk prosess mellom klinkermineralene i sementen og vann. Egenskapene som fasthetsutvikling og temperaturutvikling er styrt av sammensetningen av klinkermineralene, pozzolaner og finhet.

Sementens finhet er som regel bestemt av det spesifikke overflatearealet. Det vil si det totale arealet ( $m^2$ ) et kilogram sement dekker. Benevningen er Blaine-finhet og ligger i området 300-500  $m^2/kg$ .

Større finhet gir raskere fasthets- og temperaturutvikling. Dette er fordi kontaktflaten mellom sement og vann blir større og strukturen i betongen tettere.

Omtrent 90-95% av portlandsement består av fire hovedmineraler som vist i tabell (1) under. De er sammensatt av oksider av grunnstoffene kalsium (Ca), aluminium (Al), silisium (Si) og jern (Fe). Den resterende mengden er oksider av mangan (Mg), kalium(K), svovel (S) og natrium (Na) [2].

Tabell 1: De fire hovedmineralene i sement

Fire hovedmineraler i sement		
Navn	Kjemisk formel	Symbol
Trikalsiumsilikat	$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$
Dikalsiumsilikat	$2CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$
Trikalsiumaluminat	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$
Tetrakalsiumaluminatferrit	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF$

Størstedelen av Portlandsement (55-60 wt%)<sup>i</sup> er  $C_3S$ . Minerallet reagerer relativt langsomt med vann, men bidrar hovedsakelig til tidligfastheten. Varmeutviklingen er rimelig høy med rundt 500 kJ/kg på det meste.

$C_2S$  er 14-20 wt% av Portlandsement. Minerallet reagerer tregere enn  $C_3S$  og bidrar derfor mest til slutfastheten. Varmeutviklingen er lav med rundt 260 kJ/kg på det meste.

$C_3A$  (5-20wt%) reagerer veldig raskt med vann, men kan bremses ved bruk av gips.  $C_3A$  har liten innflytelse på slutfastheten, men bidrar til tidligfasthet. Varmeutviklingen er veldig høy på rundt 900 kJ/kg.

$C_4AF$  (6-10wt%) bidrar lite til fastheten. Minerallet reagerer raskt med vann, men litt tregere enn  $C_3A$ . Varmeutviklingen er lav på rundt 300 kJ/kg [1].

<sup>i</sup> wt% er en forkortelse for vektprosent



Figur 2: To tonn anlegg FA sement

Sementen brukt i laboratoriet er av typen Norcem anlegg FA (CEM II/A-V 42,5 N). Dette er en spesialsement som er velegnet til grovere konstruksjoner grunnet sin lave temperaturutvikling. Sementen kan brukes i alle eksponerings-, bestandighets- og fasthetsklasser [16].

### 1.3. Hydratisering av pozzolan

I denne oppgaven er hovedfokuset lagt på flyveaske og mikrosilika siden det er disse pozzolanene som har blitt benyttet i laboratoriet. I tillegg til flyveaske og mikrosilika er slagg et av de mest brukte pozzolanene i dag. Alle tre er bi-produkter fra industrien og har ikke bare en økonomisk gevinst. Ved å erstatte sement med pozzolaner er det også en miljøgevinst, siden produksjonen av tradisjonell portlandsement avgir store mengder CO<sub>2</sub>.

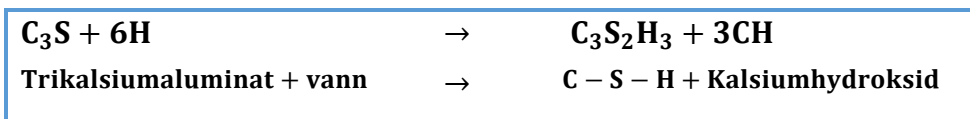
C-S-H<sup>i</sup> er hovedproduktet av hydratiseringsprosessen til Portland-sement, og er først og fremst ansvarlig for fastheten i betongen.

I tabell 2 er den prinsipielle sementklinkerreaksjonen vist. Som en kan se ut fra reaksjonene, produserer sementklinkeren Kalsiumhydroksid som binder seg med silika og produserer mer C-S-H (Tabell 2). Det vil si at pozzolanet bidrar til en mer effektiv bruk av Portland sementen. Kalsiumhydroksid er en vannløselig forbindelse som ikke gjør betongen fastere, men gir betongen høy PH [1].

Pozzolaner kan også ha hydrauliske egenskaper i seg selv, men inngår vanligvis i kjemiske reaksjoner med kalsiumhydroksid. Materialer som har denne bindende egenskapen kalles pozzolaner og reaksjonen kalles pozzolanreaksjon [2].

Mikrosilika er nesten bare silika, mens flyveaske inneholder en større mengde jern- og aluminiumoksid. Det gjør at den kjemiske prosessen til flyveaske er mer avansert, men prinsippet er det samme [1].

Tabell 2: Sementreaksjon



Tabell 3: Pozzolanreaksjon

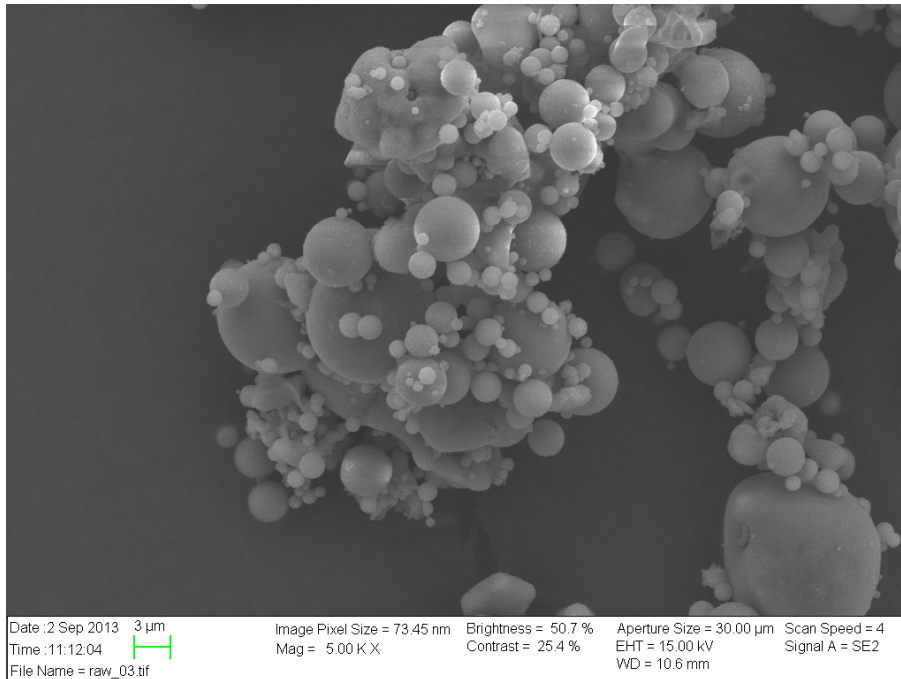


<sup>i</sup> Kalsiumsilikat-hydrat

## 1.4. Flyveaske

Flyveaske er et avfallsprodukt fra brenning av kull. Innholdet er avhengig av kullets sammensetning, men all flyveaske inneholder vesentlige mengder av  $\text{SiO}_2$  (silisiumdioksid),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Jern(III)oksid),  $\text{CaO}$  (kalsiumoksid) og  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (aluminiumoksid) [1]

Flyveaske har en Blainefinhet i området  $300\text{-}450\text{ m}^2/\text{kg}$  og en densitet på  $2300\text{ kg}/\text{m}^3$ .



Figur 3: Flyveaske

Flyveaske reduserer sjansen for at fersk betong ”blør”, på grunn av høy finhet og reduksjonen av vann. Tidligfastheten (3-7) dager reduseres, men ettersom styrkebidraget fra Portland sementen avtar, fortsetter pozzolanreaksjonen og bidrar til en høyere slutfasthet, som er mest tydelig etter 28 døgn. E-modulen kan bli litt større for betong med flyveaske i et tidlig stadiet, men utlignes mer etter hvert siden e-modulen stort sett er proporsjonal med trykkfastheten [3].

Flyveaske har en lavere hydratiseringsvarme enn portlandsement og kan derfor være til god hjelp ved utstøping av store konstruksjoner, hvor temperaturen kan bli så høy at den forårsaker riss. Flyveaske hjelper også til å redusere kryp i betongen. Siden kryp i hovedsak forårsakes av last over tid, spiller flyveaskens høye slutfasthet en viktig rolle.

Det ubrente kullet i flyveaske gjør at behovet for l-stoffer<sup>i</sup> øker for å oppnå et frostbestandig sluttprodukt. Karboninnholdet i flyveasken er avgjørende, ettersom karbon reduserer virkningsgraden av luftinnførende tilsetningsstoffer. Det er derfor vanskelig å få en frostbestandig betong med flyveaske som har et karboninnhold på over 6 prosent [3].

<sup>i</sup> luftinnførende tilsetningsstoff

## 1.5. Mikrosilika

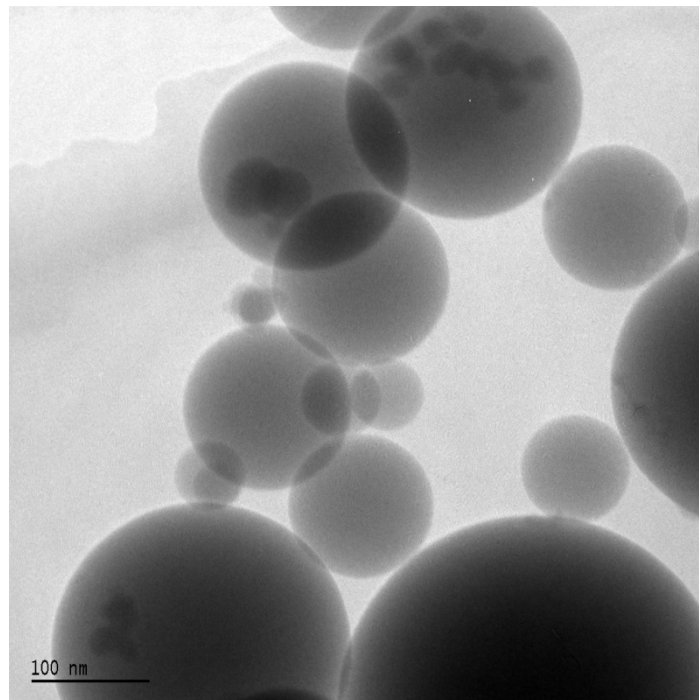
Silikastøv, også kjent som mikrosilika, er et litt nyere pozzolan, som har motatt mye oppmerksomhet gjennom forskning og bruk. Silikastøv er røykgass-støv fra ferrosilisium og silisiumproduksjon. Siden Norge er ledende på produksjon av ferrosilisium, har landet spilt en viktig rolle i denne delen av betongeventyret [15]. Diameteren til partiklene er 0,1 - 0,2 mikromillimeter og blainefinheten er i området 15000-25000 m<sup>2</sup>/kg [3].

Populariteten til mikrosilika vokste raskt frem. På grunn av finheten gir det en god tetthet og bestandighet i betongen og er med på å påvirke både ferske og herdete egenskaper.

Mikrosilika hindrer separering og blødning ved at porene i den ferske betongen blir blokkert, så vannet ikke får stige til overflaten. Den økte finheten øker også behovet for vann i blandingen. Ved stor dosering (20-25%), vil man få en betong som er veldig lite frostbestandig. Heften mot armering kan øke med opptil 50-100 prosent, så faren for korrosjon blir også redusert.

Trykkfastheten, strekkfastheten og e-modulen blir som ved flyveaske redusert i tidligfasen. Dette skjer selvfølgelig fordi silika reagerer med reaksjonsproduktet til vann og sement. Når silikaen først reagerer skjer det raskt og reaksjonen er så å si ferdig etter 28 døgn.

Avbindingstiden og temperaturen er lite påvirket ved normal dosering (opptil 10%). Hydratiseringsprosessen avgir mer varme enn ved sementhydratisering, men reaksjonen skjer tregere og gir derfor ikke økte temperaturer [1].



Figur 4: Mikrosilika



## 1.6. Tilslag

Tilslag til betong produseres i hovedsak av løsmasser fra siste istid. Dette kalles for naturtilslag. Etter hvert som tilgangen til naturtilslaget blir mindre øker behovet for knust fjell. Knust fjell må da tilfredsstille de samme geometriske kravene som naturtilslag. I Norge har vi godt egnede bergarter til betongtilslag som kvartsdioritt, granitt/gneis og gabbro.

Det var under utviklingen av høyfast betong i Norge at fokuset ble rettet mot tilslagets kvalitet. Tilslaget er med på å bestemme betongens ferske og herdete egenskaper. Det stilles derfor geometriske, fysiske og kjemiske krav [2].

Kornformen og graderingen påvirker matriksbehovet med hensyn på ønsket betongkonsistens ved utstøping. Kubisk avrundede partikler har en positiv effekt, mens tynne flate partikler har en negativ effekt.

Er tilslaget helt tørt kan det trekke til seg vann fra den ferske betongen. Det kan resultere i raskt konsistenstap samtidig som vann/bindemiddel forholdet i betongen blir lavere. Har tilslaget overflatevann kan det gi et høyere v/b tall. Det er derfor viktig at fuktnivået i tilslaget er kjent når man proporsjonerer betong. Fuktigheten i sandfraksjonen betyr mest, siden det store overflatearealet per vektenhet kan absorbere betydelig mer vann.

Tilslaget består som regel av 65-75% av det totale betongvolumet. Det stilles derfor kjemiske krav til tilslaget, siden dette er med på å påvirke betongens bestandighet.

**Klorider** forekommer som regel i tilslag som kalsium- og natriumsalter og stammer oftest fra tilslagets opprinnelse. Saltene bidrar til det totale klorid og alkalienivået i betongen og kan forårsake korrosjon av innstøpt armeringsstål.

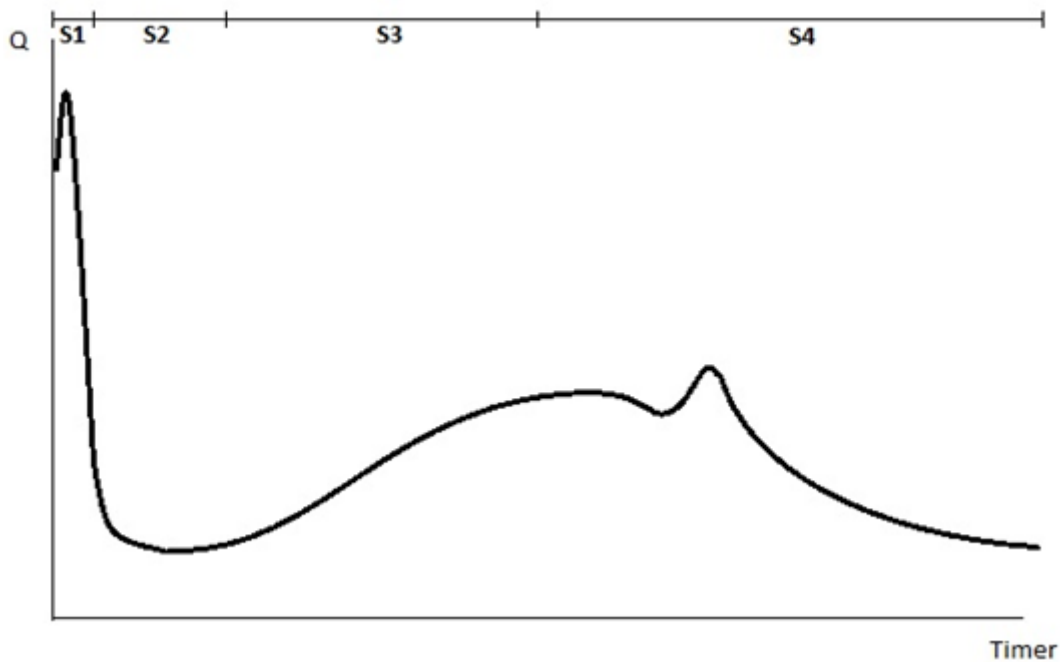
**Sulfater** i tilslag kan føre til utvidelse og riss i betongen. Det er sementens innhold av  $C_3A$  som er den ustabile komponenten ved sulfat angrep. Sulfater reagerer med aluminatene i sementen. Ved denne reaksjonen dannes det reaksjonsprodukter som binder vann og får en stor volumøkning. I begynnelsen vil reaksjonsproduktene kun fylle opp poresystemet, og dermed gi en viss fasthetsutvikling. Etter hvert vil imidlertid reaksjonsproduktene gi et kraftig trykk som vil føre til en indre oppsprekking.

I høyfast betong er sementlimet så hardt bundet at tilslaget må være av høy kvalitet for oppnå høy E-modul, trykk- og strekkfasthet. Trykkfastheten i de ulike norske steinartene varierer fra rundt 100-350 MPa. E-modulen ligger i området 45-80 GPa [1].

## 1.7. Temperatur

### 1.7.1. Utviklingsforløpet

Herdingsforløpet til Portlandsement kan deles inn i 4 intervaller. S1, S2, S3 og S4 som vist på figuren (5) under:



Figur 5: Herdingsforløpet til Portlandsement

- S1: Denne fasen starter når vann og sement blandes og varer i 10-20 minutter. Varmen stammer fra temperaturen til bindemiddel, vann og tilslag. Samt reaksjonen fra klinkermineralene. I denne fasen foregår det stort sett bare dannelse av ettringitt. Den totale varmeutviklingen ligger på rundt 20-30 kJ/kg [1].
- S2: Periode S2 varer i rundt 2-4 timer avhengig av tilsetningsstoffer og temperatur. Kalsiumhydroksid oppløses i denne perioden inntil det når et nivå som vil aktivere hydreringen av  $C_3S$ . I denne perioden oppnår sementen en viss stivhet [1].
- S3: Periode S3 er den akselererende perioden og varer i 5-10 timer. Reaksjonshastigheten øker gradvis på grunn av  $C_3S \rightarrow C-S-H$  reaksjonen. Kalsiumsilikat-hydrat begynner å gi betongen styrke. Reaksjonshastigheten er på det høyeste på slutten av periode S3 [1].
- S4: Periode S4 er retarderingsperioden hvor C-S-H binder seg til vannet i betongen og former seg som større faststoff på overflaten av  $C_3S$ . Hydratiseringshastigheten minker. Dersom gipsen er blitt brukt opp i de tidligere reaksjonene vil  $C_3A$  og ettringitt danne monosulfat og gi en ny topp i varmeutviklingen som vist på grafen over [1].

### 1.7.2. Adiabatisk temperaturutvikling

At betongen er adiabatisk betyr at den ikke får tilført eller fratatt varme. Teoretisk betyr dette at betongtemperaturen vil øke helt til den når sin adiabatiske makstemperatur for så å flate ut. Når temperaturen måles i isoterme omgivelser vil betongen nå sin makstemperatur for så begynne å synke. Dette varmetapet er et tap til omgivelsene.

I praksis vil man aldri få helt adiabatiske forhold, det vil alltid være et visst varmetap til omgivelsene og temperaturgradienter i betongen. Ved utstøping av massive tverrsnitt kan man oppnå nesten adiabatiske forhold i midten av konstruksjonen, men over lang nok tid vil betongen til slutt få samme temperatur som omgivelsene. Den totale adiabatiske temperaturøkningen kan regnes fra følgende formel [1]:

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

$\Delta\theta$	– Temperaturøkning
$C$	– Sementmengde
$Q_{\infty}$	– Total varmeutvikling
$\rho_r$	– Betongdensitet
$c_b$	– Betongens varmekapasitet

Formel 1: Adiabatisk temperaturutvikling

### 1.7.3. Gradienter

Når Portlandsementen starter å hydratisere i et massivt tverrsnitt, skjer varmetutviklingen så raskt at gradientene ikke vil være et problem. Det er derimot når maksimumstemperaturen nærmer seg, og konstruksjonen begynner å kjøle seg ned til omgivelsestemperaturen at gradientene er på sitt største. Dette er på grunn av strekkspenninger som genereres i hydratisert sementlim som ikke kjøles ned i samme hastighet. Disse spenningene kan bli så store at det oppstår mikrosprekker i konstruksjonen også kjent som temperaturriss. Dette fenomenet kalles indre fastholding. Rissene vil som regel lukke seg når konstruksjonen har kjølt seg ned. Indre fastholding er derfor ikke noe stort problem med mindre gradientene blir veldig store [4].

Temperatur gradienter i høyfast betong kan være kritiske faktorer i massive tverrsnitt og bjelker med dimensjoner større enn 500 mm. I mindre konstruksjoner vil det ikke være fare for oppsprekking på grunn av gradienter.

For å unngå såkalt indre fastholding kan man bruke forskaling med god isolasjonsevne. Dette vil senke varmetapet til omgivelsene og derfor gi en jevnere temperatur i hele konstruksjonen. Forskalingen kan også stå mot konstruksjonen i et par døgn for å sikre isoleringsevnen til temperaturen passerer kritiske verdier. Betong med flyveaskeinnhold vil også senke maksimumtemperaturen, som igjen vil gi lavere gradienter.

Som alle andre materialer vil betong utvide seg ved oppvarming og trekke seg sammen ved nedkjøling. Hvis noe holder igjen ved en slik temperaturkontraksjon vil det dannes strekkspenninger. For eksempel for en vegg støpt imot et eksisterende dekke vil først den herdnende betongen utvikle varme og utvide seg. Når den kjøles ned vil den prøve å trekke seg sammen, men blir fastholdt i den eksisterende konstruksjonen via påstøp og skjøtearmering. Den eksisterende konstruksjonen vil ha en høyere stivhet (e-modul). Det oppstår derfor sprekker vinkelrett mot kontaktflaten. Rissene oppstår i nedkjølingsfasen og kan være dype. Dette gir problemer både med tetthet og bestandighet. Fenomenet kalles ytre fastholding [2].

For å unngå fastholding, støpes det gjerne inn et lite lag isopor mellom seksjonene i grove konstruksjoner. Isopor har lav e-modul og høy tøyelighet og betongen får ikke direkte kontakt.



Figur 6: Fastholding

#### 1.7.4. Riss

Vannmengden i betong ved utstøping er som regel nok til å hydratisere alt bindemiddelet, forutsatt at alt vannet holdes i betongen [6]. Det er derfor viktig med tidlig tildekking etter utstøping for å hindre mest mulig fordamping.

##### **Plastisk svinn**

Plastisk svinn er et fenomen som forekommer på frie betongoverflater der vannet fordamper. Dette skjer rett før betongen størkner i den plastiske fasen. Fordampingen medfører et kapillært undertrykk som gir en sammentrekning av betongen. Det plastiske svinnet kan føre til store riss, opptil 1-2 mm, som i slanke konstruksjoner ofte kan være gjennomgående [2].

##### **Plastisk setning**

Plastiske setninger forekommer også i den plastiske fasen etter at betongen er utstøpt. Plastiske setninger er veldig aktuelt for høyfast betong siden det er et problem i konstruksjoner med store dimensjoner. Det vil skje en sedimentering og omlagring av faste partikler, vannutskillelse og etterkomprimering av betongen på grunn av egenvekten. Dette fører til at betongen vil synke sammen i plastisk tilstand. Fenomenet kan føre til grove riss som er gjennomgående ned til konstruktiv armering [2].

##### **Autogent svinn**

Autogent svinn er betongens egenproduserte sammentrekning. Sementlim tar mindre plass i herdet tilstand enn i fersk tilstand. Denne komprimeringen kalles for kjemisk svinn og starter med en gang vann og bindemiddel blandes og fortsetter helt til sementen er helt hydratisert. Volumtapet lager porer under bindingsprosessen. Disse kan betraktes som en integrert del av gel- og kapillærporene i det faste reaksjonsproduktet. Ved videre hydratisering blir porevannet fortært og porestrukturen blir delvis tømt. Prosessen skaper kapillærkrefter og et undertrykk i porevannet. Kreftene fører til en sammentrekning av betongen og den ytre effekten kalles for autogent svinn [1].

##### **Temperatur svinn**

Herdet betong som blir utsatt for luft vil tørke ut og utvikle uttørkingssvinn. Det er kapillære krefter og undertrykk i porevannet som er hovedårsaken bak uttørkingssvinn, akkurat som for plastisk svinn. Når vannet tørker ut vil betongen prøve å trekke seg sammen. Betongen er nå stiv og vil motsette seg denne sammentrekningen. Blir kreftene større enn betongens strekkkapasitet, vil betongen sprekke opp.

Fordampingen av vann avhenger av betongtemperatur, lufttemperatur, luftfuktigheten, vindforholdene og betongkonstruksjonens utforming. Etterhvert som betongen herder blir sementlimet tettere og tettere. Transporten av vann opp til overflaten blir mindre. Hvis fordampingen fra overflaten går raskere enn betongens evne til å transportere vann til overflaten, kan betongen på overflaten tørke ut og herdeprosessen stanse [6].

### 1.7.5. Spenning og volumendring

Krefter som oppstår i ung betong er i hovedsak knyttet til tre typer deformasjon: autogen deformasjon, termisk utvidelse, og uttørkingssvinn.

Betongen går gjennom en naturlig oppvarming-avkjølings syklus i løpet av de første dagene. Sementreaksjonen lager varme og omgivelsene kjøler ned. Den totale deformasjon er summen av termisk utvidelse og autogen deformasjon [8]:

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_T + \epsilon_A$$

$\epsilon_{tot}$  – Total deformasjon  
 $\epsilon_T$  – Termisk utvidelse  
 $\epsilon_A$  – Autogen deformasjon

Formel 2: Total deformasjon

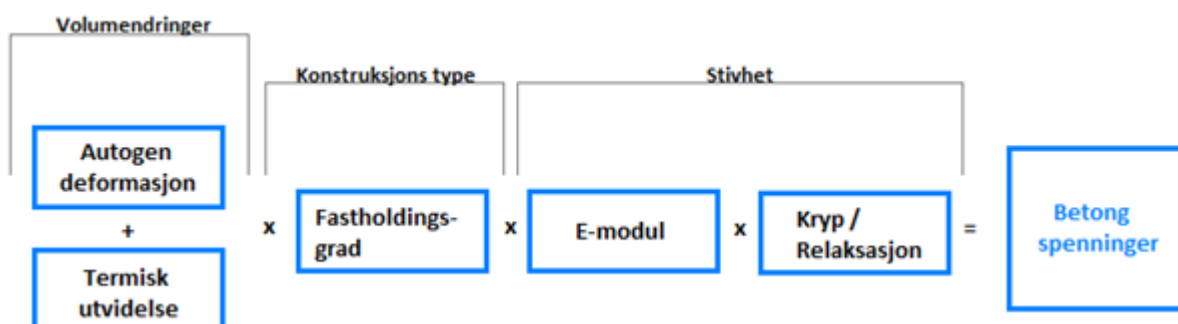
$$\epsilon_T = \alpha_T \cdot \Delta_T$$

$\epsilon_T$  – Termisk utvidelse  
 $\alpha_T$  – Temperaturutvidelseskoeffisient  
 $\Delta_T$  – Temperatur gradient

Formel 3: Termisk utvidelse

Termisk utvidelse oppstår på grunn av temperaturgradienter innad i en konstruksjon. Temperaturutvidelseskoeffisienten utvikles over tid, og vil forandre seg gjennom betongens levetid. Koeffisienten varierer fra betong til betong og er blant annet avhengig av tilslag, fukt og matriksinnhold.

Volumendringen er en sentral faktor i spenningsoppbyggingen i ung betong. Fastholdingsgraden bestemmes av konstruksjonens utforming. Stivheten er også en sentral faktor. Større e-modul gir en stivere betong som gir mer interne krefter. Mye kryp og relaksasjon i betongen øker også spenningene [1].



Figur 7: Spenninger i betong

## 1.8. Formler til regneark

### 1.8.1. Innledning

En del av denne oppgaven var å utvikle et regneark i Excel som tar for seg temperaturutviklingen og fasthetsutviklingen i en vegg. I dette kapitlet skal den nødvendige teorien som ligger bak regnearket forklares.

### 1.8.2. Hastighetsfunksjon og aktiveringsenergi

De fleste kjemiske prosesser skjer hurtigere ved høy temperatur. Dette er også tilfellet ved vann og klinkerminerale/pozzolaner. Formelen bygger på Arrhenius ligningen og beskriver forholdet mellom temperaturen og den kjemiske aktiviteten i hydratiseringsprosessen [1].

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

$E(\theta)$  – Aktiveringsenergi

$\theta$  – Temperatur

$R$  – Gasskonstanten

Formel 4: Hastighetsfunksjon

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

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

$E(\theta)$  – Aktiveringsenergi

$A$  – Konstant

$B$  – Konstant

Formel 5: Aktiveringsenergi

Aktiveringsenergien beskriver hvor mye energi som må til for å aktivere sementen. Ligningen (Formel 5) viser aktiviseringsenergien uttrykt ved temperatur og gir en god antagelse av den reelle aktiviseringsenergien. Vi ser ut i fra ligningene at aktiveringsenergien stiger kraftig når temperaturen er under 20 °C.

Konstantene A og B avhenger av sementtype, pozzolan innhold og til en viss grad v/b forholdet. A varierer i området 20-40 kJ/mol, mens B ligger i området 1.0 – 1.5 kJ/mol°C. Normal verdi er 33.5 kJ/mol for A og 1.47 kJ/mol°C for B [1].

Aktiveringsenergien øker for betonger med økende mengde flyveaske. Det vil si at vi trenger mer energi for å starte den kjemiske reaksjonen i betongen når doseringen av flyveaske øker.

### 1.8.3. Modenhetsprinsippet

Fra hastighetsfunksjonen,  $H(\theta)$ . Kan man beregne betongens modenheten ved et bestemt tidspunkt når temperaturforløpet er kjent.

Har man målt temperaturforløpet i en konstruksjon, kan man summere opp betongens modenhet i gradtimer for herding ved 20 celsius. For eksempel så har en betong som herder 30 timer ved 20 celsius oppnådd samme antall modenhetstimer som om den hadde herdet 15 timer under 40 celsius. Trykkfastheten til betongen hadde også vært lik.

Vi kan altså måle temperaturforløpet i en gitt konstruksjon og ved hjelp av modenhetsberegninger finne betongens styrke til en hver tid. Kravet er at man har fasthetsutviklingen ved 20 celsius tilgjengelig [2].

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

M – Modenheten  
 $t_0$  – Tid når vann tilsettes  
t – Slutt tid  
 $H(\theta)$  – Hastighetsfunksjon  
 $\theta$  – Temperatur

Formel 6: Modenhet ved integrasjon

Den numeriske beregningen av modenhet, M, utføres ved å dele temperaturhistorien inn i n tidsintervaller med lengde  $\Delta t$ . Videre beregnes hastighetsfunksjonen for hvert enkelt tidsintervall. Dette gjør at den endelige modenheten er summen av hastighetsfunksjonen i alle tidsintervallene [1].

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

$\Delta t$  – Tidsintervall  
n – Antall tidsintervaller

Formel 7: Modenheten ved summering



#### 1.8.4. Varme og fasthetsutvikling

Som nevnt i forrige avsnitt kan styrken i enhver konstruksjon beregnes ut i fra modenhet så lenge temperaturen er målt og trykkfastheten er kjent. Det samme gjelder for varmeutviklingen.

Vi ser fra uttrykket under at begge ligningene er en funksjon av modenhet og begge uttrykkene utvikler seg med samme eksponentialfunksjon, men forskjellige konstanter. Funksjonen er kjent som dansk egenskapsfunksjon.

Parameterne  $Q_{\infty}$ ,  $f_{c(\infty)}$ ,  $\tau$  og  $\alpha$  bestemmes ut ifra kurvetilpasning, dodenhet opp mot fasthet for fasthetsutvikling og modenhet opp mot temperatur for varmeutvikling.

Funksjonen kan bli brukt med høy nøyaktighet i de 100 første modenhetstimene. Etter dette kan det oppstå noe avvik, spesielt ved høye temperaturer. En betong som har herdet under 50 °C vil herde raskere i startfasen, men blir straffet senere og oppnår en lavere slutfasthet, enn samme betong som har herdet konstant under 20 °C. Det tar ikke egenskapsfunksjonen høyde for [1].

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

- $Q_{\infty}$  – Total varmeutvikling
- $\tau_t$  – Retardasjons parameter
- $\alpha_t$  – Krumnings parameter
- $M$  – Modenhet

Formel 8: Varmeutvikling

$$f_c(M) = f_{c(\infty)} \cdot e^{\left(-\left(\frac{\tau_f}{M}\right)^{\alpha_f}\right)}$$

- $f_{c(\infty)}$  – Slutfasthet
- $\tau_f$  – Retardasjons parameter
- $\alpha_f$  – Krumnings parameter
- $M$  – Modenhet

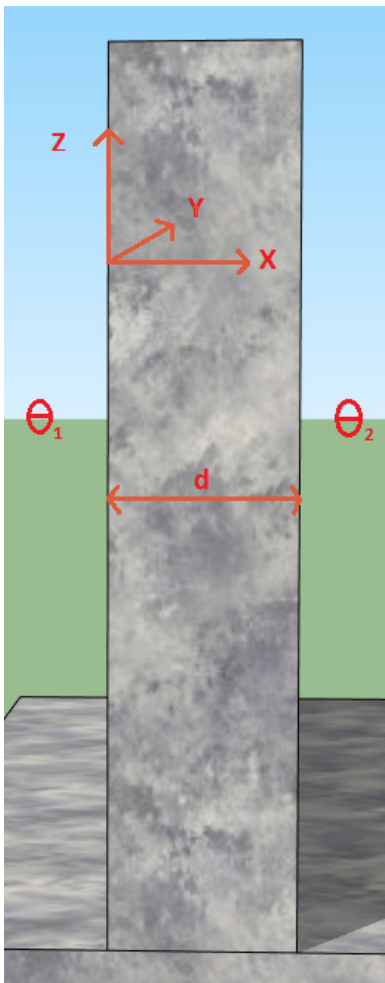
Formel 9: Fasthetsutvikling

## 1.8.5. Varmetap

Fouriers lov, eller varmeldningsloven som den også er kalt, forteller at varmetransporten i homogene materialer er proporsjonale med temperaturgradientene [18].

Ved bruken av Fouriers likning i regnearket, vil uttrykket bli brukt i en- dimensjonal retning, ved å se på konstruksjonen som et homogent isotropt materiale. Varmeledningen til armeringsstål neglisjeres.

Ved å ta utgangspunkt i bare varmeledning i x-retning, kan følgende formel utledes fra figuren [19]:



Figur 8: Varmeledning gjennom vegg

$$\begin{aligned} &\rightarrow \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \\ &\rightarrow \theta = C_1 x + C_2 \\ &\boxed{C_2 = \theta_1} \\ &\boxed{C_1 = \frac{\theta_2 - \theta_1}{d}} \\ &\rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial x} = C_1 = \frac{\theta_2 - \theta_1}{d} \\ &\rightarrow \frac{dQ}{dt} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\theta_2 - \theta_1}{d} \\ &\boxed{A = \text{Flateareal vegg}} \\ &\boxed{\lambda = \text{Varmeledningsevne}} \\ &\rightarrow \underline{Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{\theta_2 - \theta_1}{d} \cdot t} \end{aligned}$$

Formel 10: Utledning av varmetap

Resultatet er en likning som enkelt kan brukes til å beregne varmetapet over tid i et regneark.

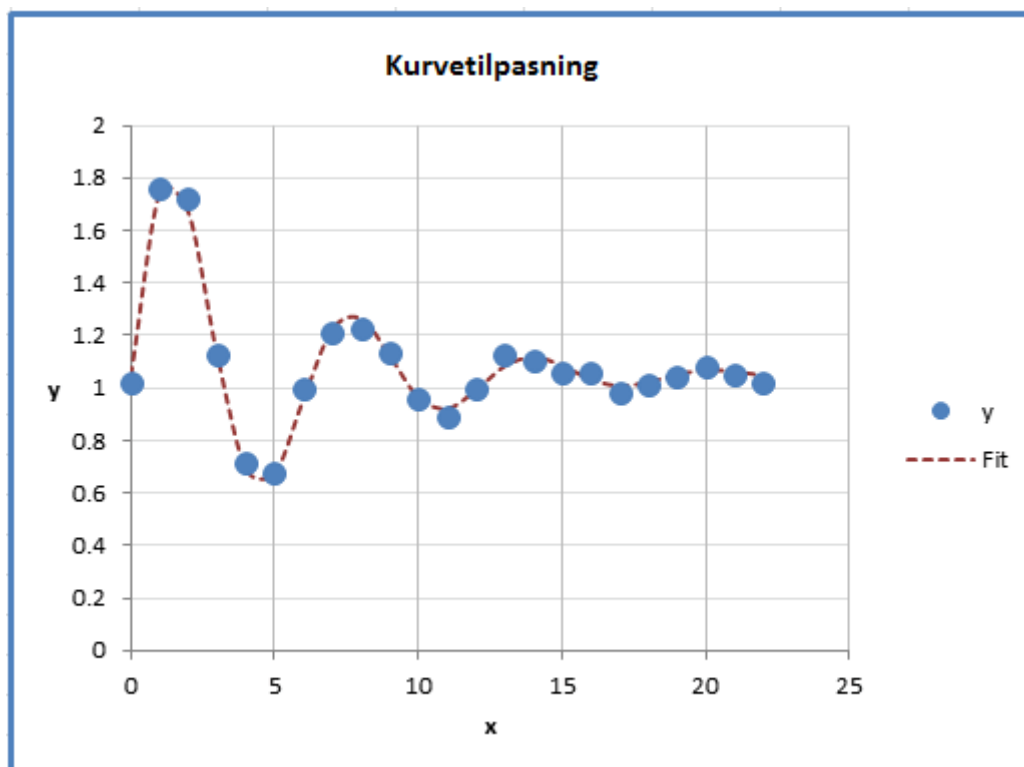
### 1.8.6 Kurvetilpasning

Minste kvadraters metode er en metode for å behandle observasjonsdata. Metoden ble først brukt av C. F. Gauss og senere uavhengig offentliggjort av A. M. Legendre (1806).

Prinsippet er å lage en matematisk funksjon som beskriver prøveresultatene på en best mulig måte. Dette gjøres ved å summere og kvadrere avvikene, for så å justere konstantene i uttrykket til avviket blir minst mulig. Standard formelen er [17]:

$$\bar{a} = (a - a_1)^2 + (a - a_2)^2 + \dots + (a - a_n)^2$$

Formel 11: Kurvetilpasning



Figur 9: Kurvetilpasnings eksempel

## 2. LAB arbeid

### 2.1. Gjennomføring

Følgende parametere holdes konstante for hver resept:

$$\frac{V}{B} = \frac{V}{C + \sum kp} = 0,3$$

*Sementpasta = 277 l/m<sup>3</sup>*

*Matriksvolum = 300 l/m<sup>3</sup>*

Figur 10: Betongparametere

For å få en lik 28 døgns fasthet på reseptene holdes masseforholdet, sementpasta- og matriksvolumet konstant. K-faktoren settes til 0,4 for flyveaske og 2,0 for silikastøv [12].

Sementen som benyttes er av typen Anlegg FA med 17% flyveaske innhold. Reseptene forkortes for å gjøre det hele mer oversiktlig. Forkortelsene vil gå igjen senere i oppgaven. 20FA Betyr at det er 20% Flyveaske i forhold til sementvekten i resepten. SF er tilsvarende forkortelse for silica fume (silikastøv).

Tabell 4: Betong resepter

Resept	Sement kg/m <sup>3</sup>	FA + kg/m <sup>3</sup>	SF kg/m <sup>3</sup>	Vann kg/m <sup>3</sup>	SP kg/m <sup>3</sup>	0/8 kg/m <sup>3</sup>	8/16 kg/m <sup>3</sup>	16/22 kg/m <sup>3</sup>
20FA00SF	445.7	0.0	0.0	120.1	-	964.1	414.6	500.6
20FA05SF	416.4	0.0	17.3	122.5	-	964.1	414.6	500.6
20FA10SF	390.7	0.0	32.4	124.7	-	964.1	414.6	500.6
30FA05SF	390.7	30.9	16.2	118.7	-	964.1	414.6	500.6
30FA10SF	368.0	29.0	30.5	120.9	-	964.1	414.6	500.6
60FA05SF	327.0	107.0	13.6	109.1	-	964.1	414.6	500.6
60FA10SF	311.0	102.0	25.8	111.5	-	964.1	414.6	500.6

Før hver blanding korrigeres vannmengden etter fukten i tilslaget. For hver resept skal det støpes prøver for trykkfasthet, strekkfasthet og e-modul. Til trykkfasthet benyttes det terninger (100x100x100mm). Til strekkfasthet og e-modul benyttes sylindere (150x300mm).

Prøvene skal gjennomføres for hver resept etter 1 døgn, 2 døgn, 3 døgn, 7 døgn og 28 døgn. For å få mest mulig nøyaktig resultater, benyttes to prøvestykker per test, hvor middelverdien av disse vil bli presentert. Det vil si at for hver resept støpes 20 sylindere og 10 terninger, totalt 135 liter. I tillegg blandes 15 liter til en temperaturboks, hvor temperaturutviklingen måles i 3 døgn.

For å få en mest mulig nøyaktig betongresept, ble siktekurver til tilslaget etterspurt. Dette leverte Velde på 8/16 og 16/22 fraksjonen. 0/8 fraksjonen ble siktet manuelt etter NS-EN 12620:2002+A1:2008+NA:2009. Alle siktekurver ligger som vedlegg til oppgaven.



*Figur 11: Alt klart til betongstøping*

## 2.2. Testing av fersk betong

### 2.2.1. Luftmåling

**Luftmåling** (Etter NS-EN 12350-7:2009 Prøving av fersk betong - Del 7: Luftinnhold – Trykkmetoder)

Målingen foregår med en luftporemåler av typen FTS B2020. Beholderen fylles i 3 like tykke lag og komprimeres 25 ganger for hvert lag. Deretter plasseres lokket på toppen av beholderen og resterende volumet fylles med vann. En pumper opp trykket i beholderen, trykker på ventilen og leser av luften [10].



Figur 12: Luftporemåler

### 2.2.2. Densitet

**Måling av densitet** (Etter NS-EN 12350-6:2009 Prøving av fersk betong - Del 6: Densitet)

Betongen fylles i 3 lag og komprimeres i en beholder med kjent volum og vekt. Deretter veies beholderen med betongen. Ut fra dette kan densiteten beregnes [10].

### 2.2.3. Synktest

**Synktest** (Etter NS-EN 12350-2:2009 Prøving av fersk betong - Del 2: Synkmål)

Dette ble gjennomført ved at synkkjeglens innside og underlaget fuktes. Synkkjeglen plasseres på et plant underlag. Kjeglen blir deretter fylt opp med 3 like tykke lag, som komprimeres med 25 støt av en metallstang (dybel), for hvert lag. Deretter løftes kjeglen av og betongen får flyte ut. Synkmålet blir deretter målt fra toppen av kjeglen og ned til betongen [9].



Figur 13: Synkkjegle og dybel

## 2.3. Testing av herdet betong

### 2.3.1. Trykkfaset

**Trykkfasthet** (Etter NS-EN 12390-3:2001 Prøving av herdnet betong - Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet)

Prøvene lufttørket i rundt en time før eksisterende overflatevann ble tørket bort. Deretter ble de testet på en maskin av typen ToniTROLL. Terningene trykkes med konstant last til brudd. Resultatet ble lest av i dataprogrammet testXpert. Det blir benyttet to prøvelegemer for hver test, hvor middelverdien av disse vil bli presentert [11].

### 2.3.2. Strekkfasthet

**Strekkfasthet** (Etter NS-EN 12390-6:2001 Prøving av herdnet betong- Del 6: Prøvelegemers spaltestrekkfasthet)

Prøvene lufttørkes og resterende overflatevann tørkes bort. Sylindere plasseres i en jig til prøving av sylindereformede prøvelegemer. Jiggen plasseres inn i testmaskinen og trykkes med konstant kraft til brudd. Det benyttes også her to prøvelegemer. Resultatet fra testXpert regnes om til spaltestrekkfasthet med følgende formel [11]:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d}$$

$f_{ct}$	– Spaltestrekkfasthet
$F$	– Bruddlast
$L$	– Lengde prøvelegeme
$M$	– Diameter prøvelegeme

Formel 12: Spaltestrekkfasthet



### 2.3.3. E-modul

E-modulen bestemmes som forholdet mellom belastning og relativ lengdeendring av prøvestykkene. Sylinderen plasseres i trykkprøvemaskinen med påmontert deformasjonsmåler.

Først belastes prøvestykket med 0,5 MPa i 60 sekunder. Dette er grunnbelastningen og deformasjonsmåleren avleses ved stabil verdi. Grunnbelastningen kalles  $\sigma_3$  og tilhørende deformasjonen kalles  $\varepsilon_{01}$ .

Belastningen økes så jevnt med  $0,8 \pm 0,2$  MPa/s, opp til 45% av betongens målte middelfasthet. Denne belastningen ( $0,45 \cdot f_{cm}$ ) kalles  $\sigma_1$  og holdes konstant i 60 sekunder for å lese av deformasjonen  $\varepsilon_1$ .

Prøvestykkene avlastes med samme hastighet som ved pålastning ned til grunnbelastningen på 0,5 MPa. Belastningen holdes som alltid konstant i 60 sekunder. Deformasjonen avleses og kalles for  $\varepsilon_{02}$ .

Så økes belastningen med samme hastighet opp til  $f_{cm}/3$  som holdes konstant i 60 sekunder. Denne deformasjonen kalles  $\varepsilon_2$  og belastningen kalles  $\sigma_2$ .

$E_c$  og  $E_0$  beregnes så fra formlene under. Det er  $E_c$  som vil bli presentert i resultatene,  $E_0$  har kun blitt brukt til sammenligning.  $L$  er avstanden mellom sensorene på deformasjonsmåleren. Statens vegvesen anbefaler 200 mm for sylinder med høyde på 300 mm [7].

$$E_c = \frac{(\sigma_2 - \sigma_3) \cdot L}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_{02})}$$

$$E_0 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot L}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{01})}$$

Formel 13: E-modul

#### 2.3.4. Temperaturutvikling

Den aktuelle resepten fylles og komprimeres i en isolert temperaturboks på 15 liter. En avisolert termokabel går fra digitaltermometeret til senter av betongen. Termometeret logger temperaturen med intervaller på 30 minutter over tre døgn.



Figur 14: Temperaturmåling av tre resepter

### 3. Resultater

#### 3.1. Innledning

I dette kapitlet er resultatene fra laboratoriet presentert. Det presenteres som rådata etter resept. En graf illustrerer utviklingen på dag 1, 2, 3, 7, og 28. Resultatene blir presentert i følgende rekkefølge: Ferske egenskaper, trykkfasthet, strekkfasthet, e-modul og temperatur til slutt. Diskusjonen rundt resultatene forekommer i kapittel 5.

Strekkfastheten i høyfast betong ligger på rundt 5 prosent av strekkfastheten, i forhold til normal betong hvor den er nærmere 10 prosent [21].

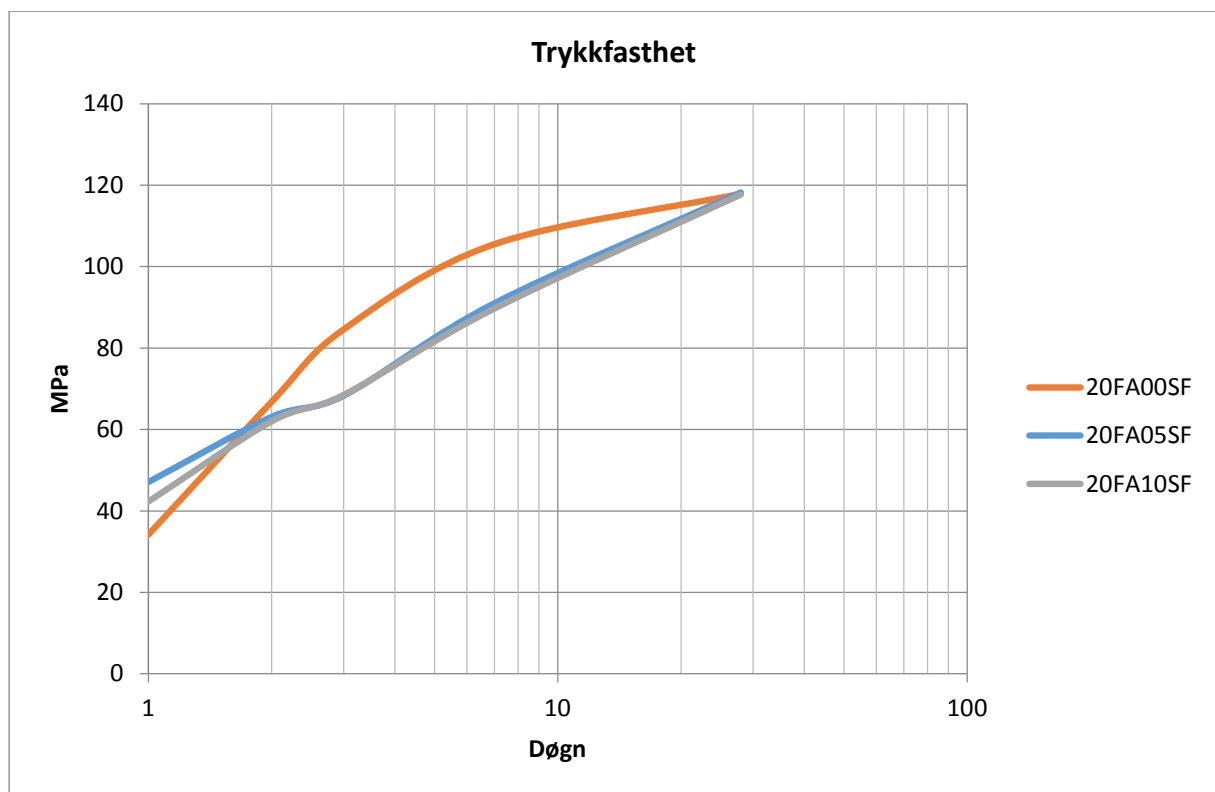


Figur 15: Et sett klart til testing

### 3.2. 20% Flyveaske

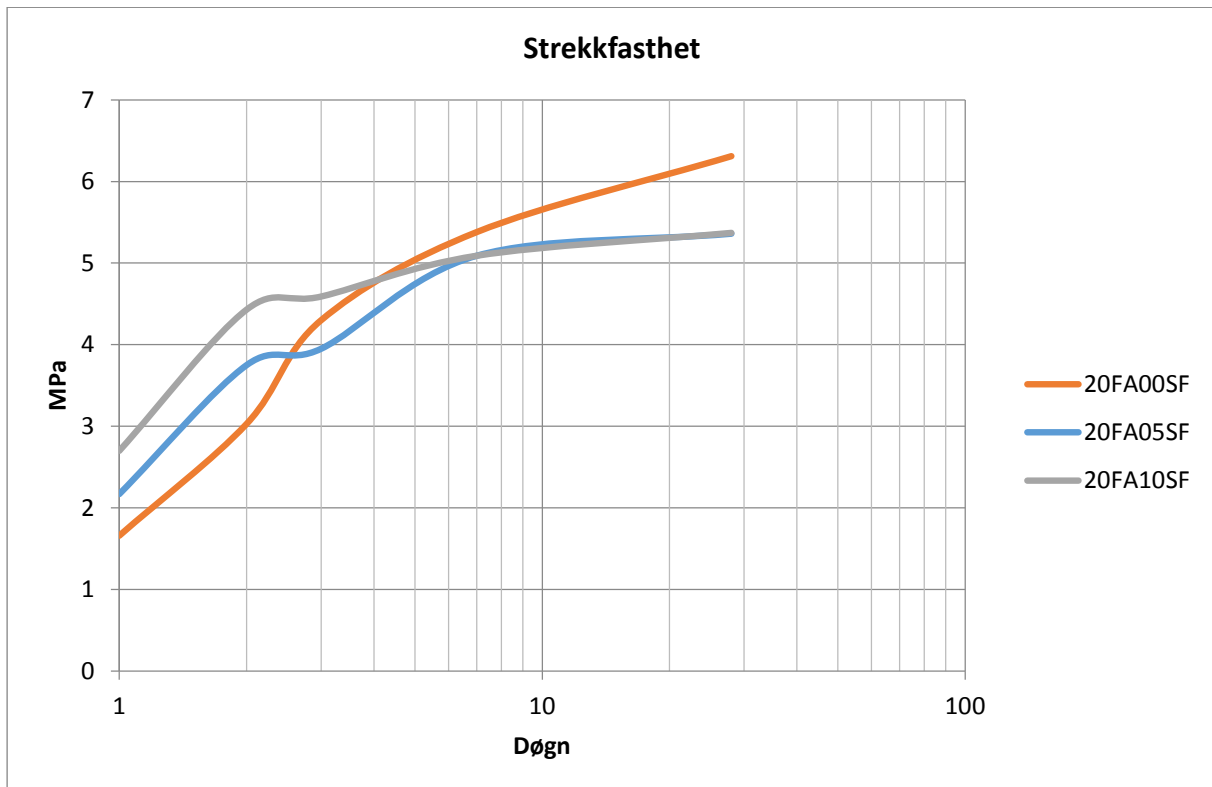
Tabell 5: Ferske egenskaper 20% FA

Ferske egenskaper			
	Luftinnhold (%)	Slump (mm)	Densitet ( $kg/m^3$ )
20FA00SF	2.0	230	2484.0
20FA05SF	1.7	220	2481.6
20FA10SF	1.6	210	2480.8



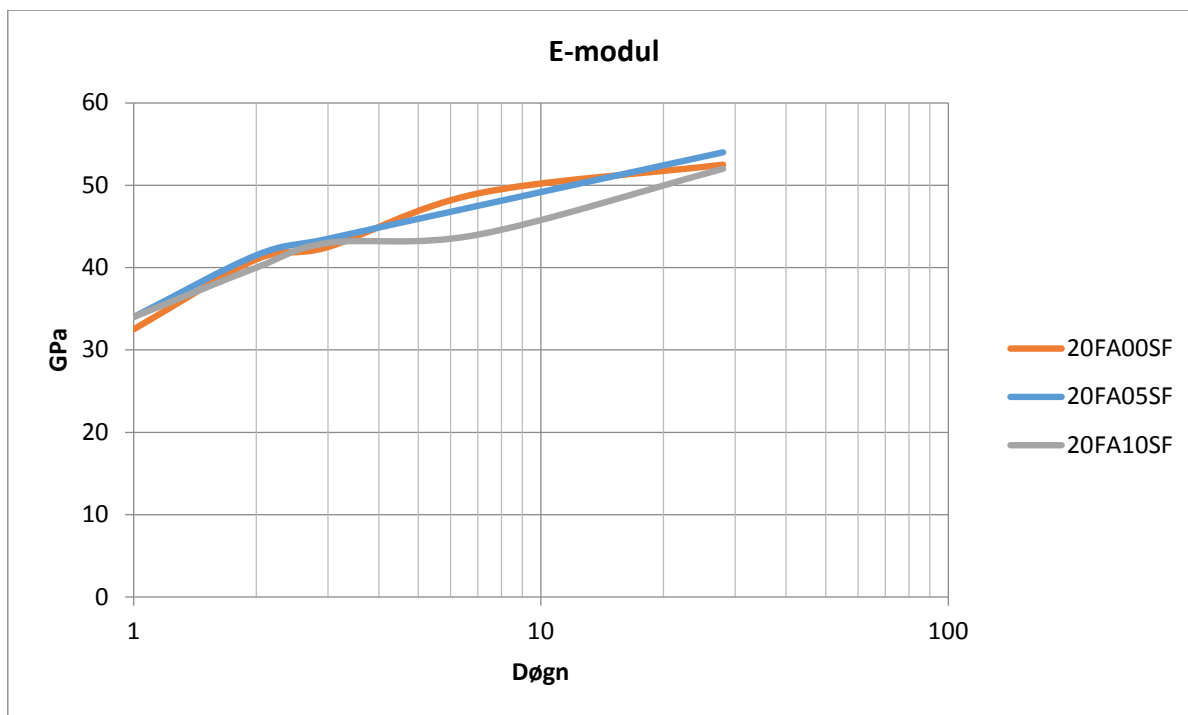
Tabell 6: Fasthetsutvikling 20% FA

Trykkfasthet (MPa)					
	1 døgn	2 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn
20FA00SF	34.2	66.8	84.6	105.5	117.9
20FA05SF	47.1	63.1	68.3	91.0	118.2
20FA10SF	42.3	62.0	68.5	89.7	117.7



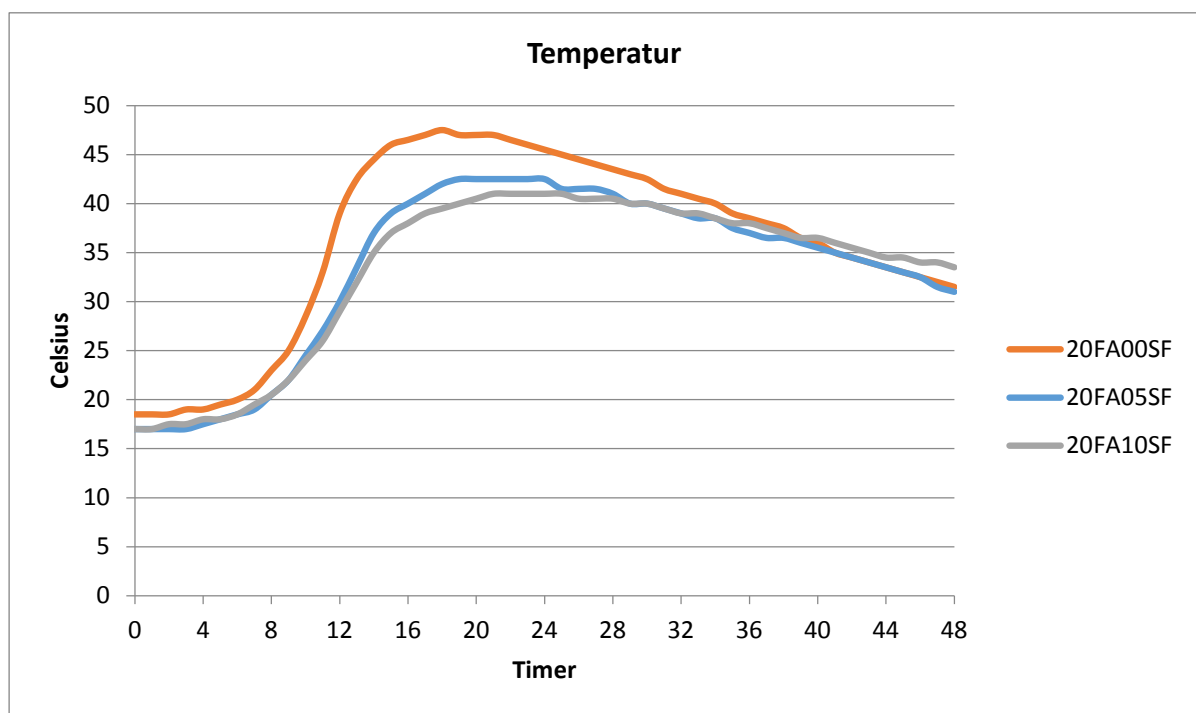
Tabell 7: Strekkutvikling 20% FA

<b>Strekfasthet (MPa)</b>					
	1 døgn	2 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn
20FA00SF	1.66	3.03	4.30	5.38	6.31
20FA05SF	2.17	3.75	3.95	5.09	5.36
20FA10SF	2.70	4.43	4.59	5.09	5.37



Tabell 8: E-modul 20% FA

E-modul (GPa)					
	1 døgn	2 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn
20FA00SF	32.5	41.0	42.5	49.0	52.5
20FA05SF	34.0	41.5	43.5	47.5	54.0
20FA10SF	34.0	40.0	43.0	44.0	52.0

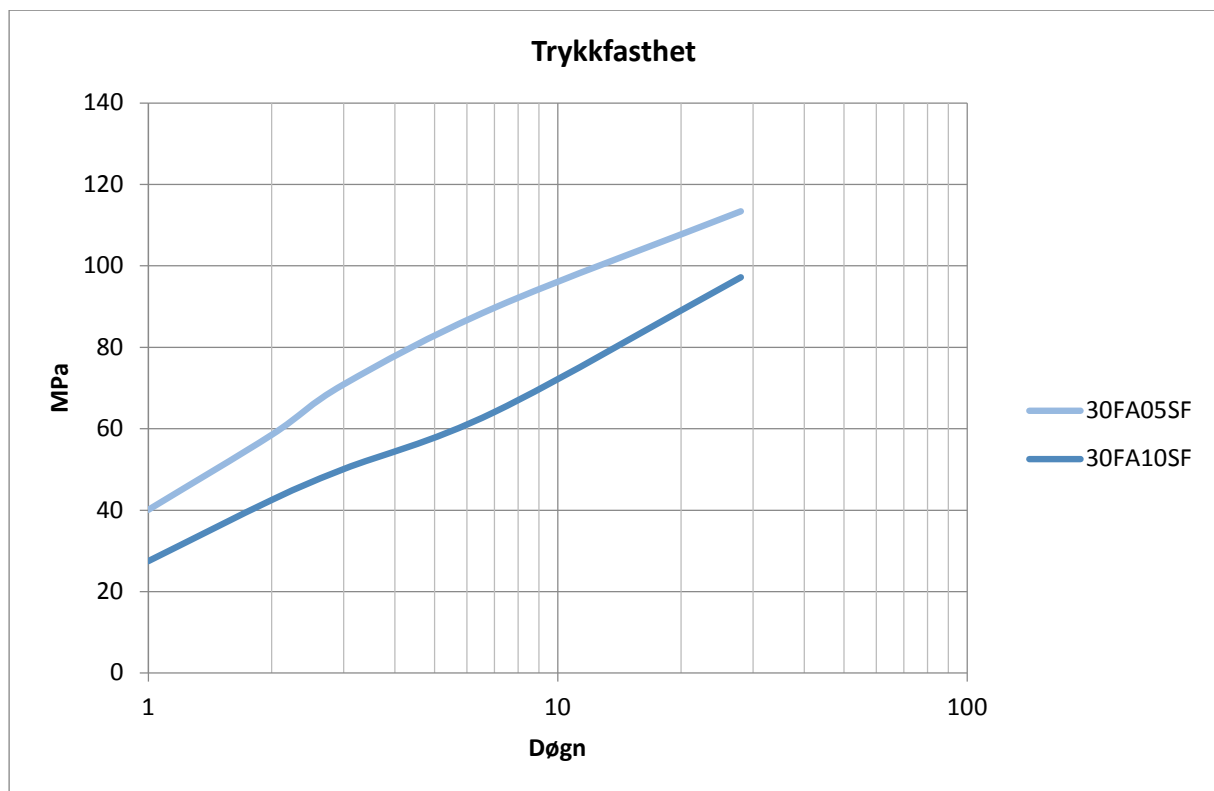


Figur 16: Temperaturutvikling 20% FA

### 3.3. 30% Flyveaske

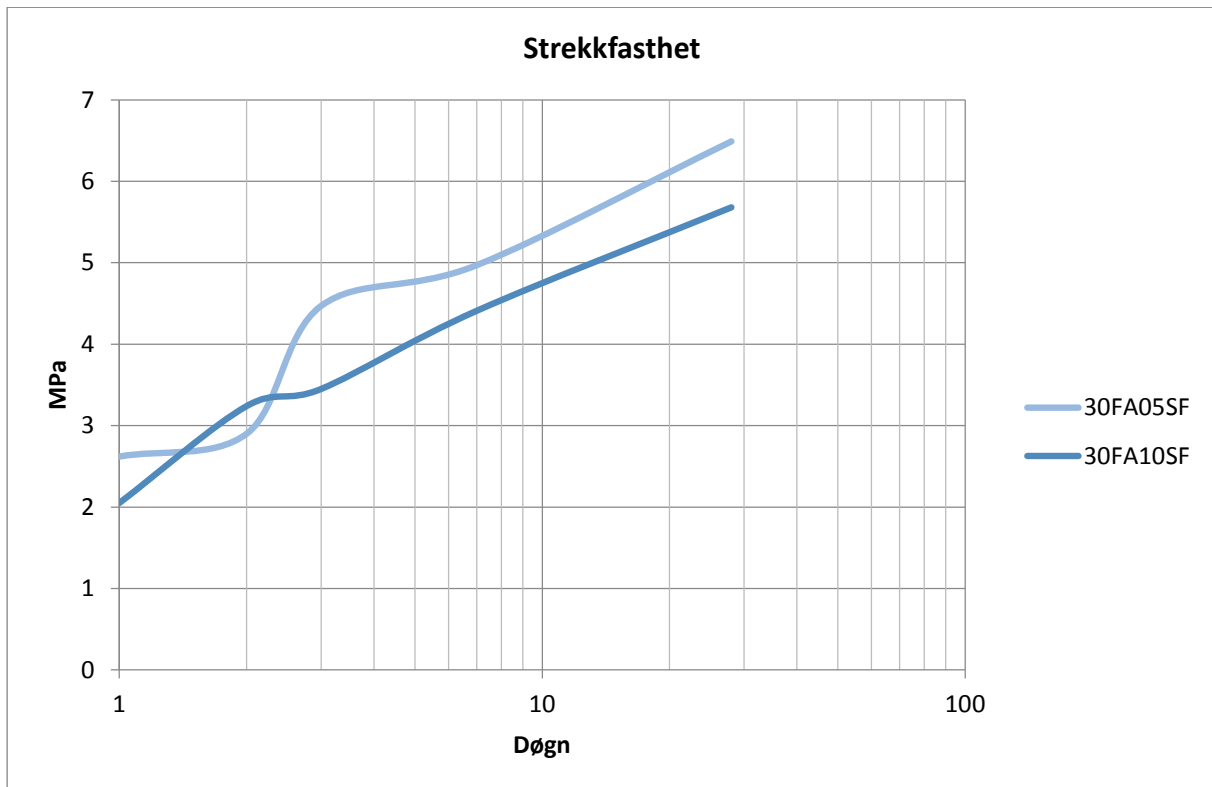
Tabell 9: Ferske egenskaper 30% FA

Ferske egenskaper			
	Luftinnhold (%)	Slump (mm)	Densitet ( $kg/m^3$ )
30FA05SF	1.5	220	2463.3
30FA10SF	1.7	190	2441.1



Tabell 10: Fasthetsutvikling 30%FA

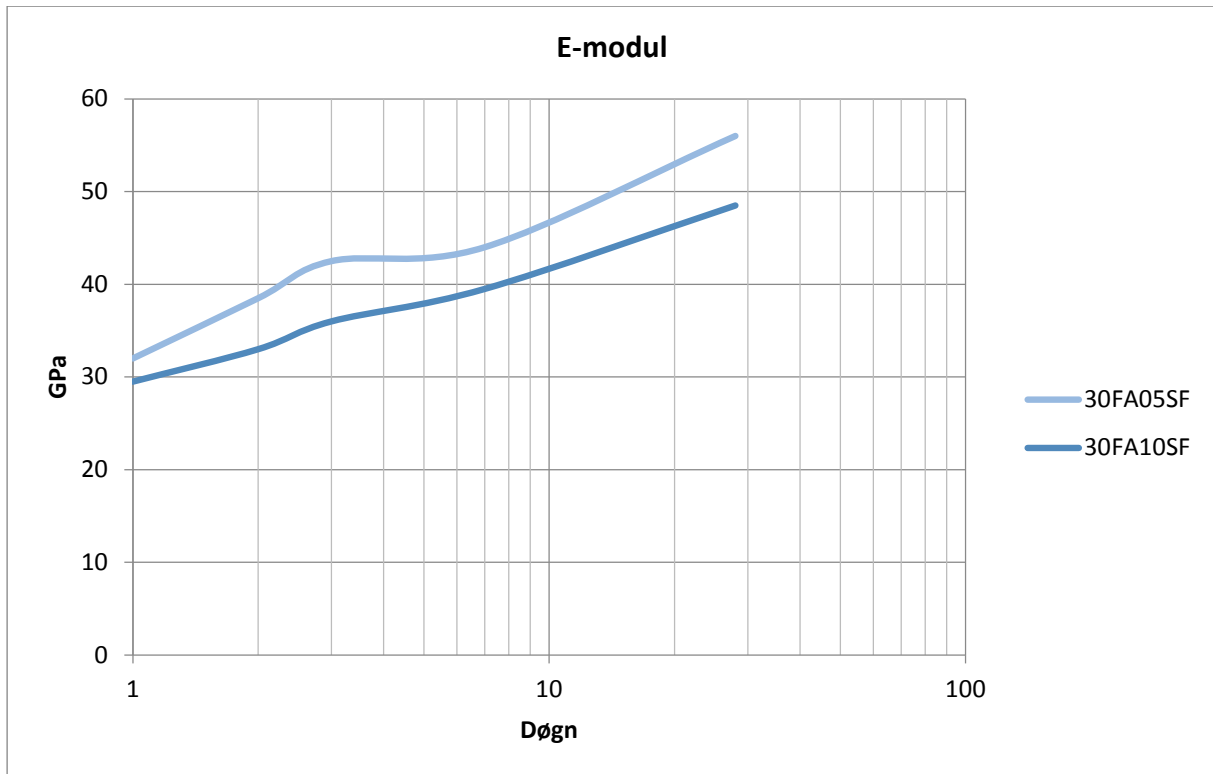
Trykkfasthet (MPa)					
	1 døgn	2 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn
30FA05SF	40.1	58.5	70.9	89.7	113.4
30FA10SF	27.5	42.5	50.1	64.1	97.2



Tabell 11: Strekkutvikling 30% FA

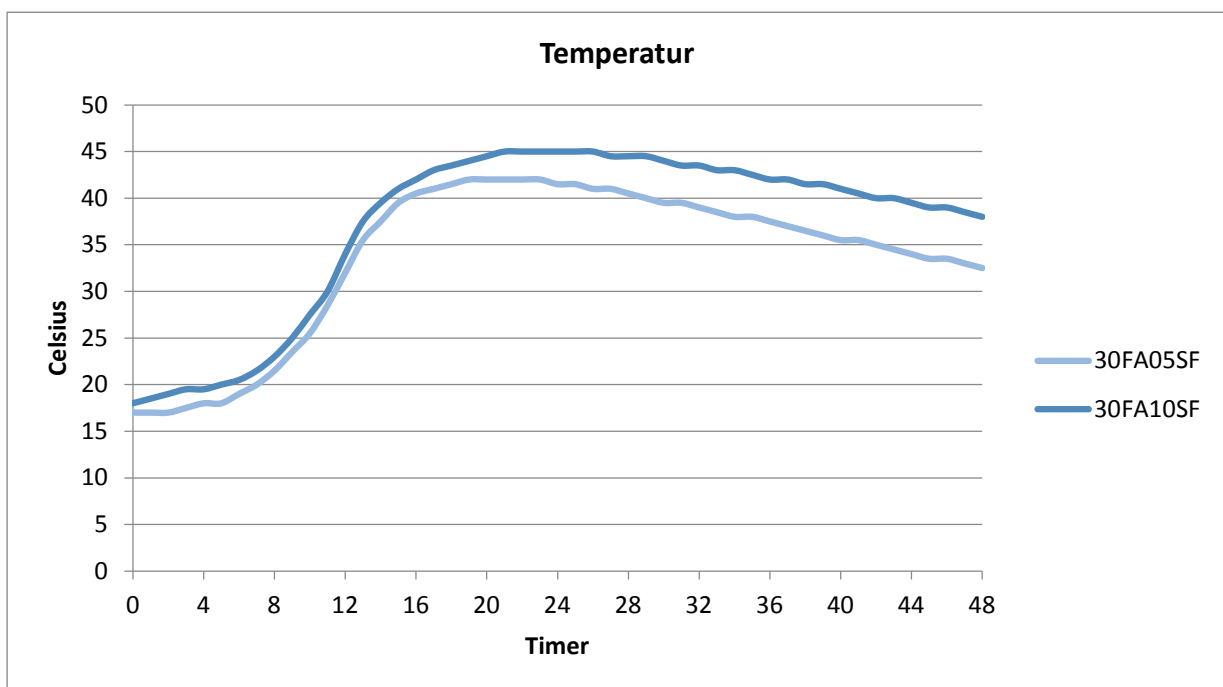
Strekfasthet (MPa)					
	1 døgn	2 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn
30FA05SF	2.62	2.90	4.47	4.97	6.49
30FA10SF	2.05	3.24	3.45	4.41	5.68





Tabell 12: E-modul 30% FA

E-modul (GPa)					
	1 døgn	2 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn
30FA05SF	32.0	38.5	42.5	44.0	56.0
30FA10SF	29.5	33.0	36.0	39.5	48.5

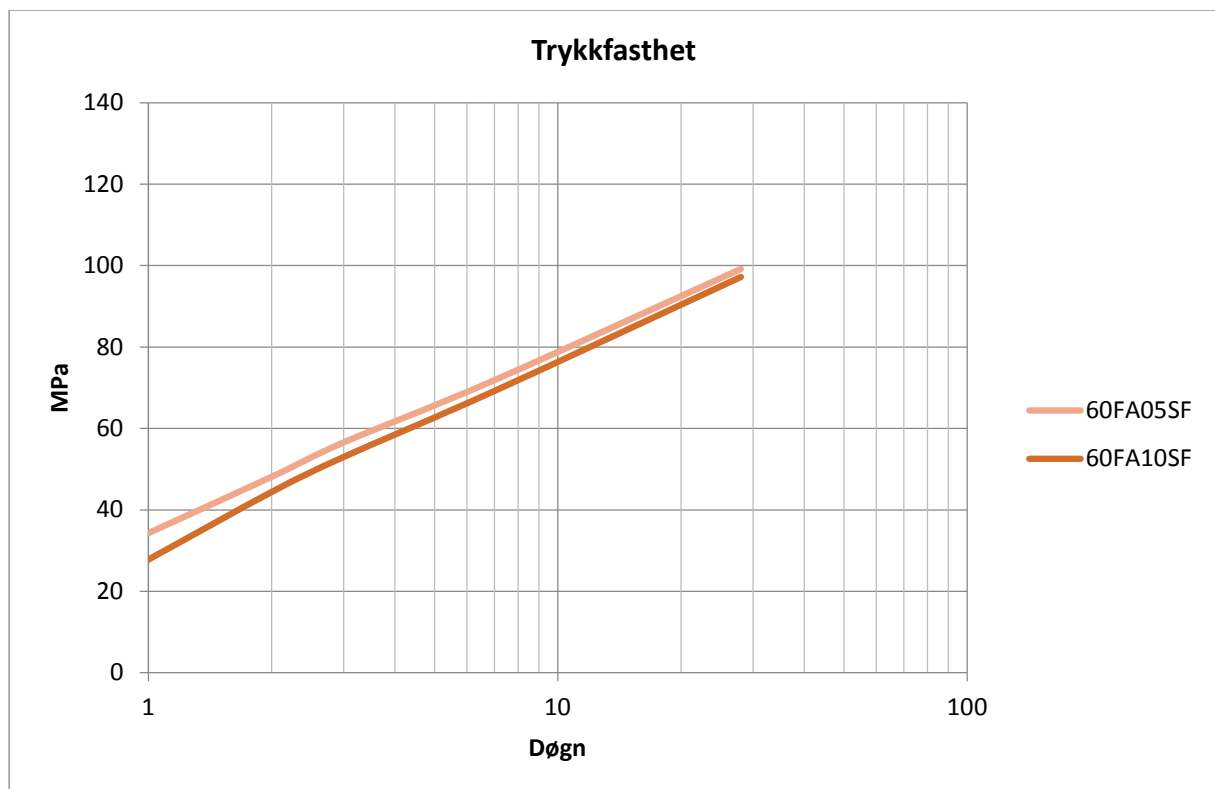


Figur 17: Temperaturutvikling 30% FA

### 3.4. 60% Flyveaske

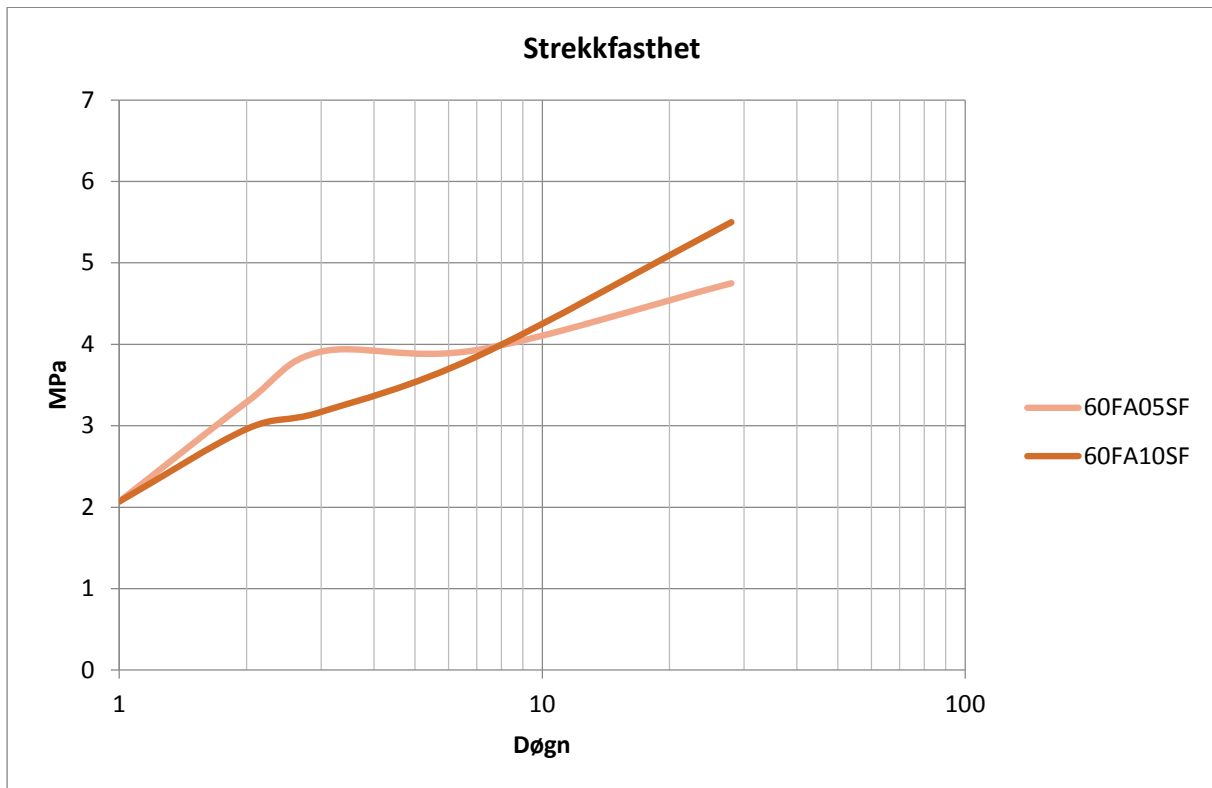
Tabell 13: Ferske egenskaper 60% FA

Ferske egenskaper			
	Luftinnhold (%)	Slump (mm)	Densitet ( $kg/m^3$ )
60FA05SF	1.1	160	2441.8
60FA10SF	0.8	180	2439.9



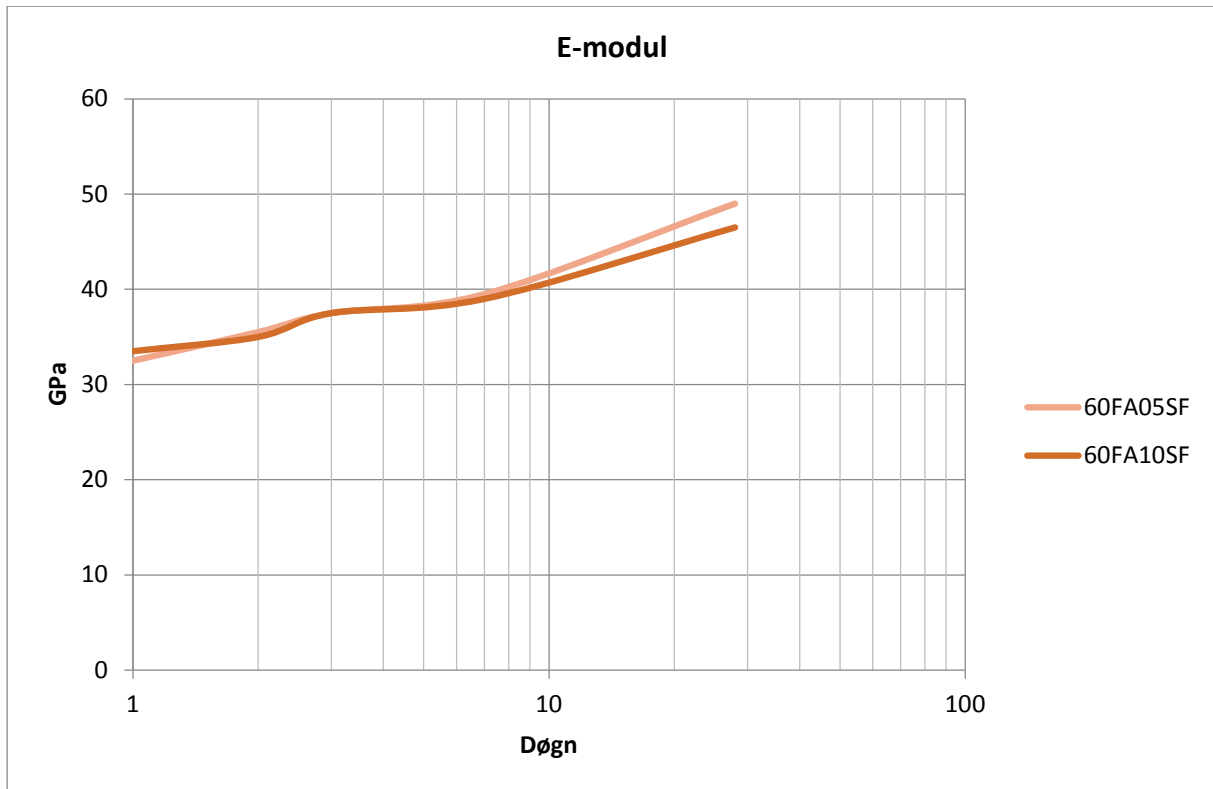
Tabell 14: Fasthetsutvikling 60% FA

Trykkfasthet (MPa)					
	1 døgn	2 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn
60FA05SF	34.3	48.1	56.6	71.9	99.2
60FA10SF	27.8	44.4	53.0	69.2	97.2



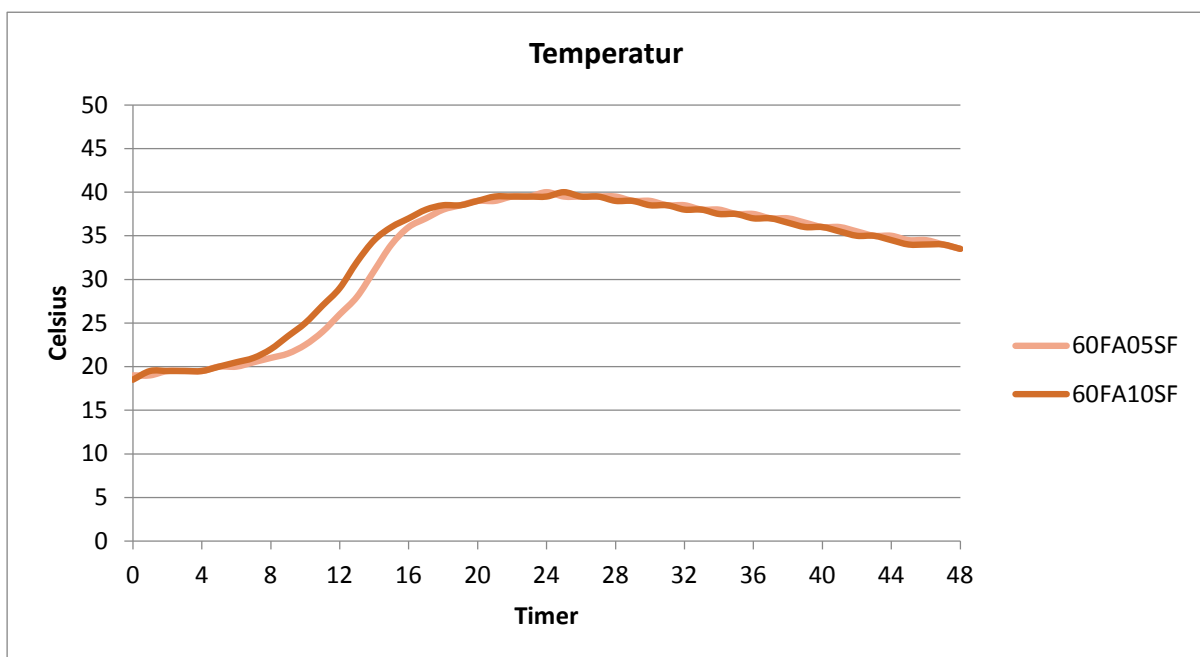
Tabell 15: Strekkutvikling 60% FA

<b>Strekfasthet (MPa)</b>					
	1 døgn	2 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn
60FA05SF	2.07	3.29	3.91	3.93	4.75
60FA10SF	2.07	2.96	3.17	3.85	5.50



Tabell 16: E-modul 60% FA

E-modul (GPa)					
	1 døgn	2 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn
60FA05SF	32.5	35.5	37.5	39.5	49.0
60FA10SF	33.5	35.0	37.5	39.0	46.5



Figur 18: Temperaturutvikling 60% FA

## 4. Beregninger

### 4.1. Innledning

En del av oppgaven var som sagt å utvikle et regneark. Regnearket skal koble resultatene fra laboratoriet med teori. Resultatene fra en resept blir brukt til å regne ut temperatur- og fasthetsegenskaper i en veggkonstruksjon. I dette kapitlet blir det gjort rede for hvordan regnearket er bygd opp og det blir gitt eksempler på teoretiske resultater. Gradienter og den adiabatisk temperaturutviklingen skal også beregnes ut ifra regnearket.

### 4.2. Egenskapsfunksjoner

Regnearket tar utgangspunkt i de danske egenskapsfunksjonene, som opererer med en del konstanter som må løses ved bruk av minste kvadraters metode for fastheten. For parameterne til temperatur finnes det allerede veldig mange gode regneark tilgjengelig. Til denne oppgaven er herdekasse av Sverre Smeplass benyttet. Resultatene er presentert under:

Tabell 17: Dansk egenskapsfunksjon for temperatur

Dansk egenskapsfunksjon (Temperatur)			
	$Q_{\infty}$	$\tau$	$\alpha$
<b>20FA00SF</b>	279	12.16	1.63
<b>20FA05SF</b>	262	13.18	1.71
<b>20FA10SF</b>	263	15.75	1.60
<b>30FA05SF</b>	287	17.30	1.54
<b>30FA10SF</b>	259	12.40	1.32
<b>60FA05SF</b>	219	16.24	1.51
<b>60FA10SF</b>	230	13.99	1.31

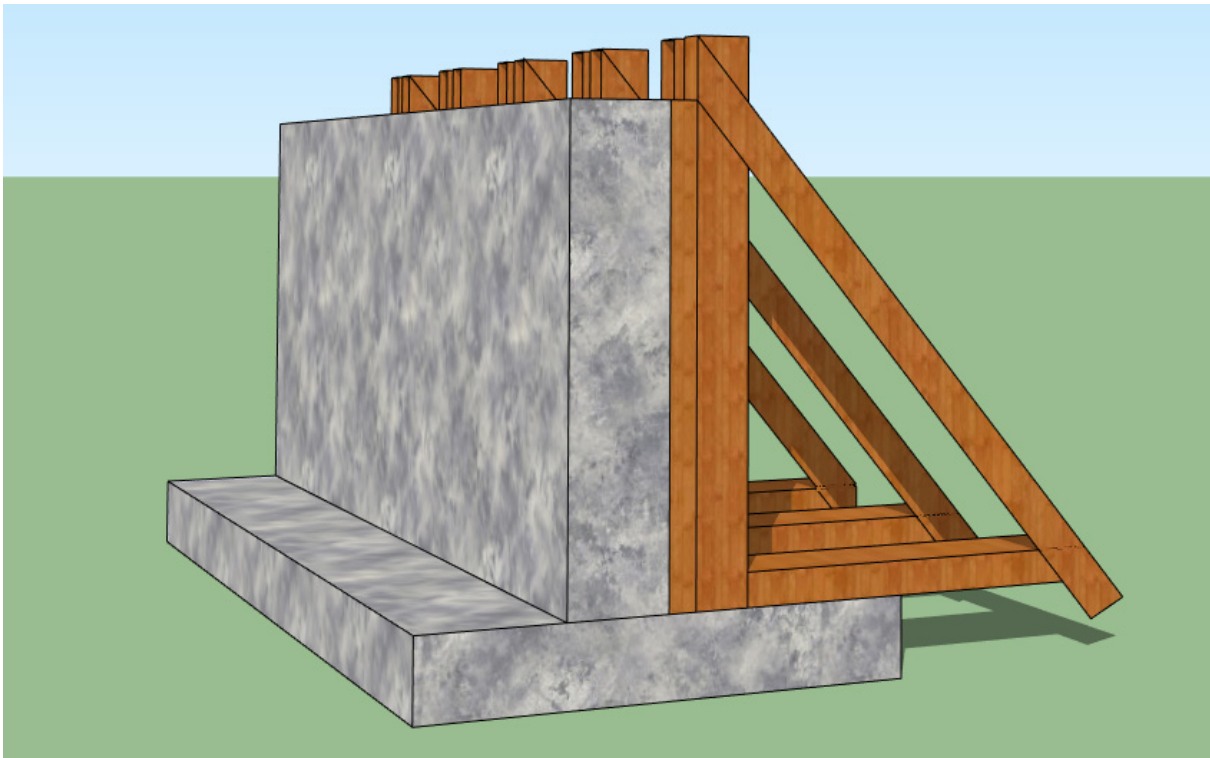
$Q_{\infty}$  er betongens totale varmeutvikling. Som tabellen (16) viser, synker denne med økende dosering flyveaske. Dette kan forklares med at når en større del av sementen erstattes med flyveaske, vil hydrasjonsprosessen gå saktere. Dette er fordi flyveasken øker aktiveringsenergien. Dette gir betongen en tregere temperaturøkning og en lavere maksimums temperatur. Den adiabatisk temperaturen vil også synke.

Tabell 18: Dansk egenskapsfunksjon for fasthet

<b>Dansk egenskapsfunksjon (Fasthet)</b>			
	$f_{c(\infty)}$	$\tau$	$\alpha$
<b>20FA00SF</b>	135.6	32.6	0.83
<b>20FA05SF</b>	135.9	30.0	0.55
<b>20FA10SF</b>	135.4	32.9	0.58
<b>30FA05SF</b>	130.4	32.4	0.62
<b>30FA10SF</b>	111.8	47.0	0.59
<b>60FA05SF</b>	114.1	36.5	0.57
<b>60FA10SF</b>	111.8	43.2	0.62

Dansk egenskapsfunksjon for fasthet er beregnet ut ifra regnearket.  $f_{c(\infty)}$  er betongens absolute slutfasthet. Siden 28 dagers fastheten kun er tilgjengelig, og flyveasken i betong herder etter 28 døgn, blir det lagt til 15% på 28-dagers fastheten som en antagelse av  $f_{c(\infty)}$ .  $\tau$  og  $\alpha$  blir deretter bestemt ved hjelp av kurvetilpasning.

### 4.3. Regneark



Figur 19: Illustrasjon regneark vegg

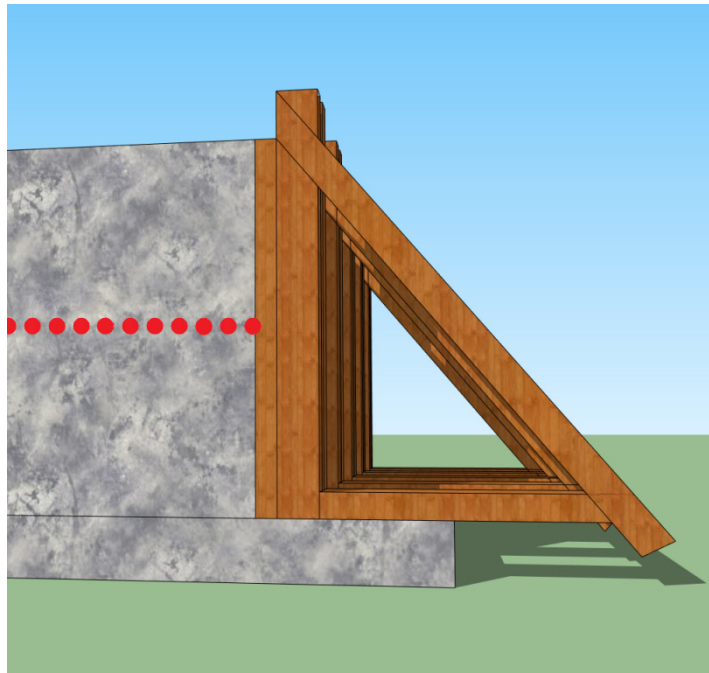
I dette kapitlet blir alle sidene regnearket gjort rede for. Det blir gjennomført eksempelberegninger som illustrerer oppbyggingen. Regnearket er laget i Microsoft Excel.

Regnearket består av totalt 9 sider:

- **Input** (Inngangsverdier)
- **Modenhet** (Modenhetsberegninger)
- **Aktiveringsenergi** (Beregner aktiveringsenergi)
- **Varmeutvikling** (Beregner varmeutvikling)
- **Varmetap** (Beregner varmetapet til omgivelsene)
- **Temperatur** (Beregner betongens temperaturutvikling)
- **Kurvtilpasning** (Bruker minste kvadraters metode til å finne  $f_{c\infty}$ ,  $\tau$  og  $\alpha$ )
- **Fasthet** (Fasthetsberegninger)
- **Graf** (Illustrasjon av utviklingen over 75 klokke timer)

Hovedformålet med regnearket er å avdekke temperaturgradienter og fasthetsforskjeller innad i en veggkonstruksjon. Regnearket vil være til størst hjelp på tykke veggkonstruksjoner, der en får de største gradientene og den mest ulike fasthetsutviklingen. Her vil altså resultatene bli mest tydelig.

Veggen antas uendelig lang og uendelig høy. Det er kun bredden som kan justeres i regnearket. Siden tverrsnittet er symmetrisk er det bare nødvendig å regne halve veggen fra senter til ytterkant betong. Totalt er det 11 punkter. Distansen mellom punktene blir da:



Figur 20: Beregningspunktene i regnearket

$$d = \frac{b_{\text{vegg}}}{11} \cdot \frac{1}{2}$$

Beregningene gjøres med tidsintervaller på 10 minutter over 75 timer. I kapittel 1 er det beskrevet at teorien er mest presis under de 100 første modenhetstimene. Dette gjelder selvsagt også for dette regnearket. Resultatene blir presentert på grafer i klokketimer. Det er derfor en fordel å holde seg oppdatert på forholdet mellom modenhetstimer og klokketimer. Det kan enkelt gjøres på siden «Modenhet».

Prinsippet til regnearket er veldig enkelt. Modenhet gir den adiabatisk varmeutvikling, trekker man fra varmetapet får man temperaturutviklingen. Modenheten brukes også til å beregne fastheten.

Regnearket er også tilgjengelig på:

<http://tinyurl.com/betongvegg>



### 4.3.1. Inngangsverdier

Input eller inngangsverdier er den første siden på regnearket. Det er her prøveresultatene fra laboratoriet, tykkelse på vegg og forskalingens egenskaper skal fylles inn. I dette eksempelet blir resultatene fra den første resepten brukt, 20FA00SF. Det er kun i de grønne kolonnene endringer skal gjøres. Andre celler er beregningsceller.

Tabell 19: Inngangsverdier for regneark

TEMPERATUR		
Utstøpningstemperatur	Celsius	15,00
Lufttemperatur	Celsius	10,00
$\tau$	Parameter	12,16
$\alpha$	Parameter	1,63
Q	Tot. varmeutv.	279,00
Bindemiddel	KG/M3	454,20
k betong	Varmeledn. Bet.	7,20
Cb	Varmekap. Bet.	1,10
k forskaling	Varmeledn. Forsk.	0,864
Veggtykkelse	meter	1,00
Forskalingstykkelse	meter	0,022
Denistet betong	KG/M3	2484

FASTHET		
timer	Døgn	Fasthet
24	1	34,2
48	2	66,8
72	3	84,6
168	7	105,5
672	28	117,9

**Utstøpningstemperatur** er temperaturen på betongen når den går i forskalingsformen. I dette eksempelet er utstøpningstemperaturen satt til 15 °C.

**Lufttemperatur** er omgivelsestemperaturen til vegg. For enkeheltens skyld er denne holdt konstant under herdingsforløpet og settes til 10 °C.

**$Q_{\infty}$ ,  $\tau$  og  $\alpha$**  er temperaturparametere fra den danske egenskapsfunksjonen.

**Bindemiddel** er kilogram bindemiddel per kubikkmeter betong.

**k-faktor betong** settes til 7,2 kJ/mh°C, som er gjennomsnittet til fersk og herdet fase [5].

Tallet brukes til å beregne betongs transmisjonstall K mellom punktene i betongen,

$$\text{i dette eksemplet blir det } \rightarrow K = k \cdot \left( \frac{2 \cdot 11}{b_{\text{vegg}}} \right) + \frac{k}{b_{\text{vegg}}} = 165.6 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$C_b$  er varmekapasiteten til betong. Det vil si den energien som trengs for å varme opp betongen. Dette er egentlig ikke en konstant, men varierer fra fersk til herdet tilstand. Faktoren har svært liten innflytelse på regnearket, den er derfor satt konstant til 1.1 kJ/kg°C [1].

**k-faktor forskaling** settes til 0,864 kJ/mh°C (standard kryssfiner) [5] og brukes til beregningen av transmisjonstallet K for forskalingen.  $\rightarrow K = \frac{k}{b_{forsk}} = 39.27 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$

**Veggykkelse** er en valgfri parameter, i dette eksemplet er tykkelsen satt til 1m.

**Forskalingstykkelse** er også en valgfri parameter. Her er den satt til 22 mm.

**Densitet** er den målte betongdensiteten fra laboratoriet, regnet om til kilogram per kubikkmeter.

**Fasthet.** I disse kolonnene fyller man inn fasthetsutviklingen, antall døgn og den tilhørende fastheten i MPa.

### 4.3.2. Temperaturberegninger regneark

I dette kapitlet dekkes de neste 5 sidene i regnearket; modenhet, aktiveringsenergi, varmeutvikling, varmetap og temperatur. Dette er rene beregningssider, så her skjer alt automatisk. Teorien er dekket i kapittel 1, så i dette kapitlet vises eksempelberegninger i et tilfeldig punkt ved en tilfeldig tid.

#### Modenhet

Det neste arket er modenhet. Her beregnes modenhet etter punkt og tid.

Tabell 20: Eksempel modenhet

MODENHET												
Timer	Senter	9/10	8/10	7/10	6/10	5/10	4/10	3/10	2/10	1/10	Ytterkant	
0,00	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
0,17	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
0,33	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,49
0,67	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,61
0,83	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,74	0,73
1,00	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,85

Det er den numeriske metoden for å beregne modenhet som benyttes i regnearket. Formelen (7)<sup>i</sup> er:

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

I punktet 6/10 etter en halvtime får vi følgende ligning:

$$M = 0,37 + \left( e^{\frac{40850}{8,314} \cdot \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{273+15} \right)} \right) \cdot \frac{1}{6} = 0,5 \text{ h}$$

<sup>i</sup> (7) referer til «formel 7»

## Aktiveringsenergi

På denne siden regnes aktiveringssetningen. Som nevnt tidligere beskriver aktiveringsenergien hvor mye energi som må til for å aktivere sementen ved en gitt temperatur. Aktiveringsenergien blir konstant over 20°C. Formelen (5) er gitt som:

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

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

I regnearket er standardverdiene,  $A=33500$  kJ/mol og  $B=1470$  kJ/mol°C benyttet. For å gjennomføre er det brukt en «hvis-setning<sup>i</sup>».

Tabell 21: Eksempel aktiveringsenergi

Aktiveringsenergi											
Timer	Senter	9/10	8/10	7/10	6/10	5/10	4/10	3/10	2/10	1/10	Ytterkant
0,00	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850
0,17	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850	41241
0,33	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40938	41523
0,50	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40870	41747
0,67	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40854	40906	41166	41934
0,83	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40851	40865	40952	41280	42095
1,00	40850	40850	40850	40850	40850	40850	40854	40881	41006	41389	42237

Som et eksempel ses det på punktet 7/10 etter 40 minutter får vi følgende ligning:

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

<sup>i</sup> Programmeringsspråk: Valg mellom flere alternativer, avhengig av hvilke betingelser som er oppfylt.

## Varmeutvikling

På dette arket regnes den totale adiabatisk varmeutviklingen som funksjon av modenhet. Varmeoverføringen skjer mellom punktene i vegg på et areal lik bredden ganget med høyden. Siden disse ikke er kjent ønsker vi å få ut svaret i  $\text{kJ}/\text{m}^2$ . Vi må derfor gange med bindemiddel innhold (C) og distansen mellom beregningspunktene, d. Formelen blir da (8):

$$Q(M) = Q_{\infty} \cdot e^{\left(-\frac{r_t}{M}\right)^{\alpha t}} \cdot d \cdot C$$

Tabell 22: Eksempel varmeutvikling

Varmeutvikling											
Timer	Senter	9/10	8/10	7/10	6/10	5/10	4/10	3/10	2/10	1/10	Ytterkant
5,00	8,79	8,79	8,77	8,73	8,64	8,44	8,07	7,40	6,31	4,76	2,92
5,17	12,21	12,20	12,17	12,11	11,98	11,70	11,18	10,27	8,80	6,71	4,20
5,33	16,52	16,51	16,47	16,38	16,20	15,82	15,12	13,89	11,95	9,20	5,88
5,50	21,85	21,83	21,78	21,66	21,41	20,90	19,97	18,38	15,87	12,32	8,02
5,67	28,32	28,29	28,22	28,06	27,72	27,06	25,87	23,83	20,64	16,17	10,71
5,83	36,04	36,01	35,91	35,69	35,25	34,41	32,89	30,34	26,37	20,81	14,01
6,00	45,13	45,08	44,95	44,67	44,10	43,04	41,15	37,99	33,14	26,35	18,01

Hvis vi tar utgangspunkt i punktet 8/10 etter 5 timer og 30 minutter, får vi følgende utregning:

$$Q(4,2363) = 279 \cdot e^{\left(-\frac{12,16}{4,2363}\right)^{1,63}} \cdot \left(\frac{1}{11} \cdot \frac{1}{2}\right) \cdot 454,2 = 21,78 \text{ kJ}/\text{m}^2$$

## Varmetap

Varmetapet regnes som varmeledning. Andre former for varmetap neglisjeres. I en veggkonstruksjon med forskaling på alle sider og plast på toppen er dette en grei antagelse.

Det er også med i beregningen at forskalingen ikke blir revet i løpet av de første 3 døgnene, som også er en grei antagelse når man støper høyfast betong, siden tidlig rivning av forskaling ville gi ekstra høye og uønskede temperaturgradienter i veggen.

Varmetapet skjer imot samme kontaktflate som varmeutviklingen. Derfor får varmetapet også samme benevnning som varmeutviklingen,  $\text{kJ/m}^2$ . Utrykket baserer seg på en endimensjonal betraktning av varmeledningsloven (10):

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

Tabell 23: Eksempel varmetap

Timer	Senter	Varmetap										Ytterkant
		9/10	8/10	7/10	6/10	5/10	4/10	3/10	2/10	1/10		
30,00	685,62	1407,90	2204,38	3114,22	4178,71	5441,32	6947,18	8741,47	10866,40	13355,87	16226,33	
30,17	694,65	1426,23	2232,53	3152,95	4228,94	5504,11	7023,59	8832,54	10973,04	13478,80	16366,07	
30,33	703,73	1444,66	2260,83	3191,85	4279,36	5567,05	7100,12	8923,66	11079,62	13601,53	16505,43	
30,50	712,86	1463,19	2289,27	3230,92	4329,94	5630,15	7176,76	9014,81	11186,13	13724,04	16644,40	
30,67	722,05	1481,82	2317,84	3270,14	4380,69	5693,40	7253,51	9106,00	11292,57	13846,35	16783,00	
30,83	731,28	1500,54	2346,54	3309,52	4431,60	5756,80	7330,37	9197,23	11398,93	13968,44	16921,21	
31,00	740,57	1519,36	2375,38	3349,06	4482,68	5820,34	7407,32	9288,47	11505,21	14090,31	17059,03	

Som eksempel fra varmetap ser vi på punkt 9/10 etter 30 timer og 30 minutter. Vi får da følgende beregning:

$$Q = 165,6 \cdot (52,6 - 51,9) \cdot \frac{1}{6} + 1444,66 = 1463,98 \text{ kJ/m}^2$$

Eksemplet avviker med noen desimaler, dette er fordi regnearket operer med x-antall desimaler mer.

Ved punktet ytterkant betong regnes temperatur mot lufttemperatur og K-verdien til forskalingen benyttes.

## Temperaturutvikling

Dette er det siste arket som tar for seg temperaturberegninger. På denne siden får man også full oversikt over alle temperaturgradientene til enhver tid. Formelen er [13]:

$$\theta = \theta_{\text{utstøping}} + \frac{Q_{\text{varme}} - Q_{\text{tap}}}{C_b \cdot \rho \cdot d}$$

Som en ekstra kontroll regner en først benevning for å sjekke at svaret kommer ut i celsius.

$$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{kg} \cdot \text{°C}}{\text{kJ}} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot \frac{1}{\text{m}} = \text{°C} \rightarrow \underline{\text{ok!}}$$

Tabell 24: Eksempel temperaturutvikling

Timer	Senter	Temperatur										Ytterkant
		9/10	8/10	7/10	6/10	5/10	4/10	3/10	2/10	1/10		
7,00	15,9	15,9	15,8	15,8	15,7	15,5	15,2	14,9	14,4	14,4	13,8	13,2
7,17	16,0	16,0	16,0	15,9	15,8	15,6	15,4	15,0	14,5	14,5	13,9	13,2
7,33	16,2	16,2	16,1	16,1	15,9	15,8	15,5	15,1	14,6	14,6	14,0	13,3
7,50	16,4	16,4	16,3	16,2	16,1	15,9	15,6	15,2	14,7	14,7	14,1	13,4
7,67	16,6	16,6	16,5	16,4	16,3	16,1	15,8	15,4	14,9	14,9	14,2	13,5
7,83	16,8	16,8	16,7	16,6	16,5	16,3	16,0	15,5	15,0	15,0	14,3	13,6
8,00	17,0	17,0	16,9	16,8	16,7	16,5	16,1	15,7	15,2	15,2	14,5	13,7

Som eksempel ser vi på senter av veggen etter 8 timer. Utregningen blir:

$$\theta = 15 + \frac{257,83 - 8,02}{1,1 \cdot 2484 \cdot \left(\frac{1}{11} \cdot \frac{1}{2}\right)} = 17,0 \text{ °C}$$

## 4.3.3. Fasthetsberegninger regneark

Fasthetsberegningene skjer på to ark, kurvetilpasning og fasthet. Som diskutert tidligere er fasthetsberegningene gitt som en funksjon av modenhet med 3 kurveparametere,  $f_{\infty}$ ,  $\tau$  og  $\alpha$ . I likhet med temperatur er kurveparameterne konstante for hver enkelt resept.

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

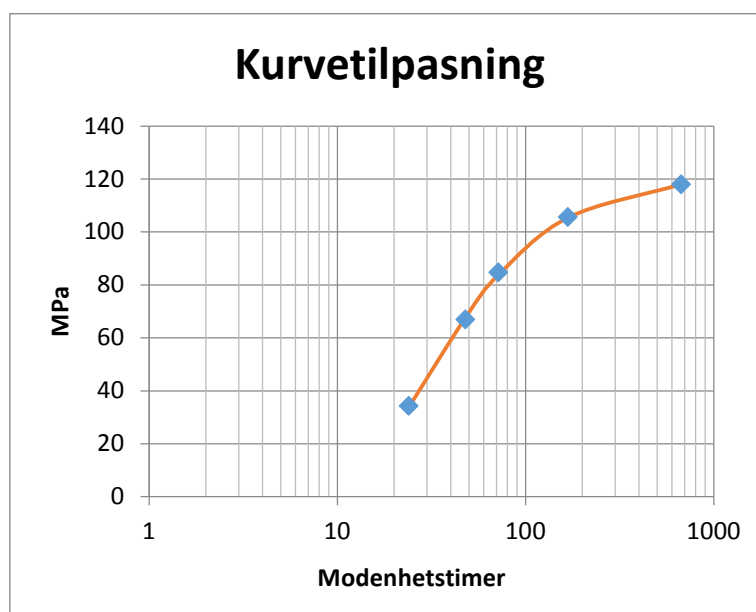
På rad en (X) i tabellen (25) er modenhetstimer ved testing. På rad to (Y) er tilhørende trykkresultater. Rad nummer tre består av de teoretiske utregnede verdiene. Rad fire er differansen mellom målt og teoretisk verdi, kvadrert.

Tabell 25: Eksempel kurvetilpasning

X	Y	yhat	(y-yhat)^2		
24	34,2	37,4067163	10,2830295	f	135,6
48	66,8	65,6949868	1,22105425	$\tau$	32,5532955
72	84,6	80,8020381	14,4245144	$\alpha$	0,82964165
168	105,5	104,933409	0,32102528		
672	117,9	125,018748	50,6765677	ss	76,926191

Cellen **ss** er summen av hele rad 4. Det vil si at alle avvikene blir summert. Man ønsker å ha denne verdien så nærme null som mulig, men noe avvik vil forekomme.

Regnearket kjører derfor x-antall simuleringer hvor det justeres på  $\tau$  og  $\alpha$  for å få et minst mulig avvik. Resultatet er en funksjon av modenhet som skal brukes til å beregne fastheten i alle punkt i vegg.



Figur 21: Illustrasjon kurvetilpasning



Når kurveparameterne er kjent skjer fasthetsberegninger på samme måte som på de andre sidene.

Tabell 26: Eksempel fasthetsberegning

Timer	Senter	Fasthet									
		9/10	8/10	7/10	6/10	5/10	4/10	3/10	2/10	1/10	Ytterkant
10,00	1,57	1,57	1,56	1,53	1,50	1,44	1,36	1,25	1,09	0,90	0,68
10,17	1,74	1,74	1,72	1,70	1,66	1,60	1,51	1,38	1,21	1,00	0,76
10,33	1,93	1,92	1,91	1,88	1,83	1,77	1,67	1,53	1,34	1,11	0,85
10,50	2,13	2,12	2,10	2,07	2,02	1,95	1,84	1,68	1,48	1,23	0,94
10,67	2,34	2,33	2,31	2,28	2,22	2,14	2,02	1,85	1,63	1,36	1,04
10,83	2,57	2,56	2,54	2,50	2,44	2,35	2,22	2,03	1,79	1,50	1,15
11,00	2,82	2,81	2,78	2,74	2,67	2,57	2,43	2,23	1,97	1,64	1,27

Som eksempel for fasthet ser vi på senterpunktet etter 10 timer og 30 minutter, vi får da følgende ligning:

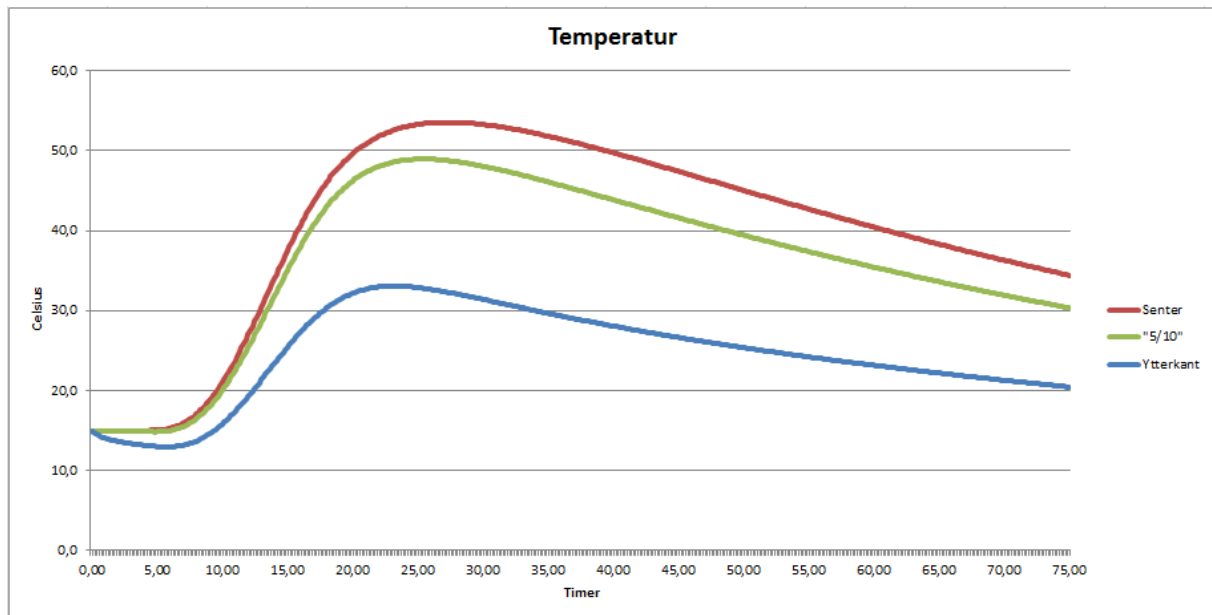
$$f_c(M) = f_\infty \cdot e^{\left(-\left(\frac{\tau}{M}\right)^\alpha\right)} \rightarrow f_c(8,61) = 121,66 \cdot e^{\left(-\left(\frac{29,85}{8,61}\right)^{1,12}\right)} = 2,17 \text{ MPa}$$

Svaret avviker litt her også av samme grunn, mindre desimaler enn hva regnearket benytter.

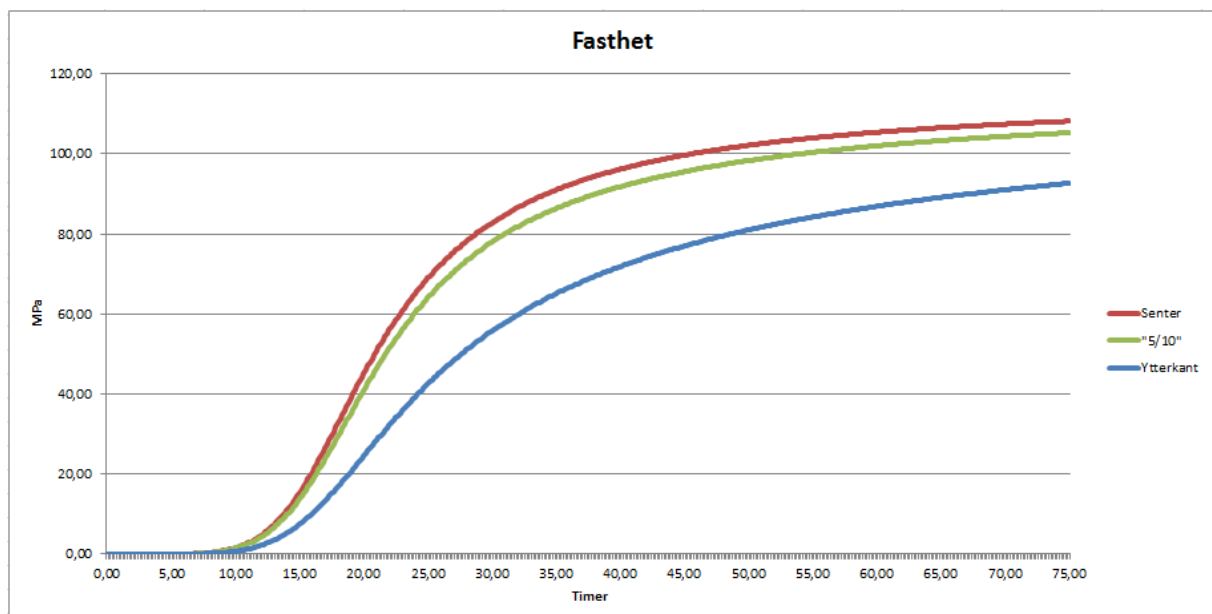
#### 4.3.4. Grafisk fremstilling

Beregningsidene blir fort veldig lite oversiktlige. Siste side inneholder derfor en grafisk fremstilling av resultatene etter klokketimer.

Kort oppsummert ser vi teoretisk temperatur og fasthetsutviklingen til blanding 20FA00SF brukt i en 1 meter tykk vegg, kledd med tradisjonell forskaling.



Figur 22: Illustrasjon av beregnet temperaturutvikling



Figur 23: Illustrasjon av beregnet fasthetsutvikling

#### 4.4. Temperatur gradienter

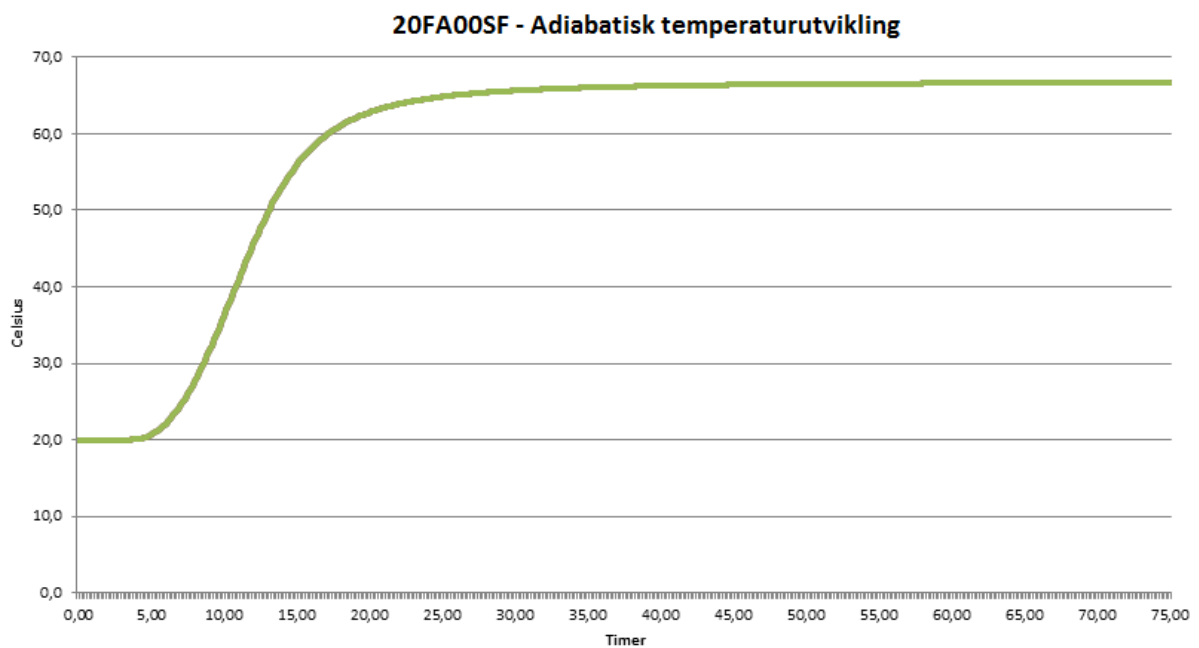
Fra regnearket kan vi hente ut temperaturgradienter. Under er blandingene med minst og mest sement satt opp. Resultatet viser tydelig at blandingen med mest pozzolaner har de minste temperaturgradientene.

Tabell 27: Eksempel beregnede temperaturgradienter

Temperatur gradienter (Beregnet)			
Resept:	Senter:	Ytterkant:	$\Delta T$ :
<b>20FA00SF</b>	52.5 °C	30.2 °C	22.3 °C
<b>60FA10SF</b>	42.4 °C	25.2 °C	17.2 °C

#### 4.5. Adiabatisk temperaturutvikling

Fra regnearket henter vi også enkelt ut den beregnede adiabatisk temperaturutviklingen til 20FA00SF:



Figur 24: Beregnet adiabatisk temperaturutvikling

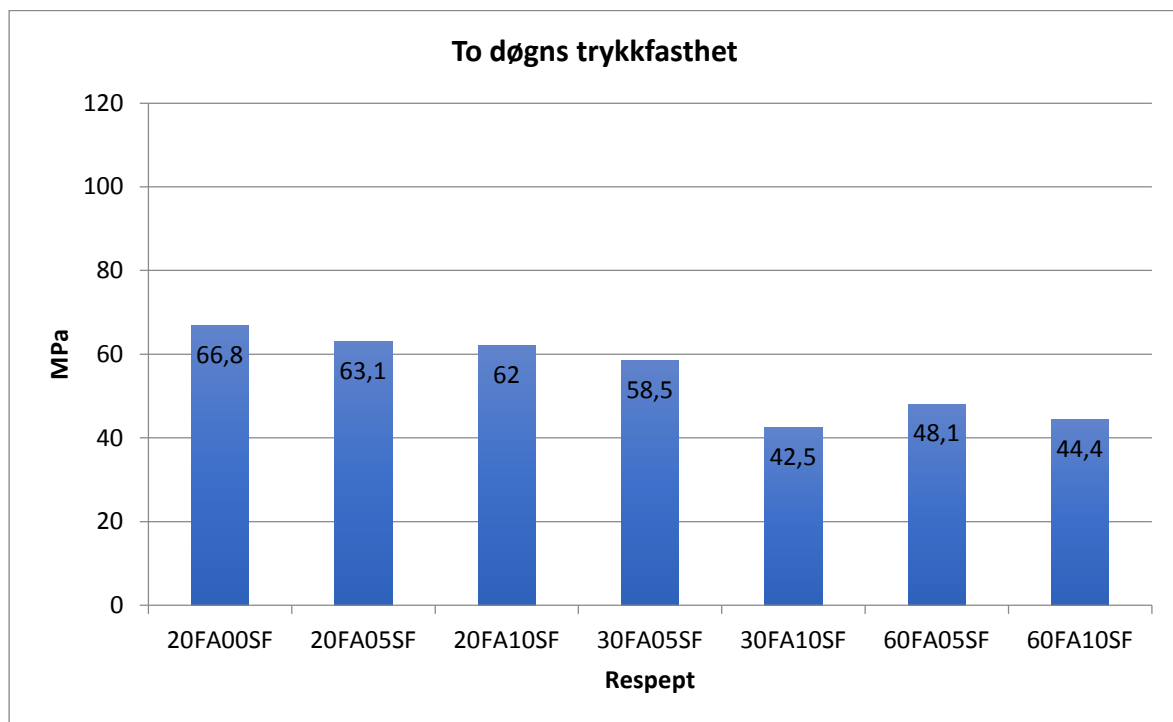
## 5. Diskusjon

### 5.1. Innledning

Resultatene drøftes i dette kapitlet. Dette gjøres ved å trekke ut eksemplet fra tidlig utviklingen og 28-døgn resultatene.

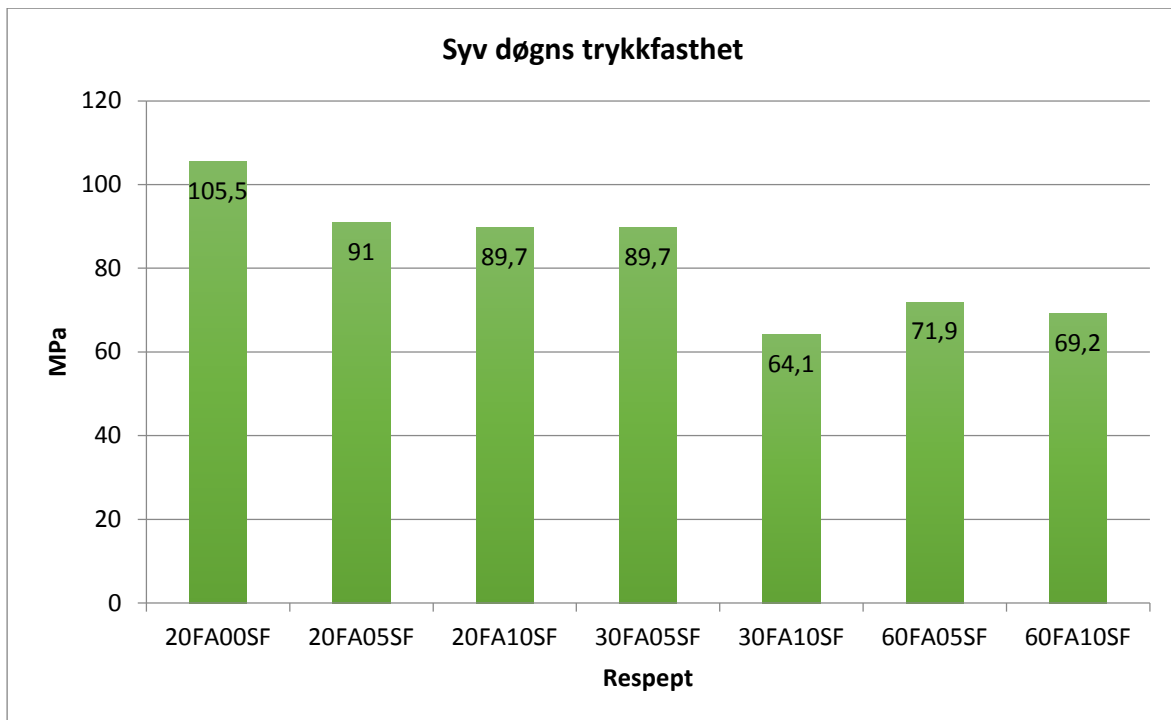
Det ble ikke satt noen krav til resultatene i forkant av testing, men det var forventet at tidlig trykk, strekk og e-modul verdiene ville synke ved økt dosering av pozzolaner. Det forventes også at alle 28-døgn prøvene med trykkfasthet er like.

### 5.2. Trykkresultater



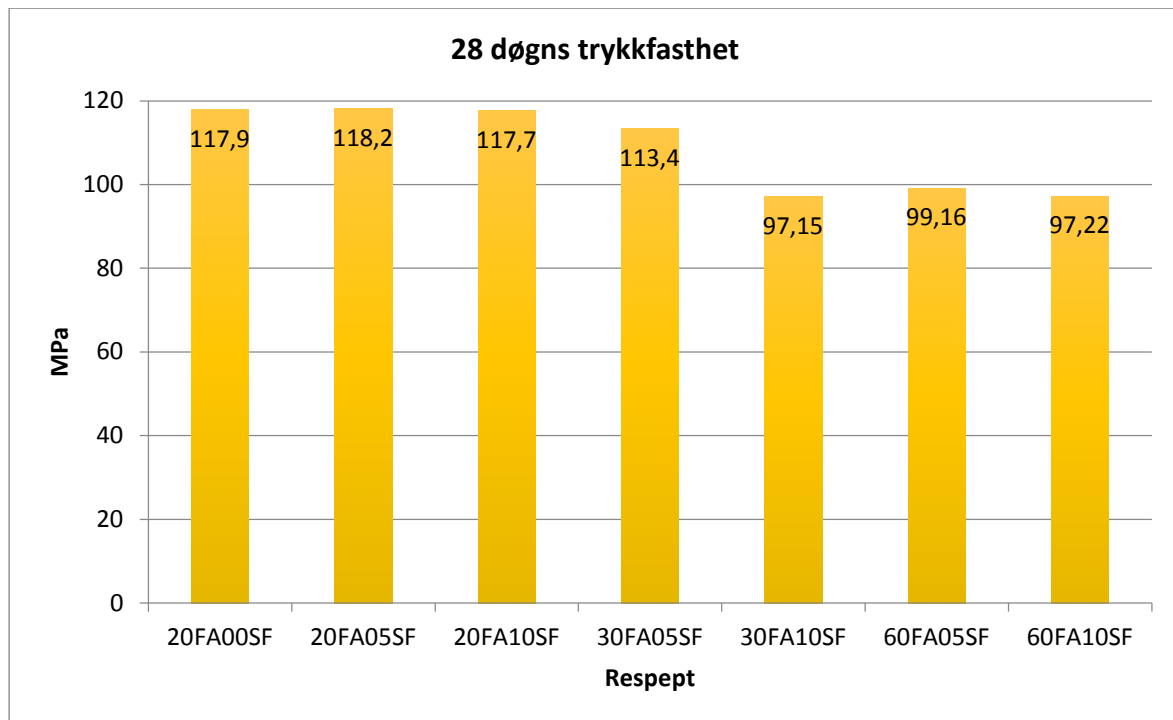
Figur 25: To døgn trykkfasthet

Allerede etter døgn 2 er det en marginal forskjell i tidlig fasthetsutviklingen. Tidligfastheten blir redusert med økende mengde flyveaske. Det registreres også at det er en forskjell i tidligfastheten når det gjelder silikastøv. Høyere dosering silikastøv gir enda lavere tidligfasthet. Ser vi bort ifra resepten 30FA10SF, er 60FA10SF resepten med minst sement og den laveste fastheten etter 48 timer. Resultatene stemmer godt overens med teorien, siden pozzolanene reagerer med sementens hydrasjonsprodukter og danner samme reaksjonsprodukt som sement og vann, C-S-H.



Figur 26: Syv døgns trykkfasthet

Resultatene viser at den samme utviklingen fortsetter etter syv døgn. Reseptene med mer flyveaske har lavere trykkfasthet etter syv døgn. Forskjellene i trykkfastheten fra døgn 2 når det gjelder silikastøv er fortsatt tilstede og lavere ved høyere dosering silikastøv. Resultatene indikerer at sementen ikke har produsert nok kalsiumhydroksid til pozzolanene, siden trykkfastheten er synkende med økt mengde pozzolaner.



Figur 27: 28 døgns trykkfasthet

Alle blandingene oppnådde rundt 100 MPa i fasthet, så alle reseptene kan kalles høyfast betong.

28 døgns trykkfasthet er ikke like. De avviker på det meste med over 20 MPa. Det er mange faktorer som innvirker, men den tydeligste ut i fra resultatene er k-faktoren til flyveaske. Når det gjelder flyveasken ser vi at avvikene øker proporsjonalt med økningen av FA. Det ser derfor ut til at standardens antagelse om aktivitetsfaktoren til flyveaske på 0,4, i dette tilfellet ikke er god nok når det gjelder 28 dagers fastheten. Aktivitetsfaktoren skulle vært lavere for å oppnå en lik 28 dagers fasthet.

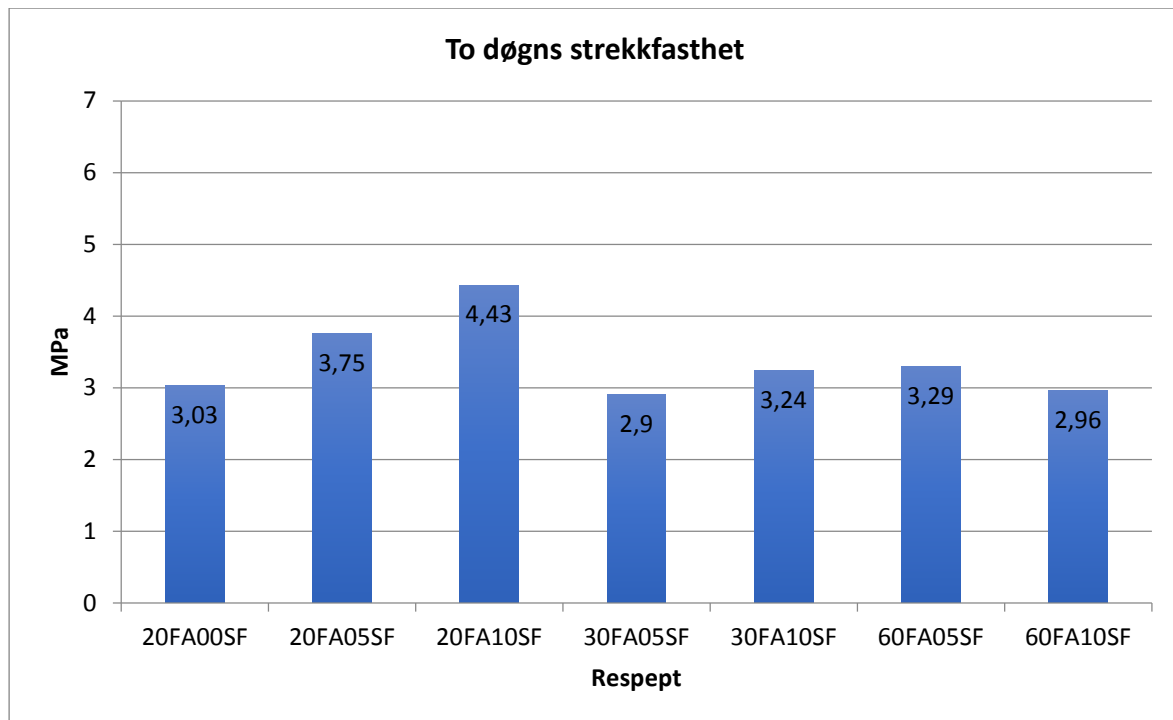
Fra blandingene med 20 prosent flyveaske innhold, ser vi at avvikene er minimale for ulik mengde silikastøv. Det kan derfor virke som standardens antagelse av aktivitetsfaktoren (k-faktor) er korrekt når det gjelder silikastøv.

Silikastøv reagerer raskere enn flyveaske på grunn av høyere finhet som gir raskere dannelse av C-S-H. Ettersom silikastøvet så å si er forventet ferdig reagert etter 28 døgner [4], vil flyveasken fortsette å reagere. Teoretisk vil man ved testing på senere tid se en utjevning av resultatene.

Noe av avvikene vil også skyldes kombinasjonen av innblandet flyveaske og tilsatt flyveaske. Flyveasken som er ferdigblandet med sementen er mer finmalt og reagerer derfor raskere enn flyveasken som ble tilsatt.

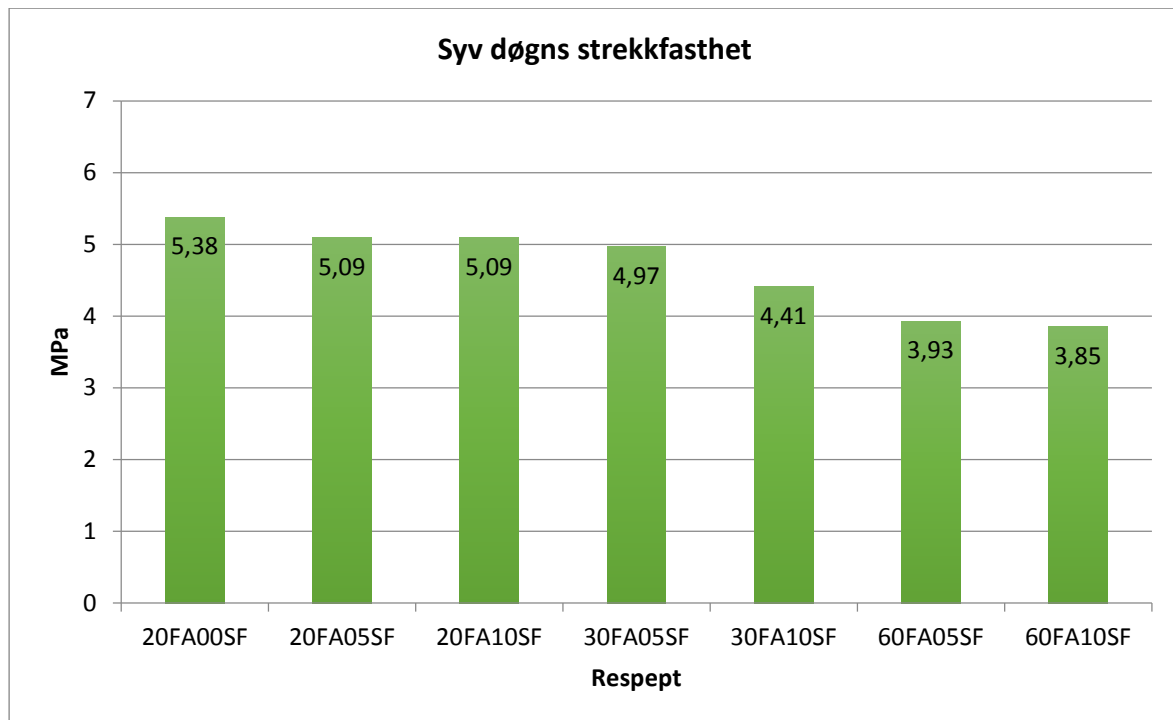
Luft og slump er normale verdier. En tommelfingerregel er at fastheten blir redusert med 5% for hver prosent ekstra luft [22]. Med luft i området 0,8-2 prosent og slump fra 160 til 230 mm, betyr det at alle blandingene har hatt god utflytning og et luftinnhold som har liten betydning for fastheten.

### 5.3. Strekkresultater



Figur 28: To døgns strekkfasthet

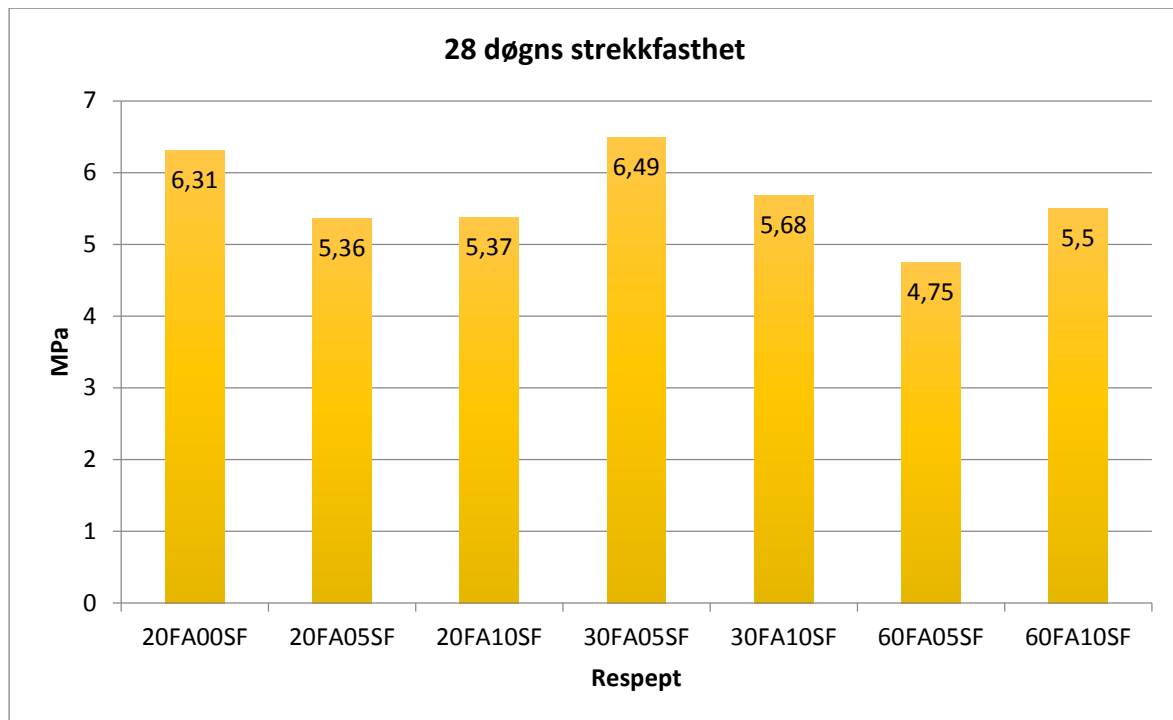
Når det gjelder strekkresultatet er observasjonene på blandingene med 20 prosent flyveaske mest interessante. Allerede etter to døgn ser vi at tidligstrekkfastheten øker proporsjonalt med økende mengde silikastøv. Det samme gjelder for reseptene med 30 prosent flyveaske, men med noe mer reduserte verdier. På reseptene med 60 prosent flyveaske ser vi en motsatt effekt ved økning av silika innhold, ded reduksjon av strekkfastheten på rundt 11 prosent fra 60FA10SF til 60FA05SF. Dette kan forklares med at disse blandingene har så lite sement at alt pozzolan innhold ikke får reagert.



Figur 29: Syv døgns strekkfasthet

Etter syv døgn ser vi at resultatene jevner seg mer ut. Her er det blandingen med mest sement som dominerer, 20FA00SF. Strekkfastheten minker med økende grad av flyveaske. Resultatene viser at silikastøvet ser ut til å ha liten eller ingen effekt etter syv døgn.





Figur 30: 28 døgns strekkfasthet

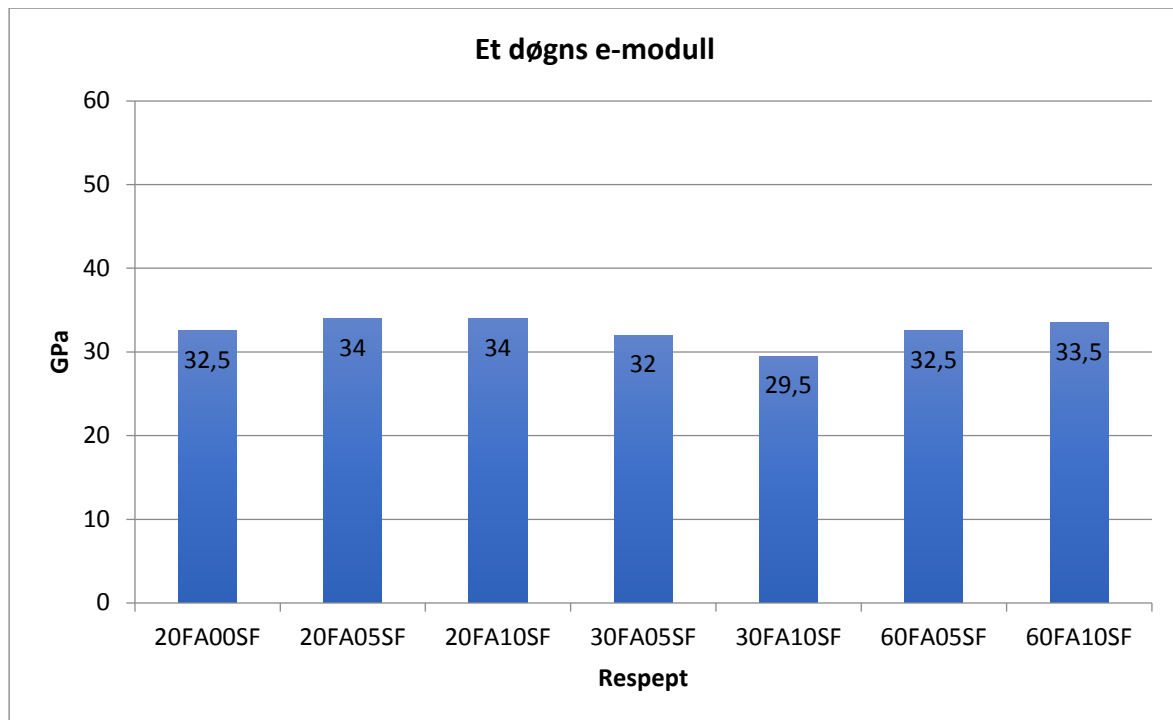
Strekkfastheten etter 28 dogn ligger som antatt på rundt fem prosent av trykkfastheten. Det er ikke noe system i reseptene, men dette er naturlig da aktivitetsfaktoren (k-faktoren) ble bestemt etter trykkfasthet.

Resultatene viser at det er blandingene med 30 prosent flyveaske som har den største strekkfastheten. 30FA05SF er hele 36 prosent sterkere enn den svakeste, 60FA05SF.

Flyveaske har en positiv økning fra 20 til 30 prosent, men minker litt når doseringen av FA økes til 60 prosent.

Økende mengde silikastøv ser ut til å ha en liten, men negativ effekt på 28-dagers strekkfastheten. Unntatt ved høy dosering av flyveaske (60 prosent). Der ser vi en økning på 15 prosent fra 60FA05SF til 60FA10SF.

## 5.4. E-modul resultater

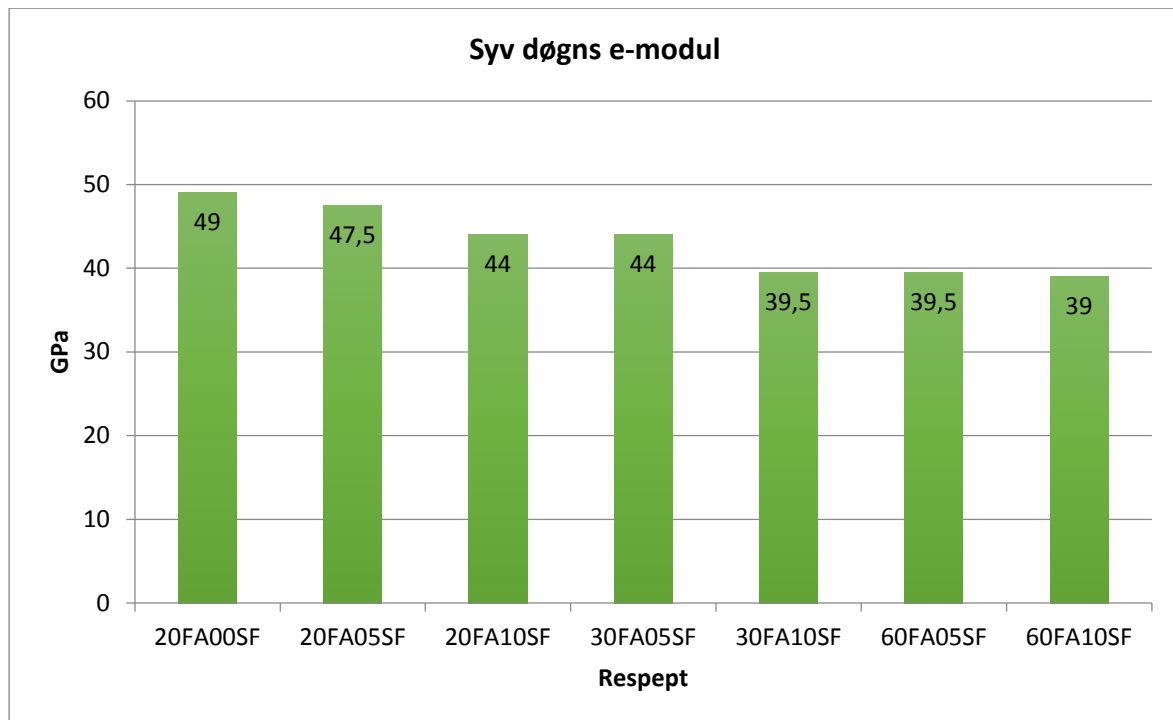


Figur 31: Et døgn e-modul

Som diskutert i teoridelen er e-modulen stort sett proporsjonal med trykkfastheten. Dette går også igjen i resultatene, forskjellene er marginale.

Etter et døgn ser vi fra grafen at silikastøv har en liten, men positiv effekt på betongens tidligutvikling av e-modulen. Det registreres også at blandingene med 60 prosent flyveaske holder en høy tidlig e-modul, til tross for en noe lavere tidlig trykkfasthet.

Resultatene viser at flyveasken ser ut til å redusere e-modulen noe, mens silikastøv gir en liten økning.

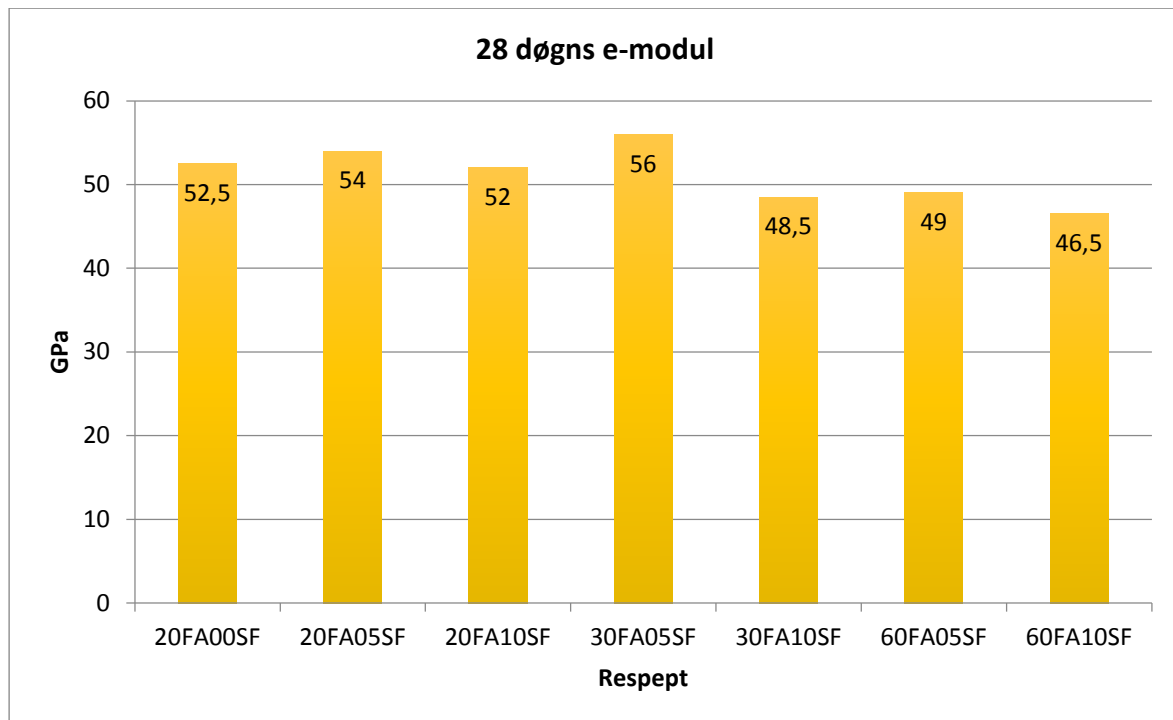


Figur 32: Syv døgns e-modul

Etter syv døgns testing ser vi også veldig tydelig at e-modulen er proporsjonal med trykkfastheten. Grafen er veldig lik som syv dagers testingen av trykkfastheten.

Både økende dosering av flyveaske og mikrosilika ser ut til å resultere i lavere e-modul. Det ser altså ut som at sement gir de beste egenskapene for e-modul, siden resepten 20FA00SF er dominerende etter syv døgn.

E-modul resultatene er noe høyere enn hva som er forventet. Spesielt på blandingene med 20 og 30% flyveaske innhold. Dette blir drøftet nærmere på neste side.



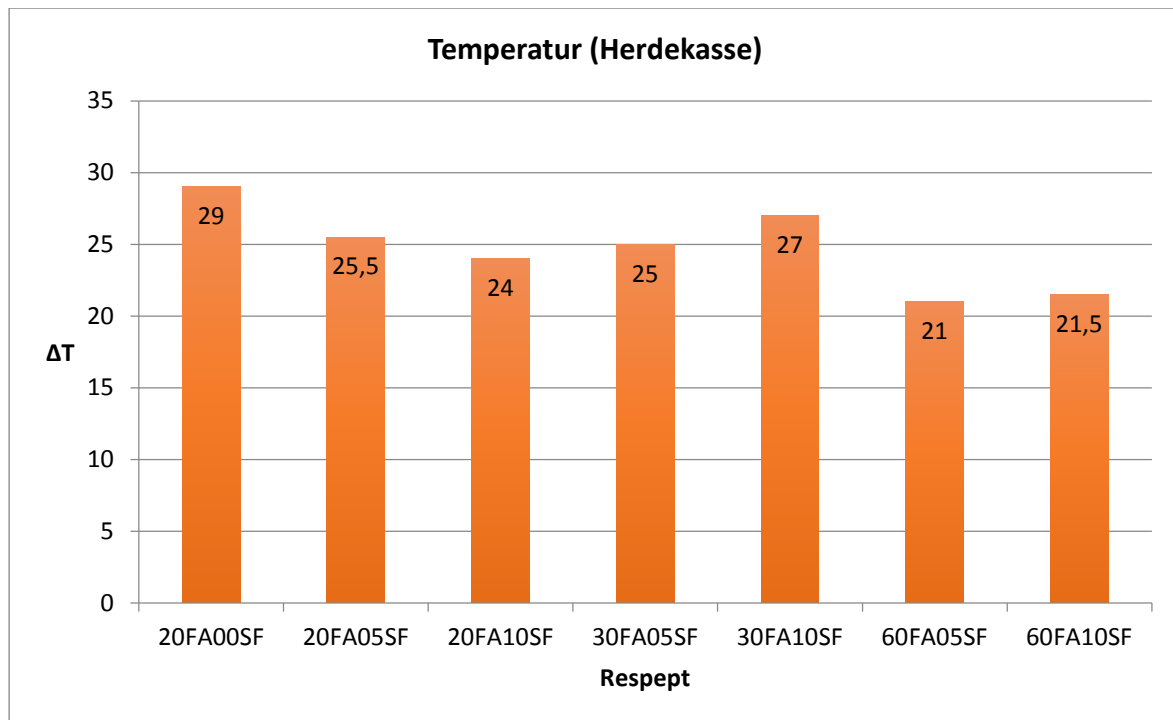
Figur 33: 28 døgns e-modul

Etter 28 dogn jevner resultatene seg mer ut og er også her proporsjonal med trykkfastheten. Silikastøvet ser ut til å ha en liten, men reduserende effekt på e-modulen. Flyveasken reduserer også litt.

Forskjellene er såpass små at det mest sannsynlig er som antatt, e-modulen er proporsjonal med trykkfastheten.

E-modulen fremstår noe høy, dette kan skyldes unøyaktighet på utstyret som ble brukt. Tar man utgangspunkt i en  $f_{cm} = 100$  MPa. Skal man i følge standarden forvente en  $E_{cm} = 22 \cdot [f_{cm}/10]^{0,3} = 44$  GPa [21]. Alle 28 dagers resultatene er altså over forventet verdi. Velde operer i hovedsak med tilslag av Granitt som også har en e-modul på rundt 44 GPa [20]. Det er derfor svært usannsynlig at de reelle e-modul verdiene så høye som de målte verdiene i denne oppgaven.

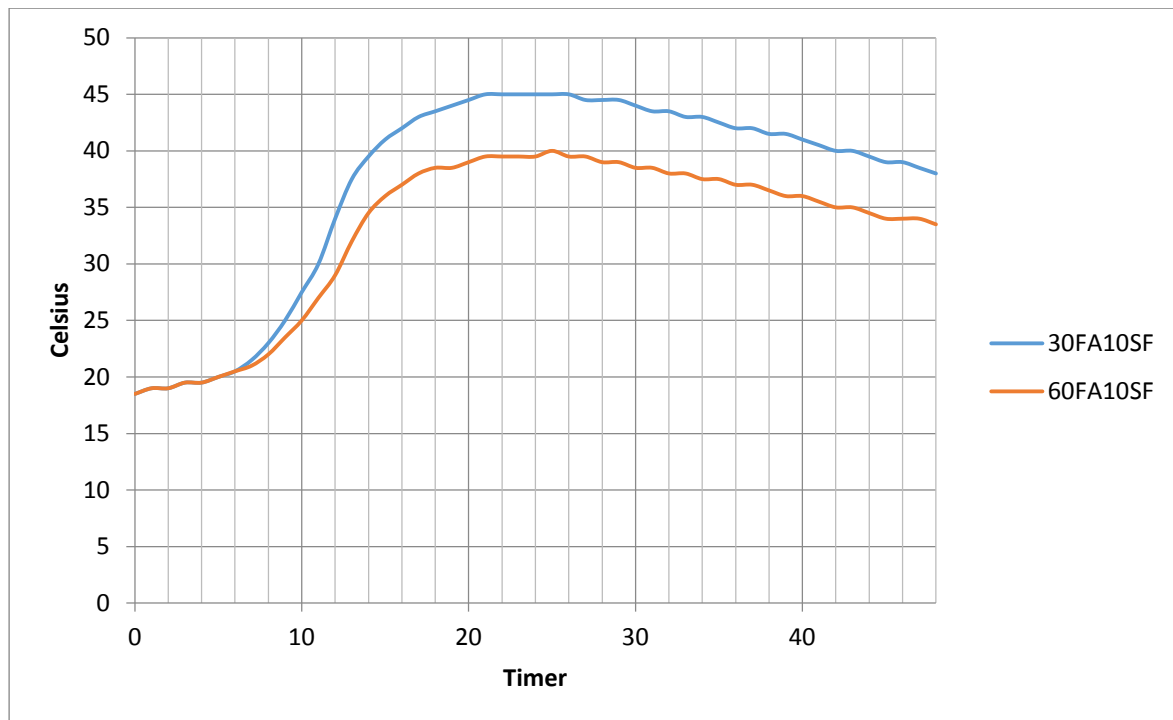
## 5.5. Temperaturresultater



Figur 34: Temperaturstigning

Den høyeste temperaturstigningen er som ventet på resepten med mest sement, 20FA00SF og lavest for reseptene med minst sement.

Hvis vi ser på reseptene med 20 prosent flyveaske, er det merkelig at temperaturstigningene varierer såpass på reseptene med ulik innhold av silikastøv. Da silikastøv avgir omtrent like mye varme som sementen kan det ikke forklares med annen måte enn temperaturredifferanser på laboratoriet, der innetemperaturen ble påvirket av varierende utetemperatur. Derfor har noen av reseptene hatt et større varmetap til omgivelsene. Dette blir drøftet videre i kapittel 7.



Figur 35: Temperaturutvikling 30FA10SF og 60FA10SF

Resultatene fra temperaturmålingene til reseptene 30FA10SF og 60FA10SF illustrerer effekten av flyveaske svært godt, da disse ble blandet ved nesten samme tid og herdet under samme forhold. Ved å øke doseringen med flyveaske får vi tregere temperaturøkning og en lavere maksimums temperatur. Det stemmer godt overens med teorien.

## 6. Konklusjon

Basert på resultatene fra laboratoriet er følgende konklusjoner blitt tatt om bruken av pozzolaner i høyfast betong:

- Pozzolaner kan også brukes med gode resultater i høyfast betong for å oppnå ferske egenskaper som høyere seighet på grunn en filler effekt av silikastøv. Siden silikastøv er 100 ganger mindre enn den gjennomsnittlige sementpartikkel, kan blødning bli eliminert helt. Luftresultatene viser at SF og FA reduserer permeabiliteten og bidrar til bedre beskyttelse mot kloridinntrenging.
- Flyveaske gir høyfast betong tregere temperaturøkning og en lavere maksimums temperatur. Resultatene viser også at tidligfastheten (1-7 døgn) blir redusert ved økende dosering av FA.
- Silikastøv er industrielt fremstilt pozzolan, som reagerer med sementens hydrasjonsprodukter og danner samme reaksjonsprodukt som mellom sement og vann (C-S-H). Tidligfastheten (1-7 døgn) synker noe, men etter 28 døgn oppnår vi samme trykkfasthet og får i tillegg en tettere betong.
- Resultatene viser at pozzolaner reduserer tidligutviklingen til trykkfasthet, strekkfasthet og e-modul (1-7 døgn), fordi pozzolanene reagerer med sementens hydrasjonsprodukter og danner samme reaksjonsprodukt som sement og vann, C-S-H.
- Resultatene viser at standardens aktivitetsfaktor (k-faktor) for flyveaske ikke er tilstrekkelig for høyfast betong med bindemiddelforhold på 0,3. Denne burde være lavere enn angitt i standarden.
- Beregningene viser at økt dosering flyveaske gir mindre temperaturgradienter, som igjen senker spenningene i betongen og faren for temperaturriss.
- Resultatene viser at e-modulen er proporsjonal med trykkfastheten.
- Det oppnås større verdier av tidlig spaltestrekkfasthet (1-3 døgn) ved høyere dosering av silikastøv.

## 7. Feilkilder

### **Fukt i sand**

Under betongblandingene på laboratoriet ble det brukt mye sand. I starten var sanden helt fri for fukt, men mot de siste blandingene ble det hentet sand som har stått ute i vær og vind. Det ble forsøkt å måle fukten i sanden, men det kom fort frem at den varierte veldig fra topp til bunn i sekken. Det var derfor vanskelig å anslå korrekt fuktinnhold. Dette kan ha gitt noe feil bindemiddel forhold og påvirket resultatene i de siste blandingene.

### **Flyveaske**

Dessverre var ikke ren anleggssement tilgjengelig. Det ble derfor brukt sement av typen anlegg FA med 17 wt% flyveaske innhold. Flyveasken som er blandet med sement har en høyere finhet, enn den som ble tilsatt og reagerer derfor raskere. Dette vil dessverre også påvirke resultatene. Det var også uheldig å ikke ha en referanseblanding med ren anleggs sement.

### **E-modul**

E-modul resultatene er høyere enn forventet resultat. Dette skyldes trolig unøyaktighet på utstyret. Det fremstod som om e-modulen økte med økende last, mens deformasjonen varierte minimalt. Dette gir etter formelen (13) økende e-modul.

### **Temperaturmåling**

Siden prøvingen på laboratoriet foregikk over lengre tid ble innetemperaturen påvirket av den stigende utetemperaturen. Under temperaturmålinger av reseptene ble disse da utsatt for forskjellige omgivelsestemperaturer, noe som påvirket resultatet og gjorde målingene mindre presise.

### **Prøvetider**

Under testingen ble det forsøkt å holde en god nøyaktighet på prøveintervallene. Det fungerte bra, men enkelte ganger var ikke laboratoriet tilgjengelig på grunn av undervisning eller annet. Dette førte til at enkelte tester ble utsatt noen timer ekstra, da prøvingen i seg selv også var veldig tidskrevende.



## 8. Videre arbeid

Forslag til videre arbeid med oppgaven:

- Blandet en referanseblanding med ren anleggssement.
- Gjennomført forsøkene med andre sementtyper.
- Legge inn strekkfasthet- og e-modulutviklingen i regnearket.
- Testet regnearket på en reell veggkonstruksjon, med trykkfasthet- og temperaturmålinger.
- Flere forsøk for å definere en bedre aktivitetsfaktor til flyveaske.

## 9. Litteraturliste

- [1] NTNU, Concrete Technology 1 (TKT 4215), 2009, ISBN 82-7482-098-3
- [2] Pål Gjerp, Morten Opsahl og Sverre Smepllass, Grunnleggende betongteknologi, 2004, ISBN 978-82-8021-035-7
- [3] Edward G. Nawy, Fundamentals of High-Performance Concrete. 2001, ISBN 0-419-19270-0
- [4] Pierre-Claude Aïtcin, High Performance Concrete, 2011, ISBN 0-471-38555-7
- [5] Norcem, Herdeteknologi, [http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/FECC97E1-A475-4324-8074-6A3D4A10C082/0/Herdningsteknologi\\_net.pdf](http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/FECC97E1-A475-4324-8074-6A3D4A10C082/0/Herdningsteknologi_net.pdf) [Lastet ned mars 2014]
- [6] B. Søpler, Betongboka, 2004, ISBN 978-82-05-31372-9
- [7] Statens vegvesen, 14.634 Elastisitetmodul, [http://www.vegvesen.no/s/vegnormaler/hb/014/Gamle\\_filer/14.63/014-634.pdf](http://www.vegvesen.no/s/vegnormaler/hb/014/Gamle_filer/14.63/014-634.pdf) [Lastet ned januar 2014]
- [8] Guomin Ji, Cracking risk of concrete structures in the hardening phase: Experiments, material modeling and finite element analysis (Doktorgrad), 2008
- [9] Statens vegvesen, Håndbok 15 Feltundersøkelser, 1997, ISBN 82-7207-439-7
- [10] Norsk Standard, NS-EN 12350 – Prøving av fersk betong, 2009
- [11] Norsk Standard, NS-EN 12390 – Prøving av herdet betong, 2009
- [12] Norsk Standard, NS-EN 206-1 – Spesifikasjon, egenskaper, fremstilling og samsvar, 2009
- [13] Knut J. Espedal, Bygningsfysikk, 2010, ISBN 978-82-8021-080-7
- [14] S. Mindess, Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete, 2008, ISBN 978-1-84569-263-6
- [15] Per Jahren, Betong historie og historier, 2011, ISBN 97888251-926997
- [16] Norcem, Anleggssement FA, <http://www.heidelbergcement.com/no/no/norcem/sementtyper/Anleggssement+FA.htm>
- [17] Store norske leksikon, minste kvadraters metode, [http://snl.no/minste\\_kvadraters\\_metode](http://snl.no/minste_kvadraters_metode)
- [18] Store norske leksikon, Fouriers lov, [http://snl.no/Fouriers\\_lov](http://snl.no/Fouriers_lov)

- [19] NTNU, el-kraft kapitel 7, [http://www.elkraft.ntnu.no/~kvitass/SIE1040/Last%20ned/Termisk\\_kap7.PDF](http://www.elkraft.ntnu.no/~kvitass/SIE1040/Last%20ned/Termisk_kap7.PDF)  
[Lastet ned mars 2014]
- [20] Statens vegvesen, Trykkfasthet og E-modul for SV-40 betong, [http://www.vegvesen.no/Fag/Publikasjoner/Publikasjoner/Statens+vegvesen+rapporter/\\_attachment/563487?\\_ts=1430af336a0&fast\\_title=Trykkfasthet+og+E-modul+fpr+SV-40+betong.pdf](http://www.vegvesen.no/Fag/Publikasjoner/Publikasjoner/Statens+vegvesen+rapporter/_attachment/563487?_ts=1430af336a0&fast_title=Trykkfasthet+og+E-modul+fpr+SV-40+betong.pdf) [Lastet ned januar 2014]
- [21] NS 19921-1 – Prosjektering av betongkonstruksjoner, 2008
- [22] Statens vegvesen, Luft i betong, [http://www.vegvesen.no/\\_attachment/390436/binary/669566?fast\\_title=Luft+i+betong+%E2%80%93+Generelt+om+frostskader+og+praktiske+%C3%A5rsaker.pdf](http://www.vegvesen.no/_attachment/390436/binary/669566?fast_title=Luft+i+betong+%E2%80%93+Generelt+om+frostskader+og+praktiske+%C3%A5rsaker.pdf)  
[Lastet ned mai 2014]

## 10. Figurliste

Figur 1: Troll A 245 000 kubikkmeter høyfast betong .....	2
Figur 2: To tonn anlegg FA sement .....	4
Figur 3: Flyveaske .....	6
Figur 4: Mikrosilika .....	7
Figur 5: Herdingsforløpet til Portlandsement .....	9
Figur 6: Fastholding .....	11
Figur 7: Spenninger i betong .....	13
Figur 8: Varmeledning gjennom vegg .....	17
Figur 9: Kurvetilpasnings eksempel .....	18
Figur 10: Betongparametere .....	19
Figur 11: Alt klart til betongstøping .....	20
Figur 12: Luftporemåler .....	21
Figur 13: Synkkjegle og dybel .....	22
Figur 14: Temperaturmåling av tre resepter .....	25
Figur 15: Et sett klart til testing .....	26
Figur 16: Temperaturutvikling 20% FA .....	29
Figur 17: Temperaturutvikling 30% FA .....	32
Figur 18: Temperaturutvikling 60% FA .....	35
Figur 19: Illustrasjon regneark vegg .....	38
Figur 20: Beregningspunktene i regnearket .....	39
Figur 21: Illustrasjon kurvetilpasning .....	47
Figur 22: Illustrasjon av beregnet temperaturutvikling .....	49
Figur 23: Illustrasjon av beregnet fasthetsutvikling .....	49
Figur 24: Beregnet adiabatisk temperaturutvikling .....	50
Figur 25: To døgns trykkfasthet .....	51
Figur 26: Syv døgns trykkfasthet .....	52
Figur 27: 28 døgns trykkfasthet .....	53
Figur 28: To døgns strekkfasthet .....	54
Figur 29: Syv døgns strekkfasthet .....	55
Figur 30: 28 døgns strekkfasthet .....	56
Figur 31: Et døgn e-modul .....	57
Figur 32: Syv døgns e-modul .....	58
Figur 33: 28 døgns e-modul .....	59
Figur 34: Temperaturstigning .....	60
Figur 35: Temperaturutvikling 30FA10SF og 60FA10SF .....	61

Tabell 1: De fire hovedmineralene i sement .....	3
Tabell 2: Sementreaksjon .....	5
Tabell 3: Pozzolanreaksjon .....	5
Tabell 4: Betong resepter .....	19
Tabell 5: Ferske egenskaper 20% FA .....	27
Tabell 6: Fasthetsutvikling 20% FA .....	27
Tabell 7: Strekkutvikling 20% FA .....	28
Tabell 8: E-modul 20% FA .....	29
Tabell 9: Ferske egenskaper 30% FA .....	30
Tabell 10: Fasthetsutvikling 30%FA .....	30
Tabell 11: Strekkutvikling 30% FA .....	31
Tabell 12: E-modul 30% FA .....	32
Tabell 13: Ferske egenskaper 60% FA .....	33
Tabell 14: Fasthetsutvikling 60% FA .....	33
Tabell 15: Strekkutvikling 60% FA .....	34
Tabell 16: E-modul 60% FA .....	35
Tabell 17: Dansk egenskapsfunksjon for temperatur .....	36
Tabell 18: Dansk egenskapsfunksjon for fasthet .....	37
Tabell 19: Inngangsverdier for regneark .....	40
Tabell 20: Eksempel modenhet .....	42
Tabell 21: Eksempel aktiveringsenergi .....	43
Tabell 22: Eksempel varmeutvikling .....	44
Tabell 23: Eksempel varmetap .....	45
Tabell 24: Eksempel temperaturutvikling .....	46
Tabell 25: Eksempel kurvetilpasning .....	47
Tabell 26: Eksempel fasthetsberegning .....	48
Tabell 27: Eksempel beregnede temperaturgradienter .....	50

Formel 1: Adibatisk temperaturutvikling .....	10
Formel 2: Total deformasjon .....	13
Formel 3: Termisk utvidelse .....	13
Formel 4: Hastighetsfunksjon .....	14
Formel 5: Aktiveringsenergi .....	14
Formel 6: Modenhet ved integrasjon .....	15
Formel 7: Modenheten ved summering .....	15
Formel 8: Varmeutvikling .....	16
Formel 9: Fasthetsutvikling .....	16
Formel 10: Utleddning av varmetap .....	17
Formel 11: Kurvetilpasning .....	18
Formel 12: Spaltestrekkfasthet .....	23
Formel 13: E-modul .....	24

## Vedlegg

- A. Anlegg FA produktinformasjon**
- B. Egenprodusert 0-8 siktekurve**
- C. Velde 8-16 siktekurve**
- D. Velde 16-22 siktekurve**
- E. Flyveaske produktinformasjon**
- F. Dynamon SX-N produktinformasjon**

TEKNISK DATABLAD

# Anlegg sement FA





# Vedlegg A

## Tekniske data

Norcem Anleggsement FA tilfredsstiller kravene til Portland flyveaskesement.

NS-EN 197-1-CEM II/A-V 42,5 N

### Kjemiske data

Egenskap	Retningsgivende verdier	Krav ifølge NS-EN 197-1
Finhet (Blaine)	390 m <sup>2</sup> /kg	
Alkali (ekv Na <sub>2</sub> O <sub>ekv</sub> )*	0,6 %	
Flyveaskelinnehold	17%	6 - 20%
Sulfat (SO <sub>3</sub> )	2,7%	≤ 2 - 3 %
Klorid	< 0,0 85 %	≤ 0,1%
Vannløselig Cr **	< 2ppm	≤ 2 ppm
Spesifikk vekt	2,99 kg/dm <sup>3</sup>	

\*Alkali innhold i klinkerdel

### Fysikalske data

Egenskap	Retningsgivende verdier	Krav ifølge NS-EN 197-1
Trykkfasthet 1 døgn	15 MPa	
Trykkfasthet 2 døgn	24 MPa	≥ 10 MPa
Trykkfasthet 7 døgn	37M Pa	
Trykkfasthet 28 døgn	55 MPa	≥ 42,5 MPa ≤ 62,5 MPa
Begynnende blindetid	165 min	≥ 60 min
Ekspansjon	1mm	≤ 10 mm



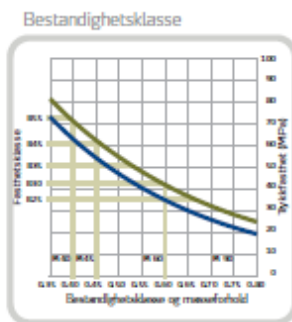
www.norcem.no

Oppstartskemabryt - 03/2025

# Vedlegg A

## ANLEGGSEMENT FA

Norcem Anleggsement FA er en spesialsement for anleggskonstruksjoner. Sementen kan brukes i alle eksponerings-, bestandighet- og fasthetsklasser. Den er spesielt tilpasset norske forhold for bruk i bestandighetsklasse M45 og MF45 eller strengere. Sementen er godt tilpasset for bruk i konstruksjoner med krav til høy sluttfasthet. Anleggsement FA kan benyttes i kombinasjon med alkalireaktivt tilslag. Sementen har relativt lav varmeutvikling og er velegnet for bruk i massivere konstruksjoner. Sementen har meget gode støpelighet og bestandighetsegenskaper.



Figur 3

### Motstand mot alkalireaksjoner

Norcem Anleggsement FA kan brukes sammen med alkalireaktivt tilslag. Sementen kommer inn under regel 4.2 (2008-05-28 Addendum) i Norsk Betongforenings publikasjon 21 samt Vedlegg C (Rev 6) til publikasjonen (se [www.betong.net](http://www.betong.net)). Sementen lages med klinker inneholdende 0,6%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ . Alkaller fra flygeasken utelates ved beregning av ekvivalent alkali innhold pr  $\text{m}^3$  betong. Siden sementen inneholder minimum 17% flygeaske, regnes ekvivalent alkali innhold pr  $\text{m}^3$  betong fra Anleggsement FA ut på følgende måte:

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}} \text{ (kg/m}^3\text{)} = \text{Sementmengde (kg/m}^3\text{)} \cdot 0,006 \cdot (1 - 0,17)$$

Maksimalt tillatt  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$  innhold iht. NB 21 er 3,0  $\text{kg/m}^3$  betong.

### Bestandighetsklasse

NS-EN 206-1 klassifiserer betongens miljøpåvirkning 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 anbefalt 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 Anleggsement FA uten luftinnføring.

#### Anbefalte kombinasjoner

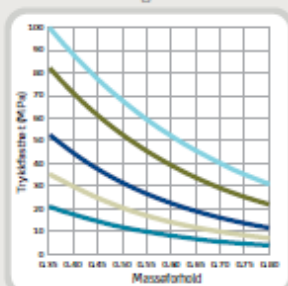
Bestandighetsklasse M45	Fasthetsklasse B35 eller høyere
Bestandighetsklasse M40	Fasthetsklasse B45 eller høyere
Statens vegvesen SV 40	Fasthetsklasse B45 eller høyere
Statens vegvesen SV 30	Fasthetsklasse B45 eller høyere

Tabell 2

# Vedlegg A



Fasthetsutvikling

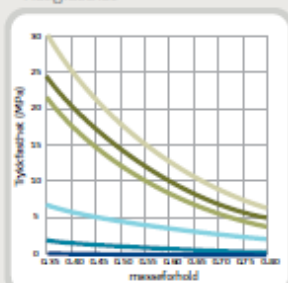


Figur 1

## Fasthetsutvikling

Fasthetsutvikling er en sentral egenskap for planlegging, styring og utførelse av alle betongarbeider. Fasthetsutviklingen er avhengig av sementtype, masseforhold, herdebetingelser (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 Norcem Anleggsement FA.

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 Anleggsement FA. 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. 5 MPa ved de ulike fasthetsklassene for å produsere med tilstrekkelig sikkerhet mot undermålere. Anleggsement FA gir følgende retningsgivende verdier for største masseforhold i ulike fasthetsklasser for betong uten luftinnføring.

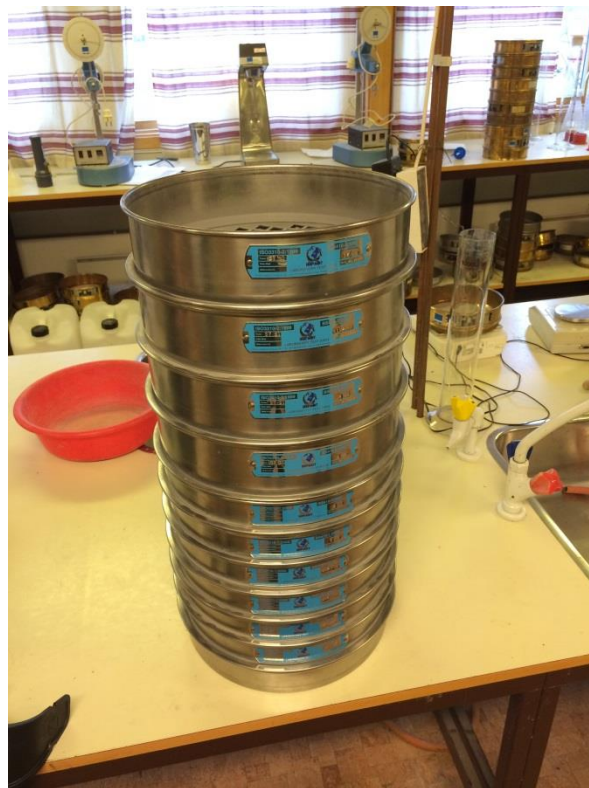
Fasthetsklasse	B30	B35	B45	B55
Største masseforhold	0,57	0,52	0,45	0,38
Største masseforhold med 5% silika				0,40

Tabell 1

## Vedlegg B

### Siktekurver 0-8 mm

Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	0	0	0,0	100,0
11,2	0	0	0,0	100,0
8	14,4	35,8	2,4	97,6
4	78,6	163,9	11,4	88,6
2	207,1	343,3	25,8	74,2
1	392,5	540,1	43,8	56,2
0,5	628,4	778,4	66,1	33,9
0,25	836,9	969,1	84,8	15,2
0,125	944,7	1065,0	94,4	5,6
0,063	982,4	1108,9	98,2	1,8
Bunn	999	1130		



## Vedlegg C

**Legg inn fraksjon:** 8/16mm.

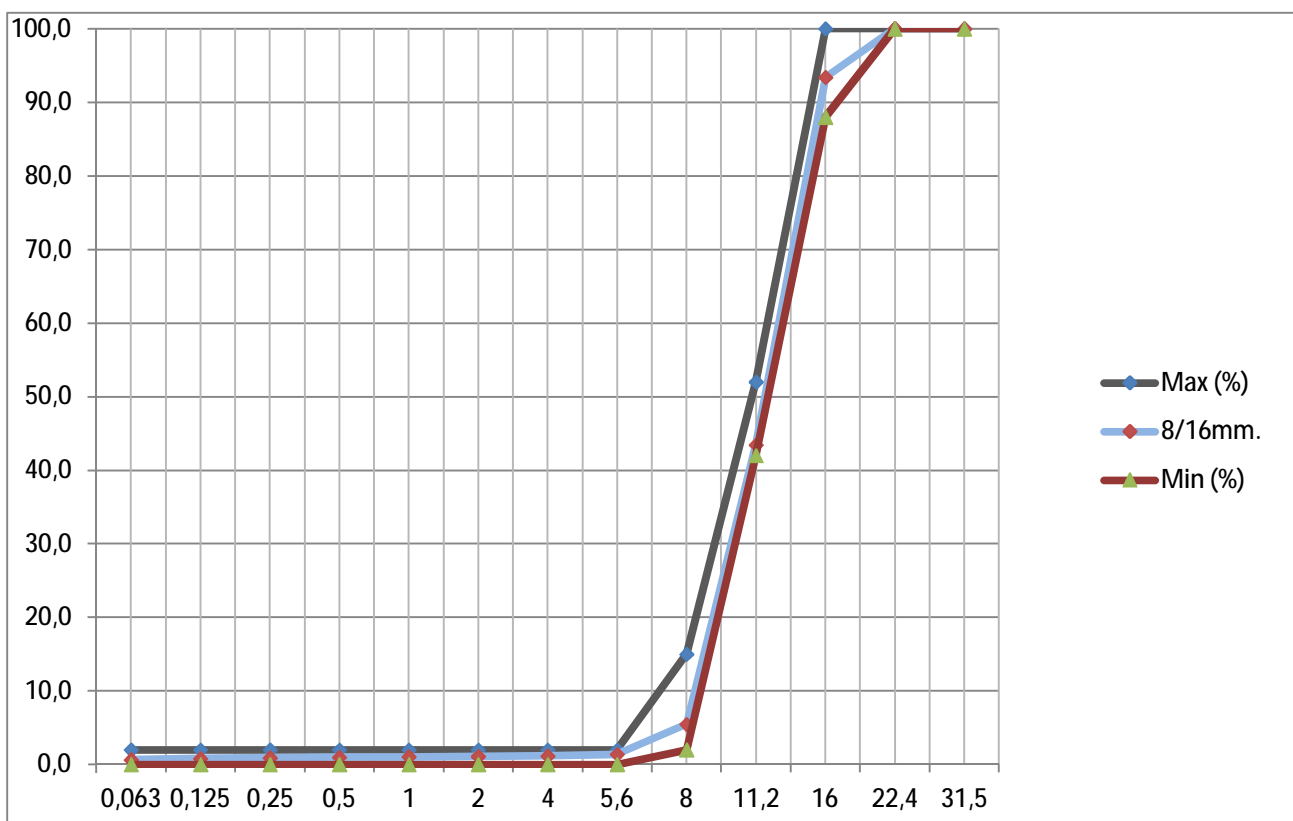
**Dato** 21.01.2014  
**Innlagt av** Michal



**Vekt våt** 2932,8 g  
**innveid masse** 2918 g

**Vekt tørr** 2918 g

Åpning (mm)	Sikterest (g)	Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
32	0	0,0 %	100 %
22,4	0	0,0 %	100 %
16	193	6,6 %	93 %
11,2	1650,3	56,6 %	43 %
8	2758,3	94,5 %	5 %
5,6	2877,4	98,6 %	1 %
4	2883,5	98,8 %	1 %
2	2885,5	98,9 %	1 %
1	2887	98,9 %	1 %
0,5	2888,8	99,0 %	1 %
0,25	2891,3	99,1 %	1 %
0,125	2894,5	99,2 %	1 %
0,063	2898,7	99,3 %	1 %
Bunn	2917		
Siktetap	0,0 %	Overstørrelse	7 %
Fukthalt	0,50 %	Understørrelse	5 %



## Vedlegg D

Legg inn fraksjon: **16/22 mm** Silotopp

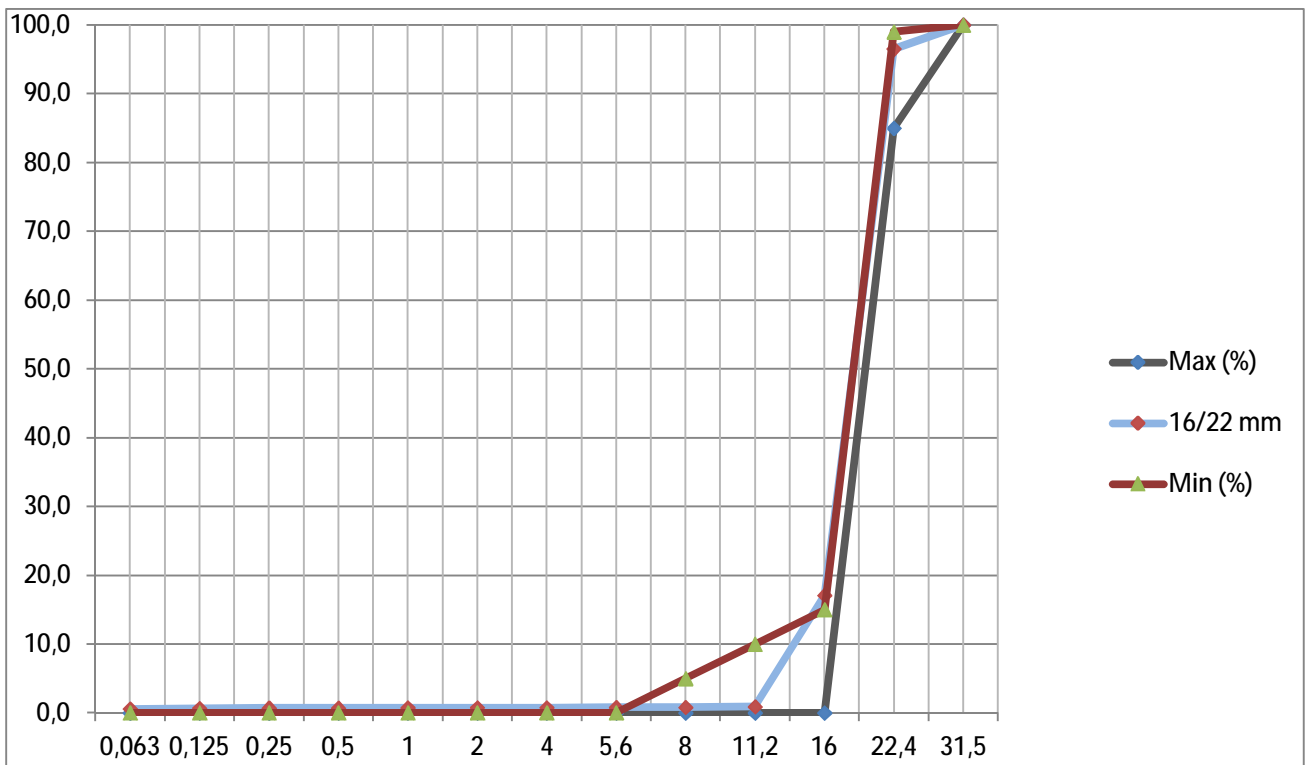
Dato: 23.01.2014  
Innlagt av: Michal



innveid masse **5036,7 g**  
**5027,7 g**

Vekt tørr **5027,7 g**

Åpning (mm)	Sikterest (g)	Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
32	0	0,0 %	100 %
22,4	175,4	3,5 %	97 %
16	4169,1	82,9 %	17 %
11,2	4981,8	99,1 %	1 %
8	4987	99,2 %	1 %
5,6	4987,6	99,2 %	1 %
4	4988,4	99,2 %	1 %
2	4989,2	99,2 %	1 %
1	4990,2	99,3 %	1 %
0,5	4991,3	99,3 %	1 %
0,25	4992,6	99,3 %	1 %
0,125	4994,4	99,3 %	1 %
0,063	4998,5	99,4 %	1 %
Bunn	5025		
Siktetap	0,0 %	Overstørrelse	3 %
Fukthalt	0,18 %	Understørrelse	17 %



# Norcem Flyveaske



**Norcem A.S ivaretar salg og kvalitetsovervåking av flyveaske til sement- og betongproduksjon.**

**Flyveaske er et mineralprodukt som fremkommer ved produksjon av elektrisitet og varme ved kullfyrte kraft- og kraftvarmeverk.**

Produktbetegnelse: Flyveaske,  
Leverandør: Flere, bl a E Mineral a/s, Nefovej 50,  
DK- 9310 Vodskov

Databladet dekker ulike flyveasketyper. Innholdet i og sammensetningen av de ulike typene flyveaske vil variere noe. All flyveaske er imidlertid sertifisert i overensstemmelse med kravene i NS/EN 450-1, klasse A .

Flyveaske kombinert med portlandsement, har vært i bruk i Norge i mange år. Materialet er først og fremst tatt i bruk for å styre fuktighetsnivået og varmeutviklingen i betong, og derved redusere risikoen for riss og sprekker i massive konstruksjoner, som f eks dammer, kraftstasjoner, veier og oljerigger i Nordsjøen.

Når man tilsetter flyveaske, kan portlandsementer brukes med alkalireaktivt tilslag.

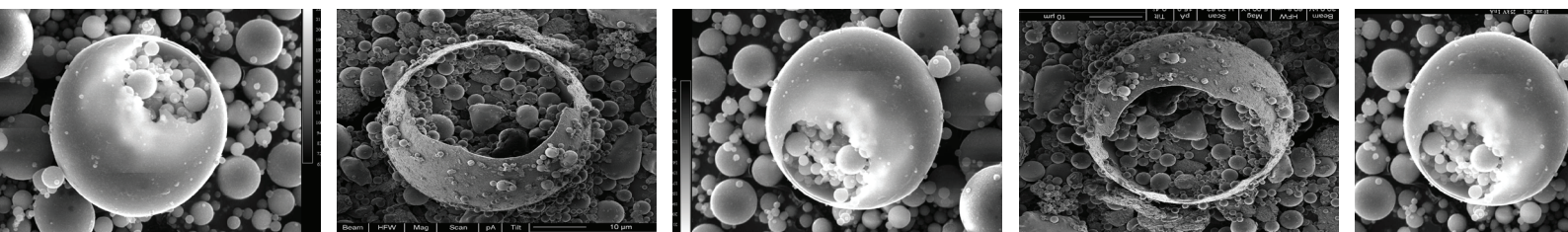
Flyveaske blandet i sement er et teknisk og miljømessig godt alternativ til rene portlandsementer.

## Vedlegg E

### Deklarerte verdier

Norcem A.S attesterer at flyveaske til betongformål er sertifisert i overensstemmelse med kravene definert i NS/EN 450-1, klasse A.

Egenskap	Typisk verdi	Krav i henhold til NS/EN 450-1+A1
Glødetap	2 - 4%	> 0,0 - < 5,0 %
Klorid (Cl <sup>-</sup> )	0,10%	< 0,10
Svovelsyre anhydrid (SO <sub>3</sub> )	<3 %	< 3,0 %
Fritt kalsiumoksid (Fri CaO)	<1 % / < 2,5 %	< 1,0 / < 2,5
Reaktivt kalsiumoksid (Reakt CaO)	4 - 6%	< 10,0
Finhet (Blaine) + 0,045 mm (Kategori N)	300 - 450	
Partikkeldensitet	2300 kg/m <sup>3</sup>	Dekl.verdi ± 200 kg/m <sup>3</sup>



**Norcem A.S**

P.O Box 143 Lilleaker  
N-0216 Oslo  
Tel: +47 22878400  
Email: [firmapost@norcem.no](mailto:firmapost@norcem.no)  
[www.norcem.no](http://www.norcem.no)



## Superplastiserende tilsetningsstoff

### PRODUKTBESKRIVELSE

**Dynamon SX-N** er et svært effektivt superplastiserende tilsetningsstoff basert på modifiserte akrylpolymerer.

Produktet tilhører Dynamonsystemet basert på den Mapeiutviklede DPP-teknologien (DPP = Designed Performance Polymers) der tilsetningsstoffenes egenskaper skreddersys til ulike betongformål.

Dynamonsystemet er utviklet på basis av Mapeis egen sammenstilling og produksjon av monomerer.

### BRUKSOMRÅDE

**Dynamon SX-N** er et tilnærmet allround-produkt som er anvendelig i all betong for å øke støpeligheten og/eller redusere tilsatt vannmengde.

Noen spesielle bruksområder er:

- Vanntett betong med krav til høy eller svært høy fasthet og med strenge krav til bestandighet i aggressive miljøer.
- Betong med særlige krav til høy støpelighet; i konsistensklasser S4 og S5 etter NS-EN 206-1.
- Selvkomprimerende betong med ønske om lengre åpentid. Om nødvendig kan SKB stabiliseres med en viskositetsøker - **Viscofluid** eller **Viscostar**.
- Til produksjon av frostbestandig betong – da i kombinasjon med luftinnførende tilsetningsstoffer - **Mapeair**. Valg av type luftinnførende stoff gjøres ut fra egenskapene til de andre delmaterialer som er tilgjengelige.
- Til golvstøp for å oppnå en smidig betong med bedret støpelighet. Store doseringer og lave temperaturer kan retardere betongen noe.

### EGENSKAPER

**Dynamon SX-N** er en vannløsning av aktive akrylpolymerer som effektivt dispergerer (løser opp) sementklaser.

Denne effekten kan prinsipielt utnyttes på tre måter:

1. For å redusere mengden tilsatt vann, men samtidig beholde betongens støpelighet. Lavere v/c-forhold gir høyere fasthet, tetthet og bestandighet i betongen.
2. For å forbedre støpeligheten sammenlignet med betonger med samme v/c-forhold. Fastheten forblir dermed den samme, men muliggjør forenklet utstøping.

3. For å redusere både vann og sementmengde uten å forandre betongens mekaniske styrke. Gjennom denne metoden kan en blant annet redusere kostnadene (mindre sement), redusere betongens svinnpotensial (mindre vann) og redusere faren for temperaturgradienter på grunn av lavere hydratasjonsvarme. Spesielt er denne siste effekten viktig ved betonger med større sementmengder.

### VÆR OPPMERKSOM PÅ

**Dynamon SX-N** lar seg kombinere med andre Mapei tilsetningsstoffer, som f.eks størkningsakselererende stoffer som **Mapequick** og størkningsretard-erende stoffer som **Mapetard**. Produktet lar seg også kombinere med luftinnførende tilsetningsstoffer, **Mapeair**, for produksjon av frostbestandig betong.



### Produsent:

Mapei AS  
Vallsetvegen 6, 2120 Sagstua, Norway  
Tlf: +47 62 97 20 00 Fax: +47 62 97 20 99  
post@mapei.no  
www.mapei.com

Valg av type luftinnførende stoff gjøres ut fra egenskapene til de andre delmaterialer som er tilgjengelige.

#### EMBALLASJE

**Dynamon SX-N** leveres i 25 liters kanner, 200 liters fat, i 1000 liters containere og i bulk. Produktet må oppbevares ved temperaturer mellom +8°C og +35°C og bevarer sine egenskaper i minst ett år i lukket emballasje. Fargenyanser kan oppstå i produksjon av polymerene som inngår i **Dynamon SX-N**, men dette påvirker ikke produktets bruksegenskaper. Produktet bør røres forsiktig om før bruk for å sikre et homogent produkt. Produktet bør ikke utsettes for sollys.

#### DOSERING

**Dynamon SX-N** tilsettes for å oppnå ønsket resultat (styrke, bestandighet, støpelighet, sementreduksjon) ved å variere doseringen mellom 0,3 og 2,0% av sementmengden.

Ved økt dosering økes også betongens åpentid, dvs. tiden betongen lar seg bearbeide.

Større doseringsmengder og lave betongtemperaturer gir en retardert betong. Vi anbefaler alltid prøvestøper med aktuelle parametere.

Til forskjell fra konvensjonelle melamin- eller naftalenbaserte superplastiserende tilsetningsstoffer, utvikler **Dynamon SX-N** maksimal effekt uavhengig av tilsetnings-tidspunkt, men tilsetningstidspunktet kan påvirke nødvendig blandetid.

Dersom **Dynamon SX-N** tilsettes etter at minst 80% av blandedvannet er inne vil blandetiden generelt være kortest. Det er likevel viktig med utprøvinger tilpasset eget blandedtstyr.

**Dynamon SX-N** kan også tilsettes direkte i automikser på bygg- eller anleggsplass. Betongen bør da blandes med maksimal hastighet på trommelen i ett minutt pr. m<sup>3</sup> betong i lasset, men minimum 5 minutter.

#### VERNETILTAK

For helse-, miljø- og sikkerhetsinformasjon, se eget sikkerhetsdatablad. Sikkerhetsdatabladene finnes på [www.mapei.com](http://www.mapei.com)

#### MERK

De tekniske anbefalinger og detaljer som fremkommer i denne produktbeskrivelse representerer vår nåværende kunnskap og erfaring om produktene.

All ovenstående informasjon må likevel betraktes som retningsgivende og gjenstand for vurdering.

Enhver som benytter produktet må på forhånd forsikre seg om at produktet er egnet for tilsiktet anvendelse. Brukeren står selv ansvarlig dersom produktet blir benyttet til andre formål enn anbefalt eller ved feilaktig utførelse.

Alle leveranser fra Mapei AS skjer i henhold til de til enhver tid gjeldende salgs- og leveringsbetingelser, som anses akseptert ved bestilling.

TEKNISKE SPESIFIKASJONER		
Form:	Væske	
Farge:	Gulbrun	
Viskositet:	Lettflytende; <30 mPa · S	
Tørrestoffinnhold, %:	18,5 ± 1,0	
Spesifikk vekt, g/cm <sup>3</sup> :	1,06 ± 0,02	
pH-verdi:	6,5 ± 1	
Kloridinnhold, %:	< 0,05	
Alkaliinnhold (Na <sub>2</sub> O-ekvivalenter) %:	< 2,0	
BRUKSEGENSKAPER I BETONG		
<i>Som vannreducerende stoff (lik konsistens) T 3.1</i>		
Sementmengde kg/m <sup>3</sup> (Norcem standard)	350	350
Tilsetningsmengde (i % av sementvekt)	0	1,0
Masseforhold (v/c-tall)	0,51	0,41
Vannreduksjon (%)	-	20
Trykkfasthet (i N/mm <sup>2</sup> ):		
1 døgn	26	41
7 døgn	42	60
28 døgn	52	68
<i>Som SP-stoff (slumpforbedrer) T 3.2</i>		
Sementmengde, kg/m <sup>3</sup> (Norcem standard sement):	350	350
Tilsetningsmengde (i % av sementvekt):	0	1,0
Masseforhold (v/c-tall):	0,48	0,48
Luftinnhold:	2,1	1,8
Konsistens, mm:		
- synkmål, 5 min	30	220
- synkmål, 30 min	20	200
- synkutbredelse, 5 min		420
- synkutbredelse, 30 min		380

#### Produsent:

Mapei AS

Vallsetvegen 6, 2120 Sagstua, Norway

Tlf: +47 62 97 20 00 Fax: +47 62 97 20 99

post@mapei.no

www.mapei.com