



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2016 30 stp
Institutt for matematiske realfag og teknologi

Flygeaske fra flisfyringsanlegg som sementerstatning i betong

Biomass fly ash as cement replacement in concrete

Christian Johan Grimsrud og Peder Johan Hafsås

Forord

Denne masteroppgaven er det avsluttende prosjektarbeidet på det 5-årige masterstudiet Byggeteknikk og arkitektur ved Norges miljø- og biovitenskaplige universitet (NMBU) på Ås. Masteroppgaven ble utarbeidet våren 2016 gjennom et samarbeid mellom Peder Johan Hafsås og Christian Johan Grimsrud.

Problemstillingen ble fremmet etter undervisning om flygeaske i studieemnet «videregående betongteknologi» som et resultat av at foreleser ikke var sikker på om flygeaske fra fyring av trevirke kunne brukes som sementerstatning i betong. Det har vært veldig givende å undersøke dette potensialet, som det tross alt ikke er gjort mye forskning på fra før.

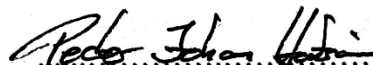
Gjennom arbeidet har vi lært mye om hvordan betong er satt sammen og hva de forskjellige ingrediensene gjør med betongen. Vi har vært så heldige at vi har kunnet gå dypt inn i teorien, men samtidig også sett hvordan de forskjellige stoffene påvirker betongen i praksis under blanding. Kunnskapen som oppgaven er bygget på er hentet fra litteratur fra fagbøker og forskningsartikler, samt fra tidligere fag ved NMBU og fra intern og eksterne veiledere.

En stor takk rettes til Bernt Kristiansen fra AF-gruppen som har bistått som ekstern veileder og har vært veldig behjelpelig med våre spørsmål rundt betongteknologi. Han har også hjulpet oss med å skaffe mange av de nødvendige materialene til å utføre laboratoriearbeidet. Vi vil også gjerne takke Christian Sørensen som satt oss i kontakt med Bernt Kristiansen og som var en viktig pådriver i masteroppgavens oppstartsfase. Takk til Janka Dibdiakova ved Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) på Ås for kjemisk analyse av flygeasken som ble testet i betongen og for gode svar på våre kjemispørsmål. Vi vil takke flisfyringsanlegget Skagerak Varme i Tønsberg, Norcem og Betong Øst for å ha skaffet til veie nødvendige de nødvendige råmaterialene.

Til slutt rettes en spesielt stor takk til hovedveileder Einar Nathan ved NMBU for den gode veiledningen vi har fått underveis.

Ås, 27. april 2016

.....



(Christian Johan Grimsrud)

(Peder Johan Hafsås)

Sammendrag

Betong er verdens mest brukte byggemateriale, på godt og vondt. Betong er et veldig allsidig materiale som kan brukes til å lage de mest utrolige konstruksjoner, men er samtidig et veldig forurensende materiale. Det er i hovedsak produksjonen av sement som står for klimagassutslippene. Med de senere års økte fokus på menneskeskapte klimaendringer har motivasjonen til å gjøre betongen mer miljøvennlig vært stor. Et mye brukt virkemiddel for å redusere betongens CO₂ fotavtrykk er bruk av flygeaske fra kullkraftverk som sementerstatning i betongen. Norge har ikke tilgang på egenprodusert flygeaske og importerer dette fra land sørover i Europa. De siste årene har det blitt bygget ut store flisfyrte fjernvarmeanlegg i stor skala i Norge. Disse anleggene produserer også flygeaske, som det er interessant å undersøke om kan benyttes som sementerstatning i betong på samme måte som flygeaske fra kullkraftverk.

Derfor er det i oppgaven undersøkt om flygeaske fra flisfyringsanlegg fyrt med flis fra norske tresorter egner seg som sementerstatning i betong. Dette er testet ved å sammenligne trykkfastheten til terningprøver av betong med ulik andel sement erstattet med flygeaske fra flisfyringsanlegg. Det ble støpt betong med 0% til 50% av sementen erstattet med flygeaske med intervaller på 10%. Sementen ble erstattet av flygeaske i forholdet en til en. Resultatene fra trykkprøvingen er sammenlignet med en referansesstøp uten flygeasketilsetning. Betongresepten som er brukt er en normalbetong med et v/b-tall på 0,55. Det er gjort fasthetsprøver av betongene etter 2-, 7-, 28-, 56- og 90- dagers herding. Resultatene gir dermed et bilde over tidligfasthet, dimensjonerende fasthet og fasthetsutvikling over lang tid.

Det er i tillegg utført analyser av det kjemiske innholdet i flygeaske fra flisfyringsanlegg. Oksidinnholdet i flygeasken er utregnet på bakgrunn av analysert grunnstoffinnhold i asken. De kjemiske analysene gir mengden pozzolane oksider i den benyttede flygeasken. Flygeaskens virkningsgrad sammenlignet med sement (k-faktor) er beregnet for alle tilsetningsgrader ved de ulike herdetidene.

Oppgaven ser også på hvordan støpeligheten til betongen påvirkes av flygeasketilsetningen. Samtidig har det blitt gjort visuelle observasjoner av hvordan betongen oppfører ved blanding og utstøping, og hvordan tilsetning av SP-stoff påvirker støpeligheten.

Resultatene fra trykktestingen viser at betongens fasthet reduseres ved økende andel tilsatt flygeaske fra flisfyringsanlegg. Dette samsvarer med resultatene fra den kjemiske analysen som viser at det er minimalt innhold av pozzolane oksider i flygeasken. Flygeasken inneholder

riktignok alle de riktige oksidene, men andelen er for liten til at flygeasken kan defineres som et pozzolan. Beregnet k-faktor for flygeasken er negativ for alle tilsetningsgrader ved alle herdetider. K-faktoren er «minst dårlig» for de mest flygeasketilsatte prøvene ved lange herdetider. Støpeligheten ble på grunn av lavere plastisitet i massen betydelig redusert ved økende flygeasketilsetning, selv om det ble forsøkt kompensert med større mengder SP-stoff ved blanding.

Abstract

Concrete is the most commonly used building material in the world. Concrete is highly versatile and is used to make the most amazing constructions. However, the production of cement is leading to vast amounts of CO₂ emissions. With increased focus on climate change and anthropogenic carbon dioxide emissions, many have looked at ways of reducing the concrete's carbon footprint. One mechanism adopted has been to use fly ash from coal-fired power plants as a cement replacement. Norway does not produce its own fly ash and has instead imported this from Southern Europe. However, in recent years, Norway has seen a large number of district heating plants been build, which also produces fly ash, yet no research has examined whether this can be used in concrete production in a similar way to fly ash from coal-fired power plants.

This thesis examines whether fly ash from district heating plants, powered by wood from Norwegian forests, can be effectively used in the production of concrete. This was tested by comparing the compressive strength of samples of concrete with different quantities of cement replaced by fly ash from district heating plants. Concrete was cast with 0 to 50 % of the cement replaced by fly ash, with 10 % intervals. The cement was replaced with fly ash in a one-to-one ratio. These tests were then compared with a reference concrete without fly ash addition. The concrete used was normal cement with a v/b-number of 0.55. Tests of concrete specimens were taken on the following days: 2, 7, 28, 56 and 90. The results were able to provide valuable insight into the early strength, the design strength and the strength development over a long period of time

Analysis was also conducted on the chemical contents of the fly ash from district heating plant. The oxide content in the fly ash was calculated based on the analysed elements in the ash, which revealed the amount of pozzolan oxides in the fly ash. The efficiency of the fly ash compared to normal cement (k-factor) is calculated at all the different interval times.

This thesis also looks at how the concrete's workability is affected by the fly ash, provides visual observations of the concrete's reaction of mixing and casting and examines how the superplasticizers affected the concrete's workability.

The results from the compressive testing revealed that the concrete reduces compressive strength with increased amounts of fly ash from the district heating plants. This coincides with results from the chemical analysts that show low levels of pozzolan oxides in the fly ash. Even

though the fly ash contained the right oxides, but the amount was too small for the fly ash to be defined as a pozzolan. The calculated k-factor for fly ash was negative for all sample tests at all intervals. The K-factor showed the “least worst” results for the samples with the most fly ash, and over the longest time period. The workability was, due to low plasticity in the mass, reduced with increased amounts of fly ash, even though this was accounted and compensated for by larger amounts of superplasticizers in the mixture.

1 Innhold

FIGURLISTE.....	XIII
BENYTTETE STANDARDVERK.....	XV
ORDFORKLARINGER OG FORKORTELSER	XVI
LISTE OVER FORMLER.....	XVII
2 INNLEDNING	1
2.1 BAKGRUNN FOR OPPGAVEN	1
2.2 PROBLEMSTILLINGER	2
2.3 AVGRENSNINGER	2
3 TEORI	3
3.1 HISTORIE.....	4
3.2 SEMENT.....	8
3.2.1 <i>Sementproduksjon</i>	9
3.3 HYDRATISERING.....	12
3.3.1 <i>Kjemiske reaksjoner</i>	12
3.3.2 <i>Morfologi</i>	15
3.3.3 <i>Porestruktur</i>	19
3.4 REOLOGI.....	23
3.4.1 <i>Støpelighet</i>	24
3.4.2 <i>Stabilitet</i>	24
3.4.3 <i>Mobilitet</i>	25
3.4.4 <i>Kompakterbarhet</i>	26
3.5 MÅLEMETODER PÅ FERSK BETONG	26
3.5.1 <i>Synkmål og synkutbredelse</i>	26
3.6 TILSETNINGSSTOFFER.....	28
3.6.1 <i>Plastiserende og superplastiserende tilsetningsstoffer</i>	28
3.6.2 <i>Lufttilførende stoffer</i>	28
3.6.3 <i>Akselererende stoffer</i>	29
3.6.4 <i>Retarderende stoffer</i>	29
3.7 TILSLAG	30
3.7.1 <i>Korngradering av tilslag</i>	30
3.7.2 <i>Finstoff</i>	31
3.7.3 <i>Kornform og overflatestruktur</i>	31

3.8	MEKANISKE EGENSKAPER	32
3.8.1	Trykkfasthet.....	32
3.8.2	Fasthetsutvikling.....	33
3.9	POZZOLANER	35
3.9.1	Disposisjon.....	35
3.10	FLYGEASKE FRA KULLFYRING	35
3.10.1	Fysiske egenskaper til flygeaske fra kullfyring.....	36
3.10.2	Kjemisk egenskaper i flygeaske fra kullfyring.....	37
3.10.3	Kullflygeaskens innvirkning på støpeligheten.....	38
3.11	FLYGEASKE FRA FYRING AV TREVIRKE	39
3.11.1	Fysiske egenskaper til flygeaske fra forbrenning av trevirke.....	39
3.11.2	Kjemiske egenskaper til flygeaske fra forbrenning av trevirke.....	40
3.12	BRUK AV FLYGEASKE SOM SEMENTERSTATNING – K-FAKTORMETODEN	42
3.12.1	Beregning av k-faktor	44
3.12.2	flygeaskens effektivitet.....	44
3.13	POZZOLANREAKSJONEN	45
3.14	POZZOLAN AKTIVITETSINDEKS	48
3.15	BESTANDIGHET FOR FLYGEASKETILSATT BETONG	49
3.15.1	Syreangrep.....	49
3.15.2	Alkali-silika reaksjoner.....	49
3.15.3	Kloridinntrengning.....	50
3.15.4	Sulfatangrep.....	50
4	MATERIALER OG METODEBESKRIVELSER	51
4.1	MATERIALER	51
4.1.1	Sement.....	51
4.1.2	Flygeaske	52
4.1.3	Superplastiserende tilsetningsstoff.....	52
4.1.4	Tilslag.....	53
4.1.5	Fukt i tilslag	54
4.1.6	Blandevann.....	55
4.2	BLANDEPARAMETRE/RESEPTER.....	55
4.3	BLANDEPROSEDYRE	57
4.3.1	Måling av synk og synkutbredelse.....	58
4.4	UTSTØPING I PRØVEFORMER	59
4.4.1	Herding av prøver	59
4.4.2	Trykktesting av prøver	60
4.5	KJEMISK ANALYSE AV FLYGEASKE	61

4.6	BEREGNING AV POZZOLAN AKTIVITETSINDEKS	61
4.7	ETTER NS-EN 450-1	61
4.8	AVVIK VED LABORATORIEARBEID	63
5	RESULTATER.....	65
5.1	FERSK BETONG	65
5.2	RESULTATER FRA KJEMISK ANALYSE AV FLYGEASKE	67
5.3	HERDET BETONG.....	69
5.4	K-FAKTOR.....	71
5.5	– FLYGEASKENS VIRKNINGSGRAD	71
5.6	POZZOLAN AKTIVITETSINDEKS	73
6	DISKUSJON.....	75
6.1	GENERELT, V/B-FORHOLD.....	75
6.2	VISUELT	76
6.3	KJEMISK ANALYSE AV FLYGEASKE	77
6.4	STØPELIGHET	80
6.5	STØRKNING	81
6.6	TRYKKFASTHET	83
6.6.1	<i>Tidligfasthet – 2 døgn.....</i>	<i>83</i>
6.6.2	<i>28-døgnsfasthet</i>	<i>84</i>
6.6.3	<i>56- og 90 døgnsfasthet.....</i>	<i>85</i>
6.6.4	<i>Kommentarer til fasthetsresultatene</i>	<i>85</i>
6.7	PORESTRUKTUR.....	87
6.8	VURDERING AV BEREGNEDE K-FAKTORER	88
6.8.1	<i>Illustrasjon av negative k-faktorer.....</i>	<i>89</i>
6.9	POZZOLAN AKTIVITETSINDEKS	90
7	KONKLUSJONER	91
8	VIDERE ARBEID	93
9	FEILKILDER	95
	LITTERATURLISTE	97
10	VEDLEGG.....	I
10.1	BETONGSAMMENSETNING OG BLANDERESEPTER	I
10.2	FORKLARING AV UTREGNINGER	II
10.3	– BENYTTET FORMELVERK	II

10.3.1	<i>Betongsammensetning referansesstøp – 0 % FA</i>	<i>vi</i>
10.3.2	<i>Betongsammensetning – 10 % FA</i>	<i>vii</i>
10.3.3	<i>Betongsammensetning – 20 % FA</i>	<i>viii</i>
10.3.4	<i>Betongsammensetning – 30 % FA</i>	<i>ix</i>
10.3.5	<i>Betongsammensetning – 40 % FA</i>	<i>x</i>
10.3.6	<i>Betongsammensetning – 50 % FA</i>	<i>xi</i>
10.4	FULLSTENDIGE RESULTATER FRA ANALYSE AV FLYGEASKE FRA FLISFYRINGSANLEGG	XII
10.4.1	<i>Tungmetaller</i>	<i>xii</i>
10.4.2	<i>Oksider</i>	<i>xiii</i>

Figurliste

Figur 3-1 Kheopspyramiden, Giza	4
Figur 3-2 Innsiden av Pantheon, Roma	5
Figur 3-3 Eddystone Lighthouse fra 1759, Plymouth	6
Figur 2-4 Oversikt over produksjonen av sement (Peder Johan Hafsås 2016)	10
Figur 3-5 Grov illustrering av sementkornenes morfologi.....	15
Figur 3-6 Varmeutvikling i hydratiseringen.....	17
Figur 3-7 Eksempel på volumfordelingen i sementpastaen ved blanding og hydratisering	20
Figur 3-8 Volumfordeling i herdet sementpasta avhengig av masseforhold.....	21
Figur 3-9 Betongens flyteegenskaper	23
Figur 3-10 Støpelighet for fersk betong	24
Figur 3-11 Måling av synkmål	27
Figur 3-12 Synkutbredelse	27
Figur 3-13 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -innhold i prosent av total sementvekt for betong.....	46
Figur 4-1 Norcem standardsement (CEM I 42,5 R).....	51
Figur 4-2 Flygeaske fra Skagerak Varme AS, Tønsberg	52
Figur 4-3 Siktekurver for tilslag	54
Figur 4-4 Blanding	57
Figur 4-5 Måling av synkmål	58
Figur 4-6 Herding av prøver i vannbad	59
Figur 4-7 Erichsen hydraulisk trykkpresse.....	60
Figur 5-1 Komposisjonsdiagram.....	66
Figur 5-2 Synkmålets sammenheng mellom askeinnhold og mengde tilsatt SP-stoff.....	66
Figur 5-3 Oversikt over fasthetsutviklingen til betongprøver med ulikt flygeaskeinnhold	70
Figur 5-4 Graf over fasthetsutviklingen til betongprøver med ulikt flygeaskeinnhold.....	70
Figur 5-5 Effektivitetsfaktorens variasjon over tid for de ulike asketilsetningsgradene.....	72

Figur 5-6 Trykkfasthet til mørtelprøver støpt for å finne pozzolan aktivitetsindeks	73
Figur 6-1 Fargeforskjeller på de herdede betongterningene i tørr tilstand.....	76
Figur 6-2 Volumfordeling i herdet sementpasta avhengig av masseforhold.....	87
Figur 6-3 Sammenligning mellom resultatene og Norcems forventede verdier	89

Tabelliste

Tabell 0-1 Ordforklaringer og forkortelser brukt i oppgaven	xvi
Tabell 3-1 Vanlig variasjonsområde for de viktigste oksidene i portlandsement	8
Tabell 3-2 Klinkermineraler i sement	8
Tabell 3-3 Forklaring av punktene på figur 2-4	11
Tabell 3-4 Forklaring av notasjonen i figur 2-7	20
Tabell 3-5 Typisk kjemisk innhold i tysk flygeaske	37
Tabell 3-6 Densiteten til ulike flygeasker fra fying av trebaserte materialer.....	40
Tabell 3-7 Kjemisk komposisjon av flygeaske fra flisfying av ulike treslag.....	41
Tabell 4-1 Korngradering av tilslag	53
Tabell 4-2 Oversikt over utførte støper	55
Tabell 4-3 Blandeparameter for mørtler til test av pozzolan aktivitetsindeks	61
Tabell 5-1 Blandeparametre, synkmål og tilsatt SP-stoff	65
Tabell 5-2 Resultater av kjemisk analyse av flygeaske – pH, uforbrent karbon og tungmetallinnhold.....	67
Tabell 5-3 Resultater fra kjemisk analyse av flygeaske, oksider	68
Tabell 5-4 Oversikt over fastheter i N/mm ² til betongprøver	69
Tabell 5-5 Beregnede k-faktorer for flygeasken ved 2-, 28-, 56-, og 90-dagers herding.....	71
Tabell 5-6 Trykkfasthet for mørtelprøver i N/mm ²	73
Tabell 6-1 Pozzolane oksider	77
Tabell 6-2 Forklaring av verdier i figur 5.2.....	89

Benyttede standardverk

NS-EN 206:2013+NA:2014 «Betong – Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar»

NS-EN 450-1:2012 «Flygeaske for betong – Del 1: Definisjon, spesifikasjoner og samsvarskriterier»

NS-EN 12350-2:2009, «Prøving av fersk betong- Del 2: Synkmål»

NS-EN 12620:2002+A1:2008+NA.2009 – «Tilslag for betong»

NS-EN 933-1:2012 «Prøvmetoder for geometriske egenskaper for tilslag - Del 1: Bestemmelse av kornstørrelsesfordeling – Sikteanalyse»

NS-EN 1008:2002 «Blandevann for betong - Krav til prøvetaking, prøving og vurdering av vannets egnethet, medregnet gjenvunnet vann brukt i betongproduksjonsanlegg, som blandevann for betong»

NS-EN 12390-3:2009 «Prøving av herdet betong – Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet»

NS-EN 196-1, «Sementprøving - Del 1: Bestemmelse av fasthet»

Ordforklaringer og forkortelser

Tabell 0-1 Ordforklaringer og forkortelser brukt i oppgaven

Ord	Forklaring
Bindemiddel	<i>Sement + tilsetningsmaterialer</i>
Tilsetningsmaterialer	<i>Pozzolane materialer som kan brukes til sementerstatning</i>
Pozzolaner	<i>Ikke sementerende materialer som utvikler fasthet ved reaksjon med reaksjonsprodukter fra sementreaksjonene</i>
Sementpasta	<i>Bindemiddel + vann</i>
Flygeaske (FA)	<i>Reststoff fra kullkraftindustrien med pozzolane egenskaper</i>
Norcem Standardsement	<i>Portlandsement CEM – I 42,5 R</i>
Tilslag	<i>Betongens faste stoffer</i>
Tilsetningsstoffer	<i>Stoff som tilsettes betongen for å justere betongens egenskaper i fersk tilstand og/eller størknings- og herdingstider</i>
P/SP-Stoffer	<i>Vannreducerende tilsetningsstoffer</i>
v/c-forhold	<i>Masseforholdet mellom vann og sement i sementpastaen</i>
Masseforhold	<i>v/b-forhold</i>
v/b-forhold, der $b = c + k \cdot p$	<i>Masseforholdet mellom vann og bindemiddel i sementpastaen. Brukes ved pozzolantilsetning, p, som korrigeres for pozzolaners virkningsfaktor, k.</i>
C ₃ S	<i>3CaOSiO₂ – trikalsiumsilikat</i>
C ₂ S	<i>2CaOSiO₂ – dikalsiumsilikat</i>
C ₃ A	<i>3CaOAl₂O₃ – trikalsiumaluminat</i>
C ₄ AF	<i>4CaOAl₂O₃FeO₃ – tetrakalsiumaluminatferritt</i>
Ca(OH) ₂	<i>Kalsiumhydroksid</i>
C-S-H	<i>CaOSiO₂H₂O – kalsiumsilikathydrat (sementgel)</i>
SiO ₂	<i>Silisiumdioksid (silika)</i>
Hydratisering	<i>Sementens reaksjon med vann</i>
Amorf	<i>Materiale eller stoff uten noen bestemt form, glassaktig</i>
In situ	<i>I sine naturlige omgivelser / på det stedet der det oppstod</i>
LOI	<i>«Loss Of Ignition» = andelen uforbrente organiske materialer etter fyring</i>

Liste over formler

Formel 1 Hydratiseringsreaksjon for C_3S	12
Formel 2 Hydratasjonsreaksjon for C_2S	12
Formel 3 Hydratiseringsreaksjon for C_3A (A.M. Neville 2010).....	13
Formel 4 Hydratiseringsreaksjonen for C_3A ved tilsatt gips	13
Formel 5 Beregning av synkutbredelse	27
Formel 6 Trykkfasthet av terningprøver	34
Formel 7 Masseforhold mellom vann og bindemiddel	43
Formel 8 Utledning av beregning av k-faktor, 1 av 3	44
Formel 9 Utledning av beregning av k-faktor, 2 av 3	44
Formel 10 Utledning av beregning av k-faktor, 3 av 3	44
Formel 11 Pozzolanreaksjonen for silika i flygeaske.....	45
Formel 12 Pozzolanreaksjonen for alumina i flygeaske	45
Formel 13 Beregning av pozzolan aktivitetsindeks	48
Formel 14 Beregning av fukt i tilslag.....	54

2 Innledning

2.1 Bakgrunn for oppgaven

Betong, eller betonglignende materialer har blitt brukt som byggemateriale i tusenvis av år og er nå det desidert mest brukte byggematerialet i verden. (Meyer 2002) Selv om det er mange fordeler med betong som byggemateriale medfører den høye bruken også store klimagassutslipp.

Sement er det tradisjonelle bindemidlet i betong og består av knust kalkstein med tilsatte mineraler og produseres ved forbrenning ved høye temperaturer. Denne forbrenningen er veldig energikrevende og er hovedårsaken til det kraftige utslippet av CO₂ ved produksjon av betong. Som en tommelfingerregel sies det at man for hvert tonn produsert sement også produserer ett tonn CO₂. For å redusere CO₂-avtrykket til betongen er det derfor vanlig å erstatte noe av sementen med pozzolaner. Kunnskapen om hvilke materialer som kan brukes som pozzolaner derfor viktig for å kunne gjøre betong til et mindre miljøfiendtlig materiale.

Pozzolaner er silika- og/eller aluminaholdige tilsetningsmaterialer som ikke i seg selv er sementerende, men som utvikler fasthet i reaksjon med restprodukter fra hydratiseringen av sement. Det mest brukte pozzolane tilsetningsmaterialet er flygeaske som stammer fra kullkraftverk. (Shetty 2008) Ved å tilsette pozzolaner i betongen reduseres klimagassutslippet per tonn produsert betong ved at man kan bruke mindre sement i betongen uten at styrken til betongen svekkes nevneverdig. Faktisk kan flygeasketilsett betong over lang tid utvikle høyere fasthet enn en tilsvarende betong uten flygeasketilsetning. (Elsageer et al. 2009)

I Norge har det de siste årene blitt bygd mange store flisfyringsanlegg. Disse brukes til å levere varme til bygninger i anleggenes nærområde. Flygeasken produsert av flisfyringsanleggene er i dag et avfallsproblem og må deponeres som farlig avfall på grunn av det høye innholdet av miljøgifter. Dette er både energikrevende og kostbart for kraftprodusentene.

Det er nærliggende å anta at den trebasert flygeasken vil kunne ha omtrent like egenskaper og inneholde mange av de samme stoffene som flygeaske fra kullkraftverk da kull i realiteten er fossile trær og planter. Det er derfor interessant å undersøke egnetheten til flygeaske fra flisfyringsanlegg som sementerstatning i betong.

Dersom flygeasken viser seg å gi gunstige resultater som tilsetning i betong vil dette kunne nyttiggjøre det som i dag er et avfallsproblem. Siden energien som utvinnes ved

flisfyringsanlegg er fornybar vil betong tilsatt flygeaske fra flisfyringsanlegg samtidig bidra til et enda grønnere klimaregnskap sammenlignet med bruk av kullflygeaske. Dette vil kunne bidra til å oppfylle de stadig strengere klimakravene i byggebransjen.

2.2 Problemstilling

Hovedmålet med denne masteroppgaven er å undersøke om flygeaske fra flisfyringsanlegg kan brukes som sementerstatning i betong på samme måte som flygeaske fra brenning av pulverisert kull.

Overordnet problemstilling:

- *Kan flygeaske fra flisfyringsanlegg benyttes som pozzolan i betong?*

Underordnede problemstillinger:

- *Hvordan påvirkes trykkfastheten til betongen av tilsetning av flygeaske fra flisfyring?*
- *Hva er virkningsgraden til flygeaske fra flisfyring?*
- *Hvordan påvirker tilsetning av flygeaske fra flisfyring betongens støpelighet?*

2.3 Avgrensninger

Oppgaven vurderer egnetheten til flygeaske fra flisfyringsanlegg som sementerstatning i betong. Det er fokusert på betongens trykkfasthet og trykkfasthetsutviklingen over tid ved tilsetning av ulike flygeaskemengder. Det er ikke utført tester av andre mekaniske egenskaper.

I den testede betongen er det av logistiske og tidsmessige årsaker kun tilsatt flygeaske fra ett flisfyringsanlegg. Av samme årsak er fasthetsprøvingen utført med en tidshorisont på 90 dager.

3 Teori

Betong er et uorganisk materiale som blir til ved å blande tilslagsmaterialer, sement og vann. I fersk tilstand er betong plastisk og formbart, mens den ferdig herdede betongen er hard med høy trykkfasthet. Blandingen av sement og vann vil ved hjelp av ulike kjemiske reaksjoner danne det som på fagspråket kalles sementpasta. Dette er et bindemiddel som fungerer som et «lim» som fester tilslagsmaterialene sammen. Tilslagsmaterialene som benyttes i blandingen er pukk, grus og sand i ulike størrelser, og utgjør vanligvis omtrent tre fjerdedeler av volumet til betongen. De viktigste egenskapene til betong er den høye trykkfastheten og den gode bestandigheten (lang levetid), disse egenskapene vil for en god betong være like god som for naturstein. (Herholdt et al. 1985)

Den dårlige strekkfastheten er svakheten til betong, den ligger normalt mellom $1/10$ og $1/20$ av trykkfastheten. For at betongkonstruksjoner skal kunne oppta strekkrefter må man armere strekkpåkjent betong. Dette gjøres vanligvis ved å legge inn stålarmoring i den strekkbelastede sonen til betongtverrsnittet, men kan også gjøres ved å fiberarmere betongblandingen.

3.1 Historie

Betong som vi kjenner det i dag er et relativt nytt byggemateriale, men om man går lenger tilbake i historien finner man eksempler på materialer med tilsvarende formål som nåtidens betong. Prinsippet med å «lime» steiner sammen har vært brukt i konstruksjoner i tusenvis av år, det er måten det blir gjort på og materialene som blir brukt som har endret seg med tiden.

Først ute var oldtidens egyptere som benyttet seg av mørtel bestående av sand og brent gips som bindemiddel mellom steinene i pyramidene. Slik mørtel ble blant annet brukt i Kheopspyramiden i Giza som ble bygd ca. 2500 f.Kr. (Lea 1998).



Figur 3-1 Kheopspyramiden, Giza
Foto: David Stanley (med tillatelse)

Det var grekerne og romerne som introduserte bruken av pulverisert kalkstein som sement. Kalksteinen ble brent og tilsatt vulkansk aske, noe som resulterte i et hydraulisk bindemiddel. Et hydraulisk bindemiddel kjennetegnes ved at den kan herde i reaksjon med- og under vann. (Herholdt et al. 1985). Den mest kjente vulkanske asken kom fra byen Pozzuoli i det som nå er Italia. Dette er opphavet til betegnelsen «pozzolaner» i betongsammenheng. Pozzolaner er en fellesbetegnelse på stoffer som reagerer med kalsiumhydroksid fra sementreaksjonen og dermed bidrar til økt styrke og tetthet av betongen. Et av de mest kjente og best bevarte eksemplene på romernes bruk av betong, er Pantheonkuppelen i Roma, bygd på 100-tallet. (Herholdt et al. 1985)



Figur 3-2 Innsiden av Pantheon, Roma
Foto: Darren Flinders (med tillatelse)

Etter romertidens fall ble kvaliteten på betongen stadig dårligere, og kunnskapen om å brenne kalkstein ble nesten tapt i perioden 800-1100 e.Kr. (Lea 1998). Selv om kvaliteten tok seg opp igjen fra 1200-tallet og at den på 1500-tallet var veldig god, var det ikke før på 1700-tallet man skulle få se en ny revolusjon i kunnskapen om sement (Kurdowski 2014). I 1756 ble den engelske byggingeniøren John Smeaton bedt om å konstruere et nytt fyrtårn på Eddystone Rock på sørkysten av England etter at det gamle ble ødelagt i brann. På grunn av de harde værforholdene bestemte han seg for å gjøre undersøker for å finne et bygningsmateriale som tålte påkjennningene fra bølger og vind. Han undersøkte kalk fra ulike forekomster for å finne det best egnede materialet til fyrtårnet. Etter å ha kjemisk analysert den kalken som ga de beste resultatene oppdaget han at den var svært leirholdig. Fyrtårnet ble til slutt bygd med sementen blandet halvt om halvt med vulkanske pozzolaner fra Civita Vecchia i Italia. Fyrtårnet ble bygd i 1759 og var i bruk fram til 1870-tallet da det ble oppdaget sprekker i fjellet det stod på, det ble senere demontert og står nå som et berømt landemerke i Plymouth (Lea 1998).

Mot slutten av 1700-tallet ble «Roman Cement» utviklet i England, den ble patentert av James Parker og var et produkt av brent mergel, som er en kalkholdig leirart. Den ble kalt «romersk

sement» fordi den hadde hydrauliske egenskaper, noe også den originale romerske mørtelen hadde. «Roman cement» var hurtigstørkende og var derfor godt egnet for betong som var i kontakt med vann (Lea 1998).



Figur 3-3 Eddystone Lighthouse fra 1759, Plymouth
Foto: Reading Tom (med tillatelse)

Det var mureren Joseph Aspdin som i 1824 tok patent på «Portland cement». Aspdins sement ble til gjennom å brenne en blanding av kalksteinsmel og leire i en ovn for å sintre den til klinker (Sørensen 2012). Sementen fikk navnet portlandsement fordi disse klinkersteinene lignet på steiner fra Isle of Portland som var populære byggesteiner på den tiden. Sementen ble til gjennom å male klinkeren ned til pulverform. Kvaliteten på Aspdins portlandsement var imidlertid ikke spesielt god da han ikke klarte å brenne materialene på høy nok temperatur. (Kurdowski 2014)

Portlandsementen ble over tid videreutviklet, og i 1845 klarte Isaac Charles Johnson etter mange forsøk å finne det ideelle blandingsforholdet mellom kalkstein og leire og samtidig fyre på høyere temperatur (Kurdowski 2014). Denne produksjonen ga en mye bedre sement enn noen annen tidligere produksjon hadde gjort. (Herholdt et al. 1985).

Etter hvert som tiden gikk ble sementproduksjonen modernisert og tilpasset den stadig økende etterspørselen. Kvaliteten har økt etter hvert som kunnskapen har blitt bedre, blant annet skjer produksjonen nå i roterovner som holder mye høyere temperaturer enn det man klarte på 1800-tallet. Dette gjør at klinkerprosessen går fortere, roterovnene gjorde det samtidig mulig å produsere sement kontinuerlig, og ikke i partier som man måtte i de gamle ovnene (Lea 1998). Produksjonen av dagens portlandsement er nærmere forklart i kapittel 2.2.

3.2 Sement

Sement er det tradisjonelle bindemidlet i betong. I tillegg til portlandsement finnes det flere ulike sementtyper som hver er tilpasset kundens behov. Disse behovene kan dreie seg om bestandighet, herdetider, miljømessige forhold eller estetiske forhold. I denne oppgaven er det imidlertid fokusert på portlandsement type I (CEM I), som er sett på som den allsidige sementen med middels fasthets- og varmeutvikling.

Tabell 3-1 Vanlig variasjonsområde for de viktigste oksidene i portlandsement (Maage 2015)

Oksid	Kjemisk navn	Variasjonsområde
SiO ₂	Silisiumdioksid	17 – 24 %
Al ₂ O ₃	Aluminiumoksid	4 – 7 %
Fe ₂ O ₃	Jernoksid	1,5 – 5 %
CaO	Kalsiumoksid	60 – 67 %
MgO	Magnesiumoksid	1 – 5 %
SO ₃	Svoveltrioksid	1,5 – 3 %
K ₂ O + Na ₂ O	Kaliumoksid + natriumoksid	0,2 – 1,5 %

Sement består av fire hovedklinkermineraler, disse er presentert i tabell 2-2. Sementens egenskaper varierer avhengig av mengdeforholdene mellom disse klinkermineralene. For eksempel vil en sement med redusert C₃A-innhold være gunstig når betongen må ha stor motstand mot sulfater. (Claisse 2016)

Tabell 3-2 Klinkermineraler i sement

Navn på forbindelse	Oksidsammensetning	Forkortelse
Trikalsiumsilikat	3CaO·SiO ₂	C ₃ S
Dikalsiumsilikat	2CaO·SiO ₂	C ₂ S
Trikalsiumaluminat	3CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A
Tetrakalsiumaluminatferritt	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Forkortelsene blir brukt av sementkjemikere og forkorter hvert oksid til én bokstav, for eksempel: CaO = C, SiO₂ = S og Fe₂O₃ = F.

De fire klinkermineralene utgjør 90-95 % av portlandsementen. De resterende 5-10 % er fri kalk, magnesiumoksid (MgO), kalium (K₂O) - og natriumoksid (Na₂O) i tillegg til tilsatt gips. CaO og MgO kan gi ekspansjon i betong, mens K₂O og Na₂O er alkalier som påvirker tidligfasthet og bestandighet i betong. (Maage 1998)

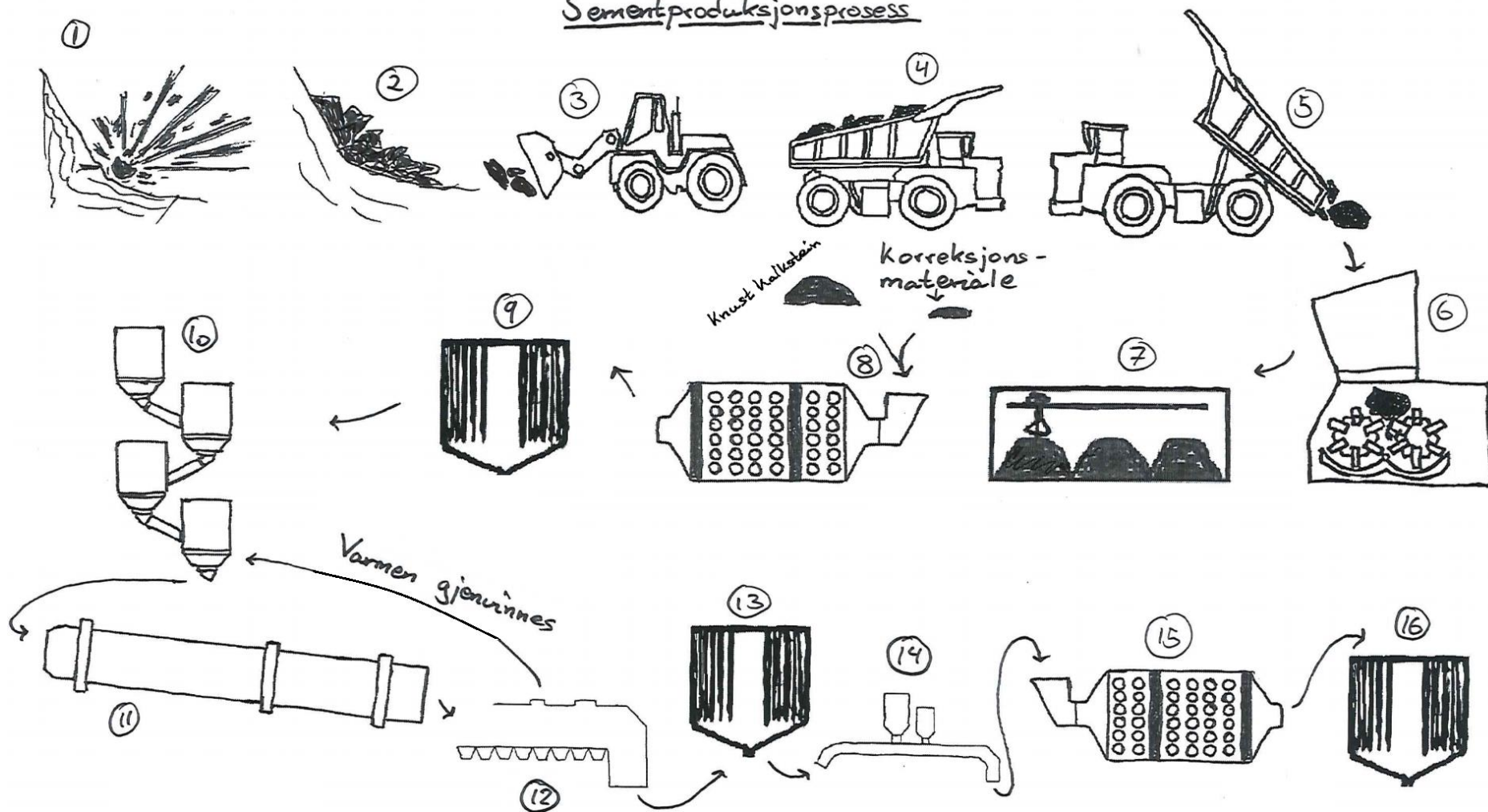
3.2.1 Sementproduksjon

Hovedråmaterialet til portlandsement er kalkholdige mineraler i form av kalkstein og mergel. I tillegg tilsettes aluminiumsoksid (bauksitt), jernoksid (kisavbrann), silisiumdioksid (kvarts) og gips for å oppnå de ønskede sementegenskapene. Kalkstein forekommer naturlig og kan utvinnes fra fjell enten i dagbrudd eller i gruver. Kalksteinen knuses på utvinningsstedet og transporteres til sementfabrikken som ofte ligger like ved kalkforekomsten. Kalksteinen tilsettes korreksjonsmaterialene bauksitt, kvarts og kisavbrann i pulverform og males opp til et fint pulver. Det oppmalte pulveret blandes så i en râmølle før det lagres i râmelsiloen. Fra siloen mates râmelet kontinuerlig inn i sykklonene som forvarmer râmelet før det føres inn i roterovnen. Formålet til roterovnen er å lage sementklinker med de kjemiske egenskapene man ønsker at sementen skal ha. Roterovnen er lang og sylindrerformet med helling som tvinger alt râmelet gjennom hele ovnen og ut i andre enden. Temperaturen er stigende gjennom roterovnen med den høyeste temperatur på ca. 1500°C i enden av ovnen. Gjennom å varme opp râmelet til så høye temperaturer skjer en sintring av râmelet. Sintring er en faseovergang der mineraler i pulverform herder til fast form, dette skjer ved diffusjon når temperaturen er like under smeltepunktet for det aktuelle materialet. For râmelet skjer denne faseovergangen i to steg: Ved lav temperatur på ca. 1300 °C, og ved høy temperatur på ca. 1500 °C. Ved lav temperatur skjer faseovergangen for det meste i fast form med bare en liten andel av râmelet smeltet til væskeform. Man antar at klinkermineralene C_2S , C_3A og C_4AF framkommer ved faseovergang ved lav temperatur, mens C_3S blir til ved høy temperatur. (Kurdowski 2014) Râmelet blandes ved å rotere ovnen mens sintringsprosessen pågår, noe som fører til at râmelet klumper seg til små harde kuler som kan minne om lecakuler, disse kulene kalles portlandklinker. Etter roterovnbehandlingen avkjøles klinkerne og varmen gjenvinnes til å forvarme en ny ladning med râmél før det tilsettes roterovnen.

Etter at avkjølingen males klinkeret til pulverform. Før nedmalingen tilsettes gips og eventuell flygeaske. Gipsen må tilsettes for å ha kontroll på størkningen til sementen. Dersom sementen ikke tilsettes gips vil den størkne med en gang den kommer i kontakt med vann («flash set»). (Maage 1998) Finheten til den ferdige sementen bestemmes ved å justere nedmalingstiden.

En oversikt over produksjonsprosessen for portlandsement er gitt i figur 2-4 med forklaringer i tabell 2-1.

Sementproduksjonsprosess



Figur 3-4 Oversikt over produksjonen av sement (Peder Johan Hafsås 2016)

Tabell 3-3 Forklaring av punktene på figur 2-4

Punkt på figur 2-4	Prosessoperasjon
1	Kalkstein sprenges fra dagbrudd eller gruver
2-5	Materialene lastes og transporteres til produksjonssted
6	Knusing
7	Knust kalkstein lagres i steinlagre
8	Knust kalkstein og korreksjonsmaterialer males til pulver i råmølle
9	Lagring av råmel i råmelsilo
10	Forvarming av råmel i sykkloner
11	Oppvarmet råmel mates inn i roterovnen der det sintres til sementklinker
12	Avkjøling av sementklinker, varmen gjenvinnes
13	Lagring av klinker i klinkersilo
14	Tilsetning av gips og eventuell flygeaske
15	Knusing av sementklinker til sementpulver
16	Den ferdige sementen lagres i sementsiloer i påvente av distribusjon

Fyringen av roterovnen er en veldig energikrevende prosess og er hovedårsaken til det høye klimagassutslippet per tonn produsert sement. For å redusere utslipp er det vanlig å benytte avfall fra annen industri som brensel. For eksempel fyres roterovnen til Norcem på Brevik blant annet med spillolje, beinmel og avfallsstoffer fra aluminiumsindustrien i form av brukte anoder. (Holen et al. 2014)

De fire klinkermineralene utgjør 90-95 % av portlandsementen. De resterende 5-10 % er fri kalk, magnesiumoksid (MgO), kalium (K₂O) - og natriumoksid (Na₂O) i tillegg til tilsatt gips. CaO og MgO kan gi ekspansjon i betong, mens K₂O og Na₂O er alkalier som påvirker tidligfasthet og bestandighet i betong. (Maage 1998)

3.3 Hydratisering

For å få en god betong er man avhengig av at bindemiddelet oppnår en viss styrke samtidig som det binder tilslagsmaterialene godt sammen. I betong er det reaksjonen mellom sementen og det tilsatte vannet som over tid gir denne styrken, denne reaksjonen kalles hydratisering. Styrken til den ferdige betongen påvirkes i stor grad av hydratiseringsprosessen som er nærmere forklart i neste kapittel.

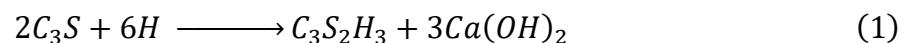
3.3.1 Kjemiske reaksjoner

Blanding av sement og vann fører til flere kjemiske reaksjoner. Silikatene og aluminatene i sementen som er presentert i tabell 2-2 reagerer med vannet og produserer hydrater som over tid vil omdannes til fast stoff.

Kalsiumsilikatene C_3S og C_2S utgjør mesteparten av klinkermineralene i sementen, av de to er det C_3S som hydratiserer raskest. Derfor har C_3S mest å si for tidligfastheten mens C_2S bidrar til fasthetsutvikling over tid.

Hydratiseringen av kalsiumsilikatene gir et produkt som kan forklares med disse kjemiske likningene med respektive masse i hakeparentes:

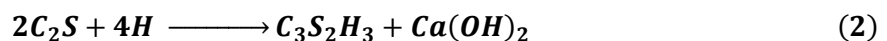
Formel 1 Hydratiseringsreaksjon for C_3S (A.M. Neville 2010)



Tilsvarende:

Trikalsiumsilikat[100] + Vann[24] → Kalsiumsilikathydrat[75] + Kalsiumhydroksid[49]

Formel 2 Hydratasjonsreaksjon for C_2S (A.M. Neville 2010)



Tilsvarende:

Dikalsiumsilikat[100] + Vann[21] → Kalsiumsilikathydrat[99] + Kalsiumhydroksid[22]

Fra de kjemiske ligningene kan man lese at begge de to silikatene behøver ca. den samme vannmengden for å hydratisere, men at hydratasjonsproduktet blir noe ulikt. Begge produserer det mikrokrySTALLINSKE hydratet kalsiumhydrat ($C_3S_2H_3$). Begge produserer også biproduktet $Ca(OH)_2$ (kalk) som er krystaller av kalsiumhydroksid. Som man kan se av ligningene vil hydratisering av C_3S gi over dobbelt så mye $Ca(OH)_2$ enn det hydratasjon av C_2S gjør.

$C_3S_2H_3$ (forkortes heretter til C-S-H) har høy fasthet og gir styrke til betongen mens overskuddskalket $Ca(OH)_2$ ikke bidrar til fasthetsutvikling (Sørensen 2012). Kalk er likevel ikke nødvendigvis en ulempe i betongen da det er en sterk base som bidrar til å holde pH-nivået i betongen høyt beskytte stålarmoring mot korrosjon. (NTPC 2007)

Sement består også av små mengder av aluminatet C_3A som bidrar til fasthetsutvikling i starten av hydratiseringen. Som man kan se av de respektive massene i hakeparentesene forbruker hydratasjonsreaksjonen av C_3A vesentlig mer vann enn reaksjonene til silikatene. (A.M. Neville 2010)

Formel 3 Hydratiseringsreaksjon for C_3A (A.M. Neville 2010)

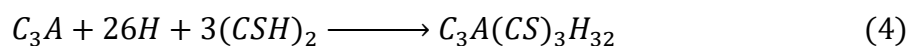


Tilsvarende:

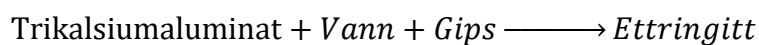


På grunn av den ekstremt hurtige reaksjonen mellom C_3A og vann må det som tidligere nevnt tilsettes gips i sementen for å bremse reaksjonen. Dersom det ikke blir gjort vil sementen bli hard med en gang («flash set») og vil måtte forkastes på grunn av at man mister all støpelighet i betongen. Siden all portlandsement tilsettes gips er dette også hovedreaksjonen for C_3A (formel 4).

Formel 4 Hydratiseringsreaksjonen for C_3A ved tilsatt gips (NTPC 2007)



Tilsvarende:



Først når all tilsatt gips er brukt opp, noe som skjer i løpet av det første døgnet etter blandingen, starter reaksjonen i formel 3. Dersom all gips i sementen reagerer før C_3A er brukt opp vil ettringitten dannet i reaksjonen med tilsatt vann bli omdannet til det sulfatfattigere C_4ASH_{14} . De fleste sementtyper inneholder ikke nok gips til å reagere med alt av C_3A i sementen (Thomas & Jennings u.å.)

Hydratiseringsreaksjonene er eksoterme, dvs. at reaksjonene frigjør varme. Spesielt frigjør reaksjonen mellom C_3A og vann store mengder varme i løpet av de første dagers hydratasjon

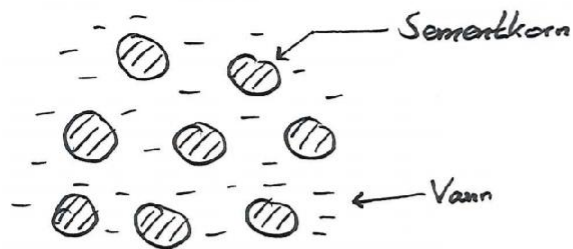
og herding. Denne varmeutviklingen bidrar til betongens tidligfasthet fordi den økte temperaturen framskynder reaksjonen mellom C_3S og vann (Sørensen 2012). Varmeutviklingen fra hydratiseringen er illustrert i figur 2-6.

C_4AF finnes i små mengder i sement og påvirker ikke sementpastaens styrkeutvikling i stor grad sammenlignet med de tre andre oksidene. (Herholdt et al. 1985) C_4AF reagerer på samme måte som C_3A , men reaksjonen tar lengre tid. Grunnen til dette er at noen av aluminiumoksidene er byttet ut med jernoksid. Reaktiviteten til C_4AF varierer derfor avhengig av forholdet Al/Fe i sementen. Ved økende jerninnhold vil reaktiviteten til C_4AF generelt reduseres. (Lea 1998).

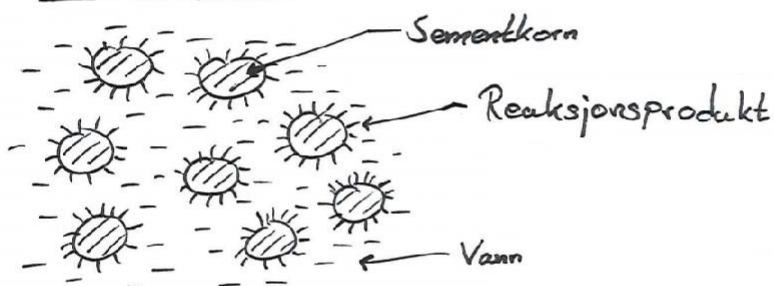
3.3.2 Morfologi

Ved blanding av sement og vann får man det som på fagspråket kalles sementpasta, dette er bindemiddelet, eller «limet» i betongen. Dette delkapitlet tar i grove trekk for seg de fysiske endringene i sementpastaen i overgangen fra fersk til herdet tilstand.

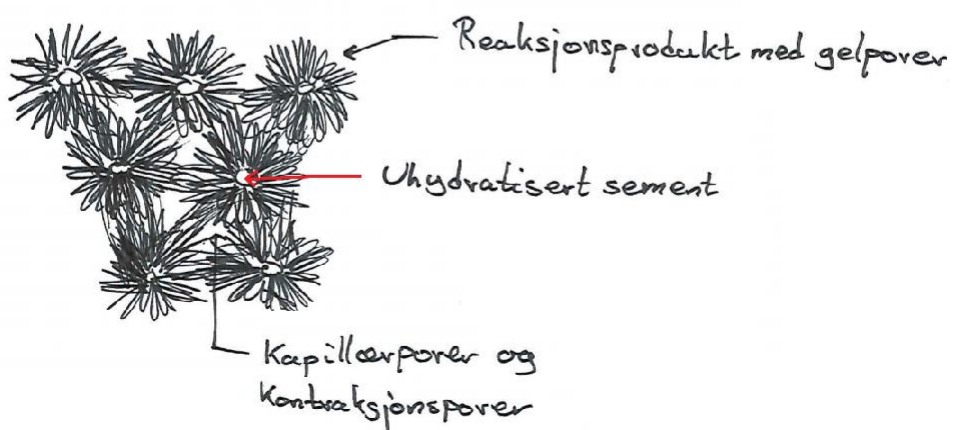
Fersk sementpasta



Størkningsstasen



Herdet sementpasta

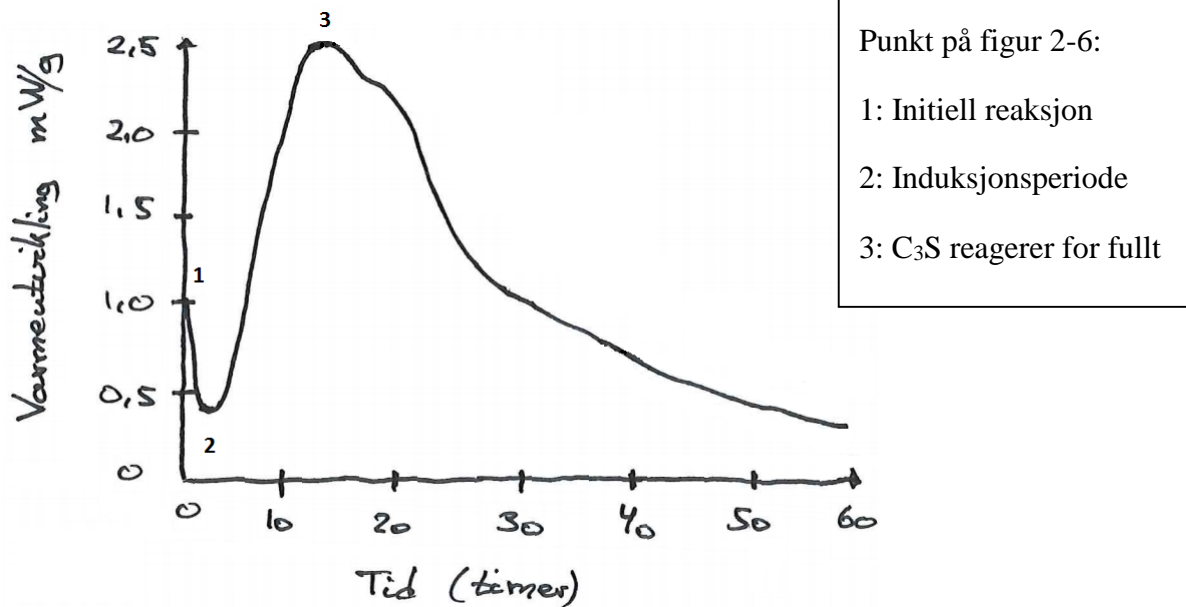


Figur 3-5 Grov illustrering av sementkornenes morfologi (Peder Johan Hafsås 2016)

Etter blandingen fordeler sementkornene seg jevnt som vist på figur 2-5. Med en gang sementkornene kommer i kontakt med vann starter de kjemiske reaksjonene som er forklart i kapittel 2.3.1. Det første som skjer etter blandingen er at det dannes et «gel-lag» på overflaten av sementkornene. (Lamond & Pielert 2006) Dette gel-laget kommer fra oppløsningen av gips og de mest reaktive, og dermed også lettest løselige klinkermineralene C_3A og C_3S . (Thomas & Jennings u.å.). Gel-laget er derfor rikt på alumina og silika, men består også av betydelige mengder kalsiumsulfat. Ca. 10 minutter etter blandingen oppstår det nåleformede ettringittkrystaller som krystalliserer seg på gel-overflaten, i selve gel-laget og også utenfor gel-laget. Disse ettringittkrystallene er små, ca. 250 nm lange og 150 nm tykke (Taylor 1997).

Ettringitt kommer fra reaksjonen til C_3A og gips med vann, og fungerer som et beskyttende lag rundt sementkornene. Ettringitt er avgjørende for å at ikke pastaen skal størkne for hurtig (Sørensen 2012).

Etter at ettringittlaget har lagt seg rundt sementkornene følger en periode på en til to timer der det ikke skjer særlig mye i sementpastaen. Denne perioden kalles induksjonsfasen og er illustrert på figur 2-6 som punkt 2, i denne perioden er det liten varmeutvikling. Betongen vil i denne perioden forholde seg plastisk, noe som helt avgjørende for at det skal være mulig å transportere, støpe ut og bearbeide betongen på byggeplass. Man har enda ikke klart å samle seg om en måte og forklare hvorfor hydratasjonen stopper opp en stund etter den initielle reaksjonen, men Taylor beskriver fire mulige teorier. Alle disse teoriene baserer seg på det beskyttende ettringittlaget som legger seg rundt sementkornene, men de har noe ulike mekanismer. (Taylor 1997). Thomas & Jennings mener den fjerde teorien er den mest sannsynlige, den lyder: «... et tynt kontinuerlig lag av hydratasjonsprodukter dannes på partiklene, som hindrer C_3S fra å løse seg opp». (Taylor 1997) (Thomas & Jennings u.å.)



Figur 3-6 Varmeutvikling i hydratiseringen (Peder Johan Hafsås 2016, inspirert av (Taylor 1997))

Avbindingen, eller størkningen, starter ca. tre timer etter blandingen. Da øker hydratiseringsgraden og dermed også varmeutviklingen betydelig, årsaken er at C₃S-mineralene i sementen nå reagerer for fullt med vannet. Størkningsperioden er illustrert på figur 2-6 som perioden fra ca. 3 til 12 timer etter blandingen. Produktet fra reaksjonen mellom C₃S og vann er sementgel bestående av C-S-H og CH. C-S-H fra C₃S-reaksjonen legger seg rundt sementkornene som et ytre produkt på ettringittkrystallene, dette laget vil krystallisere seg og fortsette å vokse utover fra sementkornene etter hvert som hydratiseringen skrider frem. (Taylor 1997) C-S-H danner derfor et fortykkende lag rundt sementkornene (Lamond & Pielert 2006). Etter hvert som C-S-H-krystallene vokser ut fra sementkornene forbrukes det frie kapillærvannet til hydratiseringsreaksjonen og plastisiteten til pastaen minkes gradvis. Dette medfører en kontinuerlig og relativt hurtig deponering av hydratiseringsprodukter (først og fremst C-S-H-gel og CH) inn i de vannfylte kapillærporene. Dette fører til en reduksjon av det totale porevolumet, og en derav påfølgende styrkeøkning. (Thomas & Jennings u.å.)

Avbindingstiden er over når nålene fra reaksjonsproduktene vokser inn i hverandre (Maage 1998). Dette vil være omtrent samtidig som varmeutviklingen er på det kraftigste i betongen (punkt 3 i figur 2-6), noe som forekommer omtrent 10 timer etter blandingen, men varierer avhengig av sementtype, herdetemperatur og tilsetningsstoffer. (A.M. Neville 2010)

Etter perioden med hurtig hydratisering og mye varmeutvikling, vil den resterende hydratisering forløpe stadig langsommere. Dette illustreres på figur 2-6 ved gradvis minkende varmeutvikling etter avbindingen. Grunnen til dette er at den lettest tilgjengelige sementen nå har reagert med vannet og dannet reaksjonsprodukter av C-S-H gel og CH som «innkapsler» den ikke reagerte sementkjernen. For videre hydratisering må derfor de ikke reagerte sementkjernene tilføres vann fra diffusjon gjennom skorpen av reaksjonsprodukter på sementkornoverflatene. Reaksjonene tvinges dermed til å foregå «in situ». Dette medfører at reaksjonene forløper stadig langsommere, eventuelt at hydratasjonen går helt i stå før sementen all sementen er reagert. (Herholdt et al. 1985).

At sementen reagerer «in situ» vil si at hydratiseringen foregår i selve sementkjernen, reaksjonsproduktene vokser med andre ord innover mot den ikke reagerte sementen i kjernen av sementkornet.

Etter et par uker er mesteparten av sementen omdannet til reaksjonsprodukter, etter dette vil herdingen gå stadig langsommere etter som det er mindre og mindre uhydratisert sement tilgjengelig for reaksjon i betongen. Herdeprosessen fortsetter så lenge det er uhydratiserte sementkorn og fuktighet tilgjengelig til hydratisering, først etter et års tid vil betongen nå sin maksimale styrke.

3.3.3 Porestruktur

Betong er et materiale med en betydelig forekomst av porer som har stor betydning for betongens egenskaper. Styrken til betongen reduseres etter hvert som porevolumandelen økes.

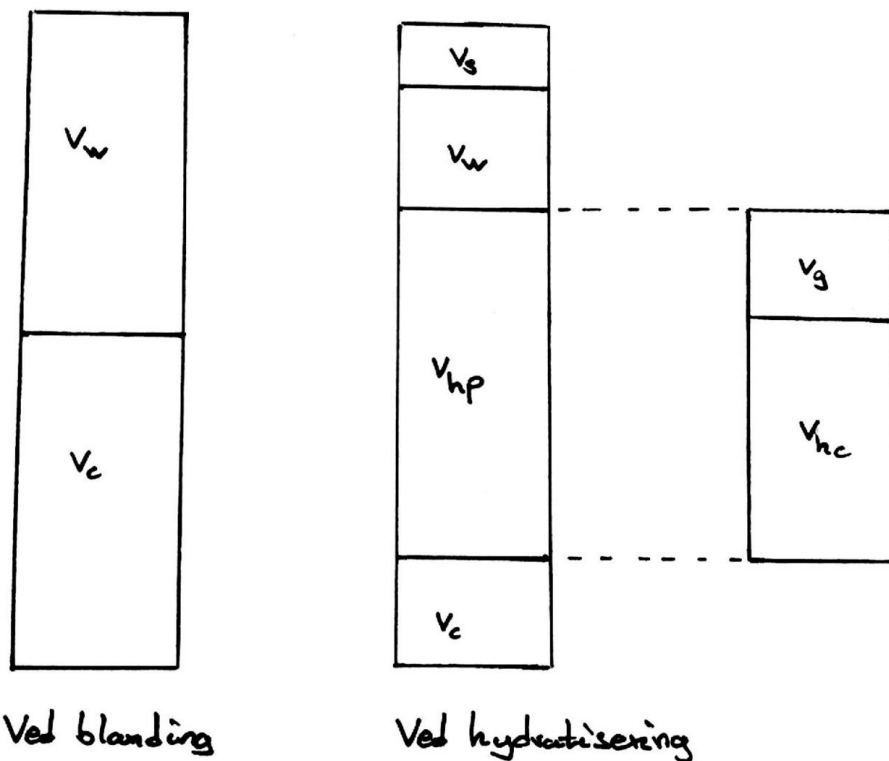
Porer forekommer på ulike måter i betong, men de med størst volumandel er gelporer og kapillærporer i sementpastaen. I tillegg vil det være porer i betongen som følge av tilslagsmaterialenes porøsitet, tilsatt luft til frostsikring og eventuelt innkapslet luft som følge av dårlig komprimering av den ferske betongen.

Andelen av de ulike porene i betong kan forklares med mengden av vann i forhold til sement i betongen. Powers og Brownyard utviklet i 1947 en modell der konseptet med gelvann og kjemisk bundet vann ble introdusert. Modellen var et resultat av flere års laboratorietesting av ulike sementtyper med mange ulike v/b-tall med ulike herdningstider. Denne modellen ble senere videreutviklet og er fortsatt gjeldende teori i dag.

Ifølge Powers-Brownyard-modellen vil vann tilsvarende ca. 23 % av sementvekten bli bundet kjemisk til produksjon av sementgel for en fullstendig hydratisert betong. Dette er altså den vannmengden som forbrukes til å lage sementgelpartikler i vann/sement-reaksjonen (Powers & Brownyard 1948). På grunn av at reaksjonsproduktene, har høyere densitet enn den tilsvarende mengden reagenter (vann og sement) før blandingen, skjer det en volumreduksjon i betongen etter hydratiseringen. (Herholdt et al. 1985) Denne volumreduksjonen kalles «kjemisk svinn» og tilsvarer ifølge Powers-Brownyard modellen ca. 25 % av volumet til det kjemisk bundne vannet. Kjemisk svinn påvirker ikke det ytre volumet til betongen siden dette allerede er «låst» etter avbindingen, men gjør seg heller gjeldende i form av kontraksjonsporer inne i betongen. Kontraksjonsporer er forholdsvis store luftfylte porer, og utgjør normalt ikke mer enn 2 % av det totale betongvolumet. (Maage 2015)

Sementgel er én del av sementpastaen. Den andre komponenten er restene etter det originale vannfylte volumet som enda ikke er blitt fylt med sementgel, altså kapillærporer. (Powers 1960) Kapillærporer er det vannfylte volumet i fersk betong som etter hvert som hydratiseringen skrider frem blir fylt opp av sementgelen som vokser ut fra sementkornene. Kapillærporevolumet i sementpastaen reduseres altså etter hvert som sementen hydratiserer. Kapillærporer har omtrent samme størrelse som kontraksjonsporene, altså et tverrmål på mellom 2 nm og 5 μm . (Herholdt et al. 1985). På grunn av at kapillærkreftene mellom vann og

porer er størst i de minste porene, vil overskuddsvannet befinne seg i de til enhver tid minste porene minste kapillærporene, det er altså de største porene som tømmes først. (Maage 2015)



Figur 3-7 Eksempel på volumfordelingen i sementpastaen ved blanding og hydratisering (Peder Johan Hafsås 2016, etter (Powers & Brownyard 1948))

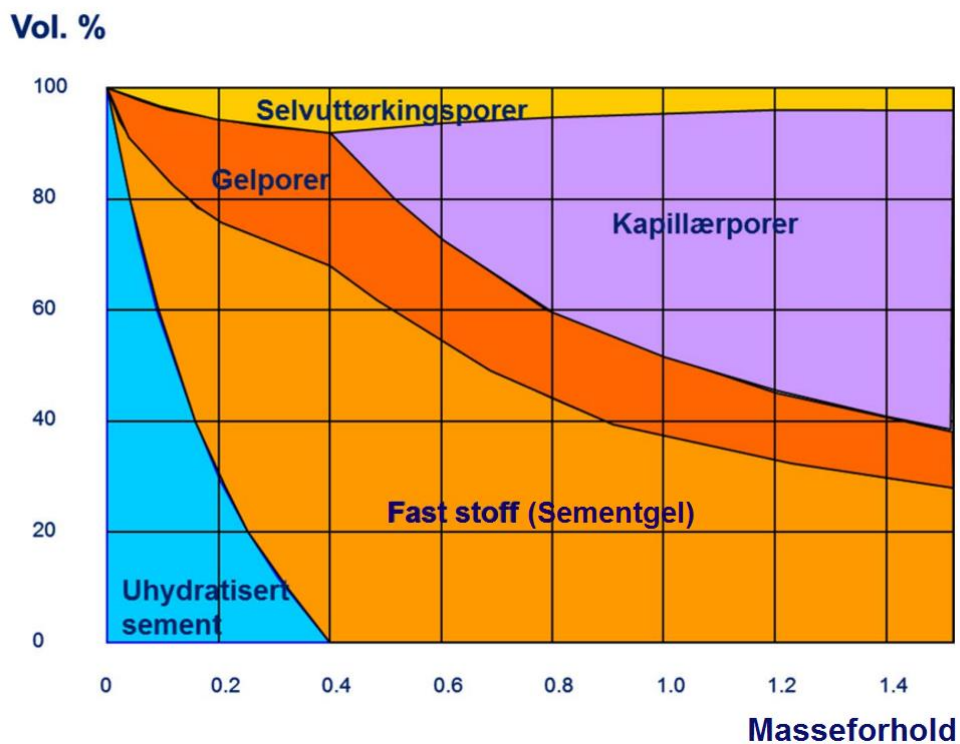
Tabell 3-4 Forklaring av notasjonen i figur 2-7

Notasjon	Forklaring
V_w	Volumet til fritt porevann (kapillærvann)
V_c	Volum av ikke reagert sement
V_s	Volumkrymping (kjemisk svinn)
V_{hp}	Volum av hydratasjonsprodukt
V_g	Volum av gelporer/gelvann
V_{hc}	Volum av hydratisert sement

Powers-Brownyard modellen forteller at vann tilsvarende ca. 18 % av vekten til den reagerte sementen bindes fysisk til sementgelen og dermed ikke gjøres tilgjengelig til hydratasjon. Dette vannet adsorberes, i små gelporer med en størrelse på mellom 0,5 og 2 nm (Powers & Brownyard 1948). På grunn av at vannmolekyler har en størrelse på ca. 0,25 nm vil det ikke bli

plass til mange vannmolekyler i hver pore, dette fører til ekstreme overflatekrefter mellom vannet og poreveggen. (Aligizaki 2006) Hver sementgelpartikkel binder til seg en liten mengde gelvann i gelporene. På grunn av den kraftige adsorpsjonen fra porene vil dette vannet ikke lenger stå til rådighet for den fortsatte hydratiseringen. Det totale volumet gelporer øker etter hvert som hydratiseringen skrider frem etter som det blir dannet stadig mer sementgel.

V/b-forholdet er altså avgjørende for porøsiteten og hydratiseringsgraden til den herdede betongen. Dette er illustrert i figur 2-8. Betong må ha et v/b-tall på minst 0,41 for å få fullstendig hydratisering av sementen. Grunnen til dette kan forklares med modellen til Powers og Brownyard der de kom fram til at vann tilsvarende ca. v/b 0,23 bindes kjemisk og vann tilsvarende ca. v/b 0,18 bindes fysisk som gelvann. (Powers & Brownyard 1948) Hydratiseringen vil altså fortsette kun så lenge reaksjonsproduktene er mettet med gelvann og det er fritt kapillærvann og ikke reagert sement til rådighet.



Figur 3-8 Volumfordeling i herdet sementpasta avhengig av masseforhold (Med tillatelse fra Bård Arntsen, Norut)

Ved v/b-tall lavere enn ca. 0,41 vil hydratasjonen stoppe opp før all sementen har reagert og det vil være en viss mengde uhydratisert sement i den herdede betongen. Grunnen til dette er at det ikke vil være nok vann i forhold sement til at all sementen kan hydratisere. Betong med uhydratisert sement har likevel høyere fasthet enn en betong med v/b på 0,41 med tilnærmet fullstendig hydratisering siden den uhydratiserte sementen har høyere fasthet enn reagert sement (Sørensen 2012). Med andre ord er det ikke nødvendig å oppnå fullstendig hydratasjon for å få en sterk betong, de uhydratiserte sementkjernene vil uansett ha et lag av reaksjonsprodukter rundt seg som binder sammen betongen. Betonger med lavt v/b-tall vil samtidig ha en lavere kapillarporøsitet. Problemet med så tørre betonger er at støpeligheten reduseres betraktelig og at risikoen for mangelfull utflytning av øker. Dette kan føre til store uønskede luftlommer i den ferdige betongen. Det er vanskelig å oppnå tilstrekkelig støpelighet når ved v/b lavere enn ca. 0,30. (Maage 2015)

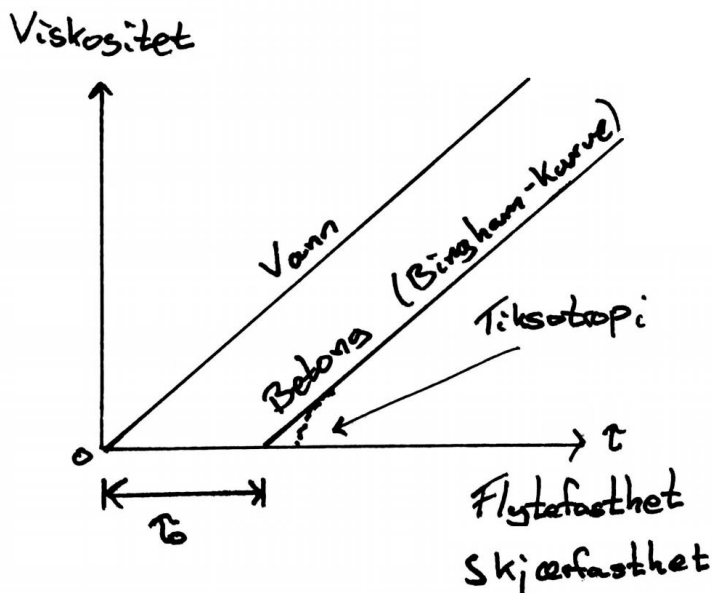
Dersom v/b-tallet er høyere enn 0,41 vil det være mer vann i blandingen enn det som bindes kjemisk og fysisk i hydratasjonen. Det vil med andre ord være et overskudd av vann. Dette fører til at sementkornene med en gang etter blandingen vil ligge relativt lenger fra hverandre. Dette gir den herdede betongen større porøsitet og samtidig lavere styrke siden styrken til betongen minker med økende porøsitet.

Siden betong er et porøst materiale er det også hygroskopisk, det vil si at det tiltrekker seg og avgir fuktighet etter som den relative luftfuktigheten endrer seg. En betong med høyere v/b-tall vil siden den da får høyere porøsitet kunne tiltrekke seg større mengde fuktighet i perioder med høy relativ luftfuktighet. (Herholdt et al. 1985)

3.4 Reologi

Reologi er læren om flyte- og deformasjonsegenskaper, spesielt for seige væsker, plastiske materialer og masser. Betongreologi omhandler derfor egenskapene betongen i fersk tilstand. Fersk betong skiller seg fra vann ved at den inneholder en betydelig andel faste stoffer i form av tilslag, sement, eventuell fiberarmering og eventuelle tilsetningsstoffer i pulverform.

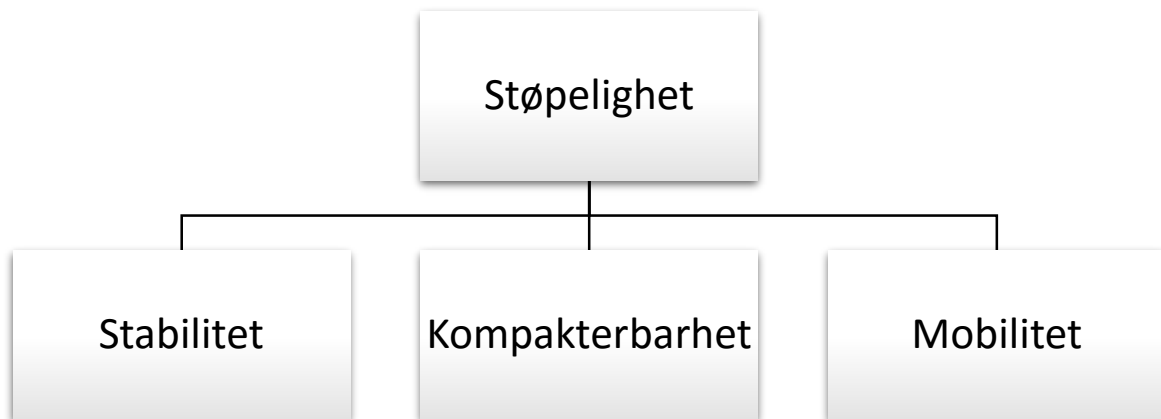
Mens vann er en newtonsk væske er fersk betong en binghamsk væske. Newtonske væsker har lineær sammenheng mellom flytehastighet og skjærspenning, det vil si at den newtonske væsken flyter ut med en gang den utsettes for en skjærspenning eller settes i bevegelse. En binghamsk væske har også lineær sammenheng mellom flytehastigheten og skjærspenningen, men har i tillegg en viss skjærmotstand som følge av intern kohesjon og friksjon. Det vil si at binghamiske væsker må påføres en skjærspenning før den starter flyt, dette er illustrert som τ_0 på figur 2-9. Etter at denne skjærspenningen er påført oppfører binghamiske væsker seg på samme måte som newtonske væsker. Den interne kohesjonen og friksjonen kommer fra innholdet av faste stoffer i betongen. Betong er tiksotrop i fersk tilstand. Det vil si at den etter at den har startet flyt og mistet sin skjærstyrke vil fortsette å oppføre seg som en newtonsk væske også etter at den er avlastet. Skjærstyrken kommer tilbake først når betongen har vært i ro et par sekunder og den interne kohesjonen er gjenopprettet (Maage 2015).



Figur 3-9 Betongens flyteegenskaper (Peder Johan Hafsås 2016)

3.4.1 Støpelighet

Støpelighet er et begrep som brukes til å forklare fersk betongs egenskaper. I begrepet ligger imidlertid flere viktige egenskaper som illustrert på figur 2-10.



Figur 3-10 Støpelighet for fersk betong

3.4.2 Stabilitet

God stabilitet er viktig i fersk betong for å unngå separasjon. Maage definerer stabilitet som «... betongens evne til å beholde sin homogenitet i den ferske fasen, både i stillestående tilstand og under transport, støp og komprimering.» (Maage 2015) Den ferske betongen er homogen når den har omtrent den samme konsistens i hele blandingen. I motsatt fall vil en heterogen masse ha veldig varierende konsistens gjennom massen. I fersk betong forekommer heterogenitet i form av separasjon.

Det finnes to separasjonsformer; mørtelseparasjon og vannseparasjon.

Vannseparasjon, eller «bleeding», forekommer ved at vann separeres fra blandingen, det er blandinger med høyt vanninnhold (v/b-tall) som er mest utsatt for dette. I fersk betong er det ønskelig at det er tilstrekkelig kohesjon i blandingen, det vil si tiltrekningskreftene mellom partiklene som holder betongen stabil. Dersom blandingen har høyt v/b-tall og lite finstoff risikerer man at det ikke blir tilstrekkelig kohesjon mellom partiklene slik at det grove tilslaget på grunn av graviteten synker ned i betongen og presser vann og sement opp til overflaten. Selv om mye av vannet vil flyte opp til overflaten vil noe kunne bli fanget i vannlommer under de

groveste tilslagspartiklene og under armeringsstenger. For herdet betong fører dette til lav styrke i disse områdene.

Mørtelseperasjon forekommer ved partikkelsprang i korngraderingen. Ved god korngradering oppstår en «fillereffekt», altså blir de fineste partiklene stoppet fra å separere av de litt større partiklene som i tur blir fanget av de enda litt større partiklene. Ved partikkelsprang får man ingen fillereffekt som stopper de finere partiklene fra å flyte opp. Dette fører til at de groveste partiklene legger seg på bunnen og de fineste flyter opp til toppen. (Maage 1998)

For å unngå separasjon, og dermed oppnå god stabilitet i den ferske betongen er det viktig med tilstrekkelig med finstoff og god korngradering. Andre aktuelle tiltak kan være å senke v/b-forholdet eller tilsette pozzolaner som fungerer som filler i fersk tilstand.

3.4.3 Mobilitet

Mobilitet defineres av Maage som «... betongmassens evne til bevegelse ved ytre påkjenning.» (Maage 2015)

Mobiliteten til fersk betong er avhengig av den indre kohesjonen, viskositeten og friksjonsvinkelen. God mobilitet oppnås ved å benytte mye sementpasta i forhold til tilslag. Dette vil gi en betong med lav viskositet, mindre indre kohesjon og lite friksjonsproblemer som følge av den reduserte tilslagsmengden. (Maage 2015) En annen måte å øke mobiliteten på er å tilsette plastiserende eller superplastiserende stoffer. Disse senker viskositeten i betongen ved å gjøre mer vann tilgjengelig til blandingen gjennom å redusere vannets polaritet. Dette er nærmere forklart i kapittel 2.6.1.

Mobilitet og stabilitet til fersk betong henger sammen. En økning i mobiliteten til betongen går ofte på bekostning av stabiliteten. Det er derfor viktig å vurdere hvilken egenskap som er viktigst for hver enkelt støp. En blanding med tilstrekkelig finstoffmengde og normal kornfordeling vil kunne justeres med SP- eller P-stoffer for å finne ønskede mobilitets- og stabilitetsegenskaper.

3.4.4 Kompakterbarhet

Maage beskriver kompakterbarheten som «... betongens evne til å fylle forskalingen, omslutte armeringen og la innestengte luftlommer unnsnippe ved bearbeiding.» (Maage 2015) Det er vanlig å vibrere eller stake betongen for å hjelpe den med å flyte godt ut og fylle alle luftlommer. Kompakterbarheten til en betong er avhengig av mobiliteten, klebrigheten til forskaling, porøsitet, densitet og luftinnhold.

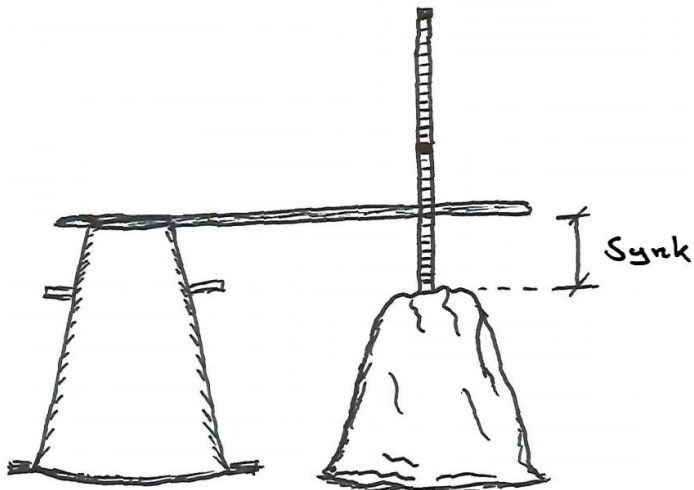
De største problemene med kompakterbarheten forekommer for tette betonger med lavt v/b-tall. Disse er veldig tørre og tykflytende og krever derfor mye kompaktering for å flyte godt ut. (Maage 2015)

3.5 Målemetoder på fersk betong

Støpelighetsegenskapene gjennomgått i kapitlene 2.4.1 – 2.4.4 er alle avhengige av hverandre, dvs. at dersom man har god stabilitet i betongen går det på bekostning av mobiliteten og kompakterbarheten. Derfor finnes det heller ingen enkeltstående testmetode som kan definere en betongs støpelighet. For å få et godt bilde av betongens støpelighet må det derfor gjennomføres flere ulike tester på betongen i fersk tilstand. Den viktigste testen er måling av synkmål som gir en god pekepinn på konsistensen til betongen (Mehta & Monteiro 2005). I de fleste tilfeller holder det å teste synkmålet da betongarbeiderne erfaringsmessig kan identifisere blandinger som kan føre til eventuelle problemer. Eksempel på andre tester på fersk betong er vebetest og kompakteringstest (Maage 2015).

3.5.1 Synkmål og synkutbredelse

Måling av synkmål, også kalt slump, er den mest brukte metoden for å identifisere ferske betongers egenskaper, og gir en pekepinn på konsistensen. Testen utføres etter NS-EN 12350-2, «Prøving av fersk betong- Del 2: Synkmål». Målingen foretas med en gang etter blanding ved å fylle en hul kjegele med betong for så å løfte kjegele og måle hvor langt betongen synker. Metoden er nærmere beskrevet i kapittel 3.3.1. Denne testen fungerer best for betonger som hverken er veldig stive eller veldig flytende, for disse bør også andre testemetoder benyttes.



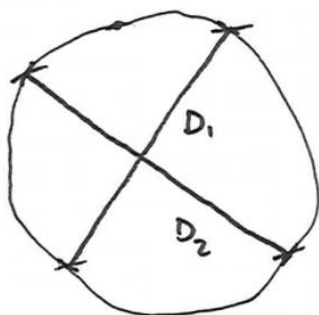
Figur 3-11 Måling av synkmål (Peder Johan Hafsås 2016)

NS-EN 206 tabell 3, klassifiserer fersk betongs konsistens etter det målte synkmålet. NS-EN 206 «Betong – Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar» er hovedstandarden for betong. Den deler synkmålet i fem konsistensklasser fra S1 – S5, der klasse S1 er veldig tungtflytende betonger med synkmål på mellom 10 – 40 mm og klasse S5 er lettflytende betong med synkmål ≥ 220 mm. I praktisk bruk er det imidlertid vanlig å benytte selve synkmålet som mål på konsistensen eller støpeligheten (Maage 2015).

Samtidig med synkmålet måles også den gjennomsnittlige utbredelsen til slumpmassen, dette gjøres etter formel 5.

Formel 5 Beregning av synkutbredelse

$$\text{Synkutbredelse} = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (5)$$



Figur 3-12 Synkutbredelse (Peder Johan Hafsås 2016)

3.6 Tilsetningsstoffer

Tilsetningsstoffer kan tilsettes ved blanding for å endre betongens egenskaper i fersk tilstand og betongens størknings- og herdningsforløp. Ulike tilsetningsstoffer kan blant annet justere størkningstiden, endre herdetiden og øke støpeligheten til fersk betong.

3.6.1 Plastiserende og superplastiserende tilsetningsstoffer

Plastiserende og superplastiserende stoffer (forkortes til P- og SP-stoffer) tilsettes ved blanding av betong for å redusere vannbehovet til betongen. Å plastisere vil si å gjøre materialer mer plastiske, altså mer bevegelige og lettere å forme.

P-stoff er det tradisjonelle vannreducerende tilsetningsstoffet. Dette er en form for lignosulfat, som er et restprodukt av treindustrien. (Maage 2015) Både P- og SP-stoffene virker dispergerende, som et «smøremiddel» i blandingen. Med andre ord reduserer disse vannreducerende tilsetningsstoffene overflatekreftene til vannet. Dette fører til at mindre vann bindes til tilslagspartiklene og at det frigjøres større mengder fritt vann. Dette skaper bedre flyt i betongen.

Tilsetning av P-stoffer medfører en økning i størkningstiden. Denne effekten forsterkes ved tilsetning etter at vannet har kommet i kontakt med sementen. Derfor må P-stoffer tilsettes blandingen sammen med vannet dersom man ikke ønsker forlenget størkningstid for å kunne bearbeide den ferske betongen i et større tidsrom.

SP-stoffer, som ble utviklet på 1970-tallet, fungerer på samme måte som P-stoff, men har bedre effekt. SP-stoffer øker også størkningstiden, men på grunn av høyere virkningsgrad er det ikke nødvendig å benytte like store mengder som for P-stoff, derfor reduseres heller ikke størkningstiden like mye.

3.6.2 Lufttilførende stoffer

Lufttilførende stoffer, eller L-stoffer, benyttes for å tilføre luft til betongen. Dette gjøres i praksis ved at L-stoffet omdanner store luftblærer til mange mindre luftblærer som fordeler seg jevnt i betongen. Luftblærerene kan ikke fylles med sementpasta eller tilslag. Den tilsatte luften kan komprimeres dersom vannet i betongen i fryser og dermed hindre oppsprekking som følge av frostsprengning på vinterstid. Norsk Standard gir ikke anledning til å produsere frostsikker betong uten tilsetning av L-stoffer. (Vollset 2010)

Tilsetningen av L-stoffer fører til en fasthetsreduksjon i betongen. For hver volumprosent tilsatt luft reduseres styrken til den herdede betongen ca. 5%. (Sørensen 2012) Dette kommer av at lufttilsetningen øker porevolumet i betongen.

Tilsetning av L-stoffer i betong øker altså motstanden mot fryse/tine sykluser. En positiv bieffekt ved lufttilførende stoffer er mange små luftblærene fungerer som kulelagre i den ferske betongen, man sier at tilslaget «ruller» mot hverandre. Dette øker bearbeideligheten til betongen, noe som gir mulighet for å senke v/b forholdet. De lufttilførende stoffene kan stamme fra blant annet treharpiks eller fettsyrer fra tallolje og kokosnøttolje. (Vollset 2010)

3.6.3 Akselererende stoffer

Akselererende stoffer (A-stoffer) tilsettes blandingen for å akselerere enten størkne- eller herdetiden. De størkningsakselererende stoffene til bruk i betong er spesielle typer kunstgjødsel (kalsiumnitrat). Behovet for hurtig størkning kan for eksempel gjøre seg gjeldende ved støping av betonger som må kunne glattes fortest mulig etter blandingen. Tilsetningen av størkningsakselererende A-stoffer fører samtidig til at man kan rive forskalingen tidligere.

Størkningsakselererende tilsetningsstoffer kan påvirke fastheten det første døgnet, men etter denne tiden har den liten effekt, den påvirker altså ikke herdetiden etter avbinding. Akseleratorer kan derfor være gunstig ved for eksempel prefabproduksjon og glidestøper. Som følge av den hurtige størkningen ved bruk av slike A-stoffer får man samtidig mindre tid til å behandle og støpe ut betongen.

Det eksisterer også herdingsakselererende A-stoffer, men dette er ikke mye brukt på grunn av at man får bedre effekt ved å tilpasse blanderesepten og herdeklimaet. En finmalt sementtype med høy andel av klinkermineralet C_3S i seg vil akselerere herdingen. Andre tiltak for å framskynde herdingen kan være å isolere betongen for å øke herdetemperaturen eller bruke mer sement i blandingen. (Maage 2015)

3.6.4 Retarderende stoffer

Retarderende stoffer (R-stoffer) er tilsetningsstoffer som forlenger avbindingstiden til betongen og utsetter avbindingen. Dette gjør at man får lengre tid til å bearbeide betongen i etter støping. Retarderende stoffer kan for eksempel bli brukt på gulvstøper under varme forhold, der man må ha tid til å disse gulvet. Tilsetningen av retarderende stoffer gjør at det legges en hinne rundt

sementkornene som utsetter den kjemiske reaksjonen mellom vann og sement. En god retarder vil samtidig kunne akselerere herdingen etter avbindingen noe. (Maage 2015).

3.7 Tilslag

Tilslaget er materialene med størst volumandel i betong, med omtrent to tredjedeler av totalvolumet. Med tilslag menes de materialene som limes fast av sementpastaen etter hvert som hydratasjonen skrider frem. For alminnelig betong er disse materialene sand, singel og pukk i ulike størrelser.

Kornform, gradering og overflatestrukturen på tilslaget er viktig både for støpeligheten av fersk betong og for den endelige styrken til den herdede betongen (Maage 1998).

De ulike tilslagpartiklene klassifiseres etter partikkelstørrelsen, altså en korngradering. Tilslaget deles inn i fraksjoner, der størrelsen på tilslaget i hver enkelt fraksjon blir identifisert med den største og minste diameteren på tilslaget i fraksjonen. For eksempel vil tilslag av fraksjonen 0/8 mm ha minste diameter 0 mm og største diameter 8 mm på tilslaget etter formen d/D , der d er minste diameter og D er den største diameteren på tilslaget i fraksjonen.

Det skilles mellom grovt og fint tilslag. Fraksjoner med fint tilslag defineres i NS-EN 12620 – «Tilslag for betong» som tilslag med største kornstørrelse, D , mindre enn 4 mm. Grovt tilslag defineres som fraksjoner med minste kornstørrelse, d , over 2 mm og største kornstørrelse, D , større enn 4 mm.

I Norge er det vanlig å bruke naturlig gradert 0/8 mm tilslag. Dette er sand fra naturlige sandforekomster som finnes i sandtak over hele Norge.

3.7.1 Korngradering av tilslag

Korngradering utføres med sikteanalyse etter NS-EN 933-1:2012. Prosedyren for sikteanalyse er forklart kapittel 3.1.4. Resultatet fra sikteanalysen presenteres som en siktekurve som gir andelen av hver enkelt kornstørrelse i tilslaget

Det er viktig med god korngradering av tilslaget for å oppnå god støpelighet av den ferske betongen og for å unngå separasjon. Med god korngradering menes at betongen bør inneholde en passende mengde av tilslag med ulike kornstørrelser. Ideelt sett bør tilslaget inneholde den mengde av hver kornstørrelse som gjør at de mindre partiklene fyller hulrommene de større partiklene etterlater seg i blandingen. Naturlig 0/8 mm sand har generelt god korngradering og er derfor mye brukt i betong. Grovere tilslag er gjerne maskinknust singel eller pukk i fraksjonen 8/16 mm.

God korngradering bidrar til stabilitet i den ferske betongen og reduserer faren for separasjon som følge av partikkelsprang.

3.7.2 Finstoff

Finstoff defineres i NS-EN 12620 som «den kornstørrelsesfraksjonen av et tilslag som passerer 0,0063 mm-sikten». Det vil si at finstoffet til en fraksjon er den mengden som går gjennom alle siktene og legger seg i bunnpannen.

3.7.3 Kornform og overflatestruktur

Kornformen og overflatestrukturen til tilslaget har betydning for støpeligheten og dermed også vannbehovet (pastabehovet) til betongen. Naturlig tilslag har generelt en relativt glatt overflate, kubisk struktur og avrundede kanter. Mens maskinknust tilslag er skarpkantede med ruere overflater. (Maage 2015)

Avrundede og glatte naturtilslagskorn krever mindre vann enn skarpkantede maskinknuste korn med samme korngradering for å oppnå den samme bearbeideligheten i fersk betong. Grunnen til dette er at glatte og avrundede tilslag har relativt mindre kornoverflate enn det ru og kantete tilslagstyper har. Dette gjør at det kreves mindre vann til smøring av naturlig tilslag enn det som må til for maskinknust tilslag (Sørensen 2012).

Det maskinknuste tilslaget vil imidlertid gi bedre binding mellom sementpastaen og tilslaget, noe som er gunstig for styrken til den herdede betongen. Som nevnt går denne styrkeøkningen imidlertid på bekostning av støpeligheten.

3.8 Mekaniske egenskaper

De mekaniske egenskapene til et materiale forteller om materialets evne til å motstå ytre krefter. For et konstruksjonsmateriale er det avgjørende å vite materialets evne for å motstå de ytre kreftene, altså kapasiteten til materialet. De viktigste mekaniske egenskapene for konstruksjonsmaterialer er trykk, strekk, skjær og duktilitet. Siden betong har høy trykkfasthet er det også betongens viktigste mekaniske egenskap. Strekk-, skjær og duktilitetsegenskapene til betong er til sammenligning veldig dårlige, det må derfor armeres med stål for at betongen skal kunne belastes med disse lastene.

3.8.1 Trykkfasthet

Betongens fasthet er et mål på hvor mye ytre mekaniske krefter betongen tåler før den går i brudd. For betong er det trykkfastheten som er den viktigste mekaniske egenskapen. Strekkfastheten er typisk bare 4 – 12 % av trykkfastheten, derfor legges det inn armering i betongen for å ta opp strekkrefter i konstruksjoner. (Maage 2015)

Betongens styrke utvikler seg over tid etter som hydratasjonen skrider frem og «limer» tilslaget fastere sammen. Fasthetsutviklingen er derfor stor den første perioden etter blanding mens hydratiseringen er på det kraftigste, før den flater ut etter hvert som tiden går. I NS-EN 206 gis det instruksjon om at: «Med mindre annet er angitt, skal trykkfastheten bestemmes når prøvelegemene er 28 døgn».

Fasthetsutviklingen i betong vil fortsette også utover 28-dagersperioden, men for de fleste betongtyper vil mesteparten av den potensielle trykkfastheten være oppnådd etter 28 dager. Hydratiseringen vil på dette stadiet ha kommet veldig langt, og den sementen som enda ikke har reagert med vann er på dette stadiet så godt innkapslet i sementgel at videre hydratisering tar lang tid. Dette er nærmere omtalt i kapittel 2.3.2 «Morfologi».

Betong sorteres i fasthetsklasser etter karakteristisk trykkfasthet for 28 dager gamle prøver, kalt «28-døgnfasthet». Trykkfastheten til betong kan bestemmes ved prøving av betong støpt i terning- eller sylindereformer. Betong klassifiseres i trykkfasthetsklasser etter karakteristisk trykkfasthet. Den karakteristiske trykkfastheten bestemmes ut i fra sylindrefastheten eller terningfastheten til en betong. For eksempel vil en betong i klasse B30 måtte ha minste karakteristiske sylindrefasthet på 30 N/mm^2 28 dager etter støping. «B» står her for betong. For B30 skal minste karakteristiske terningfasthet være 37 N/mm^2 . Den karakteristiske trykkfastheten til en prøveserie er en 5 % fraktil, det vil si det tillates kun 5 % undermålere med lavere trykkfasthet enn den gitte karakteristiske fastheten. Det stilles samtidig krav til

standardavviket til trykkprøvene i prøveserien. Trykkfastheten finnes ved å presse standardiserte prøver under trykkbelastning for så å regne ut bruddspenningen. Dette gjøres ved at prøvene først belastes til de går i brudd, for så å dividere den opptredende bruddlasten på det nominelle belastede arealet, se formel 6. For å finne sylinderfastheten presser man betong støpt i sylinderformer, mens man benytter betong støpt i terningformer for å finne terningfastheten. Trykkfastheten til herdet betong påvirkes i stor grad av forholdet mellom vann og sement i blandingen. Dette er nærmere omtalt i kapittel 2.3.3, men kort fortalt vil en blanding med mye vann i forhold til sement gi en mere porøs betong. Porøs betong har mindre av de faste stoffene i betongen og har derfor lavere trykkfasthet sammenlignet med en tettere betong med mer faststoff og lavere v/b-tall.

3.8.2 Fasthetsutvikling

Utviklingen av trykkfastheten over tid varierer avhengig av sementtype, hvor finmalt sementen er, tilsetningsstoffer og herdetemperaturer. En finmalt sement vil gi høyere tidligfasthet enn en grovere sement av samme type da det blir mer kornoverflate tilgjengelig for vannet til hydratisering, noe som akselererer reaksjonsprosessene i hydratiseringen. Hydratiseringsreaksjonene og dermed også fasthetsutviklingen går forttere ved høyere herdetemperaturer. Derfor vil effekten av bruk av finmalt sement forsterkes da økt reaktivitet i sementen også medfører økt temperaturutvikling i hydratiseringen. Hydratiseringshastigheten kan justeres ved bruk av tilsetningsstoffer i betongblandingen. Dette er imidlertid ikke veldig vanlig for å akselerere herdingen da de akselererende tilsetningsstoffene enten ikke har ønsket virkningsgrad eller inneholder uønskede stoffer (Maage 2015). For å akselerere herdingen er det derfor mer vanlig å bruke finmalt sement og/eller øke herdetemperaturen. Ved støping av massive betongkonstruksjoner som for eksempel dammer er det ofte ønskelig med lavere temperaturutvikling i betongen for å begrense riss. Dette løses vanligvis ved å tilsette flygeaske i blandingen. Dette fører til at lavere temperaturutvikling og dermed også lengre saktere fasthetsutvikling. (Herholdt et al. 1985)

Trykkfastheten til terningprøver beregnes etter formel 7.

Formel 6 Trykkfasthet av terningprøver

$$f_d = \frac{m * g}{A} = \frac{F_{ed}}{A} \quad (6)$$

Hvor:

f_d er trykkfasthet i N/mm²

m er avlest belastning i kg ved brudd

g er gravitasjonskonstanten = 9,81 m/s²

A er belastet areal, for terningerprøver: 100*100 mm = 10000 mm²

F_{ed} er bruddlasten i Newton

3.9 Pozzolaner

Pozzolaner er tilsetningsmaterialer som reagerer med kalsiumhydroksid, et biprodukt fra hydratiseringen av sement, og danner nye reaksjonsprodukter med fasthet. De vanligste pozzolanene til bruk som tilsetningsmaterialer i betong er silikastøv og flygeaske.

3.9.1 Disposisjon

I denne oppgaven fokuseres det på pozzolanet flygeaske da dette har direkte relevans for de de gjennomførte forsøkene. Selv om oppgaven baserer seg på flygeaske fra flisfyringsanlegg vil flygeaske fra kullkraftverk presenteres først. Dette gjøres da flygeaskens egnethet i betong avhenger av de samme faktorene uavhengig av om opprinnelsesmaterialet er kull eller trevirke. Samtidig vil dette danne grunnlag for sammenligning mellom den mye brukte kullflygeasken og flygeaske fra flisfyring.

For at flygeaske fra flisfyring skal kunne benyttes som sementerstatning i betong er det mange krav som må oppfylles. Blant annet må flygeasken bestå «pozzolan aktivitetsindekstest». Den er nærmere forklart i kapittel 2.14. Det stilles også krav til ulike kjemiske og fysiske egenskaper, disse er omtalt i kapitlene 2.10.1-2.10.2 og 2.11.1-2.11.2.

3.10 Flygeaske fra kullfyring

Flygeasken som benyttes som tilsetningsmateriale i betong er for det meste restprodukter fra kullfyringsanlegg, men kan også være naturlig vulkansk flygeaske. Kullfyringsanlegg benyttes i mange land til produksjon av elektrisitet og varme, spesielt har Tyskland mange kullkraftsanlegg (Groll 2015). Det er generelt rikelig med flygeaske tilgjengelig til bruk i betong.

Fyring av pulverisert kull etterlater seg to asketyper; bunn- og flygeaske. Bunnasken er generelt grov og tung og blir liggende igjen på bunnplaten av brennkammeret, mens den finkornede flygeasken følger med røyken opp fra ovnen. Før røyken sendes ut av fyringsanlegget tvinges den gjennom en rensesprosess for å redusere forurensningen til omgivelsene. Det er her flygeasken utvinnes. Røyken føres gjennom en «sil» i form av fine elektrofilterposer som ved hjelp av statisk elektrisitet samler opp flygeaskepartiklene. (Taylor 1997)

Flygeaske kan benyttes i betongen enten ved at den knuses sammen med sementklinker i sementproduksjonsprosessen, eller ved at den tilsettes ved betongblanding. Flygeaske som tilsettes blandes sammen med betongen tilsettes ved at den erstatter en del av sementmengden.

Flygeaske er ikke i seg selv sementerende. Det betyr at den ikke utvikler fasthet i reaksjon med vann på samme måte som sement, men ved hjelp av kjemiske reaksjoner i betongen kan den likevel bidra til fasthetsutvikling i betongen.

Det er flere fordeler med flygeasketilsetning i betong. Ved å senke herdevarmen får man mindre riss, og dermed også en tettere betong uten sprekker som også bidrar til økt kloridmotstand i betongen. Rissreduksjonen kommer som følge av at flygeaske har lavere reaktivitet enn sementen, noe som fører til lavere varmeutvikling i betongens herdefase. Samtidig får man et lavere CO₂-avtrykk på betongen ved erstatte noe av sementen med flygeaske da produksjonen av sement er svært energikrevende. Flygasketilsetningen bidrar dermed til å kunne oppfylle de stadig strengere miljøkravene i byggebransjen.

De viktigste faktorene for å vurdere flygeaskens egnethet som sementerstatning er evnen til å redusere vannbehovet til den ferske betongen, andelen uforbrent karbon og materialets pozzolanitet. (Taylor 1997)

3.10.1 Fysiske egenskaper til flygeaske fra kullfyring

De fleste kullaskepartikler er sfæriske eller tilnærmet sfæriske. Kornstørrelsen på flygeaskepartiklene som utvinnes på et fyringsanlegg avhenger av finheten til de elektrostatiske filterposene som samler partiklene. Diameteren kan variere fra det submikroskopiske til ca. 100 µm, mesteparten av partiklene har likevel en kornstørrelse på under 10 µm (Ghosal & Self 1995).

Partikkelstørrelsen er av stor betydning ved bruk av flygeaske som tilsetning i betong. Generelt vil fine flygeaskepartikler gi bedre mekaniske og reologiske egenskaper i betong enn grovere partikler. De reologiske fordelene ved finkornet flygeaske gjør seg gjeldende ved at partiklene fyller hulrommene der de større partiklene ikke kommer til, dette øker stabiliteten til betongen. Den økte styrken kommer av at finkornete flygeaskepartikler gir større relativ kornoverflate i blandingen enn en tilsvarende mengde grovere flygeaskepartikler. Finere flygeaske er altså mer reaktiv på grunn av at et større totalt overflateareal er tilgjengelig til reaksjon. (Wang et al. 2008a)

Densiteten til flygeaske varierer vanligvis fra 2,0 og 2,4 g/cm³, men avvik fra dette forekommer (Sear 2001). Norcem opererer med densitet på 2,3 g/cm³ på sin flygeaske (Se produktinformasjonsfoile i vedlegget). Densiteten varierer på grunn av at flygeaske har ulikt kjemisk innhold avhengig av hvor kullet er utvunnet og benyttet fyringsprosess. De forskjellige flygeaskene inneholder mange oksider som hver for seg har ulike densiteter, for eksempel vil

en flygeaske med høyt kjemisk innhold av aluminiumsoksid (densitet 3,95 g/m³) ha høy densitet. (Shirai et al. 2011)

3.10.2 Kjemisk egenskaper i flygeaske fra kullfyring

Det kjemiske innholdet og egenskapene til flygeasken fra kullfyringsanlegg varierer avhengig av kull sammensetningen og fyringsprosesser.

Det kjemiske innholdet til flygeaskene blir normalt forklart med oksider, der oksidmengdene oppgis i vektprosent. De viktigste oksidene for flygeaske i betong er SiO₂ (silisiumdioksid/silika), Al₂O₃ (aluminiumsoksid/alumina), CaO (kalsiumoksid), Fe₂O₃ (jernoksid), MgO (magnesiumoksid), Na₂O (Natriumoksid) og K₂O (kaliumoksid). I tillegg er LOI («Loss Of Ignition»), eller mengden uforbrente organiske materialer i flygeasken viktig, disse forekommer nesten utelukkende som uforbrent karbon.

Tabell 3-5 Typisk kjemisk innhold i tysk flygeaske (Berg 1981)

Oksid	Vekt%
SiO ₂	42 – 55
Al ₂ O ₃	24 – 33
Fe ₂ O ₃	5,4 – 8,3
CaO	0,6 – 8,3
MgO	0,60 – 4,3
Na ₂ O	0,2 – 1,3
K ₂ O	1,1 – 5,6
SO ₃	0,04 – 1,9
LOI (uforbrent karbon)	0,8 – 5,8

Det er de kjemiske egenskapene til flygeasken, og da først og fremst mengden av oksidene SiO₂, Al₂O₃ og Fe₂O₃, som avgjør pozzolaniteten og dermed også egnetheten til bruk i betong. Felles for disse oksidene er at de er av amorf form, noe som er nødvendig for å få en pozzolanreaksjon.

At et materiale er amorft vil si at det er glassaktig. For flygeaske dannes de glassaktige materialene ved at partiklene smelter på grunn av den høye fyringstemperaturen og omdannes til små væskedråper. Hjulpet av varmen «flyr» disse dråpene opp fra ovnen, noe som fører til en avkjøling med påfølgende faseforandring som gir partiklene en glassaktig og fast form. (Wesche 1991). Dette kan til en viss grad sammenlignes med produksjonen av alminnelig glass der SiO₂ fra kvartsholdig sand benyttes som råstoff.

NS-EN 450-1, som er standarden som omhandler flygeaske til bruk i betong, stiller krav om totalsummen av SiO_2 , Al_2O_3 og Fe_2O_3 ikke skal være mindre enn 70 vekt% for at flygeasken skal kunne brukes som pozzolan i betong. Den samme standarden forklarer at flygeaske fra forbrenning av pulverisert kull skal regnes for å godkjenne dette kravet.

Det stilles også krav til andelen uforbrent karbon i flygeasken. NS-EN 450-1 deler flygeaskene inn i tre kategorier avhengig av LOI. Grunnen til dette er at andelen uforbrent karbon har stor påvirkning på betongens egenskaper både i fersk og herdet tilstand.

Kategori A: 0,0 – 5,0 vekt% karbon.

Kategori B: 5,0 – 7,0 vekt% karbon.

Kategori C: 7,0 – 9,0 vekt% karbon.

3.10.3 Kullflygeaskens innvirkning på støpeligheten

Ved å erstatte noe av sementen med flygeaske fra kullfyring får man generelt lavere vannbehov og dermed også bedre støpelighet i betongen. Det er flere årsaker som medvirker til dette. Fyring av kull ved høye temperaturer fører til dannelsen av fine, sfæriske flygeaskekorn med harde glassoverflater og liten porøsitet. På grunn av finheten og den sfæriske formen til flygeaskekornene vil fersk betong med flygeaske ha lavere vannbehov og bedre støpelighet enn tilsvarende betong uten flygeaske. Den sfæriske formen gjør at flygeasken nærmest fungerer som kulelagre i blandingen og dermed reduserer vannbehovet. (Maage 2015)

På grunn av at flygeaske har lavere densitet enn sement medfører tilsetning av flygeaske som sementerstatning samtidig en liten økning i pastavolumet. Betong med høyere pastavolum har bedre støpelighet enn en tilsvarende betong med lavere pastavolum.

Vannbehovet er imidlertid avhengig av mengden uforbrent karbon i flygeasken. Det er porøsiteten til det uforbrente karbonet som gjør at det kan absorbere vann og dermed øke vannbehovet og dermed også behovet for SP-stoffer. (Ramenzianpour 2014) Karbon i flygeasken bidrar heller ikke til fasthetsutvikling, men fungerer heller som filler i blandingen. Det er derfor ønskelig at mengden uforbrent karbon i flygeasken er så lav som mulig. Mengden uforbrent karbon avhenger i stor grad av fyringsegenskaper som fyringstemperatur- og varighet. Kullflygeasken benyttet i betong inneholder generelt lite uforbrent karbon.

Det eksakte vannbehovet til betongen varierer avhengig av flygeaske kvalitet og kornegenskaper. Som en tommelfingerregel anbefales det ved bruk av finkornet flygeaske med lite uforbrent karbon, at man for hver 10 % flygeasketilsetning reduserer vannbehovet til betongen med 3 %. (Thomas 2007)

På grunn av finheten til asken vil en tilsetning kunne føre til at den ferske betongen får økt stabilitet. Maage forklarer at «... dette kan også føre til litt stivere betong. Vi kan kompensere for dette med litt mer matriks (sementpasta) eller mer plastiserende tilsetningsstoff.» (Maage 2015) Noe stabilitet er gunstig i betongen for å unngå separasjon, men det er samtidig viktig at det lar seg gjøre å bearbeide betongen.

3.11 Flygeaske fra fyring av trevirke

I og med at bruk av flygeaske som sementerstatning i betong er et relativt moderne virkemiddel (bruken skjøt fart på 1980-tallet) har man heller ikke kommet langt i forskningen om bruk av flygeaske fra forbrenning av andre materialer enn kull som tilsetningsstoff i betong. For flygeaske fra flisfyring forsterkes dette også av at bruken av flisfyringsanlegg for å produsere varme først har kommet for fullt de siste årene.

Trebasert aske produseres blant annet i flisfyringsanlegg, på treforedlingsfabrikker og på sagbruk. Treflygeasken er i dag en uutnyttet ressurs som i henhold til Forskrift om gjødselvarer av 20. juli 2003 § 10 må leveres til avfallsdeponier på grunn av innholdet av farlige miljøgifter (tungmetaller). Flygeasken fra flisfyring utvinnes med elektrostatiske filterposer på samme måte som for kullkraftverk.

Temperaturen i brennkammeret til flisfyringsanleggene holdes konstant ved hjelp av datastyring av lufttrekket til ovnen og brenselmatingen. Dette sørger for at den resulterende flygeasken er tilnærmet homogen så lenge det fyres med det samme brenselet.

Det tillattes ikke å bruke flygeaske fra trefyring som tilsetningsmateriale i betong på samme måte som vanlig flygeaske fra kullfyring. NS-EN 450-1 gir imidlertid mulighet til tilsetning av flygeaske fra forbrenningen av såkalte «co-combustion materials». Dette er en sammenblanding av pulverisert kull og biologiske materialer som brennes samtidig. Standarden gir mulighet for en maksimal tilsetning av sammubrenningsaske på 30 % av sementvekten der kun halvparten av materialene i forbrenningen kan være trebaserte materialer.

3.11.1 Fysiske egenskaper til flygeaske fra forbrenning av trevirke

Askepartiklenes fysiske egenskaper er ulike for flygeaske fra kull- og flisfyring. Generelt vil flygeaske fra flisfyring ha større gjennomsnittlig partikkelstørrelse og større overflateareal enn flygeaske fra kullfyring. Det er også forskjeller i de fysiske egenskapene for de ulike trebaserte

flygeaskene avhengig av råmaterialet som benyttes i forbrenningen, forbrenningstid og brennkammerets temperatur.

Flygeaskepartikler fra fyring av trevirke skiller seg fra kullbasert flygeaske ved at de ikke har den samme avrundede kornformen, men heller en uregelmessig og kantete form. (Wang et al. 2008a)

Flygeaske fra flisfyring inneholder generelt mer uforbrent karbon enn kullflygeaske. Et høyt uforbrent karboninnhold kan identifiseres visuelt ved å vurdere flygeaskens farge. Flygeaske med lite uforbrent karbon vil være gråaktig, mens flygeaske med mye uforbrent karbon vil være mørkere. Uforbrent karbon er i seg selv helt svart.

Tabell 3-6 Densiteten til ulike flygeasker fra fyring av trebaserte materialer

Referanse:	(Rajamma et al. 2009)	(Maschio et al. 2011)	(Wang et al. 2008b)	(Elinwa & Mahmood 2002)	(Abdullahi 2006)
Askeopprinnelse:	Eukalyptustre (Portugal)	Edelgran (Italia)	Ikke oppgitt treslag (USA)	Sagflis fra diverse afrikanske treslag	Ikke oppgitt treslag (Nigeria)
Densitet: (g/cm ³)	2,59	2,4	2,4	2,29	2,13

Densiteten til flygeaske fra fyring av trevirke varierer på samme måte som den kullbaserte flygeasken avhengig av materialet som det fyres med og dets oksidinnhold. På grunn av at det er større variasjoner i det kjemiske innholdet i trevirke enn i kull, er det også større variasjoner i densiteten til den resulterende flygeasken. I tabell 2-6 er målte densiteter til ulike flygeasker fra trevirke gjengitt fra tidligere forskning.

3.11.2 Kjemiske egenskaper til flygeaske fra forbrenning av trevirke

De kjemiske egenskapene til flygeasken fra flisfyringsanlegg er i stor grad avhengig råmaterialet som benyttes i forbrenningen. Ikke bare gir de forskjellige treslagene ulike kjemiske bestanddeler i flygeasken, men det er også variasjoner innad i de enkelte treslagene avhengig om det er barken, yte- eller kjerneved som forbrennes. Kjemiske bestanddeler påvirkes i mindre grad også av hogststed, hogstteknikk, trefuktighet ved fyring og fyringsmetode. (Dibdiakova & Horn)

I tillegg til forskjeller i kjemisk innhold i flygeasken avhengig av treslag som forbrennes vil mengden bark i forhold til kjerne- og yteved påvirke det kjemiske innholdet i asken i stor grad. Det kjemiske innholdet i flygeasken avhenger samtidig av den oppnådde forbrenningsgraden

ved fyringsanlegget. Derfor er forretningsmetode og lufttilførselen til ovnen viktig. Dårlig forbrenning gir høyere andel uforbrent karbon («loss of ignition») i asken.

Ulike kjemiske analyser har vist at flygeaske fra trebaserte materialer inneholder mange av de samme bestanddelene som flygeaske fra kullfyring (Tabell 2-7). Dette kan sies å være nærliggende da kull i prinsippet er organiske materialer som over lang tid har omdannet seg til en veldig karbonholdig bergart.

For at flygeaske fra trefyring skal ha nytte som sementerstatning i betong er man avhengig av at den har en viss pozzolanitet. De viktigste oksidene for pozzolanitet er de samme som for kullflygeasken, altså de amorfe mineralene SiO_2 , Fe_2O_3 og Al_2O_3 . For flygeaske krever NS-EN 450-1 at totalsummen av disse oksidene må være minst 70 vekt% for å kunne benyttes i betong. Man kan derfor anta at flygeaske fra flisfyring som oppfyller dette kravet bør ha gode forutsetninger for å ha den samme pozzolane effekten som kullflygeaske.

Resultatene fra ulike kjemiske analyser viser imidlertid svært varierende pozzolanitet for flygeaske fra flisfyring og andre trebaserte flygeasker. Resultater fra utvalgte kjemiske analyser av trebasert flygeaske er gjengitt i tabell 2-7.

Tabell 3-7 Kjemisk komposisjon av flygeaske fra flisfyring av ulike treslag i vekt%

Referanse:	(Rajamma et al. 2009)	(Lowe 2012)	(Maschio et al. 2011)	(Esteves et al. 2012)	(Wang et al. 2008b)
Aske-opprinnelse:	Eukalyptustre (Portugal)	Ikke oppgitt treslag (USA)	Edelgran (Italia)	Eukalyptustre (Portugal)	Ikke oppgitt treslag (USA)
SiO_2	41	47,14	16,4	52,1	48,94
Al_2O_3	9,3	5,85	5,9	13,3	12,47
Fe_2O_3	2,6	3,95	3,6	5,30	5,45
CaO	11,4	13,98	33,7	15,9	13,55
MgO	2,3	2,33	11,7	3,31	3,16
Na_2O	0,9	0,63	1,4		1,68
K_2O	3,9	3,52	13,0		2,14
SO_3		1,66		0,45	1,3
P_2O_5	0,9	1,30	3,3		0,95
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	52,9	56,94	25,9	70,7	66,87
LOI (%)	14	20,1	0,8	10,4	7,89

Som man kan se av tabell 2-7 er det kjemiske innholdet til trebasert flygeaske veldig varierende. Dette gjelder også for de to ulike analysene av flygeaske fra flisfyring av eukalyptustre. Kun én av flygeaskene gjengitt i tabellen oppfylder kravet fra NS-EN 450-1 om en totalandel av SiO₂, Al₂O₃ og Fe₂O₃ på over 70 vekt%. Alle flygeaskene bortsett fra den fra edelgran inneholder en relativt høy andel av uforbrent karbon. Mengden uforbrent karbon er dog i stor grad avhengig av egenskaper ved forbrenningen og mindre avhengig av materialet som forbrennes.

En av årsakene til at NS-EN 450-1 ikke gir anledning til bruk av flygeaske fra trevirke som sementerstatning i betong er at den ikke oppfylder alle kriteriene som stilles i standarden. Hvilket/hvilke av kriteriene som overstiges varierer avhengig av flygeaskens opprinnelse, men det er i første rekke begrensningene til alkalinitet, uforbrent karbon og sulfatinnhold som fører til at treflygeaske ikke kan benyttes i betong. (Barbosa et al. 2013)

NS-EN 450-1 tar det for gitt at flygeaske fra kullfyring ikke inneholder skadelige mengder tungmetaller. Dette er fordi kullkraftverkene generelt har veldig effektiv forbrenning og etterlater seg lite uforbrent karbon i flygeasken. Denne forutsetningen gjelder ikke for flygeasken fra fyring av biologiske materialer, som i enkelte tilfeller har vist seg å ha et tungmetallinnhold som overstiger kravene fra nevnte standard. Årsaken er at mye av tungmetallene fra det levende trevirket blir igjen i asken etter fyring. Som følge av at fyringen gir en betydelig volumreduksjon i overgangen fra trevirke til aske, skjer en oppkonsentrasjon av tungmetallene i flygeasken. (Dibdiakova & Horn)

Tungmetall er en fellesbetegnelse på en rekke miljøskadelige stoffer. Eksempel på tungmetaller som forekommer i små mengder i flygeaske fra flisfyringsanlegg er kadmium, bly, sink og kvikksølv. Betong med mye tungmetaller er blant annet veldig dyrt å rive siden det da må håndteres som farlig avfall, det er derfor ønskelig med så lite tungmetaller som mulig i betongen.

3.12 Bruk av flygeaske som sementerstatning – k-faktormetoden

NS-EN 206 gir instruksjoner om bruk av tilsetningsmaterialer i betong. Ifølge pkt. 5.2.5.1 skal fasthetsutviklende pozzolaner tas med i masseforholdsbergingen. Med andre ord vil flygeaske regnes som sement i v/b-forholdstallet.

Flygeaske har imidlertid ikke samme virkningsgrad med tanke på fasthetsutvikling som sement. Dette tas hensyn til ved k-faktormetoden. Der k-faktoren, eller k-verdien, er tilsetningsmaterialets virkningsgrad med tanke på fasthetsutvikling sammenlignet med sement. k-faktoren til sement er altså 1,0. Dette gjelder også for sementtyper tilsatt flygeaske i

sementproduksjonen. Det er altså bare når flygeaske tilsettes ved betongblanding man må benytte seg av standardiserte k-verdier.

For en betongblanding med pasta bestående av kun vann og sement vil masseforholdet kunne forklares med v/b-forholdet (vann/bindemiddel). Benyttes det pozzolaner i blandingen som sementerstatning, må virkningsgraden/effektiviteten til pozzolanene tas med i beregningen. V/b-forholdet forklares som følger:

Formel 7 Masseforhold mellom vann og bindemiddel

$$v/b = \frac{v}{c + k * \text{tilsetningsmateriale}} \quad (7)$$

Hvor:

- v er vannmengde [kg]
- c er sementmengde [kg]
- tilsetningsmateriale er mengden av benyttet tilsetningsmateriale [kg]
- k er virkningsgraden til det benyttede tilsetningsmaterialet

Om det benyttes flere tilsetningsmaterialer i samme blanding må k-faktoren til hvert enkelt materiale inkluderes i masseforholdsberegningen.

K-faktorer for ulike pozzolaner er gitt i pkt. NA.5.2.5.1 i NS-EN 206, der tabell NA.9 gir k-faktorer for flygeasketilsetning for ulike sementtyper og bestandighetsklasser. For alle bestandighetsklasser unntatt M60 er k-faktoren for flygeaske = 0,7. For bestandighetsklasse M60 er k-faktoren satt til 0,4, dette skyldes at flygeasketilsetningen medfører reduksjon i motstanden mot karbonatisering. Effektiviteten til tilsetningsmaterialene er sammenlignet med sementens etter 28 dager, noe som vil si at k-faktormetoden er en relativt sikker metode. Den reelle virkningsgraden til pozzolan flygeaske øker også utover de første 28 dagene etter blanding.

Det gis i NS-EN 206 en begrensning på mengde flygeaske som tillates benyttet som sementerstatning. Begrensningen avhenger av den benyttede sementtypen, for ren portlandsement tillates det at maks 35 % av bindemidlet i betongen er flygeaske. Tilsettes det flygeaske utover dette, kan dette ikke være med i beregningen av masseforholdet.

3.12.1 Beregning av k-faktor flygeaskens effektivitet

Det finnes flere metoder for å bestemme k-faktoren til flygeasken. I denne oppgaven sammenlignes trykkfastheten til de flygeasketilsatte prøvene med trykkfastheten til referanseprøver uten flygeasketilsetning for å finne effektiviteten til den tilsatte flygeasken fra flisfyring. K-faktoren til flygeasken beregnes så etter formel utarbeidet av (Atiş 2005). Formelen baserer seg på normalisering av trykkfastheten med hensyn til mengden av sementerende materialer. Formelen utledes som følger:

Formel 8 Utledning av beregning av k-faktor, 1 av 3 (Atiş 2005)

$$\frac{f_c(t)_{npc}}{c} = \frac{f_c(t)_{npc}}{(c - fa) + k * fa} \quad (8)$$

k fra formel (8) kan omskrives til:

Formel 9 Utledning av beregning av k-faktor, 2 av 3 (Atiş 2005)

$$k = \frac{c}{fa} \left(\frac{f_c(t)_{fa}}{f_c(t)_{npc}} - 1 \right) + 1 \quad (9)$$

Her er $\frac{c}{fa}$ det samme som det inverse av mengden sement erstattet med flygeaske. $\frac{c}{FA}$ kan derfor settes lik $\frac{1}{r_{fa}}$ ($r_{fa} = \frac{fa}{c}$, for eksempel 0,2 for 20 % flygeasketilsetning)

Ved å sette dette inn i formel (9) ender man opp med:

Formel 10 Utledning av beregning av k-faktor, 3 av 3 (Atiş 2005)

$$k = \frac{\left(\frac{f_c(t)_{fa}}{f_c(t)_{npc}} - 1 \right)}{r_{fa}} + 1 \quad (10)$$

Hvor:

- k – effektivitetsfaktoren til flygeasken
- c – total mengde sementerende materialer (her er flygeaske inkludert) [kg]
- fa – mengde tilsatt flygeaske [kg]
- r_{fa} - forholdet mellom mengden flygeaske og mengden sement (for eksempel vil 40% flygeasketilsetning gi $r_{fa} = 0,4$)
- $f_c(t)_{npc}$ – trykkstyrken til betong av ren Norcem standardsement ved herdetid, t [N/mm²] (npc = «normal portland cement»)
- $f_c(t)_{fa}$ – trykkstyrken til flygeasketilsatt betong ved herdetid, t [N/mm²]

Ved å bruke formel 10 kan man finne effektiviteten til den tilsatte flygeaske ved ulike tilsetningsgrader, samt hvordan den utvikler seg mellom de ulike herdetidene.

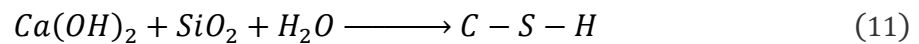
3.13 Pozzolanreaksjonen (gjelder for begge asketyper)

Som forklart i kapittel 2.3 er et av produktene fra reaksjonen mellom vann og sement kalsiumhydroksid. Dette er i prinsippet kalk med den kjemiske betegnelsen $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Kalsiumhydroksid bidrar ikke til fasthetsutvikling i betongen, men gjennom sin alkalitet bidrar den til å holde betongen basisk, og på den måten beskytte stålarmeringen mot korrosjon. Ved å tilsette pozzolane tilsetningsmaterialer i betongen ønsker man å utnytte seg av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fra sementhydratiseringen for å danne ytterligere sementgel med høy fasthet.

Pozzolanreaksjonen er altså reaksjonen i vann mellom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og de tilsatte pozzolanene. Denne reaksjonen gir et produkt tilnærmet likt C-S-H-gelen som dannes fra hydratisering av vann og sement. Silikainnholdet er den viktigste komponenten for pozzolane tilsetningsmaterialer, derfor er også reaksjonen mellom SiO_2 og $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hovedreaksjonen for pozzolaner. Den kjemiske likningen for reaksjonen er: (Mindess et al. 2003)

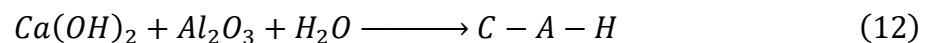
Formel 11 Pozzolanreaksjonen for silika i flygeaske



Som man kan se av likningen dannes det samme reaksjonsproduktet som også dannes av reaksjonene til klinkermineralene C_3S og C_2S med vann. Det er imidlertid noen ulikheter i molarforholdene i C-S-H-gelen, pozzolanreaksjonen vil gi et noe lavere C/S-forhold i sementgelen enn sementgel fra hydratisering av sement. (Mindess et al. 2003)

Flygeaske inneholder også en del aluminiumsoksid. Alumina er som silikaen amorf i flygeasken, og har derfor et pozzolant potensiale. Den kjemiske likningen for pozzolanreaksjonen til aluminiumsoksid er:

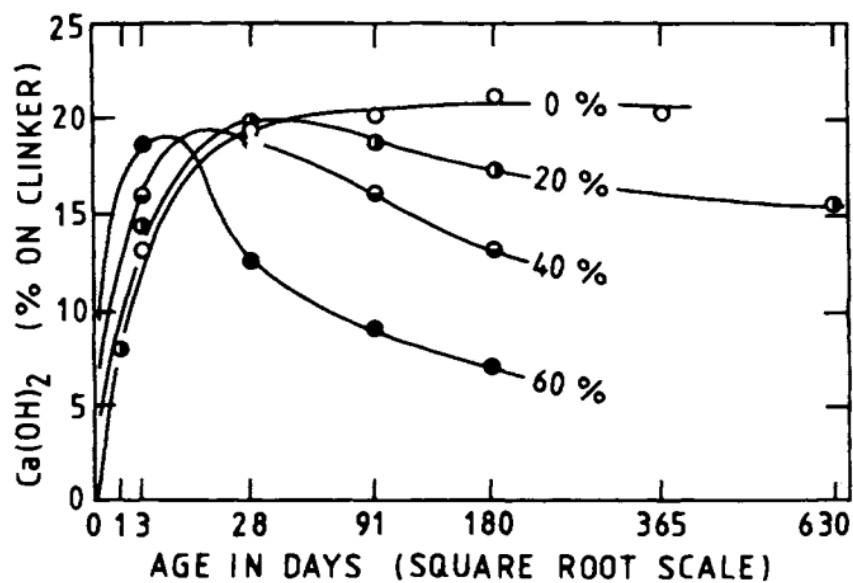
Formel 12 Pozzolanreaksjonen for alumina i flygeaske



Reaksjonen mellom Al_2O_3 og $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i vann danner et reaksjonsprodukt kalt kalsiumaluminathydrat, forkortet til C-A-H. Dette reaksjonsproduktet bidrar til fasthet i betongen. I og med at det vanligvis er mye mindre alumina enn silika i flygeaske, er dette ikke den viktigste pozzolanreaksjonen.

Pozzolanreaksjonen starter ikke før det har blitt dannet tilstrekkelig med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fra reaksjonen mellom vann og sement. Det tar med andre ord et par dager fasthetsutviklingen som følge av pozzolanreaksjonen tar til. For flygeaske fra starter pozzolanreaksjonen etter ca. 14

dager og varer deretter i ca. 150 dager. (Wesche 1991) Det fordi at flygeaskekornene er beskyttet med en fast glassoverflate som må brytes ned før de reaktive oksidene kan løse seg i $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og reagere med vann at det tar noe tid før reaksjonen setter i gang. Glass løser seg opp ved høy alkalitet, for at glassoverflaten skal korrodere må derfor alkaliteten i betongen være høy. Noe som vil si at det må dannes en tilstrekkelig andel av det basiske kalsiumhydroksidet i hydratiseringsreaksjonen før glassoverflaten oppløses og pozzolanreaksjonen kan starte. (Li et al. 2000)



Figur 3-13 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -innhold i prosent av total sementvekt for betong med ulike mengder erstattet flygeaske over tid (Taylor 1997)

Som man kan se av figur 2-13 har Taylor funnet en sammenheng mellom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -mengden i betongen i forhold til den originale sementvekten for ulike tilsetningsnivåer av flygeaske med mye SiO_2 og lite CaO .

Av figuren kan man lese at betong uten tilsetning av flygeaske produserer en mengde kalsiumhydroksid lik omtrent 20 % av den tilsatte sementmassen. Etter at hydratiseringen er fullført holdes $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -mengden konstant for betong uten flygeasketilsetning. Tilsetning av flygeaske fører derimot til at mengden $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i forhold til sementvekten reduseres over tid. Siden denne reduksjonen skjer som følge av at pozzolanreaksjonen forbruker $\text{Ca}(\text{OH})_2$ til å produsere ytterligere C-S-H, kan pozzolanreaksjonens virkning følges ved å overvåke andelen kalsiumhydroksid i betongen over tid. (Taylor 1997)

Tilsetning av flygeaske fører til økt avbindingstid dersom størkningsakselererende tilsetningsstoffer ikke benyttes. Figuren til Taylor viser likevel at betong med flygeaske akselererer produksjonen av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ på et tidlig stadium. Grunnen til dette antas å være at

tilstedeværelsen av flygeaske gir hydratiseringen av klinkermineralet C_3S mulighet til å danne krystalliserte reaksjonsprodukter også på overflaten av flygeaskekornene. (Kawada & Nemoto 1967) Det blir med andre ord større totalt kornoverflateareal tilgjengelig for sementgelen å feste seg til. Det er likevel viktig å påpeke at den totale mengden av $Ca(OH)_2$ i betongen reduseres ved flygeasketilsetning siden dette også medfører redusert total sementmengde i betongen. Figur 2-13 viser $Ca(OH)_2$ -innholdet i prosent av *benyttet* sementvekt.

Pozzolanreaksjonen vil altså kunne øke fastheten i betongen ved å produsere ytterligere sementgel med høy fasthet gjennom å forbruke $Ca(OH)_2$ uten fasthet. Som for hydratiseringsreaksjonene vokser sementgelen som dannes av pozzolanreaksjonen av flygeaske inn i kapillærporøsiteten. Dette fører til at den flygeasketilsatte betongen over tid blir tettere samtidig som den blir sterkere. Pozzolaniteten til et materiale forteller noe om materialets evne til å reagere med vann og $Ca(OH)_2$ og danne faste reaksjonsprodukter over tid.

Som nevnt i kapittel 2.1 består sementen består av fire klinkermineraler som hver for seg frigjør varme i reaksjon med vann. Alle hydratiseringsreaksjonene er altså eksoterme. Det er allment kjent at det er korrelasjon mellom varmeutviklingen til betongen og hastigheten til fasthetsutviklingen. Bruk av flygeaske som sementerstatning i betong fører til lavere varmeutvikling og dermed også senere fasthetsutvikling i betongen sammenlignet med betong uten flygeaske. Man kan sammenligne fasthetsutviklingen fra pozzolanreaksjonen med fasthetsutviklingen fra C_2S sin reaksjon med vann. C_2S er klinkermineralet i portlandsement med den laveste reaktiviteten og dermed også den tregeste fasthetsutviklingen. Varmeutviklingen som følge av hydratiseringen av C_2S er på omtrent 43 kJ/mol, mens varmeutviklingen fra pozzolanreaksjonen til flygeaske er på ca. 12 kJ per $Ca(OH)_2$ -mol. Fasthetsutviklingen som følge av pozzolanreaksjonen av flygeaske er dermed en veldig treg prosess sammenlignet med sementhydratisering. (Mindess et al. 2003)

Som følge av den retarderte fasthetsutviklingen for flygeasketilsatt betong vil ikke resultatene fra testing av 28-døgnsfastheten være like relevante for betong med flygeaske. For å oppnå en spesifisert 28-døgnsfasthet vil man ved flygeasketilsetning måtte benytte et lavere v/b-forhold enn en tilsvarende betong uten flygeaske. Pozzolanreaksjonen gir derimot mye bedre utslag på fasthetstester over lenger tid. Vanligvis vil 90-dagersfastheten til betong med flygeaske være høyere enn for en tilsvarende betong uten flygeasketilsetning. (Taylor 1997).

Pozzolanreaksjonen vil bare fortsette så lenge det er tilstrekkelig med vann tilgjengelig for reaksjon i betongen, det er derfor viktig at betongen holdes fuktig i lang tid dersom man skal få utnyttet pozzolanreaksjonen fullstendig. Dersom vannet brukes opp før pozzolanreaksjonen er fullført vil den gjenværende flygeasken fungere som filler i betongen. (Mindess et al. 2003)

3.14 Pozzolan aktivitetsindeks

Pozzolaniteten til et tilsetningsstoff bestemmes av pozzolan aktivitetsindekstest og utføres i henhold til NS-EN 450-1. Dette er en mekanisk testmetode for å bestemme virkningsgraden til tilsetningsmaterialer tiltenkt benyttet som sementerstatning i betong, i dette tilfellet flygeaske fra flisfyring. Pozzolaniteten til flygeasken finnes ved å sammenligne trykkfastheten til en flygeasketilsatt mørtel med trykkfastheten til en referansemørtel med sement som eneste bindemiddel. For den flygeasketilsatte mørtelen skal 25 % av sementen erstattes med tilsetningsstoffet som undersøkes.

For at flygeaske fra flisfyring skal kunne regnes som et pozzolan må den flygeasketilsatte mørtelens trykkfasthet etter 28 dager være over 75 % av trykkfastheten til referansestøpen¹.

Pozzolan aktivitetsindeks beregnes på følgende måte:

Formel 13 Beregning av pozzolan aktivitetsindeks

$$A_i = \frac{f_{cs}}{f_{cr}} * 100 (\%) \quad (13)$$

Der:

- A_i er aktivitetsindeks (%)
- f_{cs} er trykkfastheten til mørtelen med sementerstatning (N/mm²)
- f_{cr} er trykkfastheten til referansemørtelen (N/mm²)

¹ Mørtelens trykkfasthet kreves samtidig over 85 % av referansemørtelen etter 90 dager. Dette ble ikke testet av tidsmessige begrensninger.

3.15 Bestandighet for flygeasketilsatt betong

Bestandighet er for betong evnen til å motstå miljøpåkjenninger. Dette kan være påkjenninger fra for eksempel vann, veisalt eller frost. Betong kan påføres skader i selve betongen i form av oppsprekking og riss, eller i armeringsstålet i form av korrosjon. Skadene kan være både estetiske og strukturelle. NS-EN 206 deler betong inn i bestandighetsklasser etter evnen til å motstå slike påkjenninger. En tilsetning av flygeaske i betongen påvirker også bestandigheten til betongen. Dette er kort omtalt i delkapitlene 2.15.1-2.15-3.

3.15.1 Syreangrep

Syreangrep kan forekomme for betong med lav pH. Angrepsmekanismen er at sementgelen som dannes i hydratiseringen blir omdannet til stoffer uten fasthet. Slike angrep starter på overflaten ved at sure stoffer fra omgivelsene kommer i kontakt med betongen. Syreangrep kan enkelt identifiseres ved at tilslaget blir synlig på betongoverflaten når den omdannede sementgelen blir vasket bort av regnet.

Bruk av flygeaske som sementerstatning vil redusere pH-nivået i betongen og dermed gjøre den mer utsatt for syreangrep. Det er to grunner for dette, der begge bygger reduksjonen av det basiske kalsiumhydroksidet i betongen:

1. Tilsetning av flygeaske medfører en tilsvarende reduksjon i sementmengde, noe som fører til at det dannes mindre $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i hydratiseringen enn tilsvarende betong uten flygeaske.
2. Flygeaskens pozzolanreaksjon forbruker $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i produksjonen av C-S-H. Betong med flygeaske får dermed lavere alkalinitet, og er dermed mer utsatt for syreangrep.

3.15.2 Alkali-silika reaksjoner

Tilsetning av flygeaske kan redusere risikoen for alkali-silika reaksjon i betongen. Dette er en reaksjon som på grunn av reaksjonsproduktenes ekspansjon fører til en svelling som i verste fall kan føre til oppsprekking i betongen. Reaksjonen foregår i vann mellom alkalireaktivt tilslag og alkaliniteten i sementpastaen. Denne reaksjonen vil fortsette så lenge det er vann og reagenter tilgjengelig, uavhengig av om det er rom for reaksjonsproduktene. Oppsprekking som følge av alkali-silika reaksjonen medfører også at betongen blir mer utsatt for syreangrep.

Grunnen til at flygeasketilsetningen reduserer risikoen for alkali-silika reaksjon er at pozzolanreaksjonen til reduserer pH-nivået, og dermed også alkaliniteten i betongen. Flygeaske

fra flisfyring har vist seg å være en enda mer effektiv bekjemper av alkali-silika reaksjonen enn flygeaske fra kullkraftverk. (Wang & Baxter 2007)

3.15.3 Kloridinntrengning

Bruk av flygeaske gir en tettere betong og øker dermed motstanden mot kloridinntrengning. Kloridinntrengning gir høyt kloridinnhold i betongen og kan føre til korrosjon av armeringsstålet. Dette skjer ved at kloridene bryter ned et beskyttende lag med oksider som ligger rundt armeringsjernene, slik at korrosjonen uhindret får starte. (Maage 2015) Som nevnt i kapittel 2.13 fører pozzolanreaksjonen til flygeaske til at det dannes ytterligere sementgel med høy fasthet som over tid vokser inn i kapillærporene til betongen. Dette reduserer porøsiteten i betongen og gir derfor en tettere betong. En tettere betong gjør det vanskeligere for kloridene å komme inn i betongen på denne måten bidrar derfor flygeasketilsetningen til økt motstand mot kloridinntrengning.

3.15.4 Sulfatangrep

Sulfatangrep skjer ved at sulfater (SO_3) reagerer med klinkermineralet C_3A og danner et reaksjonsprodukt ettringitt som har større volum enn reagentene. Dette kan gi ekspanderende volumendringer inne i betongen som gjør seg synlig som oppsprekking på overflaten. Dette er spesielt uheldig da oppsprekkingen reduserer styrken og gir lettere tilgang for nye angrep (Maage 2015).

Vanligvis kommer de skadelige sulfatene fra miljøet rundt betongen, for eksempel fra sjøvann og kloakk. Tilsetning av flygeaske med høyt sulfatinnhold kan føre til at betongen utsettes for sulfatangrep. NS-EN 450-1 tillater ikke at sulfatinnholdet i flygeasken overstiger 3,0 vekt%, for flygeaske fra kullkraftverk er sulfatinnholdet generelt så lavt at dette aldri blir et problem.

Flygeaske fra flisfyring som har sulfatinnhold over 3,0 vekt% kan føre til sulfatangrep i flygeasketilsatt betong.

4 Materialer og metodebeskrivelser

Det er støpt ut betong med ulike mengder flygeasketilsetning og gjort tester på trykkstyrken til prøvelegemer ved ulike herdetider. Dette arbeidet er utført på betonglaboratoriet ved NMBU i perioden november 2015 til mars 2016.

4.1 Materialer

Materialene benyttet i forsøkene er sement, flygeaske fra flisfyringsanlegg, superplastiserende tilsetningsstoff og fint- og grovt tilslag.

4.1.1 Sement



Figur 4-1 Norcem standardsement (CEM I 42,5 R)

Foto: Peder Johan Hafsås

Sementen benyttet i forsøkene var Norcem standardsement. Dette er en portlandsementtype tilpasset norske forhold uten tilsetning av flygeaske i sementproduksjonen. Sementen er tilpasset å gi moderat varmeutvikling og god støpelighet. (Norcem)

Sementen ble hentet direkte fra Norcems fabrikk i Brevik. Produksjonen av portlandsement er forklart i kapittel 2.2.1.

Produktinformasjonsfoile for sementen kan finnes i vedlegget.

4.1.2 Flygeaske



Figur 4-2 Flygeaske fra Skagerak Varme AS, Tønsberg
Foto: Peder Johan Hafsås

Asken som ble brukt som sementerstatning i flere av blandingene er flygeaske fra firing av oppfliset trevirke hentet på flisfyringsanlegget til Skagerak Varme AS i Tønsberg. Fyringsflisen ble levert til anlegget av hogstfirmaet Viken Skog SA. Ifølge Viken bestod brenselet i det aktuelle tidsrommet (november 2015) av flis fra 70 % lauvvirke, 15 % granvirke og 15 % furuvirke. Trevirket bestod av hele trær med ved, bark og greiner før oppflisingen. Skagerak Varme AS fyrer med en temperatur på ca. 1200 °C i brennkammeret.

På bakgrunn av tidligere forskning antas det i reseptberegningene at den benyttede flygeasken har en densitet på 2,4 g/cm³. Se tabell 2-10.

4.1.3 Superplastiserende tilsetningsstoff

For å kunne justere støpeligheten til den ferske betongen ble det tilsatt SP-stoff i blandingene. Mengden ble justert med øyemål for de enkelte blandingene med den hensikt å holde konstant plastisitet i betongen og at betongen skulle være støpelig ved de ulike flygeasketilsetningsgradene.

Det benyttede SP-stoffet, Sika ViscoCrete SC-315, var levert i væskeform og ble følgelig regnet som vann i v/b-beregningen. I tillegg til de vannreducerende egenskapene har dette tilsetningsstoffet størkningsretarderende effekt.

SP-stoffet ble hentet på Betong Øst i Vestby. Produktinformasjonsfoile kan finnes i vedlegget.

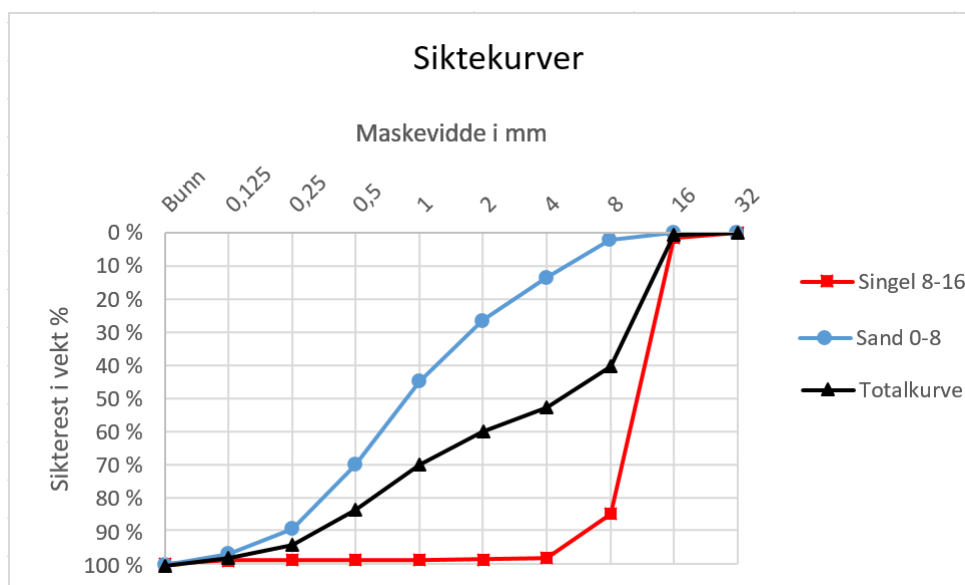
4.1.4 Tilslag

Det ble benyttet grovt og fint tilslag i betongen, der begge tilslagstypene er utvunnet ved Langbrekke Grustak AS i Mysen og hentet fra siloene til Betong Øst i Vestby. Korngradering av uvasket, tørt tilslag, ble utført etter metode beskrevet i NS-EN 933-1:2012.

Til sikting ble det benyttet en serie sikter med minkende maskevidde. Siktene ble koblet sammen med den groveste maskevidden øverst og bunnpanne i bunnen for så å bli plassert på en ristemaskin. Tilslaget var på forhånd stekt på stekeplate for å sørge for at det var helt tørt før siktingen. En hensiktsmessig mengde tørt tilslag ble så fylt i den sammenkoblede sikteserien. Sikteserien med tilslaget ble ristet i ca. to minutter. Mengden tilslag fanget i hver sikt ble veid opp for å beregne tilslagets korngradering. Denne prosessen ble utført separat for det fine og grove tilslaget, men etter samme metode. Målt korngradering for benyttet tilslag er presentert i tabell 3-1 og figur 3-3.

Tabell 4-1 Korngradering av tilslag

Korngradering av tilslag			
Maskevidde [mm]	Sikterest i vekt %		
	Sand 0-8	Singel 8-16	Totalt
32	0 %	0 %	0 %
16	0 %	1 %	1 %
8	2 %	85 %	40 %
4	13 %	98 %	52 %
2	26 %	99 %	60 %
1	45 %	99 %	70 %
0,5	70 %	99 %	83 %
0,25	89 %	99 %	94 %
0,125	97 %	99 %	98 %
Bunn	100 %	100 %	100 %



Figur 4-3 Siktekurver for tilslag

4.1.5 Fukt i tilslag

Fukttinnholdet i tilslaget ble bestemt for å kunne justere mengden blandevann i reseptene. Dette ble gjort ved måle massen til en representativ mengde fuktig tilslag, tørke det ved steking for så finne massen til det tørre tilslaget. Differansen mellom fuktig og tørt tilslag er da massen av vannet i det fuktige tilslaget. Fukttinnholdet ble funnet ved formelen:

Formel 14 Beregning av fukt i tilslag

$$fukt \%_{tilslag} = \left(1 - \frac{M_{tørr}}{M_{fuktig}} \right) * 100 \quad (14)$$

Før fuktberegningene ble tilslaget blandet i en betongblander for å sikre jevn fuktighet i tilslaget. Fukttinnholdet ble beregnet separat for det fine og grove tilslaget. I perioden mellom de ulike støpingene ble tilslaget lagret i fuktsikre beholdere for å holde konstant fuktnivå i tilslaget. Det ble korrigert for vannabsorpsjon i tilslaget ved utarbeidelsen av resepter. Vannabsorpsjonsprosenten i tilslaget er ca. 0,80 % for både grovt og fint tilslag. Korndensiteten er 2,66 g/cm³ for fint tilslag og 2,70 g/cm³ for grovt tilslag. (Langbrekke Grustak AS)

4.1.6 Blandevann

I henhold til i NS-EN 1008:2002 «Blandevann for betong», punkt 3.1, er drikkevann regnet som egnet til bruk i betong og trenger ikke prøves ytterligere.

Blandevannet benyttet er kommunalt drikkevann fra Oppegård vannverk. Offentlig informasjon fra viser at vannkvaliteten er stabil og ligger innenfor kravene fra drikkevannsforskriften. (Oppegård 2015)

4.2 Blandeparametre/resepter

Det støpt betong fra 6 ulike resepter i forsøket, alle med ulik andel tilsatt flygeaske fra flisfyringsanlegg. En referanseprøve uten flygeasketilsetning ble støpt for å danne sammenligningsgrunnlag for de flygeasketilsatte prøvene. V/b-tallet er 0,55 for alle blanderresepter.

Reseptene er utarbeidet av ekstern veileder Bernt Kristiansen og var tilrettelagt å gi 1 m³ betong. På grunn av kapasiteten til den tilgjengelige tvangsblanderen ble reseptene justert til å gi 15 liter betong.

Tabell 4-2 Oversikt over utførte støper

Blanding ²	Støpedato
Referanse	17. nov. 2015
10 % FA – 1	18. nov. 2015
10 % FA – 2	18. nov. 2015
20 % FA – 1	20. nov. 2015
20 % FA – 2	20. nov. 2015
30 % FA – 1	22. nov. 2015
30 % FA – 2	22. nov. 2015
40 % FA – 1	23. nov. 2015
40 % FA – 2	23. nov. 2015
50 % FA – 1	24. nov. 2015
50 % FA – 2	24. nov. 2015

² FA = flygeaske

I de flygeasketilsatte prøvene indikerer blandingsnavnet i tabell 3-2 mengden sement erstattet med flygeaske, for eksempel er blandingen «10 % FA» tilsatt flygeaske tilsvarende 10 % av sementvekten til referansestøpen. Hver av reseptene med flygeasketilsetning ble støpt i to omganger for å gi et større utvalg resultater. For eksempel er blandingen «10 % FA – 1» den første støpen av blanderesepten med 10 % flygeasketilsetning. Referansestøpen ble støpt en gang.

Fullstendige resepter for alle blandingene kan finnes i vedlegget.

Da flygeasken ikke tidligere er brukt i betong var heller ikke flygeaskens virkningsgrad kjent på forhånd. Det ble derfor besluttet å benytte $k\text{-faktor} = 1,0$ i utarbeidingen blandereseptene. Dette medfører at man ved tilsetning av flygeaske reduserer sementvekten tilsvarende vekten til tilsatt flygeaske for å holde masseforholdet konstant i alle reseptene. Flygeasken erstatter altså sement «likt for likt». Effektiv vannmengde holdes dermed konstant for alle reseptene.

4.3 Blandeprosedyre

- Måling av fukt i tilslag.
- Justering av blanderesept på grunnlag av resultatene fra fuktmålingen.
- Tilslag, sement, flygeaske og vann ble veid opp.
- Innsiden av trommelen til tvangsblenderen ble fuktet med vætet klut så den ble overflatefuktig.
- Grovt og fint tilslag ble tilsatt trommelen og blandet i 30 sekunder.
- De resterende tørre ingrediensene ble tilsatt (sement og eventuell flygeaske).
- De tørre materialene ble blandet i ca. ett minutt for å sørge få jevn fordeling av de tørre materialene.
- Blandevann ble tilsatt med trommelen gående.
- Blandingen ble stoppet ca. ett minutt etter at blandevannet ble tilsatt for å dra av den ikke blandede massen langs kanten i bunnen av trommelen der blandeskjeen ikke kom til. Til dette ble det brukt murereskje.
- Tvangsblenderen ble startet opp og SP-stoff tilsatt etter behov.
- Betongen ble blandet til den var ferdigblandet. Dette tidspunktet ble bedømt visuelt.



Figur 4-4 Blanding i tvangsblender
Foto: Christian Johan Grimsrud

4.3.1 Måling av synk og synkutbredelse



Figur 4-5 Måling av synkmål
Foto: Christian Johan Grimsrud

Synkmålet til fersk betong ble målt etter metode beskrevet i NS-EN 12350-2:2009 «Prøving av fersk betong - Del 2: Synkmål». Dette ble gjort umiddelbart etter blanding.

Prosedyre for synkmåling:

- En hul synkkjegle ble plassert på en underlagsplate dekket i plast.
- Innsiden av synkkjeglen og plastdekket ble fuktet med en vættest klut.
- Synkkjeglen ble fylt med fersk betong mens kjeglen ble presset mot underlagsplaten ved at en person sto på fotstøttene.
- Synkkjeglen ble fylt i tre lag á 1/3 av synkkjeglens volum.
- Etter hver av de tre fyllingene ble det staket 25 ganger med stakestav. Kun det til enhver tid øverste laget ble staket, uten å penetrere et allerede staket lag.
- Synkkjeglen ble toppet og glattet av med stakestaven.
- Slumpkjeglen ble løftet vertikalt fra betongmassen i løpet av 5 sekunder i én konstant bevegelse.
- Synkkjeglen ble plassert vis á vis betongmassen.
- Betongens synk er da den vertikale avstanden fra toppen av synkkjeglen til øverste punkt av den testede betongmassen.
- Utbredelsen til synkprøvene ble målt i kryss, og beregnet etter formel 5 i kapittel 2.5.1.

4.4 Utstøping i prøveformer

Etter måling av synk og utbredelse ble betongen støpt i 100x100 mm prøveformer av stål. Formene var på forhånd smurt med matolje for å unngå at betongen heftet til formene. Prosedyre ved utstøping var:

- Prøveformene ble fylt halvfulle med fersk betong.
- Halvfulle former ble staket 20 ganger.
- Formene ble fylt og staket på nytt 20 ganger, uten å penetrere det allerede stakede laget.
- Kantene på prøveformene ble staket med murerkje fem ganger på hver av de fire sidene for å begrense poremengden på prøveoverflatene.
- Formene ble ristet kraftig i 5 sekunder for å sørge for god utflytning i prøveformene og redusere porevolum.
- Prøveformene ble dekket i plast og lagt til 24-timers herding i romtemperatur (20° C).

Antall prøver:

Hver blanding gav 12 terningprøver, dette medfører at to prøvestykker fra hver blanding ble testet for hver av de stipulerte herdetidene. For de flygeasketilsatte prøvene gir dette fire prøvestykker per fasthetstest, da de ble gjort to blandinger for hver flygeasketilsetningsgrad.

4.4.1 Herding av prøver



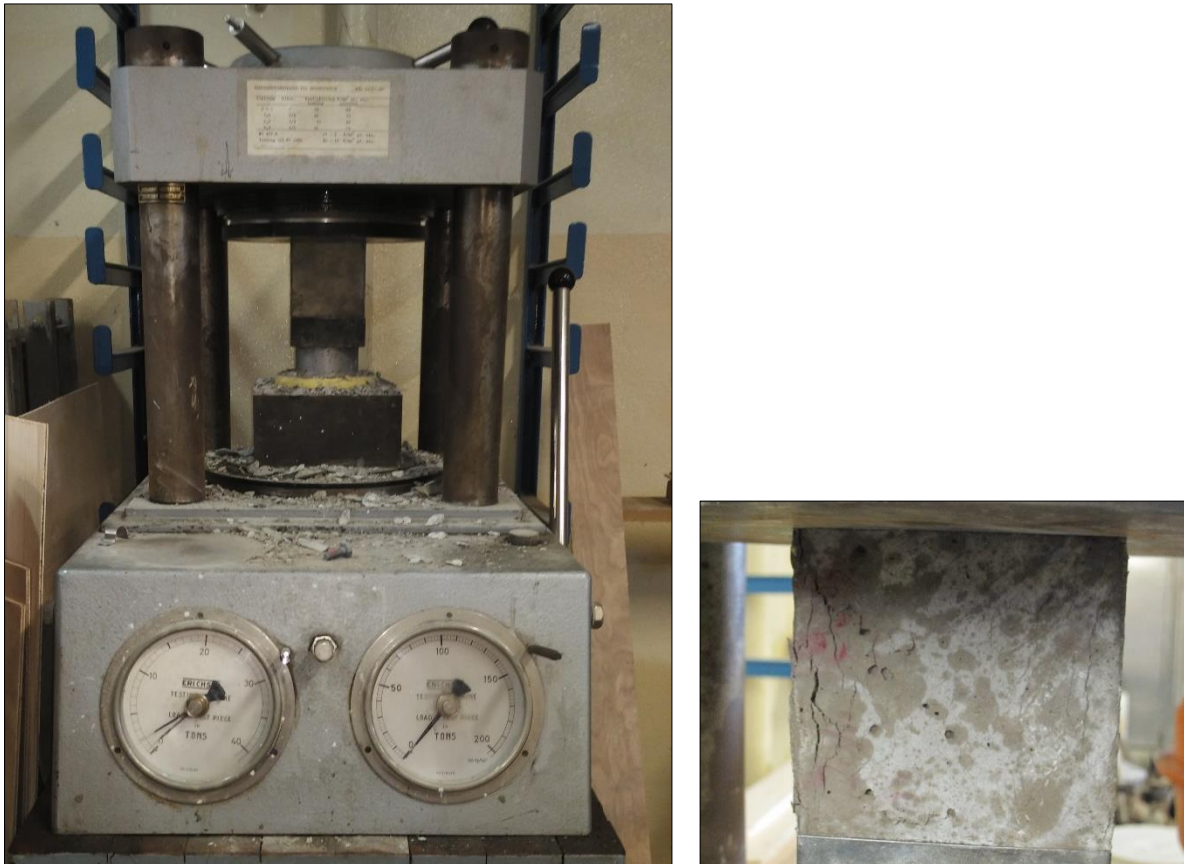
Figur 4-6 Herding av prøver i vannbad
Foto: Christian Johan Grimsrud

Prøvene lå i terningformene pakket inn i plast de første 24 timene etter blandingene for så å bli tusjmerket og lagt i vannbad. Prøvene med 10% flygeasketilsetning ble liggende i terningformene i 48 timer, da de ikke var harde nok etter ett døgn. Prøvene herdet i vannbadet

helt fram til sin respektive trykkprøvedato. Vannbadet ble ved hjelp med fatvarmer og termometer justert til å holde en temperatur på 20°C.

4.4.2 Trykktesting av prøver

Trykkfastheten ble målt etter NS-EN 12390-3:2009 «Prøving av herdet betong – Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet». Etter at prøvene hadde ligget i vannbad den stipulerte tiden ble trykkfastheten testet. Prøvene ble plukket opp av vannbadet og overflatetørket med papir.



Figur 4-7 Erichsen hydraulisk trykkpresse til venstre. Prøvelegem belastet til brudd til høyre
Foto: Peder Johan Hafsås

En Erichsen hydraulisk trykkpresse som kunne påføre en maksimal last på 200 tonn ble benyttet til trykkfasthetstestene. Terningene ble trykket til brudd og bruddlasten i kg ble lest av på innebygde måleurl.

Trykkfastheten ble testet etter 2-, 28-, 56- og 90-dagers herding.

Det ble testet fire prøveeksemplarer for hver blanderesept ved hver av de overnevnte herdetidene.

Støpeformene gir glatte overflater på sju av de åtte sidene til prøveeksemplarene. Siden den åttende overflaten er glattet manuelt for så å bli dekket av plast, varierer også planheten på denne overflaten fra prøve til prøve. For å få mest mulig samsvar i resultatene ble derfor prøvene belastet på to glatte overflater med den manuelt glattede flaten ut til siden.

4.5 Kjemisk analyse av flygeaske

De kjemiske analysene av flygeasken ble utført av forsker Janka Dibdiakova ved Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) på Ås. Resultatet fra analysene gir informasjon om grunnstoff- og oksidinnhold i flygeasken.

Oksidene i flygeasken ble identifisert ved at det først ble tatt prøver for å finne grunnstoffene i asken. Etter at grunnstoffene var funnet ble oksidene kalkulert matematisk.

4.6 Beregning av pozzolan aktivitetsindeks etter NS-EN 450-1

Mørtelen støpes i henhold til NS-EN 196-1, «Sementprøving», med følgende blandeforhold:

- $v/b = 0,50$
- sement/sand = 1/3

Det ble blandet en mørtel med 25 % flygeasketilsetning og en referansemørtel uten flygeasketilsetning. Trykkstyrken til mørtelprøver ble målt 7- og 28-døgns herding.

Det ble støpt en mørtelprøve av hver resept til prøving etter 7 dagers herding og to mørtelprøver av hver resept til prøving etter 28 dagers herding.

Trykktestingen ble utført på samme måte som for betongprøvene, se kapittel 3.4.2.

Tabell 4-3 Blandeparameter for mørtler til test av pozzolan aktivitetsindeks

	Fint tilslag	Sement	Vann	Flygeaske
	(kg)			
Referanse	6,000	2,000	1,000	0
Korr. for vann i sand	6,324	2,000	0,676	0
25 % FA	6,000	1,500	1,000	0,500
Korr. for vann i sand	6,324	1,500	0,676	0,500

Utstyr:

Sand 0-8 mm, Norcem standardsement, flygeaske, vann, vekt, murerbøtte 60 L, mekanisk mørtelmikser, murereskje, stakeredskap, prøveformer 10x10 cm.

Framgangsmåte

- Prøveformene smøres med olje.
- Sement, flygeaske og vann veies opp i riktig mengde i henhold til tabell 3-3.
- Vann og sement blandes i murerbøtta med mørtelmikseren gående på lav styrke i 30 sekunder.
- Sand helles i murerbøtta over 30 sekunder mens det mikses på lav styrke.
- Deretter følger miksing med full styrke i 30 sekunder.
- Miksing stanses i 90 sekunder mens kanten av murerbøtta dras av med murereskje for å sørge for at all masse blir blandet.
- Etter ytterligere 60 sekunder med miksing på full styrke mørtelen ferdig.
- Mørtelen fylles i terningformer, etter samme metode som beskrevet i prosedyren for utstøping av betong i prøveformer (se kapittel 3.4)
- Etter ett døgn i romtemperatur tas prøvene ut av formene og legges i vannbad med temperatur 20 °C til de har nådd riktig herdetid

4.8 Avvik ved laboratoriearbeid

Temperaturen i vannbadet skulle etter planen holdes konstant på 20 °C. Temperaturen varierte imidlertid fra ca. 18-25 °C de første 10 dagene etter den første støpen. Dette skjedde som følge av en kombinasjon av varierende romtemperaturer, varmeutviklingen til prøvene, og at det tok noe tid før man fant riktig innstilling på fatvarmeren. Dette kan ha påvirket resultatene til tidligfasthetsprøvingen.

Bassenget til betongprøvene veltet etter den tredje støpen. Prøvene tok ikke skade av dette, de ble berget umiddelbart etter hendelsen. Bassenget ble sikret mot velt etter dette.

Trykkpressen som ble brukt til trykktesting av terningprøver er av eldre modell. Pressen var ikke på forhånd kalibrert, noe som gjør det vanskelig å anslå dens nøyaktighet. I og med at den samme pressen ble nyttet for all testing vil man uansett kunne sammenligne og vurdere forskjeller i resultatene. En masterstudent som også skrev om betongteknologi testet noen av prøvene sine ved Høyskolen i Østfold der de har en moderne presse, resultatene viste seg å være relativt like.

Før prøvene ble lagt i vannbad ble prøvene merket med tusj for å kunne skille mellom prøvene fra den første og andre støpen for hver av de flygeasketilsatte blandingene. Tusjen viste seg imidlertid å ikke være tilstrekkelig vannfast. Derfor lot det seg ikke gjøre å sammenligne resultatene fra de to ulike støpene med samme flygeasketilsetning. Forskjeller i fasthet de imellom kunne blant annet forekommet på bakgrunn av ulike mengder tilsatt SP.

Det ble støpt for få mørtelprøver til beregning av pozzolan aktivitetsindeks. Én mørtelprøve av hver resept etter 7 dagers herding og to mørtelprøver etter 28 dager gir ikke et for veldig lite utvalg resultater.

5 Resultater

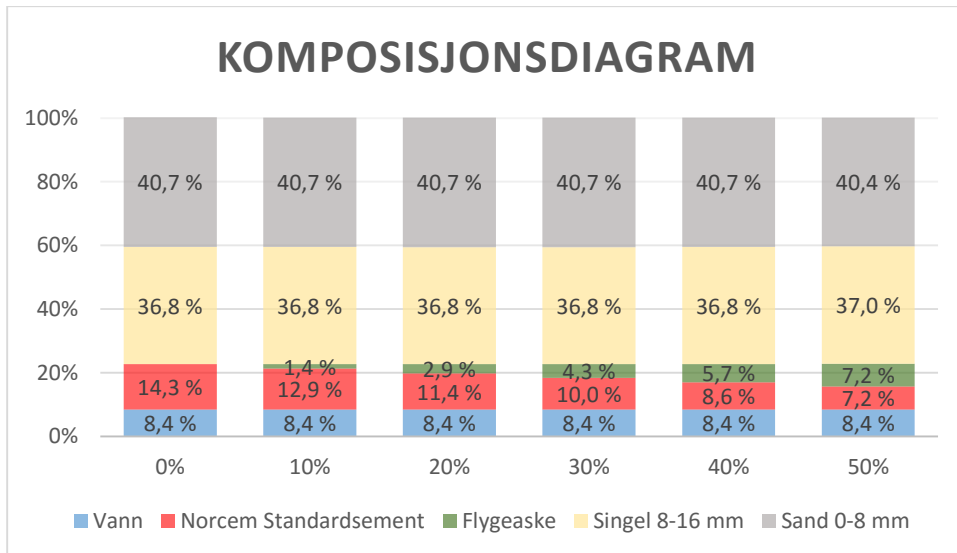
5.1 Fersk betong

Tabell 5-1 Blandeparametre, synkmål og tilsatt SP-stoff

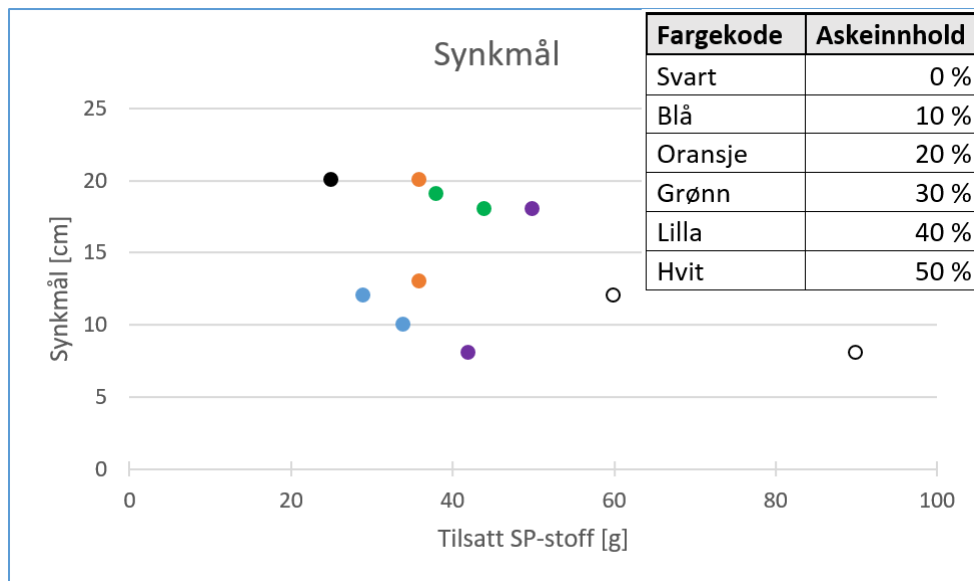
Støp ³	Synkmål	Vann	Sement	Flygeaske	Fint tilslag	Grovt tilslag	SP-stoff
	cm	kg					g
Kontroll	20	2,343	5,250	0,000	15,70	13,4	25
10 % - 1	12	2,343	4,725	0,525	15,70	13,4	29
10 % - 2	10	2,343	4,725	0,525	15,70	13,4	34
20 % - 1	20	2,343	4,200	1,050	15,70	13,4	36
20 % - 2	13	2,343	4,200	1,050	15,70	13,4	36
30 % - 1	18	2,493	3,675	1,575	15,54	13,4	44
30 % - 2	19	2,493	3,675	1,575	13,54	14,4	38
40 % - 1	8	2,493	3,150	2,100	15,54	13,4	42
40 % - 2	18	2,493	3,150	2,100	15,54	13,4	50
50 % - 1	12	2,545	2,625	2,625	15,30	13,4	60
50 % - 2	8	2,545	2,625	2,625	15,30	13,4	90

Blandereseptene ble tilpasset for å gi 15 liter fersk betong med v/b-forhold på 0,55. Det ble korrigert for fukt i tilslag.

³ Alle blandinger bortsett fra kontrollstøpen ble gjentatt en gang; for eksempel er 10 % - 1 den første blandingen med 10 % sement erstattet av aske.



Figur 5-1 Komposisjonsdiagram. Viser sammensetningen til de seks blandingene i vektprosent. Andel sement erstattet av flygeaske langs x-aksen. Her er fukt fra tilslag representert i vannbolkene.



Figur 5-2 Synkmålets sammenheng mellom askeinnhold og mengde tilsatt SP-stoff

5.2 Resultater fra kjemisk analyse av flygeaske

De mest relevante resultatene presenteres her. Fullstendige resultater fra den kjemiske analysen er å finne i vedlegg x.x

Resultater fra prøver dekomponert etter metode beskrevet i EN/TS 15290:2006.

Dekomponerte prøver er analysert med ICP-OES.

Resultatene er gitt som mg grunnstoff pr kg tørrstoff (mg/kg TS).

Tabell 5-2 Resultater av kjemisk analyse av flygeaske – pH, uforbrent karbon og tungmetallinnhold

Prøveidentifikasjon	pH	C % (LOI)	Cd mg/kg (0.2) (Kadmium)	Pb mg/kg (0.4) (Bly)	Cu mg/kg (0.6) (Kobber)	Cr mg/kg (1.1) (Krom)	Ni mg/kg (1.1) (Nikkel)	Zn mg/kg (4.4) (Sink)
Flygeaske, Skagerak Varme, Tønsberg 10.11.2015	12,69	5,197	77,7	324,6	255,8	60,8	17,6	13455,0
Flygeaske, Skagerak Varme, Tønsberg 10.11.2015	12,70	5,171	78,3	329,9	258,0	62,1	18,1	13759,0
Flygeaske, Skagerak Varme, Tønsberg 10.11.2015	12,76	5,200	73,3	308,5	239,8	56,2	16,7	13694,0
Gjennomsnitt	12,72	5,2	76,4	321,0	251,2	59,7	17,5	13636,0

Tabell 5-3 Resultater fra kjemisk analyse av flygeaske, oksider

Oksid:	Silisiumoksid	Aluminiumoksid	Jernoksid	Kalsiumoksid	Svoveltrioksid	Natriumoksid	Kaliumoksid	Magnesiumoksid	Fosforpentoksid
Kjemisk formel:	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅
Vektprosent: *	5,42	0,60	0,70	21,29	15,04	1,32	23,81	3,61	2,86

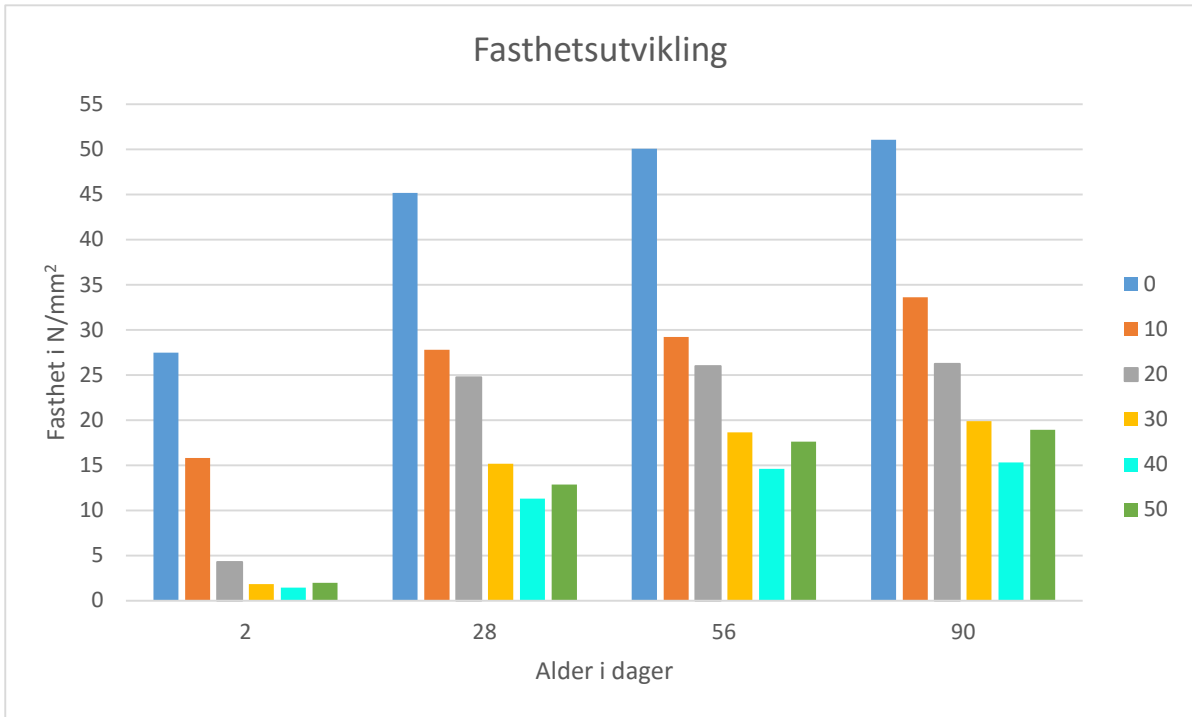
*Den samlede vektprosenten til disse oksidene er ikke 100 % da kun de viktigste elementene for flygeaske er presentert i denne tabellen.

5.3 Herdet betong

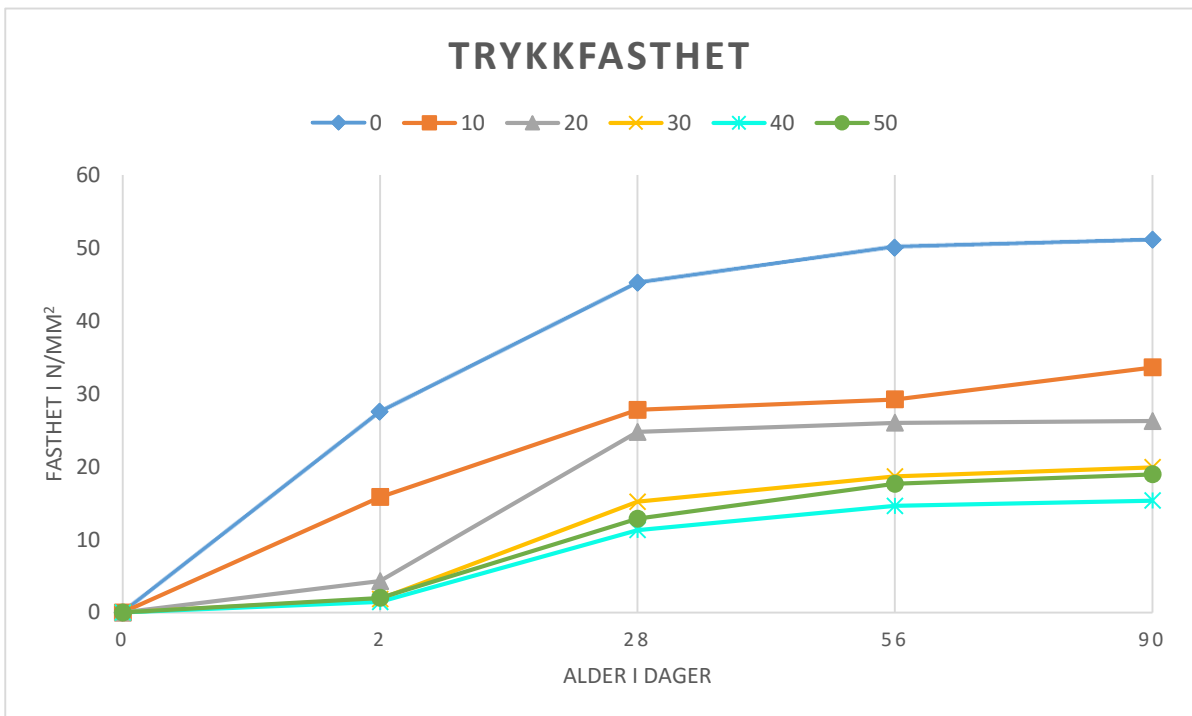
Tabell 5-4 Oversikt over fastheter i N/mm² til betongprøver med ulikt askeinnhold ved 2-, 28-, 56- og 90-dagers herding

Trykkfasthet på betongprøver							
Alder	Prøve	Støp					
		Referanse	10 % FA	20 % FA	30 % FA	40 % FA	50 % FA
2	1	28,45	16,68	2,65	1,86	1,67	1,86
	2	26,49	15,70	2,45	1,81	1,77	1,86
	3	-	15,70	5,69	0,98	1,18	2,06
	4	-	15,21	6,38	2,65	1,18	2,16
	Gjennomsnitt:	27,47	15,82	4,29	1,83	1,45	1,99
28	1	45,13	27,27	24,53	15,11	11,38	10,79
	2	45,22	28,94	25,21	14,91	12,46	11,28
	3	-	27,47	24,23	15,70	10,01	14,22
	4	-	27,47	25,02	15,01	11,38	15,11
	Gjennomsnitt:	45,18	27,79	24,75	15,18	11,31	12,85
56	1	50,91	31,39	26,00	17,17	14,42	17,56
	2	49,25	29,43	25,02	17,76	14,72	17,46
	3	-	27,47	28,94	19,72	14,81	18,34
	4	-	31,98	24,03	19,91	14,52	17,17
	Gjennomsnitt:	50,08	30,07	26,00	18,64	14,62	17,63
90	1	43,16 ⁴	33,84	28,94	19,13	15,21	19,13
	2	51,01	34,34	25,02	20,60	15,21	19,13
	3	51,11	33,84	25,51	19,33	15,60	18,64
	4	-	32,37	26,98	20,50	15,30	18,84
	Gjennomsnitt:	51,06	33,60	26,61	19,89	15,33	18,93

⁴ Denne prøven ble belastet på den ru siden og gikk derfor i brudd for tidlig. Den er ekskludert fra gjennomsnittsberegningen.



Figur 5-3 Oversikt over fasthetsutviklingen til betongprøver med ulikt flygeaskeinnhold (gjennomsnittlige verdier)



Figur 5-4 Graf over fasthetsutviklingen til betongprøver med ulikt flygeaskeinnhold (gjennomsnittlige verdier)

5.4 k-faktor – flygeaskens virkningsgrad

Her presenteres flygeaskens k-faktorer beregnet etter formel 10, side 44, for de ulike blandingene og dens endring over tid.

Eksempel på utregning av formel 10:

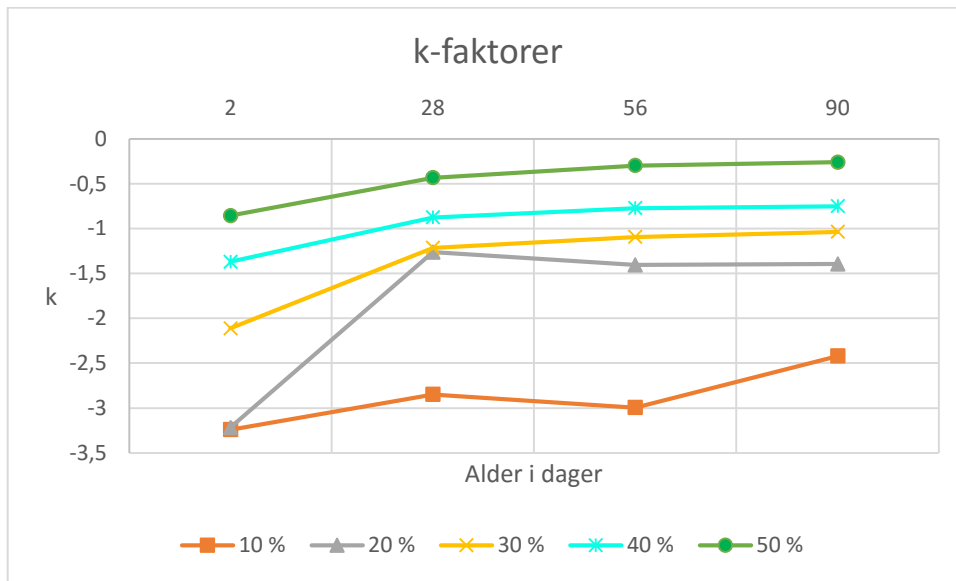
Etter 28 døgns herding hadde referanseprøvene en gjennomsnittlig trykkfasthet på 45,18 N/mm² mens prøvene med 20 % flygeasketilsetning hadde en gjennomsnittlig trykkfasthet på 24,75 N/mm². Formel 10 gir da:

$$k = \frac{\left(\frac{f_c(t)_{fa}}{f_c(t)_{npc}} - 1\right)}{r_{fa}} + 1 = \frac{\left(\frac{24,75}{45,18} - 1\right)}{0,2} + 1 = -1,26$$

K-faktoren, eller flygeaskens virkningsgrad ved 20 % sementerstatning og 28 døgns herding blir da -1,26.

Tabell 5-5 Beregnede k-faktorer for flygeasken ved 2-, 28-, 56-, og 90-dagers herding

Beregnede k-faktorer					
Alder	Støp				
	10% FA	20% FA	30% FA	40% FA	50% FA
2	-3,24	-3,22	-2,11	-1,37	-0,86
28	-2,85	-1,26	-1,21	-0,87	-0,43
56	-3,00	-1,40	-1,09	-0,77	-0,30
90	-2,42	-1,39	-1,03	-0,75	-0,26



Figur 5-5 Effektivitetsfaktorens variasjon over tid for de ulike asketilsetningsgradene

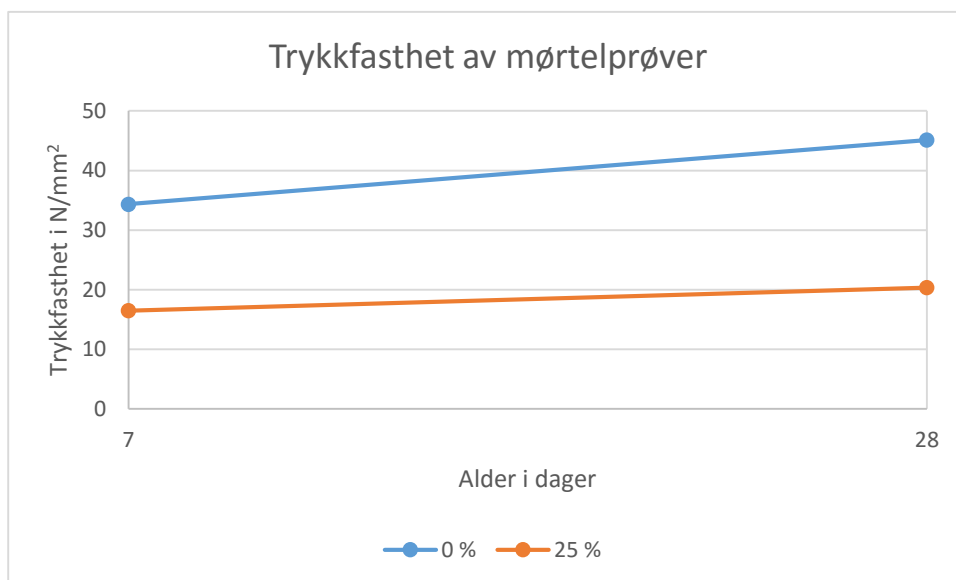
5.6 Pozzolan aktivitetsindeks

Tabell 5-6 Trykkfasthet for mørtelprøver i N/mm²

Trykkfasthet for mørtelprøver			
Alder	Prøve	Flygeasketilsetning i mørtel	
		0 %	25 %
7	1	34,34	16,48
	Gjennomsnitt:	34,34	16,48
28	1	41,20	18,64
	2	49,05	22,07
	Gjennomsnitt:	45,13	20,36

Pozzolan aktivitetsindeks etter 28 dager beregnes etter formel 13, side 48:

$$A_{28} = \frac{f_{cs}}{f_{cr}} * 100 (\%) = \frac{20,36}{45,13} * 100 (\%) = 45,1 \%$$



Figur 5-6 Trykkfasthet til mørtelprøver støpt for å finne pozzolan aktivitetsindeks for flygeasken (gjennomsnittlige verdier)

6 Diskusjon

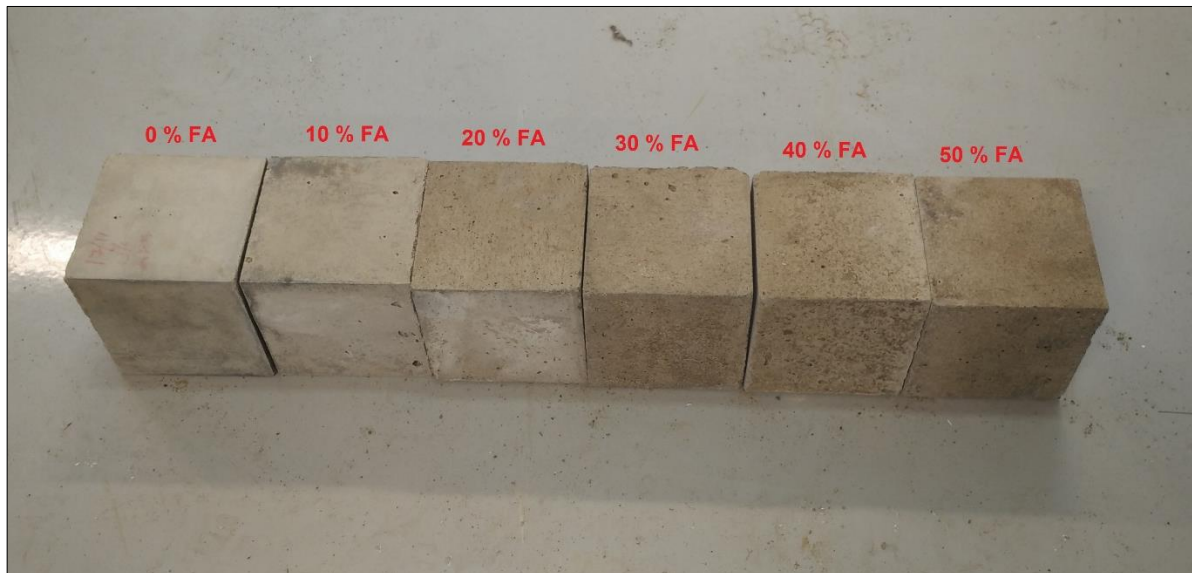
6.1 Generelt, v/b-forhold

For å få en pozzolanreaksjon ved tilsetning av flygeaske er man som ved hydratisering avhengig av tilstrekkelig vannmengde da også pozzolanreaksjonen er avhengig av vann for å danne reaksjonsprodukter med fasthet. Det var altså viktig med høyt nok v/b-tall i blandingen til at eventuell pozzolanreaksjon kunne finne sted. Det ble derfor besluttet at v/b-forholdet skulle holdes konstant på 0,55 for alle resepter. Dette gir en vannmengde i forhold til sementvekten som er større enn det som er som må til for å oppnå fullstendig sementhydratasjon ($v/b = ca. 0,41$), men samtidig vil det være vann tilgjengelig for pozzolanreaksjonen.

V/b-forholdet kunne vært redusert for å oppnå høyere fasthet, men siden det her vurderes forskjeller mellom ulike flygeasketilsetningsgraders betydning for trykkfasthet og støpelighet så har dette ingen hensikt. For å få så jevne resultater som mulig så er det viktig med god utstøpning. Hvordan flygeasken ville påvirke støpeligheten var på forhånd usikkert og det var derfor risikabelt å benytte for lavt v/b-forhold.

6.2 Visuelt

I pulverform hadde den benyttede flygeasken en lys gråfarge, dette er illustrert i figur 3-2. Fargen til flygeasken kan brukes som en grov indikator på andelen uforbrent karbon i asken. Siden den benyttede flygeasken var relativt lys kan man anta at det er lite uforbrent karbon i asken.



Figur 6-1 Fargeforskjeller på de herdede betongterningene i tørr tilstand

Foto: Peder Johan Hafsås

Allerede etter tidligfasthetsprøvingen etter 2-døgns herdeforløp ble det bemerket visuelle forskjeller mellom prøvene med ulik flygeaskemengde. Mens referankestøpen uten flygeasketilsetning var «hvitgrå» var de flygeasketilsatte prøvene merkbart mørkere. Det ble observert mørkere grånyanser i betongen etter hvert som større andel sement ble erstattet med flygeaske. Dette var noe uventet da sementen og flygeasken i pulverform hadde tilnærmet samme farge. Fargeforskjellene vedvarte og var identisk også ved 90-dagers herding som vist på figur 5-1.

6.3 Kjemisk analyse av flygeaske

Som nevnt i kapittel 2.11.2 vil det kjemiske innholdet i flygeaske fra trevirke vil variere avhengig av benyttet brensel (i dette tilfellet variasjoner mellom ulike treslag), fyringstemperaturer og fyringsmetoder. Samtidig vil det ved fyring av trevirke være variasjoner i det kjemiske innholdet innad i virket, og dermed også i den resulterende flygeasken, avhengig av hogststed, hogstmetode, vekstforhold og hvilken del av trevirket som forbrennes. Det er for eksempel store forskjeller i det kjemiske innholdet i bark og kjerneved. (Dibdiakova & Horn)

Flygeasken benyttet i denne oppgaven stammer fra en blanding av flere ulike treslag, herav 70% gran, 15% furu og 15% løvskog. (Viken Skog SA) Det ble utført laboratorietester av tre forskjellige askeprøver. Resultatene ga minimal variasjon i det kjemiske innholdet, noe som indikerer jevn aske kvalitet. Skagerak Varme fordeler det oppflisete virket jevnt før det leveres til fyringsanlegget, dette bidrar til at flygeasken er tilnærmet homogen etter fyring. Alle treslag er sammensatt av cellulose, lignin og hemicelluloser i ulike mengdeforhold. Selv om bartrær og løvtrær ser forskjellige består de fra et treteknisk synspunkt av de samme stoffene. Når flisen er godt blandet før fyring vil dette føre til at den resulterende flygeasken er homogen etter fyring. Dette bekreftes av at det var små forskjeller i det kjemiske innholdet til de tre prøvene som er gjort av flygeasken.

Tabell 6-1 Pozzolane oksider

Oksid:	Pozzolane oksider
Kjemisk formel:	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$
Vektprosent:	6,72

Resultatene fra de kjemiske analysene i tabell 5-1, viser andelen amorfe oksider med pozzolane egenskaper. Den totale mengden silisiumoksid ($\text{SiO}_2 = 5,42$ vekt %), aluminiumoksid ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,60$ vekt %) og jernoksid ($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,70$ vekt %), er mye lavere enn kravet på 70 vekt % som stilles i NS-EN 450-1. Denne flygeasken har dermed ikke tilfredsstillende pozzolanitet for å kunne benyttes som tilsetning i betong. Det var ikke forventet at flygeasken skulle oppfylle dette kravet, men at disse oksidene bare skulle stå for 6,72 % av totalvekten var mye lavere enn forventet. På bakgrunn av disse resultatene kan man ikke forvente at pozzolanreaksjon finner sted i tilstrekkelig grad til å kunne øke styrken til flygeasketilsatt betong.

Det var ønskelig med flygeaske med så høyt SiO_2 -innhold som mulig, da det er det viktigste oksidet for fasthetsutvikling i pozzolanreaksjonen. Flygeasken i dette forsøket inneholdt kun

5,42 vekt% SiO₂, noe som gir veldig lite potensiale for dannelse av sementgel fra pozzolanreaksjonen ved tilsetning i betong. Silisiumoksid er det kjemiske navnet på kvarts som er et mineral som forekommer i store mengder i flere bergarter. Det er derfor naturlig at mengden SiO₂ i flisen som benyttes i flisfyringsanleggene ikke bare avhenger av det kjemiske innholdet til brenselet, men også av mengden sand som har lagt seg i barken ved hogsten. Mengden SiO₂ i flygeasken avhenger derfor i stor grad av andelen bark i trevirket. Det er store forskjeller mellom treslagene i mengden bark på trærne. Furu har for eksempel mye tykkere bark enn gran og de fleste løvtrær. Siden SiO₂ ligger i barken i form av sand har derfor mengden bark i virket stor betydning for om flygeaske fra flisfyring er egnet som tilsetningsmateriale i betong. I tillegg til at sanden kan feste seg til barken ved hogst kan den også stamme fra mosevekst på stammen. På grunn av det lave SiO₂-innholdet i den testede flygeasken har det trolig ikke vært mye sand i trevirket.

For flisfyringsanleggene er et høyt silikainnhold i brenselet en ulempe da det vanskeliggjør avfallshåndteringen ved at man kan få sintring og slagging av asken under fyring, noe som kan danne glassklumper i bunnasken. Ved henting av aske ble observert store glassklumper i flere av askekonteinerne til Skagerak varme, dette var imidlertid først og fremst i bunnasken.

Det totale innholdet av alkalier ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \cdot \text{K}_2\text{O}$) var på ca. 17,0 vekt %, noe som overskrider kravet fra NS-EN 450-1 på maksimalt 5 vekt % alkalier. Flygeasken bør derfor ikke benyttes i betong med alkalireaktivt tilslag.

Resultatene i tabell 4-2 viser at mengden uforbrent karbon (LOI = «loss of ignition») i flygeasken var på ca. 5,2 vekt%. Dette er i henhold til flygeaskestandard, NS-EN 450-1, innenfor maksimumskravet på 9 vekt%. Uforbrent karbon er ikke ønskelig i flygeaske da det ikke bidrar til pozzolanitet, men fungerer som filler. Det uforbrente karbonet er porøst og binder derfor opp vann som ellers hadde fungert som fritt vann i den ferske betongen. Dette fører til økt vannbehov med medfølgende styrkereduksjon og økt risiko for armeringskorrosjon på grunn av høyere v/b-tall. Det er flere faktorer som påvirker mengden uforbrent karbon i flygeasken, for eksempel fyringstemperatur, fyringstid og spesielt lufttrekket under fyring.

Sulfatinnholdet (SO₃) i flygeasken er på 15,04 vekt%. Dette er mye høyere enn de 3,0 vekt% som tillates i NS-EN 450-1. Det er ikke ønskelig med store SO₃-mengder i betong på grunn av den økte risikoen for sulfatangrep. Det er altså ikke usannsynlig at man får synlige skader fra sulfatangrep på prøvene i dette forsøket, spesielt for de mest flygeasketilsatte blandingene. Dette vil man ikke få avdekket før det begynner å sprekke opp på overflaten, noe som tar tid da det ekspanderende reaksjonsproduktet først vil måtte fylle opp kapillærporene før man får

eventuelle ekspansjonsskader i betongen. Forskning har imidlertid vist at selv flygeaske med opptil 17 vektprosent SO_3 ikke nødvendigvis fører til betydelige volumendringer selv etter lang tids herding. (Lamond & Pielert 2006)

I tillegg til sulfatangrep kan betong kan sprekke opp av følgende årsaker:

- Plastisk svinn kan føre til sprekker og riss. Ved plastisk svinn oppstår risset i den plastiske fasen av hydratiseringen. Plastisk svinn kommer av avdamping og uttørking av overflaten på betongen. Betongprøvene som er støpt i dette forsøket er herdet i vannbad, så derfor er riss pga. plastisk svinn utelukket.
- Uttørking kan også føre til oppsprekking av betongen. Denne typen riss kalles uttørkingsriss og kommer av en reduksjon i volumet til betongen i det vann forlater kapillærporene. Da prøvene i dette forsøket er herdet i vannbad er dette utelukket.
- Alkali-silika reaksjonen kan føre til oppsprekking. I og med at det ikke er benyttet alkalireaktivt tilslag er dette utelukket.

Derfor ville eventuelle riss- eller oppsprekkingstendenser i betongen oppstått som følge av det høye SO_3 -innholdet. Det er imidlertid ikke observert antydning til oppsprekking på noen av de flygeasketilsatte prøvene selv 150 dager etter blandingen. Derfor kan en være sikre på at SO_3 -innholdet ikke har ført til oppsprekking og derfor heller ingen redusert trykkfasthet på grunn av oppsprekking i prøvene. På grunn av det høye sulfatinholdet i flygeasken kan dette likevel forekomme etter enda lenger tids herding.

6.4 Støpelighet

Støpeligheten ble som følge av dårligere mobilitet merkbart redusert etter hvert som en større andel av sementen ble erstattet med flygeaske. Det ble vanskeligere å støpe ut betongen etter hvert som flygeasketilsetningen økte, noe som vil si at den flygeasketilsatte betongen har et høyere vannbehov. Dette er illustrert i figur 4-2 og samsvarer med observasjoner gjort i forbindelse med støpningen.

Den reduserte mobiliteten i den flygeasketilsatte betongen medførte tilsvarende økt stabilitet. Den høye friksjonen mellom flygeaskekornene bidrar derfor å redusere separasjonstendenser. Det er viktig med stabilitet for å unngå separasjon i betongen, men for å få en støpelig betong må man samtidig ha tilstrekkelig mobilitet og kompakterbarhet. Den flygeasketilsatte betongen opplevde i dette forsøket en sterk reduksjon i mobiliteten som gjør det vanskelig å støpe ut betongen fordi den blir for tørr.

Synkmålet var på forhånd planlagt holdt konstant på ca. 20 cm på alle støpene. Eventuelle variasjoner i støpelighet skulle korrigeres med tilsetning av SP-stoff, som øker plastisiteten ved å redusere overflatespenningen til vannet og dermed frigjør mer vann til smøring av betongen. Mengden SP-stoff for de ulike blandingene ble avgjort ved visuell vurdering av betongen i tvangsblenderen, noe som medførte noe feilmargin da det viste seg at flygeasketilsetningen påvirket støpeligheten i større grad enn ventet. Det ble støpt to blandinger av hver resept (bortsett fra referansestøpen), og avhengig av synkmålet til den første blandingen ble det tilsatte SP-stoffet justert for den andre støpen i et forsøk på å oppnå 20 cm synk.

Synkmålet til referansestøpen ble målt til 20 cm, mens man med økende flygeasketilsetning måtte tilsette stadig større mengde SP-stoff for å få tilfredsstillende støpelighet. Ved 50 % flygeasketilsetning var det ikke mulig å oppnå det forutsatte synkmålet ved justering av SP-stoffet. Dette tyder på at man har «brukt opp» den vannreducerende effekten til SP-stoffet. For betong med så stor flygeaskeandel må det derfor benyttes andre virkemidler for å øke blandingens plastisitet. Det er flere måter å gjøre dette på, for eksempel kan man øke v/b-forholdet eller benytte avrundede naturtilslag som binder mindre vann til overflaten. En annen metode er å øke pastamengden, noe som medfører større klimagassutslipp og økte kostnader på grunn av høyere sementforbruk.

I motsetning til flygeaske fra kullfyring, som har en vannreducerende effekt ved tilsetning i betong, gir tilsetning av den benyttede flygeasken fra kullfyring altså et økt vannbehov. For flygeaske fra kullfyring reduseres vannbehovet som følge av at partiklene har glatt og sfærisk

glassoverflate. Som nevnt i teoribolken får kullbasert flygeaske glassoverflaten ved at SiO_2 i asken sintreter og legger/pakker seg rundt askepartiklene under fyringen. Når flygeasken så letter fra brenselkammeret og avkjøles, forsteines flygeaskeoverflatene i dråpeform, noe som gir partiklene den glatte og sfæriske glassoverflaten. Det samme gjelder i prinsippet også for flygeaske fra flisfyring, men i og med at flygeasken benyttet i denne oppgaven bare inneholdt 5,62 vekt% SiO_2 , oppnår ikke partiklene den samme avrundede formen. Det er altså ikke nok SiO_2 i asken til at den kan pakke seg rundt kornene i fyringsprosessen. Til sammenligning har flygeaske fra kullfyring normalt et SiO_2 -innhold i variasjonsområdet 42-55 vekt%. (Berg 1981) (Wang et al. 2008a) har gjennom elektronmikroskopi vist at flygeaskepartikler fra fyring av trevirke ikke har den samme avrundede formen som kullbaserte flygeaskepartikler, men heller er skarpkantede med ru overflate. Ved tilsetning av flygeaske fra trevirke økes dermed vannbehovet som følge av høyere interpartikulær friksjon mellom partiklene. Samtidig vil rye og skarpkantede partikler gi større spesifikk kornoverflate i flygeasken fra flisfyring sammenlignet med flygeaske fra kullfyring, og dermed binde opp større vannmengder.

En annen årsak til det økte vannbehovet er innholdet av organiske materialer, og da spesielt uforbrent karbon i flygeasken. Det er generelt mer uforbrent karbon i flygeaske fra fyring av trebaserte materialer enn flygeaske fra kullfyring. Mengden uforbrent karbon i den benyttede flygeasken var på ca. 5,2 vekt%. Selv om dette er innenfor maksimumskravet på 9 vekt%, bidrar det likevel til det økte vannbehovet i betongen. Karbon er porøst og kan absorbere mye vann som ellers hadde vært tilgjengelig til å smøre blandingen.

6.5 Størkning

Det ble ikke gjennomført nøyaktige målinger av avbindingstiden for de ulike blandingene, men noen variasjoner ble likevel notert. Alle prøvene bortsett fra de med 10 % flygeaske ble tatt ut av formene etter 24 timer for så å bli lagt i vannbad for videre herding. Alle disse prøvene var etter 24 timer blitt harde og kunne demonteres ut av formene uten å skade prøveterningene. Prøvene med 10 % flygeaske var derimot fortsatt for mjuke til å tas ut av formene uten at de ble påført skade, det ble derfor besluttet at de skulle få ligge i formene i ytterligere 24 timer. De var avbundet, men det er sannsynlig at avbindingstiden for prøvene med 10 % flygeaske er noe lengre enn for de andre blandingene da styrken etter ett døgn var så lav.

Teoretisk sett skulle man forvente at avbindingstiden til den flygeasketilsatte betongen øker ved økende flygeaskeandel. Flygeasken har som nevnt i teoribolken mye lavere reaktivitet og varmeutvikling enn klinkermineralene i sement, og flygeaskens reaksjon med vann starter heller

ikke før det dannes tilstrekkelig $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fra sementhydratiseringen. Siden tilsetning av flygeaske medfører en tilsvarende reduksjon i sementmengde er det derfor nærliggende å forvente økt avbindingstid etter hvert som flygeaskeandelen økes. Økt tilsetning av SP-stoffer som følge av økt vannbehov for de flygeasketilsatte prøvene bidrar også til økt størkningstid. Flygeaske fra flisfyring har også generelt lengre avbindingstid enn flygeaske fra kullfyring, dette på grunn av at innholdet av uforbrent karbon generelt er høyere. Karbonet i flygeasken er porøst og absorberer derfor mye vann, noe som reduserer mengden vann tilgjengelig til hydratisering. Den høye SO_3 -andelen i flygeasken (15,04 vekt %) er sannsynligvis også med på å forlenge størkningstiden for de flygeasketilsatte blandingene. Ifølge (Kurdowski 2014) bidrar SO_3 fra flygeaske mer til begrensningen av C_3A -hydratasjon enn den det gips gjør.

Det var derfor uventet at det bare var prøvene med 10 % flygeaske som var for mjuke til å tas ut av prøveformene etter et døgn herding. For alle andre flygeasketilsetningsgrader kunne prøvene legges i vannbad etter et døgn i romtemperatur. Dette ble observert for terningprøver støpt av begge blandingene med 10 % flygeasketilsetning.

Det samme ble observert av Rajamma et al. (2009) ved tilsetning av 10 % flygeaske fra flisfyring av eukalyptustre. De målte faktisk noe redusert avbindingstid ved flygeasketilsetning i forhold til referansestøpen på alle blandinger bortsett fra den med 10 % flygeasketilsetning. Eukalyptusflygeasken hadde en LOI på 14 vekt%, og det ble derfor konkludert med at den reduserte avbindingstiden skyldtes at det uforbrente karbonet absorberte vann som ellers hadde vært fritt kapillærvann. (Rajamma et al. 2009) Grunnen til at man ved 10 % tilsetning ikke får den samme effekten, men heller en økt avbindingstid, antas i artikkelen at er «... på grunn av den dominerende effekten askens finhet har over effekten av innholdet av organiske materialer i reguleringen av størkningstiden.» (Rajamma et al. 2009)

Rajamma et al. sin antagelse er ikke riktig da betong tilsatt flygeaske med høyt innhold av uforbrent karbon forlenger størkningstiden snarere enn å redusere den. Dette er blant annet bevist av (Lane 1983). (Elinwa & Mahmood 2002) og (Abdullahi 2006) fant også at tilsetning av flygeaske fra fyring av trebaserte materialer forlenger størkningstiden sammenlignet med en referansestøp uten flygeasketilsetning. Det er derfor merkelig at Rajamma et al. får redusert sin avbindingstid ved tilsetning av flygeaske fra fyring av eukalyptustre, spesielt med en LOI på hele 14 vekt%. At flygeaskens finhet skal føre til at størkningsperioden forlenges er ved 10 % flygeasketilsetning er også noe merkelig da den samme flygeasken benyttes også ved alle andre tilsetningsgrader. Det er likevel mulig at man ved 10 % asketilsetning får en forsterket

effekt av finheten og at størkningstiden forlenges ytterligere, slik som den gjorde i forsøkene utført i forbindelse med denne oppgaven.

6.6 Trykkfasthet

Trykkfastheten til prøvene fra de ulike blandingen ved de forskjellige prøvetider er presentert i tabell 4-4 og figurene 4-3 og 4-4.

Prøving av de ulike blandingenes trykkfasthet er utført etter metode beskrevet i kapittel 3. Referansestøpen, med Norcem standardsement som eneste bindemiddel (ingen flygeasketilsetning) hadde høyest styrke gjennom hele det målte herdeforløpet. Det ble altså ikke observert høyere fasthet sammenlignet med referansestøpen for noen flygeasketilsetningsgrader, selv ikke etter 90 døgns herding.

Resultatene av den kjemiske analysen av flygeasken ble ikke gjort før alle resultater fra trykkprøvingen var kjent. Derfor er også flygeasken de neste sidene (om tidligfasthet og 28-døgnsfasthet) betraktet som pozzolan inntil det motsatte er bevist.

6.6.1 Tidligfasthet – 2 døgn

Som ventet var hadde prøvene uten tilsatt flygeaske høyest tidligfasthet, med gradvis fasthetsreduksjon ved økende flygeasketilsetning. Det er en kombinasjon av flere faktorer som medvirker til at reduksjonen i tidligfasthet ved flygeasketilsetning. Hovedårsaken er at man ved å erstatte sement med flygeaske samtidig reduserer sementmengden i blandingen.

På dette tidspunktet vil ikke pozzolaniteten til flygeasken ha betydning for trykkfastheten da pozzolanreaksjonen uansett ikke starter før det er dannet nok Ca(OH)_2 i betongen til å bryte ned SiO_2 i flygeasken. Som forklart i teoridelen må betongen bli tilstrekkelig basisk før glasslaget rundt flygeaskekornene kan brytes ned og pozzolanreaksjonen kan starte. Det vil si at fasthetsutviklingen fra pozzolanreaksjonen, ikke starter umiddelbart etter blandingen, men først når det har blitt dannet tilstrekkelig med reaksjonsprodukter fra sementhydratiseringen. Reduksjonen i tidligfasthet for de flygeasketilsatte prøvene kommer derfor i hovedsak som følge av den reduserte sementmengden.

I tillegg bidrar superplastiserende tilsetningsstoff til den reduserte tidligfastheten. SP-stoffet benyttet i blandingen var Sika ViscoCrete SC-315. Dette tilsetningsstoffet forlenger avbindingstiden og retarderer hydratiseringen de første dagene etter blandingen. (Se produktinformasjon i vedlegget) Det ble nødvendig med stadig større doser SP-stoff for å oppnå

tilstrekkelig plastisitet i den ferske betongen etter hvert som flygeaskeandelen økte, noe som bidrar til ytterligere reduksjon av tidligfastheten for de mest flygeasketilsatte blandinger.

Resultatene av tidligfasthetsprøvene vil samtidig i stor grad bli påvirket av variasjoner i herdetid i vannbadet, og vannbadets temperatur. Mens en time tilsvarer ca. 2 % av herdetiden ved tidligfasthetsprøvingen, vil en times herding utgjøre en mikroskopisk del av den totale herdetiden ved prøving av 90-døgnsfastheten. En times herding betyr altså mye mer for tidligfastheten enn for 90-dagersfastheten. Dette betyr at man må være nøye med temperaturer og herdetider, spesielt den første tiden etter blanding. Temperaturen i vannbadet varierte noe den første tiden (årsaker til dette er nevnt i kapittel 3.8). Det antas at vannet gjennomsnittlig holdt ca. 23 °C den første uken, før temperaturen stabiliserte seg på den ønskede temperaturen, altså 20 °C. Den forhøyede temperaturen de første dagene medfører at tidligfastheten er noe høyere for alle prøver enn det som hadde vært tilfellet om vannbadet hadde holdt riktig temperatur. Prøvene ble støpt kort tid etter hverandre, derfor antas det at temperaturen har vært noenlunde lik for alle prøvene, også de to første døgnene etter støpning. Temperaturforskjellene mellom prøvene fra de ulike blandinger har derfor trolig bare funnet sted i veldig liten grad. Det antas at alle prøvene opplevde den samme temperaturøkningen over like lang tid, og dette derfor ikke ga fasthetsforskjeller mellom prøver med ulik flygeasketilsetning.

6.6.2 28-døgnsfasthet

Trykkfastheten 28 dager etter støpning er den vanlige referansen for styrken til betongen. Selv om styrkeutviklingen fortsetter også etter dette, vil mesteparten av den potensielle fastheten være oppnådd på dette tidspunktet.

Referansebetongen hadde etter 28 dager en gjennomsnittlig trykkfasthet på 45,18 N/mm², noe som er helt i henhold til den forventede fastheten fra Norcems produktinformasjonsfoile med v/b-tall 0,55. Prøvene med 10 % flygeasketilsetning hadde på dette tidspunktet en trykkfasthet på 27,79 N/mm², ca. 38% lavere enn referanseprøvene. Videre følger gradvis fasthetsreduksjon ved økende flygeaskeandel, med 11,31 N/mm² for 40 % FA som laveste styrke.

Fasthetsutviklingen fra 2 til 28 dager er størst for de mest flygeasketilsatte blandinger (20 – 50 % FA). Dette skyldes først og fremst at tidligfastheten for disse er veldig lav og at fasthetsutviklingen skyter fart senere. For kontrollprøvene og prøvene med 10 % FA følger fasthetsutviklingen i dette tidsrommet naturlig utvikling med henholdsvis 39- og 43 % styrkeøkning.

Resultatene viser tydelig at 28-døgnsfastheten synker etter hvert som det tilsettes mer flygeaske i betongen. På den ene siden kan dette være fordi at flygeasken ikke får en pozzolanreaksjon som ønsket. En medvirkende årsak er at pozzolanreaksjonen er en treg reaksjon som ikke starter før det betongen det er dannet tilstrekkelig $\text{Ca}(\text{OH}_2)$ i betongen. Reduksjonen i 28-døgnsfasthet for de flygeasketilsatte prøvene kan altså henge sammen med at flygeasken har fått liten tid til å reagere.

6.6.3 56- og 90 døgnsfasthet

Prøvene uten flygeasketilsetning hadde med gjennomsnittsfasthet $51,06 \text{ N/mm}^2$ størst styrke også 90 dogn etter blandingen. Ingen av de flygeasketilsatte prøvene hadde i perioden fra 28 dager til 90 dager høyere fasthetsøkning enn referanseprøvene. Imidlertid hadde 50 % FA i dette tidsrommet en fasthetsøkning på ca. 6 N/mm^2 , noe som er omtrent identisk med referanseprøvene.

6.6.4 Kommentarer til fasthetsresultatene

Ved 56- og 90 døgns herding vil man kunne forvente størst effekt på fastheten på betongen fra den tilsatte flygeasken. For flygeaske fra kullfyring starter pozzolanreaksjonen vanligvis etter ca. 14 dager og varer deretter i ca. 150 dager. (Wesche 1991) Om det hadde vært pozzolane egenskaper i flygeasken skulle man derfor kunne se dette på fasthetsutviklingen til prøvene ved disse herdetidene.

Styrken til betongen ble derimot redusert etter hvert som større mengde sement ble erstattet med flygeaske, det eneste unntaket var prøvene med 50 % flygeaske som hadde noe høyere fasthet enn prøvene med 40 % sementerstatning ved alle prøvetidspunkt. Sammenlignet med referanseprøvene var det ingen økt fasthetsutvikling for de flygeasketilsatte prøvene ved lang tids herding. Dette indikerer at man ikke har tilstrekkelig pozzolane egenskaper i flygeasken til at den kan bidra til styrkedannelsen i betongen. For å få en pozzolanreaksjon mellom flygeasken og kalsiumhydroksidet i betongen er man avhengig av at flygeasken består av så mye SiO_2 som mulig. Den benyttede flygeasken inneholdt imidlertid bare 5,42 vekt % silika, noe som gir veldig liten pozzolanitet. Til sammenligning har flygeaske fra kullfyring gjerne et silikainnhold på ca. 50 vekt %. (Berg 1981)

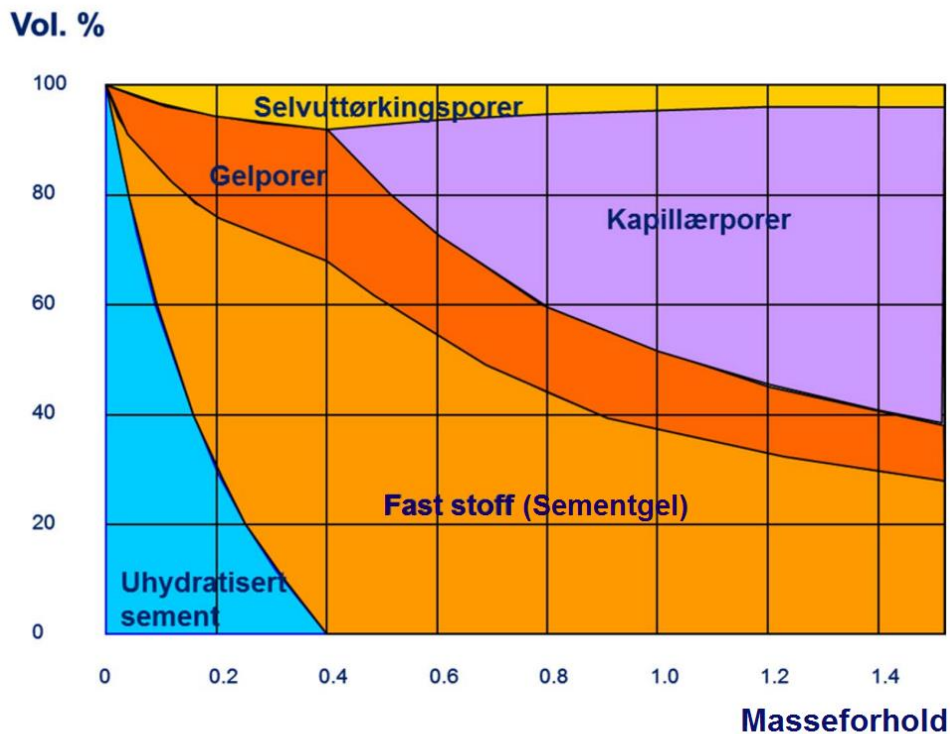
Prøvene med 50 % FA hadde høyere styrke enn de med 40 % FA ved alle herdetider. En ny blanding med 50 % flygeasketilsetning ble støpt for å avkrefte at det ble gjort feil i reseptberegning eller blandeprosedyrer. Etter 28-døgns herding viste disse prøvene seg å ha

samme fasthet som resultatene presentert i denne oppgaven. I og med at flygeasketilsetningen reduserer betongens styrke må dette skyldes andre faktorer. Det kan være at trykkfastheten ved flygeasketilsetningen nådde sitt bunnpunkt ved 40 % asketilsetning og at man ved å øke flygeaskeandelen ytterligere får en liten fasthetsøkning. Disse resultatene er merkelige da det ikke er funnet noen pozzolanitet i flygeasken, hverken fra kjemiske analyser eller trykktester.

Som følge av at man ikke har pozzolanitet i flygeasken, og at denne ikke har bidratt til fasthetsutviklingen, har man for de flygeasketilsatte prøvene i realiteten bare endt opp med en betong med redusert sementmengde. Flygeasketilsatt betong har derfor lavere styrke enn referansebetongen uten tilsatt flygeaske. Lavere sementmengde i de flygeasketilsatte prøvene gir høyere v/b-forhold, og dermed mer porøs betong med lavere trykkstyrke.

Hensikten med tilsetning av flygeaske i betong er å senke herdetemperatur- og hastighet for å unngå riss, redusere sementforbruket og å dra nytte av pozzolanreaksjons bidrag til fasthet over lang tid. Tilsetningen av flygeaske som ble benyttet i disse blandingene kan ikke sies å ha bidratt til fasthetsutviklingen, men det er naturlig at herdetemperaturen er redusert som følge av mindre sement i blandingene.

6.7 Porestruktur



Figur 6-2 Volumfordeling i herdet sementpasta avhengig av masseforhold (Med tillatelse fra Bård Arntsen, Norut)

Figur 5-2 illustrerer volumsammensetningen til sementpastaen ved ulike v/b-forhold. Andelen kapillærporer øker betraktelig ved v/b over 0,41, noe som gir mer porøs og dermed også svakere betong. Ved v/b = 0,8 står for eksempel kapillærporene for ca. 35% av volumet til sementpastaen, mens det ved v/b = 0,41 vil være tilnærmet ingen kapillærporer i fullstendig hydratisert betong.

De støpte betongene har et v/b-tall på 0,55. Av dette vil vann tilsvarende v/b = 0,23 forbrukes i de hydrasjonsreaksjonene, og vann tilsvarende v/b = 0,18 bindes som gelvann i gelporene. Det betyr at betongen må ha et v/ba-tall på 0,41 for at all sementen skal kunne reagere. Dette overflødig vannet fylles i kapillærporer med en diameter på 1-10 μm . Det er disse kapillærporene som står for mesteparten av porøsiteten og gir redusert fasthet i betongen. Formålet med flygeasketilsetningen er at reaksjonsproduktet fra pozzolanreaksjonen over tid skal forbruke kapillærvannet og fylle kapillærporene med sementgel fra pozzolanreaksjonen. Flygeaske fra flisfyring viste seg ikke å være egnet for dette. Derfor har man i realiteten et høyere v/b-tall enn det planlagte for de flygeasketilsatte prøvene. K-faktoren til flygeasken var

i reseptene satt til 1,0. I og med at flygeasken ikke har pozzolanitet kan man ikke ta hensyn til den i beregningen av masseforhold.

Den mest flygeasketilsatte betongen (50 % FA) inneholder samtidig minst sement, for denne blandingen er halvparten av sementen erstattet med flygeaske. Siden det ikke er tilstrekkelig pozzolanitet i flygeasken har denne betongen i realiteten et v/b tall på 1,15 (med k-faktor = 0). Med så lite sement i forhold til vann blir betongens styrke betraktelig redusert, noe også resultatene fra trykktestingen viser. Ved økende v/b-forhold vil sementkornene etter blandingen ligge relativt lenger fra hverandre. Dette fører til at det blir vanskeligere for sementgelen som legger seg rundt kornene å vokse inn i nabokornene og på den måten gi styrke til betongen. Dette gir også en mer porøs betong sammenlignet med betong med lavere v/b-forhold.

6.8 Vurdering av beregnede k-faktorer

Flygeaskens k-faktorer for ulike flygeasketilsetninger og herdetider beregnet etter formel utarbeidet av (Atiş 2005) er presentert i tabell 4-5 og figur 4-5.

Som ventet er k-faktoren for alle tilsetningsgrader lavest ved 2 døgns herding. Dette kommer av at beregningsmetoden baserer seg på å sammenligne fastheten til den flygeasketilsatte betongen med referansebetongen uten flygeaske. Som følge av at tidligfastheten reduseres ved flygeasketilsetning må man nødvendigvis også ha negativ k-faktor. Dette samsvarer med resultatene fra trykktestene der tidligfastheten var betydelig redusert, spesielt for de mest asketilsatte blandingene.

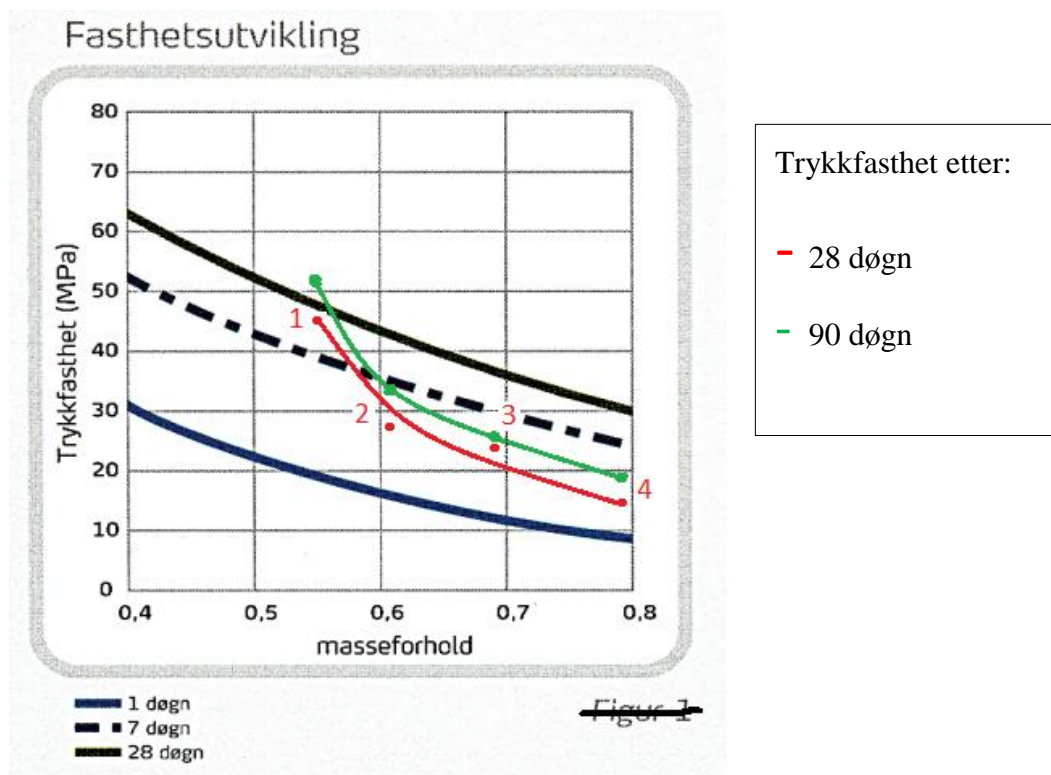
K-faktoren er negativ for alle blandinger etter 2 dager og de forblir negative også etter 90 dagers herding. Negativ k-faktor medfører at flygeasketilsetningen reduserer styrken til betongen. Ut i fra disse resultatene kan man fastslå at tilsetning av flygeaske fra flisfyringsanlegg har negativ innvirkning på betongens styrke. Betongen hadde med andre ord hatt høyere fasthet dersom man hadde brukt mindre sement og dermed økt v/b-tallet enn man oppnår ved å erstatte sement med flygeaske fra flisfyring. K-faktoren er minst negativ for de mest flygeasketilsatte prøvene og øker etter hvert som prøvene har herdet i lengre tid.

Til sammenligning er flygeaske fra fyring av pulverisert er av NS-EN 206 gitt en k-faktor på enten 0,4 eller 0,7, avhengig av bestandighetsklasse og sementtype. Altså tillater standarden at man beregner med at kullflygeasken bidrar til fasthetsutviklingen med en virkningsgrad på 40 eller 70 % av sementens.

(Yerramala et al. 2012) er et eksempel på forskning som også har fått negativ k-faktor på testet flygeaske. De hadde negativ k-faktor etter 7 døgns herding, men på grunn av pozzolanreaksjon

i den testede flygeasken ble k-faktoren positiv etter 28 døgns herding. Side det ikke er pozzolanitet i flygeasken testet i denne oppgaven forblir k-faktoren negativ hele herdeforløpet.

6.8.1 Illustrasjon av negative k-faktorer



Figur 6-3 Sammenligning mellom resultatene og Norcems forventede verdier (Norcem produktinformasjon)

Tabell 6-2 Forklaring av verdier i figur 5.2 , flygeasketilsetningen er neglisjert ved å sette $k = 0$

Punkt på figur 5-4	Resepter (per m ³ betong)				Trykkfasthet (N/mm ²) ⁵	
	Støp	Effektivt vann (kg)	Sement (kg)	$v/b = v/(c+k*FA)$ $k = 0$	28 døgn (rødt)	90 døgn (grønt)
1	Kontroll	193,389	352,3	0,549	45,18	51,06
2	10% FA	192,983	315,9	0,611	27,79	33,60
3	20% FA	192,675	279,7	0,689	24,75	26,61
4	30% FA	191,364	242,3	0,790	15,18	19,89

Figur 5-4 viser den forventede trykkfastheten for betonger støpt med Norcem standardsement ved ulike herdetider og masseforhold. For å illustrere flygeaskens negative k-faktorer er resultatene fra trykktestene påtegnet. Det er her kun tatt hensyn til den tilsatte sementmengden

⁵ Gjennomsnittlige verdier

ved beregning av v/b-forholdet, dette gjøres ved å sette flygeaskens k-faktor lik null ($v/(c+k*FA)$). Den røde streken viser resultatene etter 28-døgns herding, den grønne etter 90.

For eksempel hadde man ved å redusere sementvekten 10 %, og dermed øke v/b-forholdet fra 0,55 til 0,61, hadde man ifølge Norcem hatt høyere fasthet i betongen enn det som ble målt ved tilsetning av flygeaske tilsvarende 10 % av sementvekten.

Av figuren kan det leses at flygeasketilsetningen reduserer trykkfastheten i betongen betraktelig. Dersom man sammenligner fastheten med den stiplede linjen som viser 7-døgnsfasthet for betong uten flygeasketilsetning, har 90-døgnsfastheten for alle betonger med neglisjert flygeaske og dermed det «samme» v/b-forholdet lavere trykkfasthet.

Dette beviser flygeasken har negativ virkningsgrad, og reduserer fastheten i betongen. Selv 90 dager etter blandingen påvirker flygeasketilsetningen styrken negativt. Dette samsvarer med resultatene av de beregnede k-faktorene, presentert i tabell 4-5 og figur 4-5, som viser at flygeasketilsetningen har negativ virkningsgrad gjennom hele det målte herdeforløpet.

I eksponeringsklassene XC 1-3 er det kun krav om bestandighetsklasse M60. I henhold til Tabell F.1 i NS-EN 206 er det tilstrekkelig med B25 i disse eksponeringsklassene XC 1-2. For B25 må terningfastheten være 30 N/mm². Det vil si at etter 90 døgn vil betong med 10 % flygeaske med sine 33,6 N/mm² kunne benyttes i disse eksponeringsklassene. Det kan likevel ikke anbefales da man ved å redusere sementmengden 10 % uten å tilsette flygeaske har fått en sterkere betong etter mye kortere herdetid.

6.9 Pozzolan aktivitetsindeks

Tabell 4-6 viser resultatene fra test av pozzolan aktivitetsindeks av mørtelprøver. Med en beregnet pozzolan aktivitetsindeks på 45,1 % for flygeasketilsatt mørtel etter 28 dagers herding oppfylles ikke kravet på 75 % som stilles i NS-EN 450-1. Dette samsvarer med resultatene fra trykktestingen av betongprøvene og beregningen av k-faktorer som viser at flygeasken er ikke bidrar til økt fasthetsutvikling, men heller svekker den.

7 Konklusjoner

I denne masteroppgaven er egnetheten til flygeaske fra flisfyring av norsk trevirke som sementerstatning i betong undersøkt.

Flygeasken oppfyller ikke krav til pozzolanitet stilt i NS-EN 450-1. Samtidig overstiger den standardens begrensninger til innhold av sulfat og alkalieekvivalenter. Ved bruk som sementerstatning reduseres betongens fasthet ved økende flygeasketilsetning. Trykkfasteten til de flygeasketilsatte prøvene er lavere enn referansebetongen ved alle herdetider og tilsetningsgrader.

Flygeasken har for alle tilsetningsgrader negativ k-verdi og svekker dermed styrken til betongen ved tilsetning. Dette vedvarer hele herdeforløpet, også etter 90 døgn. Flygeasketilsetningen gir økt vannbehov i betongen, følgelig reduseres støpeligheten ved tilsetning av flygeaske fra flisfyring. Støpeligheten avtar ved økende flygeasketilsetning.

Flygeaske fra flisfyringsanlegg med forbrenning med norske tresorter er på grunnlag av resultatene fra denne oppgaven dermed ikke egnet som tilsetningsmateriale i betong.

8 Videre arbeid

Selv om at det konkluderes flygeaske fra fyring av oppfliset trevirke ikke kan brukes som sementerstatning i betong betyr det ikke at det ikke bør forskes videre på. Selv om flygeasken testet i denne oppgaven viste seg å ikke inneholde tilstrekkelig pozzolane oksider til å kunne benyttes som sementerstatning kan flygeaske fra fyring av andre tresorter kunne gi gunstigere resultater.

Pozzolaniteten til flygeasken er i stor grad avhengig av SiO_2 -innholdet, et oksid som blant annet er å finne i sand. I og med at sand ofte dras med i barken i hogsten er det tenkelig at flygeaske fra brenning av bark inneholder større SiO_2 -mengder enn det man får fra fyring av hele trær. Flygeaske fra forbrenning av bark kan derfor være bedre egnet som tilsetning i betong enn flygeasken brukt i denne oppgaven.

Det bør undersøkes hvilke deler av treets anatomi som ved forbrenning gir pozzolane oksider i flygeasken. Er det for eksempel mest pozzolane oksider i flygeaske basert på forbrenning av ligninet, hemicellulosen eller cellulosen til treet? På grunnlag av resultatene av slike forsøk vil lettere kunne identifisere et treslag med anatomi som ved forbrenning gir gode pozzolane egenskaper i flygeasken.

Det bør utføres tester på hvordan fyring av SiO_2 -holdig trevirke påvirker brennkammeret til flisfyringsanlegg. Brensel med mye SiO_2 vil kunne gi høy pozzolanitet i flygeasken, men er samtidig problematisk for fyringsanleggene som følge av økt risiko for slagging/glassklumping.

Det ble også vurdert en annen type resept der vi kun blandet pasta bestående av flygeaske fra flisfyring, sement og vann. Dette hadde vært en fullgod metode hvis hensikten bare var å teste om flygeaske fra trevirke kunne fungere som sementerstatning. Dette ble imidlertid bortprioritert da det også var viktig å se på utstøpingsegenskapene til betongen. Det var også viktig for lærdommens skyld å se hvordan tilsetningen av de forskjellige stoffene påvirket betongen, da spesielt SP-stoff. Det hadde også vært interessant å teste betong med mindre flygeasketilsetning enn det som er gjort i denne oppgaven. Ved å tilsette en flygeaskeandel mindre enn 10 % hadde man fått sikrere resultater og mer sammenligningsgrunnlag.

9 Feilkilder

Det mest overraskende med resultatene var at trykkstyrken for prøvene med 50 % flygeaske til enhver tid var høyere enn trykkstyrken til prøvene med 40% flygeaske. Dette passer ikke overens med de resterende resultatene som viste styrkereduksjon ved økende flygeasketilsetning. Det ble mistenkt at man hadde slurvet med oppmålingen av ingredienser ved støpingen, noe som er meget usannsynlig da resepten ble støpt to ganger og styrken er relativt stabil ved alle herdetider.

På forhånd var det planlagt at betongene skulle støpes med v/b 0,58. Som følge av at densiteten til noen av materialene var feil i resepten ble betongene støpt med v/b 0,55. V/b-tallet er tilnærmet konstant for de støpte blandingene. Fullstendige reseptberegninger kan finnes i vedlegget.

Densiteten til den benyttede flygeasken ble ikke målt. Den ble gitt en antatt densitet på bakgrunn av tidligere forskning. Dersom densiteten er veldig ulik fra det som ble antatt kan dette ha klusset til blandereseptene slik at man i realiteten ikke har klart å holde v/b-tallet konstant for alle blandereseptene.

Avvik ved laboratoriearbeidet er kommentert i kapittel 3.10.

Litteraturliste:

- A.M. Neville, J. J., Brooks. (2010). *Concrete Technology Second Edition*: Pearson.
- Abdullahi, M. (2006). Characteristics of Wood ASH/OPC Concrete. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies* (8): 9-16.
- Aligizaki, K. (2006). *Pore Structure of Cement-Based Materials: Testing, Interpretation and Requirements*: Taylor & Francis.
- Atiș, C. D. (2005). Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete, and influence of curing condition. *Cement & Concrete Research*, 35: 1112-1121.
- Barbosa, R., Lapa, N., Dias, D. & Mendes, B. (2013). Concretes containing biomass ashes: Mechanical, chemical and exotic performances. *Construction and Building Materials*, 48: 457-463.
- Berg, W. v. (1981). Flugasche als Betonzusatzstoff.
- Claisse, P. A. (2016). *Civil Engineering Materials*: Elsevier.
- Dibdiakova, J. & Horn, H. Innovativ utnyttelse av aske fra trevirke for økt verdiskaping og bærekraftig skogbruk. *Norsk institutt for skog og landskap*.
- Elinwa, A. U. & Mahmood, Y. A. (2002). Ash from timber waste as cement replacement. *Cement & Concrete Composites*, 24: 219-222.
- Elsageer, M. A., Millard, S. G. & Barnett, S. J. (2009). Strength development of concrete containing coal fly ash under different curing temperature conditions. *World of Coal Ash*.
- Esteves, T. C., Rajamma, R., Soares, D., Silva, A. S., Ferreira, V. M. & Labrincha, J. A. (2012). Use of biomass fly ash for mitigation alkali-silica reaction of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 26: 687-693.
- Ghosal, S. & Self, S. A. (1995). Particle size-density relation and cenosphere content of coal fly ash. *Fuel*, 74 (4): 522-529.
- Groll, S. (2015). *Kohleatlas 2014*.
- Herholdt, Justesen, Nepper-Christensen & Nielsen. (1985). *Betonbogen*: Aalborg Portland.
- Holen, A. K., Arild, A., Karlsen, Ø. & Hansen, K. (2014). Endret råvareforsyning til Norcem Brevik med etterbruk av Dalen gruve til avfallsbehandlingsanlegg og deponi.
- Kawada, N. & Nemoto, A. (1967). Calciumsilikate im frühen Verlaufe der Hydratation. *Zement-Kalk-Gips*, 20: 65-71.
- Kurdowski, W. (2014). *Cement and Concrete Chemistry*: Springer.
- Lamond, J. & Pielert, J. (2006). *Significance of Tests And Properties of Concrete & Concrete-Making Materials*. ASTM International.
- Lane, R. O. (1983). Effect of Fly Ash on Freshly Mixed Concrete. *Concrete International*, 10: 50-52.
- Lea, F. (1998). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*.
- Li, D., Chen, Y., Shen, J., Su, J. & Wu, X. (2000). The influence of alkalinity on activation and microstructure of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 30: 881-886.
- Lowe, R. (2012). Pozzolanic Properties of Biomass Fly Ash. *All Theses*, Paper 1390.
- Maage, M. (1998). *Praktisk betongteknologi b. Sementer / silikastøv*.
- Maage, M. (2015). *Betong. Regelverk, teknologi og utførelse*: Byggenæringens Forlag.

- Maschio, S., Tonnello, G., Piani, L. & Furlani, E. (2011). Fly and bottom ashes from biomass combustion as cement replacing components in mortars production: Rheological behaviour of the pastes and materials compression strength. *Chemosphere*, 85: 666-671.
- Mehta & Monteiro. (2005). *Concrete Microstructure, Properties and Materials third edition*: McGraw-Hill.
- Meyer, C. (2002). *Concrete and Sustainable Development*. ACI.
- Mindess, S., Young, J. F. & Darwin, D. (2003). *Concrete Second Edition*: Pearson Education.
- Norcem. Norcem Standard.
- NTPC. (2007). *Fly Ash For Cement Concrete*.
- Oppegård. (2015). *Vannkvalitet*. Tilgjengelig fra: <https://www.oppegard.kommune.no/vann-og-avlop/vannkvalitet> (lest 29.02.2016).
- Powers, T. C. & Brownyard, T. L. (1948). Studies of the physical properties of hardened cement paste. *Lab. of Portland Cement Association, Bulletin 22*.
- Powers, T. C. (1960). Physical Properties of Cement Paste. *Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association, Bulletin 154*.
- Rajamma, R., Ball, R. J., Tarelho, L. A. C., Allen, G. C., Labrincha, J. A. & Ferreira, V. M. (2009). Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *Journal of Hazardous Materials*, 172: 1049-1060.
- Ramenzianpour, A. A. (2014). *Cement Replacement Materials: Properties, Durability, Sustainability*: Springer.
- Sear, L. (2001). *The Properties And Use of Coal Fly Ash*: Thomas Telford Publishing.
- Shetty, M. S. (2008). *Concrete Technology Theory and Practice*: S. Chand & Company Pvt. Ltd.
- Shirai, H., Ikeda, M. & Tanno, K. (2011). Factors Affecting the Density and Specific Surface Area of Fly Ash from Pulverized Coal Combustion. *American Chemical Society*.
- Sørensen, C. (2012). Forelesningsnotater fra TBA321 Videregående betongteknologi.
- Taylor, H. W. (1997). *Cement Chemistry 2nd. Edition*.
- Thomas, J. & Jennings, H. (u.å.). *The Science of Concrete*. McCormick Northwestern Engineering.
- Thomas, M. (2007). Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete. *Portland Cement Association*.
- Vollset, D. (2010). *Luft i betong*. Rescon Mapei AS. Tilgjengelig fra: http://www.mapei.com/public/NO/linedocument/luft_i_betong_2010_lck.pdf (lest 15.04.2016).
- Wang, S. & Baxter, L. (2007). Comprehensive study of biomass fly in concrete: Strength, microscopy, kinetics and durability. *Fuel Processing Technology*, 88: 1165-1170.
- Wang, S., Baxter, L. & Fonseca, F. (2008a). Biomass fly ash in concrete: SEM, EDX and ESEM analysis. *Fuel*, 87: 372-379.
- Wang, S., Miller, A., Llamazos, E., Fonseca, F. & Baxter, L. (2008b). Biomass fly ash in concrete: Mixture proportioning and mechanical properties. *Fuel*, 87: 365-371.
- Wesche, K. (1991). *Fly Ash in Concrete Properties and Performance*: Rilem.
- Yerramala, A., Chandurdu, R. & Desai, B. (2012). Influence of Fly Ash Replacement on Strength Properties of Cement Mortar. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 4: 3657-3665.

10 Vedlegg

10.1 Betongsammensetning og blanderesepter

Blanderesepter og betongsammensetningen for de ulike blandingene er presentert i dette kapitlet. Forklaringer og eksempler på utregninger gis på denne siden. Alle utregninger er gjort i Microsoft Excel 2016.

Reseptene ved støping var gitt per m³ betong og dividert til å gi 15 liter betong. I ettertid ble det oppdaget at sementen og flygeasken hadde en annen densitet enn den som ble brukt i de originale blandereseptene⁶. Det er korrigert for dette i de forestående tabellene. Disse endringene fører til at volumet ikke ble holdt konstant på 15 liter, men økte noe ved økende flygeaskeandel. De endrede densitetene påvirker v/b-forholdet pga. at flygeasken har mye lavere densitet enn det som ble benyttet i originalreseptene. Dette fører til at de volumet – og dermed også masseforholdet øker noe ved økende flygeaskeandel. Det er imidlertid ikke snakk om store forskjeller; fra referansestøpen til blandingen med 50 % flygeaske økte v/b-forholdet med 0,006. Dette tilsvarer 1 % økning.

For å presentere massen til de ulike bestanddelene per m³ betong ble den tilsatte vekten av hver bestanddel multiplisert med: $\frac{1000m^3}{(\text{blandet betongvolum})}$. For eksempel ble den tilsatte vekten av hver bestanddel multiplisert med: $\frac{1000m^3}{15,0 m^3}$ for blandingen med 10 % FA

Det må tas hensyn til fuktinnholdet i tilslag og tilsetningsstoffer i beregningen av masseforholdet. Prosentandelen vannabsorpsjon i tilslaget må være kjent, den er ifølge produsent Langbrekke Grustak SA 0,8 % for både grovt og fint tilslag. Fuktigheten i SP-stoffet tas med i vannberegningene. Det er i beregningene antatt at det benyttede SP-stoffet har 95 % fuktighet.

Ved beregning av volum i dm³ per m³ betong er massen av bestanddelene per m³ dividert med densiteten til den aktuelle bestanddelen. Beregninger av vanninnhold og masseforhold er nærmere forklart på neste side. Luft i betong en regnes ikke med i volumberegningen. Som

⁶ Densitet for sement i original resept: 2950 kg/m³, reell: 3150 kg/m³ (Norcem).

Densitet for flygeaske fra flisfyring i original resept: 3150 kg/m³, antatt reell: 2400 kg/m³.

følge av avrundinger i flere regneoperasjoner vil ikke alle summene nødvendigvis ha riktig desimal ved manuell gjennomregning av tabellene.

10.2 Forklaring av utregninger – benyttet formelverk

Videre følger eksempler på benyttede beregninger for å komme fram til tabellverdiene i kapittel 9.3.1- 9.3.6. Verdiene fra eksemplene under er hentet fra betongsammensetningstabellen til blandingen med 10 % flygeaske, kapittel 9.3.2. I beregningene benyttes verdier per m³ betong.

Effektivt vann

I beregningen av masseforholdet benyttes effektiv vannmengde:

$$V_{\text{eff}} [\text{kg}] = V_{\text{tot}} [\text{kg}] - V_{\text{abs}} [\text{kg}]$$

Der,

$$V_{\text{tot}} [\text{kg}] = \text{blandevann} [\text{kg}] + \text{total fukt i delmaterialer} [\text{kg}]$$

$$V_{\text{abs}} [\text{kg}] = \text{absorbert vann i tilslag} [\text{kg}]$$

Dermed er:

$$V_{\text{eff}} [\text{kg}] = \text{blandevann} [\text{kg}] + \text{total fukt i delmaterialer} [\text{kg}] - \text{absorbert vann i tilslag} [\text{kg}]$$

Mengden blandevann er for alle resepter justert for å kunne gi et v/b-tall = 0,55, for 10 % FA er det tilsatt 156,7 kg/m³ blandevann.

Vekt av overflatetørt tilslag

Den totale fuktmengden i delmaterialene beregnes med hensyn til tørrvekten. Vekten av overflatetørt tilslag må finnes for å kunne beregne tørrvekten til tilslaget. Etter litt prøving og feiling med tallene ble vekten av overflatetørt tilslag beregnet med følgende metode:

Eksempel:

For blandingen med 10 % FA: Masse fint tilslag per m³: 1049,7 kg/m³, målt fuktinnhold 5,0 %

Vekt overflatetørt fint tilslag for 10 % FA blir da:

$$(1049,7 - 1049,7 * 5,0 \%) + (1049,7 - (1049,7 - 1049,7 * 5,0 \%)) * 5,0 \% = 999,8 \text{ kg}$$

Tørrvekt til tilslag

Beregnes med hensyn til vekt av overflatetørt tilslag på følgende måte:

$$\text{Tørrvekt tilslag [kg]} = \text{vekt overflatetørt tilslag [kg]} * \frac{1}{(1+\text{absorbsjonsprosent})}$$

Eksempel:

$$\text{Tørrvekt fint tilslag [kg]} = 999,8 * \frac{1}{(1+0,008)} = 991,9 \text{ kg}$$

Fukt i delmaterialer

Beregnes med hensyn til tørrvekt:

$$\text{Fukt i delmateriale [kg]} = \text{fukt \%} * \text{tørrvekt [kg]}$$

Eksempel:

$$\text{Fukt i fint tilslag [kg]} = 5,0 \% * 991,9 = 49,6 \text{ kg}$$

Absorbent vann i tilslag

Beregnes med hensyn til tørrvekt. Dvs:

$$\text{Absorbent vann [kg]} = \text{tørrvekt [kg]} * \text{vannabsorpsjonsprosent}$$

Eksempel:

$$\text{Absorbent vann i fint tilslag [kg]} = 991,9 * 0,008 = 7,935 \text{ kg}$$

En annen metode å beregne absorbent vann i tilslag er å trekke tørrvekten fra vekten til overflatetørt tilslag:

$$\text{Absorbent vann [kg]} = \text{vekt overflatetørt tilslag [kg]} - \text{tørrvekt [kg]}$$

Eksempel:

$$\text{Absorbent vann i fint tilslag [kg]} = 999,8 - 991,9 = 7,9 \text{ kg}$$

Utregning av masseforhold

Ved å benytte samme metode for alle delmaterialer kommer man fram til den totale fukten i delmaterialene er 51,4 kg for blandingen med 10 % flygeaske. Den totale mengden absorbert vann i tilslagene er 15,1 kg

Da blir:

$$V_{\text{eff}} = 156,7 + 51,4 - 15,1 = 193 \text{ kg}$$

Masseforholdet, med flygeaskens k-faktor = 1,0, beregnes ved:

$$v/b = \frac{v_{\text{eff}}}{c + (k * FA)} = \frac{193}{315,9 + (1,0 * 35,1)} = 0,550$$

Betongen med 10 % FA har dermed et masseforhold på 0,55.

Kontroll

Kontroll av fuktberegninger i fint tilslag:

$$\text{fuktig tilslag} - \text{overflatetørt tilslag} - \text{fukt i fint tilslag} = 1049,7 - 998,8 - 49,6 = 0,3 \text{ kg}$$

Dette viser at metoden benyttet til beregning av overflatetørt tilslag har tilfredsstillende nøyaktighet.

10.3.1 Betongsammensetning referansesstøp – 0 % FA

Delmateriale	Type/leverandør	Fuktighet	Oppmålt masse per 14,9 L betong [kg]	Masse per m ³ betong [kg]	Densitet [kg/m ³]	Volum [dm ³] per m ³ betong	Vann per m ³ betong [kg]
Sement	Norcem standard	0,0 %	5,25	352,3	3150	111,8	0,0
Flygeaske	Tønsberg energi	0,0 %	0	0,0	2400	0,0	0,0
Sand	Langbrekke 0-8	5,0 %	15,7	1053,6	2660	396,1	49,8
Singel	Langbrekke 8-16	0,0 %	13,4	899,3	2700	333,1	0,0
SP	Sika ViscoCrete SC-315	95 %	0,025	1,7	1080	1,6	1,6
Vann (blandevann)		100,0 %	2,343	157,2	1000	157,2	157,2
Sum:			36,7	2464,1	2464	1000	208,6

v.

Tilslag - fuktprosjenter og masse			
Tilslag	Sand 0-8	Singel 8-16	Sum:
Vannabsorpsjon av tørr masse	0,80 %	0,80 %	
Vann absorbert i tilslag i 1 m ³ betong [kg]	8,029	7,194	15,223
Masse tørt tilslag i 1 m ³ betong [kg]	995,6	899,3	
Masse overflatetørt tilslag i 1 m ³ betong [kg]	1003,6	906,5	
Fukttinnhold, totalt av tørr masse	5,0 %	0,0 %	
Masse fuktig tilslag (brukstilstand) i 1 m ³ betong [kg]	1053,6	899,3	

Effektivt vann i 1 m³ betong: 193,389 kg

Masseforhold: 0,549

10.3.2 Betongsammensetning – 10 % FA

Delmateriale	Type/leverandør	Fuktighet	Oppmålt masse per 15,0 L betong [kg]	Masse per m ³ betong [kg]	Densitet [kg/m ³]	Volum [dm ³] per m ³ betong	Vann per m ³ betong [kg]
Sement	Norcem standard	0,0 %	4,725	315,9	3150	100,3	0,0
Flygeaske	Tønsberg energi	0,0 %	0,525	35,1	2400	14,6	0,0
Sand	Langbrekke 0-8	5,0 %	15,7	1049,7	2660	394,6	49,6
Singel	Langbrekke 8-16	0,0 %	13,4	895,9	2700	331,8	0,0
SP	Sika ViscoCrete SC-315	95 %	0,029	1,9	1080	1,8	1,8
Vann (blandevann)		100,0 %	2,343	156,7	1000	156,7	156,7
Sum:			36,7	2455,2	2455	1000	208,1

II/

Tilslag - fuktprosent og masse			
Tilslag	Sand 0-8	Singel 8-16	Sum:
Vannabsorpsjon av tørr masse	0,80 %	0,80 %	
Vann absorbert i tilslag i 1 m ³ betong [kg]	7,935	7,167	15,102
Masse tørt tilslag i 1 m ³ betong [kg]	991,9	895,9	
Masse overflatetørt tilslag i 1 m ³ betong [kg]	999,8	903,1	
Fukttinnhold, totalt av tørr masse	5,0 %	0,0 %	
Masse fuktig tilslag (brukstilstand) i 1 m ³ betong [kg]	1049,7	895,9	

Effektivt vann i 1 m³ betong: 193,985 kg

Masseforhold: 0,550

10.3.3 Betongsammensetning – 20 % FA

Delmateriale	Type/leverandør	Fuktighet	Oppmålt masse per 15,0 L betong [kg]	Masse per m ³ betong [kg]	Densitet [kg/m ³]	Volum [dm ³] per m ³ betong	Vann per m ³ betong [kg]
Sement	Norcem standard	0,0 %	4,2	279,7	3150	88,8	0,0
Flygeaske	Tønsberg energi	0,0 %	1,05	69,9	2400	29,1	0,0
Sand	Langbrekke 0-8	5,0 %	15,7	1045,6	2660	393,1	49,4
Singel	Langbrekke 8-16	0,0 %	13,4	892,4	2700	330,5	0,0
SP	Sika ViscoCrete SC-315	95 %	0,036	2,4	1080	2,2	2,3
Vann (blandevann)		100,0 %	2,343	156,0	1000	156,0	156,0
Sum:			36,7	2446,1	2446	1000	207,7

vii

Tilslag - fuktprosent og masser			
Tilslag	Sand 0-8	Singel 8-16	Sum:
Vannabsorpsjon av tørr masse	0,80 %	0,80 %	
Vann absorbert i tilslag i 1 m ³ betong [kg]	7,904	7,139	15,044
Masse tørt tilslag i 1 m ³ betong [kg]	988,0	892,4	
Masse overflatetørt tilslag i 1 m ³ betong, [kg]	995,9	899,6	
Fukttinnhold, totalt av tørr masse	5,0 %	0,0 %	
Masse fuktig tilslag (brukstilstand) i 1 m ³ betong [kg]	1045,6	892,4	

Effektivt vann i 1 m³ betong: 192,675 kg

Masseforhold: 0,551

10.3.4 Betongsammensetning – 30 % FA

Delmateriale	Type/leverandør	Fuktighet	Oppmålt masse per 15,2 L betong [kg]	Masse per m ³ betong [kg]	Densitet [kg/m ³]	Volum [dm ³] per m ³ betong	Vann per m ³ betong [kg]
Sement	Norcem standard	0,0 %	3,675	242,3	3150	76,9	0,0
Flygeaske	Tønsberg varme	0,0 %	1,575	103,9	2400	43,3	0,0
Sand	Langbrekke 0-8	4,0 %	15,54	1024,7	2660	385,2	39,1
Singel	Langbrekke 8-16	0,0 %	13,4	883,6	2700	327,3	0,0
SP	Sika ViscoCrete SC-315	95 %	0,044	2,9	1080	2,7	2,8
Vann (blande vann)		100,0 %	2,493	164,4	1000	164,4	164,4
Sum:			36,7	2421,9	2422	1000	206,3

ix

Tilslag - fuktprosent og masse			
Tilslag	Sand 0-8	Singel 8-16	Sum:
Vannabsorpsjon av tørr masse	0,80 %	0,80 %	
Vann absorbert i tilslag i 1 m ³ betong [kg]	7,821	7,069	14,890
Masse tørt tilslag i 1 m ³ betong [kg]	977,6	883,6	
Masse overflatetørt tilslag i 1 m ³ betong [kg]	985,4	890,7	
Fukttinnhold, totalt av tørr masse	4,0 %	0,0 %	
Masse fuktig tilslag (brukstilstand) i 1 m ³ betong [kg]	1024,7	883,6	

Effektivt vann i 1 m³ betong: 191,364 kg

Masseforhold: 0,553

10.3.5 Betongsammensetning – 40 % FA

Delmateriale	Type	Fuktighet	Oppmålt masse per 15,2 L betong [kg]	Masse per m ³ betong [kg]	Densitet [kg/m ³]	Volum [dm ³] per m ³ betong	Vann per m ³ betong [kg]
Sement	Norcem standard	0,0 %	3,15	207,0	3150	65,7	0,0
Flygeaske	Tønsberg varme	0,0 %	2,1	138,0	2400	57,5	0,0
Sand	Langbrekke 0-8	4,0 %	15,54	1021,4	2660	384,0	39,0
Singel	Langbrekke 8-16	0,0 %	13,4	880,7	2700	326,2	0,0
SP	Sika ViscoCrete SC-315	95 %	0,042	2,8	1080	2,6	2,6
Vann (blande vann)		100,0 %	2,493	163,9	1000	163,9	163,9
Sum:			36,7	2413,7	2414	1000	205,4

x

Tilslag - fuktprosent og masse			
Tilslag	Sand	Singel	Sum:
Vannabsorpsjon av tørr masse	0,80 %	0,80 %	
Vann absorbert i tilslag i 1 m ³ betong [kg]	7,795	7,046	14,840
Masse tørt tilslag i 1 m ³ betong [kg]	974,3	880,7	
Masse overflatetørt tilslag i 1 m ³ betong [kg]	982,1	887,8	
Fukttinnhold, totalt av tørr masse	4,0 %	0,0 %	
Masse fuktig tilslag (brukstilstand) i 1 m ³ betong [kg]	1021,4	880,7	

Effektivt vann i 1 m³ betong: 190,607 kg

Masseforhold: 0,552

10.3.6 Betongsammensetning – 50 % FA

Delmateriale	Type/leverandør	Fuktighet	Oppmålt masse per 15,2 L betong [kg]	Masse per m ³ betong [kg]	Densitet [kg/m ³]	Volum [dm ³] per m ³ betong	Vann per m ³ betong [kg]
Sement	Norcem standard	0,0 %	2,625	172,2	3150	54,7	0,0
Flygeaske	Tønsberg varme	0,0 %	2,625	172,2	2400	71,7	0,0
Sand	Langbrekke 0-8	3,7 %	15,3	1003,6	2660	377,3	35,5
Singel	Langbrekke 8-16	0,0 %	13,4	878,9	2700	325,5	0,0
SP	Sika ViscoCrete SC-315	95 %	0,06	3,9	1080	3,6	3,7
Vann (blande vann)		100,0 %	2,545	166,9	1000	166,9	166,9
Sum:			36,6	2397,8	2398	1000	206,2

ix.

Tilslag - fuktprosjenter og masse			
Tilslag	Sand	Singel	Sum:
Vannabsorpsjon av tørr masse	0,80 %	0,80 %	
Vann absorbert i tilslag i 1 m ³ betong [kg]	7,681	7,032	14,713
Masse tørt tilslag i 1 m ³ betong [kg]	960,1	878,9	
Masse overflatetørt tilslag i 1 m ³ betong [kg]	967,8	886,0	
Fuktinnhold, totalt av tørr masse	3,7 %	0,0 %	
Masse fuktig tilslag (brukstilstand) i 1 m ³ betong [kg]	1003,6	878,9	

Effektivt vann i 1 m³ betong: 191,485 kg

Masseforhold: 0,556

10.4 Fullstendige resultater fra analyse av flygeaske fra flisfyringsanlegg

10.4.1 Tungmetaller

Resultater fra prøver dekomponert etter metode CEN/TS 15290:2006.					
Dekomponerte prøver er analysert med ICP-OES.					
Resultatene er gitt som mg grunnstoff pr kg tørrstoff (mg/kg TS).					
Der målt resultat er under deteksjonsgrensen, er deteksjonsgrensen lagt inn.					
Prøveidentifikasjon	Flyveaske, Skagerak Tønsberg 10.11.2015	Varme, Skagerak Tønsberg 10.11.2015	Flyveaske, Skagerak Tønsberg 10.11.2015	Varme, Skagerak Tønsberg 10.11.2015	Gjennomsnitt
Prøvenummer	1		2		3
pH	12,69		12,70		12,76
Al mg/kg (4)	2631,0		3356,0		3498,0
As mg/kg (0.7)	0,7		0,7		0,7
B mg/kg (0.6)	349,0		352,4		323,7
Ba mg/kg (0.3)	1835,0		1897,0		1858,0
Be mg/kg (0.3)	0,3		0,3		0,3
Ca mg/kg (18)	149364,0		155962,0		151164,0
Cd mg/kg (0.2)	77,7		78,3		73,3
Co mg/kg (0.2)	9,1		9,2		8,7
Cr mg/kg (1.1)	60,8		62,1		56,2
Cu mg/kg (0.6)	255,8		258,0		239,8
Fe mg/kg (4)	4929,0		5085,0		4673,0
Ga mg/kg (2.2)	2,2		2,2		2,2
K mg/kg (33)	1,94E+05		2,02E+05		1,97E+05
Li mg/kg (0.4)	30,3		30,5		26,3
Mg mg/kg (1)	20881,0		22557,0		21799,0
Mn mg/kg (2)	9239,0		9664,0		9370,0
Mo mg/kg (0.4)	13,6		15,4		14,4
Na mg/kg (11)	9739,0		10002,0		9705,0
Ni mg/kg (1.1)	17,6		18,1		16,7
P mg/kg (6)	12293,0		12636,0		12477,0
Pb mg/kg (0.4)	324,6		329,9		308,5
S mg/kg (9)	59162,0		60855,0		60630,0
Sc mg/kg (0.1)	0,1		0,1		0,1
Se mg/kg (2.2)	2,2		2,2		2,2
Si mg/kg (0.7)	23575,0		26690,0		25703,0
Sr mg/kg (0.1)	1054,0		1091,0		1068,0
Ti mg/kg (1)	395,0		484,0		405,0

V mg/kg (0.2)	10,3	11,0	9,4	10,2
Y mg/kg (0.1)	2,2	2,8	2,5	2,5
Zn mg/kg (4.4)	13455,0	13759,0	13694,0	13636,0
C %	5,197	5,171	5,200	5,2
N %	0,224	0,248	0,242	0,2
C/N	23,160	20,820	21,470	21,8

10.4.2 Oksider

PPM to OXIDE %	Element to oxide (in mg element per kg dry sample = ppm_{wt})	Element oxide (wt-%)
Al₂O₃	5985,37	0,60
As₂O₃	0,92	0,00
B₂O₃	1098,09	0,11
BaO	2087,37	0,21
BeO	0,83	0,00
CaO	212906,89	21,29
CdO	87,27	0,01
CoO	11,44	0,00
Cr₂O₃	87,25	0,01
CuO	314,45	0,03
FeO	6298,32	0,63
Fe₂O₃	6999,38	0,63
Ga₂O₃	2,96	0,00
K₂O	238109,67	23,81
Li₂O	62,43	0,01
MgO	36059,22	3,61
MnO	12168,66	1,22
MoO₃	21,75	0,00
Na₂O	13231,02	1,32
NiO	22,27	0,00
P₂O₅	28575,56	2,86
PbO	370,56	0,04
SO₃	150368,90	15,04
Sc₂O₃	0,15	0,00
SeO₃	3,54	0,00

SiO₂	54170,96	5,42
SrO	1266,56	0,13
TiO₂	713,95	0,07
V₂O₅	18,21	0,00
Y₂O₃	3,17	0,00
ZnO	16974,09	1,70

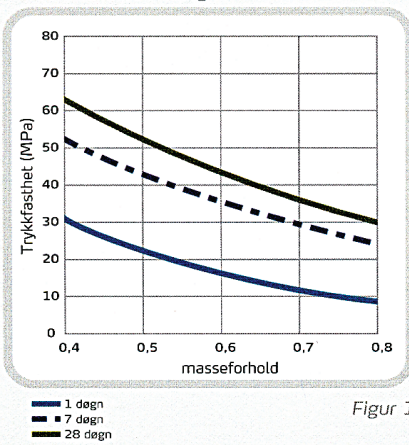
PRODUKTINFORMASJON

Standardsement





Fasthetsutvikling



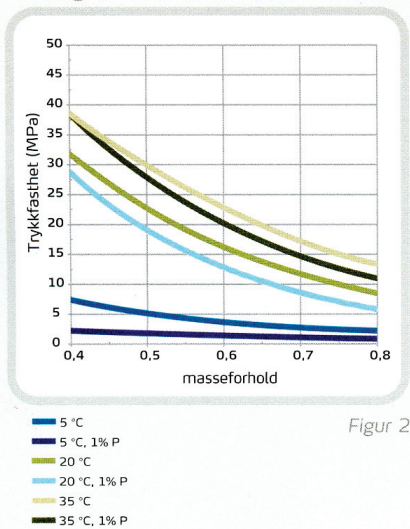
Fasthetsutvikling

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

Tidligfasthet

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

Tidligfasthet



Fasthetsklasse - masseforhold

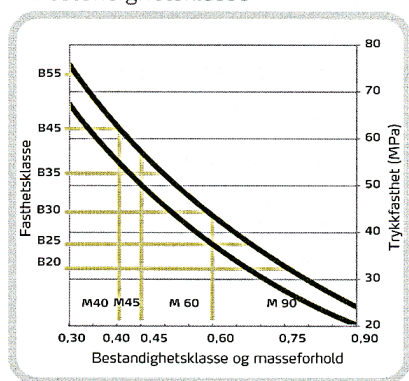
Med normal, god styring av betongproduksjonen, er det behov for en overhøyde på ca 7 MPa ved de ulike fasthetsklassene for å produsere med tilstrekkelig sikkerhet mot undermålere. Standardsement gir følgende retningsgivende verdier for minste og største masseforhold i ulike fasthetsklasser for betong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

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

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



Bestandighetsklasse



Figur 3

Bestandighetsklasse

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

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

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

* Minst 4% luft

Deklarerte data

Norcem Standardsement tilfredsstiller kravene til Portlandsement

EN 197-1-CEM I 42,5R

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

i) Brevik-produsert

ii) Kjøpsvik-produsert

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

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

i) Brevik-produsert

ii) Kjøpsvik-produsert



Sika® ViscoCrete® SC-315

Superplasticiser for sprayed concrete

Product Description

Sika® ViscoCrete® SC-315 is a highly effective super plasticizer with set retarding and mix stabilizing properties. The product meets the requirements for a concrete admixture type FM and VZ according to EN 934-2.

Uses

Sika® ViscoCrete® SC-315 is mainly used in wet spray technology in combination with various Sigunit accelerators. With the use of Sika® ViscoCrete® SC-315, shotcrete is retarded and stabilized and can be kept without loss of workability in a transit mixer for up to 3 hours. Sika® ViscoCrete® SC-315 improved shotcrete has a long open time and workability, resulting in reduced pump pressure. The combination of Sika® ViscoCrete® SC-315 and Sigunit accelerators greatly increase the early strength development of the concrete.

Characteristics / Advantages

Sika® ViscoCrete® SC-315 strongly plasticizes fresh concrete and allows for a high reduction of the water: cement ratio without negatively influencing the workability of the original concrete mix design. At the same time, cement hydration is retarded for a certain time. Dependent on the dosage, fresh concrete remains stable and retarded for a pre determined time, thus maintaining it's workability. The retarded shotcrete can then be accelerated with Sigunit accelerators at any time without loss of quality. The retardation and retention of workability effects are of course also strongly dependent on the:

- Temperature of the fresh concrete
- Ambient temperature
- W/C ratio
- Type of cement
- Cement content
- Age of cement

Trials for specific projects are absolutely essential.

Sika® ViscoCrete® SC-315 does not contain chlorides or any other steel corrosion promoting ingredients.

Product Data

Form

Appearance / Colour Dark brown liquid

Packaging Non returnable 220 kg steel drums, 1,000 kg IBC's. Bulk tanker on request

Storage

Storage Conditions / Shelf Life 15 months from date of production if stored in undamaged and unopened original sealed containers, protected from direct sunlight and frost at temperatures between +5°C and +35°C.



Technical Data

Chemical Base	Synthetic dispersing agent and set retarding, stabilizing ingredients.
Density	1.08 ± 0.02
pH Value	5.0 ± 1.0

System Information

Application Instructions

Mixing	<i>Dependent on the required concrete consistency and working time:</i> 0.7 - 1.2% of the weight of cement
Mixing Time	Sika® ViscoCrete® SC-315 is added to the concrete at the batching plant together with the gauging water. For wet spray concrete a soft concrete consistency (K3) is required. Always make use of the potential water reduction as a result of the plasticizing effect. Batching plant mixing time must be at least 60 seconds.
Mixing Tools	Concrete produced with Sika® ViscoCrete® SC-315 should be taken by transit mixer to the point of discharge. During shotcrete applications, Sigunit is added at the spray nozzle to initiate fast setting. The standard rules of good concreting practice (in production as well as in placing) must always be observed when using Sika® ViscoCrete® SC-315.
Notes on Application / Limitations	Sika® ViscoCrete® SC-315 is a product for use in civil engineering and tunneling. Please consult our technical service to ensure correct use of the product.

Value Base All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

Local Restrictions Please note that as a result of specific local regulations the performance of this product may vary from country to country. Please consult the local Product Data Sheet for the exact description of the application fields.

Health and Safety Information For information and advice on the safe handling, storage and disposal of chemical products, users shall refer to the most recent Material Safety Data Sheet containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.

Legal Notes The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.



Sika Singapore Pte Ltd
200 Pandan Loop, 06-02 Pantech 21
Singapore 128388
SINGAPORE

Phone: +65 6777 2811
Fax: +65 6779 6200
e-mail: info@sg.sika.com
www.sika.com.sg



Sika Kimia Sdn Bhd
Lot 689 Nilai Industrial Estate
71800 Nilai, Negeri Sembilan DK
MALAYSIA

Phone: +606-7991762
Fax: +606-7991980
e-mail: info@my.sika.com
www.sika.com.my





Norges miljø- og biovitenskapelig universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway