

UNDERSØKELSE AV BETONGEGENSKAPER FOR SEMENT MED 30 % FLYGEASKE-ERSTATNING TIL BYGGFORMÅL

INVESTIGATING THE CONSTRUCTION-RELATED PROPERTIES OF CONCRETE
CONTAINING CEMENT WITH 30 % FLY-ASH SUBSTITUTION

SINDRE FOSSNES

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP
INSTITUTT FOR MATEMATISKE REALFAG OG TEKNOLOGI
MASTEROPPGAVE 30 STP. 2011





Universitetet for miljø- og biovitenskap

Institutt for matematiske realfag og teknologi

Masteroppgave våren 2011

Fagområde	Dato	Antall sider
Byggeteknikk	10.mai 2011	85 + vedlegg

Tittel

Undersøkelse av betongegenskaper for sement med 30 % flygeaske-erstatning til byggformål

Investigating the construction-related properties of concrete containing cement with 30% fly-ash substitution

av

Sindre Fossnes

Intern veilere: Dr.ing. Christian O. Sørensen, IMT

Eksterne veiledere: Sivilagronom Lise Bathen, Veidekke Entreprenør ASA
Ingeniør Alf Egil Mathisen, Veidekke Entreprenør ASA

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Institutt for matematiske realfag og teknologi ved Universitetet for miljø og biovitenskap våren 2011.

Forsøkene til denne oppgaven er gjennomført på Veidekkes boligprosjekt på Åstadryggen i Asker i perioden 2010 - 2011. Her har jeg truffet utrolig mange hyggelige folk med stor yrkes stolthet og godt humør, som har gjort sitt beste for å hjelpe meg med nødvendig informasjon og utstyr.

Jeg ønsker å rette en spesiell takk til hovedveileder Christian O. Sørensen, og eksterne veiledere fra Veidekke V-teknikk, Lise Bathen og Alf Egil Mathisen for uvurderlig hjelp. Takk også til Liv Margrethe Hatlevik Bjerge ved Norcem AS, og byggeledelse og medarbeidere på Åstadryggen for god hjelp underveis.

Sindre Fossnes
Ås, 10. mai 2011

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	VII
Abstract	IX
Forkortelser og terminologi	XI
1 Innledning og problemstilling.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.1.1 Hovedmål - Utvikling av en sement med mindre CO ₂ - utslipp.....	1
1.1.2 Utfordringer knyttet til lavkarbonsementen.....	3
1.1.3 Denne hovedoppgavens hensikt og plass i prosjektet	4
1.2 Problemstilling.....	5
1.3 Avgrensinger og definisjoner.....	6
2 Litteraturstudie.....	7
2.1 Innledning.....	7
2.2 Pozzolanreaksjonen.....	8
2.3 Flygeaskens komponenter og fasesammensetning	9
2.4 Kalksteinsmelets rolle i sementen.....	11
2.5 Effekter av flygeaske i fersk og herdet betong.....	12
2.5.1 Herding og styrke	12
2.5.2 Betydningen av flygeaskens finhet.....	16
2.5.3 Bearbeidelighet og vannbehov.....	17
2.5.4 Kryp, svinn og separasjon	19
2.5.5 Luftinnhold	20
2.5.6 Vannreducerende stoffer: Plastiserende (P) og superplastiserende (SP)	21
2.5.7 Permeabilitet og betongens motstand mot angrep.....	21
2.5.8 Varmeutvikling	22
2.5.9 Utfordringer knyttet til bruk av flygeaske	23
2.6 Oppsummering av litteraturstudiet	26
3 Hypoteser	27
4 Feltarbeid - Utprøving av lavkarbonsementen på byggeplass	28
4.1 Prøveuttaket.....	28
4.2 Teknisk data.....	31
4.2.1 Lavkarbonbetongen benyttet på Åstadryggen.....	31

4.2.2 Aalborg Portland Rapid - Referansebetong på Åstadryggen.....	31
4.3 Egenskaper knyttet til lavkarbonsementen og den benyttede flygeasken.....	32
5 Resultater og diskusjon	39
5.1 Bearbeidighet - Slump	39
5.2 Betongtemperatur, værdata og fremdrift på byggeplass	45
5.3 Luftinnhold og overflatekvalitet.....	50
5.4 Fasthetsresultater	53
5.4.1 Periode 1 og 2 - Karakteristisk fasthet	53
5.4.2 Periode 1 og 2 - Fasthetsutvikling	56
5.4.3 Periode 1 og 2 - Regresjonsanalyser	61
5.4.4 Periode 3 og 4 - Karakteristisk fasthet	62
5.4.5 Periode 3 og 4 - Fasthetsutvikling	64
5.4.6 Fasthetsresultater fra Unicons interne prøving av lavkarbonbetongen	66
5.4.7 Feilkilder og diskusjon	69
5.5 Temperaturlogging i vegg.....	75
5.5.1 Avbindingstidspunkt og topp temperaturer	76
5.5.2 Temperaturlogging - Feilkilder	79
6 Konklusjoner.....	80
7 Oppsummering og avslutning.....	84
8 Videre arbeid	85
Vedlegg A - Metode for prøving på byggeplass	86
Vedlegg B - Resultater	91
Vedlegg D - Figurliste.....	102
Vedlegg E - Tabelliste	104
Vedlegg F - Litteraturliste	105

Sammendrag

Energiforbruket er en av de største miljømessige utfordringene ved sement og betongproduksjon. Sementproduksjon er en av de mest energikrevende av alle industrielle produksjonsprosesser, noe som fører til høye utslipp av CO₂. Norcem AS har utviklet en ny sement til byggformål, der 30 % av sementen er erstattet med flygeaske, og 5 % er erstattet med kalksteinsmel. Intensjonen er å redusere CO₂-utslippene ved produksjon, og sementen kalles derfor "lavkarbonsement".

Denne sementen er ikke godkjent til bruk i alle relevante bestandighetsklasser i Norge, og for å få den godkjent, er det behov for å samle inn dokumentasjon om sementens egenskaper. Denne hovedoppgaven er en del av dette dokumentasjonsarbeidet, som inkluderer testing av denne sementen på et av Veidekkes boligprosjekter på Åstadryggen i Asker.

Sement med flygeaske-erstatning gir betong med tregere fasthetsutvikling, og det skal derfor undersøkes om sementen er egnet til bruk vinterstid. Det skal også undersøkes egnethet i forhold til ferskbetongegenskaper. Som et mål på dette, er det tatt ut terningfastheter, målt slump, luftinnhold og betongtemperatur på til sammen 32 ulike betongleveranser med lavkarbonbetong på byggeplass. Som referanse, ble tilsvarende tester utført på 5 serier med 100 % Portland sement. Disse parameterne er sammen med værmålinger, intervjuer av arbeidere og måling av temperaturutvikling i vegg, med på å besvare om lavkarbonbetong er egnet til bruk under norske vinterforhold.

Første del av oppgaven er et litteraturstudie, der det redegjøres for hva flygeaske er, og hvilke effekter den har i fersk og herdet betong. Dette er med på å danne underlag og forståelse for resultatene fra forsøkene. I andre del av oppgaven er resultatene fra forsøkene på Åstadryggen presentert.

Konklusjoner:

- Lavkarbonbetongen har tilsvarende bearbeidelighet som referansebetongen for betong med slump ≥ 180 . For betonger med slump < 180 mangler det data for å konkludere.
- Det er ikke registrert forskjell i tidsbruk for kompaktering av lavkarbonbetongen og referansebetongen.
- På grunn av lavkarbonbetongens flygeaskeinnhold oppleves denne betongen som noe stivere enn referansebetong ved samme slump. Betong med slump ≥ 180 responderer imidlertid godt på vibrator. Den gitte betongsammensetningen er imidlertid ikke egnet for betong med slump 150. Det er ikke fremkommet data for slump 160 og 170.
- Lavkarbonbetongen inneholder signifikant mindre naturlig luft enn referansebetongen.
- Flygeaskens filler-effekt bidrar til tette og jevne overflater. Det er registrert lite porer på veggene med flygeaskebetong. På bakgrunn av personlige oppfatninger til byggeplassledelse og arbeidere, konkluderes det med at lavkarbonbetongen gir penere og tettere overflater enn referansebetongen.

- Resultatene fra testperiodene viser at det ikke er registrert forsinkelser og økt tidsbruk ved bruk av lavkarbonbetongen på Åstadryggen.
- Bruk av lavkarbonbetong har i forbindelse med fremdrift og fasthetsutvikling vært uproblematisk til bruk ved temperaturer ned mot $-8/10$ °C, med tilhørende flau vind. Det ser ikke ut til at fremdriften blir berørt når det gjennomføres samme herdetiltak for referansebetongen og lavkarbonbetongen ned mot $-8/10$ °C.
- Betongen fungerer bra, og er egnet til byggeplassbruk under de gitte værforhold. Dette på tross av at målt betongtemperaturene generelt har vært lavere enn bestilt. Betongtemperatur er et viktig parameter for fasthetsutvikling og fremdrift.
- Fasthetsresultatene er delt inn i 4 perioder, der henholdsvis periode 1 & 2, og 3 & 4 behandles adskilt. Årsaken til dette er at prøvene fra periode 1 og 2 viste uregelmessig fasthetsutvikling.
 - Resultatene fra periode 1 og 2 viser at lavkarbonbetongen ikke når kravet til karakteristisk fasthet ($f_{ck} = 25,1 < 30$ Mpa). Årsaken til dette er at utvalget har høyt standardavvik (6,9) og lav gjennomsnittsfasthet (34,8 Mpa). Dette skyldes sannsynligvis i hovedsak ugunstige herdeforhold.
 - Kravet til karakteristisk fasthet nås heller ikke for utvalget i periode 3 og 4 ($f_{ck} = 29,8 < 30$ Mpa). Dette skyldes blant annet en undermåler som øker standardavviket (3,7), og senker gjennomsnittsfastheten (36,1 Mpa).
 - Det er kun resultatene fra periode 3 som delvis viser forventet fasthetsutvikling og standardavvik. Resultatene fra de øvrige periodene viser generelt høye standardavvik ved alle aldre, og har fasthetsutvikling som strider mot kjent betongteknologi. Resultatene fra dette forsøket viser at betongen kun når 28- døgns karakteristisk fasthet tilsvarende B20 (B25 er dimensjonerende). Fasthetsresultatene er imidlertid usikre, og gir på grunn av utslagsgivende feilkilder, ikke generelt grunnlag for å konkludere vedrørende lavkarbonbetongens egnethet til å nå karakteristisk fasthet.
- Temperaturlogging viser i noen vegger uklare avbindingstidspunkt. Dette viser, sammen med de generelt uregelmessige fasthetsresultatene, at denne betongen er sensitiv for temperaturforhold, og krever tett oppfølging med hensyn til herdetiltak når den brukes i bygg på vinterstid.
- Lavkarbonsementen kan benyttes innenfor dagens regelverk, men siden den ikke er godkjent i aktuelle bestandighetsklasser, kreves det at byggherre og rådgivende ingeniør påtar seg dokumentasjonsansvaret ved bruk av sementen.

Abstract

Energy consumption is the biggest environmental concern in cement and concrete production. Cement production is one of the most energy intensive of all industrial manufacturing processes, which leads to high emission levels of CO₂. A new type of cement, where 30 % of the cement is replaced by fly ash, and 5 % by limestone powder, has been developed by Norcem AS for building purposes. The intent is to reduce CO₂- emissions associated with cement-production. Accordingly, this new fly-ash cement is referred to as "low-carbon cement".

This cement is not approved for use in all relevant performance classes established in Norway with regards to environmental impact resistance. Documentation of properties is required for approval by authorities. This thesis is a part of this documentation process, which includes the testing of this cement at one of the construction company Veidekke's projects located at Åstadyggen in Asker, in the vicinity of Oslo.

Fly ash replacement results in concrete having slower strength development. Investigations are needed to establish whether this new cement is suitable for use in winter or not. Its suitability when it comes to the fresh concrete rheological properties was also investigated. As a contribution to this knowledge, the work associated with this report includes the testing of slump, air content and concrete temperature in the fresh state at the time of pouring, and testing cube strengths at various stages of curing, of a total of 32 different low carbon concrete deliveries at the construction site. For reference purposes, equivalent test were performed on 5 series` with 100% Portland cement. Other parameters, like weather records, worker interviews, and the recording of temperature development in the walls, are other factors that will contribute to determine if the low-carbon cement is suitable to use under Norwegian winter conditions.

The first part of the thesis is a literature study, explaining what fly ash is, and what effects it has in fresh and hardened concrete. This forms the basis for understanding the results from the experiments. The results from the tests at Åstadyggen are presented in the second part of the thesis.

Conclusions:

- Slump measurements show that low carbon concrete has the same workability as reference concrete with slump ≥ 180 . The data collected are, however, insufficient for drawing conclusions for concretes with slump < 180 .
- No difference in the time required for the compaction of low carbon concrete and the reference concrete was found.
- Due to the fly ash content, the low carbon concrete is perceived as somewhat stiffer than the reference concrete having the same slump. Concrete with slump ≥ 180 , however, responds well to the vibrator. For the given mix, this concrete is not suitable for slump 150. No data was obtained for slumps 160 and 170.
- The low carbon concrete contains significantly less natural air than the reference concrete, due to the fly ash filler-effect. No air-entraining agent was used.

- The fly ash filler-effect contributes to dense and smooth surfaces. Only minimal pores were noticed on the walls made with fly-ash concrete. Opinions from construction site management and workers, indicates that concrete produced with low-carbon cement provides neater and denser surfaces than the reference concrete.
- Results from the test periods shows that there is no recorded delays and increase in time use, by the use of concrete with low-carbon cement.
- The use of low-carbon cement has, in relation to strength development, been unproblematic when used at temperatures down to $-8/10\text{ }^{\circ}\text{C}$, accompanied by light wind. The progress does not appear to be affected when equal curing measures are applied to low-carbon concrete and reference concrete down to $-8/10\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- The concrete works well, and is suitable for construction purposes under the prevailing conditions. This despite the fact that concrete temperatures have generally been lower than ordered. Concrete temperature is an important strength development parameter.
- Compressive strength results are divided into 4 periods, respectively; period 1 & 2 and 3 & 4 are treated separately. The reason for this, is that the samples from period 1 and 2 showed irregular strength development.
 - The results from period 1 and 2 shows that the low carbon concrete does not meet the requirements for characteristic strength ($f_{ck} = 25,1 < 30\text{ MPa}$). This is due to high standard deviation (6,9) and low average strength (34,8 MPa). This is probably mainly due to unfavorable curing conditions.
 - The requirement for characteristic strength is not reached for the samples in period 3 and 4 either ($f_{ck} = 29,8 < 30\text{ MPa}$). This is caused by one sub-standard test-result that increased the standard deviation (3,7), and decreased the average strength (36 MPa).
 - Only the results from period 3, partly displays the expected strength development and standard deviation. The results from the other periods, generally demonstrates high standard deviation at all curing-ages, and strength-development adverse to known concrete technology. The results from this experiment demonstrates that the concrete only reaches 28-days' characteristic strength equivalent to B20 (B25 is the design). However, the strength results are uncertain, and due to error sources, there is no overall basis for conclusion concerning the low-carbon concrete characteristic strength, and its suitability to achieve it
- The recording of temperature development in the walls, shows in some cases unclear initial setting. This indicates, together with the generally irregular strength-results, that the concrete is sensitive to temperature conditions, and requires close monitoring with regard to curing measures when used in winter.
- The low-carbon cement can be used within today's regulations, but since it is not approved for all relevant performance classes, it is required that the contractor and consulting engineer assumes the documentation-responsibility.

Forkortelser og terminologi

Forkortelser

SiO ₂	silisiumdioksid
CaO	kalsiumoksid
Al ₂ O ₃	aluminiumoksid
Fe ₂ O ₃	jernoksid
Ca(OH) ₂	kalsiumhydroksid
C ₃ S	trikalsium silikat
C ₂ S	dikalsium silikat
C ₃ A	trikalsium aluminat
C ₄ AF	tetrakalsium aluminoferritt
MgO	magnesiumoksid
SO ₄ ²⁻	sulfat
C-S-H	kalsium-silikat-hydrat: Hoved-hydratasjonsproduktet fra sement/vannreaksjonen. Dannes også når pozzolaner reagerer med Ca(OH) ₂ .
FA	flygeaske
P	vannreduserende plastiserende stoff
SP	vannreduserende superplastiserende stoff
L	luftinnførende stoff
SEM	scanning electron microscopy

Terminologi

Pozzolan	Stoffer som har pozzolane egenskaper, dvs. at de reagerer med Ca(OH) ₂ og danner C-S-H. Eksempler på vanlige pozzolaner er silikastøv, flygeaske, og vulkansk aske.
Pozzolanreaksjon	Flygeaske reagerer med vann og kalsiumhydroksid fra vann/sementreaksjonen og former C-S-H.
Glass-fasen	Flygeaskens amorfe (formløse) mineralske fasesammensetning, som er grunnlaget for flygeaskens pozzolane egenskaper.
Aft-fasen	Fase formet etter hydratasjon av sement, som er avledet fra ren ettringitt med delvis substitusjon av Al ₂ O ₃ med Fe ₂ O ₃ , og SO ₄ ²⁻ med andre ioner [13].

AFm-fasen Fase formet etter hydratasjon av sement, som er avledet fra ren mono-sulphoaluminate med delvis substitusjon av Al_2O_3 med Fe_2O_3 , og SO_4^{2-} med andre ioner [13].

Refererte Standarder

NS-EN 197-1	Sement - Del 1: Sammensetning, krav og samsvarskriterier for ordinære sementtyper
NS-EN 12390-2	Prøving av herdnet betong - Del 2: Støping og herding av prøvelegemer for fasthetsprøving
NS-EN 12390-3	Prøving av herdnet betong - Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet
NS-EN 206-1	Betong - Del 1, Spesifikasjon, egenskaper, fremstilling og samsvar
NS-EN 13670	Utførelse av betongkonstruksjoner
NS-EN 1992-1	Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger
NS-EN 450-1	Flygeaske for betong - Del 1: Definisjon, spesifikasjoner og samsvarskriterier
NS 3420	Beskrivelsestekster for bygg og anlegg, 2. utgave mai 1986 (utgått)
ASTM C618	Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete

1 Innledning og problemstilling

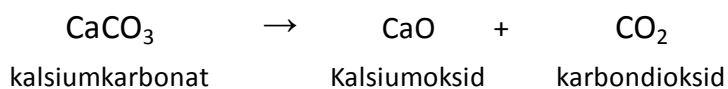
1.1 Bakgrunn

Denne hovedoppgaven er en del av et større dokumentasjonsarbeid i utvikling av en ny og mer miljøvennlig sement i regi av sementprodusenten Norcem AS. Oppgaven inngår i Norcem-prosjektet "utvikling av lavkarbonsement for byggformål", et skatteFUNN-prosjekt i perioden 2009 - 2012 [14]. Prosjektet er godkjent av Forskningsrådet som et flerårig FoU-prosjekt, med rett til skattefradrag gjennom skatteFUNN for kostnader knyttet til FoU aktiviteter.

1.1.1 Hovedmål - Utvikling av en sement med mindre CO₂- utslipp

Prosjektets hovedmål er "å utvikle en miljøvennlig sement til byggformål", hvor CO₂-utslippet er halvert sammenliknet med ordinær Portland sement utviklet på 1990 tallet [15]. Sementen omtales gjerne "Lavkarbonsementen", fordi CO₂- utslippet ved produksjon er lavere enn tradisjonelle Norcem sementer. Sementen finnes per i dag ikke i Norcems produktregister, og det forventes at det tar 2-4 år (fra prosjektstart i 2009) før sementen eventuelt blir godkjent til bruk, og kommer i normal produksjon. Norcem er i en prosess med å fase ut sin standard byggsement (CEM I - 100 % klinker), og ønsker på sikt å levere all byggsement innblandet med flygeaske [16]. Norcem Standard FA- sement, som inneholder 20 % flygeaske, har de siste årene fått flere anvendelsesområder, og er i dag godt etablert på det norske markedet. Med lavkarbonsementen har Norcem tatt skrittet videre, og erstattet en større andel klinker med flygeaske [15]. Denne sementen har 35 % klinker-erstatning, der 30 % er flygeaske, og 5 % er kalksteinsmel, og de gjenværende 65 % består av ordinær klinker. Prosjektet skal lede til at lavkarbonsementen blir den ordinære byggsementen i fremtiden [15]. Denne sementen er ikke planlagt å koste mer enn Standard FA, og brukeren får dermed ingen ekstra sementkostnad ved å benytte lavkarbonsementen [16].

Sementproduksjon har store CO₂- utslipp knyttet til seg, både på grunn av råmaterialet kalkstein som avgir CO₂ ved foredling, men også på grunn av utslipp knyttet til oppvarming av produksjons-ovner, fabrikk- og gruvedrift. Ved sementproduksjon males kalkstein som er rik på CaCO₃ sammen med korreksjonsmaterialer til råmel, som deretter forvarmes i syklontårn ved ca 1000 °C [17]. Denne kalsineringsprosessen fører til at karbondioksid drives ut [18]:



Råstoffet brennes så i en tørrovningsprosess ved ca 1450 °C, og klinkeren som kommer ut blandes med gips, kalksteinsmel og flygeaske, før det males til sement i sementmølle. Den høye temperaturen gjør at sementproduksjon er energikrevende, og CO₂- utslipp knyttet til råmaterialene utgjør 63 %, mens 37 % er knyttet til brensel. Norcem har redusert andelen fossilt brensel med 50 %, og lavkarbonbetongen produseres med 50-55 % ikke-fossilt brensel som plast, tre, kjøttbenmel, fast- og flytende spesialfall. Reduksjonen av andel fossilt brensel gjør derfor at CO₂- utslippet per tonn sement er mindre i dag enn på 1990-tallet (se tabell 1.1). CO₂- utslippet knyttet til råvarematerialet er imidlertid vanskelig å gjøre noe med, men ved å redusere klinkerinnholdet i sementen, reduseres netto CO₂- utslipp per tonn produsert sement [15].

Sementproduksjonen står for ca 4 % av verdens totale CO₂- utslipp, og det er forventet en økning i verdens sementbehov [15]. Det er derfor viktig å utvikle mer miljøvennlige sementer. Tabellen nedenfor viser CO₂- utslipp per tonn sement, og CO₂- besparelse i forhold til henholdsvis Norcem Standard (CEM I) og Norcem Standard FA, som er en blandingssement med 20 % flygeaske (CEM II). Den høye klinkererstatningen gir henholdsvis 32 % og 18 % CO₂- reduksjon i forhold til Norcem Standard sement, og Norcem Standard FA.

Tonn CO₂/ tonn sement

Sementtype	Tonn CO ₂ / tonn sement	Kommentar
Norcem Standard Sement	0,730*	CEM I, Ingen klinkererstatning
Norcem Standard FA	0,607*	CEM II, 20 % flygeaske
Lavkarbonsementen	0,498	CEM II, 30 & flygeaske + 5 % kalkmel - ca. 32 % CO ₂ -reduksjon ifht Standard sement - ca. 18 % CO ₂ -reduksjon ifht Standard FA sement
Tidligere Norcem Standard Sement (1990-tallet)	0,9-1,0	CEM I

* Tall hentet fra gjeldene EPD'er, basert på 2007-tall

Tabell 1.1: Sammenlikning av CO₂- utslipp for ulike sementtyper [3]

En annen motivasjon for å utvikle denne sementen, er økende etterspørsel etter miljøvennlige byggematerialer. Markedet etterspør miljødokumentasjon før man tar materialvalg i nybygg, og det er etterspørsel etter miljøvennlige og bestandige materialer med lang levetid. Lavkarbonsementen vil være det mest miljøvennlige alternative til bruk i bygg på det norske markedet [15].

Lavkarbonsementen kalles også for "Pilotsement", fordi Norcem tidligere ikke har produsert en CEM II sement med så høy klinkererstatning for byggmarkedet. Innblanding av flygeaske fra kullfyrte kraftverk i sement er ikke noe nytt, men har vært gjort i andre deler av verden siden 1940 tallet. Norcem lanserte i 1983 sin Standard FA med 20 % flygeaske, men det har

ikke vært benyttet så store mengder flygeaske i en sement til byggmarkedet i Norge tidligere. CEM II/ B-V kvaliteter er ikke uvanlig brukt i utlandet, og Statens Vegvesen har i en årrekke eksperimentert med så stor andel flygeaske-erstatning til bruk i anlegg. Det ble i forkant av byggingen av senketunellen i Bjørvika utført omfattende prøving av sement med 30 % flygeaske-erstatning, men det mangler erfaringer med bruk av denne sementen til byggformål [14].

1.1.2 utfordringer knyttet til lavkarbonsementen

Betongstandarden NS-EN 206-1 [19] angir 5 ulike sement-hovedklasser: CEM I – CEM V, avhengig av hvilke type mineralske stoffer som er innblandet, og mengden av disse. Lavkarbonsementen er en Portland flygeaske-sement, med benevnelse CEM II/ B-V. Denne sementtypen skal i henhold til sementstandarden NS-EN 197-1 [20] inneholde mellom 65 - 79 % klinker, 21-35 % flygeaske og 0-5 % mindre mengder tilsetningsmateriale. NS-EN 197-1 [20] åpner også for bruk av inntil 5 % kalksteinsmel blandet i sementen, noe som er gjort med lavkarbonsementen [20].

NS-EN 206-1 [19] beskriver totalt 27 forskjellige sementtyper, men den gir kun regler for bruk av 8 av disse [17]. Det er heller ikke mulig å benytte disse 8 sementene i alle bestandighetsklasser. Tabell NA.9 i NS-EN 206-1 (NA) [19], angir at Norsk standard kun gir regler for bruk av denne sementtypen i bestandighetsklassene M45 og M40. Sementen har altså regler for bruk i sementstandarden NS-EN 197-1 [20], men ikke i kombinasjon med alle aktuelle bestandighetsklasser etter betongstandarden NS-EN 206-1 [19].

Det er forventet at lavkarbonsementen vil ha en langsommere fasthetsutvikling enn standardsement på grunn av den høye andel klinkererstatning, og det knytter seg derfor spørsmål om sementens egnethet til bruk på vinterstid. Da Norcem lanserte sin Standard FA i 1983 var dette et problem, og flere anså ikke denne sementen som brukbar i kaldt vær [21]. For å øke reaktiviteten ble denne sementsammensetningen endret i 1995, noe som innebar en endring av klinker, samt økt finmaling [22]. Dersom lavkarbonbetongens fasthetsutvikling er så sakte at fremdrift på byggeplass blir vesentlig hindret, fordi man ikke får revet forskalingen slik man har planlagt, vil lavkarbonsementen fungere dårlig som byggsement. Det er derfor viktig å kartlegge hvorvidt bruk av lavkarbonsementen påvirker fremdriften på byggeplass.

Et annet moment vedrørende lavkarbonsementens fasthetsutvikling er at konstruksjoner i følge NS-EN 1992- 1 [19] dimensjoneres etter 28 døgns karakteristisk fasthet. Tidligere erfaringer med betong som inneholder så høy klinkererstatning, viser at betongen ikke når dette kravet. Det forventes at lavkarbonbetongen vil nå standardens krav til 28 døgns karakteristiske fasthet først ved 56 eller 91 døgner. Skal sement med så høy klinkererstatning

kunne benyttes, er et alternativ at det gis regler eller dispensasjon for dimensjonerende 28 døgns fasthet. En slik styringsfasthet vil angi hva som er forventet fasthet etter 28 døgn, men tillate at den ikke når opp til dimensjonerende karakteristisk fasthet ved 4 ukers alder. Et annet alternativ vil være om man får dispensasjon til å bruke 56 eller 90 døgn til å oppnå standardens dimensjonerende karakteristiske fasthet.

1.1.3 Denne hovedoppgavens hensikt og plass i prosjektet

For å nå målet om å utvikle denne sementen har Norcem satt opp følgende delmål i prosjektet [15]:

1. Produsere lavkarbonsementen.
2. Innhenting og systematisering av internasjonale erfaringer.
3. Gjennomføre funksjonsprøving for dokumentasjon av karbonatiseringshastighet og frostbestandighet.
4. Anvendelse av lavkarbonsement i hele eller deler av bygg.
5. Dialog med ferdigbetongprodusent om produksjon av lavkarbonbetong
6. Oppfølging av byggeplass med in-situ målinger av konstruksjon
7. Dialog med Standard Norge om godkjenning av sementkvaliteten for bruk i betong i bestandighetsklasse M60 og MF45
8. Dokumentasjon og rapportering av resultater.

Norcem produserte i november 2009, 1200 tonn av denne sementen for utprøving i aktuelle byggeprosjekter. Sementen er i løpet av 2010/2011 benyttet i deler av 3 byggeprosjekter:

- (1) Vitenskapsenteret i Sarpsborg, Grålund
- (2) Utbygging av Meteorologisk institutt, Oslo
- (3) 2 nye boligblokker på Åstadryggen, Asker

Min oppgave er å innhente dokumentasjon på ferskbetong- og fasthetsegenskaper ved utprøving av denne sementen i boligprosjektet i Asker. Hensikten med oppgaven er å bidra med dokumentasjon av sementens egnethet for bruk under norske vinterforhold. Gjennom tidligere testing, og erfaringer hentet fra utlandet, har Norcem en indikasjon på lavkarbonsementens egenskaper knyttet til bestandighetsegenskaper og fasthetsutvikling. Samtidig er det behov for dokumenterte erfaringer knyttet til norske råmaterialer og forhold [15]. Undersøkelsene i forbindelse med denne rapporten, skal sammen med laboratorietester, og funksjonsprøving av karbonatiseringshastighet og frostbestandighet på SINTEF Byggforsk, bidra til at det kan dannes bruksregler for denne sementen i aktuelle bestandighetsklasser, eksempelvis M60.

Veidekke Entreprenør AS er entreprenør for boligprosjektet i Asker, og har stilt deler av byggene til disposisjon for å prøve ut lavkarbonsementen. Veidekke har spisskompetanse innen betongarbeider, og benytter mye plass-støpt betong i sine konstruksjoner. Utviklingen i sementproduksjon er at man benytter mindre rene sementer, og i stedet erstatter større deler av klinkeren med pozzolaner. Det er derfor viktig for Veidekke å være oppdatert, og i forkant av denne utviklingen, og stille seg i en posisjon med mulighet til å påvirke produsenten før det ferdige produktet er utviklet [24]. Veidekkes spisskompetanse-enhet V-teknikk, ble derfor tidlig part i dette prosjektet, og har bidratt med kompetanse og dialog med byggeledelsen og konsulent RIB Will Arentz i Asker.

1.2 Problemstilling

“Hvordan egner lavkarbonsement seg til bruk i Norge vinterstid?”

Det skal undersøkes egnethet i forhold til:

- **Ferskbetongegenskaper og overflatekvalitet:** Hvordan fungerer betongen i forhold til bearbeidelighet, kompaktering og luftinnhold? Gir lavkarbonbetongen overflater av samme kvalitet som normalbetong?
- **Værpåkjennning:** Hvordan fungerer en betong med så høy klinkererstatning under vinterforhold? Hvordan påvirker bruk av denne sementen fremdrift, herdetiltak og tidsbruk på byggeplass?
- **Fasthetsutvikling:** Hvilken fasthetsutvikling ser vi i betong med lavkarbonsement over tid? Når betongen kravet til 28- døgns karakteristisk fasthet?
- **Avbinding og temperaturutvikling:** Hva slags temperaturutvikling har lavkarbonbetongen? Når binder den av, og hvilke topp temperaturer oppstår?
- **Gjeldende regelverk:** Er lavkarbonsement egnet til bruk med dagens regelverk?

Det skal svares på problemstillingen gjennom oppfølging av betongegenskapene under utprøving av lavkarbonsementen på Åstadyggen i Asker, i perioden høsten 2010 til våren 2011.

I kapittel 3 er det fremsatt hypoteser på bakgrunn av litteraturstudiet i kapittel 2, og disse vil også bidra til å besvare problemstillingen

1.3 Avgrensinger og definisjoner

Denne oppgaven skal dokumentere betongegenskaper for betong som inneholder lavkarbonsement, og omfatter ikke prøving av mørtel. Begrepene "lavkarbonbetong" eller "flygeaskebetong" betyr i sammenheng med forsøkene på Åstadryggen, betong som inneholder lavkarbonsement. Begrepene "normalbetong" eller "referansebetong" benyttes for betong som er laget med 100 % Portlandsement.

Oppgaven begrenses til å dokumentere betongegenskapene ved bruk av lavkarbonsementen på Veidekkes boligprosjekt på Åstadryggen i Asker, og svare på problemstillingen om den er egnet til bruk i Norge på vinterstid. Betongegenskapen skal dokumenteres i byggeperioden, ikke i driftsfasen.

Med begrepet "lavkarbonsement", menes det prøvesementen som Norcem har produsert 1200 tonn av for utprøving i byggesektoren. Det er ikke gitt at sammensetningen av sementen vil være den samme dersom den kommer i normal produksjon.

Det kan tenkes at lavkarbonbetongen trenger lenger tid i forskalingen for å oppnå tilstrekkelig fasthet før riving, og det kan derfor bli nødvendig å ha mer forskaling tilgjengelig i byggeperioden for å opprettholde fremdrift. Man kan også komme i en situasjon der man må fyre mer for å sikre fremdrift på vinterstid. Dette kan gjøre at CO₂- gevinsten forsvinner, ved at "vinningen går opp i spinningen". Slike spørsmål er ikke del av denne oppgaven, men vil bli behandlet i en egen og parallell masteroppgave ved UMB våren 2011, skrevet av Kristin Syltøy Hølleland.

Det finnes ulike grenser for hva som defineres som finstoff i betong. I denne oppgaven har jeg valgt å definere finstoff som: sement, flygeaske og tilslagspartikler som passerer 0,125 mm maskeåpning.

Med "kulelager-effekt", menes det at fersk betong får økt bearbeidelighet dersom det tilsettes lufttilførende stoff eller andre små kuleformede partikler. Slike partikler gjør at de øvrige tilslagspartiklene glir lettere om hverandre.

Med "filler-effekt", menes det partikler som fyller ut hulrom mellom sementkorn og øvrige tilslagspartiklene. Dette fører til tettere betong på grunn av redusert vannbehov (pastabehov).

2 Litteraturstudie

I dette kapittelet vil jeg gå gjennom et utvalg litteratur, og presentere teori som omhandler betong som har innblandet flygeaske. Jeg vil vektlegge stoff som omhandler hvilke effekter innblanding av flygeaske har på fersk og herdet betong. Dette vil danne underlagsmateriale for de forsøkene som er gjennomført på byggeplass.

2.1 Innledning

Flygeaske stammer fra forbrenningen av pulverisert kull i kullfyrte kraftverk. Dette er et biprodukt som mekanisk, eller ved hjelp av elektrostatisk utfelling, samles opp fra forbrenningsgassene, før gassene slippes ut i atmosfæren. Asken består hovedsakelig av partikler med mer eller mindre sfærisk form, og diameter fra $< 1 \mu\text{m}$ og opp til $200 \mu\text{m}$ [7]. Flygeasken kjemiske innhold er varierende, men nesten all flygeaske inneholder komponenter av magnesium, kalsium, jern, aluminium og silisium [9].

Det er flere grunner til å blande inn flygeaske i betong. CO_2 - gevinsten er allerede introdusert, og definerte utslipps- og klimakvoter gjør at det også er økonomisk motiverende for sementprodusenten å redusere innholdet av klinker i sine sementer. Flygeaske er et avfallsprodukt som kan utgjøre en miljøfare ved deponering, og det er derfor en fordel om den kan brukes til nyttige formål [12]. I 2002 ble det estimert at årlig verdensproduksjon av kullaske var 700 millioner tonn, der 500 millioner tonn var flygeaske. Av de 700 millionene tonnene kullaske, gikk omtrent 80 % i hovedsak til landfyllinger og lagring [12]. Slike industrielle biprodukt inneholder generelt små mengder giftige metaller (arsenikk, krom, selen, titan, vanadium) som har en negativ innvirkning på miljøet hvis de lekker ut. Benyttes flygeasken i sement, kan de fleste av disse metallene bindes opp i hydratasjonsproduktene, og utgjøre en sikker lagring av disse stoffene. Forsøk viser at betong som inneholder flygeaske lekker giftstoffer i liten grad [12]. Innkapsling av flygeaske i betong fører til vesentlig nedgang i lekkning av sporstoffer, sammenliknet med ubeskyttet lagring i åpne felt, som i mange tilfeller er alternativet [7].

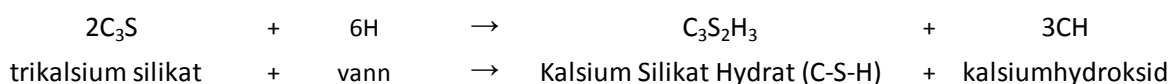
Ved å benytte flygeaske i betong, bruker man ubenyttede ressurser videre, samtidig som det i mange tilfeller har gunstige effekter på betongen. For eksempel har flygeaskebetong lavere temperaturutvikling, noe som gjør at svinn og risstendenser i høyere grad kan kontrolleres og reduseres [12]. Iblanding av flygeaske kan også gi bedre bearbeidelighet på grunn av kulelager-effekt, flygeaskens gunstige sfæriske kornform, og filler-effekt. Betongens vannbehov kan også reduseres ved å tilsette flygeaske. Dette bidrar sammen med flygeaskens kornstørrelse til at betongen blir tettere og mer motstandsdyktig mot inntrengning av skadelige stoffer. Flygeaske påvirker de reologiske egenskaper til betong i fersk tilstand, og bidrar til styrke og holdbarhet for herdet betong [7].

Det skiller i hovedsak mellom flygeaske som stammer fra bituminøst kull (høyverdig steinkull), og flygeaske som stammer fra lignitt (brunkull) og sub-bituminøst kull (lav-verdig steinkull). Flygeaske fra lignitt og subbituminøst kull har både pozzolanegenskaper, og selvherdene egenskaper i fravær av sement [9]. Flygeaske fra bituminøst kull har pozzolanegenskaper, men innehar ikke selvherdende egenskaper. Den største kjemiske forskjellen mellom disse typene er at aske fra bituminøst kull inneholder lavere mengder kalsium, og kalles derfor ofte for lav-kalsium flygeaske. Denne kulltypen har ASTM C618 [25] klassifikasjon F, mens de øvrige nevnte kulltypene produserer høy-kalsium flygeaske, og har klassifikasjon C [9]. Den europeiske sementstandarden NS-EN 197-1 [20], deler flygeaske inn i silisiumholdig og kalkholdig flygeaske, basert på andel reaktiv kalsiumoksid [13].

Asken som benyttes i den nye lavkarbonsementen til Norcem er lav-kalsium, som stammer fra forbrenning av bituminøst kull, og denne redegjørelsen vil derfor ta for seg egenskaper for betong knyttet til lav-kalsium flygeaske. Dersom det ikke eksplisitt er nevnt i teksten, menes det altså i denne gjennomgangen lav-kalsium flygeaske (ASTM C618 klassifikasjon F / EN 197-1: Silisiumholdig).

2.2 Pozzolanreaksjonen

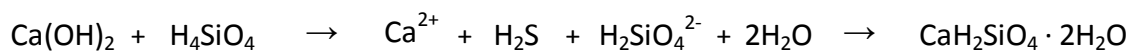
Hovedkomponentene i sementklinker reagerer med vann og produserer reaksjonsproduktene trikalsium silikat (C_3S), dikalsium silikat (C_2S), trikalsium aluminat (C_3A) og tetrakalsium aluminoferritt (C_4AF). Hydratasjonsproduktene fra de to kalsiumsilikatene er nærmest identiske, men skiller av mengden kalsiumhydroksid som dannes. Reaksjonen mellom C_3S / C_2S og vann, er som følgende i oppsummerte forkortede versjoner [9]:



Flygeaske er et stoff som innehar pozzolanegenskaper, der silisiumdioksid (SiO_2), kalsiumoksid (CaO), aluminiumoksid (Al_2O_3) og jernoksid (Fe_2O_3) er hovedkomponentene. Pozzolanegenskapene kan tilskrives tilstedeværelsen av SiO_2 og Al_2O_3 i amorf form (glass) som i alkalisk løsning reagerer med CaO og danner reaksjonsprodukter [11, 13]. Flygeaske er ikke noe entydig begrep, fordi kulletts sammensetning er varierende, og asken vil derfor ha noe varierende innhold. Kjemisk analyse av ulike flygeasker viser et bredt spekter av sammensetninger, som reflekterer variasjonene i kullet som blir brukt i forskjellige kraftverk i ulike deler av verden [11]. Kulletts egenskaper varierer blant annet i hardhet, fuktinnhold, svulle-egenskaper, og mengden og typen organiske komponenter [7]. Disse variasjonene gjør

seg gjeldende i flygeaskens reaktivitet, og dens effekt på hydratasjon og styrkeutvikling i sement. Wesche skriver i "Fly ash in concrete" at man derfor bør vektlegge trender, til fordel for kvantitative parametere når man diskuterer flygeaske [11]. Pozzolanegenskapene bestemmes i hovedsak imidlertid ikke av kjemisk sammensetning, men av askens partikkelstørrelse, form og mineralske sammensetning [12].

Lav-kalsium flygeaske har ikke sementliknende kvaliteter i seg selv, men reagerer med vann og Ca(OH)_2 (kalsiumhydroksid) fra vann/sement reaksjonen, og former en gel av kalsium-silikat- hydrat. Denne inneholder blant annet Fe, Al, SO_4^{2-} , og ligner de øvrige hydratasjonsproduktene [11]. Dette kalles for pozzolanreaksjonen, og sørger for et ekstra bidrag til sementens bindende kapasitet [7]. Reaksjonsproduktene etter pozzolanreaksjonen har tilsvarende fasthet som silikatene fra hydratasjonen forøvrig. Et eksempel på en slik pozzolanreaksjon er vist [26]:



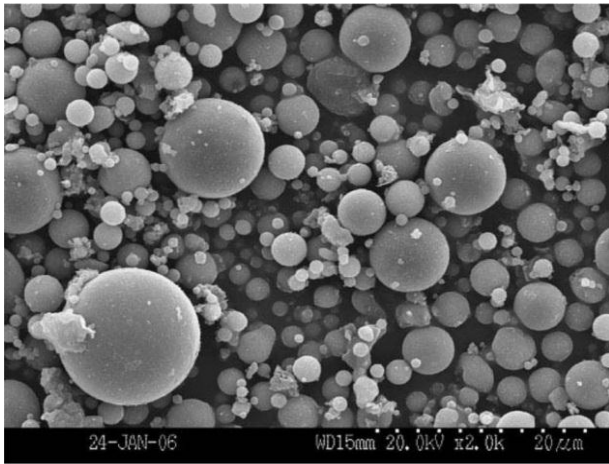
Eller som oppsummert og forkortet versjon [26]:



Pozzolanaktiviteten er tydelig fra 14 dager etter kontakt og fremover, og er spesiell aktiv mellom 14 og 150 døgn. Etter 120 døgn er flygeaskepartiklene i høy grad forvitret etter angrep fra kalsiumhydroksid etter hydratasjon av Portlandsement [11].

2.3 Flygeaskens komponenter og fasesammensetning

Flygeaske består imidlertid ikke kun av stoffer med pozzolanegenskaper, men inneholder mellom 10 og 40 % ubrennbare urenheter som leire, skifer, kvarts, feltspat, dolomitt og kalkstein [12]. Når kullet ankommer forbrenningssonen av ovnen, forbrennes karbonet og flyktige materialer, mens de fleste av de mineralske urenheterne bringes ut med røykgassene i askeform. Disse partiklene smelter sammen, men felles i hovedsak ut som sfæriske glasspartikler når de avkjøles hurtig ved utgangen av forbrenningskammeret. Noe av den sammensmeltede massen klumper seg sammen til bunnaske (10 – 15 %), mens størsteparten flyr ut sammen med de øvrige røykgassene. Flygeasken fanges så opp ved hjelp av elektrostatiske utfelling, posefiltre eller mekaniske fangarmer [12]. Partikkelstørrelse og form avhenger av råstoffet, pulveriseringsgrad, forbrenningssystem og metoden for å fange flygeaskepartiklene. Partikkeform er også en funksjon av partikkelstørrelsen, og de fleste partiklene er glassaktige, hule eller solide, og har sfærisk form [27].



Figur 2.1: Flygeaske forstørret 2000x med SEM mikroskop [4]



Figur 2.2: Flygeaske i pulverform [4]

Bildet til venstre viser flygeaske av god kvalitet, med sfærisk form og jevn overflate. Flygeaske av dårligere kvalitet, vil kunne ha stor andel av partikler som henger sammen, er hule, har andre partikler felt ut på flygeaskens overflate, eller har ru og ujevn overflate.

Flygeaskes mineralske sammensetning består av ulike faser. Den største andelen inngår i den amorfte fasen (glass), som utgjør 60 - 90 % av den totale massen. I tillegg finner vi i krystalliske faser mullitt (opp til 34 %), kvarts (2,8 – 8,5 %), hematitt (1,1 – 2,7 %), magnetitt (0,8 – 2,6 %), og mindre bestanddeler som diopsid, wollastonitt og silimanitt [7]. Disse krystallinske fasene er kjemisk inaktive og bidrar derfor ikke med pozzolanegenskaper. Høy-kalsium flygeaske inneholder imidlertid flere andre krystallinske faser, som gjør at disse flygeaskene har selvherdende egenskaper og er mer reaktive. De krystallinske fasene er til stede i separate partikler, eller de er inkorporert i glassfasen. Denne blandingen av faser gjør at det kan være vanskelig å klassifisere flygeasker [27]. I tillegg finnes det i flygeaske blant annet sekundære bestanddeler som ubrent kull (karbon), fri kalsiumhydroksid, magnesiumoksid og løselige metall-salter, samt små bestanddeler tungmetaller [7].

Flygeaskens fase-sammensetning er blant annet avgjørende for flygeaskens reaktivitet, fordi bare glassfasen av flygeasken går i reaksjon med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og vann. [11]. Glassfasen er grunnlaget for pozzolanaktiviteten, og denne bestemmes derfor i stor grad av mengden og sammensetningen til glassfasen [11]. Den kjemiske sammensetningen og reaktiviteten til glassfasen, avhenger igjen av flygeaskens kalsiuminnhold, sammensetningen til det pulveriserte kullet, og temperaturen kullet brennes i [12]. Kull med lavt innhold av kalsium (bituminøse, antrasitt og noen typer brunkull) gir aluminisilikat glass, mens høy-kalsium flygeaske fra sub-bituminøst kull, og noen typer brunkull gir kalsium- aluminisilikat glass. Sistnevnte er mer reaktiv enn aluminisilikat glass, og gir høyere reaktivitet ved tidlig alder [27]. Flygeaskens reaktivitet kan også forbedres ved varmebehandling. Dersom flygeasken varmes opp til 1000 °C og kjøles hurtig ned, vil dette øke pozzolanaktiviteten, mens aktiviteten synker ved avtagende avkjølingshastighet [11].

Lav- kalsium flygeaske fra Europa inneholder typisk 45-65 wt.% SiO₂, < 10 wt.% CaO, 20-30 wt.% Al₂O₃, 4-20 wt.% Fe₂O₃ og 1-2 wt.% MgO, samt små andeler av andre oksider og alkalier [11]. SiO₂- innholdet stammer i hovedsak fra leireminerale og kvarts i kullet. Den viktigste kilden til Al₂O₃ kommer fra leireminerale, mens Fe₂O₃ stammer fra jernholdige materialer i kullet [27]. CaO stammer fra kalsiumkarbonater og kalsiumsulfater, og mengden CaO-innhold avhenger mye av kullets kvalitet. Høyverdig steinkull inneholder mindre andeler ikke-brennbare stoffer, og har gjerne mindre enn 5 % CaO-innhold, mens lav-verdige kull kan ha CaO-innhold opp mot 35 %. Flygeaskens MgO-innhold stammer fra organiske bestanddeler, og SO₃ har opphav i svovelkis og gips [27]. Karbon stammer fra ufullstendig forbrenning av kullet, og er av betydning for flere betongegenskaper, som vannbehov, luftbehov og reaktivitet. Dagens europeiske kraftverk produserer i hovedsak flygeaske med karboninnhold under 5 %, men høyere andeler finnes i aske fra eldre anlegg [11]. Karbon innehar ikke pozzolan-egenskaper, og er derfor bare en filler. Det er av den grunn ønskelig at innholdet av karbon, andre sekundære bestanddeler og mineraler i krystallinsk fase er på et lavt nivå [28]. NS-EN 197-1 [20] setter grensen for ubrent karboninnhold til maks 5 % for flygeaske som skal benyttes i sement.

2.4 Kalksteinsmelets rolle i sementen

Klaartje De Weerdts har i sin doktoravhandling fra 2011 [13], undersøkt tesen om at innblanding av kalksteinsmel i flygeaske gir positive synergieffekter i betong. Funnene fra avhandlingen viser at det er mer virksomt å erstatte sement og kalksteinsmel, enn om man erstatter sement med bare et av disse elementene [13]. Det er observert kjemisk reaksjon mellom kalksteinsmel og flygeaske, ved at kalksteinsmel reagerer med AFm og AFt fasene som dannes gjennom hydratasjon av sement. AFt fasen er avledet fra ren ettringitt med delvis substitusjon av Al₂O₃ med Fe₂O₃, og SO₄²⁻ med andre ioner. AFm fasen er avledet fra ren mono-sulphoaluminate med delvis substitusjon av Al₂O₃ med Fe₂O₃, og SO₄²⁻ med andre ioner [13].

Ettringitt dannes ved hydratasjon av sement, og når all gips er oppbrukt, reagerer ettringitt med de gjenværende aluminatene og danner monosulfat. Når kalksteinsmel er til stede brytes ikke ettringitt ned, fordi det dannes hemi- og monokarboaluminat i stedet for monosulfat. Dette fører til redusert porøsitet og forbedret trykkfasthet, fordi det oppstår høyere volum av hydrater [13]. Denne effekten av kalksteinspulver på sement er begrenset på grunn av det lave aluminatinnholdet (5-10 %). Introduksjon av flygeaske (inneholder omtrent 30 % aluminat) øker imidlertid innholdet av aluminater til systemet når denne reagerer, noe som øker AFm/AFt forholdet, og senker SO₃/Al₂O₃ nivået. Dermed forsterkes kalksteinsmelets effekt [13].

Det er i forbindelse med doktoravhandlingen gjort forsøk med å erstatte 5 % flygeaske med 5 % kalksteinsmel i sement som opprinnelig inneholdt 35 % flygeaske og 65 % sement. Resultatene viste en 8-13 % økning av 28 døgns trykkfasthet, en økning som imidlertid er avhengig av finheten på flygeasken og sementen, men i liten grad avhengig av finheten på kalksteinsmelet. Det trengs bare noen få prosent kalksteinsmel for å forhindre at ettringitt brytes ned til monosulfat. Økes innholdet av kalksteinsmel, reduseres trykkfastheten fordi ytterligere kalksteinsmel i hovedsak tjener som filler. Det ble også med samme resept forsøkt å erstatte 5 % av sementen med kalksteinsmel, men dette resulterte i styrkereduksjon, eller en liten økning opp mot 4 % på 28 døgns fastheten. Innblandingen av kalksteinsmel ser heller ikke ut til å påvirke reaktiviteten til sement og flygeaske signifikant. Kalksteinsmelets gunstige effekt er maks ved 28 dager, og reduseres noe ved videre herding [13].

Denne synergieffekten som kalksteinsmel gir i flygeaskebetong, muliggjør større sementerstatning enn når bare en av dem er til stede. Doktoravhandlingens mål var å bidra med utviklingen av en all-round Portland kompositt- sement med klinkerestatning høyere enn 30 %, og funn i studien viser at den optimale sementsammensetningen er 65 % sement, 30 % flygeaske og 5 % kalksteinsmel. Kalksteinsmelet forbedrer tidligfastheten i betong, mens flygeasken forbedrer senere fasthetsutvikling på grunn av pozzolanreaksjonen [13].

Kalksteinsmelets effekt i flygeaskebetong gjør at dette er et gunstig tilsetningsmateriale, både med tanke på fasthet, økonomi, og utslipp av CO₂, fordi andelen klinkerinnhold reduseres.

2.5 Effekter av flygeaske i fersk og herdet betong

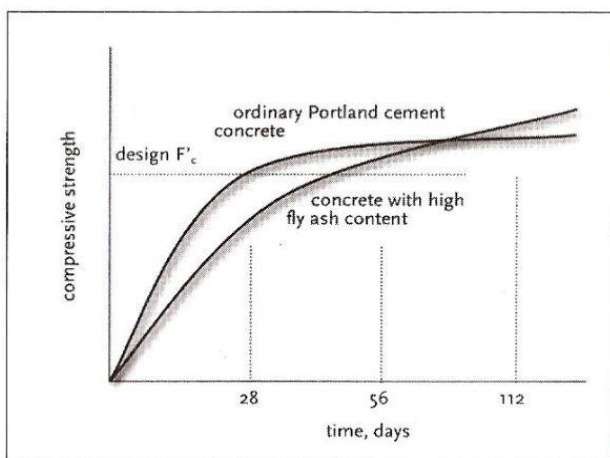
2.5.1 Herding og styrke

Ulike tilsetningsmåter for flygeaske i betong

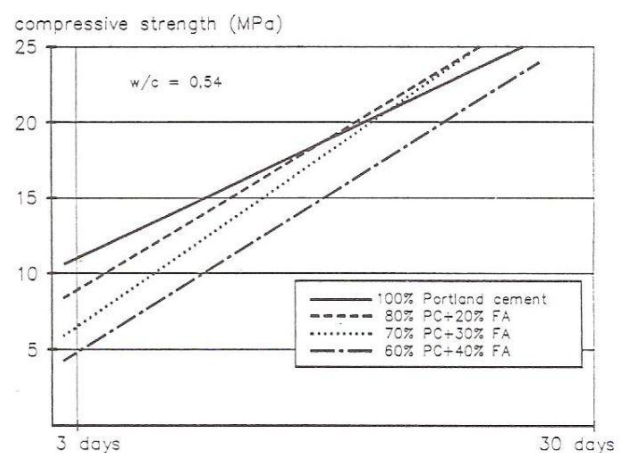
Hvordan man tilsetter flygeasken er en viktig faktor som påvirker betongens egenskaper og fasthetsutviklingsraten. Man kan delvis erstatte sement, eller sement og finstoff. Eller man kan delvis erstatte finstoff, eller finstoff og grove partikler [11]. Det viser seg at enhver prosentvis erstatning av Portlandsement med flygeaske (volum eller masseerstatning), gir redusert trykkfasthet i de tre første månedene av herding, og utvikling av høyere styrke enn rene Portlandsementer etter 6 måneder [9]. Til sammenlikning vil en sement med delvis erstatning av finstoff og/eller grove partikler (og ikke erstattet sement) forårsake økt betongstyrke ved alle aldre. Også her vil likevel tilveksten være beskjedent ved tidlige stadium, og flygeaskens bidrag blir ikke betydelig før 2-3 måneder [9]. I noen tilfeller er det også påvist at fasthetsøkningen er lik eller større enn for blandinger som er tilsatt tilsvarende mengde sement. Det viser seg også at trykkfastheten øker ved alle aldre dersom sement males sammen med flygeaske, til sammenlikning med flygeaske som blandes i sement [9].

Pozzolanreaksjonens betydning for herding

Pozzolanreaksjonen er tregere enn vann/semest reaksjonen, som starter umiddelbart etter blanding, og gir derfor sement med tregere herderate. Pozzolanaktiviteten er økende ved senere aldre, der det dannes økende mengder C-S-H på bekostning av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [11]. Glassnettverket i flygeaskepartiklene gjennomgår en depolymerisasjonsprosess på grunn av OH^- angrep av alkaliske omgivende medier [7]. Aluminosilikat glass-segmentene brytes ned til molekylære enheter som oppløses, og danner sammen med kalsiumet i porevannet reaksjonsprodukter av kalsium-aluminat-silikat-hydrat [7]. Flygeaskereaksjonen fortsetter å forbruke $\text{Ca}(\text{OH})_2$ til å danne C-S-H gel, så lenge $\text{Ca}(\text{OH})_2$ er til stede i sementpastaens porevann, og så lenge det eksisterer plass som C-S-H gelen kan oppta [27].



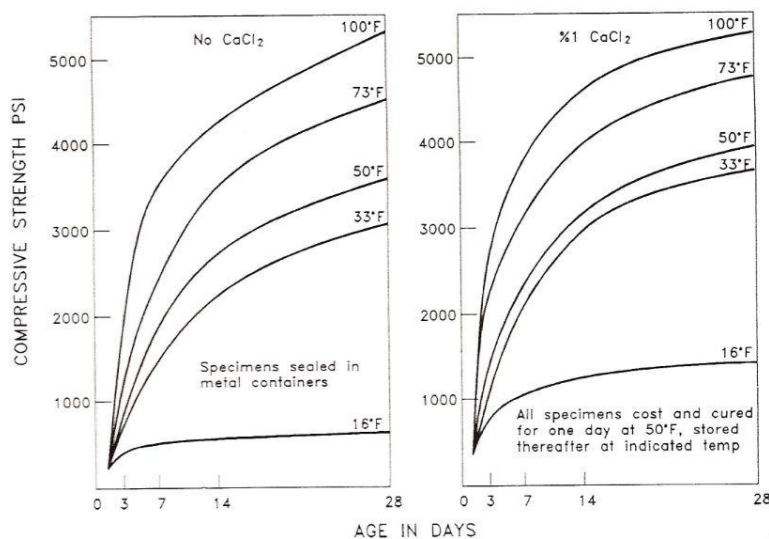
Figur 2.3: Prinsippskisse for fasthetsutvikling - Flygeaskebetong vs ordinær Portland betong [10]



Figur 2.4: Styrkeutvikling for Portlandsement med ulike mengde flygeaskeerstatning [11]

Forsøk viser at pozzolanreaksjonen ikke blir signifikant før etter 1-2 uker (ved 20 °C), fordi det tar så lang tid før alkaliteten i porevannet er høy nok til å oppløse glassfasen til flygeasken [7]. Dannelse av C-S-H er kun mulig når glassfasen til flygeaskepartiklene er løst opp. Reaksjonen er svært sensitiv for porevannets PH, fordi flygeaske ikke brytes vesentlig ned før PH er over omtrent 13,2. Utviklingen av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ etter vann/semest reaksjonen sørger for at poreløsningen er alkalisk. Nedbrytningsprosessen av glassfasen økes dermed betydelig ved økende PH. Dette gjør at også v/c forholdet er av betydning for pozzolanreaksjonen, fordi PH verdien minker med økende v/c forhold [7]. Ved tidlig alder øker betongens PH over tid (mens Ca^{2+} konsentrasjonen minker), og sørger for at flygeaskens glassfase brytes ned og kan reagere med $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Dette betyr at høy-alkalie sement vil føre til hurtigere og lengre reaksjon enn sement med lavere alkalinitet. Siden både løseligheten til flygeaske ved konstant PH, og alkaliteten til porevannet er temperaturavhengig, er herdeklima og temperaturutvikling viktig for pozzolanreaksjonen. Ved senere aldre vil betongens PH gradvis avta (se fig. 2.15), noe som fører til retardering av flygeaskereaksjonen [7].

Høyere herdetemperatur gir økende pozzolanaktivitet, og det er vist at herdetemperaturer over 20 °C forbedret styrken til sementmørtel med 20 % flygeaske, i større grad enn mørtel med ren Portlandsement [9]. Årsaken til dette er at flygeaske tilsynelatende har høyere aktiveringsenergi enn sement. De grove partiklene (> 45µm) er vanligvis inaktive som pozzolaner i flygeasken, men disse vil også aktiveres til pozzolanreaksjon ved høye herdetemperaturer [27]. Det er også rapportert at flygeaskebetong som er utsatt for høy temperatur tidlig i herdefasen, får økt styrkeutvikling selv etter at varmekilden er fjernet [9]. Dette fører til økt tidligfasthet, og økt styrkeutvikling ved senere aldre. Lave herdetemperaturer gir lav styrkeøkning, både på grunn av redusert pozzolanreaksjon og retardert hydratasjon av Portlandsement. Det er forventet at flygeaskebetong vil få andre egenskaper i kaldt vær til sammenlikning med normalbetong, og generelt kan man si at flygeaskebetonger som skal benyttes i kaldt klima krever mer oppmerksomhet når det kommer til proporsjonering og herding, fordi sement som er laget med flygeaske er mer sensitiv for temperatur og fuktbetingelser under herding enn rene sementer [29]. I betong som det er benyttet pozzolaner, er det derfor ekstra viktig med god etterbehandling [30].



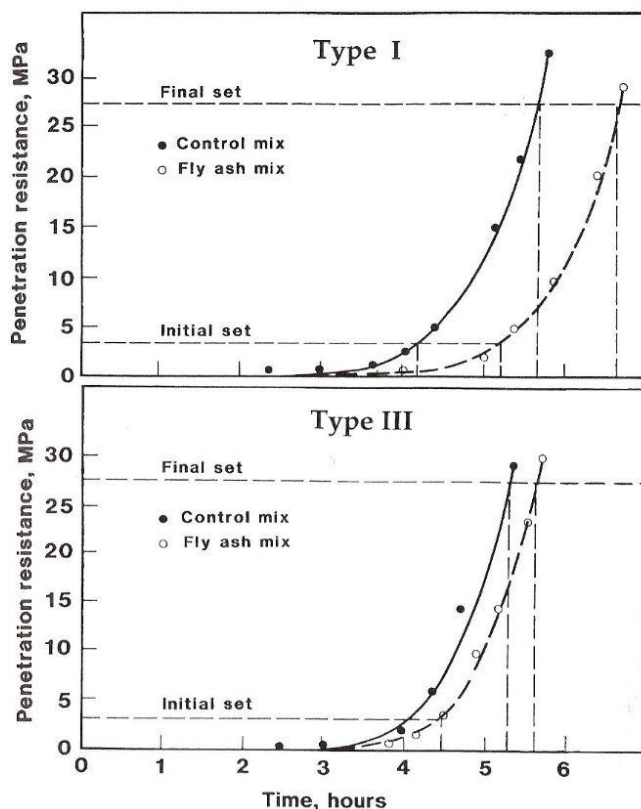
50 °F = 10 °C
1000 psi = 6,9 Mpa

Figur 2.5: Trykkfasthet for betong som er herdet 24 timer ved 10 °C, og dermed lagret ved ulike lave temperaturer [9]

Tiden det tar før flygeaskebetong når opp til betong uten flygeaske med tanke på fasthet, avhenger av mengden, finheten, herdetemperatur og reaktiviteten til flygeasken. Her spiller også faktorer som sementens alkalieinnhold, fuktighet, temperatur og masseforhold inn [11]. Det er også tilfelle at ulike flygeaskebetonger som er laget med samme sement og samme tilslag, utvikler styrke med ulik hastighet, noe som skyldes ulik reaktivitet i ulike flygeaske. Dersom det er benyttet flygeaske med lav reaktivitet, eller at herdeforholdene er kalde, gir dette spesielt store utslag på betongens herding. Herdetemperaturer under 10 °C vil retardere styrkeutviklingen betraktelig [12].

Flygeaskens påvirkning på avbinding og herding

Det er i følge Malhotra & Ramezani-pour [9] generell konsensus i litteraturen at lav-kalsium flygeaske retarderer størkning/avbindingstidspunktet for sement. Det vises blant annet til et CANMET- (Canada Center for Mineral and Energy Technology) studie gjennomført for 11 ulike flygeasker i Canada, som viste at 8 av disse flygeaskene utsatte avbindingstidspunktet i forhold til referansebetongen med opp til 3 timer på initiell, og 4,25 timer på avsluttende herding (for sement med 20 % flygeaskeerstatning) [9]. Disse resultatene er fremkommet ved "Vicat test", som bestemmer initiell og avsluttende herding ved hjelp av inntrengingsdybden til en nål som presses inn i en standardisert pastakonsistens med en standardisert kraft. Tiden måles fra første vann/sement kontakt [28]. Det refereres også til en studie gjennomført av Malivaganam *et al.* [9] som viser at betong med 30 % flygeaskeinnhold og blandetemperatur 20 °C, utsatte avsluttende størkning med 1 – 1,75 timer i forhold til normalbetong. Betong mikset ved 5 °C resulterte i avbindingstidspunkt over 10 timer, uavhengig av flygeaskeinnhold.



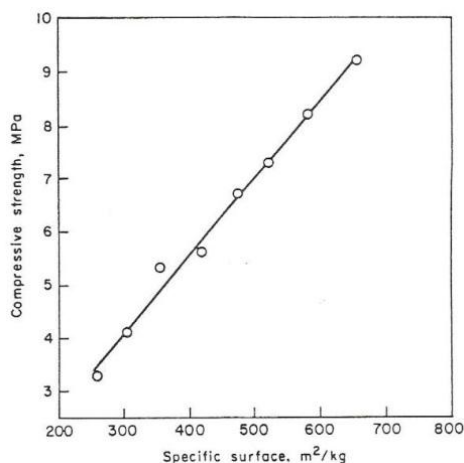
Figur 2.6: Sammenlikning av avbindingstidspunkt for 2 ulike flygeasker og kontrollbetonger [9]

Den ultimate trykk og strekkfastheten til betong med flygeaske-erstatning er imidlertid nesten alltid høyere enn for betonger med ren Portlandsement [27]. Bruker man 28 døgns fasthet som referanse, er det vist at betong med flygeaske hadde 50 % styrkeøkning etter et år, kontra 30 % for referansebetongen med ren Portlandsement [27].

2.5.2 Betydningen av flygeaskens finhet

Finheten (og spesielt den i glassfasen), anses som viktigere enn den kjemiske sammensetningen for flygeaskens reaktivitet [11]. Fine materialer løser seg opp hurtigere og reagerer fortere under hydratasjon, og det er funnet direkte sammenheng mellom flygeaskens finhet og dens reaktivitet. Årsaken er at en vektandel fint pulver har større overflateareal enn en vektandel grovere pulver [21]. Høy finhet gir større pozzolanaktivitet, og dermed også økt bidrag til betongens styrke. Denne sammenhengen er imidlertid ikke tydelig ved tidlig alder [29]. Pozzolanaktiviteten til flygeasken er typisk proporsjonal med andel partikler under 10 μm , mens partikler over 45 μm innehar lite pozzolane egenskaper [11]. Flygeaske fra Nord-Amerika inneholder generelt mindre enn 20 % partikler som er større enn 45 μm , og 40-50 % partikler under 10 μm . Gjennomsnittsstørrelsen ligger omtrent på 20 μm [12]. Ved å male opp flygeaske får man finere fraksjoner, og bryter opp partikler med overflatespenninger, og kan på den måten oppnå optimal finhet for vannbehov og reaktivitet. Økende finhet senker også vannbehovet, og øker motstandsevnen mot sulfatangrep av betongen [27].

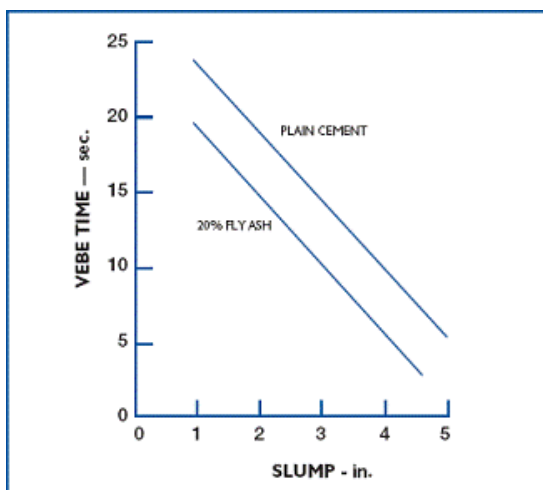
De fleste flygeasker som benyttes i betong er finere enn sement, og de fine fraksjonene fyller derfor ut mellomrommene mellom sementkornene. Samtidig passer ikke store flygeaskekorn like godt inn i mellomrommene, og grov flygeaske kan dermed gi ugunstig effekt på bearbeideligheten [7]. Det er i forsøk vist at styrke, slitasjemotstand, fryse og tine-resistans er en funksjon av andelen flygeaske < 45 μm [27]. Samtidig viser det seg at ved sammenlikning av flygeasker fra ulike kilder, kan det være vanskelig å påvise sammenhengen mellom finhet og styrke [9]. Det viser seg imidlertid at finheten av flygeasken innenfor en gitt flygeaskekilde er en relativ god indikator på hvilke egenskaper flygeasken får, og disse egenskapene forbedres ved økt finhet [27]. Dette indikerer at det ved sammenlikning av ulike flygeaskekilder er flere, og muligens samspillende faktorer, som er viktigere enn partikkelstørrelse som enkeltfaktor. På dette feltet er det behov for mer kunnskap [9].



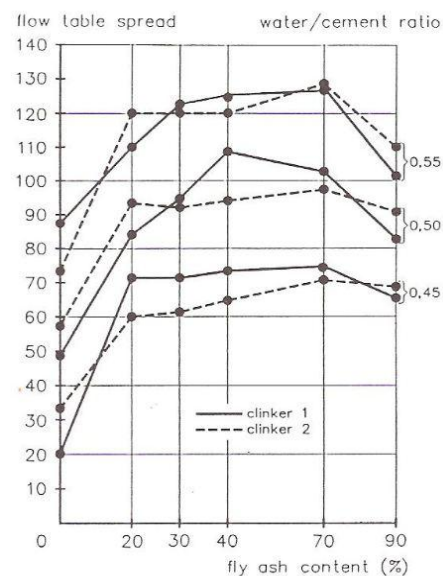
Figur 2.7: Korrelasjon mellom spesifikt overflateareal og trykkfasthet [9]

2.5.3 Bearbeidelighet og vannbehov

Flygeaskens reologiske effekt i betong bestemmes i hovedsak av dens finhet, kornsammensetning/ form og karboninnhold [11]. Flygeaskens sfæriske kornform sørger for at den interne friksjonen i sementpastaen reduseres, noe som fører til økt mobilitet i flygeaskebetong. Flygeaskepartikler er generelt rundere enn sementpartikler, og har derfor gunstig effekt på bearbeideligheten. Flygeaskens "filler-effekt" øker partikkel-sammensetningens homogenitet, øker massens stabilitet, kompakteringseffektivitet og reduserer vannseparasjon. Her spiller også flygeaskens kornform, sementfinhet og tilslag en stor rolle. Tilsetningen av flygeaske reduserer det "fangede" luftinnholdet signifikant, og gir derfor en betong som trenger mindre kompakteringsenergi [7].



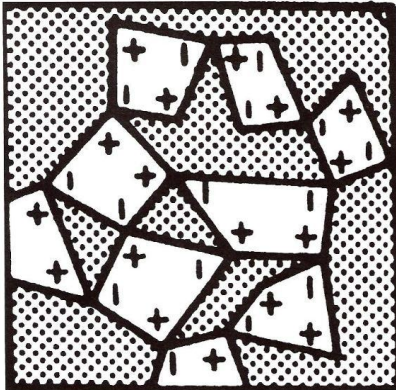
Figur 2.8: Flygeaskens påvirkning på slump, målt med VEBE apparat [6]



Figur 2.9: Flygeaskens påvirkning på slump, målt med fallbord [11]

Det er i følge Malhotra og Mehta [12] mulig å oppnå 20 % reduksjon i vannbehov ved å delvis erstatte sementen med flygeaske. Sementpartikler har en tendens til flokkulasjon på grunn av sementkornenes elektriske ladning. Dette gjør at vann blir fanget i hulrom mellom sementkornene, og bidrar dermed ikke til smøring i fersk tilstand. De fine fraksjonene av flygeasken kan forhindre flokkulering, ved at de absorberes på de motsatt ladede overflater av sementpartiklene. Det innestengte vannet kan dermed frigjøres, og sementen får således mindre vannbehov for å oppnå en gitt konsistens [12]. Andre studier viser at flygeasker som er prosessert til å inneholde gjennomsnittsdiameter mellom 2,5 og 4 μm , kan redusere vannbehovet med 10-12 % i mørtel. Disse fine askene bidrar også mer til styrke, og redusert permeabilitet mer enn grovere fraksjoner. En slik finmalt flygeaske vil kunne gi betongegenskaper med pozzolanreaksjon tilsvarende høy-reaktive pozzolaner som silikastøv

[27]. Flygeaskepartikler over 45 μm har liten/ingen vannreducerende effekt, mens erstatning av sement med flygeaskepartikler under 45 μm gir vannreducerende effekt [9].

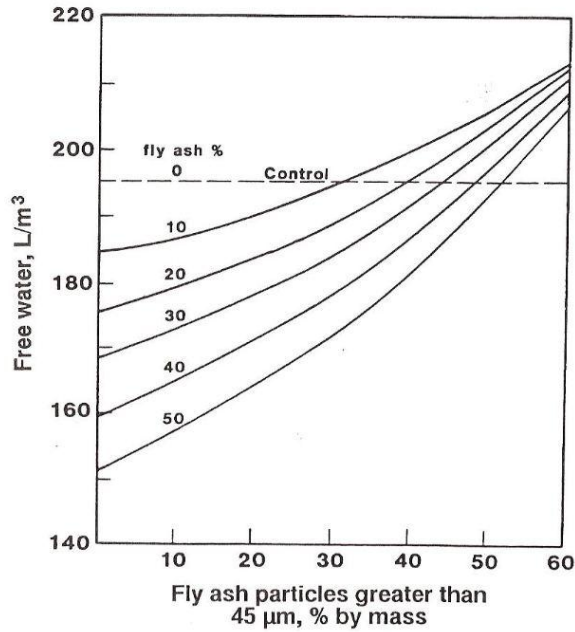


Figur 2.10: Prinsippskisse av sementkorn som flokker seg og stenger inne vann [12]

Flygeaske har også en vannreducerende filler-effekt, ved at de fyller hulrom mellom sementpartiklene [10]. Fordi flygeaske har større volum per masseenheter, fungerer den som en enda mer effektiv filler enn sement [12]. Generelt øker volumet fine partikler dersom en masseandel sement erstattes med en masseandel flygeaske. Grunnen til dette er flygeaskens lavere partikkeldensitet, som ligger i området 1,9 – 2,8 kg/dm^3 , kontra 3,15 kg/dm^3 for sement [7]. Når flygeaske erstatter en andel sement i en volumandel betong, vil derfor andelen pasta øke, gitt at $v/(c + FA)$ -forholdet er konstant. En slik pastaøkning fører vanligvis til at betongen får større plastisitet og bedre kohesjon [27].

En reduksjon i vannbehov er sannsynlig dersom omtrent 70 % eller mer av flygeasken innehar en sfærisk form [11]. Flygeaskens karboninnhold er også avgjørende for vannbehovet, fordi porøs karbon absorberer vann [9]. Flygeaske med lavt karboninnhold gir derfor lavt vannbehov, høyere pozzolanaktivitet, og betong med høy mekanisk styrke [11]. Både innhold av ubrent karbon, innhold av sfæriske partikler og partikkelstørrelse, er dermed avgjørende for flygeaskens vannreducerende evner. Malhotra og Mehta [12] hevder at flygeaske med mindre enn 2 % karboninnhold og minst 80 % partikler under 45 μm , generelt kan redusere vannbehovet betydelig. I sementer med 50 % flygeaske-erstatning kan man med de fleste flygeasker oppnå 15 - 20 % vannreduksjon [12]. Er flygeasken malt til finere fraksjon for å øke dens reaktivitet, kan dette imidlertid øke betongens vannbehov. Dette skjer fordi de sfæriske partiklene knuses, og dermed ikke lenger bidrar med kulelagereffekt [11]. Andre forsøk viser imidlertid at de sfæriske kornene ikke blir affektert av nedmaling. Dette kan antageligvis tilskrives ulike kvernprosesser. Det viser seg også at sement, gips og flygeaske som er malt sammen har bedre eller tilsvarende vannreducerende effekt enn om sement og flygeaske bare blandes sammen [9].

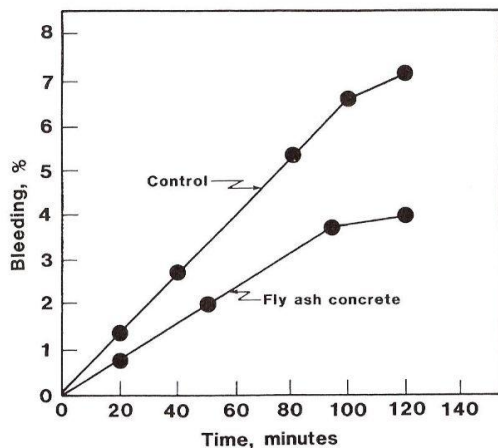
For at flygeaske skal ha en vannreducerende effekt må den proporsjoneres korrekt, og inneha egenskaper som gjør den egnet. Hovedfaktorer er her karboninnhold, partikkelstørrelse, korngradering og kornform.



Figur 2.11: Betydningen av flygeaskens partikkelstørrelse på vannbehov for tilsvarende bearbeidelighet [9]

2.5.4 Kryp, svinn og separasjon

Flygeaskes vannreducerende effekt er også gunstig med tanke på betongens svinn. Mindre andel pasta, og pasta med mindre vann gir reduksjon i faren for svinn og oppsprekking i betongen. Praktisk erfaring tilsier at aske i betong gir noe effekt med tanke på plastisk svinn, noe som antageligvis kan sees i sammenheng med flygeaskens gunstige motstandstendens mot separasjon [11]. Denne motstandsevnen kommer av at de fine flygeaskepartiklene fyller hulrommene mellom sement og tilslagspartikler, og gjør det vanskelig for separasjonsvannet å forme lommer og sprekker [10]. Bruk av flygeaske i betong (både lufttilført og ikke lufttilført) reduserer vanligvis separasjonstendens fordi vi får større overflateareal av solide partikler, og mindre vannbehov for en gitt bearbeidelighet [27].



Figur 2.12: Relativ vannseparasjon i flygeaskebetong vs betong uten flygeaske [9]

I forhold til betongkryp, spiller faktorer som ambient temperatur, fuktighet, betongens styrke og elastisitet, finstoffinnhold og alder vesentlige roller. Flygeaskens betydning for betongens kryp, ligger i hovedsak i måten flygeasken påvirker betongens styrke og styrkeutvikling. Ved kryptesting på 28- døgns prøvelegemer, vil man kunne oppleve at betonger med flygeaske har høyere kryp enn betong med rene sementer. Grunnen til dette er imidlertid flygeaskebetongens lavere styrke på prøvetidspunktet. I tilfeller der betongene har samme styrke ved samme alder, er det vist at flygeaskebetong har mindre kryp enn betonger med ren sement. I slike tilfeller vil flygeaskebetongen få større styrke enn referansebetongen, og langtidskrypet blir dermed redusert [27].

2.5.5 Luftinnhold

Betong laget med Portlandsement inneholder vanligvis under 3 % naturlig luft, avhengig av finmalingsgrad, korngradering og kornform. Tester viser at betong med flygeaske har 0,5-1 % mindre naturlig luft, fordi finstoffene i flygeasken fyller opp hulrom og derved fortrenger luft [11]. Innblanding av fin flygeaske gir lavere innhold av naturlig luft, noe som også er fordelaktig for betongens ultimate styrke [7].

Mengden tilført luft som kreves for frostsikring, påvirkes i hovedsak av flygeaskens karboninnhold. Flygeaskens høye overflateareal absorberer de luft-tilførende stoffene, og resulterer i høyere dosering for å oppnå spesifisert luftinnhold. De luftinnførende stoffene blir dermed utilgjengelige for å produsere små stabile luftbobler som er nødvendig for frostsikring [29]. Andre faktorer som påvirker mengden luftinnførende stoffer er flygeaskens alkalieinnhold og innhold av organisk materiale [11]. Økende alkalieinnhold reduserer behovet for lufttilførende stoffer, og økt innhold av organiske stoffer øker behovet for lufttilførende stoffer [9].

Andre studier viser imidlertid at flygeaske fra ulike steder kan gi varierende effekt på lufttilføring, selv om karboninnholdet er omtrent det samme [27]. Det viser seg at totalt karbonoverflateareal, totalt tilgjengelige areal og overflateaktivitet interagerer mellom flygeaskekarbon og de lufttilførende stoffene. American concrete institute [27] skriver at dette er mulig å løse ved å kjemisk passivere karbonet, slik at det ikke kommer i interaksjon med de lufttilførende stoffene.

Malhotra og Ramezaniapour [9] skriver på sin side at det ikke finnes adekvate teorier som kan forklare de varierende resultatene som finnes på interaksjonen mellom flygeaske og lufttilførende stoffer, og fremhever behovet for videre forskning.

2.5.6 Vannreducerende stoffer: Plastiserende (P) og superplastiserende (SP)

Fordi tilsetning av flygeaske generelt gir behov for større dosering lufttilførende stoffer, er det plausibelt at absorpsjonen av P og SP-stoff også er avhengig av egenskapene knyttet til flygeaskens overflate [9]. Det er gjennomført flere studier for å undersøke hvordan SP absorberes i flygeaskebetong, men resultatene er sprikende. Malhotra og Ramezaniapour [9] refererer til et forsøk som konkluderte med at absorpsjon av SP reduseres i nærværet av karbon. Dette resultatet står i motsetning til hvordan L-stoff absorberes i flygeaskebetong. Det refereres imidlertid også til et studie som viser en viss grad av uavhengighet mellom flygeaskens karboninnhold og dens evne til å absorbere SP. Forfatterne fremholder behovet for videre forskning for å forklare de motstridende resultatene [9].

Innblanding av vannreducerende stoffer kan gjøres i flygeaskebetong uten skadelige bieffekter, men det er rapportert at varigheten av økt plastisitet ikke er like god i flygeaskebetong som i normalbetong [9]. Det antas at denne lavere vannreducerende evnen kan tilskrives flygeaskebetongs lavere vannbehov for å oppnå samme konsistens som normalbetong. Siden det er mindre overflødig vann tilgjengelig, får tilsetningen av vannreducerende stoff mindre effekt på langtidsplastisiteten. På kortere sikt er effektiviteten av SP funnet å være den samme i normalbetong og flygeaskebetong [9].

2.5.7 Permeabilitet og betongens motstand mot angrep

Betong er i utgangspunktet permeabel for vann på grunn av dens iboende porestruktur. Når flygeaskebetong herder, vil C-S-H etter pozzolanreaksjonen delvis fylle ut kapillærporene, og på den måten bidra til lavere permeabilitet [27]. Innholdet av disse porene er en funksjon av v/c forholdet, der en økning gir større andel kapillærporer. Ca(OH)_2 som frigjøres under hydratasjon er løselig i vann, og kan lekke ut av den herdede betongen. Dette fører til tomrom i betongen som kan fylles av inntrengende vann. Pozzolanreaksjonen fører til at Ca(OH)_2 benyttes til produksjon av C-S-H, og reduserer dermed faren for å lekke Ca(OH)_2 . Flygeaske foredler også porestrukturen til betongen over tid ved at store porer transformeres til mindre porer [27]. Dette fører til tettere betong, som er mer motstandsdyktig mot inntrenging av kloridholdig vann, CO_2 , kjemikaler og oksygen. Bruk av flygeaske i betong reduserer kloridinntrengingen vesentlig ved alder over 1 år i forhold til normal betong, men er forholdsvis lik referansebetongen ved tidlige aldre [27]. Andre studier viser at 28- døgns betong med flygeaske er mer permeabel enn betong uten flygeaske, noe som reverseres ved 6 mnd på grunn av økende pozzolanaktivitet [9]. Permeabiliteten reduseres altså i større grad enn i normalbetong over tid, og er direkte relatert til trykkfasthetsutviklingen til mørtler med flygeaske [29].

Diffusjon av ioner i herdet betong representert av Fick`s lov [29]:

$$\frac{dc}{dt} = D_c \frac{d^2c}{dx^2}$$

Der c er kloridioneinnhold ved en avstand x etter tiden t . D_c er diffusjonskoeffesienten for kloridioner i betong som varierer mellom $1,0 \cdot 10^{-9}$ og $50,0 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ for høy- og normalstyrke betong. Det er i forsøk vist at D_c for pasta med flygeaskebetong var $17,7 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$, og $47,7 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ for normal Portlandsement, noe som leder til konklusjonen at flygeaskebetong er tettere og mer motstandsdyktig mot inntrenging av kloridioner enn vanlig betong [29].

Lavere permeabilitet gjør også at flygeaskebetong viser god resistens mot sulfatangrep. Sulfatresistansen er også avhengig av de samme faktorene som gjelder for normalbetong: eksponering, herdeforhold og v/c - forhold. Flygeaskens effektivitet mot sulfatangrep beror imidlertid også på type, mengde, og de individuelle kjemiske og fysiske egenskapene til flygeasken og sementen [27].

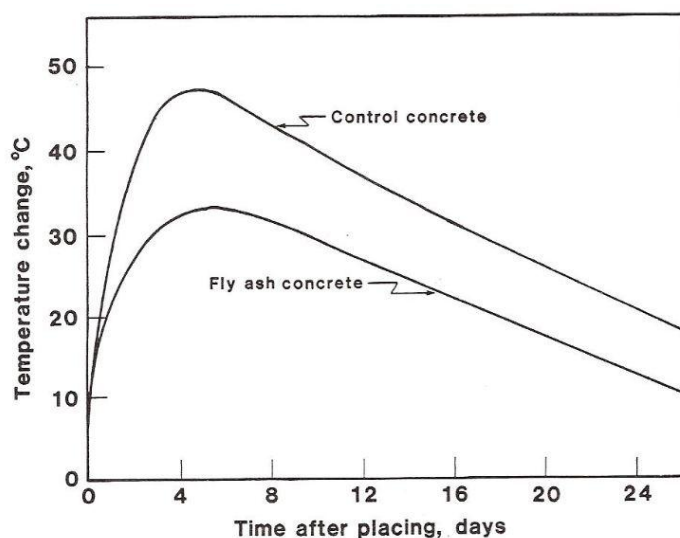
Tilsetning av flygeaske fører også til reduksjon i faren for alkalisilikareaksjoner (ekspansjon og oppsprekking). Pozzolanreaksjonen og dannelsen av C-S-H fører til reduksjon i forholdet mellom kalsium og silisium i den hydratiserte sementen. Det reduserte forholdstallet fører til at den hydratiserte sementen lettere tar opp alkalieioner, som fører til porevann med lavere PH. På denne måten senkes muligheten for at strukturen i eventuell reaktiv tilslag brytes ned [31]. Tilsetningen av tilstrekkelige mengder av noen flygeasker kan redusere tilslagsreaksjoner, og dermed redusere eller eliminere uønsket ekspansjon i betongen. For å oppnå dette, krever det ofte mer flygeaske enn det som er optimalt for styrke og bearbeidelighet, og mer reaktive pozzolaner som silika kan vurderes benyttet [27].

2.5.8 Varmeutvikling

Det ble allerede på 1940 tallet benyttet flygeaske i damprosjekter i USA for å unngå for stor varmeutvikling i de massive konstruksjonene. Dette er viktig for å hindre at forskjeller i avkjølingshastighet mellom indre og ytre deler av en massiv konstruksjon forårsaker riss på grunn av store temperaturdifferanser [21]. Til å begynne med ble betong tilsatt flygeaske for å hindre for stor varmeutvikling, og fordi det var en billig erstatter av sement. Erfaringer fra blant annet byggingen av "Canyon Ferry Dam" i Montana i 1949, viste at sement erstattet med 1/3 flygeaske ga betong med lavere varmeutvikling, lavere vannbehov, bedre bearbeidelighet, lite volumendring og høyere styrke [32].

Mengden varme som utvikles i sementhydratasjonen reduseres vanligvis når flygeaske proporsjoneres sammen med sement i betong. Tidlig varmeutvikling, og tiden det tar før temperaturen oppnår maksimum, retarderes i slike tilfeller [27]. Varmeutvikling skjer som et resultat av kontakt mellom C_3A fra sementen og vann. Erstatning av sement med flygeaske reduserer C_3A -innholdet, og gir således mindre varmeutvikling. Ulike studier viser også at flygeaske retarderer hydratasjonen av C_3A , noe som avhenger av askens sulfatinnhold, mengden oppløste alkalier og kalsium absorberingskapasiteten [9]. Hydratasjonshastighet og varmeutvikling beror også på fimalingsgrad, sementtype, massen og geometrien til strukturen som skal støpes, tilsetningsmetode, sementens starttemperatur og herdetemperatur [27].

Flygeaskebetongens lave varmeutvikling ble utnyttet i utbygging av Bjørvikatunnelen i Oslo. For å unngå sprekkdannelse bestemte Statens Vegvesen at det skulle benyttes en lav-varmebetong med 30% flygeaske-erstatning. Flygeaske ble også benyttet for å oppnå en betong med lav permeabilitet, og tilsvarende reduksjon i faren for armeringskorrosjon [33].



Figur 2.13: Varmeutvikling for betong med 30 % flygeaske vs normalbetong [9]

2.5.9 utfordringer knyttet til bruk av flygeaske

Flygeaske er ikke noe entydig begrep, fordi råmaterialet kull innehar relativt store variasjoner. Dette gjør at flygeaske varierer i kjemisk og mineralsk sammensetning fra kraftverk til kraftverk, men også innenfor samme kraftverk [29]. Variasjon i karboninnhold, glassinnhold, partikkelstørrelse, kornform, forbrennings og prosesseringsmetoden til flygeaskepartiklene har i den sammenheng stor betydning. Disse parameterene er spesielt viktig for flygeaskens kvalitet og pozzolanegenskaper, og gjør at ulike flygeasker gir forskjellige egenskaper i fersk og herdet betong. Flygeaske og sementproporsjonering kan derfor ikke bestemmes for alle materialkombinasjoner og krav, og det bør derfor

gjennomføres forsøksblandinger og prøveforsøk for å oppnå ønskede betongkvaliteter [27]. Samtidig har flygeaskens kvalitet for bruk i betong forbedret seg vesentlig de senere årene, fordi kraftverkenes forbrennings- og oppsamlingsmetoder generelt er forbedret. Dette er også økonomisk motiverende fordi salg av høy-kvalitet flygeaske kan være en god biinntekt for kraftverket [29].

I USA har det de siste årene blitt debattert om flygeaske skal deklarerer som farlig avfall. Denne diskusjonen ble utløst når et deponi med over 4 millioner kubikkmeter flygeaske brast i Tennessee i 2008. Dette førte til at asken rant ut i nærliggende elver, og flygeaskeslurry dekket over 1,2 millioner kvadratmeter [34]. Flygeaske inneholder tungmetaller, og utgjør derfor en fare når den frigjøres i drikkevann og omliggende miljø. Det finnes over 600 slike landfyllinger og deponier i USA, som i mer eller mindre grad reguleres av de enkelte delstater [35]. Etter hendelsen i Tennessee var det flere krefter som tok til orde for at det skulle være et føderalt ansvar å regulere slike deponier. Dersom dette skulle bli tilfelle, måtte imidlertid flygeaske omdefineres til farlig avfall. Organisasjoner og produsenter som fremmer bruk av flygeaske i USA fryktet at dette ville være slutten på bruk av flygeaske i betong, selv med tilleggsforskrifter som muliggjorde nyttiggjøring av flygeaske i betong. Man fryktet at faren for søksmål kunne føre til at produsentene vil slutte å gjøre asken tilgjengelig, og sementprodusenter ikke ønsket å blande farlig avfall inn i sine produkter. En slik omklassifisering eller forbud ville også kunne fått konsekvenser for bruk av flygeaske i Norge [36]. United States Environmental Protection Agency (EPA) definerte imidlertid i 2010 flygeaske som spesialavfall, og man unngikk dermed forannevnte konsekvenser [37]. Miljøvernorganisasjoner som generelt ønsker å redusere bruk av kullkraft, ønsker fremdeles et forbud, og nye utslipp vil i fremtiden kunne føre til regulering av flygeaskebruk.

Det opplyses fra Klima og forurensningsdirektoratet, at det ikke finnes egen deponiforskrift for flygeaske i Norge [38]. I den Europeiske avfallslisten står flygeaske oppført med såkalt speilgang, som betyr at flygeaske er farlig avfall dersom innholdet av farlige stoffer overgår visse grenseverdier, gitt av vedlegg i avfallsforskriften kapittel 11 [38, 39]. Om flygeaske klassifiserer som farlig avfall i Norge, avgjøres derfor på bakgrunn av veiledning utarbeidet av Statens forurensingstilsyn [40].

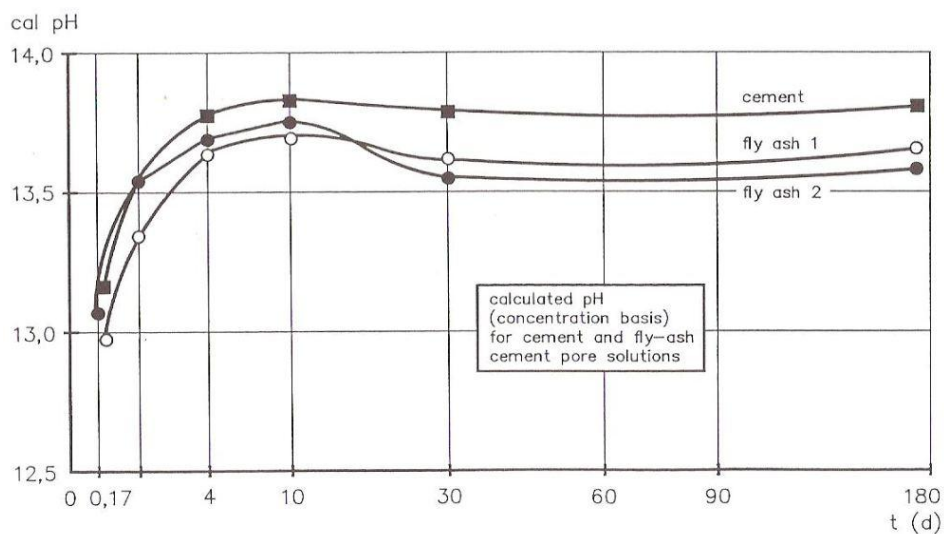


Figur 2.14: Oversvømmelse av flygeaskeslurry etter deponibrudd i Tennessee, 2008 [8]

I forhold til flygeaskens miljøpåkjenning, kan man også stille seg spørsmålet om økt bruk av flygeaske oppfordrer til bruk av kullfyrte kraftverk? Med den nåværende situasjon kan dette argumentet sies å være urelevant, fordi man kun bruker omtrent 7 % av verdens produksjon av pozzolane biprodukter fra kraftverk og metallurgisk industri (tall fra 2005). Resten av denne flygeasken har man ingen spesielt gode bruksområder for, og anses mange steder som et avfallsproblem [10].

Når betongen på slutten av sitt bruksområde skal rives, benyttes den i stor grad videre som fyllmasser. Siden flygeaskebetong inneholder sporstoffer av tungmetaller, er det et spørsmål om dette har miljøkonsekvenser når flygeaskebetong benyttes videre. Det finnes lite informasjon på dette emnet, og i videre arbeid bør det undersøkes hvorvidt tungmetallene forblir passivisert når betong rives og benyttes til andre formål.

Betong er et alkalisk materiale som i utgangspunktet har høy PH (omtrent 12 i fersk betong). $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bidrar i betong til å holde porevannet alkalisk. Pozzolanreaksjonen fører i betong med flygeaske til at alkaliene bindes opp ved at $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -innholdet reduseres. Dette fører til redusert PH i betongen, og et surere miljø som øker faren for armeringskorrosjon. American Concrete Institute (ACI) [27] refererer til studier som viser at flygeaskebetong på tross av denne faren, har alkalisk miljø med liknende PH som betong uten flygeaske, som er tilstrekkelig for å bevare stålarmenings passivitet [27]. I hydratisert Portlandsement er omtrent 20 % av vekten av hydratasjonsproduktene kalsiumhydroksid, noe som bidrar til å holde betongen basisk nok for å unngå korrosjon på stålarmenings. Studier gjennomført av Diamond [29] viser at den høye alkaliteten i porevannet ikke først og fremst stammer fra kalsiumhydroksid, men fra nærværet av sodium- og potassium- ioner. Raten og omfanget av armeringskorrosjon avhenger av den elektriske konduktiviteten, og gjennomtrengningen av fuktighet og luft gjennom betongen. Det konkluderes derfor med at tilstrekkelig overdekning av høykvalitet betong med lav permeabilitet gir nødvendig bestandighet mot korrosjon [29].



Figur 2.15: PH utvikling i betong med og uten flygeaske [11]

2.6 Oppsummering av litteraturstudiet

Tekniske fordeler ved bruk av flygeaske i betong

- Økt bearbeidelighet
- Filler effekt - redusert vannbehov
- Høyere ultimat styrke
- Lavere varmeutvikling – fordel ved støp av massive konstruksjoner og i varme klima
- Bedre pumpbarhet og kompaktering
- Reduserte separasjonstendenser (bleeding)
- Benytter et avfallstoff, og passiviserer tungmetallrestene i flygeasken
- Lavere permeabilitet, større motstandsdyktighet mot vannintrenging, sulfater, klorider alkalisilikareaksjoner og kjemikaler.

Utfordringer ved bruk av flygeaske i betong

- Varierende kjemisk og mineralsk sammensetning av flygeaske gir behov for dokumentasjon og prøving av de enkelte flygeasker
- Behov for mer lufttilførende stoff ved bruk av noen typer flygeaske - vanskelig å oppnå ønsket luftinnhold
- Tregere fasthetsutvikling
- Vanskelig å oppnå korrekt proporsjonering med hensyn til ønskede egenskaper og styrke

Faktorer som påvirker pozzolanaktiviteten og flygeaskens effektivitet i fersk betong

- Kjemisk og mineralsk sammensetning, inkludert innhold av ubrent karbon
- Finheten og kornformen til flygeasken og sementen
- Fasesammensetningen - andel glass og dens reaktivitet
- Kornstørrelse og korngradering
- Temperatur og herdeforhold
- Sementtype - alkalitet
- PH nivået i porene

Det er viktig å påpeke at de nevnte egenskaper ikke er allmenngyldig for alle flygeasker, men avhenger igjen av flere faktorer. Det refereres for eksempel i litteraturen til forsøk som viser andre resultater enn de som fremkommer her, og ulike forfattere viser til ulike effekter av flygeaskeinnblanding på egenskaper som bearbeidelighet, vannreduksjon, fasthetsutvikling, temperaturutvikling og reaksjon på tilsetningsstoffer. De oppsummerte egenskapene er likevel generelt akseptert i litteraturen som gyldige for betonger med flygeasketilsetning eller erstatning, selv om man vil kunne finne motstridende studier.

3 Hypoteser

På bakgrunn av litteraturstudiet er det fremsatt følgende hypoteser som skal testes:

Hypotese I: Det er forventet at flygeaskebetongen har tilsvarende eller bedre bearbeideligheit enn normalbetongen, på grunn av flygeaskens sfæriske overflate.

Hypotese II: Det er trolig at lavkarbonbetongen vil inneholde mindre naturlig luft enn referansebetongen. Fordi det er mindre naturlig luft som skal vibreres ut, er det forventet at det er behov for mindre kompakteringsenergi.

Hypotese III: Flygeaskebetong har tregere fasthetsutviklingsrate enn referansebetong, og det forventes at dette vil gi noe forsinkelse på byggeplassen i forbindelse med planlagte tidspunkt for riving av forskalinger.

Hypotese IV: Det forventes at lavkarbonbetongen har lavere fasthet enn normalbetongen ved 28 døgn, og kanskje også ved 56 døgn, men at den ved 91 døgn er høyere enn normalbetongen.

Hypotesene skal bidra til å belyse problemstillingen om sementens egnethet på vinterstid i Norge.

4 Feltarbeid - Utprøving av lavkarbonsementen på byggeplass

4.1 Prøveuttaket

Norcem har inngått et samarbeid med Veidekke entreprenør for utprøving av lavkarbonbetongen i to boligblokker på Åstadryggen i Asker. Disse boligblokkene er bygget med plassstøpt betong, og kalles i byggeperioden for blokk A og blokk B. Betongen er benyttet i skilleveggene i andre etasje på begge blokkene, og i toppetasjen og toppdekket på blokk A. Den første støpen med denne sementen ble utført 29. september 2010, og forsøket ble avsluttet med et betongdekke i 6. etasje 18. februar 2011. De øvrige vegger og dekker er i begge blokkene støpt med Aalborg Portland Rapid (CEM I) B30- betong. Denne betongen er brukt som referanse/kontroll-betong for prøveuttaket, og danner sammenlikningsgrunnlag for lavkarbonbetongen.

Det er til sammen gjort 37 prøveuttak (serier), og hver av disse seriene stammer fra 37 forskjellige biler. Hver serie kan dermed entydig spores tilbake til en bestemt leveranse. Av disse seriene, er 5 kontrollserier med referansebetongen. Det er for hver serie tatt ut terninger for fasthetsprøving, samt at betongtemperatur, slump og luftinnhold er kontrollert. Terningfasthet gir en indikasjon på betongens fasthetsutvikling og slutfasthet, og er et mål på om betongen holder prosjekteringsstandardens (NS-EN 1992-1 [23]) krav til karakteristisk fasthet. Betongtemperatur er et parameter som har betydning for betongens avbinding og fasthetsutvikling, og dermed også fremdriftsmuligheter på byggeplass. Betongtemperaturen er på den måten med på å forklare betongens egnethet på vinterstid. Betongens naturlige luftinnhold er målt for å kontrollere hvordan dette påvirkes av flygeaske. Innhold av luft er av betydning for kompakteringsbehov og mengde energi som er nødvendig for å få ut luften, og er således av betydning for betongens kompakteringsevne. Slump er kontrollert for å dokumentere betongens evne til å flyte ut (mobilitet). Dette er et parameter som gir en indikasjon på hvor lang tid arbeiderne trenger for å kompaktere betongen tilstrekkelig.

Støping og prøveuttak av lavkarbonsement har vært gjennomført på Åstadryggen i 4 perioder:

Periode 1: 29.09.2010 – 13.10.2010: Serie 1-15 → Skillevegger, 2 etasje i blokk B

Periode 2: 16.11.2010 – 29.11.2010: Serie 16-26 → Skillevegger, 2 etasje i blokk A

Periode 3: 03.02.2011 – 08.02.2011: Serie 27-31 → Skillevegger, 6 etasje i blokk A

Periode 4: 18.02.2011: Serie 32 – 37 → Toppdekket i blokk A



Figur 4.1: Andre etasje med lavkarbonsement, blokk B, Åstadryggen [1]



Figur 4.2: Andre etasje med lavkarbonsement, blokk B, Åstadryggen [1]

I periode 1-3 er terningfastheter for hver serie kontrollert etter 1, 2, 7, 14, 28, 56 og 91 døgn, og for hver serie i periode 4 etter 14, 28 og 56 døgn. Hver fasthet er gjennomsnittet av 2 terningtrykkprøver. Til sammen utgjør dette prøveuttaket 440 terninger.

For å få et så godt statistisk materiale som mulig, er det så langt det har vært praktisk gjennomførbart, tatt ut prøveserier for hver betongleveranse med lavkarbonsement. Prøvetaking er startet etter at betongbilen har tømt 2m^3 for å sikre at betongen er homogen og representativ.

Det har i periode 1 og 2 vært kontinuerlige målinger av temperatur og vindforhold med værstasjon som ble montert på byggeplassen, for å dokumentere betongens egnethet ved vinterforhold. Temperatur og vindforhold er i periode 3 og 4 hentet fra værstasjonen i Asker gjennom yr.no [41]. Dette er gjort for å dokumentere hvilke klimapåkjenninger betongen har vært utsatt for, noe som er avgjørende for betongens herderate.

Det er målt temperaturutvikling i 19 utvalgte vegger med automatiske temperaturloggere. Dette er gjort for å dokumentere varmeutvikling, avbindingstidspunkt og toppetemperatur.

All betong er blandet ved Unicons anlegg i Sandvika, og Unicon AS har stått for alle betongleveranser. Betongen er fylt i forskalingsformene ved hjelp av heisekran og tobb.

Erfaringer ut over egne utførte tester, er hentet gjennom dialog med formenn og arbeidere på byggeplassen.

Verken lavkarbonbetongen eller referansesbetongen er tilsatt luftinnførende stoffer. Begrepet "luft" referer derfor til naturlig luft, dersom ikke annet eksplisitt er nevnt i teksten.

Metode for gjennomføring av prøveuttakene er beskrevet i vedlegg A.

V/c- og v/(c+FA) forhold

Når forholdet mellom vann og sement beskrives, benyttes det i denne redegjørelsen v/c - forhold, og ikke v/(c+FA). Årsaken til dette er at flygeasken males sammen med klinker under produksjon, og regnes som en integrert del av sementmengden. En lavkarbonbetong som eksempelvis inneholder 300 kg sement per m³, inneholder 0,30*300 kg = 90 kg FA, men sementmengden betraktes likevel som 300 kg. Dette er på tilsvarende måte som at gips og kalksteinsmel tradisjonelt kan regnes som del av sementmengden. Flygeaskens virkningsgrad og k-faktor i henhold til NS-EN 206-1 [19], blir derfor ikke et tema i denne rapporten.

Sammenlikningsgrunnlaget - lavkarbonsement og referansesement

Heissjakt og avstivende vegger er på Åstadryggen støpt med referansebetong, i samme tidsrom som lavkarbonbetongen, og det har derfor vært mulig å sammenlikne betongene under relativt like forhold. Det er imidlertid et poeng at referansebetongen og lavkarbonbetongen ikke har samme v/c- forhold, stein/sand- forhold, og andel tilsetningsstoffer, samt at betongene har sementer som stammer fra ulike produsenter. Det refereres til kapittel 4,2, og vedlegg B.4 for detaljer vedrørende betongenes resepter og egenskaper. Disse betongene er av den grunn ikke direkte sammenliknbare. Fordi datainnsamlingen til denne rapporten har foregått i et pågående byggeprosjekt, har det ikke vært mulig å styre valget av referansesement og v/c- forhold. Konklusjoner som i denne rapporten baserer seg på sammenlikninger av de to betongene, må derfor sees i lys av disse ulikhetene. Det statistiske materialet for prøvingen av betongene er også av ulik størrelse, og resultatene må også tolkes på bakgrunn av dette. Det er likevel fornuftig å sammenlikne betongene, fordi referansebetongen er en mye brukt standardbetong til byggformål, som utgjør et reelt alternativ til lavkarbonbetongen. Referansesementen og lavkarbonsementen er også av ulik karakter, og krever derfor ulik proporsjonering for å oppnå ønskede betonegenskaper.

På Åstadryggen er boligblokkene i utgangspunktet dimensjonert i fasthetsklasse B30, og referansebetongen er derfor av denne kvaliteten. Fordi lavkarbonbetongen ikke forventes å oppnå 28 døgns dimensjonerende karakteristisk fasthet i løpet av 28 døgn, har prosjekterende ingeniør dimensjonert denne betongen ned til fasthetsklasse B25, samtidig som den har sementmengde tilsvarende en B30. Kravet til 28 døgns terningfasthet for lavkarbonbetongen er dermed 30 Mpa (B25), kontra 37 Mpa (B30) for referansebetongen. Dette har man gjort for å sikre at betongen skal nå kravet til karakteristisk fasthet ved 28 døgn. Selv om referansebetongen er B30, og lavkarbonbetongen er B25, er det derfor mulig å sammenlikne disse betongene med hensyn til fasthet.

4.2 Teknisk data

4.2.1 Lavkarbonbetongen benyttet på Åstadryggen

- **Dimensjonerende fasthetsklasse betong:** B25 - Krav til karakteristisk terningfasthet etter 28 døgn = 30 Mpa
- **Dimensjonerende bestandighetsklasse:** M60 - Korrosjonsfare pga karbonatisering, lett fryse/tine angrep. Maks masseforhold: $v/c < 0,60$.
- **Dimensjonerende kloridinnholdklasse:** CL 0,1 - Største kloridinnhold (salter) i forhold til sementmasse = 0,1 %
- **Dimensjonerende eksponeringsklasser:** X0, XC4, XF1
- **D_{maks} :** 24 mm - Største nominelle kornstørrelse skal ikke overstige 24 mm.
- **Flygeaskeinnhold:** 29 % av sementvekt
- **Kalkmelinnhold:** 4 % av sementvekt
- **Gips:** 3,2 % av sementvekt
- **Avbinding:** 175 min fra vann/sement kontakt
- **v/c- forhold:** 0,54
- **Sementklasse:** CEM II/ B-V
- **Sement-finhets (Blaine):** 472 m²/kg
- **Fasthetsklasse sement:** 32,5N - 7 døgns fasthet ≥ 16 Mpa, og 28 døgns fasthet $\geq 32,5$ og $\leq 52,5$ Mpa.
- **Beregnet luftinnhold ved massekontroll:** 2 %.

4.2.2 Aalborg Portland Rapid - Referansebetong på Åstadryggen

- **Dimensjonerende fasthetsklasse betong:** B30 - Krav til karakteristisk terningfasthet etter 28 døgn = 37 Mpa
- **Dimensjonerende bestandighetsklasse:** M60
- **Dimensjonerende kloridinnholdklasse:** CL 0,1
- **Dimensjonerende eksponeringsklasser:** X0, XC4, XF1
- **D_{maks} :** 24 mm
- **Avbinding:** 144 min
- **v/c- forhold:** 0,59
- **Sementklasse:** CEM I/ B-V 52,5 N
- **Sement-finhets (Blaine):** 428 m²/kg
- **Fasthetsklasse sement:** 32,5N - 2 døgns fasthet ≥ 20 Mpa, og 28 døgns fasthet $\geq 52,5$ Mpa.
- **Beregnet luftinnhold ved massekontroll:** 3,5 %.

Opplysningene ovenfor er hentet fra datablader, følgesedler fra betongleveranse, blanderapporter fra blandeverket, Standarder, og informasjon fra betongprodusent.

4.3 Egenskaper knyttet til lavkarbonsementen og den benyttede flygeasken

Hensikten med dette avsnittet er å knytte erfaringer fra litteraturstudiet opp mot egenskapene til lavkarbonbetongen og den benyttede flygeasken.

Fra litteraturstudiet har det fremkommet at flygeaskens kvaliteter er av betydning for dens egenskaper i fersk og herdet betong. De data som foreligger for den flygeasken som Norcem benytter er av begrenset omfang, men all flygeaske som brukes er i henhold til NS-EN 450-1 *Flygeaske for betong* [42]. Denne standarden setter begrensninger for hva slags flygeaske som kan benyttes i betong. Norcem måler blant annet flygeaskens innhold av kjemiske komponenter, som er vist i tabell 4.1. Disse gjennomsnittsverdiene er fremkommet etter gjennomgang av 28 forsendelser flygeaske Norcem importerte i 2010. Flygeasken er importert fra Danmark og Tyskland.

Prosentandel %

SiO ₂	53,2	K ₂ O	2,1	P ₂ O ₅	0,8
Al ₂ O ₃	24,9	Na ₂ O	1,0	F.Carbon	2,5
Fe ₂ O ₃	6,3	Alkali	2,3	Glødetap	2,9
CaO	7,2	Cr ₂ O ₃	0,03	SO ₃	0,6
MgO	2,3	Total klor	0,01		

Tabell 4.1: Gjennomsnittlig kjemisk innhold for 28 forsendelser med flygeaske [2]

Sementstandarden NS-EN 197-1 [20] setter begrensning for innhold av ubrent karbon til 5 % for flygeaske som skal benyttes i betong. Tabellen viser at innholdet av ubrent karbon i gjennomsnitt har vært 2,5 %. Median for dette utvalget er også 2,5 %, og verdiene varierer mellom 1,2 og 3,5 % (ikke vist i tabell). Et lavt karboninnhold er gunstig med tanke på fasthetsutvikling, vannbehov, flygeaskens reologiske effektivitet, pozzolanaktivitet, behov for luftinnførende stoffer og overflatekvalitet. Mengden av de øvrige resterende kjemiske komponentene er i overenstemmelse med hva som er funnet i litteraturen.

Norcem foretar ikke systematisk måling av mineralsk sammensetning og kornstørrelsefordeling. Det har derfor ikke vært mulig å fremskaffe systematiske data for disse egenskapene.

Norcem måler imidlertid flygeaskens finhet og spesifikke vekt (densitet). Verdiene for flygeaske er også gjennomsnitt av 28 forsendelser med flygeaske i 2010, mens de resterende verdiene stammer fra Norcem FoU.

	Spesifikk vekt (g/cm³)	Blaine finhet (m²/kg)
Flygeaske	2,33	380
Norcem Standard	3,15	370
Lavkarbonsement	2,97	472
Norcem Standard FA	2,99	450

Tabell 4.2 Spesifikk vekt og Blaine-finhet for flygeaske og et utvalg sementer [2]

Norcem erstatter sement med flygeaske på bakgrunn av vekt/vekt erstatning, og ikke volum/volum erstatning. Siden flygeaske har lavere spesifikk vekt enn sement, øker volumet av fine partikler når en masseandel sement erstattes av en masseandel flygeaske. Norsk sand inneholder generelt mindre finstoffer enn det man har behov for i betong, og det er derfor generelt en fordel å øke finstoffinnholdet. Silika ble tidligere benyttet i større grad for å sikre tilstrekkelig finstoffinnhold, men det er produksjonsunderskudd på silika, og prisene er dertil høye. Silika benyttes derfor ikke i like utstrakt grad som tidligere [43].

Litteraturstudiet viste at det på verdensbasis er produksjonsoverskudd på flygeaske.

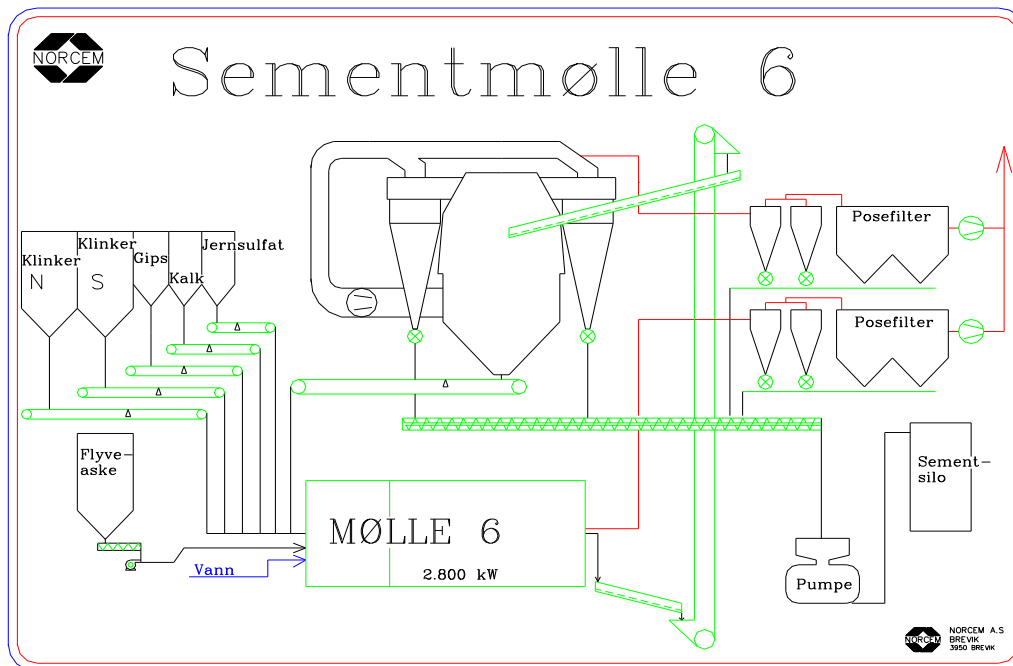
Med tanke på flygeaskens kornstørrelsefordeling, gjøres det ikke systematiske målinger på Norcem. I tabell 4.3 finnes kornfordelingsverdier for henholdsvis 1 flygeaskeprøve, og 1 prøve med Norcem Standard FA. Disse verdiene er dermed ikke representativ for Norcems import og produksjon, men er tatt med for å gi en pekepinn over kornstørrelsesfordelingene. Det opplyses fra Norcem at kornfordelingskurvene for flygeaske har relativt stor variasjon [22].

	Kornstørrelse (µm)	% < 10 µm	% < 20 µm	% < 30 µm	% < 45 µm
Flygeaske	1-100	41,3	65,3	80,2	92,0
Norcem Standard FA	1-80	48,2	73,8	87,6	96,5

Tabell 4.3: Kornfordeling for 1 flygeaskeprøve og en prøve med standard FA [2]

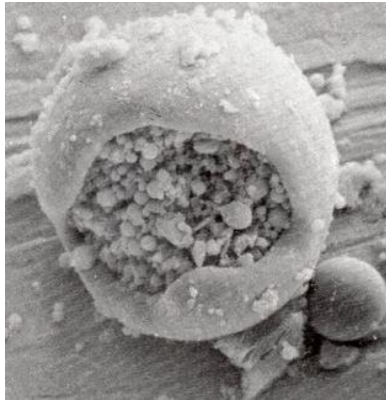
Det er i følge litteraturen spesielt kornfraksjonene under 10 µm som er av betydning for flygeaskens pozzolane egenskaper. Prøven som her foreligger, viser at omtrent 40 % av flygeaskekornene har denne fraksjonen eller mindre. Over 90 % av partiklene er under 45 µm.

Lavkarbonsementen produseres ved at flygeaske males sammen med klinker, gips og kalksteinsmel i sementmølle til 472 m²/kg (Blaine). Denne mølla består av et hovedkammer og et finkammer. Hovedkammeret inneholder stålkuler på opptil 100 mm, mens finkammeret inneholder mindre kuler. Materialene knuses i den roterende mølla, før de løftes av en elevator, og siktes i en vindsikte. Her siktes ferdigmalt sement ut til lagersilo, mens grove partikler returneres til mølla inntil de har oppnådd ønsket finhet [44].

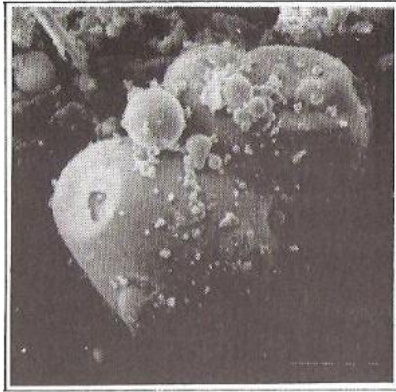


Figur 4.3: Prinsskisse av en del av sementproduksjonen på Norcem [2]

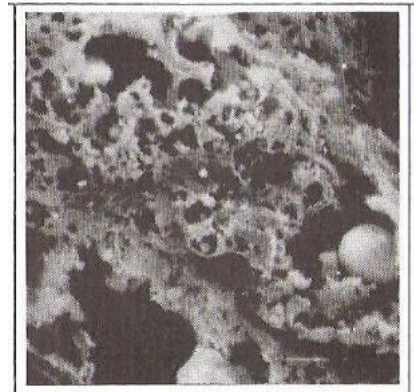
Flygeaske leveres med finhet 380 m²/kg, og nedmaling gjør at korn som henger sammen brytes fra hverandre. Hule flygeaskepartikler, som inneholder mindre flygeaskepartikler vil også løse seg opp og bidra til høyere finhet. I litteraturstudiet fremkom det at fine materialer løser seg opp hurtigere og reagere forttere under hydratasjon, og øker dens reaktivitet. Forfinelse av flygeasken og sementen er derfor viktig for hydratasjonsraten. Lavkarbonsementens finhet er høyere enn standardsement (370 m²/kg), men lavere enn Norcem industrisement som har Blaine finhet 550 m²/kg.



Figur 4.4: Hult FA-korn som inneholder mindre Flygeaskekorn. SEM, Ukjent forstørrelse [7]



Figur 4.5: Flygeaskekorn som henger sammen, samt mindre FA-korn festet på overflaten. SEM, 500x forstørret [7]



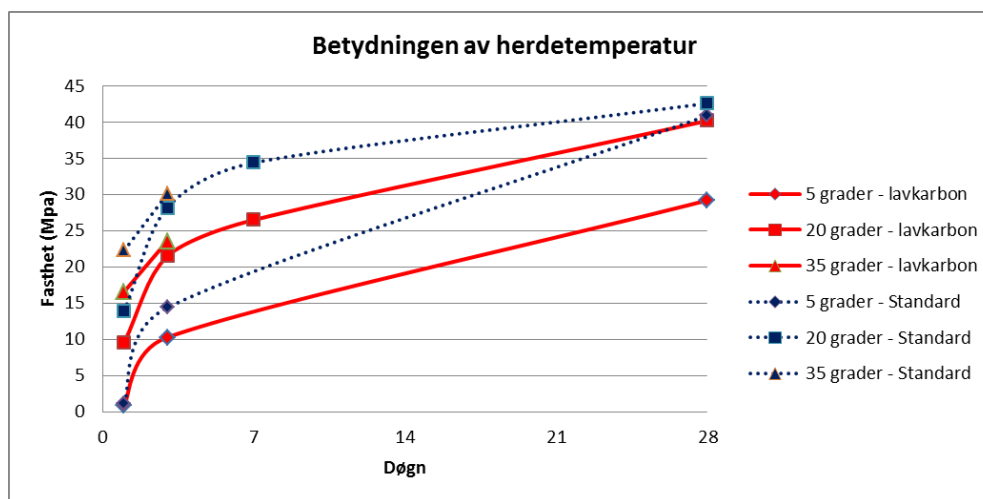
Figur 4.6: Rester av ubrent karbon, med mange små FA-korn på overflaten. SEM, 1000x forstørret [7]

Som et ledd i dokumentasjonsarbeidet for denne sementen, gjennomføres det på oppdrag fra Norcem bestandighetsforsøk for lavkarbonsementen hos SINTEF byggforsk. Det er i følge Knut Kjellsen ved Norcem FoU, karbonatiseringsmotstanden som er den kritiske faktor med tanke på bestandighet [22]. Akselerert karbonatiseringstest viser at masseforhold på 0,53 er nødvendig for å oppnå tilfredsstillende karbonatiseringsmotstand. Det gjennomføres også en langtidsprøving med naturlig karbonatisering, der det er forventet av 0,54 vil være tilfredsstillende masseforhold. Dette er bakgrunnen for at masseforholdet er valgt til 0,54 for betongen som er benyttet på Åstadryggen. Forsøk fra SINTEF har vist at frostbestandighet for denne sementen er tilfredsstillende [22].

Fordi det ikke eksisterer bruksregler for denne sementen i bestandighetsklasse M60, har byggherren i samarbeid med rådgivende ingeniør påtatt seg dokumentasjonsansvaret for bruken av den. Siden karbonatiseringsmotstanden enda ikke er fullstendig kartlagt, har byggherren godtatt denne usikkerheten. Det er anledning til å gå ut over Norsk Standards bestemmelser, men det kreves da dokumentasjon på at den valgte løsningen er like god som foreskrevet i Norsk Standard. Norcem har derfor fremlagt byggherren nødvendig dokumentasjon for at sementen er trygg å bruke. Norcem har ønsket at Norsk Standard skal åpne for at prøver med alder 56 eller 91 døgns fasthet skal kunne benyttes som dimensjonerende fasthet. Dette ønsket har bakgrunn i forsøk som viser at betong med denne sementen når kravet til karakteristisk fasthet, men på et senere tidspunkt. Disse forsøkene viser også at lavkarbonbetong overgår normalbetong på ultimat styrke. Norsk Standard ønsker ikke å innføre en slik bestemmelse, og man er derfor nødt til å forholde seg til de eksisterende regler. Den eneste måten man kan benytte seg av denne sementen på, blir dermed å gå utenom Norsk Standard og dokumentere betonegenskapene [22].

Svaret på spørsmålet om lavkarbonsementen er egner til bruk med dagens regelverk, blir dermed noe nyansert. Regelverket (Norsk Standard) tillater at andre kriterier enn Norsk Standard legges til grunn, men dokumentasjonsansvaret faller da på byggherre og rådgivende ingeniør. Lavkarbonbetongen er derfor egnet til bruk med dagens regelverk, samtidig som bruk av sementen på nåværende tidspunkt gir byggherren dokumentasjonsansvar for betongens egnethet.

Tabell 4.4, og grafer i figur 4.7, viser betydningen av herdetemperatur for lavkarbonbetongen og Norcem Standard Portland sement (CEM I), ved henholdsvis 5, 20 og 35 °C. Grafene som er heltrukket representerer standardsementen, mens de stiplede linjene representerer lavkarbonsement. Dataene er hentet fra Norcem FoU.



Figur 4.7: Betydning av herdetemperatur for lavkarbonsement og referansesement

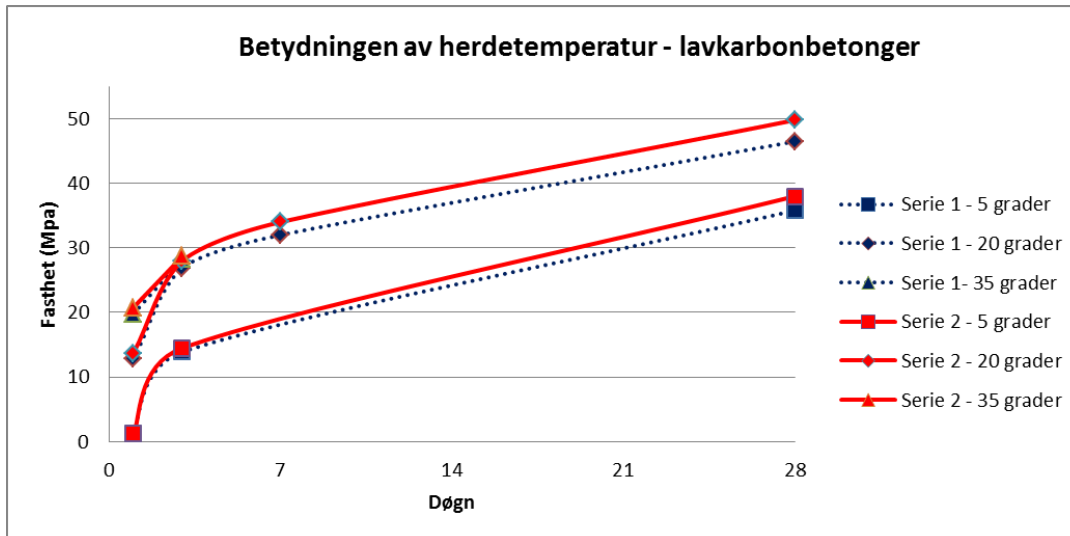
Sement type	Klasse	SP - SKY 552	% TSS	v/c	Luft %	Trykkfasthet (Mpa)								
						5 °C, døgn			20 °C, døgn				35 °C, døgn	
						1	3	28	1	3	7	28	1	3
Lavkarbon	B30/M60	1,76	0,54	0,60	1,1	0,9	10,3	29,2	9,6	21,5	26,5	40,2	16,6	23,6
Standard	B30/M60	1,31	0,40	0,60	1,6	1,2	14,4	40,9	13,9	28,2	34,4	42,6	22,3	30,1

Tabell 4.4: Betydningen av herdetemperatur for lavkarbonsement og referansesement [2]

Figur 4.7 viser kun 1 serie med henholdsvis lavkarbon og standardbetong, og det er derfor ikke mulig å konkludere på generelt grunnlag om hva betydning av herdetemperatur har for de to betongene. Figuren kan likevel gi en indikasjon på virkningen av herdetemperatur.

For herdetemperaturene 20 og 35 °C ser det ikke ut som om temperaturen gjør utslag på forholdet mellom fasthetsutviklingene. For herdetemperatur på 5 °C følger ikke kurvene til lavkarbon- og standardbetongen hverandre like god som ved 20 og 35 °C. Dette kan indikere at lave herdetemperaturer har større effekt på fasthetsutviklingen for lavkarbonbetong enn

standardbetong, men det statistiske grunnlaget er for lite til at det kan konkluderes. På dette området mangler det systematisk data som kan danne sammenlikningsgrunnlag, og det er behov for videre arbeid. Figur 4.8 viser kurver for 2 andre serier med lavkarbonbetonger som har v/c tall på henholdsvis 0,55 og 0,53. Dataene er hentet fra Norcem FoU.



Figur 4.8: Betydningen av herdetemperatur - lavkarbonbetonger

Serie	Sement type	Klasse	SP - SKY 552	% TSS	v/c	Luft %	Trykkfasthet (Mpa)								
							5 °C, døgn			20 °C, døgn			35 °C, døgn		
							1	3	28	1	3	7	28	1	3
Serie 1	Lavkarbon	B30/M60	1,80	0,54	0,55	1,3	1,3	13,9	35,8	12,8	26,9	32,0	46,5	19,8	28,3
Serie 2	Lavkarbon	B30/M60	1,85	0,54	0,53	1,6	1,2	14,5	38,0	13,7	28,0	34,0	49,8	20,8	28,7

Tabell 4.5: Betydningen av herdetemperatur - lavkarbonbetonger [2]

Grafene i figur 4.8 viser at herdetemperaturen har stor betydning for fasthetsutviklingen til denne sementen. Det vises for øvrig til figur 2.5 i kapittel 2, for flere forsøksresultater med flygeaskebetong som har herdet ved ulike temperaturer. Herdetemperatur blir et tema under diskusjon av feilkilder i kapittel 5.4.7.

I litteraturstudiet ble flygeaskebetongs lave varmeutvikling trukket frem som en fordel. Dette er imidlertid tilfellet for massive konstruksjoner og for støping i varmt klima. Ved støp av slanke konstruksjoner i kaldt klima er utfordringen i større grad å holde på varmen for å sikre fasthetsutvikling. Flygeaskebetongens lave varmeutvikling kan derfor være positiv ved varmt klima, men er i større grad en utfordring på vinterstid.

Det er vanlig praksis å blande inn kalksteinsmel i betong for å øke finstoffinnholdet. I litteraturstudiet har det gjennom Klaartje De Weerdt sitt doktorgradsarbeid fremkommet at tilsetningen av kalksteinsmel forbedrer tidligfastheten i flygeaskebetong. Denne effekten er ivaretatt ved at lavkarbonsementen er tilsatt 4 % kalksteinsmel, noe som spesielt er en

fordel når sementen benyttes i kaldt klima. Litteraturstudiet har også vist at flygeaskens vannreducerende effekt er bedre dersom sement, gips og flygeaske er malt sammen, enn om bare flygeaske og sement blandes sammen.

Det er i litteraturstudiet presentert ytterligere momenter, som på grunn av kapasitet og manglende data ikke er dekket gjennom forsøkene på Åstadryggen. De er likevel regnet for relevante som underlagsmateriale, for forståelse av flygeaskens betydning i fersk og herdet betong.

5 Resultater og diskusjon

For resultater fra prøvetakingen på Åstadryggen refereres det til vedlegg B. Det refereres til vedlegg A for prøvemetoder.

5.1 Bearbeidelighet - Slump

Slumpen er et mål for betongens bearbeidelighet, og måler betongens evne til å flyte ut. Dette har innvirkning på tidsbruk for utstøping og komprimering. Det kan imidlertid være vanskelig å trekke konklusjoner om betongens egnethet ut i fra slumpmålinger, fordi denne bestemmes av proporsjonering. De presenterte slumpmålingene blir dermed et parameter som er med på å underbygge og forklare tidsbruken ved bruk av denne betongen på byggeplass. Slumpmålingene kan dermed bidra med å besvare om det er forskjell i tidsbruk for å komprimere lavkarbonbetongen og referansebetongen.

Tabell 5.1 viser de målte slumpverdier, og hvor mange ganger en verdi har forekommet i løpet av prøveuttakene. Prosentkolonnen angir hvor stor prosentandel antallet utgjør av summen. Disse målingene viser at det kun i 3, av til sammen 37 serier er registrert lavere slump enn det som er bestilt. Dette betyr at det i 92 % prosent av tilfellene er målt slump som bestilt, eller høyere. For lavkarbonbetongen isolert er det registret lavere slump enn bestilt i 2 av 32 tilfeller, og det er målt slump som tilsvarer eller er høyere enn bestillingen i 94 % av tilfellene. NS-EN 206-1 [19] tillater slumpavvik på ± 30 mm for betong som har tilsiktet slumpverdi over 100 mm. Når man tar hensyn til dette ligger alle slump-målingene innenfor produksjonens godkjenningsskriteriets nedre del (-30mm). Det er i praksis dette kriteriet som har hatt mest betydning for dette byggeprosjektet, fordi betong med høyere slump har vært en fordel med tanke på bearbeidelighet og tidsbruk for tilstrekkelig kompaktering [45]. Både median og gjennomsnitt viser at den målte slumpen har ligget over det som var bestilt for alle betongsammensetninger.

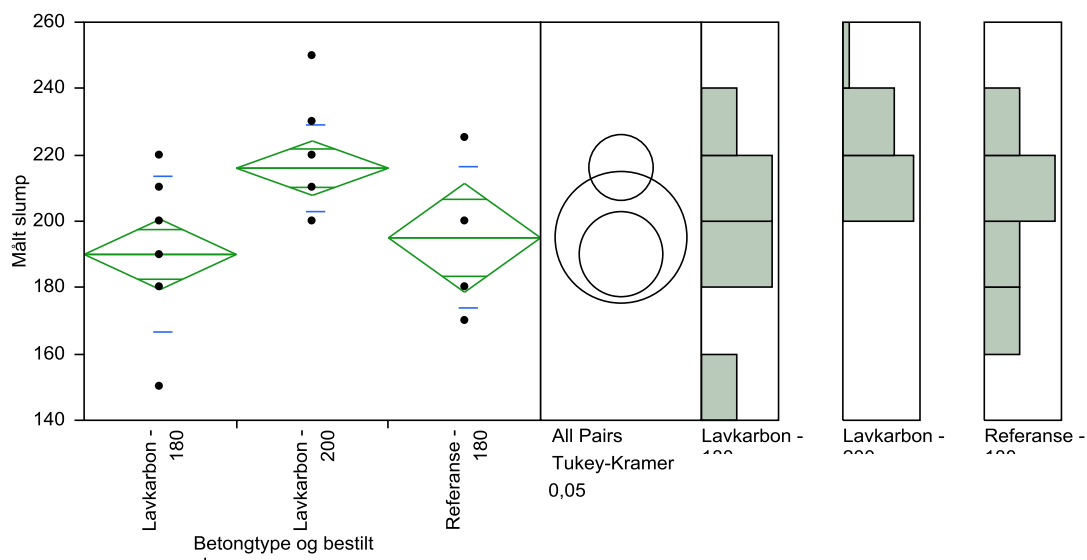
Bestilt slump: 200 - Lavkarbonbetong			Bestilt slump: 180 - Lavkarbonbetong			Bestilt slump: 180 - Referansebetong		
Målt slump	Antall	Prosentandel %	Målt slump	Antall	Prosentandel %	Målt slump	Antall	Prosentandel %
200	4	20	150	2	17	170	1	20
210	7	35	180	3	25	180	1	20
220	4	20	190	1	8	200	2	40
230	4	20	200	3	25	220	1	20
250	1	5	210	1	8	Sum:	5	100
Sum:	20	100	220	2	17	Gjennomsnitt:	194	
			Sum:	12	100	Median:	200	
Gjennomsnitt:	216		Gjennomsnitt:	190				
Median:	210		Median:	195				

Tabell 5.1: Betongens målte slump, og hvor mange ganger den har forekommet gjennom testperiodene

Den første støpen ble i periode 1 bestilt med slump 180, men det ble målt 150 på byggeplass. Dette var en betong som var seig og treg, og det førte til at arbeidet med å få betongen ut i formen tok lengre tid enn forventet. Arbeiderne synes det var slitsomt å jobbe med denne betongen fordi det var tungt å dytte ned skjøtejern, og arbeide med vibratoren i den seige massen. Det kom også opp lite luftbobler, og det var vanskelig å si om betongen var vibrert godt nok.

Fordi byggeplassledelsen ikke hadde erfaring med bruk av denne typen betong, ble det på bakgrunn av erfaringene fra denne første støpedagen bestilt slump 200 for resten av denne støpeperioden, for å være på den sikre siden. Fra betongprodusenten koster det ekstra å bestille slump over 180, så anlegget på Åstadryggen bruker normalt slump 180 på all betong. De videre erfaringene fra denne perioden viste at betongen holdt tilfredsstillende slump, og det ble derfor bestilt slump 180 fra og med periode 2. Erfaringene fra denne perioden var at Unicon leverte betong med slump som bestilt eller høyere, og det var derfor ikke nødvendig å beregne ekstra kostnad til høyere slump.

For å se om det er forskjell på gruppegjennomsnittet til lavkarbonbetongen og referansebetongen med bestilt slump 180, er det gjennomført variansanalyse med statistikkprogrammet JMP® 9.0.0. Lavkarbonbetongen med bestilt slump 200 er tatt med som kontrollgruppe.



Figur 5.1: Variansanalyse - slump for referansebetong og lavkarbonbetong

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Betongtype og bestilt slump	2	5617,297	2808,65	8,6186	0,0009*
Error	34	11080,000	325,88		
C. Total	36	16697,297			

Tabell 5.2: Variansanalyse - slump for referansebetong og lavkarbonbetong

Means and Std Deviations

Level	Number	Mean	Std Dev	Std Err Mean	Lower 95%	Upper 95%
Lavkarbon - 180	12	190,000	23,3550	6,7420	175,16	204,84
Lavkarbon - 200	20	216,000	13,1389	2,9380	209,85	222,15
Referanse - 180	5	195,000	21,2132	9,4868	168,66	221,34

Tabell 5.3: Gjennomsnitt og standardavvik, variansanalyse for slumpmålinger

Comparisons of all pairs using Tukey-Kramer HSD

	q*	Alpha			
	2,45044	0,05			
Abs(Dif)-HSD	Lavkarbon - 200	Referanse - 180	Lavkarbon - 180		
Lavkarbon - 200	-13,989	-1,118	9,847		
Referanse - 180	-1,118	-27,977	-18,546		
Lavkarbon - 180	9,847	-18,546	-18,059		

Tabell 5.4: Tukey-Kramer HSD test, variansanalyse for slumpmålinger

P verdien (prob >F) viser at det med 5 % signifikansnivå ($0,0009 < 0,05$) er signifikante statistiske forskjeller mellom minst et par av gjennomsnittsverdiene. Tukey-Kramer HSD testen viser at det er lavkarbonbetongene med bestilt slump 180 og 200 som er signifikant forskjellige. Dette fremgår av tabell 5.4, der positive verdier viser gjennomsnitt som er signifikant forskjellige. Null-hypotesen om at det i virkeligheten ikke eksisterer forskjeller på gruppene kan dermed forkastes. Denne forskjellen ligger imidlertid mellom lavkarbonbetongene. Det er ikke signifikante forskjeller mellom gruppegjennomsnittene til referansebetongen og lavkarbonbetongen med bestilt slump 180. Lavkarbonbetongens slump skiller seg derfor ikke signifikant fra referansebetong med tilsvarende bestilt slump.

Lavkarbonbetongen har også vært benyttet i 2 andre prosjekter i 2010. Erfaringene fra disse prosjektene tilsier at betongen oppfører seg ganske likt som normalbetong med hensyn på bearbeidlighet. Dette er også den generelle erfaringen fra arbeidet med lavkarbonbetongen på Åstadryggen.

Innholdet av flygeaske gjør at lavkarbonbetong kan oppleves som noe stivere enn referansebetong med tilsvarende slump. Dette er imidlertid ikke noe problem fordi betong med slump ≥ 180 responderer bra på vibrator. Forsøkene fra Åstadyggen viser at det i praksis ikke er forskjell på tidsbruk til komprimering for lavkarbon- og referansebetongen for betonger med slump ≥ 180 . Ved slump 150 responderer ikke lavkarbonbetongen like bra på vibrator, og den blir tung å jobbe med. Det er i periodene ikke målt slump på 160 og 170 for lavkarbonbetongen, så det finnes ikke erfaringsdata for disse verdiene. På bakgrunn av dette forsøket kan det derfor konkluderes med at denne betongsammensetningen ikke er egnet til bruk med slump 150. Det er ikke gjort forsøk for å teste om lavkarbonbetong med slump 150 har dårligere bearbeidelighet enn standardbetong med tilsvarende slump. Slump på 150 er imidlertid innenfor produksjonens nedre godkjennelseskriterie (-30mm), og man kan derfor risikere at dette er slumpen man får levert på byggeplass når det bestilles slump 180. Dette har ikke vært et problem på Åstadyggen, fordi slumpen i all hovedsak har ligget på den bestilte verdi eller høyere.

Av egne erfaringer med de to betongene oppleves lavkarbonbetongen som noe seigere/stivere enn normalbetongen. Dersom man drar spaden gjennom en trillebår med lavkarbonbetong, trekkes betongen rundt spaden med. Gjøres det samme med referansebetongen, får man i større grad bare med seg det man setter spaden i. Årsaken til dette er det høye finstoffinnholdet som sørger for høy kohesjon i den ferske betongen. Det rapporteres i litteraturen [27] at flygeaskebetong med høy finstoffandel kan bli seig og vanskelig å bearbeide, noe som også er erfaringen for betongene målt til slump 150 på Åstadyggen.

Det ble i innledningen av oppgaven fremsatt en tese om at flygeaskebetongen har bedre eller tilsvarende bearbeidelighet som referansebetong. Fra dette forsøket kan det konkluderes at den benyttede lavkarbonbetongen har like god, eller bedre, bearbeidelighet som referansebetongen med slump ≥ 180 . Denne konklusjonen baserer seg på større datagrunnlag enn seriene som er tatt ut for referansebetongen.



Lavkarbonbetong til venstre og normalbetong til høyre. Når det arbeides med betongene er det mulig å se på lavkarbonbetongen at den er rik på finstoff.

Figur 5.2: Finstoff - Lavkarbonbetong og referansebetong [1]

Slumpen bestemmes av proporsjonering, og slump-testen representerer også bare en del av betongens reologi. Det kunne derfor vært benyttet supplerende former for fersk betongtester, men dette er ikke gjennomført på grunn av kapasitet. Slump-testen ble valgt fordi den er enkel og lite tidkrevende å gjennomføre.

Det kan derfor være interessant å gjøre noen observasjoner omkring betongenes resepter. Faktorer som i hovedsak påvirker betongens slump er pastamengden, P, SP, L- stoff, tilslaget overflatestruktur, pozzolaner og stein/sand- forholdet. Nedenfor er reseptene for de tre betongene vist, og det er foretatt en sammenlikning mellom lavkarbonbetongen og referansebetongen med slump 180. Disse observasjonene fører ikke til konklusjoner, men er i større grad til opplysning.

Betongtype	Lavkarbon B25	Lavkarbon B25	Std Aalborg B30
Slump	200	180	180
V/C	0,54	0,54	0,59
Luftinnhold (%)	2,0	2,0	3,5
SP type	Glenium SKY 552	Glenium SKY 552	Glenium 151
Romvekt (g)	2385	2385	2361

Resept for 1m³ målt i kg

Sement	337	328	300
P	0,67	0,66	0,90
SP	1,69	1,64	1,92
0-8 Kilemoen	504	509,9	501
0-8 Kilemoen II	504	509,9	593
11-16 mm Steinskogen	215	217,1	297
16-22 mm Steinskogen	642	648,9	493
Vann	182	176,9	176,9

Totalt

Sand	1008	1020	1094
Stein	857	866	790
Sand + Stein	1865	1886	1884
% Sand	54	54	58
% Stein	46	46	42

Kontroll

Vann	182,0	176,9	176,9
Sement	337	328	300
V/C	0,54	0,54	0,59

Tabell 5.5: Resepter [46]

Observasjoner:

Referansebetongen har stein/sand- forhold på 42/58, mens dette forholdet er 46/54 for lavkarbonbetongen. Økt stein/sand. forhold gir økt mobilitet. Det er ikke innblandet silika i referansebetongen, og det er derfor sannsynlig at det er kompensert med økt sandmengde for å oppnå tilstrekkelig mengde finstoff [43].

Referansebetongen har 0,24 liter mer P-stoff per m³, og 0,28 liter mer SP-stoff per m³ enn lavkarbonbetongen. Mer sand i referansebetongen gir større behov for tilsetningsstoffer for å oppnå tilsvarende bearbeidighet. Grunnen til dette er at sandinnholdet gir større totalt areal som skal omslutes [43].

Lavkarbonbetongen inneholder $328 \cdot 0,29 = 95,1$ kg flygeaske pr m³. Malhotra og Mehta [12] skriver at innblanding av flygeaske ved et fastsatt $v/(c+FA)$ - forhold ikke alltid øker slumpen. Litteraturstudiet har vist at dette er avhengig av flygeaskens kvalitet. Det mangler systematisk data og forsøk som kan avgjøre om den benyttede flygeasken gir økt slump ved et gitt $v/(c+FA)$.

Betongene med slump 180 har tilsvarende vannmengder, men lavkarbonbetongen har større andel sement, og får dermed lavere v/c - forhold.

Tilslaget til de ulike betongene stammer fra samme kilder, og vil derfor i stor grad ha like egenskaper. Eventuelle variasjoner fanges ikke opp her.

En feilkilde ved proporsjonering er tilslagets vanninnhold. Dersom det er mer vann i tilslaget enn det som er beregnet, økes v/c - forholdet, som er direkte proporsjonal med betongens fasthet. Dette vil også øke slumpen.

5.2 Betongtemperatur, værdata og fremdrift på byggeplass

Betongtemperatur er et viktig parameter for fasthetsutvikling det første døgnet. Tabell 5.6 viser hvor mange av seriene som har hatt en gitt temperatur. Det er i denne tabellen avrundet til nærmeste hele grad. Årsaken til at det i perioder ikke har vært bestilt temperatur på betonger, er at blandverket i Sandvika ikke begynner å bruke oppvarmet blandevann før 1. november på høsten. Betongen har i følge FABEKOs alminnelige salgs og leveringsbetingelser [47] tillatt avvik på $-3/+5$ °C på bestilt temperatur levert på byggeplass. Det er bransjenorm at betong som ikke er bestilt med temperatur skal holde minst 15 °C [43].

Målte betongtemperaturer har i hele testperiodene vært lavere enn det som har vært bestilt, og har kun ligget innenfor FABEKOs leveringskriterier i 35 % av tilfellene det er bestilt temperatur på betongen.

Bestilt temperatur: 22 °C		
Målt temperatur °C	Antall	Prosentandel %
14	1	5
15	2	10
16	1	5
17	2	10
18	7	35
19	3	15
20	4	20
Sum:	20	100

Gjennomsnitt:	18
Median:	18

Ingen bestilt temperatur		
Målt temperatur °C	Antall	Prosentandel %
15	5	33
16	2	13
17	2	13
18	1	7
20	4	27
21	1	7
Sum:	15	100

Gjennomsnitt:	17
Median:	17

Tabell 5.6: Betongens målte temperatur, og hvor mange ganger den har forekommet gjennom testperiodene

Justering av betongtemperatur er et av de billigste tiltakene man kan gjennomføre for å sikre tilstrekkelig fasthetsutvikling det første døgnet [48]. Økte temperaturer gir økt reaksjonshastighet og hurtigere avbinding, og øker sannsynligheten for at forskalingen kan rives på ønsket tidspunkt. Veidekke entreprenør bruker 5 Mpa som rettesnor for når veggforskaling med standard etasjehøyde kan rives. Når veggen har denne fastheten kan det forventes at betongen tåler påkjenningen ved riving [19]. Det er helt avgjørende at betongen ikke fryser før denne fastheten er oppnådd, ellers vil betongen kunne ødelegges av porevann som utvider seg. I perioder med kaldt vær, er det sammen med fyring rundt forskalingen og tildekking av betongen, nødvendig å bestille oppvarmet betong for å opprettholde fremdriften.

For opplysninger om døgntemperaturer (middel, maks, min), og vindhastigheter (middel og maks) på dagene med støping, refereres det til vedlegg B.5.

Rutinen på Åstadryggen har vært å støpe klokken 14:00 på ettermiddagen, og så rive forskalingen neste morgen. Etter riving klargjøres forskalingen igjen til støping på ettermiddagen, og det er derfor viktig at betongen er sterk nok til å rives om morgenen. Oppvarming av betongen er et billig tiltak som bidrar til dette.

Betongtemperaturen har i gjennomsnitt ligget 4 grader under bestilt temperatur. Det er gjennomført simuleringer i herdeteknologiprogrammet Hett97 for å vise hvordan betongtemperaturen spiller inn på fasthetsutviklingen. Resepten for lavkarbonsementen eksisterer ikke i Hett97, så det er benyttet resept for Norcem std FA. Det er også benyttet B30 i simuleringen fordi B25 ikke er tilgjengelig i Hett97. De andre verdiene er tilsvarende som for forholdene på Åstadryggen.

Forutsetninger:

Sementtype:	Std. FA B30-M60 0,5% P
Sementinnhold:	337 kg/m ³
28 døgns trykkfasthet:	37 Mpa
Veggtykkelse:	200 mm
Forskaling:	19 mm finer
Vindstyrke:	1 m/s
Simuleringstid	16 timer (15:00 – 07:00)
Ingen ekstra oppvarming	

Simulerte fastheter ved ulike lufttemperaturer:

0°C lufttemperatur:

Betongtemperatur (°C)	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Trykkfasthet (Mpa)	2,8	3,6	4,4	5,2	6,3	7,4	8,4	9,4	10,4
% oppnådd fasthet*	27	35	42	50	61	71	81	90	100

±5 °C lufttemperatur:

Betongtemperatur (°C)	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Trykkfasthet (Mpa)	1,6	2,1	2,7	3,5	4,4	5,2	6,3	7,4	8,4
% oppnådd fasthet*	19	25	32	42	52	62	75	88	100

±10 °C lufttemperatur:

Betongtemperatur (°C)	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Trykkfasthet (Mpa)	0,7	1,1	1,6	2,1	2,7	3,5	4,4	5,3	6,3
% oppnådd fasthet*	11	17	25	33	43	56	70	84	100

* % av beregnet oppnådd fasthet dersom betong var levert med bestilt temperatur på 22°C

Tabell 5.7: Simulert 16 timers fasthet ved ulike betongtemperaturer i Hett97

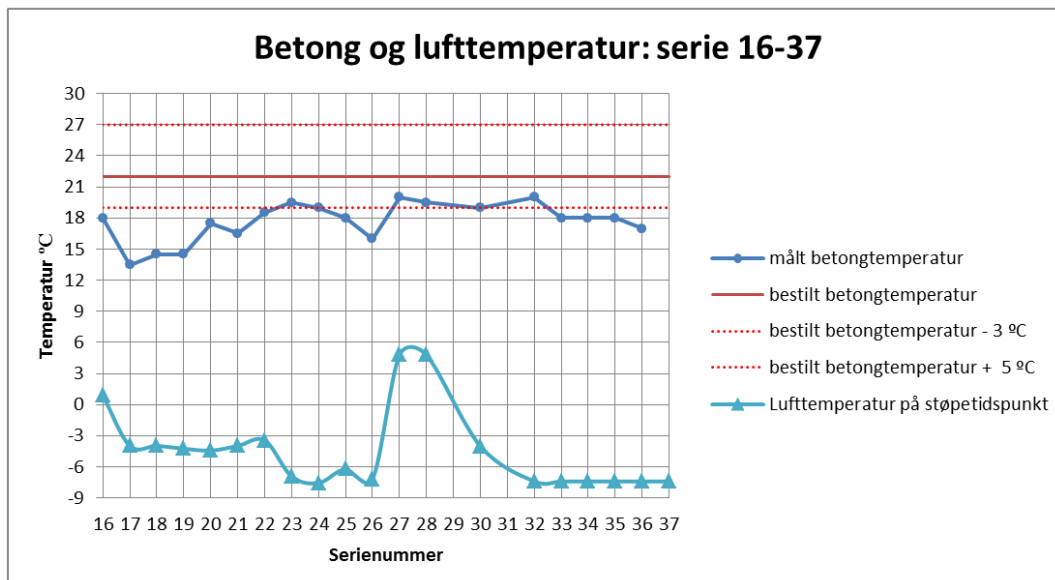
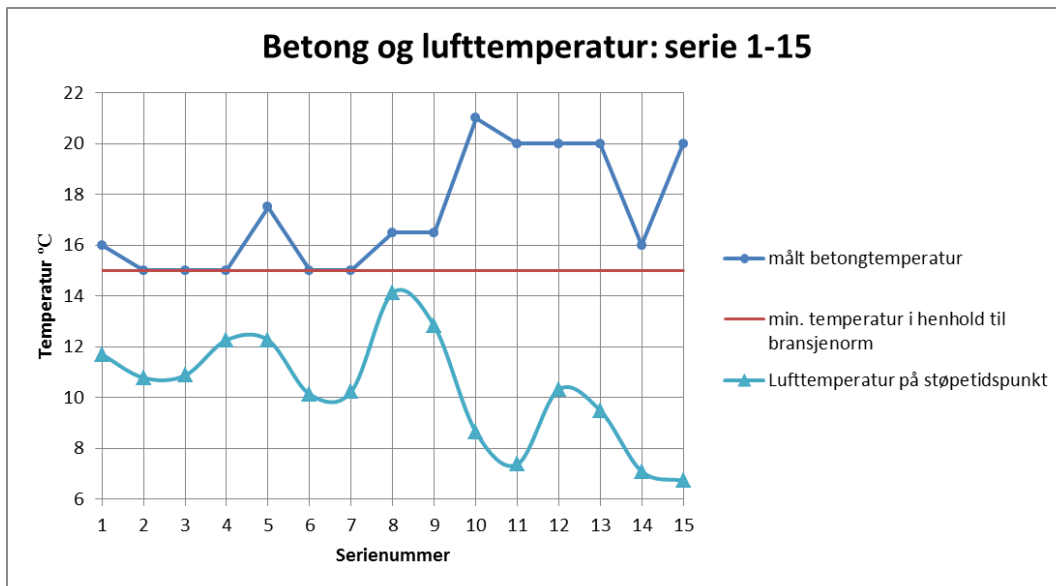
Resultatene fra simuleringene viser hvor viktig betongtemperaturen er for fasthetsutviklingen det første døgnet. Et eksempel som belyser dette er forsøk fra Åstadryggen den 18.oktober 2010. Middelttemperaturen denne dagen var -5 grader, og det skulle støpes med både lavkarbonbetong og referansebetong. Målt betongtemperatur på et av lassene var 13,5 °C, mens bestilt temperatur var 22 °C. Simuleringene viser at dersom det ikke hadde blitt innført oppvarmingstiltak av forskaling, ville denne veggen oppnådd mindre enn 20 % av fastheten den ville hatt om betongen hadde holdt bestilt temperatur. Konsekvensen av den lave betongtemperaturen førte til at både referansebetongen og lavkarbonbetongene ble stående med oppvarming flere timer enn planlagt. Simuleringen er gjennomført med std FA sement, som inneholder 20 % flygeaske, og ville antageligvis vist enda større effekt på fasthetsutviklingen til lavkarbonbetongen, fordi den inneholder enda mindre sement.

Før støping med lavkarbonbetongen begynte, var det et usikkerhetsmoment om man ville være i stand til å rive forskalingen neste morgen, og dermed opprettholde fremdriftsrutinen. Resultatene fra testperiodene viser at det ikke er registrert forsinkelser og økt tidsbruk ved bruk av flygeaskebetongen på Åstadryggen. Det har altså vært mulig å rive forskalingen på tilsvarende måte som med bruk av normalbetong.

For å oppnå dette, har det i periodene med minusgrader vært benyttet følgende herdetiltak: oppvarming og tildekking av forskaling, samt bruk av oppvarmet betong. De benyttede herdetiltak er i tråd med hva byggeplassledelsen normalt ville velge å gjennomføre for tilsvarende veggstøp under vinterdrift. Byggeplassledelsen har ikke inntrykk av at det er benyttet mer oppvarming på Åstadryggenprosjektet enn på andre tilsvarende byggeprosjekter under vinterdrift [49]. Hvilke herdetiltak man benytter under ulike værforhold avgjøres på bakgrunn av erfaring og/eller datasimuleringsprogram som Hett 97. Slike tiltak koster penger, og omfanget av disse blir naturligvis en viktig faktor i avgjørelsen om man velger å benytte denne sementen på vinterstid eller ikke.

Forsøkene på Åstadryggen indikerer at det ikke er forskjell på oppvarmingsbehovet til lavkarbonbetongen og referansebetongen ved temperaturer ned mot -8/10 °C. I periode 1 ble det ikke benyttet oppvarming på verken lavkarbonbetongen eller referansebetongen. Det ble benyttet oppvarming i hele periode 2-4, og det ble ikke gjort forskjell på oppvarmingen av de to betongene. Det ser altså ut til at fremdriften ikke blir berørt når det gjennomføres samme tiltak for referansebetongen og lavkarbonbetongen ned mot -8/10 °C. Ved støping under -8/10 grader indikeres det at det er behov for mer oppvarming av lavkarbonbetongen for å opprettholde fremdrift. Denne grensen er ikke eksakt, men er satt på bakgrunn av personlige vurderinger fra byggeplassledelsen. For å finne en grense som er basert på målinger, bør det settes opp kontrollerte forsøk som ikke er avhengig av fremdriften på byggeplass. På dette området er det behov for videre arbeid.

Figur 5.3 viser at betongen fra serie 1-15 er levert med temperatur i henhold til bransjenorm. For serie 16-37 ligger kun 6 av 19 leveranser innenfor leveringskriteriet på $22\text{ }^{\circ}\text{C} -3/+5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Det tidligere nevnte eksempelet fra Åstadryggen og de gjennomførte simuleringene i Hett97 viser hvor viktig betongtemperaturen er for fremdriften på kalde dager. Dette er spesielt viktig for flygeaskebetong, fordi den har mindre sement som bidrar til varmeutvikling og herding. Disse forholdene vil bli videre diskutert under avsnitt 5.5 som omhandler temperaturlogging i vegg.



Figur 5.3: Betong og luft-temperatur

På en byggeplass er ikke rivekriteriet på 5 Mpa et absolutt krav, men riving avgjøres på bakgrunn av erfaring. Når man sammenlikner de to betongene vil normalbetongen som inneholder mer sement naturligvis herde hurtigere. Selv om flygeaskebetongen ikke har oppnådd samme fasthet som normalbetong, betyr ikke det at den ikke er sterk nok til at forskalingen kan rives neste morgen. Resultatene fra dette forsøket viser at forskalingene for begge betongtyper kan rives på ønsket tidspunkt, men det er ikke utført målinger på hvilken fasthet betongene har hatt på dette tidspunktet. Det viser seg altså at betongen er egnet til byggeplassbruk for de gitte vær- og påkjenningene, dette på tross av at betongtemperaturen har vært lavere enn bestilt.

Vindhastighetene som er registrert er svært beskjedne, og kan i all hovedsak karakteriseres som flau vind (0,3–1,5 m/s), med vindkast opp i mot laber bris (5,5–7,9 m/s). Dette gjør at det ikke blir så mye bidrag til den effektive temperaturen. Blåser det eksempelvis 3 m/s vil 0 grader føles som -3 °C, og -5 grader vil føles som -9 °C. Ved vindkast på 6 m/s er den effektive temperaturen ved 0 grader -5 °C, og ved -5 grader vil den være -12 °C [50]. Dette gir ikke veldig store utslag på temperaturen fordi vindhastighetene har vært så lave, men vinden vil selvsagt ha en viss negativ innvirkning fordi den kjøler ned forskalingene.

Betong skal i følge NS-EN 13670 - *Utførelse av betongkonstruksjoner* [51] ikke fryse før den har nådd fasthet på 5 Mpa. Veidekke V-teknikk sin generelle anbefaling for når det skal gjennomføres fyretiltak for støpearbeider er fra -5 °C og nedover. Under denne temperaturen er det av erfaring risiko for at betongen fryser før den har nådd 5 Mpa [48]. Er temperaturen ned mot -20 °C, skal man stille seg spørsmålet om støping i det hele tatt skal gjennomføres, forskaling skal forvarmes, og det skal bestilles temperatur på betongen. Det kan også vurderes om man skal blande inn rapidsement eller øke en fasthetsklasse. I videre arbeid bør det undersøkes hvordan sementen fungerer under -10 °C, og hvordan dette påvirker oppvarmingskostnadene. Det bør også undersøkes hvor grensen går for når fyretiltak må gjennomføres for å sikre tilstrekkelig fasthetsutvikling ved bruk av lavkarbonsementen.



Figur 5.4: Tildekking med duk for innføring av varm luft under duken [1]



Figur 5.5: Gass-aggregat til oppvarming [1]



Figur 5.6: Tildekking med vintermatte [1]

5.3 Luftinnhold og overflatekvalitet

Generelt reduseres 28 døgns fastheten med 5 %, per prosent luft i betong [52]. Det er derfor viktig å få ut den naturlige luften under kompaktering av betongen, noe som gjøres ved hjelp av vibrator. Det naturlige luftinnholdet er dermed av betydning for lavkarbonbetongens egnethet. Tabell 5.8 viser hvilke luftinnhold som er målt, og hvor mange ganger det er forekommet i forsøket.

Luftinnhold - Lavkarbonbetongen			Luftinnhold - Referansebetongen		
Målt luftinnhold %	Antall	Prosentandel %	Målt luftinnhold %	Antall	Prosentandel %
0,6	3	12	2,3	1	25
0,7	5	19	2,6	1	25
0,8	2	8	2,9	1	25
0,9	5	19	4,2	1	25
1,0	4	15	Sum:	4	100
1,1	1	4			
1,4	3	12	Gjennomsnitt:	3,0	
1,5	1	4	Median:	2,8	
2,0	2	8			
Sum:	26	100			

Gjennomsnitt:	1,0
Median:	0,9

Tabell 5.8: Betongens målte luftinnhold, og hvor mange ganger det har forekommet gjennom testperiodene

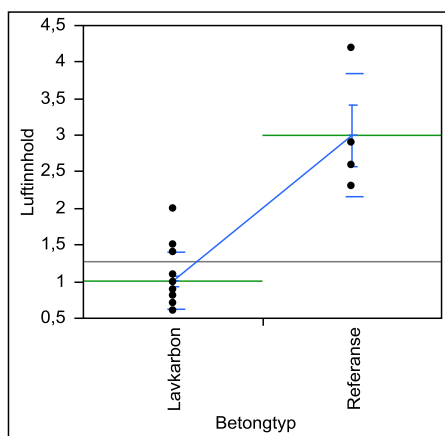
Resultatene viser at lavkarbonbetongen inneholder mindre luft enn referansebetongen, noe som også fremkommer av litteraturen. Innledningsvis ble det satt opp en forventning om at innholdet av mindre naturlig luft skulle tilsa behov for mindre kompakteringsenergi, og dermed behov for kortere vibrasjonstid. Det ble fra byggeplassen imidlertid rapportert at kompaktering tok like lang tid for lavkarbon- og referansebetongen med slump ≥ 180 . Det er likevel ikke fullt ut mulig å forkaste hypotesen om at lavkarbonbetongen krever mindre kompakteringsenergi. Grunnen til dette er at forsøket bygger på erfaringsdata fra intervjuer av arbeiderne. Det er en fare for at arbeiderne kompakterer betongene ut i fra "gammel vane", og av den grunn ikke gjør forskjell på de to betongene. Referansebetongen og flygeaskebetongen har heller ikke samme v/c-forhold og sammensetning, og det er av den grunn vanskelig å trekke sikre konklusjoner. Dersom det skulle være mulig å konkludere i forhold til denne hypotesen, burde det vært gjennomført et mer kontrollert forsøk. Det viste seg i ettertid at forsøk basert på intervjuer ikke ga tilfredsstillende dataunderlag. Det er på dette punktet behov for videre arbeid.

Betongarbeiderne har vært fornøyd med denne betongen, fordi den gir fine og tette overflater. Det ble rapportert at de ikke klarte å oppnå tilsvarende overflater med referansebetongen uansett hvor mye de vibrerte. Det er trolig at dette skyldes lavkarbonbetongens høye finstoffinnhold [43]. Høyt finstoffinnhold gir god filler-effekt, som gjør at hulrommene mellom tilslagspartiklene fylles ut. Unicon beregner at det er 2,0 % luft i lavkarbonbetongen når det gjøres massekontroll, og 3,5 % luft når det gjøres massekontroll for standardbetongen. Resultatene viser at luftinnholdet for lavkarbonbetongen har ligget under de forventede 2 prosent luft i 92% av målingene.

Forsøket viser at lavkarbonbetongen generelt har mindre porer i overflatene. Porer kan skyldes luftlommer, utilstrekkelig mengde finstoff og utilstrekkelig kornfordeling, skitten forskaling, utilfredsstillende kompaktering, eller at det er brukt for mye forskalingsolje som samler støv og skitt. Separasjon av fersk betong kan også gi porer og steinreir. Arbeiderne hadde inntrykk av at lavkarbonbetongen holdt bedre på vannet, noe som gir mindre tendens til steinreir. Lavkarbonbetongen fyller også formene godt ut, og gir pene overganger fra for eksempel vegger til dekker. Det refereres til vedlegg B.6 for bilder.

Vurdering av porer og overflatekvalitet er gjennomført ved innsamling av subjektive meninger, og er ikke målt kvantitativt.

Det er gjennomført en T-test med statistikkprogrammet JMP for å se om det er statistisk signifikant forskjell på luftinnholdet til lavkarbonbetongen og referansebetongen. T-test er en vanlig statistisk metode for å sammenligne kvantitative data, som kan gi svar på om det er signifikante forskjeller på to gruppers gruppegjennomsnitt [53].



Figur 5.7: Spredningsplot - luftinnhold, standardsement og referansesement

T-test

Referanse - Lavkarbon

Difference	1,99231	t Ratio	4,684946
Std Err Dif	0,42526	DF	3,203275
Upper CL Dif	3,29835	Prob > t	0,0159*
Lower CL Dif	0,68626	Prob > t	0,0079*
Confidence	0,95	Prob < t	0,9921

Tabell 5.9: T-test - luftinnhold, standardsement og referansesement

Means and Std Deviations

Level	Number	Mean	Std Dev	Std Err Mean	Lower 95%	Upper 95%
Lavkarbon	26	1,00769	0,389793	0,07644	0,8503	1,1651
Referanse	4	3,00000	0,836660	0,41833	1,6687	4,3313

Tabell 5.10: Gjennomsnitt og standardavvik – luftinnhold, standardsement og referansesement

P-verdien (Prob t) angir sannsynligheten for at vi ville fått disse resultatene helt tilfeldig, med antagelsen om at 0-hypotesen er sann (ingen forskjell mellom gruppegjennomsnittene).

T-verdien er et mål på gruppegjennomsnittet vektet med standardfeilen til forskjellen mellom gruppegjennomsnittene (Std Err Dif). Hvis gruppegjennomsnittene er identiske, er t-verdien 0, og større differansen fra 0, angir mindre sannsynligheten for å få en slik verdi tilfeldig (indikerer en forskjell) [54].

Prob > t viser at det er 0,79 % sjans for å få en t-verdi på 4,68 eller større. Dette viser sannsynligheten for at man tilfeldig ville fått denne differansen mellom gruppegjennomsnittene. Det er altså 99,2% sjans for at man tilfeldig vil få en mindre forskjell i gruppegjennomsnittene. Det kan altså på 95% konfidensnivå konkluderes med at det er signifikant statistisk forskjell mellom gruppegjennomsnittene. Den statistiske testen bekrefter dermed at lavkarbonbetongen inneholder mindre luft enn referansebetongen.

5.4 Fasthetsresultater

Ved presentasjon av fasthetsresultatene er det valgt å dele resultatene opp i 2 deler. Det vil først bli presentert resultater for periode 1 og 2, og deretter resultater for periode 3 og 4. Årsaken til dette er at resultatene fra periode 1 og 2 avviker mye fra forventet fasthetsutvikling, og resultatene fra periodene er derfor behandlet hver for seg.

5.4.1 Periode 1 og 2 - Karakteristisk fasthet

Lavkarbonbetongen

Ved utregning av karakteristisk fasthet etter NS3420, kapittel L [55] er følgende verdier fremkommet:

Karakteristisk fasthet 28 døgn, lavkarbon (B25)	Karakteristisk fasthet 56 døgn, lavkarbon (B25)
$f_{cm} = 34,8$	$f_{cm} = 43,9$
$w = 1,4$	$w = 1,4$
$s = 6,9$	$s = 8,1$
$n = 22$	$n = 22$
$f_{ck} = f_{cm} - w*s = 25,1$	$f_{ck} = f_{cm} - w*s = 32,6$

Tabell 5.11: Karakteristisk fasthet periode 1 og 2

der:

f_{cm} = middelvei av prøvefasthetene

w = jmfør tabell NS 3420, kap L

Antall (n) prøvefastheter	3	4-5	6-10	11-20	>20
w	2,5	2,0	1,7	1,5	1,4

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n-1)}}$$

n = antall prøvefastheter

f_{ck} = karakteristisk fasthet

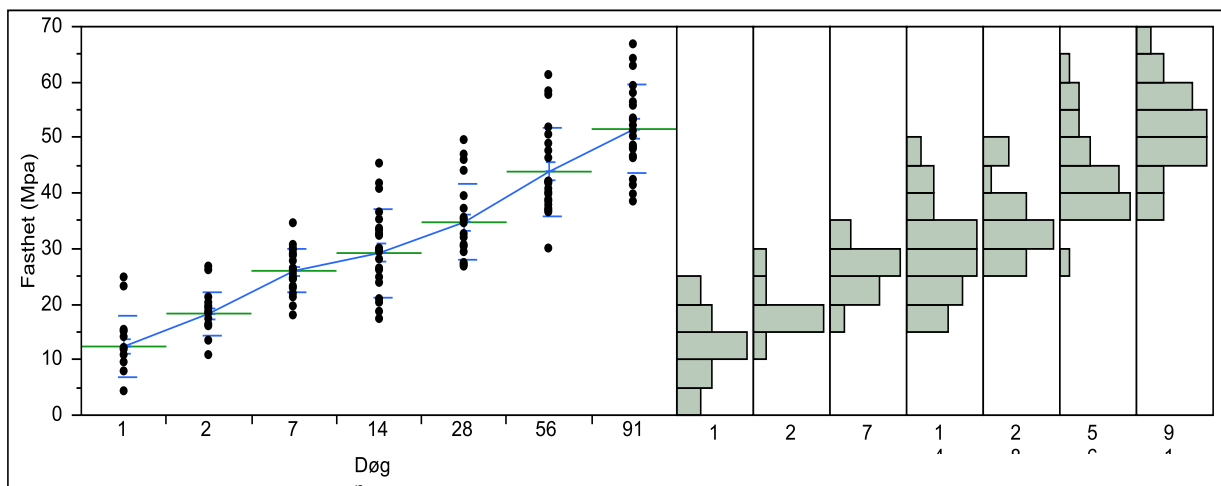
NS 3420 [55] krever at alle 28 døgns terninger skal holde minimum 80% av karakteristiske fasthet. Terningene i dette utvalget holder dette kravet. f_{ck} er imidlertid 25,1 Mpa, og dette er mindre enn kravet på 30 Mpa, og betongen oppnår dermed ikke kravet til karakteristisk fasthet før etter 56 døgn. Årsaken til dette er den store spredningen i datasettet, som gir standardavvik på 6,9. Den største spredningen for at betongen kunne blitt godkjent, er

standardavvik på 2,5. Dette er lavt, og tilsier at også gjennomsnittsfastheten er lav. Betongen når dermed akkurat kravet for å bli karakterisert som B20 ($f_{ck} = 25,1 > 25$ Mpa).

Trykkfasthets-klasse	Minste karakteristiske sylindrefasthet $f_{ck, cyl}$ N/mm ²	Minste karakteristiske terningfasthet $f_{ck, cube}$ N/mm ²
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37

Tabell 5.12: Utdrag fra tabell 7 i NS-EN 206-1 [19]

Unicon angir at standardavviket for deres prøveuttak ligger i området 3-5 [56]. For byggeplassuttak er det i følge Veidekke [24] normalt å ligge på 5-7. Grunnen til at man forventer høyere standardavvik på byggeplass, er at uttaket skjer under mindre kontrollerte forhold, og det ofte er flere personer med noe ulike fremgangsmåter som gjennomfører prøveuttaket. Dette er ikke tilfellet for dette uttaket, og man skulle da kunne forvente at standardavviket ligger rundt 5. Spredningsplottet i figur 5.8, og tilhørende tabell (5.13) viser at standardavviket i hovedsak ligger over dette.



Figur 5.8: Spredning av fasthetsresultater for lavkarbonbetongen - periode 1 og 2

Gruppegjennomsnittet er i figur 5.8 angitt av de lange horisontale linjene. De korte horisontale linjene på opp- og nedsiden av gruppegjennomsnittet, angir ett standardavvik fra gjennomsnittet. Linjen mellom gruppene knytter gruppegjennomsnittene sammen. Histogrammene til venstre viser fordelingen innenfor hver av gruppene.

I det følgende er gjennomsnittsverdier, standardavvik, samt høyeste og laveste fasthet innenfor hver prøvealder vist.

Gjennomsnittsfasthet og standardavvik - Lavkarbonbetongen

Døgn	Antall	Snitt	Std avvik	Std feil	Nedre 95%	Øvre 95%
1	16	12,4	5,6	1,4	9,4	15,4
2	17	18,3	3,9	1,0	16,3	20,3
7	22	26,0	4,0	0,8	24,2	27,8
14	22	29,2	7,9	1,7	25,7	32,7
28	22	34,8	6,9	1,5	31,7	37,8
56	22	43,9	8,0	1,7	40,3	47,4
91	21	51,5	7,9	1,7	48,0	55,4

Tabell 5.13: Gjennomsnittsfasthet og standardavvik - lavkarbonbetong

	1 døgn	2 døgn	7 døgn	14 døgn	28 døgn	56 døgn	91 døgn
Laveste fasthet	4,1	10,9	17,9	17,1	26,5	36,5	38,6
Høyeste fasthet	24,8	26,6	34,4	45,1	49,6	61,1	66,7
Differanse	20,7	15,7	16,6	28,0	23,1	24,6	28,1

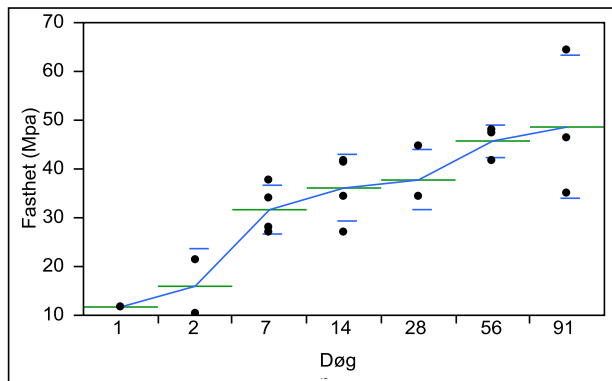
Tabell 5.14: Høyeste og laveste fasthet innenfor hver prøvealder - Lavkarbonbetongen, periode 1 og 2

Standardavviket måler spredningen av fordelingen rundt gjennomsnittet. Standardavviket er viktig fordi det indikerer hvor vi kan forvente å finne hovedtyngden av verdiene i utvalget. I en normalfordeling, vil ca 68 % av verdiene ligge innenfor ± 1 standardavvik fra gjennomsnittet. Standardfeilen anslår standardavviket til fordelingen av utvalgsgjennomsnittet, og brukes for å beregne konfidensintervaller. Det oppgitte konfidensintervallet (øvre og nedre 95 %) angir intervallet som vi med 95 % sannsynlighet kan si at populasjonsgjennomsnittet ligger innenfor [57].

Av tabell 5.13 ser vi at standardavviket kun ligger under 5,0 for 2 og 7 døgn. Differansen mellom høyeste og laveste fasthet understreker også den høye spredningen i materialet.

Referansebetongen

I det følgende er spredningsplot, gjennomsnittsverdier og standardavvik for uttaket av referansebetongen vist.



Figur 5.9: Spredningsplot for referansebetong, periode 1 og 2

Gjennomsnitt og standardavvik - Referansebetongen

Døgn	Antall (n)	Snitt	Std avvik	Std feil	Nedre 95%	Øvre 95%
1	1	11,7
2	2	16,0	7,7	5,5	-53,3	85,2
7	4	31,7	5,0	2,5	23,6	39,7
14	4	36,1	6,9	3,4	25,1	47,1
28	3	37,7	6,1	3,5	22,5	52,9
56	3	45,7	3,4	2,0	37,3	54,2
91	3	48,6	14,8	8,5	11,9	85,3

Tabell 5.15: Gjennomsnittsfasthet og standardavvik - referansebetong

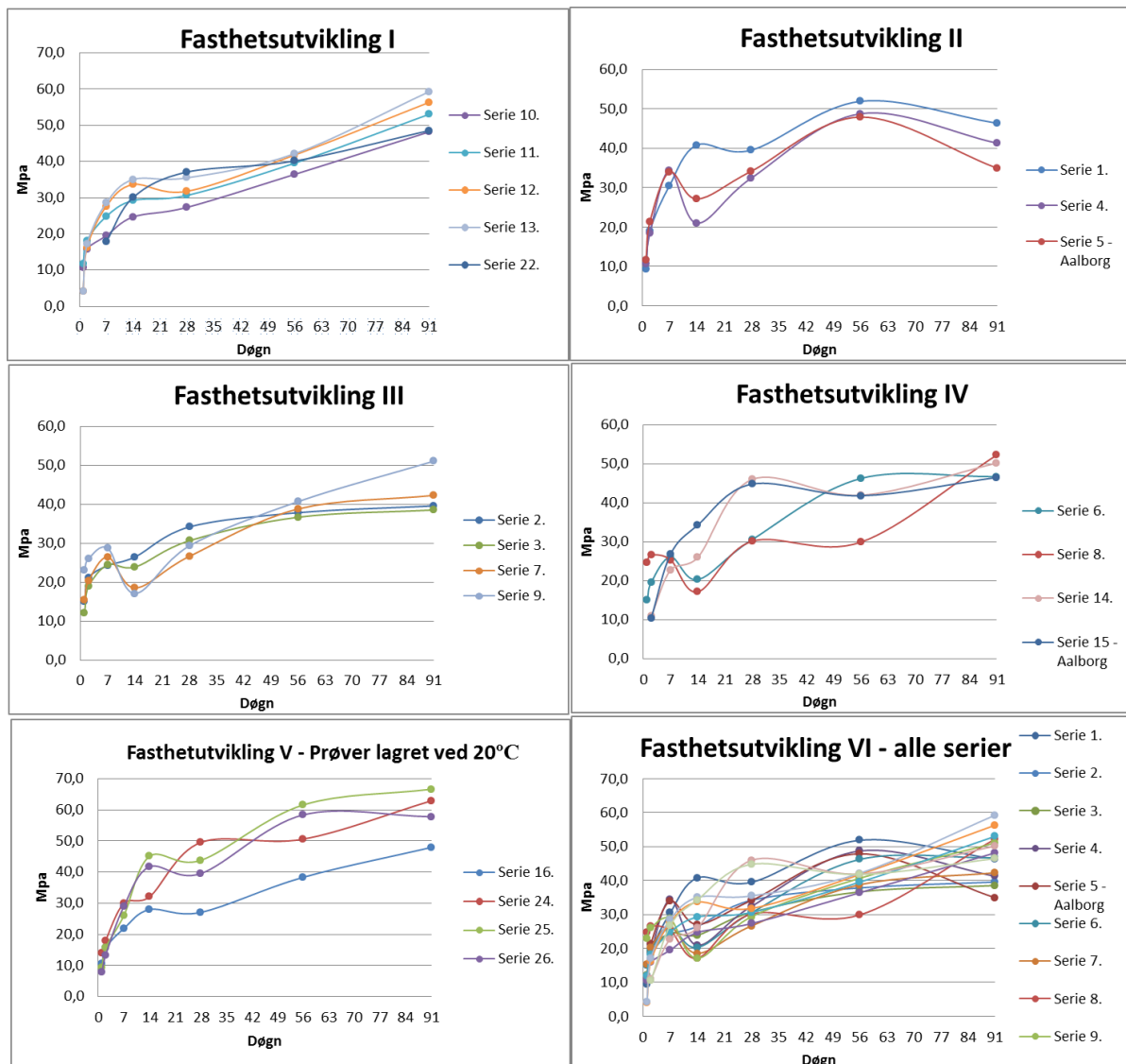
Tabell 5.15 viser at også referansebetongens standardavvik er større enn hva man skulle forvente. Her må det selvsagt tas i betraktning at utvalget er lite ($n = 1 - 4$). Når også betong med 100 % Portland sement har høy spredning i resultatene, og fasthetsutvikling som avviker fra forventningene, indikerer dette forekomst av feilkilder i prøveuttaket, herdeforhold eller trykking av prøvene.

5.4.2 Periode 1 og 2 - Fasthetsutvikling

Et problem med resultatene fra periode 1 og 2 er at økende alder ikke alltid gir økende fasthet. Resultatene viser i mange tilfeller en utflating eller fasthetsreduksjon fra en døgnverdi til neste. En slik fasthetsutvikling strider mot kjent betongteknologi, og det er grunn til å tro at det har forkommet feil i prosessen. Det kan sees en liknende utvikling for

referansebetongen også, og det er derfor nærliggende å tro at dette har med utførelse av støping, herdeforhold og trykking å gjøre. Det er gjennomført kontroll av en del av blanderapportene, for å kontrollere proporsjoneringen på betongleveranser med avvikende resultater, uten at det er funnet utslagsgivende avvik her.

Resultatene er i sin helhet vedlagt i vedlegg B, men presenteres her i grafisk form for å gi et inntrykk av fasthetsutviklingen for disse prøvene. De ulike seriene er ordnet i ulike diagrammer med omtrent tilsvarende fasthetsutvikling.



Figur 5.10: Grafisk fremstilling av fasthetsutvikling for periode 1 og 2

Det kan være verdt å merke seg at grafene kan gi større inntrykk av styrkereduksjon mellom aldrene enn det som er tilfellet. Skalaen som angir fasthet er relativt grov, så det er i mange tilfeller snakk om fasthetsutflating, med liten styrketilvekst fra en alder til neste.

Tabell 5.16 angir prosentvis fasthetsutvikling fra henholdsvis forrige aldre, og fasthetsutvikling relatert til 1 døgn. De grå feltene angir negativ fasthetsutvikling. De tomme feltene er prøver som på grunn av kapasitet på Unicon ikke er trykket.

Serie	% vekst fra forrige trykkprøve					
	2 døgn	7 døgn	14 døgn	28 døgn	56 døgn	91 døgn
Lavkarbonbetong						
1	103,7	60,1	33,8	-3,2	31,4	-10,7
2	40,7	15,2	9,1	29,1	10,7	4,6
3	56,8	29,6	-2,4	28,2	19,7	5,0
4	72,9	85,9	-39,1	54,7	50,5	-15,3
6	30,3	33,5	-22,2	50,5	51,4	1,0
7	32,2	30,3	-29,9	43,7	45,6	9,0
8	7,5	-4,7	-32,3	75,8	-0,8	74,7
9	12,8	10,4	-40,4	71,6	38,7	25,6
10	48,8	23,0	26,7	10,7	33,5	32,1
11	53,8	36,9	17,7	4,8	29,2	34,0
12	296,3	70,2	21,7	-5,5	31,4	34,8
13	303,5	66,5	22,8	1,3	18,7	40,7
14		109,2	14,0	76,9	-8,8	19,7
16	47,9	39,4	27,6	-3,2	41,5	25,0
17			38,8	-10,2	40,2	
19			40,8	7,5	18,8	34,0
20			13,9	3,6	38,4	12,5
21			22,2	29,0	22,8	11,3
22			68,6	23,3	8,2	20,9
24	28,9	66,8	6,6	54,4	1,9	24,6
25	66,7	66,0	72,5	-2,9	39,5	9,1
26	71,2	118,0	43,5	-5,3	47,7	-1,0

Serie	% vekst relatert til 1 døgn fasthet					
	2 døgn	7 døgn	14 døgn	28 døgn	56 døgn	91 døgn
Lavkarbonbetong						
1	103,7	226,2	336,4	322,5	455,1	395,7
2	40,7	62,0	76,7	128,0	152,3	164,0
3	56,8	103,3	98,3	154,4	204,6	219,9
4	72,9	221,5	95,8	202,8	355,6	286,0
6	30,3	74,0	35,3	103,7	208,3	211,3
7	32,2	72,3	20,8	73,6	152,8	175,6
8	7,5	2,4	-30,7	21,8	20,8	111,1
9	12,8	24,5	-25,8	27,3	76,6	121,7
10	48,8	83,1	131,9	156,8	242,7	352,6
11	53,8	110,6	147,9	159,7	235,6	349,6
12	296,3	574,4	720,7	675,6	919,5	1274,4
13	303,5	571,8	724,7	735,3	891,8	1295,3
14						
16	47,9	106,1	162,9	154,5	260,1	350,2
17						
19						
20						
21						
22						
24	28,9	115,0	129,3	253,9	260,7	349,3
25	66,7	176,7	377,2	363,5	546,6	605,3
26	71,2	273,1	435,3	407,1	648,7	641,0

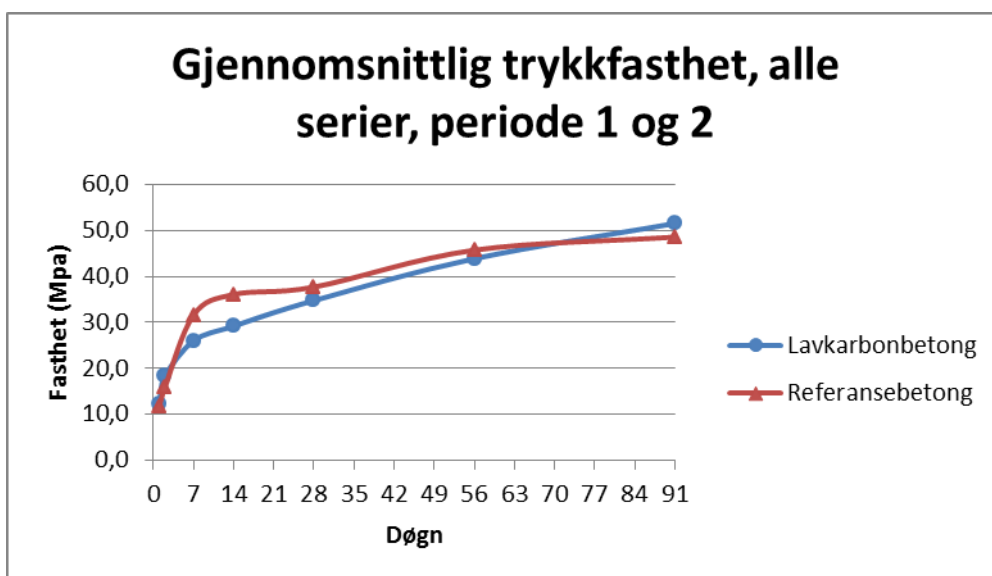
Referansesebetong						
5	82,9	58,6	-20,2	26,0	40,3	-27,0
15		156,9	27,7	30,6	-6,7	11,2
18			47,3	-17,5	39,1	2,3
23			10,6			

Referansesebetong						
5	82,9	190,2	131,6	191,9	309,4	198,7
15						
18						
23						

Tabell 5.16: Prosentvis fasthetsutvikling, periode 1 og 2

Det er ikke funnet klare årsaker til at det i flere tilfeller er liten eller negativ fasthetsutvikling mellom ulike aldre. Årsaken kan være at det ikke har vært like herdeforhold innenfor samme serie. Dette er videre diskutert under kapittelet som omhandler feilkilder.

Figur 5.11 viser gjennomsnittet av alle prøver ved ulike aldre, for lavkarbonbetongen og standardbetongen fra periode 1 og 2. Flygeaskebetong får på grunn av pozzolanreaksjonen ekstra bindende kapasitet ved senere alder, og det har av den grunn vært viktig å dokumentere lavkarbonbetongens fasthetsutvikling utover 28 døgn. Grafen i figur 5.11 viser denne tendensen, der det ser ut til at betongene har lik fasthet etter omtrent 75 dager. Det er imidlertid viktig å påpeke at det statistiske materialet for referansebetongen er lavt i forhold til flygeaskebetongen. Det høye standardavviket til både flygeaskebetongen og referansebetongen, samt utilfredsstillende fasthetsutvikling gjør at det ikke er mulig å trekke sikre konklusjoner på grunnlag av dette datagrunnlaget. Det kan likevel sies at resultatene indikerer samme tendens som ble funnet i litteraturstudiet.



Figur 5.11: Gjennomsnittlig trykkfasthet, alle serier, periode 1 og 2

Gjennomsnittlig trykkfasthet periode 1 og 2							
	1	2	7	14	28	56	91
Lavkarbon	12,4	18,3	26,0	29,2	34,8	43,9	51,5
Standard	11,7	15,9	31,6	36,1	37,7	45,7	48,6

Tabell 5.17: Gjennomsnittlig trykkfasthet, alle serier, periode 1 og 2

Videre er det interessant å se om lav tidligfasthet også gir lav fasthet ved senere aldre. Tabell 5.18 belyser dette:

Serie	1 døgn		91 døgn	
	Fasthet	rangeringsverdi	Fasthet	rangeringsverdi
12	4,1	1	56,4	12
13	4,3	2	59,3	14
26	7,8	3	57,8	13
1	9,4	4	46,4	5
25	9,5	5	66,7	16
10	10,7	6	48,2	8
16	10,7	7	48,0	7
4	10,7	8	41,3	3
11	11,8	9	53,1	11
3	12,1	10	38,6	1
24	14,0	11	62,9	15
2	15,0	12	39,6	2
6	15,0	13	46,7	6
7	15,4	14	42,3	4
9	23,1	15	51,1	9
8	24,8	16	52,3	10

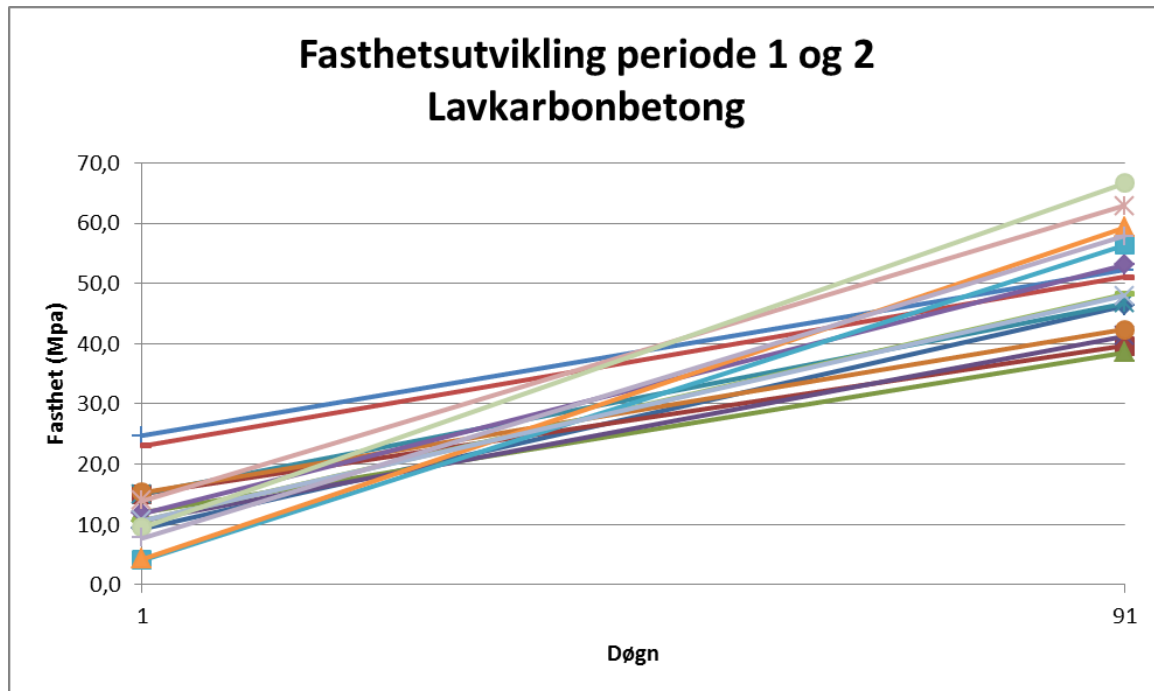
Dersom vi betrakter rad 1 i tabellen (serie 12), fremkommer det at denne serien har lavest 1 døgns fasthet av utvalget. Denne verdien har derfor fått rangeringsverdi 1. Serie 8 har høyest 1 døgns verdi av utvalget, og har rangeringsverdi 16. Sammenliknes disse verdiene med rangeringsverdiene for 91 døgn, kan vi se om lav tidligfasthet fører til lav fasthet ved senere aldre. Dersom rangeringsverdiene for 1 døgn og 91 har omtrent lik verdi, skulle dette tilsi en slik sammenheng.

Tabell 5.18: 1 og 91 døgns fasthet for lavkarbonbetong

Det ser imidlertid ikke ut til at det er en sammenheng mellom lav tidligfasthet og lav fasthet ved høy alder. Tabellen viser at det i mange tilfeller med lav tidligfasthet er registrert høye fastheter ved 91 døgn, og serier som har høy tidligfasthet har ikke nødvendigvis høy 91 døgns fasthet.

Det er også verdt å merke seg de uthevede tallene i tabellen. Disse angir terninger som har hatt optimale herdeforhold første døgn, ved at de er kjørt direkte til Unicon, og har stått til herding ved 20 grader det første døgnet. Man skulle forvente at optimale herdeforhold gir høy 1 døgns fasthet, men dette er ikke tilfelle. Disse prøvene er kun rangert som 3, 5 og 11 ved 1 døgn. Samtidig er disse prøvene rangert som 7, 13, 15 og 16 ved 91 døgn, og har dermed noen av de høyeste 91 døgns resultatene av utvalget. Dette kan indikere en sammenheng mellom herdeforhold det første døgnet og langtidsfasthet, men fordi datagrunnlaget er usikkert, trekkes det på dette punktet ingen konklusjoner.

Figur 5.12 belyser også denne sammenhengen mellom tidligfasthet og fasthet ved senere aldre.



Figur 5.12: Fasthetsutvikling lavkarbonbetong , periode 1 og 2

5.4.3 Periode 1 og 2 – Regresjonsanalyser

Det er gjennomført regresjonsanalyser i statistikkprogrammet JMP, for å se om det kan påvises sammenhenger mellom fasthet og henholdsvis slump, luft, betongtemperatur og terningvekt. Resultatene fra regresjonene viser imidlertid generelt lite eller ingen korrelasjon, og det har dermed ikke vært mulig å påvise noen sammenheng mellom de forannevnte variablene. Årsakene til dette kan være at fasthetsutviklingen ikke har vært som forventet, og spredningen i materialet er stort. Resultatene fra regresjonsanalysene bør derfor ikke tillegges særlig betydning.

Det refereres til vedlegg B.7 for resultatene fra regresjonsanalysene.

5.4.4 Periode 3 og 4 - Karakteristisk fasthet

Fordi resultatene fra periode 1 og 2 viste uregelmessig fasthetsutvikling, ble det besluttet å gjennomføre nye prøveuttak. Prøvene fra periode 3 viser delvis forventet fasthetsutvikling, mens prøvene fra periode 4 viser i likhet med prøvene fra periode 1 og 2 uregelmessige fasthetsresultater.

Det ble i periode 3 og 4 tatt ut 10 serier med lavkarbonbetong, og 1 serie referansebetong. Fasthetene oppnår også for dette utvalget kravet om at alle 28 døgns terninger skal holde minimum 80 % av karakteristiske fasthet.

Serie	Betongtype	28,1	> 80 % av	28,2	> 80 % av	Middel- verdi	56 døgn		Middel- verdi
			krevd fck?		krevd fck?		56,1	56,2	
Serie 27	Lavkarbon	36,9	SANN	37,1	SANN	37,0	45,3	48,9	47,1
Serie 28	Lavkarbon	38,9	SANN	39,4	SANN	39,2			
Serie 29	Lavkarbon	36,9	SANN	35,5	SANN	36,2	48,9	47,8	48,4
Serie 31	Lavkarbon	36,7	SANN	38,8	SANN	37,8	49,6	50,3	50,0
Serie 32	Lavkarbon	37,5	SANN	36,9	SANN	37,2	25,8	22,7	24,3
Serie 33	Lavkarbon	39,8	SANN	38,9	SANN	39,4	23,3	26,0	24,7
Serie 34	Lavkarbon	36,7	SANN	39,2	SANN	38,0	28,2	30,4	29,3
Serie 35	Lavkarbon	38,6	SANN	36,5	SANN	37,6	29,4	29,5	29,5
Serie 36	Lavkarbon	29,1	SANN	25,9	SANN	27,5	31,9	32,2	32,1
Serie 37	Lavkarbon	31,0	SANN	32,3	SANN	31,7	29,4	31,1	30,3

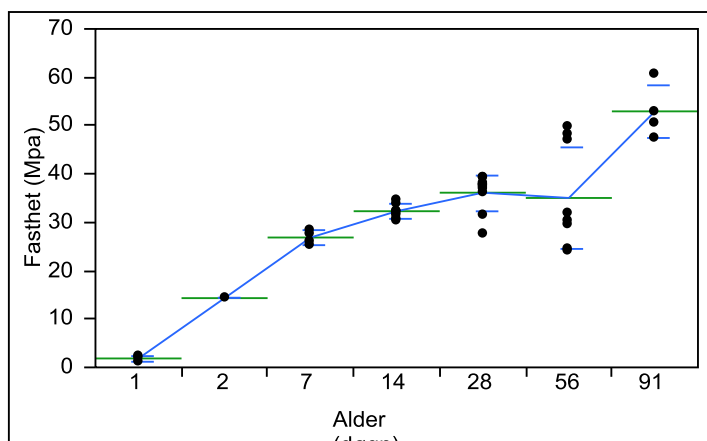
Tabell 5.19: 28 døgns fastheter periode 3 og 4 - lavkarbonbetong

Karakteristisk fasthet 28 døgn, lavkarbon (B25)			Karakteristisk fasthet - uten undermåler, 28 døgn, lavkarbon (B25)			Karakteristisk fasthet 56 døgn, lavkarbon (B25)		
f _{cm}	=	36,1	f _{cm}	=	37,1	f _{cm}	=	35,0
w	=	1,7	w	=	1,7	w	=	1,7
s	=	3,7	s	=	2,3	s	=	10,4
n	=	10	n	=	9	n	=	9
f _{ck} = f _{cm} - w*s	=	29,8	f _{ck} = f _{cm} - w*s	=	33,2	f _{ck} = f _{cm} - w*s	=	17,4

Tabell 5.20: Karakteristisk fasthet periode 3 og 4 - Lavkarbonbetong

f_{ck} er for utvalget med lavkarbonbetongprøver 29,8 Mpa, og når derfor ikke kravet til karakteristisk fasthet på 30 Mpa. Dersom undermålerne i serie 36 utelates, blir f_{ck} 33,2 Mpa, og betongen ville da nådd kravet til karakteristisk fasthet. Serie 32-37 viser lave 56 døgns fastheter, og betongen når derfor heller ikke kravet til karakteristisk fasthet ved 56 døgn. Uttaket fra denne perioden viser dermed at betongen kun når kravet til B20, som er 25 Mpa.

Utvalget er lite for periode 3 og 4, og standardavviket for 1, 2 og 7 -døgn kan dermed sees bort fra (n = 2 og 4). 28 døgns resultatene viser standardavvik på 3,7, og ligger dermed under forventet standardavvik 5,0. 56 døgns resultatene viser imidlertid stor spredning, og har standardavvik på 10,4. Dette skyldes fasthetsreduksjon mellom 28 døgn og 56 døgn for serie 32-37.



Figur 5.13: Spredning av fasthetsresultater for lavkarbonbetongen - periode 3 og 4

Gjennomsnittsfasthet og standardavvik - Lavkarbonbetongen

Døgn	Antall	Snitt	Std avvik	Std feil	Nedre 95%	Øvre 95%
1	4	1,9	(0,6)	(0,3)	(1,0)	(2,7)
2	2	14,3	(0,1)	(0,1)	(13,4)	(15,3)
7	4	26,9	(1,5)	(0,7)	(24,6)	(29,2)
14	9	32,3	1,4	0,5	31,2	33,4
28	10	36,1	3,7	1,2	33,5	38,8
56	9	35,0	10,4	3,5	27,0	43,0
91	4	53,0	5,5	2,8	44,1	61,8

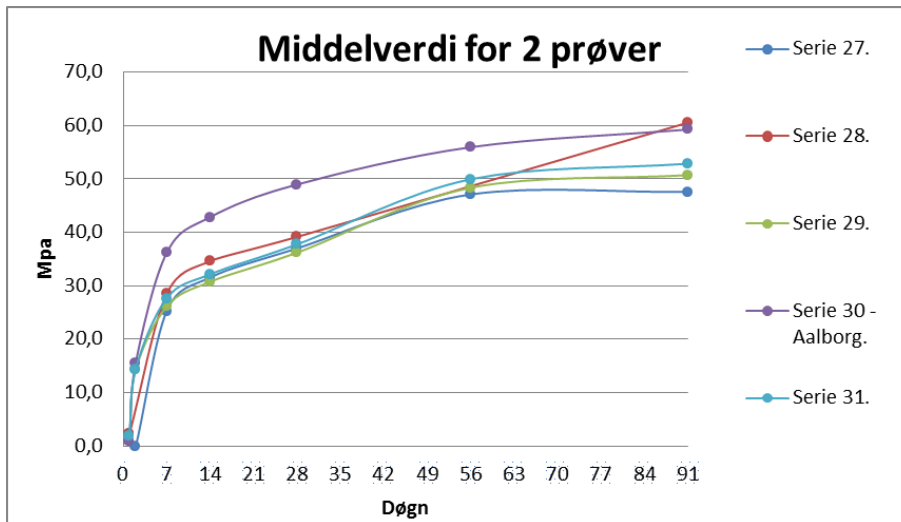
Tabell 5.21: Gjennomsnittsfasthet og standardavvik for lavkarbonbetongen - periode 3 og 4

	1 døgn	2 døgn	7 døgn	14 døgn	28 døgn	56 døgn	91 døgn
Høyeste fasthet	1,1	14,3	25,3	30,2	27,5	24,3	60,6
Laveste fasthet	2,3	14,4	28,5	34,6	39,4	50,0	47,6
Differanse	1,2	0,1	3,2	4,4	11,9	25,7	13,0

Tabell 5.22: Høyeste og laveste fasthet innenfor hver prøvealder – Lavkarbonbetongen, periode 3 og 4

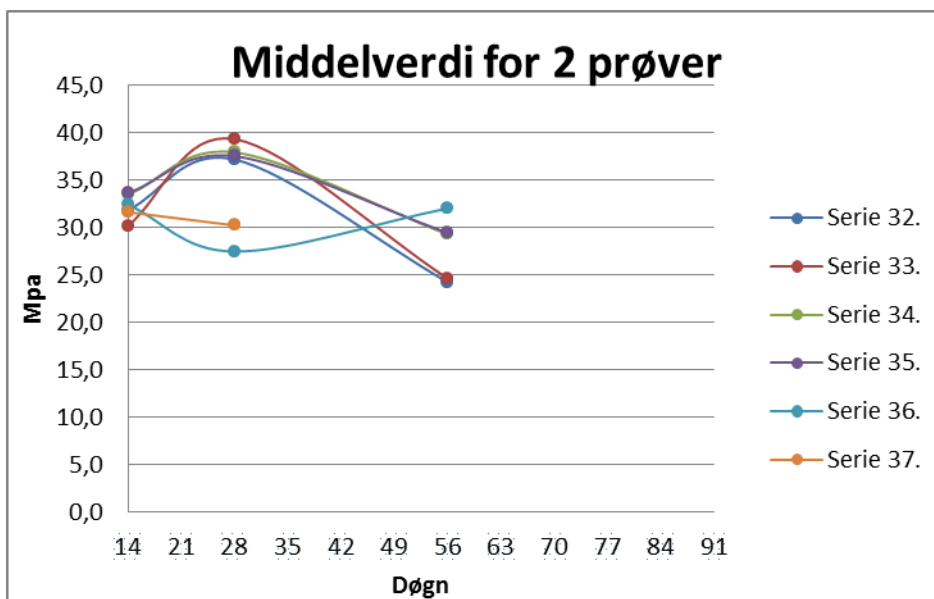
5.4.5 Periode 3 og 4 – Fasthetsutvikling

Resultatene fra serie 27-31 viser fasthetsutvikling som delvis svarer til forventet utvikling for både referansebetongen og lavkarbonbetongen. 91 døgns resultatene viser en utflating etter 56 døgner, og bekrefter derfor ikke antakelsen om at pozzolanaktivitet gir fasthetsøkning større enn referansebetong ved senere aldre. Kun serie 28 viser en slik tendens.



Figur 5.14: Fasthetsutvikling for serie 27-31

Resultatene fra serie 32-37 viser imidlertid fasthetsreduksjon mellom 28 døgner og 56 døgner for serie 32,33 og 35. Serie 36 viser fasthetsreduksjon mellom 14 og 28 døgner. Serie 32-37 er tatt ut på samme dag, men fra ulike biler.



Figur 5.15: Fasthetsutvikling for serie 32-37

Tabell 5.23 viser prosentvis vekst i fasthet fra henholdsvis forrige prøve, og tilvekst i fasthet fra 1- døgns prøvene. Serie 30 er referansebetong, mens de øvrige er lavkarbonbetong.

Serie	% vekst fra forrige trykkprøve					
	2 døgn	7 døgn	14 døgn	28 døgn	56 døgn	91 døgn
Serie 27			25	17	27	1
Serie 28			22	13		
Serie 29	1257	83	18	18	34	5
Serie 30	1532	133	19	14	14	6
Serie 31	658	92	16	17	32	6
Serie 32				17	-35	
Serie 33				30	-37	
Serie 34				13	-23	
Serie 35				12	-22	
Serie 36				-15	17	
Serie 37					-4	

Serie	% vekst relatert til 1 døgns fasthet					
	2 døgn	7 døgn	14 døgn	28 døgn	56 døgn	91 døgn
Serie 27		1048	1334	1582	2041	2064
Serie 28		1164	1438	1640		2593
Serie 29	1257	2386	2829	3348	4505	4729
Serie 30	1532	3705	4411	5053	5789	6142
Serie 31	658	1355	1592	1887	2529	2684
Serie 32						
Serie 33						
Serie 34						
Serie 35						
Serie 36						
Serie 37						

Tabell 5.23: Prosentvis fasthetsutvikling - Periode 3 og 4

Det er vanskelig å peke på klare årsaker til at serie 32-37 viser fasthetsreduksjon fra 28 til 56 døgn. Siden serie 32-37 viser 28 døgns-fastheter som ligger i samme område som serie 27-31, og deretter viser fasthetsreduksjon, tyder dette på endring i herdeforhold. Det er lite sannsynlig at en oppnådd fasthet i virkeligheten kan reduseres fra en alder til neste. Dette nesten systematiske fasthetsfallet fra 28 til 56 døgn indikerer derfor at disse terningene har hatt en ufordelaktig behandling og/eller herdeforhold.

5.4.6 Fasthetsresultater fra Unicons interne prøving av lavkarbonbetongen

Fordi fasthetsresultatene ikke er som forventet, er det hentet inn alle tilgjengelige fasthetsresultater med lavkarbonresepten fra Unicon. Dette er gjort for å sammenlikne resultatene fra Unicons interne prøving, og resultatene som er fremkommet i denne rapporten.

Fasthetene i tabell 5.24 er hentet fra innledende prøving for utbyggingen av Meteorologisk institutt (MET) i Oslo. Denne prøvingen er i henhold til NS-EN 206-1 [19]. Resultatene er fra perioden 28.05.2010 – 23.06.2010. Betongen er B25 M60, med v/c 0,55. Alle verdier er 28 døgns terning-trykkfasthet, men omregnet til sylinder-fasthet, og er gjennomsnittet av to prøver.

	Sylinder fasthet (Mpa)	Status ¹		
	25,5	Ok		
	30,0	Ok		
	28,9	Ok		
fcm	28,1	std.avvik	2,3	Status ² på 3 prøver (min. fcm 29,0): Ikke Ok
	21,1	Ok		
	23,8	Ok		
	20,6	Ikke Ok		
fcm	21,8	std.avvik	1,7	Status ² på 3 prøver (min. fcm 29,0): Ikke Ok
Gjennomsnittsverdi	25,0			
Høyeste	30,0			
Laveste	20,6			

Tabell 5.24: Unicons fasthetsresultater for innledende prøving – MET

¹ I henhold til kriterium 2 ($f_{ci} \geq f_{ck} - 4 \text{ Mpa}$), tabell 14 i NS-EN 206-1 [19]

² I henhold til kriterium 1 ($f_{cm} \geq f_{ck} + 4 \text{ Mpa}$), tabell 14 i NS-EN 206-1 [19]

Resultatene fra denne innledende prøvingen viser at gjennomsnittsfastheten er for lave, noe som fører til at det må gjøres endringer i resepten. Det finnes ikke flere prøver fra denne perioden, noe som indikerer at oppfølgingen av sementresepten kunne vært bedre.

Fasthetene i tabell 5.25 er hentet fra innledende prøving for utbyggingen på Åstadryggen. Resultatene er fra perioden 29.09.2010 - 13.10.2010. Betongen er B25 M60, med v/c 0,54.

	Sylinder fasthet (Mpa)	Status		
	44,6	Ok		
	38,0	Ok		
	37,6	Ok		
fcm	40,1	std.avvik	3,9	Status på 3 prøver (min. fcm 29,0): Ok
	39,7	Ok		
	25,0	Ok		
	34,9	Ok		
fcm	33,2	std.avvik	7,5	Status på 3 prøver (min. fcm 29,0): Ok
	29,7			
fcm	29,7	std.avvik		Delvis status på 1 prøver
Gjennomsnittsverdi	35,6			
Høyeste	44,6			
Laveste	25,0			

Tabell 5.25: Unicons fasthetsresultater for innledende prøving - Åstadryggen

Resultatene i tabell 5.25 viser at prøvene når kravet til kriterium 1 og 2 i NS-EN 206-1 [19]. Denne standarden setter videre krav til 3 prøver for de første produserte 50m³, og deretter 1 prøve per 200 m³, eller 2 per produksjonsuke. Det lave prøveuttaket indikerer at Unicon ikke har gitt sementen nok prioritet i henhold til kontroll og etterjustering av resepten. Siden lavkarbonbetongen dreier seg om resept med en ny sement, burde den innledende prøvingen vært av et større omfang [58].

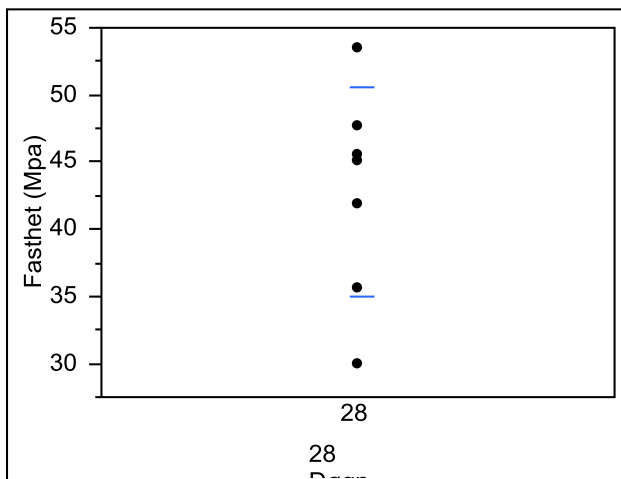
I tabell 5.26 er det satt opp 28- døgns trykkfastheter for Unicons interne resultater fra Åstadryggen (tabell 5.25), og alle 28 døgns resultater presentert i denne rapporten. Unicons interne resultater beskrevet i tabell 5.24 har v/c = 0,55, og er dermed ikke tatt med i sammenlikningen. De øvrige resultatene stammer fra betong med samme resept og v/c = 0,54. Resultatene er regnet om til terningfasthet ved omregningsfaktoren 25/30 [19].

	Resultater fra Åstadryggen		Resultater fra Unicon	
	periode 1 og 2	periode 3 og 4	(fra tabell 5.24)	
Snitt (f_{cm,28})	34,8	36,1	48,1	39,8
Std.avvik	6,9	3,7	3,9	7,5
Maks	49,6	39,4	53,5	
Min	25,6	27,5	30,0	
Differanse (maks-min)	23,1	11,9	23,5	
Antall prøver	22	10	3	3

Tabell 5.26: Sammenlikning av fasthetsresultater fra Åstadryggen og Unicon

Tabell 5.26 viser at også resultatene fra Unicon har relativ stor spredning. Differansen mellom største og minste fasthet er omtrent lik for resultatene fra Unicon og resultatene fra Åstadryggen. Standardavvikene ligger også innenfor samme område. Det som skiller seg ut, er at resultatene fra Unicon viser noe høyere gjennomsnittsfasthet, og større høyeste- og laveste verdi.

Figur 5.16 viser spredningsplot for alle 7 prøvene fra Unicon som er angitt i tabell 5.25. Resultatene gir inntrykk av relativ stor spredning, og har standardavvik på 7,8. Gjennomsnittsfastheten for disse prøvene er 42,7 Mpa. Prøvene fra Unicon viser dermed i henhold til spredning, samme tendens som prøvene fra periode 1 og 2, og 3 og 4. Dette indikerer at det kan være andre faktorer enn den praktiske gjennomføringen av prøveuttaket som gir utslag på 28- døgns- trykkfastheten. Det er imidlertid vanskelig å peke på hva slike faktorer kan være. Det er på dette punktet behov for videre arbeid.



Figur 5.16: Spredningsplot - 28 døgns resultater fra Unicon

5.4.7 Feilkilder og diskusjon

Det ble satt inn store ressurser for å forsøke å finne årsaken til de avvikende resultatene fra periode 1 og 2, slik at disse feilkildene kunne elimineres før uttaket i periode 3 og 4.

Resultatene er diskutert med fagfolk fra både Unicon, Veidekke, Universitetet for miljø og biovitenskap, SINTEF Byggforsk og Norcem, uten at det er fremkommet sikre årsaker. Jeg vil i dette avsnittet diskutere ulike feilkilder, og se på om disse er relevante for prøveuttaket.

5.4.7.1 Feilkilder relatert til prøveuttaket og fasthetsutvikling

- Utilstrekkelig komprimering av betongprøvene kan gi luftlommer og ufullstendig form på terningene.
- Prøvene kan være for dårlig avrettet, slik at prøvelegemene får konkav eller konveks form.
- Formene kan være utette, slik at finstoffet renner ut, eller ha deformasjoner som ikke sikrer riktig geometri og skjeve trykkflater.
- For lav herdetemperatur det første døgnet kan føre til skader på prøvene ved avforming.
- Dersom prøvelegemene fryser vil dette ødelegge terningenes fasthet.
- Prøvefasthetene vil påvirkes av vannbadets temperatur. Dersom ikke terningene innenfor samme serie får samme herdeforhold vil dette være ugunstig.
- Støt og slag under transport og håndtering vil kunne skade prøvelegemene.
- Utilstrekkelig tildekking av prøvene etter støping vil kunne føre til uttørring.
- Prøvene kan også tørke ut dersom det tar lang tid før de legges i vann etter avforming, eller at de ligger for lenge etter at de er tatt opp av vannbad før trykking.
- Utilstrekkelig merking av prøvene kan føre til at hvert prøvestykke ikke entydig kan identifiseres.
- Ukorrekt plassering av prøvestykker i prøvemaskin, eller skjeve overflater på trykkflatene vil gi feil resultater.
- Dårlig internsystem på laboratoriet vil kunne medføre at prøver trykkes på feil tidspunkt.
- Dersom sjåføren har glemt å tømme vannet etter rengjøring (spyling) av betongbilen, vil betongen få økt v/c- forhold, og lavere fasthet.
- Ved utilstrekkelig fuktkontroll av tilslaget, vil tilslaget kunne ha høyere fuktinnhold enn det som beregnes ved proporsjonering, noe som gir høyere v/c.

5.4.7.2 Diskusjon

Viktige faktorer som påvirker trykkfastheten i følge Statens vegvesens

I følge Statens vegvesens håndbok 014 - *Laboratorieundersøkelser* [59], er det først og fremst skjeve trykkflater som kan føre til ukorrekt trykkfasthet. Håndbok 014 fremhever også ikke-sentrisk plassering av prøvestykket i testmaskinen, eller at det er benyttet feil pålastingshastighet som feilkilder for trykkfasthet. NS-EN 12390-3 [60] angir hastigheten til å være innenfor området 0,2 Mpa/s til 1,0 Mpa/s. Videre er prøvelegemenes lagringstemperatur og beskyttes mot uttørking viktige momenter for å oppnå korrekt resultat. Feil lagringstemperatur vil være spesielt utslagsgivende for prøvestykker ved aldre under 7 døgn, men ha lite påvirkning ved 28 døgnns alder og senere [59].

Terningformer

Det er i prøvetakingen benyttet prøveformer av stål, som i utgangspunktet skal sørge for at geometrien forblir korrekt. Ola Skjølvold ved SINTEF byggforsk [61] fremhever prøvelegemenes trykkflater som spesielt viktig for fastheten. Prøveformenes geometri ble ikke kontrollert før støping ble påbegynt, og på grunn av utilstrekkelig tid har det ikke vært mulig å kontrollere prøveformene for skjevheter i ettertid. Det er ikke registrert visuelle skjeve trykkflater på noen av prøvelegemene. Prøvene er ellers behandlet på en måte som ikke skal ha negativ effekt på fastheten. Fylling og komprimering av formene er gjort i følge NS-EN 12390-2 [60], og er beskrevet i vedlegg A. Det er benyttet 2 typer stålformer i prøveuttaket, som er gjengitt i figur A.2, i vedlegg A.

Lagringstemperatur under herding i form

NS-EN 12390-2 [60] stiller krav til lagringstemperatur på $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Det har ikke vært mulig å oppnå slike forhold ved byggeplassen, og prøvene er det første døgnet lagret i container der det har stått på vifteovn hele døgnet. Dette har vært en lagringscontainer som har stått lukket hele døgnet. Nedenfor er det angitt hvilke utetemperaturer som har vært i tidsrommene serie 1-26 har herdet. Det finnes ikke data for eksakte temperaturer inne i containeren, men det kan trygt antas at det har vært varmere enn utetemperaturen. Værdata for serie 27-37 er ikke tatt med her, fordi det i disse periodene ikke var tilgang på værstasjon som kunne stå på byggeplassen.

Serie	Luft-temperatur (°C)		
	Middel	Maks	Min
Serie 1	X	X	X
Serie 2/3	11,1	11,9	10,6
Serie 4/5	10,3	12,3	9,2
Serie 6/7	11,7	15,2	8,7
Serie 8/9	9,1	14,1	7,7
Serie 10/11	3,8	10,5	0,8
Serie 12/13	5,4	10,3	2,2
Serie 14/15	5,1	12,5	0,8
Serie 16	Unicon	Unicon	Unicon
Serie 17/18/19	-4,7	-4,0	-5,4
Serie 20/21	-2,6	-0,3	-5,4
Serie 22	-5,9	-2,4	-9,8
Serie 23 - 26	Unicon	Unicon	Unicon

Tabell 5.27: Lufttemperatur utenfor container i de timene prøvene har stått i formene

Som tabell 5.27 viser, har det for serie 1- 15 ikke vært under 0 grader ute, og det er derfor utelukket at prøvene har fryst. Det er ingen indikasjon på at temperaturen har vært under null i perioden med kuldegrader heller. Temperaturene viser også at det har vært jevne temperaturer gjennom døgnet, uten store variasjoner. Disse lagringsforholdene er ikke optimale, men skulle ikke ha stor betydning ut over 28 døgn. Alle prøvene er lagret sammen i containeren før av-forming, og man skulle kunne forvente at når et prøvelegeme har oppnådd en fasthet ved en alder, skulle fastheten ved neste alder være høyere enn denne. Det er derfor lite sannsynlig at dette forklarer fasthetsreduksjon ved senere aldre. Dersom det var tilfelle at prøvene har fryst, er det sannsynlig at alle prøver ved alle aldre ville vært ødelagt. Det er også interessant å merke seg at prøvene som har vært lagret hos Unicon før av-forming også viser a-typisk fasthetsutvikling. Lav lagringstemperatur det første døgnet kan imidlertid føre til skader på terningen ved av-forming. Det er i noen tilfeller registrert noe avskalling på prøvelegemene, men dette hører til unntakene.

Lagringstemperatur under herding i vannbad hos Unicon

Etter prøveperiode 1 og 2, viste det seg at det hadde vært problemer med termostaten på herdekarene i en periode prøvene var lagret der. Termostaten virket ikke en hel måned i overgangen høst/vinter, og det antas at temperaturen har vært nede i 14 grader. Rommet som herdekarene står i, har hatt anslått temperatur på 16-18 grader på kveld/helg, og ned i 10 grader på dagtid, noe som gir en plausibel variasjon på 5-6 grader i vannbadet. Samtidig er ikke terninger fra samme serie nødvendigvis lagret i samme vannbad, men noen prøver er på grunn av plassmangel lagt i vannbad uten termostat. Det var i periode 1 og 2 ustrukturert og tilfeldig hvor prøvene ble lagt, og de er også flyttet mellom vannbad med og uten termostat. Disse lagringsproblemene kom frem etter at resultatene fra trykkprøvingene

etter periode 1 og 2 var kjent, og tiltak ble derfor iverksatt før oppstart av periode 3 og 4. Det ble da sørget for like lagringsforhold innenfor samme serie i vannbad med fungerende termostat.

Resultatene fra periode 4 viser imidlertid en systematisk fasthetsreduksjon mellom 28 og 56 døgn for 4 av prøvene. Fordi det anses som usannsynlig at prøver som har oppnådd en fasthet, mister denne fra en prøvealder til neste, indikerer dette at 56 døgns prøvene har hatt en ufordelaktig behandling eller lagringsforhold. 28 døgns resultatene for periode 4 har omtrent samme fasthetsverdier som de øvrige 28 døgns prøvene, og 56 døgns prøvene fra periode 4 har lavere verdi enn de øvrige 56 døgns prøvene. Dette er også med på å indikere at lagringsforhold og behandlingen av 56 døgns prøvene har vært ufordelaktig. Seriene fra periode 4 har imidlertid hatt tilsynelatende like herdeforhold, både det første døgnet, og under lagring hos Unicon. Dette gjør at det ikke er lyktes å finne forklaringer på reduksjonen fra 28 døgn til 56 døgn for resultatene fra periode 4.

Prøving ved Unicon

Trykkpressen som er benyttet er sertifisert og godkjent av kontrollrådet for betongprodukter [62]. Unicon har heller ikke opplevd avvik med sine interne prøver i perioden der prøvene til dette prosjektet er trykket. Det er derfor nærliggende å tro at prøvingen er gjennomført på en tilfredsstillende måte. Pålastingshastigheten er i følge Unicon kontrollert regelmessig, så det kan antas at denne hastigheten er riktig. Merkingen av prøvelegemene har vært entydig og god nok, så det er lite sannsynlig at det er blandet prøver mellom ulike serier. Det er heller ikke sannsynlig at resultater er byttet om, slik at for eksempel 7 døgns- fasthet er ført inn som 14 døgns- fasthet. Datafilen med resultater er kryssjekket med håndskrevne resultat-oppføringer. Alle prøvene skal også være trykket på riktig tidspunkt. Det har tatt inntil 2 timer fra prøvene er tatt opp av vannbadet til de er trykket, noe som ikke er helt gunstig, men heller ikke kritisk med henhold til uttørking.

Proporsjonering

Gjennomgang av en del blandingslogger fra Unicon, tilsier ikke at det har skjedd noe galt under proporsjoneringen av betongen. Disse er gjennomgått med betongteknologer fra Veidekke og Unicon, og det er ikke funnet avvik i disse som kan forklare fasthetsutviklingen. Det at referansebetongen også oppfører seg avvikende, er med på å avkrefte at proporsjonering er årsak til de avvikende fasthetsresultatene.

Terningvekt

Prøvene fra periode 1 og 2 holdt noe høyere densitet enn 2385 kg/m^3 som er utgangspunktet for resepten. Densitet er ikke målt med Arkimedes prinsipp, men er målt som vekten av en terning på tilnærmet lik en liter. Det er forutsatt volum på en liter, noe som ikke gir et helt korrekt bilde av densitet. Gjennomsnittsvekten etter periode 1 og 2 ligger på 2473 g, altså ca 4% mer enn 2385 g/l. Det er jevnt over registrert noe høyere vekt på alle prøvene fra disse periodene. Denne noe høyere vekten skyldes at betongspade ble benyttet til å avrette prøvene, i stedet for å "sage av" overskytende betong med komprimeringsstaven. Den sistnevnte metoden ble benyttet i periode 3 og 4, og gjennomsnittsvekten for prøvene er for disse periodene 2422 g, og ligger derfor omtrent 1,5 % høyere enn utgangspunktet for resepten. Det har vært diskutert hva denne overhøyden har å si i for trykkfastheten. Statens håndbok 014 nevner ikke dette som feilkilde, og teknologer fra Veidekke, SINTEF byggforsk og Norcem mener at en slik overhøyde ikke har en slik utslagsgivende effekt på trykkprøvene. Det er også samme person som har gjennomført majoriteten av uttaket, og det er tatt mål av å gjøre det så likt som mulig hver gang. Alle prøvene vil derfor få en omtrent samme vekt.

De avvikende fasthetsresultatene for periode 4 er med på å indikere at en liten overhøyde ikke er utslagsgivende for trykkfastheten, fordi disse terningene ble avrettet ved hjelp av sagende bevegelse med komprimeringsstav.

Andre forhold

Det er verdt å merke seg at Lise Bathen og Alf Egil Mathisen fra Veidekke V-teknikk har tatt ut 5 av seriene i periode 2. Dette er fagfolk med stor tyngde innen betongteknologifaget, og også disse seriene viser a-typisk utvikling. Dette er med på å indikere at problemene stammer fra lagring og trykking hos Unicon. Samtidig viser Unicons interne prøveuttak også relativ høy spredning, noe som indikerer at det kan være andre og ukjente faktorer enn den praktiske gjennomføringen av prøveuttaket som er av betydning for fasthetsresultatene.

Resultatene fra slumpmålingene viser at slumpen gjennomgående har vært høyere enn bestilt. Dette kan indikere at fuktkontrollen av tilslaget på fabrikk ikke har vært god nok, og at det er mer vann i betongen enn beregnet. En annen forklaring er at sjåføren kan ha glemte å tømme bilen for vann etter rengjøring. Det ble imidlertid ikke funnet signifikante sammenheng mellom slump og fasthet i regresjonsanalysene fra periode 1 og 2.

Det er også et spørsmål om terningene burde vært planslipt. NS-EN 12390-3 [60] angir regler for sliping av prøvestykker med utilfredsstillende geometri. I videre arbeid bør man gå i dialog med Unicon om plansliping er noe som burde gjennomføres.

5.4.5.3 Oppsummering av feilkilder

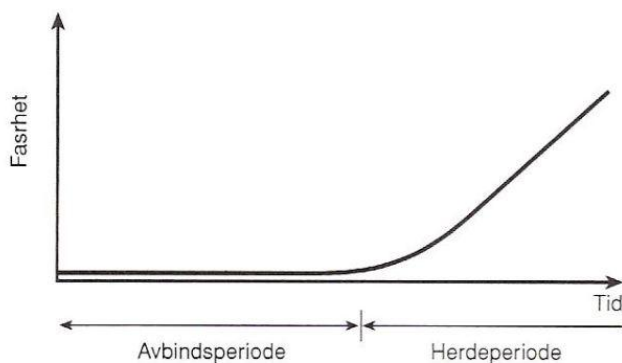
Det er vanskelig å finne klare årsaker som entydig kan forklare den avvikende fasthetsutviklingen for både lavkarbon og referansebetongen, det pekes imidlertid her på noen faktorer:

- Herdeforholdene i container det første døgnet har ikke vært optimale, men dette påvirker i størst grad tidligfasthetene, og forklarer ikke fasthetsreduksjon i aldre over 28 døgn.
- Herdeforholdene i vannbad hos Unicon har for periode 1 og 2 ikke vært tilfredsstillende. Prøvene av referansebetongen viser også unormal fasthetsutvikling, noe som er med på å styrke mistanken om at årsaken er uriktig herdetemperatur hos Unicon, og at prøver innenfor samme serier har hatt ulike herdeforhold
- Prøvene fra periode 1 og 2 veier noe mer enn ønsket på grunn av en liten overhøyde, men dette er jevnt over for alle seriene. Det er lagt vekt på å gjennomføre prøveuttaket så likt som mulig for alle serier, slik at alle prøvelegemer i utgangspunktet er like. Prøvene for periode 3 og 4 veier også noe mer enn det som er utgangspunktet for resepten, men unøyaktige målinger hos Unicon (vekt i stede for densitet) gjør det vanskelig å avklare signifikansen av dette.
- Det er ikke gjennomført målinger for å kontrollere formenes geometri, men det er ikke registrert skjeve trykkflater visuelt på prøvelegemene.
- Årsaken til fasthetsreduksjon fra en alder til neste kan også være en sammensetning av de overnevnte faktorene, eller den kan ligge i ukjente faktorer som det ikke er lyktes å redegjort for.

5.5 Temperaturlogging i vegg

Som et ledd i dokumentasjonen av betongens fasthetsutvikling, er det gjennomført temperaturlogging i 19 ulike vegger. Betongtemperaturer er registrert hver halvtime ved hjelp av automatiske loggere, som gjør at man i ettertid kan finne avbindingspunkt og topptemperatur.

I avbindingsperioden har betongen ikke styrke, og den er mulig å vibrere og bearbeide. Mot slutten av denne perioden binder betongen av, og går over i herdeperioden. Betongen har da stivnet, og utvikler fasthet og varme [17]. Betongen utvikler i avbindingsperioden minimalt med varme [48].



Figur 5.17: Prinsippskisse av avbindingsperiode og herdeperiode [17]

Avbindingstidspunktet defineres som det tidspunktet betongens temperatur har økt 2 grader fra den laveste temperaturen [43]. Det er ikke uvanlig at betongtemperaturen synker noen grader etter den er plassert i formen, før den øker igjen. Tiden det tar før betongen når topptemperatur, regnes fra den laveste til den høyeste registrerte temperaturen.

Avbindingstidspunktet og temperaturutvikling er avhengig av betongens sementmengde, tilsetningsstoffer (grad av retardasjon), oppvarming og tildekking av forskaling, betong og luft-temperatur, samt andre værforhold.

Hver temperaturlogger har 3 kanaler, og det er for hver måling registrert temperatur på 3 ulike steder i veggens halve høyde, i 3 av følgende posisjoner:

- POS. I Midt i veggens tverrsnitt, 0,5 meter fra veggens frie ende
- POS. II Veggens overdekning, 2 meter fra veggens frie ende
- POS. III Midt i veggens tverrsnitt, 2 meter fra veggens frie ende
- POS. IV Veggens overdekning, 0,5 meter fra veggens frie ende

Alle vegger er 200 mm brede, og har overdekning 25 ± 10 mm. Veggene har standard etasjehøyde (2400 mm), og er støpt med 19 mm finersforskaling (systemforskaling).

Det var for periode 1 (serie 1-15) ikke nødvendig å varme opp forskalingene for å sikre tilstrekkelig fasthetsutvikling. For de øvrige periodene er det fyrt etter behov. Utgangspunktet for testingen av lavkarbonsementen var at det ikke skulle gjennomføres mer oppvarming for denne betongen enn for normalbetongen. Oppvarmingsbehov ble av byggeplassledelsen fastsatt på bakgrunn av normalbetongens estimerte behov, og lavkarbonbetongen fikk tilsvarende behandling. På denne måten kan man se om fremdriften blir berørt når det gjennomføres samme herdetiltak for de to betongene.

5.5.1 Avbindingstidspunkt og topptemperaturer

Ifølge de tekniske spesifikasjonene, skal lavkarbonbetongen binde av etter 175 min ved laboratorieforhold, altså tilnærmet lik 3 timer. Resultatene viser at betongen har bundet av mellom 3 og 12 timer, avhengig av posisjon i veggen, og betong og luft-temperatur. Gjennomsnittstid for avbinding (både vegger med og uten oppvarming) ligger på 6,5, 6,6, 6,8, og 8,4 timer for henholdsvis POS. I – POS. IV. For å nå topptemperatur ligger gjennomsnittstiden på 14,3, 13,4, 13,9 og 14,7 timer, med topptemperaturer på henholdsvis 24,9, 23,9, 22,6 og 23,0 °C. Samlet gjennomsnitt for alle målinger i alle posisjoner gir avbinding etter 7,1 timer, topptemperatur etter 14,1 timer, og topptemperatur 23,6 °C.

Det ble den 7.februar 2011 målt temperaturutvikling i både referansebetong og lavkarbonbetong. Disse veggene hadde like vind og værforhold, samt lik betongtemperatur ved levering, og er derfor mulig å sammenlikne. Resultatene viser at referansebetongen binder av 1 time før lavkarbonbetongen i posisjon I, og 30 minutter før i posisjon II. For posisjon III mangler det data på grunn av defekt føler. For lavkarbonbetongen er det registrert at det tar 17 og 14 timer til topptemperatur for POS. I og POS. II, mot 12 og 20 timer for referansebetongen. Topptemperaturene er for lavkarbonbetongen registrert til 34,6 og 23,6 °C, mot 27,0 og 30,8 °C i referansebetongen. Topptemperatur på 34,6 °C er for lavkarbonbetongen en del høyere enn gjennomsnittet for de resterende prøvene (i området mellom 22 og 25 grader for de ulike posisjonene), og det mistenkes derfor at føleren har vært direkte påvirket av oppvarmingskilden, selv om det er forsøkt å unngå dette. Det er ikke grunnlag til å trekke konklusjoner basert på kun en prøve referansebetong, men denne enkeltmålingene viser at den som forventet binder av noe hurtigere enn lavkarbonbetongen. Topptemperaturene i referansebetongen er som forventet noe høyere enn gjennomsnittlige topptemperaturer for lavkarbonbetongen. Dette er i tråd med hva som ble funnet i litteraturstudiet.

Tabellen 5.28 viser antall timer til avbinding, samt betong og luft-temperatur. Der det i tabellen er oppgitt N/A, betyr det at betongen ikke har gått til avbinding med tydelig tidspunkt. Dette betyr svært sakte fasthetsutvikling, og i noen tilfeller kan betongen ha stått i fare for å fryse. Serie 16-19, og 27-28 viser at betongen ikke har kommet til tydelig avbinding i det tidsrommet loggeren har stått på. For serie 16 er forskalingen antageligvis ikke varmet opp tilstrekkelig i forhold til værpåkjenningen, noe som gir treg fasthetsutvikling. For serie 17-19 var både luft og betong-temperaturen lav, noe som i praksis førte til at forskalingen ikke kunne rives ved ønsket tidspunkt. For serie 27 og 28 ligger betongtemperaturen 2-2,5 grader under bestilt, og luft-middeltemperatur ligger på omtrent 2 °C. Disse veggene har ikke hatt tilstrekkelig oppvarming i forhold til værpåkjenningen, og har dermed ikke gitt tydelig

avbindingstidspunkt. Flygeaskeementens lave klinkerinnhold gjør at betongen har “lite motor”, som innebærer at den utvikler lite varme på grunn av lavt C₃A-innhold. De slanke konstruksjonene gir stort overflateareal i forhold til antall m³ betong, og det er derfor en utfordring å holde på varmen. De uregelmessige fasthetsresultatene viser derfor sammen med de uklare avbindingstidspunktene at denne betongen krever tett oppfølging i forhold til herdeforhold når den brukes i bygg på vinterstid.

LAVKARBONBETONG										
DATO	SERIE	ANTALL TIMER TIL AVBINDING				BETONG - TEMPERATUR	LUFT-TEMPERATUR (°C)			
		Pos. I	Pos. II	Pos. III	Pos. IV		Støpetidspunkt	Middel	Maks	Min
04.10.10	2 / 3	-	7,0	6,5	7,0	15,0 / 15,0	10,8 / 10,9	11,3	11,9	10,6
05.10.10	4	5,5	6,5	-	5,5	15,0	12,3	11,1	15,5	9,7
06.10.10	6/7 - I	-	10,0	9,0	8,0	15,0 / 15,0	10,1 / 10,2	10,4	12,5	9,2
06.10.10	6/7 - II	-	8,5	9,0	9,5	15,0 / 15,0	10,1 / 10,2	10,4	12,5	9,2
07.10.10	8 / 9	8,5	5,5	X	-	16,5 / 16,5	14,1 / 12,8	11,4	15,5	8,4
11.10.10	10 / 11	-	7,5	11,5	12,0	21,0 / 20,0	8,7 / 7,4	3,9	8,7	0,8
12.10.10	12 / 13	5,0	6,0	7,0	-	20,0 / 20,0	10,3 / 9,5	6,0	10,7	0,8
16.11.10	16	N/A	N/A	N/A	-	18,0	0,9	-1,5	1,5	-4,2
18.11.10	17 / 19	N/A	N/A	N/A	-	13,5 / 14,3	-4,0 / -4,2	-4,7	-3,7	-6,0
19.11.10	20 / 21	8,5	7,5	8,5	-	17,7 / 16,7	-4,4 / -4,0	-4,7	-3,6	-5,4
23.11.10	22	4,5	4,0	3,5	-	18,6	-4,4	-3,8	-2,4	-5,0
24.11.10	A	9,0	6,5	3,5	-	N/A	N/A	-7,2	-4,6	-9,4
25.11.10	24	6,0	6,0	6,5	-	19,0	-7,5	-7,2	-4,6	-9,4
29.11.10	25 / 26	4,0	3,5	3,0	-	18,0 / 16,3	-6,2 / -7,2	-8,6	-6,0	-11,3
30.11.10	B	8,5	5,5	X	-	N/A	N/A	-10,7	-9,5	-11,5
03.02.11	27	N/A	N/A	N/A	-	20,0	4,8	1,9	5,5	-1,3
03.02.11	28	N/A	N/A	N/A	-	19,5	4,8	1,9	5,5	-1,3
07.02.11	29	6,0	7,0	X	-	19,0	-4,0	-4,0	1,4	-7,3
Gj.Snitt		6,6	6,5	6,8	8,4					
Std.avvik		1,9	1,7	2,8	2,5					
Maks		9,0	10,0	11,5	12,0					
Min		4,0	3,5	3,0	5,5					

REFERANSEBETONG										
DATO	Serie	ANTALL TIMER TIL AVBINDING				BETONG - TEMPERATUR	LUFT-TEMPERATUR (°C)			
		Pos. I	Pos. II	Pos. III	Pos. IV		Støpetidspunkt	Middel	Maks	Min
07.02.11	30	5,0	6,5	5,5	-	19,0	-4,0	-4,0	1,4	-7,3

Tabell 5.28: Antall timer til avbinding, samt betong og luft-temperatur

Forklaring til tabell

- A og B Logging i vegg uten serienavn
- Hver temperaturlogger har 3 utganger, og minustegnet betyr at det ikke er målt temperatur i denne posisjonen
- X Defekt føler

Resultatene viser relativ stor spredning mellom største og minste avbindingshastighet innenfor de forskjellige posisjonene, og reflekterer ulike herdeforhold. Avbindingstidspunktene ned mot 3 timer tilsvarer herding i laboratorie, og er et resultat av at forskalingen er varmet

opp. Basert på erfaringer fra Veidekke V-teknikk, skulle man forvente at denne betongen binder av etter 7-9 timer for de gitte forhold [63]. Serie 1-9 har ikke hatt oppvarming av forskalingen, og betongtemperaturene ved leveranse har vært lik (15 °C). Disse veggene har også hatt samme værforhold (middeltemperatur på 10 - 11 °C), og er derfor egnet for sammenlikning. Disse seriene har hatt gjennomsnittlig avbinding på 7,0, 7,5, 8,2 og 7,5 timer i henholdsvis POS. I – POS. IV, noe som er høyere enn for det samlede gjennomsnittet. Årsaken til dette kan være at senere serier er levert med høyere betongtemperatur, eller at oppvarming har gitt høyere avbindingshastighet en for seriene uten oppvarming av forskaling. Gjennomsnittlig topptemperatur for serie 1-9 ligger på henholdsvis 24,6, 23,7, 24,1 og 22,9 grader, noe som er tilsvarende som for det samlede gjennomsnittet.

LAVKARBONBETONG									
DATO	SERIE	ANTALL TIMER TIL TOPPTEMPERATUR				TOPPTEMPERATUR (°C)			
		Pos. I	Pos. II	Pos. III	Pos. IV	Pos. I	Pos. II	Pos. III	Pos. IV
04.10.10	2 / 3	-	14,0	14,5	14,0	-	22,6	23,4	22,2
05.10.10	4	17,5	17,5	-	16,5	25,0	22,6	-	24,6
06.10.10	6/7 - I	-	23,5	22,0	14,5	-	23,0	25,6	22,0
06.10.10	6/7 - II	-	16,5	17,0	16,5	-	23,1	23,2	23,0
07.10.10	8 / 9	14,0	14,0	X	-	24,2	27,2	X	-
11.10.10	10 / 11	-	8,5	11,5	12,0	-	21,8	22,8	23,0
12.10.10	12 / 13	9,0	9,5	10,0	-	23,4	24,0	24,4	-
16.11.10	16	N/A	N/A	N/A	-	N/A	N/A	N/A	-
18.11.10	17/18/19	N/A	N/A	N/A	-	N/A	N/A	N/A	-
19.11.10	20 / 21	18,5	11,5	16,0	-	20,4	18,2	17,0	-
23.11.10	22	12,0	7,5	7,5	-	26,8	20,8	21,8	-
24.11.10	A	9,5	10,0	11,5	-	9,2	22,4	12,8	-
25.11.10	24	15,0	12,0	13,5	-	24,8	24,2	25,0	-
29.11.10	25 / 26	16,5	12,5	15,0	-	35,8	34,4	30,2	-
30.11.10	B	X	17,0	X	-	X	26,4	X	-
03.02.11	27	N/A	N/A	N/A	-	N/A	N/A	N/A	-
03.02.11	28	N/A	N/A	N/A	-	N/A	N/A	N/A	-
07.02.11	29	17,0	14,0	-	-	34,6	23,6	X	-
	Gj.Snitt	14,3	13,4	13,9	14,7	24,9	23,9	22,6	23,0
	Std.avvik	3,5	4,2	4,1	1,9	7,8	3,7	4,8	1,0
	Maks	18,5	23,5	22,0	16,5	35,8	34,4	30,2	24,6
	Min	9,0	7,5	7,5	12,0	9,2	18,2	12,8	22,0

REFERANSEBETONG									
DATO	SERIE	ANTALL TIMER TIL TOPPTEMPERATUR				TOPPTEMPERATUR (°C)			
		Pos. I	Pos. II	Pos. III	Pos. IV	Pos. I	Pos. II	Pos. III	Pos. IV
07.02.11	30	12,0	20,0	16,5	-	27,0	30,8	33,4	-

Tabell 5.29: Antall timer til topptemperatur, og registrert topptemperatur med temperaturlogger

5.5.2 Temperaturlogging - Feilkilder

- Intensjonen har vært å plassere temperaturfølerne slik at de ikke påvirkes direkte av oppvarmingskilden (varmluft). Denne kan likevel flyttes etter at føleren er plassert i vegg. Det er ut i fra resultatene sannsynlig at oppvarmingskilden i enkelte tilfeller kan ha påvirket føleren direkte ved at den har stått for nær.
- En mulig feilkilde er at kanalene kan byttes om når de plasseres i vegg, slik at feil temperatur fremkommer for feil posisjon. Dette kan være tilfelle dersom to følere som ligger nærme hverandre viser store forskjeller i avbindingstidspunkt og topptemperatur.
- Å lese av og tolke avbindingstidspunktet gjøres ved å finne 2 graders temperaturøkning i et datasett med temperaturer, noe som gir rom for feiltolking.

6 Konklusjoner

Problemstillingen “Hvordan egner lavkarbonsement seg til bruk i Norge vinterstid?” er behandlet gjennom feltarbeid på Åstadryggen. Det kan trekkes følgende slutninger fra arbeidet:

Ferskbetongegenskaper

- Slumpmålingene viser at lavkarbonbetongen har bearbeidelighet tilsvarende referansebetongen med slump ≥ 180 . Det ble ikke funnet statistisk signifikante forskjeller mellom referansebetongen og lavkarbonbetongen for betong med bestilt slump 180. Hypotesen om at betongen har bearbeidelighet bedre eller tilsvarende referansebetongen, er dermed bekreftet for betonger med slump ≥ 180 . For betonger med slump < 180 mangler det data for å bekrefte/avkrefte hypotesen.
- Det er ikke registrert forskjell i tidsbruk for kompaktering av lavkarbonbetongen og referansebetongen. Det er ikke mulig å bekrefte/avkrefte hypotesen om at lavkarbonbetongen trenger mindre kompakteringsenergi enn referansebetongen. Årsaken er at det i ettertid viste seg at undersøkelsesmetoden basert på intervju ikke ga godt nok konkluderingsmateriale.
- På grunn av lavkarbonbetongens flygeaskeinnhold oppleves denne betongen som noe stivere enn referansebetongen ved samme slump. For slump ≥ 180 er ikke dette noe problem, fordi betongen responderer godt på vibrator. Det er i løpet av prøveperioden registrert slump 150 to ganger. Med den gitte betongsammensetningen er lavkarbonbetongen ikke egnet til bruk ved denne slumpen, fordi den blir seig og ikke responderer like godt på vibrator. Det er verd å merke seg at slump 150 ligger innenfor betongprodusentens leveringskriterier for betong med bestilt slump 180. Det er ikke gjennomført forsøk for å kontrollere om lavkarbonbetongen og referansebetongen har samme bearbeidelighet med slump 150. Det er ikke fremkommet data for slump 160 og 170.
- Lavkarbonbetongen inneholder signifikant mindre luft enn referansebetongen, og bekrefter hypotesen om at lavkarbonbetongen inneholder mindre luft. Dette er i tråd med funnene i litteraturstudiet.
- Flygeaskens filler-effekt bidrar til tette og jevne overflater. Det er registrert lite porer på veggene med flygeaskebetong. På bakgrunn av personlige oppfatninger til byggeplassledelse og arbeidere, kan det konkluderes med at lavkarbonbetongen gir penere og tettere overflater enn referansebetongen.

Værpåkjønning

- Resultatene fra testperiodene viser at det ikke er registrert forsinkelser og økt tidsbruk ved bruk av flygeaskebetongen på Åstadryggen. Det har altså vært mulig å rive forskalingen på tilsvarende måte som med bruk av normalbetong. Dette avkrefter hypotesen om at bruk av denne betongen fører til forsinkelser på byggeplass under de her rådende forhold.
- Bruk av lavkarbonsement har i forbindelse med fremdrift og fasthetsutvikling vært uproblematisk til bruk ved temperaturer ned mot $-8/10$ °C med tilhørende flau vind. Det ser ikke ut til at fremdriften blir berørt når det gjennomføres samme herdetiltak for referansebetongen og lavkarbonbetongen ned mot $-8/10$ °C. Det indikeres på bakgrunn av byggeplassledelsens personlige erfaringer, at det er behov for mer oppvarming av lavkarbonbetong-forskalingen ved temperaturer under $-8/10$ °C for å opprettholde fremdrift. Forsøket indikerer at det er behov for utvidede herdetiltak i forhold til referansebetongen når temperaturen synker under $-8/10$ °C.
- Det var ikke middeltemperatur under -10 °C i periodene med støping, og forsøket avdekker derfor ikke hvordan fremdrift og herdetiltak påvirkes av temperaturer under -10 °C.
- Betongen fungerer bra og er egnet til byggeplassbruk under de gitte værforhold, dette på tross av at målte betongtemperaturer generelt har vært lavere enn bestilt. Betongtemperatur er et viktig parameter for fasthetsutvikling og fremdrift, og her er det rom for forbedringspotensiale fra produsenten.

Fasthetsutvikling

- Resultatene fra periode 1 og 2 viser at lavkarbonbetongen ikke når kravet til karakteristisk fasthet ($f_{ck} = 25,1 < 30$ Mpa). Årsaken til dette er at utvalget har høyt standardavvik (6,9) og lav gjennomsnittsfasthet (34,8 Mpa). Det er sannsynlig at dette i hovedsak skyldes ugunstige herdeforhold.
- Kravet til karakteristisk fasthet nås heller ikke for utvalget i periode 3 og 4 ($f_{ck} = 29,8 < 30$ Mpa). Dette skyldes blant annet en undermåler som øker standardavviket (3,7), og senker gjennomsnittsfastheten (36,1 Mpa).
- Det er kun resultatene fra periode 3 som delvis viser forventet fasthetsutvikling og standardavvik. Resultatene fra de øvrige periodene viser generelt høye standardavvik ved alle aldre, og har fasthetsutvikling som strider mot kjent betongteknologi. Resultatene fra dette forsøket viser at betongen kun når 28- døgns karakteristisk fasthet tilsvarende B20. Fasthetsresultatene er imidlertid usikre, og gir på grunn av utslagsgivende feilkilder, ikke generelt grunnlag for å konkludere vedrørende lavkarbonbetongens egnethet til å nå karakteristisk fasthet.
- Resultatene indikerer at flygeaskebetongens herdeforhold er av stor betydning for fasthetutvikling. Dette er i tråd med den presenterte litteraturen i kapittel 2.
- Regresjonsanalysene etter periode 1 og 2 viser ikke signifikante sammenhenger mellom fasthet og henholdsvis slump, luft, betongtemperatur og terningvekt. Det finnes heller ikke klare sammenhenger mellom lav/høy tidligfasthet og lav/høy fasthet ved senere aldre. Årsakene til dette kan være at fasthetsutviklingen ikke har vært som forventet, og spredningen i materialet er stort.
- I forhold til hvilke fasthetsutvikling vi ser i lavkarbonbetongen over tid, er det på bakgrunn av det usikre datamaterialet ikke mulig å trekke sikre konklusjoner. Det er dermed ikke mulig å bekrefte eller avkrefte hypotesen om at lavkarbonbetongen har høyere fasthet en normalbetongen ved 91 døgn. Tendensene fra forsøket indikeres likevel:
 - Resultatene fra periode 1 og 2 viser at lavkarbonbetongen tar igjen referansebetongen med tanke på fasthet omtrent ved 75 dager.
 - Resultatene fra periode 3 viser at lavkarbonbetongens fasthetsutvikling flater ut fra 56 døgn til 91 døgn, og viser dermed ikke den forventede fasthetsveksten ved senere aldre. Resultatene fra periode 3 viser at lavkarbonbetongen i hovedsak ikke tar igjen referansebetongen ved 91 døgn.

- Gjennomsnittet av alle 91 døgns fasthetene, gir et forventet fasthetsnivå på 51,6 Mpa ved 91 døgn. Denne forventningens standardavvik er 7,1.

Avbinding og temperaturutvikling

- Resultatene viser at lavkarbonbetongen har bundet av mellom 3 og 12 timer, avhengig av posisjon i veggen, oppvarming, samt betong- og luft-temperatur. Gjennomsnittstid for avbinding (både vegger med og uten oppvarming) ligger på 6,5, 6,6, 6,8, og 8,4 timer i henholdsvis POS. I – POS. IV. For å nå topptemperatur ligger gjennomsnittstiden på 14,3, 13,4, 13,9 og 14,7 timer, med topptemperaturer på henholdsvis 24,9, 23,9, 22,6 og 23,0 °C.
- Logging av vegger som ikke har hatt oppvarming, samt like værforhold og betongtemperatur, viser avbinding ved 7,0, 7,5, 8,2 og 7,5 timer (POS. I – POS. IV).
- Noen temperaturlogger viser svært lav fasthetsutvikling, der veggen har stått i fare for å fryse. Dette skyldes lav betongtemperatur ved levering og/eller for lite oppvarming av forskaling. På tross av dette er det ikke registrert forsinkelser på byggeplass som skyldes bruk av denne sementen. De uklare avbindingstidspunktene viser sammen med de generelt uregelmessige fasthetsresultatene at denne betongen er sensitiv for temperaturforhold, og krever tett oppfølging i forhold til herdetiltak når den brukes i bygg på vinterstid.
- Ved sammenlikning av avbindingstidspunkt for referansebetong og lavkarbonbetong ved like forhold, binder referansebetongen av mellom 0,5 og 1 time hurtigere enn lavkarbonbetongen. Det er imidlertid sannsynlig at temperaturfølerne til flygeaskebetongen har vært direkte påvirket av oppvarmingsovnen, noe som gjør disse resultatene usikre.

Gjeldende regelverk

- Lavkarbonsementen er egnet til bruk med dagens regelverk, men krever at byggherre og rådgivende ingeniør påtar seg dokumentasjonsansvaret ved bruk av sementen.
- Norsk Standard ønsker ikke å åpne for at 56 eller 91 døgns fasthet kan benyttes som dimensjonerende fasthet, og bruk av denne sementen må derfor forholde seg til de eksisterende regler for 28 døgns dimensjonerende fasthet.

7 Oppsummering og avslutning

De presenterte konklusjoner viser at lavkarbonbetongens egnethet er tilfredsstillende med hensyn på bearbeidelighet og kompakteringsbehov, innenfor de gitte avgrensninger. Med tanke på fasthetsutvikling og oppvarmingsbehov, er lavkarbonbetongen benyttet ned mot $-8/10\text{ }^{\circ}\text{C}$, med tilhørende flau vind, uten at det var behov for herdetiltak utover det man trengte for å sikre fasthetsutvikling for normalbetongen. Det er ikke registrert forsinkelser av byggeplassens planlagte fremdrift som skyldes bruk av lavkarbonsementen, noe som viser at betongen har fungert tilfredsstillende under de gitte forhold. Fasthetsresultatene fra forsøket er usikre, og gir på grunn av utslagsgivende feilkilder, ikke generelt grunnlag for å konkludere vedrørende lavkarbonbetongens egnethet til å nå karakteristisk fasthet. De resultater som foreligger viser imidlertid at betongen kun oppnår 28-døgns karakteristisk fasthet tilsvarende B20. Gjennomsnittet av alle 91 døgns fasthetene, gir et forventet fasthetsnivå på 51,6 Mpa ved 91 døgn. Flygeaskebetongen har signifikant mindre naturlig luft enn normalbetongen, og bruken av den gir tette og pene overflater med lite porer. Skal betongen benyttes i aktuelle bestandighetsklasser (eksempelvis M60), faller dokumentasjonsansvaret på byggherren.

Med de forutsetninger og avgrensninger som er nevnt i forrige kapittel, kan lavkarbonsementen sies å være egnet til bruk under vinterforhold i Norge. Erfaringene med sementen er i tråd med litteraturen, der det fremholdes at flygeaskeement på grunn av pozzolanreaksjonen er sensitiv for temperatur og fuktbetingelser under herding. Generelt uregelmessig fasthetsutvikling viser sammen med uklare avbindingstidspunkt for noen målinger, at betongen krever tett oppfølging med hensyn til herdetiltak når den brukes i bygg på vinterstid.

8 Videre arbeid

Det indikeres her noen momenter som kan være utgangspunkt for videre arbeid:

- Forblir tungmetallene passivisert når flygeaskebetong rives og benyttes til andre formål? Hvilke miljøkonsekvenser har videre benyttelse av revet flygeaskebetong?
- Det er behov for systematisk data, for å avklare betydningen av herdetemperatur for lavkarbonbetongen. Hvordan påvirker ulike herdetemperaturer lavkarbonbetong vs normalbetong?
- Forsøkene har vist at det ved støping under $-8/10$ grader, indikeres behov for mer oppvarming av lavkarbonbetongen for å opprettholde planlagt fremdrift. I videre arbeid foreslås det å finne en mer eksakt grense, basert på målinger gjennom mer kontrollerte forsøk, som ikke er avhengig av fremdriften på en byggeplass.
- Hvordan fungerer lavkarbonsementen under -10 °C, og hvordan påvirker bruken av lavkarbonsementen under -10 °C oppvarmingskostnadene? Det kan også undersøkes hvor grensen går for når fyretiltak må gjennomføres for å sikre tilstrekkelig fasthetsutvikling.
- De usikre fasthetsresultatene gjør at det ikke er grunnlag for å generelt konkludere vedrørende lavkarbonbetongens egnethet til å nå karakteristisk fasthet. Det er heller ikke lyktes i å entydig dokumentere den forventede tiltakingen av fasthet ved senere aldre. Ved videre forsøk bør herdeforholdene vies spesiell oppmerksomhet.
- Dette forsøket lyktes ikke i å bekrefte eller avkrefte hypotesen om at lavkarbonbetongen krever mindre kompakteringsenergi på grunn av utilstrekkelig datagrunnlag. For å undersøke dette bør det settes opp mer kontrollerte forsøk.
- Det mangler systematisk data og forsøk som kan avgjøre om den benyttede flygeasken gir økt slump ved et gitt $v/(c+FA)$ - forhold.
- Det bør i videre arbeid legges som forutsetning at kontrollbetongen har samme v/c -forhold som flygeaskebetongen, slik at feilkilder i sammenlikningsgrunnlaget reduseres. Det bør også benyttes sementer fra samme produsent. Det bør også legges som forutsetning at prøver som tas på byggeplass oppbevares under korrekte temperaturer før av-forming. Det bør også vurderes om plansliping er noe som burde gjennomføres på terninger med utilfredsstillende geometri. Dette er ikke blitt praktisert på terningene i dette forsøket.

Vedlegg A - Metode for prøving på byggeplass

A.1 Utstyr

- 100*100 mm betongformer av stål
- Forskalingsolje til å smøre formene
- Komprimeringsstav
- Betongspade
- Trillebår
- Papir/Håndkle til å fjerne betongsøl
- Merketusj
- Tildekkingsplast
- Stålbørste for rengjøring av former
- Frostfritt og vannrett lagringssted for betong under herding
- Tilgang til vann for rengjøring av utstyret

- Luftbøtte
- Flaske med påfyllingsvann

- Vannrett, ikke-sugende underlag
- Slumpkjegele
- Målestokk

- Elektronisk termometer for måling av betongtemperatur

- Automatisk værstasjon
 - Vindsensor - vindstyrke
 - Vindsensor - vindretning
 - Temperatursensor
 - Harddisk for lagring av værdata
 - PC og utstyr for nedlasting og prosessering av data

- Automatiske temperaturloggere
 - Følere (kabel) som festes i overdekningsjern før forskalingen lukkes
 - Monteringsverktøy for kabler
 - PC og utstyr for nedlasting og prosessering av data

A.2 Fasthetsprøving

Støping av prøver for fasthetsprøving er gjort etter NS-EN 12390-2 [60]. Det er benyttet stålformer med dimensjon 100*100 mm, som er smurt med forskalingsolje før prøvetakingen. Betongen er hentet i trillebår fra betongbilen, og blandet godt før formene ble fylt. Det er benyttet både flat og rund spade til fylling av betongformen. Prøvene er komprimert i tre lag ved hjelp av komprimeringsstav, der støtene er jevnt fordelt over tverrsnittet av formen. Betongen er påført 25 støt per lag, og det er sørget for at komprimerings-staven ikke har truffet bunnen av formen hardt, eller trengt vesentlig ned i tidligere lag.



Figur A.1 Betongformer [1]



Figur A.2: Spade, komprimeringsstav, slumpkjegle [1]

I periode 1 og 2 er formene løftet opp ca 10 cm, og sluppet ned i 5 omganger for å slippe ut eventuell luft etter ferdig komprimering. I periode 3 og 4 ble komprimeringsstaven benyttet til å dunke på utsiden av formene for å slippe ut innesteng luft.

I periode 1 og 2 ble overflødig betong fjernet og rettet av med spade. Resultatene fra disse periodene viste noe høye densiteter (målt vekt) på prøvelegemene, og komprimeringsstaven ble i periode 3 og 4 derfor benyttet til å "sage" av overflødig betong.

Prøvene er deretter umiddelbart dekket med plast og flyttet til container for lagring over natten. De ulike prøveseriene er merket slik at de entydig kan identifiseres. Prøvelegemene er så lagret i minst 16 timer i prøveformene, men ikke lengre enn 3 døgn, beskyttet mot vibrasjoner, uttørking og støt.



Figur A.3: Fersk betong til herding i container [1]



Figur A.4: 1- døgns prøver [1]

Prøvene er i all hovedsak avformet neste dag, og transportert med bil til Unicons betonglaboratorium på Sjursøya i Oslo. Her er prøvelegemene entydig merket med prøveserienummer, terningnummer og alder de skal trykkes på, før de er lagt i herdekar for herding frem til trykking. Unicons betonglaboratorium-personale har tatt ansvar for å plassere prøvene i herdekar, og registrere prøvene i deres interne prøverutiner.

NS-EN 12390 - 2 [60] angir at prøvelegemene skal lagres ved $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Det har ikke vært mulig å oppnå kontrollerte temperaturer det første døgnet siden prøvene er lagret i en container, men det har til enhver tid vært frostfritt på grunn av oppvarming med vifteovn. Noen prøvelegemer er også transportert rett til Unicon etter prøvetaking, for å oppnå kontrollerte temperaturer. All trykking av prøver er utført av laboratoriepersonalet på Unicon Sjursøya.

Til trykking er det benyttet automatisk trykkprøvingsmaskin av typen:

FORM+TEST, SEIDNER+CO GMBH

Type: CSRG -5505, Byggeår 1988



Figur A.5: Prøvelegeme i trykkprøvemaskin [1]



Figur A.6: Plassering av prøvelegemene i vannbad hos Unicon [1]

A.3 Luftinnhold og temperaturmåling

Luftinnhold er målt med luftbøtte av typen FORM+TEST, Profsystem - 8 liters luftbøtte som viser luftporeinnhold i %. Denne er fylt i tre like lag, og det er komprimert med 25 støt med komprimeringsstaven mellom hver påfylling. Etter siste komprimering er overflødig betong fjernet slik at overflaten er vannrett med kanten av bøtten. Det er så benyttet papir til å tørke langs kanten av bøtten, slik at det oppnås fullstendig tetting mellom luftbøttekanten og gummipakningen til lokket. Lokket er så festet med fastmonterte klemmer. Det fylles deretter på vann helt til vannet som kommer ut på motstående ventil, ikke inneholder luftbobler. Vannpåfyllingsåpningen tettes deretter, slik at luftbøtten er tett. Luftventilen skrues så igjen, og bøtten pumpes opp med luft helt til nålen på avlesningsskalaene er passert det røde kalibreringsmerket. Luftventilen åpnes så forsiktig slik at nålen treffer nøyaktig på det røde merket, og stenges på dette punktet. Hendelen på luftbøtten trykkes så ned, og holdes der helt til nålen stabiliserer seg. Betongens luftinnhold i % kan deretter leses direkte av på skalaen.

For å måle betongtemperatur er det benyttet elektronisk termometer av typen COMARK, C28 K TYPE. Temperatur er enten målt direkte i tobben, eller den er målt rett etter at betongen er kommet i trillebåren.



Figur A.7: Luftbøtte [1]

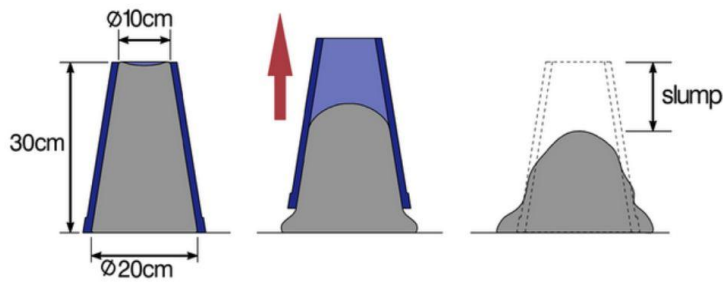


Figur A.8: Termometer [1]

A.4 Slump-test

Betongens slump er målt med slumpkjegle. Betongen er fylt i 3 like lag i slumpkjeglen, der det er komprimert 25 ganger med komprimeringsstav mellom hver fylling. Det er sørget for at staven ikke dunker ned i underlaget, og ikke trykkes vesentlig ned i underliggende lag.

Når kjeglen er fylt og ferdigkomprimert, er overflødig betong fjernet, før kjeglen er løftet horisontalt opp med jevn bevegelse i løpet av 3 sekunder. Slumpen måles dermed som avstanden mellom toppen av den fjernede kjeglen og øverste punkt på den sammensunkede betongen. Betongslumpen angis i millimeter, og en slump på eksempelvis 200 betyr at betongen har seget sammen 200 mm etter at kjeglen ble fjernet. Begrepene synkmål og slumpmål brukes om hverandre og betyr det samme.



Figur A.9: Prinsippskisse for måling av slump [5]



Figur A.10: Måling av slump [1]

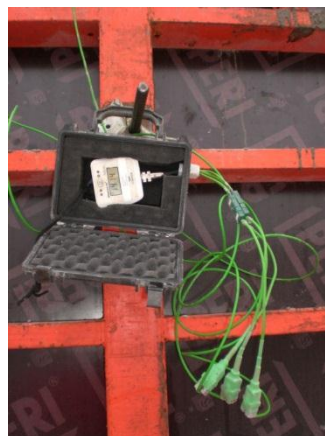
A.5 Værmålinger og temperaturmålinger i vegg

Til kontinuerlige værmålinger er det i periode 1 og 2 benyttet automatisert loggeutstyr av typen: AADI AANDERAA DATA INSTRUMENTS, met station for research. Værstasjonen har vært utstyrt med vindhastighet, vindretning og temperatursensor. Værdata har vært registrert hvert 20. min, og blitt lagret på en ekstern harddisk, som i etterkant er lastet ned og bearbeidet på datamaskin. Det er på bakgrunn av disse målingene regnet ut gjennomsnitts-, maks- og min- temperatur over døgnet. Dataene fra denne værstasjonen er kvalitetsjekkert opp mot meteorologisk institutts værstasjon på Asker. For periode 3 og 4 er det hentet værdata fra Asker gjennom yr.no [64], som ligger ca 6 km fra byggeplassen.

Til kontinuerlig måling av temperaturutvikling i vegg er det benyttet automatisert loggeutstyr av typen: COMARK, Diligence E, N2014 - beskyttet i PELI 1120 Case. Denne sensoren er utstyrt med 3 temperaturloggere, som gjør det mulig å registrere temperaturutviklingen på 3 ulike steder i en vegg. En fjerde sensor registrerer lufttemperatur. Dataene er i ettertid lastet ned på datamaskin og bearbeidet.



Figur A.11:
Montert
værstasjon [1]



Figur A.12: Temperatur-
logging vegg [1]

Vedlegg B - Resultater

B.1 Slump, luft og betongtemperatur

Pøveserie	Prøvedato	Bestilt vare		Målt på byggeplass				Målt på Unicon		
		Synkmål	Temperatur	Temperatur	Synkmål	Luftinnhold	Konsistens	Temperatur	Luftinnhold	Synkmål
Periode 1										
Serie 1	29.09.2010	180	Ingen	16,0	150	2,0	seig, sjur, treg	16,0	2,1	180
Serie 2	04.10.2010	200	Ingen	15,0	220	1,5	bløt, flyter lett ut	14,0	4,3	200
Serie 3	04.10.2010	200	Ingen	15,0	210	1,0	bløt, flyter lett ut	-	-	-
Serie 4	05.10.2010	200	Ingen	15,0	220	0,8	bløt, flyter lett ut	15,0	3,5	210
Serie 5	05.10.2010	180	Ingen	17,5	200	2,6	bløt, mindre treg	-	-	-
Serie 6	06.10.2010	200	Ingen	15,0	230	0,7	svært bløt	-	-	-
Serie 7	06.10.2010	200	Ingen	15,0	200	0,7	bløt	15,0	3,0	210
Serie 8	07.10.2010	200	Ingen	16,5	230	0,6	bløt	-	-	-
Serie 9	07.10.2010	200	Ingen	16,5	220	0,7	svært bløt	-	-	-
Serie 10	11.10.2010	200	Ingen	21,0	210	0,6	bløt	-	-	-
Serie 11	11.10.2010	200	Ingen	20,0	210	0,9	bløt	-	-	-
Serie 12	12.10.2010	200	Ingen	20,0	200	1,0	holdt bestil synk	21,0	-	200
Serie 13	12.10.2010	200	Ingen	20,0	250	0,6	svært bløt	-	-	-
Serie 14	13.10.2010	200	Ingen	16,0	230	1,0	bløt	-	-	-
Serie 15	13.10.2010	180	Ingen	20,0	170	4,2	noe stiv	-	-	-
Periode 2										
Serie 16	16.11.2010	180	22,0	18,0	220	0,7	bløt	-	-	-
Serie 17	18.11.2010	180	22,0	13,5	200	0,9	harsk, bløt	-	-	-
Serie 18	18.11.2010	180	22,0	14,5	225	2,9	Ok	-	-	-
Serie 19	18.11.2010	180	22,0	14,5	200	1,4	Ok	-	-	-
Serie 20	19.11.2010	180	22,0	17,5	200	1,0	Fin konsistens	-	-	-
Serie 21	19.11.2010	180	22,0	16,5	150	2,0	Sjur - stiv	-	-	-
Serie 22	23.11.2010	180	22,0	18,5	190	-	Ok	-	-	-
Serie 23	25.11.2010	180	22,0	19,5	180	-	Ok	-	-	-
Serie 24	25.11.2010	180	22,0	19,0	180	1,1	Ok	-	-	-
Serie 25	29.11.2010	180	22,0	18,0	180	1,4	OK etter 3-4 liter SP	-	-	-
Serie 26	29.11.2010	180	22,0	16,0	180	1,4	OK etter 3-4 liter SP	-	-	-
Periode 3										
Serie 27	03.02.2011	180	22,0	20,0	220	0,9	bløt og fin	-	-	-
Serie 28	03.02.2011	180	22,0	19,5	210	0,9	bløt og fin	-	-	-
Serie 29	07.02.2011	200	20,0	19,0	230	0,9	bløt	-	-	-
Serie 30	07.02.2011	180	22,0	19,0	200	2,3	Ok	-	-	-
Serie 31	08.02.2011	200	20,0	19,5	200	0,8	Ok	-	-	-
Periode 4										
Serie 32	18.02.2011	200	22,0	20,0	210	0,7	Ok	-	-	-
Serie 33	18.02.2011	200	22,0	18,0	220	-	Ok	-	-	-
Serie 34	18.02.2011	200	22,0	18,0	200	-	Ok	-	-	-
Serie 35	18.02.2011	200	22,0	18,0	210	-	Ok	-	-	-
Serie 36	18.02.2011	200	22,0	17,0	210	-	Ok	-	-	-
Serie 37	18.02.2011	200	22,0	18,0	210	-	Ok	-	-	-

Tabell B.1: Slump, betongtemperatur og luftinnhold for alle serier

Tabellen viser resultater for betongtemperatur, synkmål og luftinnhold for henholdsvis bestilt vare, målt på byggeplass, og målt på laboratoriet til Unicon før betongen ble kjørt ut til Åstadryggen. Seriene som står i fet skrift er av referansebetongen Aalborg Portland Rapid, mens de resterende seriene er lavkarbonbetong.

B.2 - Fasthetsresultater fra periode 1 og 2

Alle resultater er gjennomsnitt av to prøver, og angitt i Mpa. Densitet er målt som vekten (gram) av en terning på tilnærmet lik en liter.

Serie	1 døgn		2 døgn		7 døgn		14 døgn		28 døgn		56 døgn		91 døgn	
	densitet	fasthet	densitet	fasthet	densitet	fasthet	densitet	fasthet	densitet	fasthet	densitet	fasthet	densitet	fasthet

Lavkarbonsement

1	2471	9,4	2478	19,1	2491	30,5	2491	40,8	2482	39,5	2467	51,9	2451	46,4
2	2475	15,0	2447	21,1	2447	24,3	2461	26,5	2495	34,2	2491	37,9	2478	39,6
3	2404	12,1	2486	18,9	2421	24,5	2443	23,9	2388	30,7	2469	36,7	2378	38,6
4	2438	10,7	2453	18,5	2455	34,4	2461	21,0	2462	32,4	2471	48,8	2489	41,3
6	2458	15,0	2486	19,6	2463	26,1	2499	20,3	2473	30,6	2502	46,3	2485	46,7
7	2474	15,4	2474	20,3	2493	26,5	2492	18,6	2404	26,7	2475	38,8	2435	42,3
8	2508	24,8	2541	26,6	2494	25,4	2523	17,2	2507	30,2	2478	29,9	2504	52,3
9	2490	23,1	2464	26,0	2478	28,7	2472	17,1	2440	29,4	2472	40,7	2480	51,1
10	2510	10,7	2486	15,9	2466	19,5	2502	24,7	2548	27,4	2548	36,5	2478	48,2
11	2509	11,8	2447	18,2	2479	24,9	2480	29,3	2491	30,7	2491	39,6	2482	53,1
12	2522	4,1	2498	16,3	2553	27,7	2542	33,7	2551	31,8	2561	41,8	2535	56,4
13	2505	4,3	2495	17,2	2494	28,6	2482	35,1	2531	35,5	2503	42,2	2486	59,3
14			2439	10,9	2477	22,8	2488	26,0	2479	46,0	2472	42,0	2492	50,2
16	2479	10,7	2464	15,8	2419	22,0	2390	28,0	2428	27,1	2444	38,4	2504	48,0
17					2484	21,3	2413	29,5	2462	26,5	2410	37,2		
19					2423	23,2	2485	32,6	2430	35,1	2478	41,7	2446	55,8
20					2456	29,1	2489	33,2	2531	34,4	2536	47,6	2480	53,5
21					2487	29,8	2484	36,4	2473	46,9	2484	57,6	2506	64,1
22					2379	17,9	2368	30,1	2345	37,1	2348	40,2	2322	48,6
24	2440	14,0	2471	18,1	2465	30,1	2487	32,1	2516	49,6	2489	50,5	2532	62,9
25	2489	9,5	2471	15,8	2481	26,2	2464	45,1	2465	43,8	2482	61,1	2490	66,7
26	2448	7,8	2465	13,4	2485	29,1	2500	41,8	2444	39,6	2474	58,4	2486	57,8
Snitt	2476	12,4	2474	18,3	2468	26,0	2473	29,2	2470	34,8	2479	43,9	2473	51,5
Median	2477	11,3	2471	18,2	2478	26,1	2484	29,4	2473	33,3	2478	41,7	2485	51,1
st.avvik	32	5,6	24	3,9	35	4,0	40	7,9	52	6,9	44	8,0	48	7,9
Maks	2522	24,8	2541	26,6	2553	34,4	2542	45,1	2551	49,6	2561	61,1	2535	66,7
Min	2404	4,1	2439	10,9	2379	17,9	2368	17,1	2345	26,5	2348	29,9	2322	38,6
Differanse	118	20,7	102	15,7	174	16,6	175	28,0	206	23,1	214	31,2	213	28,1

Standardsement

5	2440	11,7	2431	21,4	2447	34,0	2435	27,1	2451	34,2	2423	47,9	2428	35,0
15			2390	10,5	2449	26,9	2453	34,3	2435	44,8	2443	41,8	2441	46,5
18					2367	28,1	2350	41,4	2290	34,2	2352	47,5	2337	48,6
23					2392	37,6	2425	41,6					2476	64,3
Snitt			2411	15,9	2414	31,6	2416	36,1	2392	37,7	2406	45,7	2420	48,6
median			2411	15,9	2419	31,0	2430	37,9	2435	34,2	2423	47,5	2434	47,6
st.avvik			21	7,7	35	5,0	39	6,9	72	6,1	39	3,4	51	12,1
Maks	2440	11,7	2431	21,4	2449	37,6	2453	41,6	2451	44,8	2443	47,9	2476	64,3
Min	2440	11,7	2390	10,5	2367	26,9	2350	27,1	2290	34,2	2352	41,8	2337	35,0
Differanse	0	0	41	11	82,5	10,8	103	14,5	161	10,7	91	6,1	139	29,4

Tabell B.2: Fasthetsresultater for periode 1 og 2

B.3 - Fasthetsresultater fra periode 3 og 4

Alle resultater er gjennomsnitt av to prøver, og angitt i Mpa. Densitet er målt som vekten (gram) av en terning på tilnærmet lik en liter.

Serie	1 døgn		2 døgn		7 døgn		14 døgn		28 døgn		56 døgn		91 døgn	
	densitet	fasthet	densitet	fasthet	densitet	fasthet	densitet	fasthet	densitet	fasthet	densitet	fasthet	densitet	fasthet
Lavkarbonsement														
27	2472	2,2			2447	25,3	2471	31,6	2425	37,0	2477	47,1	2486	47,6
28	2454	2,3			2446	28,5	2470	34,6	2470	39,2			2470	60,6
29	2404	1,1	2435	14,3	2400	26,1	2400	30,8	2385	36,2	2420	48,4	2399	50,7
31	2410	1,9	2418	14,4	2422	27,7	2400	32,2	2431	37,8	2417	50,0	2448	52,9
32							2392	31,9	2387	37,2	2385	24,3		
33							2396	30,2	2385	39,4	2393	24,7		
34							2415	33,5	2423	38,0	2406	29,3		
35							2405	33,7	2405	37,6	2415	29,5		
36							2401	32,5	2434	27,5	2386	32,1		
37									2485	31,7	2442	30,3		
Snitt	2435	1,9	2427	14,3	2429	26,9	2417	32,3	2423	36,1	2416	35,0	2451	53,0
Median	2432	2,1	2427	14,3	2434	26,9	2401	32,2	2424	37,4	2415	30,3	2459	51,8
st.avvik	33	0,6	12	0,1	22	1,5	31	1,4	35	3,7	29	10,4	38	5,5
Maks	2472	2,3	2435	14,4	2447	28,5	2471	34,6	2485	39,4	2477	50,0	2486	60,6
Min	2404	1,1	2418	14,3	2400	25,3	2392	30,2	2385	27,5	2385	24,3	2399	47,6
Differanse	68	1,2	17	0,1	47	3,2	79	4,4	100	11,9	92	25,7	87	13,0

Serie	1 døgn		2 døgn		7 døgn		14 døgn		28 døgn		56 døgn		91 døgn	
	densitet	fasthet	densitet	fasthet	densitet	fasthet	densitet	fasthet	densitet	fasthet	densitet	fasthet	densitet	fasthet
Standardsement														
30	2487	1,0	2441	15,5	2436	36,2	2439	42,9	2426	49,0	2421	56,0	2455	59,3

Tabell B.3: Fasthetsresultater for periode 3 og 4

B.4 - Resepter for lavkarbonbetongen og referansebetongen benyttet på Åstadyggen

Betongtype	Lavkarbon B25	Lavkarbon B25	Std Aalborg B30
Slump	200	180	180
V/C	0,54	0,54	0,59
Luftinnhold (%)	2,0	2,0	3,5
SP type	Glenium SKY 552	Glenium SKY 552	Glenium 151
Romvekt (g)	2385	2385	2361

Resept for 1m³ målt i kg

Sement	337	328	300
P	0,67	0,66	0,90
SP	1,69	1,64	1,92
0-8 Kilemoen	504	509,9	501
0-8 Kilemoen II	504	509,9	593
11-16 mm Steinskogen	215	217,1	297
16-22 mm Steinskogen	642	648,9	493
Vann	182	176,9	176,9

Totalt

Sand	1008	1020	1094
Stein	857	866	790
Sand + Stein	1865	1886	1884
% Sand	54	54	58
% Stein	46	46	42

Kontroll

Vann	182,0	176,9	176,9
Sement	337	328	300
V/C	0,54	0,54	0,59

Tabell B.4: Resepter for benyttet lavkarbonbetong og referansebetong

B.5 Værdata, Åstadyggen

Dato	Serie	Temperatur (°C)			Vind (m/s)		Annet
		Middel	Maks	Min	Middel	Maks	

Periode 1 - Blokk B

29.sep.10	serie 1	6,1	12,5	2,7	2,1	4,6	Opphold, skyfritt
04.okt.10	serie 2/3	11,3	11,9	10,6	1,0	5,5	Opphold
05.okt.10	serie 4/5	11,1	15,5	9,7	1,5	7,0	Overskyet, opphold
06.okt.10	serie 6/7	10,4	12,5	9,2	1,3	7,3	Regn under prøving og støping
07.okt.10	serie 8/9	11,4	15,5	8,4	0,8	4,9	Opphold
08.okt.10		8,4	9,1	7,6	0,3	2,5	
09.okt.10		7,1	7,8	5,6	0,3	2,2	
10.okt.10		6,2	10,8	2,9	0,8	2,8	
11.okt.10	serie 10/11	3,9	8,7	0,8	1,0	3,1	Skyfritt
12.okt.10	serie 12/13	6,0	10,7	0,8	0,8	4,0	Skyfritt
13.okt.10	serie 14/15	4,7	7,6	2,2	0,6	2,8	Stort sett opphold, spredt regn
14.okt.10		6,1	12,5	2,0	0,7	5,8	

Periode 2 - Blokk A

16.nov.10	serie 16	-1,5	1,5	-4,2	0,7	2,6	Skyfritt
17.nov.10		-5,0	-3,1	-7,4	0,6	2,3	
18.nov.10	serie 17-19	-4,7	-3,7	-6,0	0,5	3,8	Opphold, overskyet
19.nov.10	serie 20/21	-4,7	-3,6	-5,4	0,7	3,8	Opphold, overskyet
20.nov.10		-2,7	-1,3	-4,4	0,6	4,8	
21.nov.10		-0,5	0,1	-1,4	0,3	2,0	
22.nov.10		-2,5	-0,6	-4,7	0,6	4,8	
23.nov.10	serie 22	-3,8	-2,4	-5,0	0,8	5,1	Opphold
24.nov.10		-4,6	-3,7	-5,3	1,1	6,0	
25.nov.10	serie 23/24	-7,2	-4,6	-9,4	0,7	3,5	Opphold
26.nov.10		-8,7	-8,2	-9,8	0,7	4,1	
27.nov.10		-8,2	-7,6	-8,8	0,9	6,3	
28.nov.10		-7,4	-6,2	-8,8	1,1	6,0	
29.nov.10	serie 25/26	-8,6	-6,0	-11,3	0,4	4,8	Opphold
30.nov.10		-10,8	-7,8	-12,6	0,4	2,6	

Periode 3 - Blokk A

03.feb.11	serie 27/28	1,9	5,5	-1,3	2,1	2,6	Opphold
04.feb.11		1	5,4	-2,1	2,7	4,6	
05.feb.11		-2,2	2,5	-6	2,6	6,7	
06.feb.11		0,5	2,1	-4,9	2,2	6,7	
07.feb.11	serie 29/30	-4	1,4	-7,3	1,5	2,6	Opphold
08.feb.11	serie 31	0,4	4	-1,5	4,6	6,7	Opphold
09.feb.11		-1,3	2,2	-5,1	0,3	4,6	

Periode 4 - Blokk A

18.feb.11	serie 32-37	-7,7	-5,4	-8,5	1,5	2,6	Opphold
19.feb.11		-10,1	-5,7	-12,7	2,1	2,6	

Tabell B.5: Værdata for periodene med lavkarbonbetongstøp.
De grå feltene angir dagene som det er støpt på.

B.6 Overflatekvalitet



Figur B.1: Overflate - lavkarbonbetong [1]



Figur B.2: Overflate - lavkarbonbetong [1]



Figur B.3: God fylling - lavkarbonbetong [1]



Figur B.4: Steinreir - lavkarbonbetong [1]



Figur B.5: Overflate - standard betong [1]



Figur B.6: Overflate - standard betong [1]

B.7 - Regresjonsanalyser for periode 1 og 2

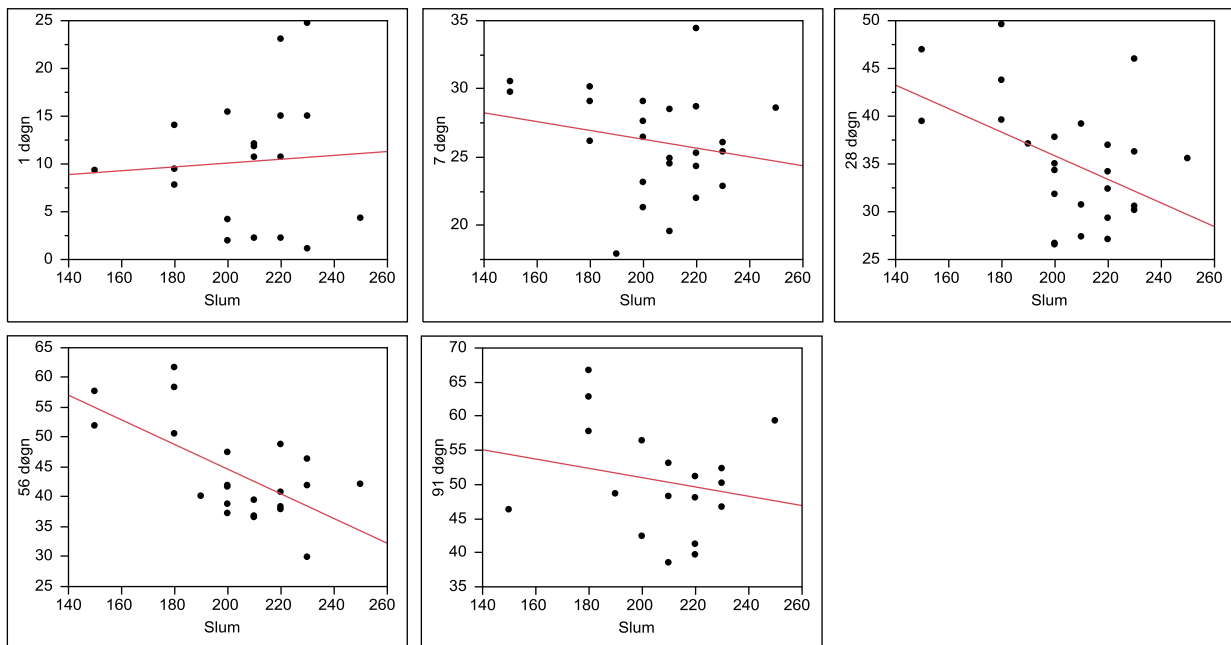
Det er gjennomført regresjonsanalyser i statistikkprogrammet JMP, for å se om det kan påvises sammenhenger mellom fasthet og henholdsvis slump, luft, betongtemperatur og terningvekt.

I alle regresjonsanalysene angir R^2 hvor mye av variasjonen som forklares av modellen. En R^2 -verdi på 1, angir at modellen forklarer all variasjon uten feil. X-verdien lar oss dermed forutse y-verdien perfekt (x-y koordinatsystem). R^2 lik null vise ingen lineær sammenheng mellom x og y. Lav R^2 -verdi angir at mye av variansen kan tilskrives tilfeldig feil.

P-verdien tester 0-hypotesen om at regresjonslinjens stigningstall er 0 (ingen sammenheng mellom x og y). P-verdier $< 0,05$ angir etter konvensjon en signifikant sammenheng mellom x og y, og betyr at det er $< 5\%$ sannsynlighet for at sammenhengen er tilfeldig, og dermed 95% sannsynlighet for at sammenhengen er ekte. Det er benyttet 5% signifikansnivå.

Fordi fasthetsresultatene fra periode 1 og 2 ikke nødvendigvis er representative, må disse regresjonsanalysene sees i lys av dette. Analysene viser generelt liten korrelasjon mellom variablene, og resultatene skiller seg i mange tilfeller fra hva som er forventet. Det kan på grunnlag av analysene ikke sees klare sammenhenger. Det er derfor ikke forsøkt å forklare disse resultatene utover det faktum at spredningen i resultatene er stort, og prøvene har vist en a-typisk fasthetsutvikling.

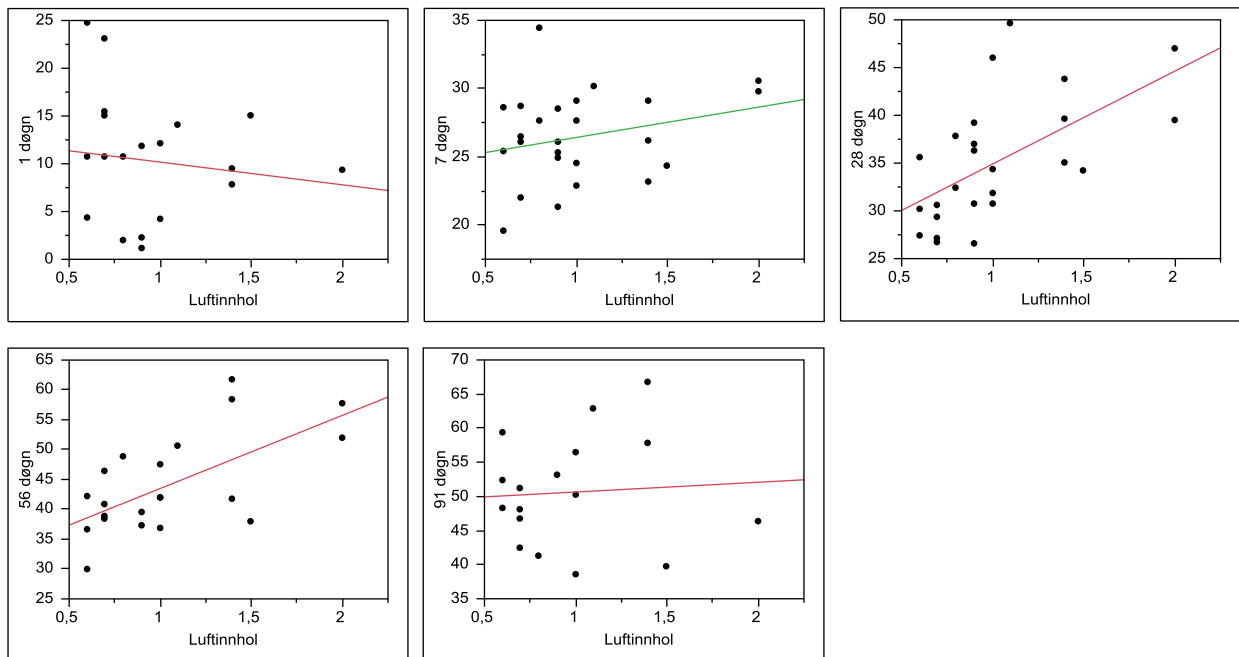
Fasthet - Slump



	1 døgnet	7 døgnet	28 døgnet	56 døgnet	91 døgnet
R²	0,005	0,043	0,210	0,411	0,044
P verdi	0,770	0,308	0,019	0,001	0,400
Signifikans	USANN	USANN	SANN	SANN	USANN

Analysene viser svært lave R^2 verdier, noe som indikerer at lite av variansen forklares av modellen. For 1, 7 og 91 døgnet er R^2 verdiene så lave at tilpasningen ikke er bedre som prediksjonsmodell enn det samlet gjennomsnitt er [54]. For 28 og 56 døgnet er sammenhengen signifikant, og viser at høyere slump har resultert i prøver med lavere fasthet enn de med lav slump.

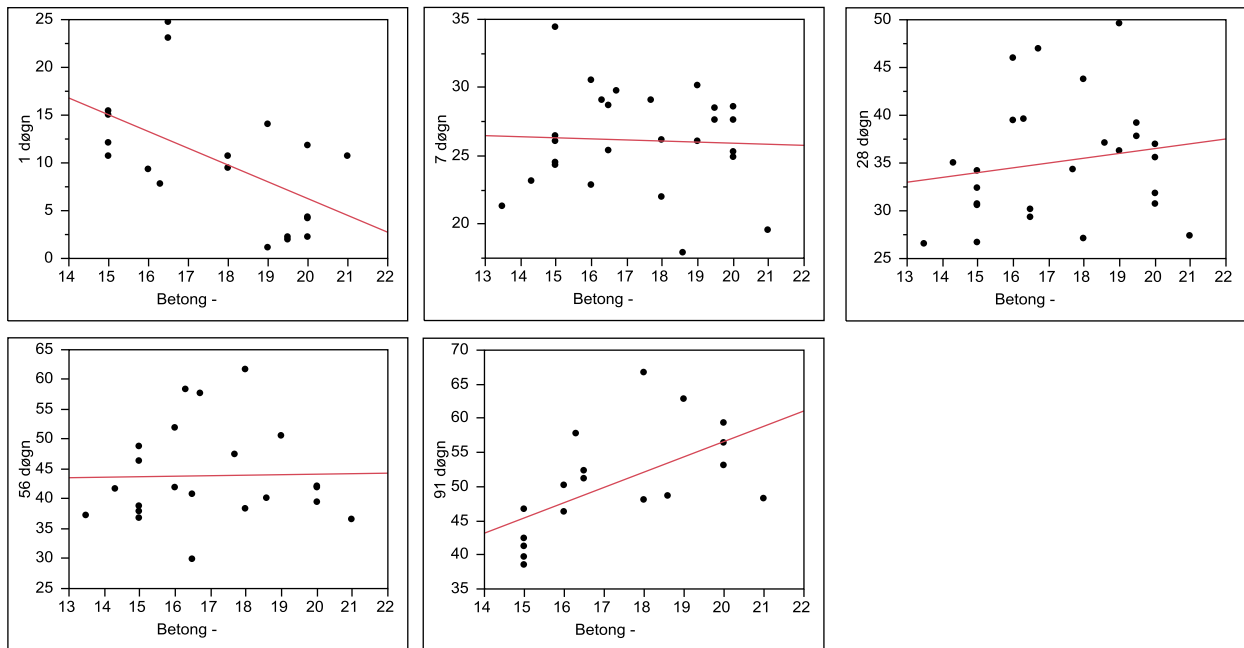
Fasthet - Luftinnhold



	1 døgn	7 døgn	28 døgn	56 døgn	91 døgn
R²	0,017	0,068	0,344	0,399	0,005
P verdi	0,580	0,207	0,002	0,002	0,791
Signifikans	USANN	USANN	SANN	SANN	USANN

Tilsvarende forholdet fasthet/slump blir sammenhengende ikke signifikant før ved 28 døgn, men viser ikke signifikans ved 91 døgn. Resultatene viser overaskende nok en tendens til at prøvene med høyere luftinnhold har høyere fasthet. Generelt reduseres 28 døgns fastheten med 5 % per prosent økning av luftinnholdet [52], så det kan uansett utelukkes at økende luftinnhold gir økt fasthet.

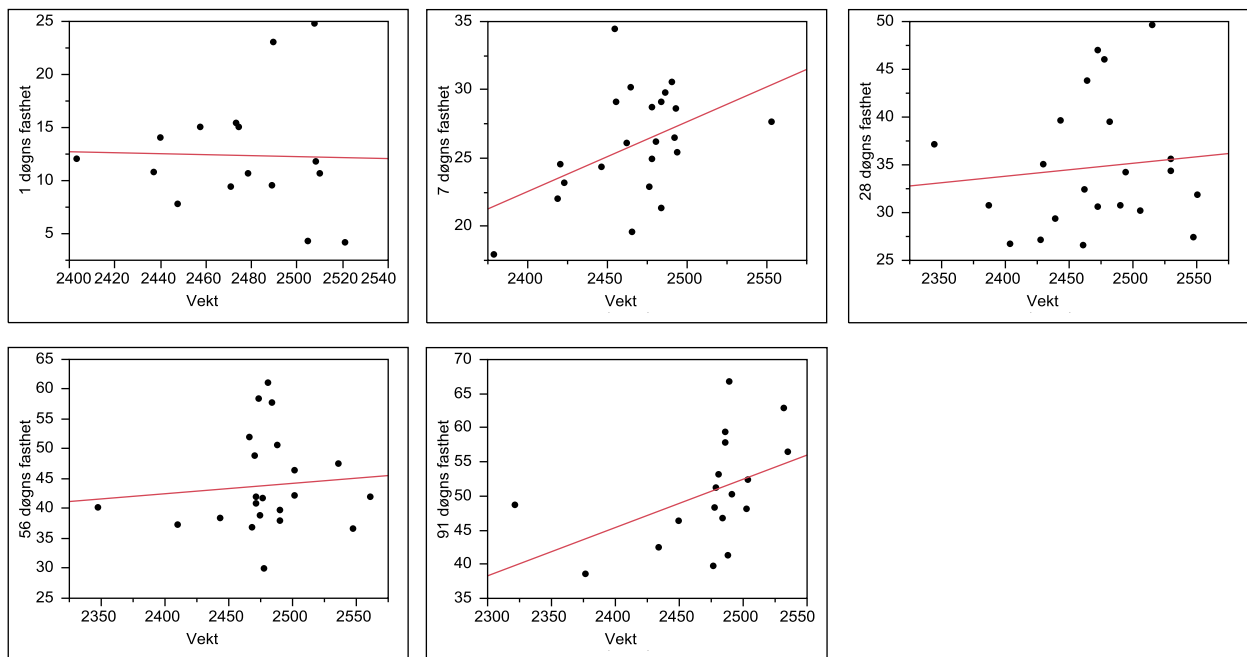
Fasthet – Betongtemperatur ved utstøping



	1 døgn	7 døgn	28 døgn	56 døgn	91 døgn
R²	0,321	0,002	0,029	0,001	0,350
P verdi	0,009	0,822	0,406	0,922	0,010
Signifikans	SANN	USANN	USANN	USANN	SANN

Det ser ut i fra disse prøvene ut til å være liten sammenheng mellom fasthetsutvikling og økende betongtemperatur, bortsett fra for 1 døgn prøvene, som viser motsatt trend av hva som er forventet. Disse resultatene står i motsetning til simuleringene som er gjennomført i Hett97. For 91 døgn resultatene ser det ut til å være en sammenheng, men fordi det ikke finnes noe kontinuitet i sammenhengene med de andre aldrene, kan dette trolig tilskrives tilfeldigheter.

Fasthet - Terningvekt



	1 døgn	7 døgn	28 døgn	56 døgn	91 døgn
R²	0,001	0,208	0,011	0,009	0,212
P verdi	0,923	0,033	0,647	0,675	0,054
Signifikans	USANN	SANN	USANN	USANN	USANN

Det ser ikke ut til å være noe signifikante sammenhenger mellom vekt på prøvelegemene og oppnådd fasthet. Det ser ut i fra disse regresjonene ikke ut til å være økt trykkfasthet for prøver med høyere vekt.

Oppsummering regresjonsanalyser

Resultatene viser generelt liten korrelasjon mellom de ulike variablene som er satt opp. I flere tilfeller viser de også motsatt tendens enn det som er forventet. Utvalget har stor spredning, og fasthetsutviklingen er i mange tilfeller ikke i henhold til forventningene. Resultatene fra regresjonene bør derfor ikke tillegges særlig betydning. En svakhet med disse regresjonsanalysene er at de ikke fanger opp samhandlingseffekter mellom de ulike parameterne, men kun viser en og en parameters effekt på fastheten.

Vedlegg D - Figurliste

Figur 2.1: Flygeaske forstørret 2000x med SEM mikroskop [4]	10
Figur 2.2: Flygeaske i pulverform [4]	10
Figur 2.3: Prinsippskisse for fasthetsutvikling flygeaskebetong vs ordinær Portland betong [10]	13
Figur 2.4: Styrkeutvikling for Portlandsement med ulike mengde flygeaskeerstatning [11]	13
Figur 2.5: Trykkfasthet for betong som er herdet 24 timer ved 10 °C, og så lagret ved ulike lave temp. [9]	14
Figur 2.6: Sammenlikning av avbindingstidspunkt for 2 ulike flygeasker og kontrollbetonger [9]	15
Figur 2.7: Korrelasjon mellom spesifikt overflateareal og trykkfasthet [9]	16
Figur 2.8: Flygeaskens påvirkning på slump, målt med VEBE apparat [6]	17
Figur 2.9: Flygeaskens påvirkning på slump, målt med fallbord [11]	17
Figur 2.10: Prinsippskisse av sementkorn som flokker seg og stenger inne vann [12]	18
Figur 2.11: Betydningen av flygeaskens partikkelstørrelse på vannbehov for tilsvarende bearbeidelighet [9] ..	19
Figur 2.12: Relativ vannseparasjon i flygeaskebetong vs betong uten flygeaske [9]	19
Figur 2.13: Varmeutvikling for betong med 30 % flygeaske vs normalbetong [9]	23
Figur 2.14: Oversvømmelse av flygeaskeslurry etter deponibrudd i Tennessee, 2008 [8]	24
Figur 2.15: PH utvikling i betong med og uten flygeaske [11]	25
Figur 4.1: Andre etasje med lavkarbonsement, blokk B, Åstadryggen [1]	29
Figur 4.2: Andre etasje med lavkarbonsement, blokk B, Åstadryggen [1]	29
Figur 4.3: Prinsippskisse av en del av sementproduksjonen på Norcem [2]	34
Figur 4.4: Hult FA-korn som inneholder mindre Flygeaskekorn. SEM, Ukjent forstørrelse [7]	35
Figur 4.5: FA-korn som henger sammen, samt mindre FA-korn festet på overflaten. SEM, 500x forstørret [7] ..	35
Figur 4.6: Rester av ubrent karbon, med mange små FA-korn på overflaten. SEM, 1000x forstørret [7]	35
Figur 4.7: Betydning av herdetemperatur for lavkarbonsement og referansesement	36
Figur 4.8: Betydningen av herdetemperatur - lavkarbonbetonger	37
Figur 5.1: Variansanalyse - slump for referansebetong og lavkarbonbetong	40
Figur 5.2: Finstoff -Lavkarbonbetong og referansebetong [1]	42
Figur 5.3: Betong og luft-temperatur	48
Figur 5.4: Tildekking med duk for innføring av varm luft under duken [1]	49
Figur 5.5: Gass-aggregat til oppvarming [1]	49
Figur 5.6: Tildekking med vintermatte [1]	49
Figur 5.7: Spredningsplot - luftinnhold, standardsement og referansesement	51
Figur 5.8: Spredning av fasthetsresultater for lavkarbonbetongen - periode 1 og 2	54
Figur 5.9: Spredningsplot for referansebetong, periode 1 og 2	56
Figur 5.10: Grafisk fremstilling av fasthetsutvikling for periode 1 og 2	57
Figur 5.11: Gjennomsnittlig trykkfasthet, alle serier, periode 1 og 2	59
Figur 5.12: Fasthetsutvikling lavkarbonbetong , periode 1 og 2	61
Figur 5.13: Spredning av fasthetsresultater for lavkarbonbetongen - periode 3 og 4	63
Figur 5.14: Fasthetsutvikling for serie 27-31	64
Figur 5.15: Fasthetsutvikling for serie 32-37	64
Figur 5.16: Spredningsplot - 28 døgns resultater fra Unicon	68
Figur 5.17: Prinsippskisse av avbindingsperiode og herdeperiode [18]	75
Figur A.1 Betongformer [1]	87
Figur A.2: Spade, komprimeringsstav, slumpkjegle [1]	87
Figur A.3: Fersk betong til herding i container [1]	88

Figur A.4: 1- døgns prøver [1]	88
Figur A.5: Prøvelegeme i trykkprøvemaskin [1]	88
Figur A.6: Plassering av prøvelegemene i vannbad hos Unicon [1]	88
Figur A.7: Luftbøtte [1].....	89
Figur A.8: Termometer [1]	89
Figur A.9: Prinsippskisse for måling av slump [5].....	90
Figur A.10: Måling av slump [1]	90
Figur A.11: Montert værstasjon [1].....	90
Figur A.12: Temperatur- logging vegg [1]	90
Figur B.1:Overflate - lavkarbonbetong [1]	96
Figur B.2: Overflate - lavkarbonbetong [1]	96
Figur B.3: God fylling -lavkarbonbetong [1]	96
Figur B.4: Steinreir – lavkarbonbetong [1]	96
Figur B.5: Overflate - standard betong [1]	96
Figur B.6: Overflate - standard betong [1]	96

Vedlegg E - Tabelliste

Tabell 1.1: Sammenlikning av CO ₂ - utslipp for ulike sementtyper [3]	2
Tabell 4.1: Gjennomsnittlig kjemisk innhold for 28 forsendelser med flygeaske [2]	32
Tabell 4.2 Spesifikk vekt og Blaine-finhet for flygeaske og et utvalg sementer [2]	33
Tabell 4.3: Kornfordeling for 1 flygeaskeprøve og en prøve med standard FA [2]	33
Tabell 4.4: Betydningen av herdetemperatur for lavkarbonsement og referansesement [2]	36
Tabell 4.5: Betydningen av herdetemperatur - lavkarbonbetonger [2]	37
Tabell 5.1: Betongens målte slump, og hvor mange ganger den har forekommet gjennom testperiodene	39
Tabell 5.2: Variansanalyse – slump for referansebetong og lavkarbonbetong	41
Tabell 5.3: Gjennomsnitt og standardavvik, variansanalyse for slumpmålinger	41
Tabell 5.4: Tukey-Kramer HSD test, variansanalyse for slumpmålinger	41
Tabell 5.5: Resepter [46]	43
Tabell 5.6: Betongens målte temperatur, og hvor mange ganger den har forekommet gjennom testperiodene	45
Tabell 5.7: Simulert 16 timers fasthet ved ulike betongtemperaturer i Hett97	46
Tabell 5.8: Betongens målte luftinnhold, og hvor mange ganger det har forekommet gjennom testperiodene	50
Tabell 5.9: T-test - luftinnhold, standardsement og referansesement	52
Tabell 5.10: Gjennomsnitt og standardavvik - luftinnhold, standardsement og referansesement	52
Tabell 5.11: Karakteristisk fasthet periode 1 og 2	53
Tabell 5.12: Utdrag fra tabell 7 i NS-EN 206-1 [20]	54
Tabell 5.13: Gjennomsnittsfasthet og standardavvik - lavkarbonbetong	55
Tabell 5.14: Høyeste og laveste fasthet innenfor hver prøvealder - Lavkarbonbetongen, periode 1 og 2	55
Tabell 5.15: Gjennomsnittsfasthet og standardavvik - referansebetong	56
Tabell 5.16: Prosentvis fasthetsutvikling, periode 1 og 2	58
Tabell 5.17: Gjennomsnittlig trykkfasthet, alle serier, periode 1 og 2	59
Tabell 5.18: 1 og 91 døgn fasthet for lavkarbonbetong	60
Tabell 5.19: 28 døgn fastheter periode 3 og 4 - lavkarbonbetong	62
Tabell 5.20: Karakteristisk fasthet periode 3 og 4 - Lavkarbonbetong	62
Tabell 5.21: Gjennomsnittsfasthet og standardavvik for lavkarbonbetongen - periode 3 og 4	63
Tabell 5.22: Høyeste og laveste fasthet innenfor hver prøvealder – Lavkarbonbetongen, periode 3 og 4	63
Tabell 5.23: Prosentvis fasthetsutvikling - Periode 3 og 4	65
Tabell 5.24: Unicons fasthetsresultater for innledende prøving - MET	66
Tabell 5.25: Unicons fasthetsresultater for innledende prøving - Åstadyggen	67
Tabell 5.26: Sammenlikning av fasthetsresultater fra Åstadyggen og Unicon	67
Tabell 5.27: Lufttemperatur utenfor container i de timene prøvene har stått i formene	71
Tabell 5.28: Antall timer til avbinding, samt betong og luft-temperatur	77
Tabell 5.29: Antall timer til toppetemperatur, og registrert toppetemperatur med temperaturlogger	78
Tabell B.1: Slump, betongtemperatur og luftinnhold for alle serier	91
Tabell B.2: Fasthetsresultater for periode 1 og 2	92
Tabell B.3: Fasthetsresultater for periode 3 og 4	93
Tabell B.4: Resepter for benyttet lavkarbonbetong og referansebetong	94
Tabell B.5: Værdata for periodene med lavkarbonbetongstøp.	95

Vedlegg F - Litteraturliste

1. Fossnes, S., Fotografier fra Åstadyggen, 2010-2011.
2. FOU, Norcem., Data hentet fra Norcem sin avdeling for forskning og utvikling, 2011.
3. Bjerger, L.M.H, *Lavkarbonsementen*, i *Cement Nå 2-2009*, Norcem, 2009.
4. Kentucky, U.O., *What are Coal Combustion By-Products (CCBs)?*
URL: <http://www.caer.uky.edu/kyasheducation/flyash.shtml>, lest 02.03.2011.
5. Madhusudhanan., *Testing - Hardened concrete*.
URL: <http://civilgc.blogspot.com/>, lest 03.03.2011.
6. Concrete-Techgroup., *Fly Ash: Improves Workability*.
URL: <http://www.concretebasics.org/articlesinfo/fa11workability.php>, lest 02.03.2011.
7. Fraay, A.L.A., *Fly ash a pozzolan in concrete*, Amsterdam: Faculty of Civil Engineering of the Delf University of Technology, 1990.
8. Dewan, S., *Coal Ash Spill Revives Issue of Its Hazards*.
<http://www.nytimes.com/2008/12/25/us/25sludge.html>, lest 02.03.2011.
9. Malhotra, V.M. og A.A. Ramezaniapour., *Fly ash in concrete*, Ottawa: Canada Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET), 1994.
10. King, B., *Making better concrete: guidelines to using fly ash for higher quality, eco-friendly structures*, California: Green Building Press, 2005.
11. Wesche, K., *Fly ash in concrete: properties and performance: report of Technical Committee 67-FAB, Use of Fly Ash in Building, RILEM (the International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures)*, London: E & FN SPON, 1991.
12. Malhotra, V.M. og P.K. Mehta., *High-performance, high-volume fly ash concrete: materials, mixture proportioning, properties, construction practice, and case histories*, Ottawa: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, 2002.
13. Weerdt, K.D., *Blended cement with reduced CO2 emission - utilizing the fly ash-limestone synergy*, Department of Structural Engineering, Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2011.
14. Forskningsrådet., *Godkjenning - Flerårig FoU prosjekt innen skatteFUNN, prosjektnummer: 198688*, 2009.

15. Norcem, *Utvikling av lavkarbonsement for byggformål (skattefunn)*, Søknadsnummer: ES449951, prosjektnummer: 198688, 2009.
16. Bjerger, L.M.H., Møte angående fremdrift av masteroppgaven, Lysaker, 08.09.2010.
17. Neville, A.M., *Properties of concrete*, Harlow: Longman, 1986.
18. Gjerp, P., M. Opsahl, og S. Smeplass, *Grunnleggende betongteknologi*, Lillestrøm: Byggenæringens forlag, 2004.
19. kalk.no., *Kalk - viktig i vårt daglige liv*.
URL: <http://kalk.no/website.aspx?displayid=25>, lest 25.03.2011.
20. Standard, N., *NS-EN 206-1, Betong, Del 1, Spesifikasjon, egenskaper, fremstilling og samsvar*, Lysaker: Pronorm, 2007.
21. Standard, N., *NS-EN 197-1, Sement - Del 1: Sammensetning, krav og samsvarskriterier for ordinære sementtyper*, Lysaker, 2000.
22. Sørensen, C., Masteroppgaveveiledning, Ås, 08.03.2011.
23. Kjellsen, K., Telefonsamtale og e-post, 06.04.2011.
24. Standard, N., *NS-EN 1992-1, Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*, Lysaker, 1992.
25. Bathen, L., Oppfølgingsmøte om masteroppgaven, Ås, 18.02.2011.
26. ASTM, *C618 - 08a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, 2008.
27. Grosh, B., *The Pozzolonic reaction*.
URL: <http://marktechinternational.in/fly-ash.html>, lest 08.03.2011.
28. ACI, *Use of fly ash in concrete – Report by ACI Committee 232*, Michigan: American Concrete Institute, 2004.
29. Joshi, R.C. og R.P. Lohtia, *Fly ash in concrete: production, properties and uses*, Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1997.
30. Søpler, B., *Betongboka*, Oslo: Gyldendal undervisning, 2004.
31. Gran, H.C., *Alkalitilslagsreaksjoner i betong. Kjemiske aspekter*. Prosjektrapport 194, Norsk byggtknisk institutt, 2006.
32. Blanks, R.F. and H.L. Kennedy, *The technology of cement and concrete*, New York: John Wiley & Sons, 1955.

33. Seehusen, J. *Senketunnel - norsk tunnelhistorie*.
URL: <http://www.tu.no/innsikt/bygg/article38437.ece>, lest 22.02.2011.
34. Editorial, *Collapse of the clean coal myth*.
URL: http://www.nytimes.com/2009/01/23/opinion/23fri3.html?_r=1, lest 23.02.2011.
35. Dewan, S., *Tennessee ash flood larger than initial estimate*.
URL: <http://www.nytimes.com/2008/12/27/us/27sludge.html>, lest 23.02.2011.
36. Pedersen, P.H., *Forbudt med flygeaske i betong?*
URL: <http://www.bygg.no/2009/12/48960.0>, lest 23.02.2011.
37. EPA., *Fossil fuel combustion waste*.
URL: <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/industrial/special/fossil/>, lest 23.02.2011.
38. Larsen, J.F., E-post til Klima- og forurensningsdirektoratet, 18.04.2011.
39. Lovdata. *FOR 2004-06-01 nr 930: Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall (avfallsforskriften)*, 2004-06-01.
URL: <http://www.lovdata.no/for/sf/md/xd-20040601-0930.html>, lest 18.04.2011.
40. Forurensingstilsyn, S., *Håndtering av farlig avfall*.
URL: http://www.klif.no/miljoreferanse_35086.aspx, lest 18.04.2011.
41. Institutt, Met., *Været som var - Asker*.
URL: <http://www.yr.no/sted/Norge/Akershus/Asker/Asker~73216/statistikk.html>, lest 20.03.2011.
42. Standard, N., *NS-EN 450-1: Flygeaske for betong - Del 1: Definisjon, spesifikasjoner og samsvarskriterier*, Lysaker, 2005.
43. Bathen, L., Oppfølgingsmøte om masteroppgaven, Spydeberg, 01.04.2011.
44. Thyholdt, P., E-post til Norcem, 15.04.2011.
45. Ølstad, G., Samtale med lagbas, Åstadryggen, 18.11.2010.
46. Unicon., Data for betongresept 921000 og 533000, 2011.
47. Fabrikkbetongforening., *Alminnelige salgs- og leveringsbetingelser*. URL: [http://www.fabeko.no/oslo/fabeko.nsf/Attachments/C39E75A8006DD85DC125782D0047B102/\\$FILE/Salgs-+og+lev++2011.pdf](http://www.fabeko.no/oslo/fabeko.nsf/Attachments/C39E75A8006DD85DC125782D0047B102/$FILE/Salgs-+og+lev++2011.pdf), lest 03.05.2011
48. V-Teknikk, V., *Betongarbeider, Støpelederkurs [U3]*, Veidekkeskolen, Oslo, 2010.

49. Lauritsen, E., Telefonsamtale, 03.04.2011.
50. Institutt, Met., *Effektiv temperatur*.
URL: <http://www.yr.no/nyheter/1.4097757>, lest 20.02.2011.
51. Standard, N., *NS-EN 13670, Utførelse av betongkonstruksjoner*, Lysaker, 2009.
52. Sørensen, C., Forelesning i videregående betongmaterialteknologi, Ås, 2010.
53. Løvås, G.G., *Statistikk for universiteter og høyskoler*, Oslo: Universitetsforlaget, 2004.
54. 9.0.0, J., *Discovering JMP (Tutorial), Release 9*, SAS Institute Inc, 2010.
55. Norges, b., *NS 3420, 2. utgave mai 1986: Beskrivelsestekster for bygg og anlegg, 1986*.
56. Sæter, Ø., *Møte med Unicon, Furuset*, 03.02.2011.
57. Iversen, A., *Konfidensintervall*.
URL: www.uio.no/studier/emner/sv/iss/SGO1900/v07/konfidensintervall07.doc, lest 02.03.2011
58. Frode Skottun, Telefonsamtale, 06.05.2011.
59. Vegvesen, S., *Håndbok 014 – Laboratorieundersøkelser*, 2005.
60. Standard, N., *NS-EN 12390, Utvalg av Norsk Standard, Betongprøving - herdnet betong*, Pronorm: Lysaker, 2004.
61. Ola Skjølvold, S.B., Telefonsamtale, 06.05.2011.
62. Kontrollrådet., *Betongprodukter*.
URL: <http://www.kontrollbetong.no/?gclid=CIP51Me22qgCFUww3wod2k2IBg>, lest 06.05.2011.
63. Mathisen, A.E., Oppfølgingsmøte Masteroppgave, Spydeberg, 02.05.2011.
64. Institutt, Met., *Værstatistikk for Asker (Akershus)*. URL:
http://www.yr.no/sted/Norge/Akershus/Asker/Asker~73216/detaljert_statistikk.html, lest 11.03.2011.