

Egenskaber for frisk og hærdet mørtel med højt indhold af træaske



Pil Hørby Sørensen
S123778

Bachelorprojekt

Department of Civil Engineering
2015

DTU Civil Engineering
Januar 2016

Forord

Dette projekt udgør sammen med et mundtligt forsvar resultatet af et bachelorprojekt, som færdiggør bacheloruddannelsen Byggeteknologi ved Danmarks Tekniske Universitet. Projektet udgør 15 ECTS-point, og er udarbejdet i perioden 14. september 2015 til 11. januar 2016 under vejledning fra Lisbeth Ottosen.

Opgaven er udarbejdet i Microsoft Word, med grafer udarbejdet i Microsoft Excel. Til håndtering af referencer er Havard System, udarbejdet af Angilia Ruskin University, benyttet.

Der rettes stor tak til en række ansatte ved DTU Byg for hjælp til projektet. Særligt skal Lisbeth Ottosen nævnes for god og reel vejledning under hele projektet, Ebba Schnell og de øvrige laboranter på DTU Byg for assistance i laboratoriet, og Per Leth for assistance i betonstøberiet. Desuden en tak til de øvrige studerende med daglig gang i laboratorie og støberi for hjælp og sparring. Endelig rettes også en tak til de derhjemme, venner og familie, som har været en stor støtte under projektets forløb.

Pil Hørby Sørensen
s123778

Dato

Sammenfatning

Dette projekt er et studie i hvordan træflyveaske fra Køge Kraftvarmeværk påvirker mørtelprøver, hvis det tilsættes i større mængder som erstatning for cement. Der er lavet forsøg hvor hhv. 30, 40, 50, 80, 90 og 100 % af cementindholdet erstattes. Det primære fokus ligger på bestemmelse af vandbehovet for disse blandinger, hvilket er bestemt ved hjælp af sæt- og flydemålsprøver, og undersøgelse af blandingerens styrke. Her er der primært set på 7-dagesstyrker. I den sammenhæng er der også lavet mørtelprøver med tredjegerations- superplastificerende stoffer tilsat for at undersøge om det kan reducere vandbehovet trods den delvise erstatning af cement med træaske. Der er også lavet analyse af de ioner og tungmetaller der udskilles af mørtelprøverne under hærkning. Herudover er porøsiteten bestemt for enkelte støbninger med 30 % cement erstattet, der er set på volumenforskellen mellem det benyttede cement og træaske, og vægt- og størrelsesudviklingen af mørtelprøver med og uden træaske er målt.

Der blev i studiet fundet en tydelig sammenhæng mellem indholdet af træflyveaske og styrken af en mørtelprøve. Prøver med lavt indhold af aske havde højere styrke end de med højt askeindhold, og prøver med 80 % eller mere af cementen udskiftet med aske gik i stykker i løbet af hærkningsperioden. For prøver hvor vandbehovet blev opfyldt kunne der efter 7 døgn opnås trykstyrker på 8,68 MPa når 30 % af cementen blev erstattet med træaske, 4,32 MPa når 40 % cement blev erstattet og 2,53 MPa når 50 % cement blev erstattet. Mørtelprøver med vandbehovet opfyldt og 30 % cement erstattet kunne opnå en trykstyrke på 12,7 MPa efter 14 døgn, og 15,2 MPa efter 28 døgn.

Eftersom mørtelprøver med 80 % eller mere af cementindholdet erstattet af træaske ikke blev gode blev vandbehovet kun bestemt for de prøver hvor 50 % eller mindre af cementen blev erstattet. Det kan konstateres, at for prøver med 30 % cement erstattet af træaske skal der tilsættes 67 % ekstra vand før vandbehovet er opfyldt, for prøver med 40 % cement erstattet skal der tilsættes 73 % ekstra vand, og for prøver med 50 % cement erstattet skal der tilsættes 64 % ekstra vand. Det kan også konstateres, at tilsætning af tredjegerations- superplastificerende stof ikke har samme effekt på mørtel med højt indhold af træaske, som det normalt har på mørtel kun med cement som bindemiddel. For en mørtelblanding med 30 % cement erstattet kunne der opnås en vandbesparelse på 5 %.

Den åbne porøsitet blev bestemt for to forskellige støbninger med 30 % cement erstattet. Ved tilsætning af 36 % ekstra vand blev den bestemt til at være 29 %, mens den ved tilsætning af 67 % ekstra vand blev bestemt til at være 32 %. De salte og tungmetaller der blev udskilt under hærkningsprocessen blev bestemt til primært at bestå af kalium (67 %), sulfat (18 %), klor (9 %) og natrium (6 %). Med hensyn til træasken blev det fundet, at dens massefylde er mindre end for cement, både før og efter tørring. For de færdigstøbte mørtelprøver blev det fundet, at der ikke var væsentlig forskel i størrelsen på dem før og efter hærkning. Dog blev der observeret en tendens til, at prøver med højt askeindhold tog mindre på i vægt under hærkning end prøver med lavt eller intet askeindhold.

På baggrund af de samlede undersøgelser er det konkluderet, at der skal en hel del væske til for at opnå en tilfredsstillende bearbejdelse af en frisk mørtelblanding med højt indhold af træaske. Det er især problematisk, da det ifølge studiet ser ud til, at superplastificerende stoffer ikke reagerer med træaske som det gør med cement. Desuden bliver styrken af mørtelprøver meget lav med så højt askeindhold som benyttet i dette studie. Det kan desuden konkluderes, at der er et maksimum for hvor meget cement der kan erstattes med træaske, som ligger mellem 50 og 80 %. Dog er der ifølge resultaterne en mulighed for at der findes et styrkeoptimum omkring blandinger med 30 % cement erstattet. Der kan ikke konkluderes noget om sammenhængen mellem askeindhold og porøsitet på baggrund af studiet.

Abstract

This project covers a study in the effects of addition of larger amounts of wood fly ash from Køge Kraftvarmeværk to mortar as substitute for cement. Experiments have been made with respectively 30, 40, 50, 80, 90 and 100 % of the cement substituted. The primary focuses have been to determine the proper amount of water needed for these mixes, and examining their strength. In most cases the strength has only been determined after 7 days of maturing. It has also been tested if third-generation superplasticizers can reduce the amount of required water in spite of the partial substitution of cement with wood ash. Some of the components of the crystals formed on the mortar samples during the maturing period have also been determined, and the porosity of some of the mortar samples has been determined too. Finally difference in volume for the same amount of wood ash and cement has been observed, and the development of the weight and size of the different mortar samples during the maturing period has been examined.

Coherence between the content of wood ash in a mortar sample and the strength of the sample was found. A mortar sample poor in wood ash would have higher strength than that of a sample high in wood ash, and samples with 80 % or more of the concrete substituted with wood ash would break during the maturing period. For mortar samples with their water needs covered a 7-day-strength of 8.68 MPa could be reached for a mortar with 30 % of the concrete substituted, 4.32 MPa could be reached for a mortar with 40 % of the concrete substituted, and 2.53 MPa could be reached with 50 % of the concrete substituted. The compressive strength of mortar samples with 30 % concrete substituted could reach 12.7 MPa after maturing for 14 days, and 15.2 MPa after 28 days.

Since mortar samples with 80 % or more of the concrete substituted with wood ash turned out bad after maturing only the water requirements for the samples with 50 % or less of the cement substituted were determined. It was found that mortar with 30 % cement substituted needed extra 67 % water added in order to be as tractable as mortar with no wood ash, while mortar with 40 % cement substituted needed extra 73 % water added, and mortar with 50 % cement substituted needed extra 64 % water added. It was also found that the superplasticizer added did not have the same effect on mortar with high contents of wood ash as it would have on mortars without. For a mortar with 30 % of the cement substituted with wood ash it was possible to decrease the amount of required water with 5 %.

The porosity was determined for two different mortar samples, both with 30 % of the cement substituted for wood ash. When 36 % extra water was added the porosity was determined to 29 %, while it was determined to 32 % when 67 % extra water was added. The ions and heavy metals separated out from the mortar samples were determined to primarily consist of Potassium (67 %), sulfate (18 %), chlorine (9 %) and Sodium (6 %). It was found that the density of the wood ash was lower than for the cement without examining the differences closer. It was also found that the difference in size of the samples from before and after maturing was very little. It seemed that there was a tendency for the weight to increase more for samples with lower contents of wood ash.

From the sampled data it can be concluded that fresh mortar with high contents of wood ash requires quite a lot of water in order to be as tractable as an ordinary mix. That is especially challenging in the light of the fact that the superplasticizer seemed to have little effect on mortar with high contents of wood ash. Another thing to consider is that the strength of these mortars is very low with the high contents of wood ash used in this study. It has also been found that there is a maximum to the amount of concrete that can be substituted with wood fly ash that is between 50 and 80 %, before the samples become of a poor quality. Nothing conclusive can be said about the content of wood ash and porosity on basis of this study.

Indhold

Forord.....	i
Sammenfatning	ii
Abstract.....	iii
Indhold.....	iv
1 Indledning	1
2 Teori.....	2
2.1 Cement, mørtel og beton.....	2
2.1.1 Bearbejdelighed, sætmål og flydemål.....	3
2.1.2 Brug af plastificerende stoffer.....	3
2.1.3 Porøsitet	4
2.1.4 Styrke	4
2.2 Flyveaske	5
2.2.1 Puzzolaner.....	6
2.2.2 Egenskaber for flyveaske fra Køge kraftvarmeværk	6
3 Eksperimentelt arbejde og udførelse.....	8
3.1 Mørtelprøver	9
3.1.1 Støbning	9
3.1.2 Sæt- og flydemålsprøver	11
3.2 Styrkeprøvning.....	11
3.3 Porøsitet	12
3.4 Ion- og tungmetalanalyse	12
3.5 ”Askevolumen”	13
3.6 Øvrige observationer.....	13
4 Resultater	14
4.1 Indledende undersøgelser.....	14
4.2 Sæt- og flydemålsprøver	15
4.3 Styrkeprøver.....	18
4.4 Porøsitet	22
4.5 Saltanalyse	22
4.6 ”Askevolumen”	22
4.7 Øvrige observationer.....	23
4.7.1 Størrelse og vægt.....	23

5	Diskussion.....	25
5.1	Sæt- og flydemålsprøver	25
5.2	Styrkeprøver.....	25
5.3	Porøsitet	26
5.4	Saltanalyse	28
5.5	Fejlkilder	29
5.6	Videre forskning	29
6	Konklusion.....	31
	Litteratur	32
	Bilag.....	33
6.1	Datablad: Sika ViscoCrete® HE-230	33
6.2	Vejledning: Sæt- og flydemålsprøver	35
6.3	Vejledning: Porøsitet	37
6.4	Resultater: Indledende undersøgelser	40
6.5	Resultater: Støbning, herunder sæt- og flydemålsprøver.....	42
6.6	Resultater: Styrkeprøver	44
6.7	Resultater: Porøsitet	46
6.8	Resultater: Ion- og tungmetalanalyse.....	47

1 Indledning

Beton er en utrolig vigtig komponent i moderne byggeri. Det er stærkt, nemt at arbejde med, og relativt billigt at fremstille. En ulempe er dog at det ikke er særligt miljøvenligt. Det er det bl.a. ikke fordi et af de vigtigste indholdsstoffer i beton er cement, og cement er miljøbelastende og ubæredygtigt at fremstille. En måde at gøre beton mere miljøvenligt på er derfor at mindske indholdet af cement. I dag benyttes allerede flyveaske fra kulfyrede kraftvarmeværker til betonproduktion. Kulflyveaske har ved korrekt brug positiv indvirkning på betons styrke, men produceres også på en miljøbelastende måde.

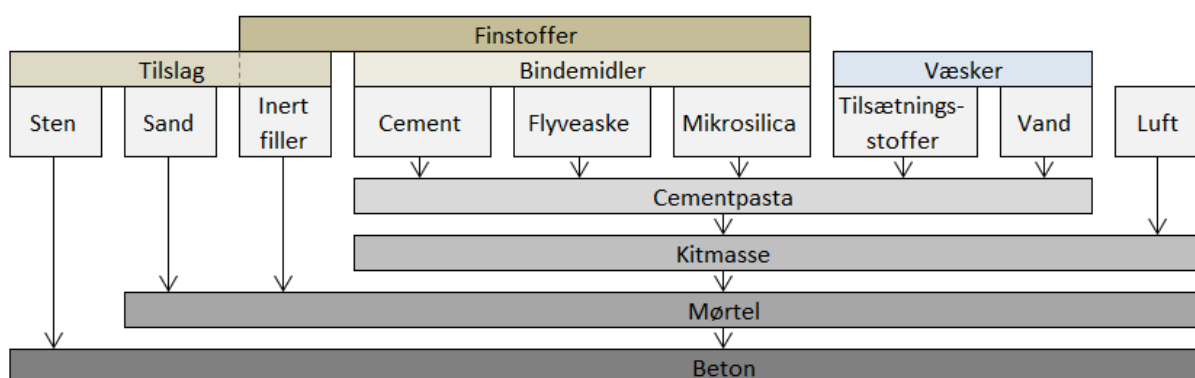
Et svar på den problemstilling kunne derfor være flyveaske fra kraftvarmeværker fyret med biobrændsel som fx træ, flis eller halm. Mange kraftvarmeværker fyrer allerede i dag både med kul og biobrændsel, som et led i den generelle omstilling fra fossile brændstoffer til biobrændsel. Dog er vores viden om flyveaske produceret ved afbrænding af biomasse, fremover kaldet træflyveaske, begrænset. Målet med dette projekt er derfor at undersøge hvilken effekt træflyveaske har på både frisk og hærdet mørtel når det tilsættes i større mængder.

2 Teori

For en dybere forståelse for de udførte forsøg og resultater gennemgås i dette afsnit den teori der ligger til grund for det udførte arbejde, og som læser bør være bekendt med.

2.1 Cement, mørtel og beton

Beton af flere årsager et af de mest anvendte byggematerialer i Danmark. Det er billigt, nemt forarbejdeligt, og fås skræddersyet efter behov. En bygherre kan stort set få beton i lige den styrkeklasse og bearbejdelighed han ønsker, da det er et sammensat materiale hvis indholdsstoffer kan varieres i mængde i forhold til hinanden. Beton består som regel af cement, vand og tilslagsstofferne sand og sten, men kan sagtens indeholde flere ting som det ses Figur 1. Her er vist et diagram over anvendte delmaterialer i beton. De mest relevante forklares nærmere herunder.



Figur 1: Diagram over indholdsstofferne i hhv. cementpasta, kitmasse, mørtel og beton.
Kilde: (Geiger, et al., 2008, p. 537).

Cement er helt konkret et bindemiddel der kan være hydraulisk eller ikke-hydraulisk. Hydraulisk cement hærdner ved kontakt med vand til en hård masse, uden luft er nødvendig for processen. Ofte benyttes denne cementtype til beton, da den er vandresistent efter endt hærdning. Portlandcement, som benyttes i dette studie, er hydraulisk, og defineret som et produkt der indeholder to tredjedele calciumsilikater (3CaO SiO_2 , 2CaO SiO_2), hvor resten er Al_2O_3 , Fe_2O_3 og andre oxider, og hvor masseforholdet CaO/SiO_2 er større end 2 (Geiger, et al., 2008, p. 531).

Tilslagsmaterialer er, som det ses på diagrammet, sand og sten og filler i forskellig størrelse. Der findes forskellige standarder i forskellige lande, men ifølge (Geiger, et al., 2008, p. 489) karakteriseres sand ved at have en kornstørrelse på 0,06 - 2 mm, mens grus og sten er mere grovkornet, og filler har en størrelse mindre end 250 μm (Hansen, 2015, p. 10). Karakteren af disse materialer er altså forskellen på om der er tale om mørtel eller beton.

Det vand som benyttes til beton, bør ligesom resten af indholdsstofferne være af en vis kvalitet. Der behøves ikke at anvendes drikkevand, men det er vigtigt at der ikke er fx klorider som kan korrodere evt. armering, eller tungmetaller som forurener det nærliggende miljø, i vandet. Fx kan vand fra rengøring af blandekar o. lign. benyttet i produktionen genanvendes med en vis forsigtighed (Lundgaard, 2013, p. 3.3).

Dog er den benyttede vandmængde af stor betydning, da der er direkte korrelation mellem vand/tørstofforhold (v/t) og porøsitet og styrke. Tørstofferne dækker her over både cement og flyve-

aske. En typisk beton uden aske vil efter 28 dage have en styrke på 40-55 MPa med et vand/cementforhold (v/c) på 0,4, mens den kun vil have en styrke på 15-25 MPa med et v/c-forhold på 0,8 (Geiger, et al., 2008, p. 536). Med den betragtning skulle man synes, at et minimalt vandindhold altid bør efterstræbes, men også betonens evne til bl.a. at flyde ud, blive vibreret på plads, og holde på indblandet luft må der tages hensyn til. Luftindholdet i en færdig beton har bl.a. stor betydning for dens frostresistens. Et mere helstøbt indtryk af materialet fås derfor ikke ved kun at betragte dets egenskaber efter hærkning, men også egenskaberne mens det er friskblandet. Ofte er det muligt at få et godt indtryk af en betons egenskaber ved at lave et studie af samme blanding uden sten, altså en mørtel, som det gøres i dette studie. Herunder beskrives de undersøgte karakteristika.

2.1.1 Bearbejdelighed, sætmål og flydemål

Som nævnt er det vigtigt at en beton eller mørtel har en konsistens der er praktisk i forhold til bl.a. vibrering og luftoptag. Når flyveaske fra træ tilsættes ændres vandbehovet for en blanding da asken har andre egenskaber end cement. Det er tidligere blevet observeret en sammenhæng mellem træakseindhold og ringe bearbejdelighed ved vibrering og meget porøse støbninger (Ebert, 2015, p. 24). En måde at karakterisere bearbejdeligheden og derved bestemme vandbehovet for en blanding er ved brug af sæt- og flydemålsprøver. Disse metoder benyttes ofte for beton, hvor der er fastsatte standarder for fremgangsmetoden. Ved mørtel bestemmes ofte kun flydemålet, og her findes forskellige fremgangsmåder.

Ved bestemmelse af sætmål benyttes en såkaldt sætmålskegle, der er karakteriseret ved at have form som en keglestub der har mindre diameter i åbningen for oven end den for neden. Sætmålskeglen fyldes med det ønskede materiale ad flere omgange, og der stemples mellem hvert lag med en stampetang. Når keglen er fyldt fjernes overskydende materiale, og keglen fjernes varsomt. Sætmålet er angivet som højdeforskellen mellem keglens højde, og højden på det udflydte materiale.

Flydemål benyttes ofte til mere flydende betonblandinger, og ved karakterisering af mørtel. Her benyttes en lavere kegle sammen med et faldbord. Sætmålskeglen sættes på faldbordet og fyldes som før ad flere omgange med materiale, hvor der stemples undervejs mellem påfyldninger. Overskydende materiale fjernes, og keglen fjernes forsigtigt. Herefter løftes og slippes faldbordet et bestemt antal gange over et bestemt tidsinterval, således at materialet flyder ud. Flydemålet kan angives som diameteren af det udflydte materiale, eller som procentvis stigning i diameter efter keglens fjernelse og stampning med bordet.

I dette projekt benyttes en kombination af de to metoder for at øge antallet af parametre til bestemmelse af rette vandindhold for mørtel med aske tilsat.

2.1.2 Brug af plastificerende stoffer

For at øge bearbejdeligheden af en beton eller mørtel uden at tilsætte mere vand er det muligt at tilsætte plastificerende stoffer til sin blanding. Plastificerende stoffer er polymere, organiske stoffer med varierende kædelængde. De virker ved at holde en vis afstand mellem cementkornene, enten ved fysisk at lægge sig mellem dem, eller holde dem adskilt statisk. Stofferne kan også virke med en blanding af begge metoder. Resultatet af afstanden er, at blandingen bliver mere flydende. De plastificerende stoffer kan inddeles i forskellige kategorier (Geiger, et al., 2008, p. 540): Plastificerende stoffer, som kan give en vandreduktion på 5-15 %, og som består af hydroxycarboxylater og lignosulfonater. Superplastificerende stoffer, som giver en vandreduktion på ca. 25 %, og som består af melamin- og naphtalenformaldehydkondensat. Og tredjegerations superplastificerende stoffer, der bl.a. benyttes til fremstilling af selvkomprimerende beton, der fx kan bestå af polycarboxylester.

I dette projekt arbejdes med et tredje generations superplastificerende stof kaldet Sika ViscoCrete® HE-230 (se bilag 6.1). Stoffets aktive komponent er modificeret polycarboxylat, der virker ved overfladeabsorption og sterisk separationseffekt på cementpartiklerne, og er på væskeform. Som de fleste plastificerende stoffer virker det retarderende, hvorfor det kun må tilsættes i begrænsede mængder. Producenten anbefaler, at der benyttes 0,2-1,5 vægt-% af tørstofferne. Ved denne dosering forventes, at der kan spares mindst lige så meget vand som ved brug af et superplastificerende stof. Effektiviteten af det plastificerende stof vurderes ved brug af sæt- og flydemålsprøverne, det vides ikke om det samarbejder lige så godt med træflyveaske som det gør med cement.

2.1.3 Porøsitet

Et materiales porøsitet er et udtryk for hvor 'tæt' det er - altså hvor meget af materialet der består af luftporer. Luftporerne inddeles i to kategorier: Åbne og lukkede porer. De åbne porer er dem som væske umiddelbart kan trænge ind i fra overfladen, mens de lukkede porer er dem som kun kan tilgås ved diffusion gennem materialet. Når porøsiteten af et materiale skal beskrives benyttes derfor både volumen af hele prøvelegemet V , og volumen af de åbne porer $V_{p\grave{a}}$. Disse bestemmes vha. prøvelegemets vægt efter tørring, m_{50} , dets vægt i vakuumvandmættet og overfladetør tilstand, m_{ssd} , og dets vægt i vakuumvandmættet tilstand, nedsunket i vand, m_{sw} :

$$V = \frac{m_{ssd} - m_{sw}}{\rho_w}$$

$$V_{p\grave{a}} = \frac{m_{ssd} - m_{50}}{\rho_w}$$

Her er ρ_w densiteten af vandet. Med disse data er det muligt at bestemme følgende:

Åben porøsitet:
$$P_{\grave{a}} = \frac{V_{p\grave{a}}}{V} \left[\frac{m^3}{m^3} \right]$$

Angiver hvor stor en andel af prøvelegemets samlede volumen der udgøres af porer.

Vandtørstofforholdet:
$$u_{ssd} = \frac{m_{ssd} - m_{50}}{m_{50}} \left[\frac{kg}{kg} \right]$$

Angiver forholdet mellem vægten af vandet i porerne og vægten af tørstoffet, når prøvelegemet er i vakuumvandmættet og overfladetør tilstand.

Porøsiteten af en mørtel hænger desuden sammen med styrken af den. Højere porøsitet hænger sammen med lavere styrke.

2.1.4 Styrke

Styrken af en beton eller mørtel er forståeligt nok helt essentiel når det kommer til anvendelighed. Da begge materialer er væsentligt stærkere i tryk end træk eller bøjning måler man typisk flere styrker. Her arbejdes med hhv. trykstyrken og bøjetrækstyrken. Disse bestemmes ved at belaste et prøvelegeme med kendt størrelse med en kendt kraft, og omregne resultatet til styrke efterfølgende.

Ved trykstyrkeprøvning belastes et kubisk område af et prøvelegeme med kraften F_c [N] jævnt indtil brud, og trykstyrken R_c bestemmes så ved følgende udregning:

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} [MPa]$$

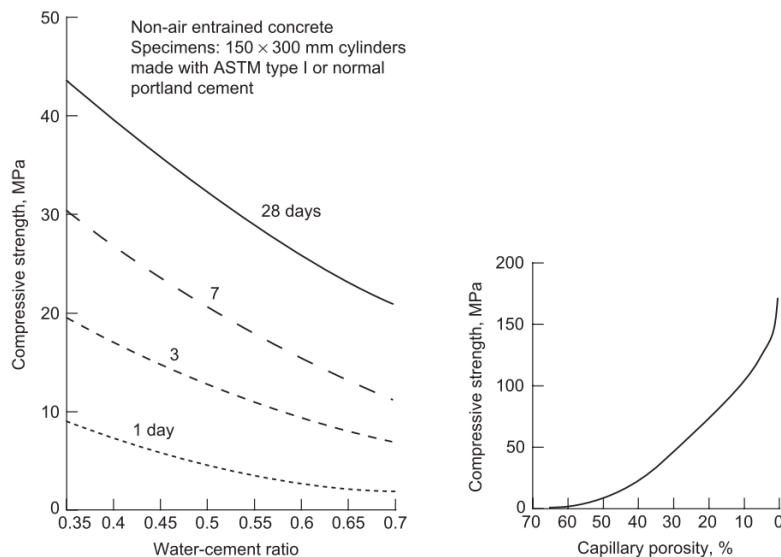
Størrelsen b [mm] angiver bredden af det kvadratiske område der belastes.

Ved bestemmelse af bøjetrækstyrken sættes prøvelegemet på to understøtninger med afstanden l [mm] og belastes i et punkt midt imellem oppefra med kraften F_f [N]. Størrelsen af den belastende kraft ved brud benyttes så til bestemmelse af bøjetrækstyrken F_f således:

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b^3} \text{ [MPa]}$$

Hvor b [mm] angiver sidelængden af det kvadratiske tværsnit.

Som tidligere nævnt påvirkes styrken af en beton eller mørtel i høj grad af vand/cementforholdet i blandingen, samt af porøsiteten af materialet. Dette er illustreret Figur 2 hvor sammenhængen mellem hærdetid og styrke også kan ses. Langt størstedelen af en betons styrke er opnået efter 28 dage, hvorfor beton ofte regnes for færdighærdet efter denne periode. I realiteten vil styrken stige yderligere i løbet af betonens levetid, men tilvæksten er lille i forhold til de første uger.



Figur 2: Styrken som funktion af hhv. v/c-forhold og tid, og procentvis porøsitet. Illustrationen til højre gælder for normalt behandlede cementer, porebeton og aggregater.

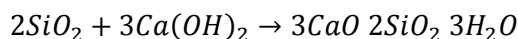
Kilde: (Mehta & Monteiro, 2006, pp. 51,54)

2.2 Flyveaske

Flyveaske er et biprodukt der fremstilles på kraftvarmeværker ved afbrænding af kul, træ eller andre materialer. Typisk opfanges asken ude på kraftværkerne i store filtre enten mekanisk eller statisk, og samles i lagre eller tanke, i visse tilfælde efter at være blevet vandet af hensyn til afkøling og minimering af partikler i luften. Flyveaske fremstillet ved kulafbrænding har længe været brugt i betonindustrien, da det er et puzzolan med bindende egenskaber. Uanset typen af flyveaske skal det leve op til nogle krav og kategoriseres efter regler beskrevet i (DS/EN450-1, 2012) inden det kan anvendes kommercielt i beton.

2.2.1 Puzzolaner

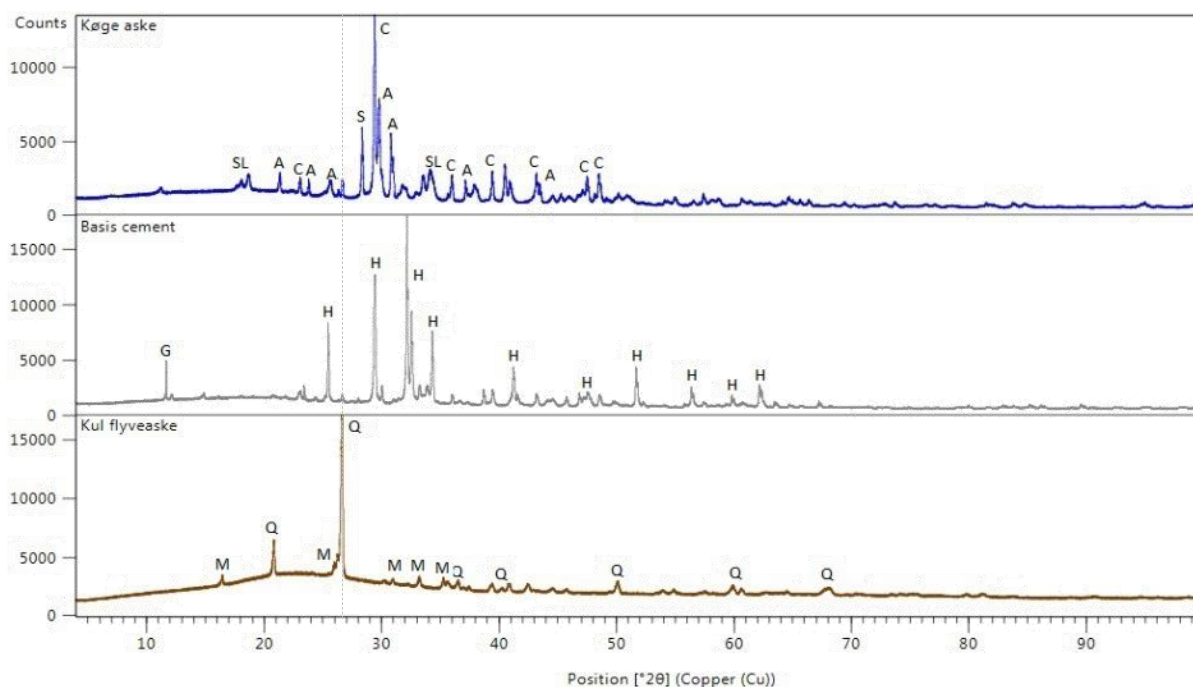
Puzzolaner er pulvere der primært består af SiO_2 og Al_2O_3 , og er ikke i sig selv et bindemiddel. Det har dog den egenskab, at det reagerer og danner bindemiddel sammen med Ca(OH)_2 , der dannes ved hydratisering af cement. Reaktionen kaldes den puzzolanske reaktion:



Andre materialer med puzzolanske egenskaber er bl.a. over visse bjergarter, knust tegl, vulkansk aske og aske fra afbrænding af avner fra ris.

2.2.2 Egenskaber for flyveaske fra Køge kraftvarmeværk

Træflyveasken fra Køge kraftvarmeværk er skabt ved afbrænding af træflis og træstøv, hvoraf det meste er restprodukter fra guldproduktion (Ebert, 2015, p. 10). Træflyveasken fra Køge består naturligvis nok af helt andre indholdsstoffer end kulflyveaske, hvilket ses på difraktogrammerne Figur 3.



Figur 3: Difraktogrammer for træflyveasken fra Køge, Basiscement og kulflyveaske. Forkortelserne er Q: Quartz (SiO_2), C: Calcite (CaCO_3), S: Sylvite (KCl), A: Arcanite (K_2SO_4), G: Gypsum ($\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$), H: Alite ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) og M: Mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), SL: Slaked lime (Ca(OH)_2). Bemærk for køgeasken den lille top ved 27 grader, der indikerer at den også kan indeholde SiO_2 .
Kilde: (Ebert, 2015, p. 48).

Her ses det bl.a., at kulflyveaske primært består af kvarts og mullit, hvorimod træflyveasken fra Køge består af mange forskellige forbindelser. Umiddelbart er de mest dominerende calciumcarbonat, kaliumchlorid og kaliumsulfat, men også læsket kalk er at finde. Ved 27 grader findes en top som indikerer, at der muligvis også er kvarts i træasken. Da kvarts er det primære indholdsstof i puzzolaner må det formodes at træflyveasken fra Køge har en lav puzzolansk effekt. Grunden til at træasken fra Køge alligevel studeres nærmere er, at der er god viden om dens indholdsstoffer og egenskaber, og derfor god grobund for videre studier.

Her skal det nævnes, at der tidligere er fundet individuelle forskelle i kvaliteten af træflyveasken fra Køge forskellige partier imellem. Dette studie anvender resultater fra studier lavet af hhv. aske fra Hansens parti (Hansen, 2015), og aske fra Eberts parti (Ebert, 2015). I dette studie er aske fra Eberts parti benyttet, og generelt når der refereres til træaske i denne rapport henvises til asken fra Eberts parti. Hvor resultater fundet ved studier af aske fra Hansens parti benyttes vil det blive nævnt.

2.2.2.1 Ionindhold

Indholdet af ioner og salte i træflyveasken har betydning hvis den skal kunne anvendes i praksis, idet (DS/EN450-1, 2012, p. 9) sætter en begrænsning for hvor meget af visse stoffer asken må indeholde. Indholdet af ioner i træasken fra Køge som den modtages ses Tabel 1.

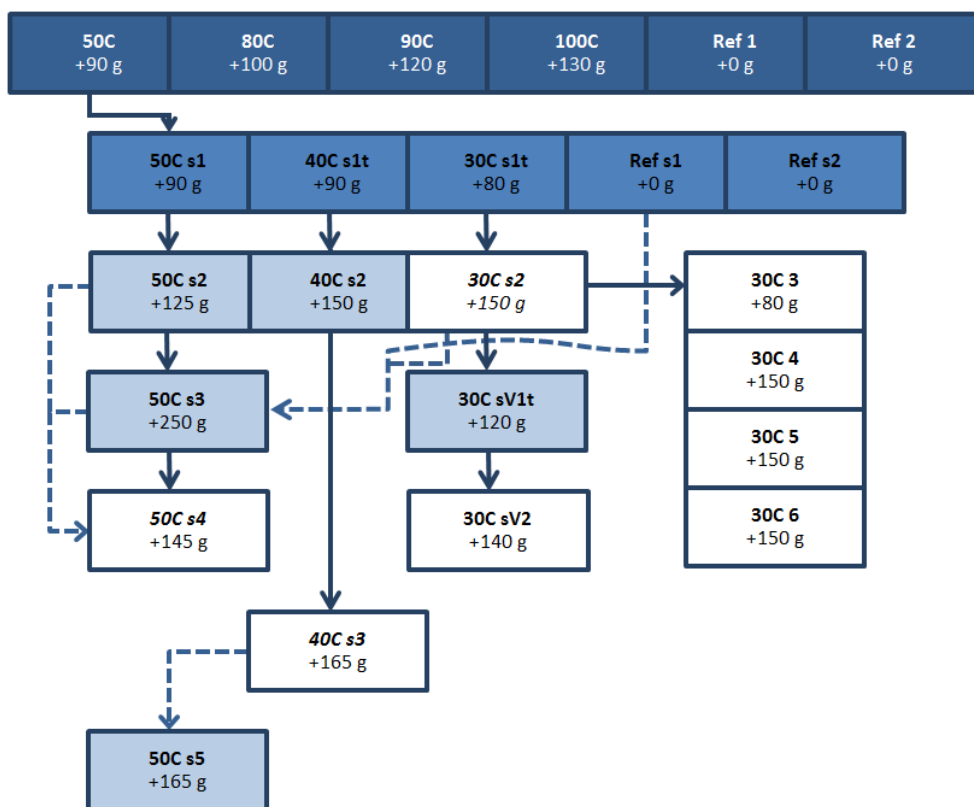
Tabel 1: Resultatet af analyse af ioner i træflyveasken fra Køge. Nederst er den procentvise andel af det samlede indhold angivet. Kilde: (Ebert, 2015, p. 39).

Stof	SO ₄	K	Cl	Na	NO ₃	Ca	Mg	Ma
mg/kg	98 900	93 214	12 300	6494	963	132	N/A	N/A
%	46,6	43,9	5,8	3,1	0,5	0,1	N/A	N/A

Ifølge (DS/EN450-1, 2012) må en flyveaske til betonbrug indeholde 0,10 masseprocent klor, hvilket er betydeligt mindre end de 1,23 masseprocent træflyveasken fra Køge indeholder. Det kan dog ignoreres så længe der blot arbejdes med flyveasken på forskningsmæssigt niveau.

3 Eksperimentelt arbejde og udførelse

I løbet af projektperioden blev der støbt 24 mørtelprismer efter samme grundopskrift, med varierende indhold af vand, flyveaske og cement (alm. Portland). De første støbninger dækkede en bred vifte af aske/cement-forhold for at bestemme de mest interessante tilfælde, mens de følgende støbninger blev udført med samme aske/cement-forhold men forskellige mængder vand og tilsætningsstoffer. Udvælgelsesprocessen blev gjort på baggrund af styrke og bearbejdelighed, dette vil blive beskrevet nærmere under afsnittet resultater. Processen ses illustreret Figur 4, hvor de forskellige stadier af processen er illustreret med forskellige farver. De to mørke farver dækker over indledende undersøgelser, den lyseblå farve indikerer uddybende undersøgelser, mens de hvide støbninger resulterede i endelige resultater. Tallene angiver hvor meget af cementen der er erstattet af flyveaske - 50C står fx for 50 % cementerstatning. Bogstavet *s* angiver at der er lavet sæt- og flydemålsundersøgelse af blandingen, *t* angiver at der blev brugt ekstra tid under sammenblanding af materialerne, og *V* angiver at tilsætningsstoffet Sika ViscoCrete® HE-230 blev anvendt. Under navnet står mængden af vand tilsat blandingen. Endelig angiver pilene baggrunden for hver enkelt støbnings blandingsforhold. Fx blev blandingsforholdene for 50C s3 bestemt ud fra resultater fundet under støbningen af 50C s2, 30C s2 og Ref s1 tilsammen. Tallet sidst i navnet er fortløbende nummerering for de enkelte blandingsforhold (fx går 50C fra 1-5, mens 40C går fra 1-3).



Figur 4: Illustration af støbningernes proces. Pilene angiver hvordan givne resultater har ledt videre til de næste skridt i støbningsprocessen. Tallene angiver andelen af cementerstatning (dvs. aske), *s* står for sætmålsprøve, *t* står for ekstra tid under blandingprocessen og *V* for tilsat ViscoCrete. Under navnet for blandingerne er mængden af ekstra tilsat vand vist.

Fremgangsmåden for de udførte forsøg, samt støbning af (og herunder recept for) de forskellige mørtelprøver vil blive beskrevet i dette afsnit.

3.1 Mørtelprøver

Mørtelprøverne blev alle støbt efter samme grundproces. Visse af blandingerne blev også undersøgt mens mørtlen endnu var helt frisk, før selve støbningen. Både støbeprocessen og prøverne udført med den friske mørtel beskrives herunder.

3.1.1 Støbning

Fremstilling af mørtelprismene er udført som angivet i standard (DS/EN196-1, 2005), dog med afvigelser i tilfælde hvor der blev lavet sæt- og flydemålsprøver, og i tilfælde hvor det var nødvendigt at tilsætte ekstra vand for at opnå rimelig bearbejdelighed. Efter sammenblanding blev mørtlen hældt i en form og vibreret. De recepter der som udgangspunkt blev benyttet ses Tabel 2 (bemærk vandindholdet varierer i de endelige, støbte prøver). Al asken blev desuden tørret ved 105 °C natten over inden brug, og regnes derfor at have et vandindhold på 0 %. Den blev opbevaret i lufttæt beholder, og havde derfor samme temperatur som de øvrige ingredienser ved sammenblanding. Der blev benyttet en Hobart røremaskine, og forme tilsvarende de beskrevet i standarden.

Tabel 2: Recepter for de undersøgte mørtelprøver. Bemærk forskelligt vandindhold blev benyttet ved forskellige støbninger med samme procentvise cementerstatning.

Navn	Askeindhold	Cement [g]	Aske [g]	Sand [g]	Vand [g]
100C	100 % cementerstatning	0	450	1350	225
90C	90 % cementerstatning	45	405	1350	225
80C	80 % cementerstatning	90	360	1350	225
50C	50 % cementerstatning	225	225	1350	225
40C	40 % cementerstatning	270	180	1350	225
30C	30 % cementerstatning	315	135	1350	225
Ref	0 % cementerstatning	450	0	1350	225

I Tabel 3 redegøres der for samtlige støbte prøver. Tabellen angiver hvor meget ekstra vand der tilsættes under blandingen af materialerne (og v/t-forholdet), om der blev brugt ekstra tid, om det blev benyttet plastificerende stoffer og om der blev foretaget sæt- og flydemålsprøve inden støbning. Sidste kolonne angiver hvor mange dage mørtelprøverne hærkede inden styrkeprøvning, eller udtagelse til undersøgelse af porøsiteten.

Tabel 3: Oversigt over samtlige støbte mørtelprøver.

** Sæt- og flydemålsprøverne for disse blev udført med anden metode end de øvrige.*

*** Visse af disse prismere blev benyttet til undersøgelse af porøsiteten.*

Navn	Ekstra vand [g]	Vand/tørstof [%]	Ekstra tid [s]	Tilsætningsstof [g]	Sæt- og flydemålsprøve	Hærdetid [dage]
Ref 1	-	0,50	-	-	Nej	7
Ref 2	-	0,50	-	-	Nej	7
Ref s1	-	0,50	-	-	Ja *	7
Ref s2	-	0,50	-	-	Ja	7
100C	130	0,79	30	-	Nej	7
90C	120	0,77	30-60	-	Nej	7
80C	100	0,72	30-60	-	Nej	7

50C	90	0,70	105	-	Nej	7
50C s1	90	0,70	-	-	Ja *	7
50C s2	125	0,78	-	-	Ja *	7
50C s3	250	1,06	-	-	Ja	7
50C s4	145	0,82	-	-	Ja	7
50C s5	165	0,87	-	-	Ja	7
40C s1t	90	0,70	30	-	Ja *	7
40C s2	150	0,83	-	-	Ja	7
40C s3	165	0,87	-	-	Ja	7
30C s1t	80	0,68	30	-	Ja *	7
30C s2	150	0,83	-	-	Ja	7
30C 3	80	0,68	-	-	Nej	7 **
30C 4	150	0,83	-	-	Nej	7 **
30C 5	150	0,83	-	-	Nej	14
30C 6	150	0,83	-	-	Nej	28
30C sV1t	120	0,77	30	6,75	Ja	7
30C sV2	140	0,81	-	6,77	Ja	7

Selve sammenblandingen af materialer foregik på følgende måde:

- 0 sek.: Vand tilsættes cement og evt. aske. Øjeblikket hvor vand tilsættes kaldes ”Zero time”.
- 0 - 30 sek.: Blanderens startes og kører med lav hastighed (indstilling 1).
- 30 - 60 sek.: Sand tilsættes jævnt i løbet af de 30 sekunder.
 - o Her indskydes evt. 30 sekunder ekstra med lav hastighed til tilsætning af ekstra vand.
- 60 - 90 sek.: Mørtlen blandes med høj hastighed (indstilling 2).
- 90 - 120 sek.: Blanderens stoppes, og skålen skabes med en dejskaber.
- 120 - 180 sek.: Mørtlen hviler.
- 180 - 240 sek.: Blanderens startes og kører med høj hastighed.

Som beskrevet ovenfor blev der tilsat ekstra vand til alle mørtelblandingerne med aske i. I de tilfælde hvor der er brugt ekstra blandetid på at tilsætte vand er det gjort efter sandet er tilsat, men før der bliver blandet på høj hastighed. I nogle af de første blandinger gik en smule materiale tabt fordi der ikke var tilstrækkeligt væske til at holde massen sammen nede i skålen. Hvor der ikke er brugt ekstra tid, er det ekstra vand blot tilsat sammen med de 225 g vand fra referenceopskrifterne. I de tilfælde hvor der er benyttet plastificerende stoffer er det blevet tilsat sammen med blandevandet af første ombæring. Der blev benyttet den maksimalt anbefalende mængde plastificerende stof fra start.

Efter sammenblanding stod mørtelmassen benyttet til støbning i visse tilfælde og samlede sig mens der blev udført sæt- og flydemålsprøver, i øvrige tilfælde var der ikke hviletid mellem sammenblanding og formfyldning.

Fyldning af prismeformene (med udformning som beskrevet i DS/EN 196-1) foregik ad to omgange, og med brug af et vibrationsbord. Formene fyldtes først halvt, mørtlen blev strøget to gange med dejskraberen, og der blev vibreret med 55 Hz i 30 sekunder. Herefter blev formene efterfyldt, og imens der blev vibreret 30 sekunder ved 55 Hz igen, blev overskydende mørtel fjernet med et afretterjern. Mørtlen blev så dækket tæt med plastik, og henstillet i 24 timer. Efter 24 timer blev prismene fjernet fra formene, uregelmæssigheder blev fjernet med en spartel, og de blev vejjet. Sidst blev de lagt i vandbad med demineraliseret vand indtil trykprøvning. Ved støbning uden sætmålsprøve fås 3 prøve-

prismer, ved støbning med sætmålsprøve fås 2. Vandet i vandbadet blev skiftet en gang undervejs i forløbet.

3.1.2 Sæt- og flydemålsprøver

Som beskrevet blev mørtelblandingerne i mange tilfælde undersøgt inden støbning ved at måle sætmål og flydemål med det formål at bestemme vandbehovet for en mørtel tilsat flyveaske fra Køge Kraftvarmeværk. Til dette benyttedes en keglestubform, en stampestang, et faldbord, et afretterjern og en målestok. Specifikationerne for disse findes i bilag 6.2. Der blev taget udgangspunkt i TI-B 18 (86), men desværre blev to forskellige fremgangsmåder benyttet undervejs. Begge er beskrevet i prøvevejledningen bilag 6.2, her beskrives den primært benyttede i korte træk:

Umiddelbart imens mørtlen blev blandet ved høj hastighed i det sidste minut blev keglestub og faldbord fugtet. Da mørtlen var færdigblandet fyldtes keglestubben halvt, og der blev stampet med tilhørende stampestang 20 gange i mørtlen, så den fordelte sig jævnt. Keglestubben blev herefter fyldt helt, og der blev igen stampet 20 gange, i en dybde svarende ca. til midten af det nye lag. Den overskydende mørtel blev fjernet med afretterjernet, og keglestubben fjernet. Ved at benytte keglestubben som grundlag for afretterjernet kunne afstanden mellem keglestubben og mørtelkeglen bestemmes. Et gennemsnit af 3 målinger angiver sætmålet. Keglestubben blev herefter fjernet, og faldbordet blev hævet og 'tabt' 10 gange på 10 sekunder. Diameteren af det bredeste sted af mørtlen blev bestemt som et gennemsnit, og angiver flydemålet. Figur 5 viser opstillingen ved opmåling af de to karakteristika.



Figur 5: Her ses udførelsen af hhv. sæt- og flydemålsprøven på mørtelprøve Ref s2.

Mørtlen benyttet til bestemmelse af sæt- og flydemål blev herefter kasseret, for at sikre at mørtlen til prismene forblev homogen. Mørtlen til prismene blev også i flere tilfælde mere fast af at stå mens der blev udført prøver, hvorfor der i de fleste tilfælde er taget tid på forløbet så det er sikret, at forsøget er udført inden for 15 minutter efter Zero time.

3.2 Styrkeprøvning

Efter endt hærdningsperiode styrkeprøves prismene i en Mohr & Federhaff maskine, også kendt som "Den lille grønne". Det er en ældre maskine som bruger olietryk, og den kan indstilles til to forskellige finhedsgrader. Den har en indsats udformet efter DS/EN 196-1, som gør det muligt først at bestemme et prismes bøjetrækstyrke ved at knække det i to, og derefter bestemme trykstyrken af de to prismehalvdele. De forskellige indsætter ses Figur 6. Pladerne der benyttes ved trykstyrkeprøven er begge 40 mm brede, og derfor trykprøves kun et volumen på 40 x 40 x 40 mm, trods selve prismestykket er større. Maskinen var desuden indstillet til størst finhed ved de fleste styrkeprøver, da styr-

ken af mørtelprismerne med aske ikke var specielt høj sammenlignet med standard mørtelprøver. Maskinens indstilling i de enkelte tilfælde er angivet sammen med resultaterne bilag 6.6.



Figur 6: Opstilling i prøvemaskinen umiddelbart efter bestemmelse af hhv. bøjetrækstyrke og trykstyrke. Bemærk de forskellige indsætter for oven.

Eftersom hver støbning resulterede i tre prizmer, er der for de fleste støbningers vedkommende resultater fra 3 bøjetrækprøvninger og 6 styrkeprøvninger. Jf. DS/EN 196-1 er resultater som falder mere end 10 % udenfor gennemsnittet af disse prøvninger sorteret fra. Dette er også noteret i resultatbilaget.

3.3 Porøsitet

Porøsiteten bestemmes for hhv. 30C 3 og 30C 4, idet disse har samme askeindhold, men forskelligt vandindhold. Fra hver støbning udtages to halve prizmer efter bestemmelse af bøjetrækstyrken. Således er risikoen for at der ligger en fejl i en af støbningerne som man ikke opdager mindst.

Den fulde fremgangsmåde for bestemmelsen af porøsiteten findes bilag 6.3, og beskrives her i korte træk:

De fire prismehalvdele blev lagt til tørre i en ventileret ovn ved 50 °C indtil vægtkonstante. Prismerne tørrer ved denne temperatur frem for de 105 °C for ikke at manipulere hærdningsprocessen mere end højest nødvendigt. Herefter blev prizmerne vejjet, og placeret i en eksikator med undertryk i tre timer for temperering. Efter de tre timer blev prizmerne oversvømmet med demineraliseret vand, mens der, modsat øvelsesvejledningens anbefaling, ved et uheld fortsat var tilsluttet vakuumpumpe. Efter en time blev der udlignet til atmosfæretryk, og prizmerne stod natten over under vand. På den måde bør prizmerne blive fuldstændigt vandmættede. Efter overnatning under vand vejes prizmerne først under vand, og derefter over vand efter aftørring med en hårdt opvreden klud. Med disse data kan porøsiteten bestemmes efter formlerne beskrevet afsnit 2.1.3. Sidst lægges prizmerne tilbage til tørre i den ventilerede ovn ved 50 °C for at undersøge, om der er blevet udvasket nogle salte undervejs.

3.4 Ion- og tungmetalanalyse

Flere af mørtelprismerne havde efter endt hærdningsperiode i større eller mindre grad saltkrystaller udskilt på overfladen. Tidligere er saltindholdet i træflyveasken fra Køge Kraftvarmeværk blevet analyseret, se (Hansen, 2015), og det blev derfor besluttet at undersøge om det var de samme salte der

krystalliserede sig på mørtelprøverne indeholdende samme aske. De udskilte saltkrystaller var for små til at analysere, men det demineraliserede vand i vandbadet var tydeligvis ved at blive saltmættet undervejs i prøveperioden. Derfor blev der udtaget en prøve af vandet til analyse, og det antages at resultatet herfra vil belyse hvilke ioner og evt. tungmetaller der udskilles af prismerne.

Til analysen blev der benyttet både ionchromatografi og ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry), da de to metoder supplerer hinanden mht. hvilke forbindelser de kan identificere. I analysen ledes der efter følgende: Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Cl, NO₃ og SO₄.

3.5 "Askevolumen"

Under støbning af mørtelprismerne og håndtering af ingredienserne blev det konstateret at der var væsentlig forskel på volumen af samme mængde cement og flyveaske. Vandbehovet steg også voldsomt med cementerstatning. Derfor blev der afvejet 6,0123 gram cement, 6,0158 gram fugtig aske og 6,0159 gram tørret aske i hvert sit målebæger. Målebægerne blev kontinuerligt banket forsigtigt ned i bordet under påfyldning for at pakke de forskellige pulvere tilpas meget, og på samme måde. Der blev benyttet bægerglas med en kapacitet på 25 mL.

Det var ikke muligt at benytte måleglas, da en ukontrollerbar mængde af hhv. cement og aske i så fald ville sætte sig på indersiden af glassene, og det ville være svært at stampe pulveret tilstrækkeligt sammen.

3.6 Øvrige observationer

For at samle nogle generelle data om forskellen på mørtelprøver med og uden flyveaske, blev der lavet nogle målinger udover de nævnte forsøg.

I en periode blev størrelsen af alle de støbte prismen målt, med henblik på at undersøge om der skete en udvidelse under hærdningen. Hvert støbt prisme blev umiddelbart efter udtagning af støbform og afskrabning målt tre gange på hvert led. Dette blev gentaget efter endt hærdning, og et gennemsnit udregnet. Her skal det bemærkes, at der blev benyttet tre forskellige skydelærere undervejs, da de deles mellem laboratoriets brugere og det ikke var muligt at bruge den samme hver gang. Derfor er længden af prismerne heller ikke målt i alle tilfælde. Eftersom der ikke var store udvidelse eller tydelige tendenser i målingerne blev de stoppet efter en periode.

Vægten af prismerne blev også bestemt umiddelbart efter udtagning af støbform, efter afskrabning, og igen umiddelbart efter fjernelse fra vandbad, i overfladetør tilstand. Prøverne blev skyllet i demineraliseret vand, inden de blev duppet med papir til overfladetør tilstand.

4 Resultater

I det følgende vil resultaterne for de forskellige undersøgelser blive gennemgået. Det vil også blive forklaret hvorledes resultater fundet undervejs i forløbet har ligget til grund for udvælgelse af videre undersøgelser.

4.1 Indledende undersøgelser

Til at starte med blev der støbt fire prøver med høj askemængde, og to referenceprøver. De to referenceprøver blev støbt hhv. før og efter de øvrige prøver for at se hvor stor effekt erfaringen med at støbe ville have på de øvrige prøvers kvalitet. De indledende undersøgelser beskrives her separat, da resultaterne har ligget til grund de øvrige undersøgelser. Detaljer ikke beskrevet her findes bilag 6.4, sammen med billedokumentation.

Ved støbning af 100C blev der som beskrevet afsnit 3.1 tilsat 130 g. ekstra vand under sammenblandingen. På trods af, at blandingen derefter virkede til at have en god konsistens, satte mørtlen sig ikke. Efter 24 timer, hvor prøver normalt tages ud af formen, havde disse prøver stadig ikke sat sig. Da formen blev løsnet var det tydeligt, at mørtelprøverne gik ud af facon. Først efter 3 døgn blev der vurderet, at prøverne kunne fjernes fra formen og overføres til vandbad uden de ville gå i stykker, og selv da var prøverne meget bløde og bøjelige.

Overførslen af støbningerne 90C, 80C, 50C og referencerne til vandbad gik noget bedre. 90C var ved overførsel klistret og fugtig, nærmest som ler eller fed jord, men havde en fast form. Det var muligt at knække et hjørne af med fingrene. 80C virkede blot porøs og let klistret - prøverne gik desuden en smule i stykker, da de sad fast i formene. Det virkede som om at der var en smule bundfald i 50C, således at mørtelprøverne var lidt mørkere i bunden end toppen. Dette gik igen på langt de fleste mørtelprøver, inklusive referenceprøverne, og tilskrives større vandmængde i bunden af støbningerne efter 24 timer i formene. Farveovergangen blev generelt betydeligt mindre markant efter at prøverne havde ligget i vandbad. Der var intet specielt at bemærke ved overførslen af referenceprøverne til vandbad. Generelt havde prøverne med aske flere synlige porer end referenceprøverne.

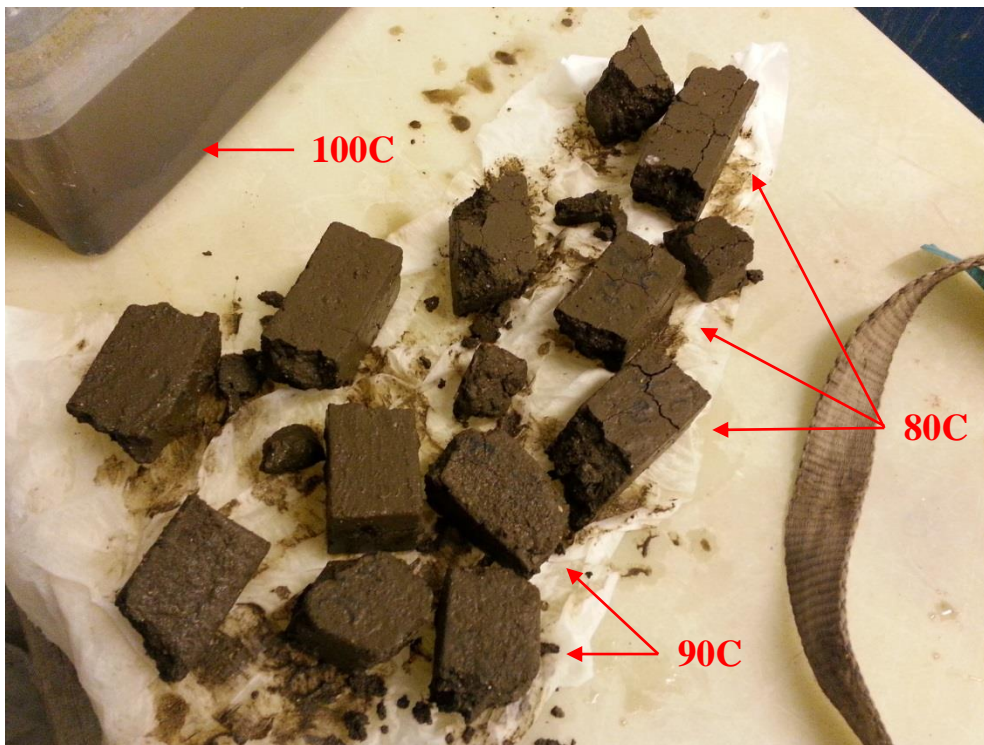
7 dage efter støbning af hhv. 50C og Ref 1 og Ref 2 blev prøverne taget op af vandbadet og styrkeprøvet. Resultaterne er angivet som gennemsnit af de tre individuelle prismer fra hver støbning, og ses Tabel 4. Uddybende resultater findes bilag 6.4.

Tabel 4: Resultater fra styrkeprøvning af Ref 1, Ref 2 og 50C.

Navn	Gns. bøjetrækstyrke [MPa]	Gns. trykstyrke [MPa]
Ref 1	6,99	52,1
Ref 2	9,04	53,8
50C	1,14	3,8

Som det ses, er der en vis forskel på resultaterne for de to referenceprøver, især mht. bøjetrækstyrken. Dette kan tænkes at være en konsekvens af, at Ref 1 blev støbt som den allerførste prøve, mens Ref 2 blev støbt som den fjerde, og erfaringen derved har haft en målbar indflydelse på resultatet. Det ses også, at styrken for mørtelprøven med 50 % cementerstatning er voldsomt reduceret i sammenligning, om end resultatet har størst betydning for trykstyrken. De øvrige støbninger fra de indledende undersøgelser blev ikke styrkeprøvet af årsager forklaret nedenfor.

7 dage efter støbning af 80C, og 6 dage efter støbning af 100C og 90C blev disse mørtelprøver tilset i vandbadet. Det viste sig, at mørtel med så lille andel cement ift. aske ikke hærder, men blot opløses i vand som det ses Figur 7. Det lykkedes at identificere rester af mørtelprøverne 80C og 90C, men ikke af 100C. I bunden af vandbadet lå et tykt lag mudder, og det formodes at 100C-prøverne er blevet fuldstændigt opløst. En tydelig udvikling kan også se i graden af hvor opløste prøverne er. Hvor 80C har en nogenlunde fast form med markerede kanter er 90C så opløst at overfladen er mulig at skrabe af, og der ikke er markante linjer tilbage. 90C og 80C prøverne var i en tilstand så det ikke gav mening at styrkeprøve dem, eller arbejde videre med mørtel med så højt indhold af aske.



Figur 7: Resterne af mørtelprøverne 80C, 90C og 100C hhv. 6 og 7 (kun 80C) dage efter støbning.

4.2 Sæt- og flydemålsprøver

Efter de indledende undersøgelser blev det besluttet, at arbejde videre med mørtel med maksimalt halvdelen af cementen erstattet. De hidtil undersøgte mørtelprismer med 50 % cementerstatning havde ikke haft imponerende styrke, men var dog sammenhængende og hærdede i vandbadet som ønsket. Det blev besluttet ikke at lave prøver med hhv. 60 % og 70 % cementerstatning, og i stedet holde fokus på prøver, som der på forhånd var vished om ville give brugbare støbninger. For at have et kriterie for at afgøre hvor meget vand skulle tilsættes blev der lavet sæt- og flydemålsprøver for de følgende støbninger indtil vandbehovet blev bestemt, hvorfor de har været en central del af undersøgelserne. Bilag 6.5 viser notater og resultater fra støbeprocessen, herunder resultaterne for sæt- og flydemålsprøverne.

Mørtelprøverne 50C s1, 40C s1t og 30C s1t samt Ref s1 og Ref s2 blev som de første støbt med undersøgelse af sæt- og flydemål. Resultaterne ses Tabel 5, og det er tydeligt, at der slet ikke er tilsat tilstrækkeligt med vand til mørtelprøverne med aske. Det bemærkes, at der umiddelbart, som forventet, skal mere vand til at give tilstrækkelig bearbejdelighed ved højere askeindhold.

Tabel 5: Resultater for de indledende sæt- og flydemålsprøver.

Navn	Ekstra vand [g]	Sætmål [mm]	Flydemål gl. metode [mm]	Flydemål ny metode [mm]
50C s1	90	2,7	95,7	-
40C s1t	90	3,2	99,8	-
30C s1t	80	2,3	91,3	-
Ref s1	0	14,3	127,0	-
Ref s2	0	14,3	-	155,2

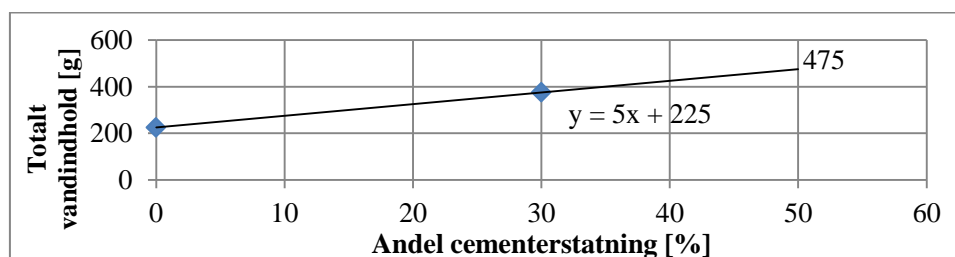
Eftersom sætmålet for de to referenceprøver er nøjagtigt det samme, blev det vurderet, at der ikke behøvedes at lave flere referenceprøver for at understøtte resultatet af flydemålsundersøgelsen med den nyeste metode.

På baggrund af de fundne resultater blev anden ombæring af støbninger med sæt- og flydemålsprøver udført. På den baggrund blev tredje ombæring støbt, osv. Resultaterne er vist Tabel 6, og her kan udviklingen i sæt- og flydemålene tydeligt følges for især 50C:

Tabel 6: Resultater for uddybende sæt- og flydemålsprøver. Prøver med tilpas vandmængde er markeret med kursiv

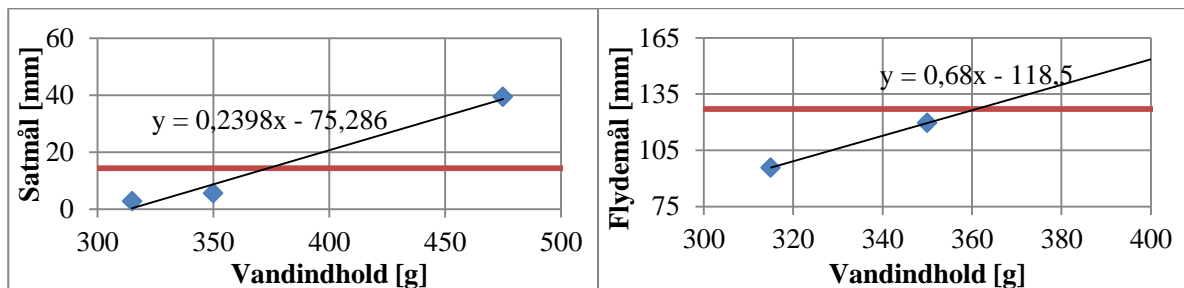
Navn	Ekstra vand [g]	Sætmål [mm]	Flydemål (ny metode) [mm]
50C s2	125	5,5	-
50C s3	250	39,3	203,7
<i>50C s4</i>	<i>145</i>	<i>13,3</i>	<i>152,3</i>
50C s5	165	18,0	163,0
40C s2	150	11,7	142,2
<i>40C s3</i>	<i>165</i>	<i>14,7</i>	<i>155,0</i>
<i>30C s2</i>	<i>150</i>	<i>15,0</i>	<i>154,0</i>

Indledningsvis blev vandbehovet bestemt for 30C ved et heldigt skøn. Herefter blev det antaget, at der var en lineær sammenhæng mellem vandbehovet og askeindholdet i en mørtelprøve. Figur 8 ses vandbehovet derfor som en lineær funktion af den procentvise cementerstatning bestemt ud fra vandbehovet for referenceprøverne og 30C. Ved ekstrapolation ud fra antagelsen om linearitet skulle der tilsættes 250 g ekstra vand, altså 475 g vand i alt. Dette blev gjort ved støbning af 50C s3, men som det ses Tabel 6 blev sæt- og flydemål alt for højt, og det kan konkluderes at der ikke er en lineær sammenhæng mellem vandbehovet og andelen af aske.



Figur 8: Det blev antaget at der var en lineær sammenhæng mellem vandindhold og procentvis cementerstatning ved at prøve at forudsige vandbehovet for 50C ud fra resultater for 30C og referenceprøverne.

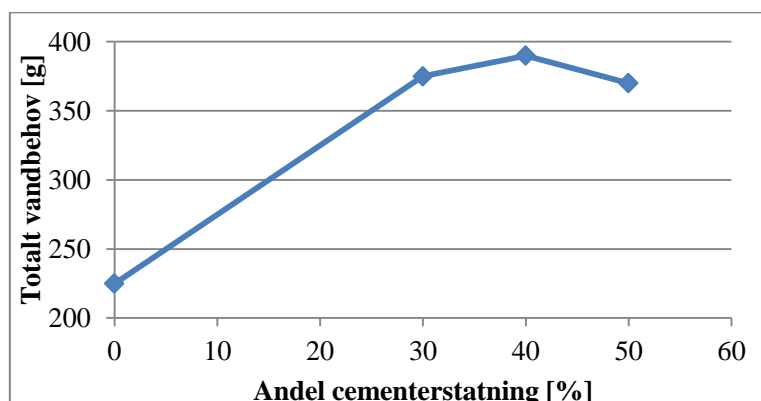
Med 3 forskellige mål for vandindhold og sæt- og flydemål for 50C er det muligt at undersøge om der er en lineær sammenhæng mellem disse faktorer. Resultaterne fundet ved de tre første støbninger er sammenholdt Figur 9, hvor den røde linje angiver målene for referenceprøverne.



Figur 9: Sammenhængen mellem vandindhold, sætmål og flydemål for 50C. Data for flydemål er bestemt ved den gamle metode, hvorfor der kun er to målepunkter. Den røde linje angiver hhv. sæt- og flydemålsværdien for referenceprøverne.

Ifølge de to grafer skal der tilsættes mellem 136 g og 148 g ekstra vand ved 50 % cementerstatning for at opnå den ønskede bearbejdelighed. Til 50C s4 tilsættes 145 g ekstra vand, hvilket viste sig at være en tilpas mængde. Det er altså muligt, at der er en lineær sammenhæng mellem bearbejdelighed og vandindhold. På den baggrund blev det besluttet, at tilsætte rigeligt med vand til næste støbning med 40 % cementerstatning, således at der ville være to målepunkter at interpolere mellem på samme vis som det var gjort ved vandbehovsbestemmelsen for 50C. Derfor blev der tilsat 165 g ekstra vand til 40C s3, hvilket overraskende nok viste at være en perfekt mængde ift. den ønskede bearbejdelighed. For at sikre der ikke var sket en fejl ved bestemmelsen vandbehovet for mørtelprøver med hhv. 40 % og 50 % cementerstatning blev endnu en mørtelprøve støbt. 50C s5 fik under blandingen tilsat 165 g ekstra vand, ligesom 40C s3. Dog blev sæt- og flydemål som det ses Tabel 6 for høje, og resultaterne for 40C s3 og 50C s4 regnes for brugbare.

Ud fra de færdige sæt- og flydemålsundersøgelserne kan en sammenhæng mellem procentvis cementerstatning og vandbehov skitseres som vist Figur 10. Det ses, at vandbehovet stiger med askeindholdet indtil et vist punkt, hvorefter askens manglende sammenhængskraft sammenlignet med cement angiveligt bidrager så meget til bearbejdeligheden at der skal mindre vand til igen.



Figur 10: Det totale vandbehov for en mørtel som funktion af den procentvise erstatning af cement med flyveaske. Vandbehovet topper ved 40 % cementerstatning.

Endelig blev der også lavet undersøgelser af sæt- og flydemål for mørtel med tilsætningsstoffet Sika ViscoCrete HE-230 i blandevandet. Eftersom vandbehovet hurtigt blev bestemt for mørtel med 30 % cementerstatning, og fordi dette blandingsforhold gav gode resultater ift. styrkeprøverne, blev det besluttet at undersøge tilsætningsstoffets effekt på netop denne mørtelblanding. Resultaterne ses Tabel 7. Det endelige vandbehov blev ikke bestemt ved brug af tilsætningsstoffer. Som det ses kunne der ikke kunne spares voldsomt meget vand og vand/cement-forholdet forbliver derfor nogenlunde det samme.

Tabel 7: Resultater for sæt- og flydemålsprøver udført på mørtelprøver med 30 % cementerstatning og tilsætningsstoffet Sika VicoCrete HE-230 i blandevandet.

Navn	Ekstra vand [g]	ViscoCrete [g]	Sætmål [mm]	Flydemål (ny metode) [mm]
30C sV1t	120	6,75	9,5	135,5
30C sV2	140	6,77	19,3	162,3

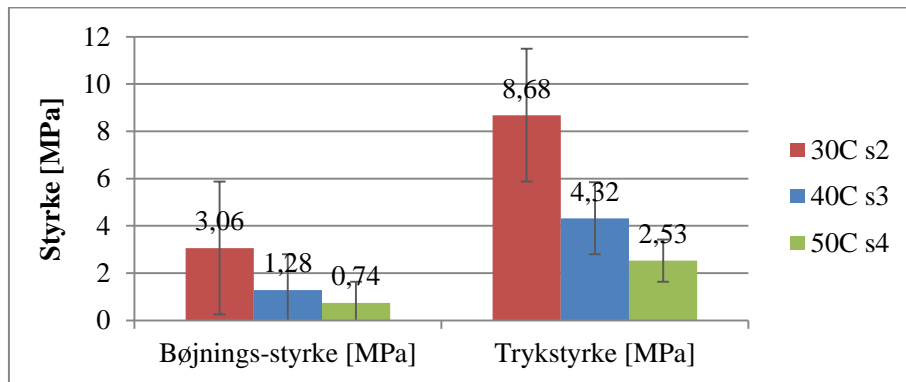
4.3 Styrkeprøver

Efter hærdning i vandbad blev prøverne testet for at bestemme hhv. bøjetrækstyrke og trykstyrke. Alle støbninger hærkede i 7 døgn, med undtagelse af 30C 5 som hærkede i 14 døgn, og 30C 6 som hærkede i 28 døgn. En opsummering af resultaterne ses Tabel 8, mens de samlede data findes bilag 6.6. I Tabel 8 bør det bemærkes, at rækkefølgen for serien 30C ikke følger den forløbende nummerering, men vand- og tilsætningsstofindholdet. Det skal også bemærkes, at 50C s3 ikke blev styrkeprøvet, da mørtelprismene revnede under hærdningen grundet det høje vandindhold.

Tabel 8: Resultater af styrkeprøverne udført efter de indledende undersøgelser. Bemærk at rækkefølgen for serien 30C ikke følger den fortløbende nummerering, og at 50C s3 ikke blev styrkeprøvet. Prøver med tilpas vandmængde er markeret med kursiv

Navn	Ekstra vand [g]	ViscoCrete [g]	Bøjningsstyrke [Mpa]	Trykstyrke [Mpa]
50C s1	90	-	1,38	4,15
50C s2	125	-	1,32	3,62
50C s3	250	-	-	-
<i>50C s4</i>	<i>145</i>	-	<i>0,74</i>	<i>2,53</i>
50C s5	165	-	0,63	2,49
40C s1t	90	-	2,29	5,65
40C s2	150	-	0,98	3,49
<i>40C s3</i>	<i>165</i>	-	<i>1,28</i>	<i>4,32</i>
30C s1t	80	-	2,70	9,23
30C 3	80	-	3,52	9,58
<i>30C s2</i>	<i>150</i>	-	<i>3,06</i>	<i>8,68</i>
<i>30C 4</i>	<i>150</i>	-	<i>3,51</i>	<i>8,98</i>
30C sV1t	120	6,75	2,80	7,78
30C sV2	140	6,77	3,67	9,77
<i>30C 5 (14d)</i>	<i>150</i>	-	<i>4,10</i>	<i>12,7</i>
<i>30C 6 (28d)</i>	<i>150</i>	-	<i>4,70</i>	<i>15,2</i>
<i>Ref s1</i>	<i>0</i>	-	<i>7,36</i>	<i>53,9</i>
<i>Ref s2</i>	<i>0</i>	-	<i>7,41</i>	<i>53,2</i>

Det ses, at der er en markant forskel i styrken afhængigt af askeindholdet, hvilket stemmer overens med de indledende undersøgelser. Der er især forskel i styrken mellem prøverne med 30 og 40 % cementerstatning sammenlignet med forskellen mellem prøver med 40 og 50 % cementerstatning. Figur 11 ses styrkeudviklingen illustreret for støbninger med forskelligt askeindhold og optimal vandmængde jf. sæt- og flydemålsprøverne. Der ses en tendens til eksponentiel sammenhæng mellem askeindhold og styrke, selvom der ikke kan konkluderes noget ud fra dette studie. Det er her interessant at bemærke, at mørtelprøver med forskelligt askeindhold opførte sig markant forskelligt under trykstyrkeprøverne foretaget efter 7 døgn. Hvor mørtelprøver med 40 og 50 % cementerstatning blev knust ved 'bløde' brud med varselsrevner, knustes mørtelprøver med 30 % cementerstatning ved meget pludselige og 'eksplosive' brud. Det tyder på, at prøverne med 30 % erstatning besad en skørhed, som de øvrige ikke gjorde. Denne tendens var gennemgående, og brudtypen er noteret ved hovedparten af resultatbeskrivelserne der ses bilag 6.6. Referenceprøverne blev knust ved pludselige brud uden advarselsrevner, men ikke med den eksplosive effekt der blev oplevet ved styrkeprøvning af 30C-støbningerne. Denne opførsel giver en indikation af, at der måske er et form for styrkemæssigt optimum omkring mørtelprøver med 30 % cementerstatning. Der ses et par eksempler på mørtelprøvernes udseende efter trykstyrkeprøvning Figur 12.



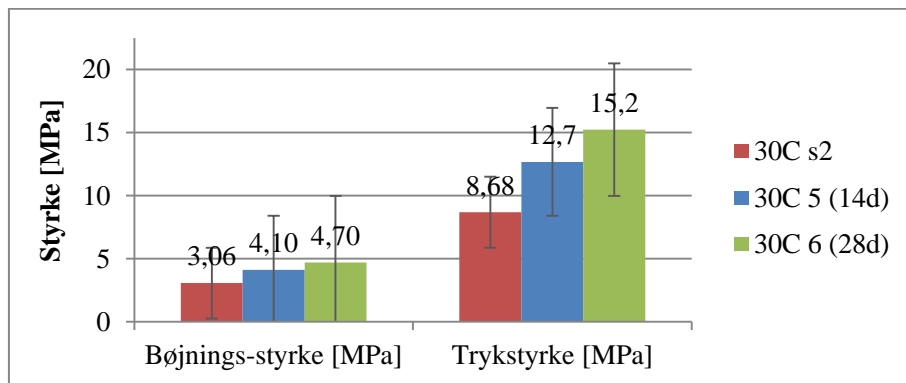
Figur 11: Bøjnings- og trykstyrke for støbninger med forskelligt askeindhold, alle med vandbehovet opfyldt i henhold til sæt- og flydemålsprøverne. Standardafvigelsen er vist.



Figur 12: To mørtelprøver efter trykstyrkeprøvning. Til venstre ses 30C 3 B, til højre 50C s4 A. Bemærk hvordan prøven til venstre er sprængt 'fra hinanden', modsat den til højre.

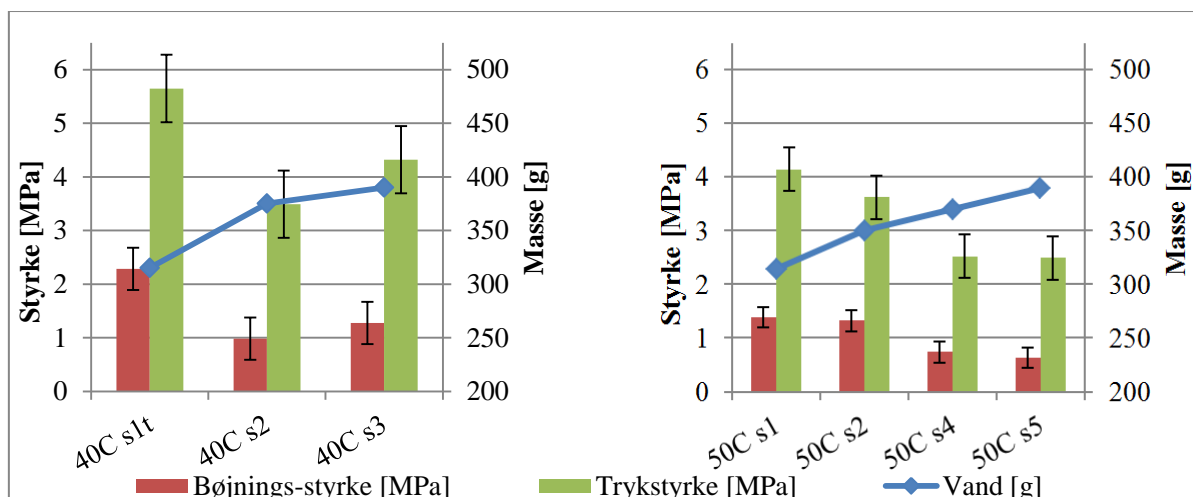
Mørtelprøverne 30C 5 og 30C 6, der blev styrkeprøvet efter hhv. 14 og 28 døgn, havde ikke samme tendens til 'eksplosive' brud som de 30C-prøver der blev styrkeprøvet efter 7 døgn. Disse mørtelprøver blev, som dem med 40 og 50 % cementerstatning, knust ved bløde brud.

Udover anderledes knusning ved trykstyrkeprøvning, var styrken af de to 30C-støbninger med længere hærte tid selvfølgelig også anderledes. Betragtes Figur 13 ses udviklingen i styrke over tid for mørtelprøverne med 30 % cementerstatning og samme, passende vandindhold. Det kan ses, at tilvæksten i styrke som forventet er størst i løbet af de første 14 døgn. De sidste 14 døgn øges styrken kun med omtrent det halve af hvad den gjorde i første halvdel af hærdeperioden.



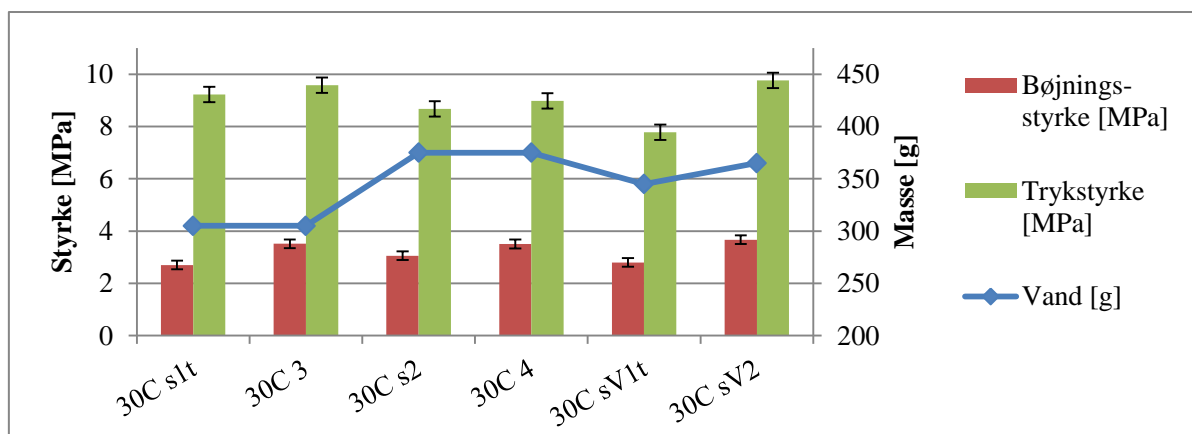
Figur 13: Her ses udviklingen af bøjnings- og trykstyrken over tid for prøverne med 30 % cementerstatning og passende vandmængde jf. sæt- og flydemålsprøverne (150 g ekstra vand tilsat). Standardafvigelsen er vist.

I Tabel 8 er det også muligt at følge udviklingen af styrken for de forskellige serier for sig, i sammenhæng med vandindholdet. Umiddelbart kan man få det indtryk, at vand/tørstofforholdet og styrken er omvendt proportionale. Plotters styrke og vandindhold sammen som det ses Figur 14 og Figur 15 bliver det dog tydeligt at der ikke kan findes en entydig sammenhæng i dette studie. Betragtes de sidste to støbninger i serierne 40C og 50C Figur 14 modsiges det umiddelbare indtryk direkte. For 50C forbliver trykstyrken stort set den samme fra 50C s4 til 50C s5, og for 40C stiger styrken ligefrem fra 40C s2 til 40C s3 trods større vand/tørstoffindhold i begge tilfælde. Det skal bemærkes, at 50C s3 ikke fremgår af grafen, da prøven var revnet efter endt hærtningsperiode - formodentlig pga. det høje vandindhold (250 g ekstra vand blev tilsat, 105 g mere end den passende vandmængde).



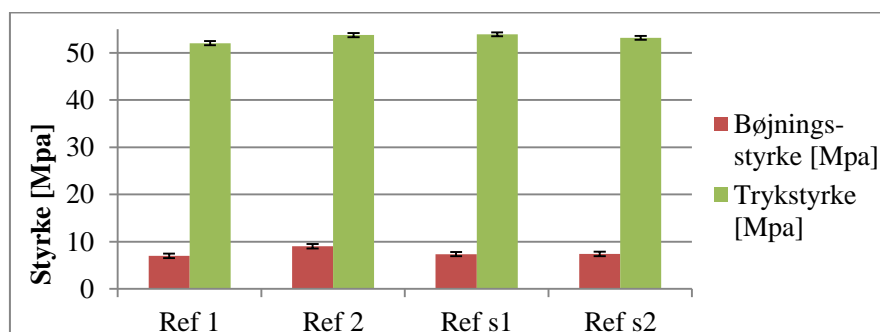
Figur 14: Styrke og vandindhold som funktion af støbning for serierne 40C og 50C. Bemærk at 50C s3 ikke er med, da prøven var revnet efter hærtningsperioden. Standardafvigelsen er vist.

Betragtes Figur 15 bekræftes det, at der ikke kan findes en entydig sammenhæng mellem vand/tørstofforholdet og styrken når der er flyveaske indblandet. Godt nok falder styrken fra støbning 30C s3 til 30C s2, men det er et meget lille fald sammenlignet med det der forekommer fra 40C s1t til 40C s2. Det på trods af, at der for begge støbninger med meget vand er tilsat 150 g ekstra, mens der for støbningerne med lidt vand kun er 10 g til forskel. Det lille fald i styrke forekommer endvidere for 30C- støbningerne - de støbninger med størst forskel i vandindhold. Betragtes styrken sammenholdt med vand/tørstofforholdet for de støbninger med Sika ViscoCrete tilsat ses nøjagtigt modsatte tendens. Der må altså være flere andre faktorer end vand/tørstofforholdet som har større indflydelse på styrken.



Figur 15: Styrke og vandindhold som funktion af støbning for serierne 30C og 30C sV. Bemærk at rækkefølgen prioriterer vandindhold frem for fortløbende nummerering, og at data for 30C med hærte tid længere end 7 dage ikke er medtaget her. Standardafvigelsen er vist.

En ekstra ting der er værd at bemærke er, at der synes at være en tendens til at styrken er højere for støbninger der er udført på kortere tid og med mere rutine. Betragtes igen Figur 15 er der to gange støbt to separate prøver med samme vandindhold. Anden støbning er begge gange udført på kortere tid, idet der ikke blev foretaget sæt- og flydemålsprøver for 30C 3 og 30C 4. I begge tilfælde har anden støbning også størst styrke. Denne tendens er dog ikke til stede for referencestøbningerne, der ses Figur 16. Dog kan der argumenteres for, at den ekstra tid benyttet til at udføre sæt- og flydemålsprøver under støbningen af Ref s1 og Ref s2 ikke har den store betydning når der sammenlignes med Ref 1 og Ref 2, som blev støbt som hhv. første og fjerde prøve.



Figur 16: Styrke for de støbte referenceprøver efter 7 døgn. Der er ikke en umiddelbar sammenhæng mellem tid brugt på støbeprocess og styrke at spore. Standardafvigelsen er vist.

4.4 Porøsitet

Grundet den lille forskel i styrken mellem støbningerne 30C s1t og 30C s2 med hhv. 80 og 150 g ekstra vand tilsat, blev det besluttet at undersøge de to tilfælde nærmere. Prøve 30C 3 og 30C 4 blev derfor støbt med hhv. 80 g og 150 g ekstra vand tilsat med henblik på at undersøge porøsiteten da der er en kendt sammenhæng mellem porøsitet og styrke for mørtel og beton. Tabel 9 ses resultaterne. 'P_a' angiver den åbne porøsitet, dvs. volumen af de åbne porer over volumen af fast materiale. Som forventet er forholdet mindst for prøven med mindst vandindhold. 'u_{ssd}' beskriver vandtørstofforholdet i en vakuumvandmættet, overfladetør tilstand i enheden masse af vand over masse af fast materiale. Også denne er som forventet mindre for prøven med mindst vand. Resultaterne er et gennemsnit af to prøver fra samme støbning, og udregninger samt målinger kan ses bilag 6.7.

Tabel 9: Resultater for porøsitetsundersøgelse af 30C med hhv. 80 g og 150 g ekstra tilsat vand. P_a står for 'prøvelegemets åbne porøsitet', mens u_{ssd} står for 'vandtørstofforhold i vakuumvandmættet overfladetør tilstand'.

Prøve	P _a (gns.) [m ³ / m ³]	u _{ssd} (gns.) [kg / kg]
30C 3	0,287	0,15
30C 4	0,317	0,18

4.5 Saltanalyse

Koncentrationen af de mest almindelige salte blev bestemt for det vand hvori mørtelprøverne hærdede med henblik på sammenligning med tidligere fund. I Tabel 10 ses resultatet af analysen sorteret efter andel således at saltet med størst koncentration fremgår først. Resultaterne findes som modtaget fra laboratoriet bilag 6.8.

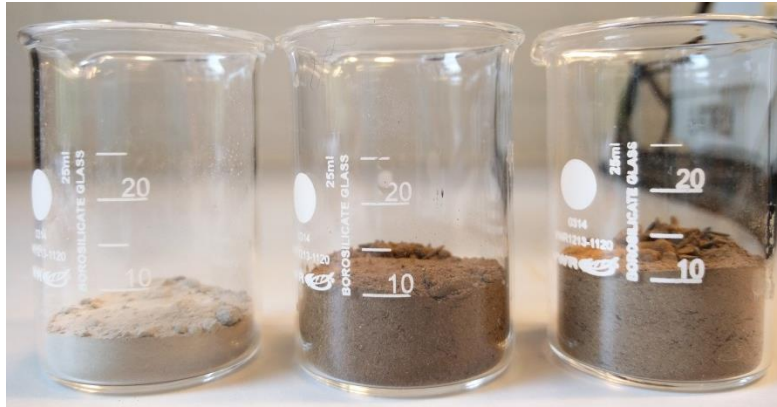
Tabel 10: Saltkoncentrationen i vandbadet hvor mørtelprøverne hærder.

Stof	K	SO ₄	Cl	Na	NO ₃	Ca	Fe	P	Al	Mg
mg/L	7420	1940	1020	632	66,4	1,23	0,624	0,155	0,120	0,000
%	66,9	17,5	9,2	5,7	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Her kan det ses, at især indholdet af kalium, sulfat og klor især er højt.

4.6 "Askevolumen"

Eftersom det var betydelig forskel på volumen af samme mængde cement og akse, og forskel i volumen af færdig mørtel med og uden flyveaske, blev der set nærmere på vægt-masse forholdet. Som beskrevet afsnit 3.5 er volumenforskellen dokumenteret billedligt, som det ses Figur 17. Der var 6,0123 gram cement, 6,0158 gram fugtig aske og 6,0159 gram tørret aske i målebægerne. Det er svært at sætte et mål på for hvor stor forskellen er, men det er tydeligt at den tørrede flyveaske benyttet til støbning har omtrent dobbelt volumen af portlandcementen trods de er forsøgt pakket lige tæt.



Figur 17: Fra venstre mod højre ses 6 gram af hhv. almindelig portlandcement, fugtig flyveaske som modtaget fra Køge kraftvarmeværk og samme flyveaske efter tørring ved 105 °C natten over.

Billede 10 ses desuden en vis forskel i materialernes naturlige form idet flyveasken danner nogle meget hårde klumper modsat cementen der er meget homogen.



Figur 18: Det kan her ses hvordan flyveasken, modsat cementen, klumper.

4.7 Øvrige observationer

Undervejs i forløbet blev det besluttet at undersøge forskellige forhold omkring mørtelprismerne. Det blev gjort som et led i de generelle undersøgelser af forskellene mellem mørtelprøver med og uden flyveaske.

4.7.1 Størrelse og vægt

Størrelsen og vægten af de målte mørtelprismer blev bestemt umiddelbart efter udtagelse af støbeformen, og igen umiddelbart inden styrkeprøvning. Størrelsesændringen blev undersøgt i en kortere periode, indtil det stod klart at der ikke var en særlig ændring for nogle af prismerne. Vejningen fortsatte i en længere periode. Resultaterne præsenteres Tabel 11. Både størrelses- og vægtudviklingen vises som et gennemsnit af differencen mellem målingen før og efter hærkning for de støbte prismen.

Tabel 11: Vægt- og størrelsesdifferencen mellem før og efter hærkning i vandbad.

Navn	Vægtforskel [g]	Længdeforskel [mm]	Breddeforskel [mm]	Dybdeforskel [mm]
30C s1t	4,07	-	-0,01	-1,75
50C s2	0,72	-	0,04	0,18
Ref s2	5,55	0,08	0,02	0,08
40C s2	3,36	0,39	0,10	-0,10

30C s2	3,39	-0,43	-0,60	0,54
50C s3	18,89	-	-	-
30C sV1t	4,02	0,08	0,02	0,08
30C 3	3,95	0,08	-0,01	0,07
30C 4	3,60	0,07	0,01	0,07
50C s4	0,54	-	0,18	0,23

Det ses, at der generelt er en meget lille forskel i størrelsen af prismene før og efter hærkning i vandbad. I visse tilfælde er det observeret, at mørtelprøverne faktisk krymper, men dette er højst sandsynligt et resultat af måleusikkerhed da det er meget små størrelser. Vægtforøgelsen svinger noget mere for de forskellige prøver. Der ser dog ud til at være en tendens til, at et højere askeindhold mindsker vægtforøgelsen, men det er ikke muligt at konkludere noget med så få målinger. I den sammenhæng må der desuden ses bort fra 50C s3, da denne prøve revnede under hærkningen. Den blev derfor heller ikke hverken målt eller styrkeprøvet.

5 Diskussion

I dette afsnit vil resultaterne blive diskuteret i kontekst med teori og eksterne kilder.

5.1 Sæt- og flydemålsprøver

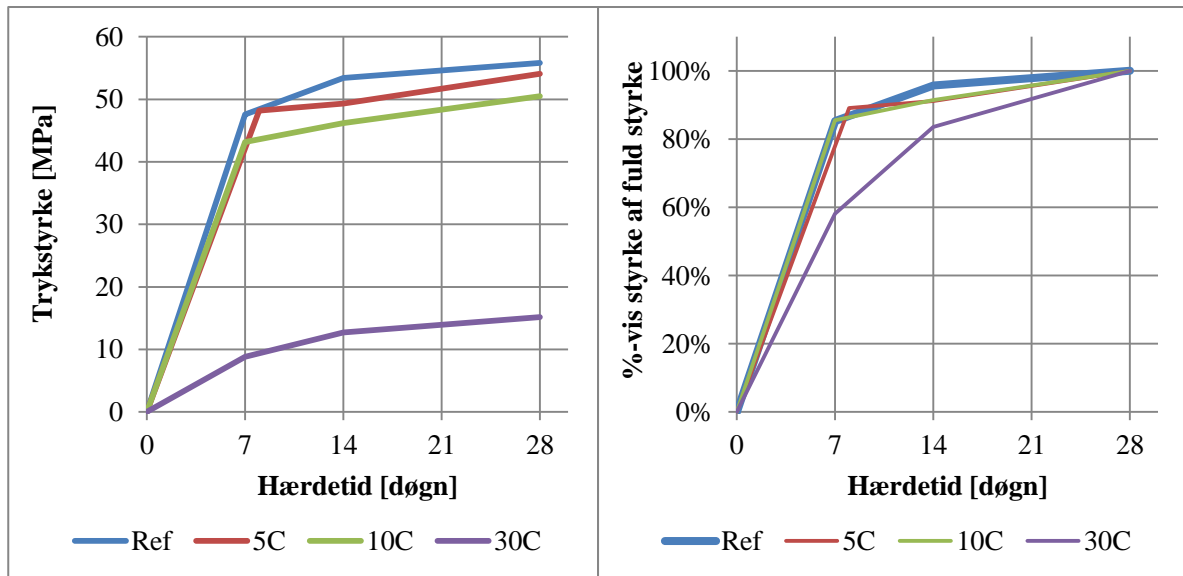
Resultaterne af sæt- og flydemålsprøverne var overraskende. Det var forventet, at der skulle tilsættes en del ekstra vand ved så højt askeindhold, men ikke i den udstrækning som det ses her. Tidligere forsøg med flyveaske fra Køge kraftvarmeværk har været gennemført uden ekstra tilsat vand i de tilfælde hvor det udelukkende har været tilsat som cementerstatning, se (Ebert, 2015) og (Hansen, 2015). Dog har andelen af aske i disse tilfælde været noget mindre, end tilfældet er i denne undersøgelse. Det var heller ikke forventet, at vandbehovet som funktion af den procentvise askeerstatning ville have et toppunkt som det sås Figur 10. Dette kan måske forklares med, at afstanden mellem cementkornene øges så meget at plasticiteten stiger på samme måde som når tilsætning af plastificerende stoffer holder dem adskilt. Det er også muligt, at indholdet af Ca(OH)_2 bliver for lavt til at der kan foregå en puzzolansk reaktion med den smule SiO_2 asken indeholder, hvorved sammenhængskraften også mindskes. Dog indeholder asken relativt små mængder SiO_2 , og den indeholder også i sig selv Ca(OH)_2 , så det er en mindre sandsynlig forklaring.

Der blev også foretaget sæt- og flydemålsprøver med plastificerende stoffer tilsat. Der blev benyttet et tredjegerations- superplastificerende stof, men effekten levede ikke op til forventningerne. Hvis det antages, at der kan interpoleres mellem resultaterne for sæt- og flydemålsprøverne for 30C sV1t og 30C sV2 kan vandbehovet for 30C med ViscoCrete tilsat estimeres. Benyttes sætmålet fås et estimat på 355 g vand, mens flydemålet giver et estimat på 360 g vand. Vandbehov for 30C blev oprindeligt bestemt til at være 375 g vand, hvorved det kan konstateres at kun 4-5 % af vandindholdet spares. Det er en mindskelse af v/t- forholdet fra 0,83 til 0,79. Det står i skarp kontrast til forventningen om en besparelse på 25 % af vandindholdet, som normalt kan opnås ved brug af superplastificerende stoffer jf. afsnit 2.1.2. At det superplastificerende stof virker så ringe i denne sammenhæng kan måske forklares med det mindskede indhold af cement, i det tilfælde at stoffet ikke kan reagere med flyveasken. Dog virker det som en voldsom forringelse af virkeevnen når der stadig er 60 % cement tilbage i blandingen som stoffet kan reagere med. Der var heller ingen tegn på retardering som ellers opstår ved overdosering af plastificerende stoffer. Det er måske derfor mere sandsynligt, at stoffet reagerer mere med flyveasken end med cementen, og asken derved binder stoffet til sig så der kun er en lille mængde superplastificerende stof tilbage til at reagere med cementen. Det er muligt at tærsklen for hvornår der opstår retardering ved brug af plastificerende stoffer flyttes ved brug af træflyveaske, men det er ikke muligt at sige noget nærmere om ud fra denne undersøgelse.

5.2 Styrkeprøver

At styrken af de forskellige støbninger blev så lav var delvist forventet. I tidligere projekter er det blevet konstateret at træflyveaske fra Køge Kraftvarmeværk umiddelbart har en lav puzzolansk effekt, ligesom samtlige støbninger med træflyveaske (på nær en) har haft forringet styrke sammenlignet med referenceprøver (Ebert, 2015), (Hansen, 2015). Men det har overrasket hvor meget styrken er faldet når andelen af cementerstatning er øget fra 5 - 10 % til 30 %. Udviklingen af styrke som funktion af tid er vist Figur 19 for prøver med hhv. 0 %, 5 % 10 % og 30 % cementerstatning. Her skal det bemærkes, at prøverne med mindre end 30 % cementerstatning er støbt og styrkeprøvet af Esben Hansen, med aske fra et andet parti end det benyttet i dette projekt. Det er tidligere vist (Ebert, 2015), at asken fra Hansens parti resulterer i højere styrke end den fra Eberts parti, der benyttes i dette projekt.

Dog vurderes det at askerne har så meget tilfælles at en sammenligning som denne kan retfærdiggøres. Betragtes først grafen til venstre på Figur 19 ser det ud til at de sidste 20 % cementerstatning svækker styrken noget mere end de første 5 og 10 %. En anden interessant detalje er hvorledes prøverne med lille cementerstatning meget pænt følger referenceprøvens hærdemønster de første 7 dage, og umiddelbart følger hinandens hærdemønster de næste 21 dage. Desværre er prøven med 5 % cementerstatning styrkeprøvet på 8. hærdedag frem for 7., hvorfor det er svært at vurdere om de faktisk ville følges helt. Dog er det tydeligt at prøven med 30 % cementerstatning har sit helt eget, noget langsommere og langt mere jævne hærdeforløb end de øvrige prøver. Denne sene udvikling af styrke kan tænkes at være et resultat er det mindskede indhold af 3CaO SiO_2 , som giver hurtig tidlig styrke.



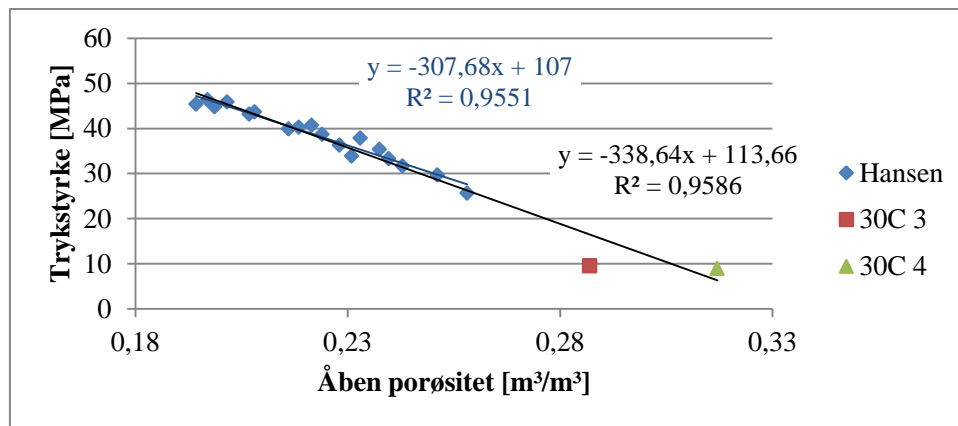
Figur 19: Udviklingen af trykstyrke som funktion af tid for prøver med hhv. 0 %, 5 %, 10 % og 30 % cementerstatning. Til højre er trykstyrken vist som procentvis andel af den højest opnåelige styrke for hver prøve. Data for prøverne Ref, 5C og 10C er fra (Hansen, 2015, p. 28).

5.3 Porøsitet

Som konstateret tidligere er der en tydelig sammenhæng mellem en mørtelprøves styrke og dens porøsitet. Tidligere studier viser også, at der umiddelbart er en vis sammenhæng mellem indholdet af Køge træflyveaske og porøsitet (Hansen, 2015, p. 32). I Hansens studie er der benyttet vasket aske, modsat ubehandlet som i dette studie, men det er fundet at tendensen er generel for træflyveaske (Ottosen, et al., 2016), hvorfor det vurderes at resultaterne godt kan sammenlignes. Det skal også bemærkes, at træasken i Hansens studie i visse tilfældene også har været tilsat som erstatning for sand, evt. i kombination med tilsætning som erstatning for cement.

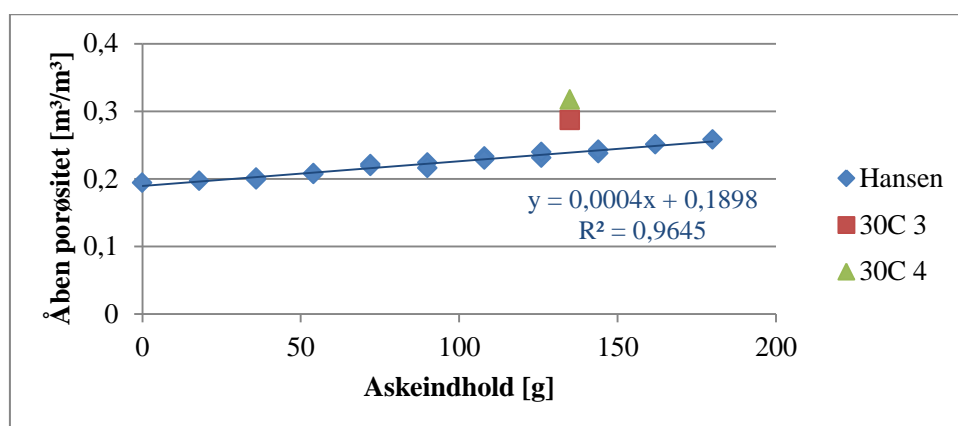
Figur 20 ses styrken af en række 7-døgns mørtelprøver som funktion af den åbne porøsitet. Serien 'Hansen' inkluderer målepunkter fra (Hansen, 2015), mens porøsiteten 30C 3 og 30C 4 er plottet med hvert sit symbol, da de alene adskiller sig fra hinanden i vandindhold. Øverst ses med blå tekst forskriften for en lineær regression der inkluderer Hansens datapunkter. Nedenfor ses med sort tekst forskriften for en lineær regression som inkluderer samtlige datapunkter i grafen. Her bekræftes det, at den åbne porøsitet og trykstyrken af en mørtelprøve generelt har en klar lineær sammenhæng. Dog er det påfaldende hvor ens styrke de to prøver med 30 % cementerstatning har. Styrken af 30C 3 ligger tydeligvis lavt i forhold til den generelle tendens, og påfaldende lavt sammenlignet med 30C4. Blev de to punkter sammenlignet alene havde tendensen været meget anderledes. Det er svært at forklare

hvad der kan have forårsaget udsvinget. Det kan måske forklares med, at der sker noget spændende når omkring 30 % af cementindholdet i en mørtelprøve erstattes, som endnu ikke vides hvad er. Det kan også tænkes at den ene støbning benyttet til undersøgelse af porøsiteten har været dårlig til trods for at der ikke er særlig indikation for det i resultaterne af styrkeprøven.



Figur 20: Sammenhængen mellem åben porøsitet og styrke af 7-døgns mørtelprøver indeholdende træflyveaske fra Køge. Øverst vises forskriften for en lineær tendenslinje for serien 'Hansen', nederst forskriften for en lineær tendenslinje der inkluderer alle datapunkter.

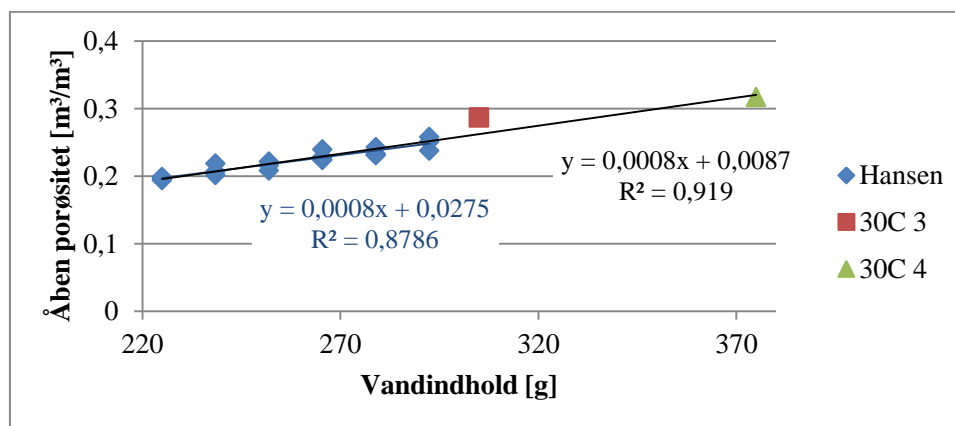
Når sammenhængen mellem indholdet af aske og den åbne porøsitet undersøges nærmere passer de to nye datapunkter ikke helt så godt ind i sammenhængen. Figur 21 ses samtlige data plottet sammen, den lineære regression som er vist med blå farve inkluderer udelukkende data fra serien 'Hansen'. Her er det 30C 4 som afviger mest fra 'Hansen'-dataserien, men begge de nye punkter ligger udenfor. At porøsiteten er for begge højere end forventet kan højst sandsynligt forklares med det højere vandindhold. Ingen af støbningerne fra serien 'Hansen' indeholder mere end 300 g vand, hvilket er mindre end de to 30C prøver indeholder hver især. Det er også en mulighed at det faktum at asken benyttet i 'Hansen'-serien var været vasket inden støbning spiller ind, og at opløselige stoffer er blevet udvasket under porøsitetsundersøgelsen. Det er derfor svært at finde entydig forklaring og sammenhæng mellem lige præcis askeindholdet og porøsiteten.



Figur 21: Sammenhængen mellem indholdet af aske og den åbne porøsitet for 7-døgns mørtelprøver med træflyveaske fra Køge. Den lineære tendenslinje inkluderer kun datapunkter fra serien 'Hansen'.

En ting der er en relativt sikker sammenhæng mellem er vandindholdet i prøverne og den åbne porøsitet. Figur 22 ses sammenhængen mellem disse data plottet, og de to tendenslinjer for hhv. 'Han-

sen'-datapunkterne (blå) og alle datapunkterne sammen (sort) afslører at overensstemmelsen mellem resultaterne er relativt god. Datapunktet for 30C 3 ligger endnu engang lidt ved siden af, men afviger ikke voldsomt meget mere end visse af datapunkterne for 'Hansen'-serien. Formålet med plottet er, at understrege, at det er svært at knytte en sammenhæng mellem porøsitet og askeindhold med de tilgængelige data, idet udsvinget lige såvel kan stamme fra vandindholdet i de forskellige prøver.



Figur 22: Sammenhængen mellem vandindholdet og den åbne porøsitet for 7-døgns mørtelprøver indeholdende træflyveaske fra Køge. Til venstre vises forskriften for en lineær tendenslinje for serien 'Hansen', til højre forskriften for en lineær tendenslinje der inkluderer alle datapunkter.

5.4 Saltanalyse

Umiddelbart er det svært at sammenligne resultaterne fra ion- og tungmetalanalysen med den allerede givne viden om ionindholdet i asken. Når man ser nærmere på forholdet mellem de fundne ioner er det dog muligt at se en interessant sammenhæng mellem andelen af kalium- og sulfat-ioner i asken og i vandbadet til hærkning. Et uddrag af resultaterne fra tidligere undersøgelser og undersøgelser foretaget i dette projekt ses Tabel 12. Her er det interessant at se hvordan indholdet af kalium- og sulfat-ioner er meget mere ens for træasken end for vandet i vandbadet. Der er også en vis forskel i forholdet mellem de øvrige ioner, men den er mindre markant.

Tabel 12: Oversigt over hvor stor en andel de enkelte ioner udgør af det samlede resultat. Øverst ses indholdet i asken som den modtages, nederst indholdet i det vand som mørtelprøverne hærder i.

	SO ₄	K	Cl	Na	NO ₃	Ca
Ioner i aske [%]	46,6	43,9	5,8	3,1	0,5	0,1
Ioner i vandbad [%]	17,5	66,9	9,2	5,7	0,6	0,0

Den relative forskel mellem indholdet af kalium sulfat kunne tyde på, sulfat-ionerne optages i mørtelprøverne under støbning og hærkning i langt højere grad end kalium-ionerne gør. Det er interessant at bemærke, at indholdet af sulfat faktisk ligger på så højt et niveau, at vandet vurderes til at være i aggressiv miljøklasse XA2 ifølge (DS/EN206-1, 2002). DS/EN 206-1 er udgået, men henvises til i den gældende DS 2426 EN 206-1 2011.

5.5 Fejlkilder

Ingen forsøg kan udføres uden der vil være nogle fejlkilder som det er vigtigt at være opmærksom på. Derfor vil de mest påfaldende nævnes her.

Under hele forløbet blev der ved støbning af mørtelprøver benyttet den samme vægt til afvejning af materialer og færdige prøvers vægt. Dog opførte den sig ujævnt gennem hele perioden, og stod i mange tilfælde og svingede på de sidste decimaler. Det vurderes derfor at det ikke kan antages, at der altid er afvejet med mere end en decimalers sikkerhed.

Ved støbning af mørtelprøver var der i enkelte tilfælde rester af aske og cement der havde sat sig fast i bunden af blandeskålen. I disse tilfælde er de angivne mængder af indholdet ikke svarende til mængderne i støbningerne. I visse tilfælde var det også svært at vibrere mørtelblandingerne på plads, især ved de meget tørre blandinger. Generelt må der tages højde for, at støbningerne er udført hurtigere og mere rutineret efterhånden som projektperioden er skredet fremad, hvilket også kan have en effekt på resultatet. Endelig er det vigtigt at huske, at der vil være nogle støbninger som har været bedre end andre, især har de meget tørre prøver fx været svære at vibrere sammenlignet med de mere fugtige.

Under porøsitetsundersøgelserne blev en anden vægt benyttet. Midt i perioden blev den dog desværre fjernet, og ved afvejning af kontrollod ses det, at der er en vis usikkerhed her. Den første vægt gav dog også tvetydige resultater ved afvejning af kontrollod, det ses bilag 6.7. Om end udsvinget ikke var voldsomt stort bidrager det til en vis usikkerhed. Da mørtelprøverne under dette forsøg stod under vand i en ekssikator natten over var der desuden tændt for vaakumpumpen, selvom det ikke var meningen. Det vides ikke om dette måske kan have haft indflydelse på resultatet.

Ved måling af størrelsen af prismerne blev der, som tidligere nævnt, benyttet flere forskellige skydelærere undervejs. Dette kan være problematisk, idet der så ud til at være en vis forskel i nulstillingen mellem visse af skydelærerne. Det giver vis måleusikkerhed, især i kraft af de små størrelser der arbejdes med.

Sidst er der en vis usikkerhed i den måde styrkeprøverne er udført på. Den anvendte Mohr & Federhaff maskine benytter olietryk, hvor hastigheden hvormed styrken øges styres manuelt. Det er derfor muligt, at styrkeprøverne har forløbet forskelligt gang til gang, hvilket kan have påvirket resultaterne.

5.6 Videre forskning

Selvom dette projekt har føjet til den samlede viden om brug af træflyveaske, navnlig træflyveaske fra Køge Kraftvarmeværk, i mørtelprøver, er der også blevet rejst nogle spørgsmål der kun kan besvares ved yderligere forskning inden for området. Af forslag til emner der kan udforskes yderligere kan følgende f.eks. nævnes:

Tidligt i forsøgsprocessen stod det klart, at der er en øvre grænse for hvor stor en andel af cementen i en mørtel der kan erstattes med træflyveaske før end resultatet af støbningen bliver ubrugeligt. Grænsen er i dette studie fundet til at ligge mellem 50 % og 80 %, men det kunne være spændende at bestemme den nærmere. Her kunne det også være spændende at se på effekten af det tilsatte vand. Kan mere cement måske erstattes af træaske med positivt resultat hvis der laves en meget flydende blanding, eller forholder det sig omvendt?

I afsnit 4.2 blev det konstateret, at vandbehovet for en mørtel stiger med andelen af cement der erstattes af træaske - men kun indtil et vist punkt. Herefter falder vandbehovet igen selvom mere cement

erstattes af træaske. Denne tendens kunne være spændende at undersøge nærmere, og fastlægge hvor-
når vandbehovet er størst. Det kunne også være interessant at se om der kan findes en entydig sam-
menhæng mellem andelen af træflyveaske og vandbehov. Undersøgelsen kan også gentages med træf-
lyveaske fra andre kraftvarmeværker for at se om sammenhængen er generel for træflyveasker.

Jf. afsnit 4.3 ser det ud til, at mørtelprøver med 30 % cementerstatning styrkemæssigt påvirkes mindre
af den tilsatte vandmængde end mørtelprøverne med hhv. 40 og 50 % cementerstatning. Det kunne
være interessant at undersøge nærmere, og evt. finde ud af om det er et relativt styrkemaksimum for
mørtelprøver med mellem 10 og 40 % cementerstatning. Man kunne i den sammenhæng også se på
porøsiteten i sammenhæng med styrken, og føje yderligere data til Figur 20.

I afsnit 5.1 diskuteres det hvorvidt større mængder af superplastificerende stoffer vil virke lige så re-
tarderende i mørtelprøver med træflyveaske som i mørtelprøver uden træaske. Da mørtelprøverne med
større mængder træflyveaske har et enormt stort vandbehov vil det være relevant at undersøge nærme-
re. I den forbindelse kunne det også være spændende at se på hvad det er ved træflyveasken som
mindsker det superplastificerende stofs virkeevne, og om andre plastificerende stoffer vil være bedre.

Undervejs blev det observeret, at volumen af en færdigblandet mørtelmasse er større når den indehol-
der træflyveaske. Det kunne være interessant at se på hvor stor betydning træasken har for volumen,
og om der fx kan spares på mængden af tilsat sand uden reduktion af den færdige blandings volumen.

6 Konklusion

I projektet har fokus været på bestemmelse af vandbehov, styrke og andre egenskaber for mørtelprøver med højt indhold af træflyveaske fra Køge kraftvarmeværk.

Først og fremmest blev det fundet, at der er et maksimum for hvor højt askeindholdet i en mørtelprøve kan være, hvis resultatet af støbningen skal være brugbart. For højt indhold af aske resulterede i smuldrende mørtelprøver, der blev opløst i vandbadet under hærkning. Der blev derfor arbejdet videre med mere moderat askeindhold. Her blev vandbehovet for prøver med hhv. 30, 40 og 50 % cement erstattet med flyveaske bestemt. Det blev fundet, at der skal tilsættes mellem 64 og 73 % ekstra vand for at opnå sæt- og flydemål svarende til de for en referenceprøve. Det blev konkluderet, at vandbehovet for en mørtelprøve med større mængde træflyveaske tilsat stiger med indholdet af aske indtil et vist punkt, hvorefter vandbehovet igen vil mindskes trods endnu højere askeindhold.

Styrken af mørtelprøverne hang også sammen med askeindholdet. De prøver med mindst styrke indeholdt mest aske, og vice versa. Ingen af styrkerne kom dog i nærheden af den styrke som opnås for mørtelprøver uden tilsat flyveaske. Det blev desuden fundet, at mørtelprøver med 30 % aske var mere skøre end både referenceprøver, og prøver med højere askeindhold. Mørtelprøver 30 % aske kunne desuden konstateres at udvikle styrke sent i hærdeforløbet over en 28-døgnperiode.

Porøsiteten blev målt for to prøver med samme askeindhold og forskellig vandmængde. Prøven med højest vandindhold var også mest porøs. Dog var forskellen mellem styrken af de to prøver meget lille deres forskellige porøsitet til trods. Resultaterne blev sammenlignet med tidligere resultater, men det var ikke muligt at finde en entydig sammenhæng mellem porøsiteten og askeindholdet.

Ion- og tungmetalindholdet i det vand som mørtelprøverne blev opbevaret i under hærkning blev også analyseret. Her blev der fundet en stor koncentration af især kalium-ioner, men også en del sulfationer. Blev der sammenlignet med indholdet af ioner i asken virkede det til, at mørtelprøverne binder en del af sulfat-ionerne i asken, men ikke kalium-ionerne.

Derudover blev ved visuel inspektion fundet, at massefylden af træflyveasken er væsentligt mindre end massefylden af den anvendte Portlandcement. Det blev også fundet, at størrelsen af mørtelprøverne ikke ændrede sig under hærkning. Til gængæld blev der fundet en tendens til, at højere askeindhold i en mørtelprøve hang sammen med mindre vægtforøgelse under hærkning.

Litteratur

- DS/EN196-1, 2005. *Metoder til prøvning af cement - Del 1: Styrkebestemmelse*. 2. red. -: Dansk Standard.
- DS/EN206-1, 2002. *Beton - Del 1: Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse*. 2. red. s.l.:Dansk Standard.
- DS/EN450-1, 2012. *Flyveaske til beton - Del 1: Definition, specifikation og overensstemmelseskriterier*. 3. red. s.l.:Dansk Standard.
- Ebert, B., 2015. *Anvendelse af forskellige træasker i beton*, Kgs. Lyngby: DTU Byg.
- Geiger, M. et al., 2008. D Keramer. I: O. T. Sørensen & A. Nielsen, red. *Materialebogen*. København: Nyt Teknisk Forlag, pp. 477-696.
- Hansen, E., 2015. *Trykstyrke og densitet for beton*, Kgs. Lyngby: DTU Byg.
- Lundgaard, N. C., 2013. *Betonhåndbogen*. [Online]
Available at: www.betonhaandbogen.dk/bogen-i-kapitler
[Senest hentet eller vist den 28 December 2015].
- Mehta, P. K. & Monteiro, P. J., 2006. *Concrete - Microstructure, Properties, and Materials*. 3. red. s.l.:McGraw-Hill.
- Ottosen, L. M., Jensen, P. E. & Kirkelund, G. M. G. P., 2016. *Wood ash used as partly sand and/or cement replacement in mortar*, Kgs. Lyngby: DTU Byg.
- TI-B18(86), 1986. *Prøvningsmetode - Frisk mørtel. Konsistens. Flydemål på faldbord.*, -: Teknologisk Institut, Byggeri.

Bilag

6.1 Datablad: Sika ViscoCrete® HE-230


Construction

Teknisk datablad
Version: 17-09-2015
Identifikationsnr.:
Sika ViscoCrete® HE-230

Sika ViscoCrete® HE-230

Superplastificerende tilsætningsstof til fremstilling af beton og mørtel, med høj tidlig styrke

Anvendelses-områder	Sika Viscocrete HE-230 anvendes generelt ved produktion af cementbundne materialer.																				
Produktbeskrivelse	<p>Sika Viscocrete HE-230 er et tredje generations-, superplastificerende tilsætningsstof til fremstilling af beton og mørtel, samt vibreringsfri beton og mørtel i elementproduktion.</p> <ul style="list-style-type: none">■ Blandinger med højt flydemål■ Blandinger med høj vandreduktion■ En kombination af høj vandreduktion og højt flydemål■ Vibreringsfri beton til elementproduktion <p>Høj vandreduktion og stor flydeevne uden retardering, har sammen med tidlig høj styrke en positiv virkning på ovennævnte anvendelsesområder.</p> <p>Sika Viscocrete HE-230 virker på forskellige områder. Gennem overfladeabsorption og sterisk separationseffekt på cementpartiklerne, parallelt med hydrationsprocessen, opnås følgende egenskaber:</p> <ul style="list-style-type: none">■ Ekstrem høj vandreduktion■ Høj tæthed og styrke■ Glimrende flydeevne■ Reducerer udstøbnings- og vibreringsproblemer■ Specielt egnet til fremstilling af vibreringsfri beton■ Høj tidlig styrkeudvikling																				
Produktdata																					
Tekniske data	<table border="0"><tr><td>Aktive komponenter:</td><td>Modificeret polycarboxylat</td></tr><tr><td>Farve:</td><td>Lys gulbrun turbid væske</td></tr><tr><td>Homogenitet:</td><td>Homogent ved den foreskrevne omrøring</td></tr><tr><td>Densitet, kg/l:</td><td>1,05 ± 0,02</td></tr><tr><td>Tørstofindhold, vægt-%:</td><td>26,0 ± 1,5 (EN 480-8)</td></tr><tr><td>pH-værdi:</td><td>4,4 ± 1,0</td></tr><tr><td>Ækvivalent alkaliindhold (Na₂O, vægt-%)</td><td>< 0,7</td></tr><tr><td>Kloridindhold, vægt-%</td><td></td></tr><tr><td>Vandopløselig:</td><td>< 0,1</td></tr><tr><td>Total:</td><td>< 0,1</td></tr></table>	Aktive komponenter:	Modificeret polycarboxylat	Farve:	Lys gulbrun turbid væske	Homogenitet:	Homogent ved den foreskrevne omrøring	Densitet, kg/l:	1,05 ± 0,02	Tørstofindhold, vægt-%:	26,0 ± 1,5 (EN 480-8)	pH-værdi:	4,4 ± 1,0	Ækvivalent alkaliindhold (Na ₂ O, vægt-%)	< 0,7	Kloridindhold, vægt-%		Vandopløselig:	< 0,1	Total:	< 0,1
Aktive komponenter:	Modificeret polycarboxylat																				
Farve:	Lys gulbrun turbid væske																				
Homogenitet:	Homogent ved den foreskrevne omrøring																				
Densitet, kg/l:	1,05 ± 0,02																				
Tørstofindhold, vægt-%:	26,0 ± 1,5 (EN 480-8)																				
pH-værdi:	4,4 ± 1,0																				
Ækvivalent alkaliindhold (Na ₂ O, vægt-%)	< 0,7																				
Kloridindhold, vægt-%																					
Vandopløselig:	< 0,1																				
Total:	< 0,1																				



	Normaldoseringsområdet:	0,2 – 1,5 vægt-% af cement + flyveaske + mikrosilica
	Bivirkninger i normaldoseringsområdet:	Ingen
	Bivirkninger ved overdosering:	Retardering / afblanding
Produktcertificering	Sika ViscoCrete HE-230 indeholder ikke klorider, eller andre materialer, der fremmer rustdannelse på stål. Det kan derfor anvendes uden restriktioner i armerede og forspændte konstruktioner. Sika ViscoCrete HE-230 er omfattet af EC certificering og er CE mærket.	
Betonproduktion Tilsætning	Sika Viscocrete HE-230 tilsættes blandevandet eller direkte i den våde betonblanding efter grovvandstilsætning. En forsinket tilsætning efter grovvandet vil øge effektiviteten af Sika Viscocrete HE-230. Tilsætning af restvand – for afstemning af betonkonsistensen, bør ske tidligst efter 40 sekunders blanding. Dette for at undgå overskudsvand i betonen.	
Generelle bemærkninger	Af hensyn til arbejdsmiljøet er det ved udstøbning en fordel at kunne arbejde med vibreringsfri beton. Sika Viscocrete HE-230 giver ved sine specielle egenskaber gode muligheder for at eliminere anvendelsen af støjende vibrationsudstyr og derved udnytte fordele ved helt nye produktionsteknikker og rutiner.	
Efterbehandling	Det er vigtigt for al beton, at reglerne for god betonpraksis overholdes. Især er det vigtigt at betonen beskyttes mod udtørring på et så tidligt tidspunkt som muligt. Udtørningsbeskyttelse udføres bedst ved tildækning med plastfolie eller påsprøjtning af egnet curing compound. Valg af metode til beskyttelse af udtørring bør ske med hensyntagen til eventuel senere overfladebehandling. Tilsætning af Crackstop polypropylenfibre med 0,6 kg/m ³ kan ved sin spændingsfordelende effekt i betonens plastiske fase, medvirke til minimering af revnedannelser.	
Vigtigt		
Vibreringsfri beton	Sika Viscocrete HE-230 anvendes ligeledes til at producere flydende og vibreringsfri beton, med eller uden stålfibre. Til dette brug kræves der ofte specielle blandingsforhold. I tvivlstilfælde kontakt vore betonteknologer for assistance.	
Opbevaring og holdbarhed	Holdbarheden ved frostfri opbevaring mellem min. +5°C og max. +25°C er 12 måneder fra produktionsdato. Ved levering af følgesedlen forsynet med et batchnummer. De fire første cifre angiver produktionsår- og måned. Opbevaring ved lavere temperatur kan medføre udkrystallisering af fast stof, som genopløses ved opvarmning og grundig omrøring – selv efter nedfrysning. Væsken ændrer ikke egenskaber. Ved opbevaring i lagertank anbefales det, at der etableres omrøring, idet selv små forureninger kan pøde produktet og igangsætte bundfældning af tørstof.	
Kombinationer	Sika Viscocrete HE-230 kan kombineres med Sikas øvrige betontilsætningsstoffer. Forsøg anbefales og kontakt eventuelt vor tekniske afdeling.	
Sikkerhed og miljø	Dette produkt er ikke omfattet af reglerne for farlige stoffer, men leverandørbrugsanvisning er udarbejdet på frivillig basis og kan rekvireres.	

6.2 Vejledning: Sæt- og flydemålsprøver

Til forsøget blev benyttet en keglestub med indre dimensioner:

- Øvre åbning: 38,2 mm.
- Nedre åbning: 88,8 mm.

Keglestubben havde en højde på 73,0 mm

Der blev endvidere benyttet en stampestang med dimensionerne:

- Skaft: 12,0 mm.
- Hoved (afrundet ende), bredeste punkt: 16,4 mm.



På grund af manglende udførelsesvejledning blev der desværre benyttet to forskellige fremgangsmåder til forsøget, der dog ligger tæt op ad hinanden. Her beskrives først den metode der blev benyttet inden en vejledning blev fremskaffet:

- Placer keglestubben på et faldbord, og fyld den 1/3 af højden. Stamp 5 gange til midt i laget. Gentag i alt 3 gange til keglestubben er rigeligt fyldt.
- Benyt afretterjern til at fjerne overskydende mørtel.
- Fjern keglestubben, og benyt den til at måle differencen mellem keglestub og mørtelkegle. Mål højden 3 gange, hvor keglestubben flyttes mellem hver måling, for at sikre et retvisende resultat. Dette gennemsnit angiver sætmålet.
- Fjern keglestubben fra faldbordet, og lad det falde 5 gange.
- Benyt to afretterjern til at bestemme diameteren af mørtlen på det bredeste punkt. Dette gøres også 3 gange for at sikre et retvisende resultat. Dette gennemsnit angiver flydemålet.
- Den benyttede mørtel kasseres.

Næste side ses et uddrag fra en anbefalet prøvemethode for bestemmelse af flydemål for mørtelprøver udarbejdet af Teknologisk Institut i 1989. De overstregede sætninger angiver afvigelserne mellem den anbefalede og benyttede fremgangsmåde. Den faktiske fremgangsmåde der blev benyttet er således:

- Mens mørtlen blandes på høj hast i sidste minut fugtes indersiden af keglestubben samt faldbordet med vædet papir. Det skal ikke være alt for vådt.
- Keglestubben fyldes halvvejs med mørtel, og der stemples 20 gange med stampestangen til midten af laget. Dette gentages således at keglestubben er rigeligt fyldt.
- Afretterjernet benyttes til at fjerne overskydende mørtel.
- Keglestubben fjernes, og benyttes til at måle differencen mellem keglestub og mørtelkegle. Højden måles 3 gange, hvor keglestubben flyttes mellem hver måling, for at sikre retvisende resultat. Gennemsnittet angiver sætmålet.
- Keglestubben fjernes fra faldbordet, og faldbordet får lov at falde 10 gange på 10 sekunder. To afretterjern benyttes til at bestemme diameteren af mørtlen på det bredeste punkt. Dette gøres også 3 gange for at sikre et retvisende resultat. Dette gennemsnit angiver flydemålet.
- Den benyttede mørtel kasseres, og det tjekkes at forsøget blev udført inden for 15 minutter.

Det benyttede faldbord stemmer overens med det i øvelsesvejledningen beskrevne faldbord.

Prøvningsmetode Frisk mørtel. Konsi- stens. Flydemål på faldbord.

1. Formål og anvendelsesområde

Metoden anvendes til at udtrykke konsistensen af cementbundne mørteler med største kornstørrelse i tilslaget på 4 mm.

2. Referencer

ASTM C 230 (Reapproved 1974)
Standard specification for Flow Table for use in tests of hydraulic cement. DS 423.11, 2. udgave.

3. Definitioner

Flydemål: Ved frisk mørtels flydemål forstås den gennemsnitlige diameter af den nogenlunde cirkulære prøve, der fås efter at en kegle af frisk mørtel 10 gange er faldet 12,7 mm.

Faldbord: Metalplade som hæves i en fastsat højde efterfulgt af frit fald til sin udgangsposition.

4. Prøveudtagning

Med mindre andet angives i prøvningsrapporten, skal prøveudtagningen ske som angivet i DS 423.11.

5. Prøvningsmetode

5.1 Princip

På et faldbord udstøbes den friske mørtel i en keglestubform med en nedre diameter på 102 mm og højde på 52 mm. Efter afformning udsættes mørtelen for sammensynkning ved et antal standardiserede fald af faldbordet. Mørtelens udbredelse efter keglestubbens sammensynkning anvendes til at udtrykke mørtelens konsistens.

5.2 Apparatur

Faldbord og keglestubform som angivet i ASTM 230-68 (Reapproved 1974), (se skitse på side 4).

Stampestang af jern med længden 250 mm og diameteren 12 mm, afrundet i begge ender.

Retskede.

Målestok.

5.3 Forbehandling af prøveemner

Ingen.

5.4 Procedure

Prøvningen gennemføres senest 15 minutter efter blandingen, dog inden afbindingen begynder.

Faldbordpladen og keglestubformens inderside fugtes. Keglestubformen placeres centrisk på faldbordpladen og fyldes med frisk mørtel i to omtrent lige tykke lag, som hver for sig bearbejdes med 20 stød med stampestangen. Stødende skal være jævnt fordelt over overfladen på hvert lag.

Efter afretning af mørtelens overflade med retskeden over formens overkant, fjernes formen forsigtigt.

Faldbordets lodrette bevægelse igangsættes og prøveemnet udsættes for 10 faldslag hvert med faldhøjden 12,7 mm. Slagene gives kontinuerligt med en varighed af i alt 10 sek.

Udbredelsen af mørtelprøven måles med målestokken i to på hinanden vinkelrette retninger, hvorefter gennemsnitsværdien beregnes.

5.5 Resultatbehandling


Gennemsnittet af udbredelsesmålingerne er prøvningens resultat.

Resultatet angives i mm. Følgende skala angiver sammenhæng mellem flydemål og konsistens.

<u>Flydemål, mm</u>	<u>Konsistens</u>
100-110	Jordfugtig
110-120	Stiv plastik
120-150	Plastisk
150-200	Tyktflydende
> 200	Flydende

Figur 23: Uddrag af TI-B 18 (86), udarbejdet af Teknologisk Institut. Uddraget beskriver en prøve-
metode for bestemmelse af flydemål for mørtel.

6.3 Vejledning: Porøsitet

	FUGTPARAMETRE, PORØSITET OG DENSITET LBM-Prøvemethode 2.	6108/14 s. 1
		290390 CBN: sl

Anvendelsesområde

Metoden anvendes til for et uorganisk, porøst materiale såsom beton, tegl og gasbeton at bestemme porøsitet og densitet.

Metoden kan eventuelt kombineres med LBM-prøvemethode 1.

Referencer

Metoden er en bearbejdet udgave af metode TI-B-25 fra Teknologisk Institut, Byggeteknik, 1983. Denne baserer sig på en RILEM Standard udgivet i Matériaux et Constructions Vol. 10, nr. 58.

Definitioner, begreber og symboler

Vægtkonstans regnes at gælde, når prøvelegemets masse ikke ændrer sig mere end 0,1% i løbet af 4 timer.

m_o	(kg)	Masse af prøvelegemet før forsøget
m_{105}	(kg)	Masse af prøvelegeme efter tørring ved 105°C
m_{ssd}	(kg)	Masse i luft af vakuumvandmættet prøvelegeme i overfladetør tilstand
m_{sw}	(kg)	Masse af vakuumvandmættet prøvelegeme vejet i vand
V	(m ³)	Prøvelegemets volumen
$V_{p\grave{a}}$	(m ³)	Volumen af åbne porer
ρ_f	(kg/m ³)	Faststoffdensitet
ρ_d	(kg/m ³)	Tørdensitet
ρ_{ssd}	(kg/m ³)	Densitet af prøvelegeme i vakuumvandmættet overfladetør tilstand
$p_{\grave{a}}$	(m ³ /m ³)	Prøvelegemets åbne porøsitet
u_{ssd}	(kg/kg)	Vandtørstofforhold i vakuumvandmættet overfladetør tilstand

Prøveudtagning

Antallet af prøver bestemmes ud fra en statistisk analyse.

Prøvelegemets størrelse bestemmes ud fra, hvor meget materiale der er til rådighed, og ud fra, om det pågældende materiale er svært at vandmætte.

Hvis prøvelegemer af cementbaserede materialer skal opbevares i længere tid før prøvningen, må de beskyttes mod kemiske forandringer såsom karbonatisering.

	FUGTPARAMETRE, PORØSITET OG DENSITET LBM-Prøvemethode 2.	6108/14 s. 2
		290390 CBN:sl

Apparatur

- Varmeskab til udtørring ved $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Ekssikkator med silicagel til opbevaring af prøvelegemerne under afkølingen
- Vægt, hvor prøvelegemernes masse kan bestemmes med en nøjagtighed på 0,1 % - vægtkontrollod
- Udstyr til vejning af prøvelegeme under vand
- Destilleret vand
- Termometer (0,1 $^{\circ}\text{C}$ deling)
- Vakuumpumpe til tryk på ca. 100 N/m²
- Ekssikkator til vakuummætning af prøvelegemer
- Klude

Fremgangsmåde

I tilfælde af, at man skal måle kapillarsugning på de samme prøvelegemer, skal sugningen, jf. LBM-PM-1, være udført først.

Prøvelegemer tørres ved $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ i en ventileret ovn til vægtkonstans. Tørring ved 105°C kan for nogle materialer medføre ændringer i porestrukturen. Disse materialer bør tørres ved en lavere temperatur. Derefter afkøling i ekssikkator til stuetemperatur. Prøvelegemet vejes (vægt m_{105}) (Skema 1).


Det udtørrede prøvelegeme evakueres tørt i ekssikkator i mindst 3 timer ved tryk på (\sim torr).

Demineraliseret vand med rumtemperatur ledes ind i ekssikkatoren. Prøvelegemer skal være helt dækket med vand. ~~Ekssikkatoren med vand og prøver evakueres til vands damptryk (2338 N/m² \sim 17,5 torr ved 20 $^{\circ}\text{C}$)~~ og henstår ved dette tryk i mindst 1 time uden pumpning. Herefter ledes luft ind og prøverne henstår i vandet natten over ved atmosfæretryk.

De vandmættede prøvelegemer vejes i vand (vægt m_{sw}) (Skema 1). Efter aftørring af overfladen med en hårdt opvreden klud vejes prøvelegemer i luft (vægt m_{ssd}) (Skema 1).

Efter tørringen udtørres prøverne ved $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ til vægtkonstans og der foretages en kontrolvejning så det kan konstateres, om der er sket en udvaskning af prøverne ved vandmætningen.

Parametrene bestemmes som vist med formlerne i skema 1.

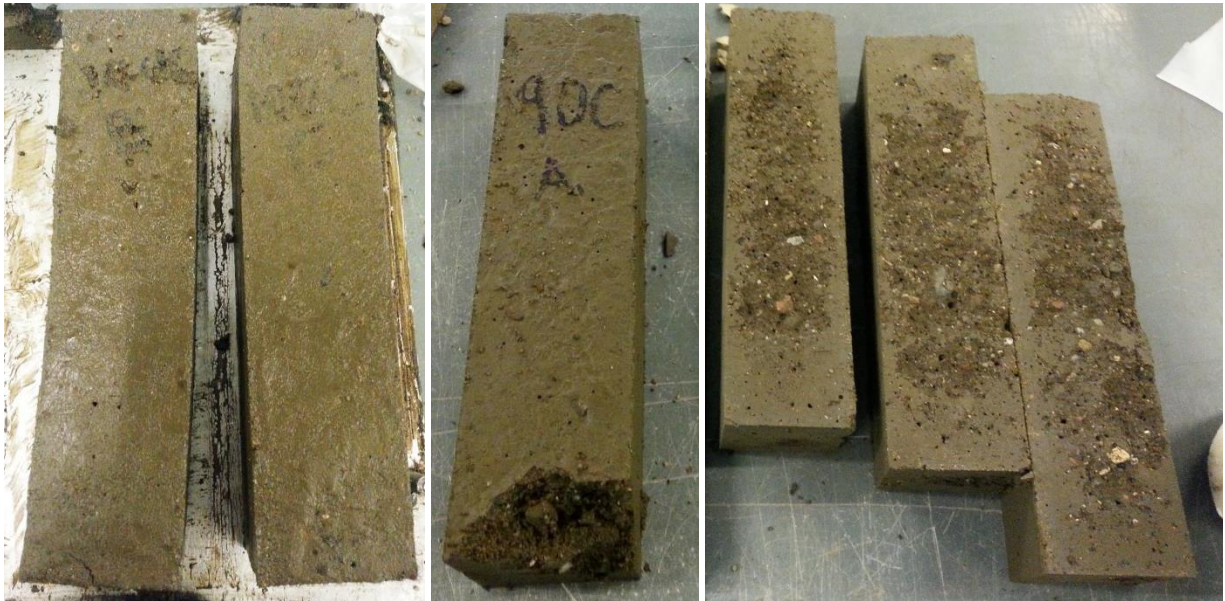
	PORØSITET OG DENSITET, SKEMA 1	Hold:
	Sag:	Dato:
		Initialer:

Rum: T = °C	Vand: T = °C	Vanddensitet $\rho_w =$	kg/m ³
Vægtkontrollod	Før: Kg,g	Efter: Kg,g	
Prøvelegeme nr.			
m_{105} kg			
m_{ssd} kg			
m_{sw} kg			
$V = (m_{ssd} - m_{sw}) / \rho_w$ m ³			
$V_{p\ddot{a}} = (m_{ssd} - m_{105}) / \rho_w$ m ³			
$\rho_{\ddot{a}} = V_{p\ddot{a}} / V$ m ³ /m ³			
$\rho_d = m_{105} / V$ kg/m ³			
$\rho_f = m_{105} / (V - V_{p\ddot{a}})$ kg/m ³			
$\rho_{ssd} = m_{ssd} / V$ kg/m ³			
$u_{ssd} = (m_{ssd} - m_{105}) / m_{105}$ kg/kg			

Bemærkninger:				
---------------	--	--	--	--

6.4 Resultater: Indledende undersøgelser

Billeder af de indledende mørtelstøbninger:



Figur 24: Her ses mørtelprøverne 100C, 90C og 80C umiddelbart efter de er taget ud af støbformen, inden de blev lagt i vandbad. Bemærk især hvordan den ene 100C-prøve er buet.



Figur 25: Her ses mørtelprøverne 50C og Ref 2 umiddelbart efter de er taget ud af støbformen. Der er markant farveforskel på prøver med og uden flyveaske tilsat.

Uddybende resultater fra de indledende styrkeprøver:

Tabel 13: Uddybende resultater fra de indledende styrkeprøver. Feltet markeret med rødt er ikke medregnet, og tryk 2 blev for 50C udført med trykmaskinen indstillet til højeste finhed. De øvrige trykprøver blev udført med lavere finhedsindstilling, antal decimaler er en indikator.

Navn	Prøve	Bøjn. [kN]	Gns. bøjn. [kN]	Bøje-styrke [MPa]	Tryk 1 [kN]	Tryk 2 [kN]	Gns. tryk [kN]	Gns. Tryk [kN]	-10%	10%	Tryk-styrke [Mpa]
Ref 1	A	2,87	2,98	6,99	84,7	-	84,7	83,3	75,0	91,6	52,1
	B	3,14			84,1	-	84,1				
	C	2,94			77,1	85,0	81,1				
50C	A	0,43	0,49	1,14	7,5	5,42	6,5	6,1	5,5	6,7	3,8
	B	0,34			5,7	5,42	5,6				
	C	0,54			6,8	5,73	6,3				
Ref 2	A	3,98	3,86	9,04	89,7	90,3	90,0	86,0	77,4	94,6	53,8
	B	3,76			81,8	85,4	83,6				
	C	3,83			90,8	78,1	84,5				

Her ses resultaterne for styrkeprøverne udført på 50C samt Ref 1 og Ref 2. Samtlige bøjningsprøver blev udført med den høje finhedsindstilling, mens trykprøverne blev udført med den lave finhedsindstilling, undtaget for 50C tryk 2. Der mangler data for Ref 1 tryk 2 eftersom prøverne under bøjningstesten knækkede skævt, og derfor ikke passede ind i opsætningen. Det farvede felt angiver, at resultatet her ikke er taget med i videre udregninger. Det er fordi værdien falder uden for de 10 % afvigelse fra gennemsnittet, jf. metoden beskrevet afsnit 3.2.

6.5 Resultater: Støbning, herunder sæt- og flydemålsprøver

Her ses samtlige af de resultater som er fundet ved støbning af mørtelprøverne efter de indledende resultater. Det skal bemærkes, at den målte længde, højde og bredde her er angivet som et gennemsnit af 3 målinger forskellige steder på samme prøve. Der er selvfølgelig en vis variation i de målinger som derfor ikke fremgår her. Den lysegrå skrift angiver at flydemålet blev bestemt på gammel vis.

Navn	Vand [g]	Ekstra vand [g] (+30 s)	ViscoCrete HE-230 [g]	Tid til vib [min]	Sætnål [mm]	Gns. sæt-mål [mm]	Flydemål [mm]	Flydemål gns. [mm]	Notat	Notat ved udtagning af form	Prøve	Vægt [g]	Vægt gns. [g]	Længde [mm]	L. gns. [mm]	Bredde [mm]	B. gns. [mm]	Dybde [mm]	D. gns. [mm]	
Ref s1	225	0	-	16:30	15,0	14,3	127,0	127,0	Mængde en lille mængde sand der faldt ved siden af.		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
					15,0		128,0				-	-	-	-	-	-				
					13,0		126,0				-	-	-	-	-	-				
50C s1	315	0	-	16:33	3,0	2,7	96,0	95,7	Svær at vibere på plads. Tør Svær at få i samme afskeglen.	Strykke huller i overfladen, svær at skrive på Ellers trin og fast.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
					2,0		96,0				-	-	-	-	-	-				
					3,0		95,0				-	-	-	-	-	-				
40C s1t	225	90	-	16:00	3,5	3,2	100,5	99,8	Mere lugtig og med gullig end 50C st.	Også stryge huller i overfladen. Vinkede fast nok	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
					3,0		99,0				-	-	-	-	-	-				
					3,0		100,0				-	-	-	-	-	-				
30C s1t	225	80	-	14:30	2,0	2,3	92,0	91,3	Svær at vibere. Ekstra tilsat under vibration 2. ca. 5-20 sek ekstra vibration.	Som andre er overfladen porøs og huller.	A	531,94	532,15	-	-	40,06	40,03	40,53	40,43	
					2,0		93,0				B	532,36		-	-	40,00		40,34		
					3,0		89,0				-	-		-	-	-		-		
50C s2	350	0	-	18:10*	5,5	5,5	119,0	119,5	Svært at vibere og sætningen sandlesartning. Frøsinker i form. Ellers trin håndledt fast ved vibration. Klumper som løse	Mere jævn og bedre at skrive på end andre. Vinkede bedre sat i overfladen.	A	526,96	527,94	-	-	39,98	39,98	40,43	40,58	
					5,0		118,0				B	528,92		-	-	39,98		40,73		
					6,0		121,5				-	-		-	-	-		-		
Ref s2	225	0	-	19:20	14,0	14,3	159,0	155,2	Ny metode benyttet til flydemål herfra og fremover. Desuden dårlig sætning af prøve (se billeder)	Der blev benyttet anden afmærkning end sætning. Vand havde svært ved at sætte sig.	A	578,02	579,14	160,15	160,17	40,0	40,00	40,52	40,50	
					14,0		154,5				B	580,26		-		-		40,0		40,48
					15,0		152,0				-	-		-		-		-		-
40C s2	375,00	0	-	17:45	11	11,7	144,5	142,2	Rød i brug af redovret. Der er ingen ny metode benyttet til vibrationssætning. Svær at få til at sætte sig.	Måget porøs og huller i overfladen.	A	512,41	514,12	160,10	160,10	40,00	40,01	40,18	40,46	
					12		140,0				B	515,82		-		-		40,02		40,73
					12		142,0				-	-		-		-		-		-
30C s2	375	0	-	12:00	16	15,0	153,0	154,0	God at vibere. Der var mængde i ting på bordet mens.	Prøven er blevet meget frøse i overfladen, mindre porøs end før sæt.	A	523,19	525,16	161,10	160,61	40,47	40,60	40,00	40,01	
					14		157				B	527,13		-		-		40,73		40,02
					15		152				-	-		-		-		-		-
50C s3	475	0	-	14:25	45	39,3	199	203,7	Løvet for at undersøge linnear sammenhæng ud fra Ref s2 og 30C s2. Var meget våd, og blev blanded ved høj hast allestret (Heber)		A	507,31	508,32	160,00	160,02	40,00	40,00	40,47	40,52	
					38		208				B	509,32		-		-		40,00		40,57
					35		204				-	-		-		-		-		-
30C sV1t	225	120	6,75	16:01	10	9,5	140	135,5	Der var en askelump i bunden af mørtelblandingen, som ikke var med. Blev vibreret en smule for længe (før det lykkedes væk?)		A	514,97	509,86	160,02	160,01	40,00	40,01	40,02	39,57	
					7,5		133				B	504,75		-		-		40,02		39,12
					11		135,5				-	-		-		-		-		-

Navn	Vand [g]	Ekstra vand [g] (+30 s)	ViscoCrete HE-230 [g]	Tid til vib [min]	Sætnål [mm]		Gns. sæt-mål [mm]	Flydemål [mm]		Notat	Notat ved udtagning af form	Prøve	Vægt [g]	Vægt gns. [g]	Længde [mm]	L, gns. [mm]	Bredde [mm]	B, gns. [mm]	Dybde [mm]	D, gns. [mm]
					1	2		1	2											
30C 3	305	0	-	-	-	-	-	-	-	Svær at vibrere, meget fykklivende.	Mågt buler og ujævn.	A	521,72	160,05	160,02	160,05	40,02	40,02	39,57	-
					-	-		B	509,78			160,02	160,05	40,02	40,02	38,85	39,24			
					-	-		C	515,70			160,08	160,08	40,02	40,02	39,32	-			
30C 4	375	0	-	-	-	-	-	-	-	Blænder på høj hastighed først med hånd. God at røre i men at skrabe siderne ned.	Bedre og mere jævn overflade.	A	520,53	160,02	160,02	160,02	40,00	40,02	40,17	40,18
					-	-		B	522,25			160,02	160,02	40,03	40,02	40,28	-			
					-	-		C	521,39			160,03	160,03	40,03	40,03	40,10	-			
50C s4	370	0	-	14:10	14	156	13,3	152	149	Lidt askecementblandning var tilbage i bunden af mærskalen ved støbning. Se billeder. Smidg	VANDSKIFT inden overførsel! Skydeleren til opmaling virkede upræcis (se evt. billeder)	A	515,55	519,36	-	-	40,12	40,12	40,43	40,61
					13	152		B	523,16			-	-	40,12	40,12	40,78	-			
					13	149		A	526,38			-	-	-	-	-	-			
30C 5 (14d)	375	0	-	-	-	-	-	-	-	God og samtidig, lækker konsistens at arbejde med.	Ingen sæt	B	527,40	527,34	-	-	-	-	-	-
					-	-		C	528,25			-	-	-	-	-	-			
					-	-		A	531,30			-	-	-	-	-	-			
30C 6 (28d)	375	0	-	-	-	-	-	-	-	God og samtidig, lækker konsistens at arbejde med. Dog fæl med blanderen min 30 sek for lang tid blanding af cementpasta + lidt spild.		A	528,49	530,74	-	-	-	-	-	-
					-	-		B	528,49			-	-	-	-	-	-			
					-	-		C	532,44			-	-	-	-	-	-			
30C sV2	365	0	6,77	12:50	16	163	19,3	162	162	Nogen flyden del i det. Afretning på vibratørsbord blev gjort dævis uden sævak.		A	518,80	517,69	-	-	-	-	-	-
					22	162		B	516,58			-	-	-	-	-	-			
					20	162		A	515,47			-	-	-	-	-	-			
40C s3	390	0	-	13:00	15	156	14,7	156	153	God at arbejde med.		A	500,17	515,07	-	-	-	-	-	-
					15	156		B	514,66			-	-	-	-	-	-			
					14	153		A	507,59			-	-	-	-	-	-			
50C s5	390	0	-	14:30	15	163	18,0	163	162	Mågt omhyggeligt arbejde.		B	507,59	503,88	-	-	-	-	-	-
					15	163		A	500,17			-	-	-	-	-	-			
					20	162		B	507,59			-	-	-	-	-	-			

6.6 Resultater: Styrkeprøver

Her skal det bemærkes, at størrelsesangivelser af prismerne er et gennemsnit af 3 målinger på hver led.

Dato	Tid, start	Navn	Prøve	Våd vægt [kg]	Vægt gns. [kg]	længde [mm]	L gns. [mm]	Bredde [mm]	B gns. [mm]	Dybde [mm]	D gns. [mm]	Bøjn. [kN]	Bøjn. gns [kN]	Styrke [Mpa]	Tryk 1 [kN]	Tryk 2 [kN]	Tryk gns [kN]	Tryk gns [kN]	-10%	10%	Styrke [Mpa]	Notat
13-10-15	10:48	Ref s1	A	586,32	586,88	160,53	160,53	40,12	40,08	40,38	40,40	3,23	3,14	7,36	89,0	85,0	87,0	86,3	77,6	94,9	53,9	
			B	587,43		160,52	40,03	40,42	3,05	86,3	84,8	85,6										
14-10-15	09:20	50C s1	A	519,56	519,36	160,95	161,00	40,00	40,05	39,78	39,60	0,50	0,59	1,38	7,2	6,33	6,8	6,51	5,97	7,30	4,15	Tryk A: trykprøvemaskine på 200kN. For øvrige indstilling 20kN. Blødt brud
			B	519,16		161,05	40,10	39,42	0,68	6,51	6,51	6,51										
14-10-15	10:15	40C s1t	A	519,62	524,01	160,22	160,29	40,00	40,02	39,53	39,75	0,83	0,98	2,29	8,61	8,94	8,78	8,78	8,13	9,94	5,65	Udstillelse af sæt. Desuden mæglprøveligt krænk.
			B	528,39		160,37	40,03	39,97	1,12	9,41	9,19	9,30										
14-10-15	12:10	30C s1t	A	535,77	536,23	160,27	160,29	40,00	40,02	40,33	38,68	1,19	1,15	2,70	14,71	13,94	14,33	14,33	13,28	16,24	9,23	MEGET sprødt og voldsomme brud. Her krækkede en desuden skævt, så der er 3bojn. og 4tryk
			B	536,68		160,32	40,03	37,03	0,79	15,09	15,20	15,20										
14-10-15	14:55	50C s2	A	527,67	528,66	160,15	160,19	40,05	40,03	40,70	40,77	0,54	0,57	1,32	5,84	5,66	5,75	5,85	5,22	6,38	3,62	
			B	529,65		160,23	40,00	40,83	0,59	5,71	5,98	5,85										
20-10-15	10:15	Ref s2	A	583,62	584,69	160,27	160,25	40,03	40,03	40,60	40,58	3,05	3,16	7,41	86,8	84,8	85,8	85,8	76,6	93,6	53,2	Tryk ved maskinindstilling 200kN
			B	585,76		160,23	40,02	40,55	3,27	86,1	82,7	84,4										
22-10-15	09:55	40C s2	A	515,87	517,47	160,48	160,49	40,12	40,11	40,33	40,36	0,39	0,42	0,98	5,52	5,57	5,55	5,55	5,03	6,14	3,49	Blødt, kvæsende og ikke så pludseligt brud.
			B	519,07		160,50	40,10	40,38	0,45	5,57	5,68	5,63										
22-10-15	10:03	30C s2	A	526,65	528,55	160,18	160,18	40,00	40,00	40,52	40,55	1,24	1,31	3,06	13,57	13,39	13,48	13,48	12,50	15,27	8,68	Møgl pludseligt og sprødt brud som ved 30C s1
			B	530,45		160,17	40,00	40,58	1,37	14,48	14,29	14,29										
22-10-15	-	50C s3	A	525,30	527,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Prøvevar sammenlængende, men revnede.
			B	529,10		-	-	-	-	-	-	-										

Dato	Tid, start	Navn	Prøve	Våd vægt [g]	Vægt gns. [g]	Længde [mm]	L. gns. [mm]	Bredde [mm]	B. gns. [mm]	Dybde [mm]	D. gns. [mm]	Bøjn. [kN]	Bøjn. gns [kN]	Styrke [MPa]	Tryk 1 [kN]	Tryk 2 [kN]	Tryk gns [kN]	Tryk gns [kN]	-10%	10%	Styrke [MPa]	Notat
29-10-15	16:30	30C SV1T	A	519,00	513,88	160,10	160,09	40,03	40,03	40,05	39,65	1,24	1,20	2,80	12,34	12,01	12,2	12,5	11,21	13,70	7,78	For prøve A var tryk mindre eksplosiv end for optimer for 30C. Prøve B var også mindre eksplosiv, beegvevar pludselige.
			B	508,76		160,08		40,03		39,25		1,15			12,48	12,97	12,7					
29-10-15	16:30	30C 3	A	525,73	519,68	160,15	160,13	40,02	40,01	39,77	39,32	1,57	1,50	3,52	15,44	-	15,4	15,3	13,80	16,86	9,58	Uenslille sale. Stadig relativt eksplosive brud ved tryk. To halve prøver desuden udtaget til undersøgelse af densitet.
			B	513,60		160,10		40,02		38,97		1,40			15,20	-	15,2					
			C	519,71		160,13		40,00		39,22		1,53			15,11	15,60	15,4					
29-10-15	16:30	30C 4	A	524,14	524,99	160,07	160,09	40,05	40,03	40,23	40,26	1,46	1,50	3,51	14,28	-	14,3	14,4	12,92	15,80	8,98	Stadig eksplosive ved brud. Tryk 2 for C virkede dog ikke sådan. For halve prøver desuden udtaget til undersøgelse af densitet.
			B	525,86		160,10		40,05		40,40		1,48			14,20	-	14,2					
			C	524,96		160,10		40,00		40,13		1,55			14,49	14,71	14,6					
09-11-15		50C s4	A	516,09	519,90	-	-	40,28	40,30	40,68	40,84	0,26	0,32	0,74	4,03	3,69	3,9	4,0	3,64	4,45	2,53	Blå skydelære. Bløde brud
			B	523,70		-		40,32		41,00		0,37			4,08	4,37	4,2					
17-11-15	09:20	30C 5 (14 d)	A	529,82	530,83	-	-	39,96	39,98	40,62	40,65	1,60	1,75	4,10	20,4	19,8	20,1	20,3	18,26	22,31	12,68	Digital skydelære. Væjet med saltkrystaller. Meget bløde og insignifikante brud. Tryk ved 200kN indstilling
			B	530,95		-		39,99		40,66		1,88			20,6	19,8	20,2					
			C	531,71		-		39,98		40,68		1,77			19,8	21,3	20,6					
01-12-15	10:55	30C 6 (28 d)	A	525,29	531,56	-	-	40,00	40,06	40,64	40,50	2,15	2,00	4,70	25,1	24,9	25,0	24,4	21,9	26,8	15,2	Digital skydelære. Væjet med saltkrystaller. Meget bløde og insignifikante brud. Tryk ved 200kN indstilling
			B	532,81		-		40,09		40,39		1,88			24,0	24,0	24,0					
			C	536,58		-		40,10		40,47		1,98			22,9	25,3	24,1					
10-11-15	10:45	30C SV2	A	522,50	521,52	-	-	40,17	40,13	40,08	40,22	1,62	1,57	3,67	15,78	15,82	15,8	15,6	14,1	17,2	9,8	Blå skydelære. Saludskiløse. Pludselige brud
			B	520,54		-		40,10		40,35		1,51			15,29	15,62	15,5					
10-11-15	14:25	40C s3	A	518,43	517,99	-	-	40,18	40,19	40,67	40,58	0,61	0,55	1,28	6,76	6,85	6,8	6,9	6,22	7,60	4,32	Blå skydelære. Saludskiløse. Bløde brud
			B	517,54		-		40,20		40,50		0,48			6,89	7,15	7,0					
10-11-15	15:07	50C s5	A	501,62	505,25	-	-	40,28	40,26	39,62	39,84	0,28	0,27	0,63	3,74	4,12	3,9	4,0	3,59	4,39	2,49	Blå skydelære. Bløde brud
			B	508,87		-		40,23		40,07		0,26			4,26	3,83	4,0					

6.7 Resultater: Porøsitet

Her ses resultaterne for undersøgelsen af porøsiteten af 30C 3 og 30C 4. Det skal bemærkes, at der blev benyttet to forskellige vægte undervejs i prøveperioden. Fremgangsmåden for udregningerne er beskrevet i øvelsesvejledningen bilag 6.3.

Dag	29-10-15	02-11-15	05-11-15	09-11-15	10-11-15	12-11-15	16-11-15	17-11-15		m _{sw}	m _{ssd}
30C 3A	247,9	221,51	220,12	220,04	220,11	220,11	220,06	220,06		135,57	253,96
30C 3B	257,0	229,26	227,73	227,62	227,70	227,70	227,63	227,63		140,22	262,76
30C 4A	261,1	226,32	224,86	224,84	224,92	224,94	224,87	224,85		138,15	265,25
30C 4B	259,6	225,05	223,80	223,83	223,92	334,94	223,86	223,86		137,50	263,83
Snit	256,4	225,54	224,13	224,08	224,16	251,92	224,11	224,10		137,86	261,45
Kontrollod	1000,00				999,98			999,90			999,90
Note	Våd						Ny vægt	4A fik slag			

NB: Da der skulle vejes kontrollod d. 18-11-15 svingene vægten op mod 999,92 og ned til 999,98

1000 kg/m³

	30C 3A	30C 3B	30C 4A	30C 4B	30C 3 gns	30C 4 gns		
m ₁₀₅	220,06	227,63	224,85	223,86	223,85	224,36	kg	
m _{ssd}	253,96	262,76	265,25	263,83	258,36	264,54	kg	
m _{sw}	135,57	140,22	138,15	137,50	137,90	137,83	kg	
V	0,118	0,123	0,127	0,126	0,120	0,127	m ³	
V _{på}	0,034	0,035	0,040	0,040	0,035	0,040	m ³	
P_å	0,286	0,287	0,318	0,316	0,287	0,317	m³/m³	
ρ _d	1858,77	1857,60	1769,08	1772,03	1858,18	1770,55	kg/m ³	
ρ _f	2604,57	2604,16	2593,43	2592,17	2604,37	2592,80	kg/m ³	
ρ _{ssd}	2145,11	2144,28	2086,94	2088,42	2144,70	2087,68	kg/m ³	
u_{ssd}	0,15	0,15	0,18	0,18	0,15	0,18	kg/kg	

6.8 Resultater: Ion- og tungmetalanalyse

Analysen af vandet i vandbadet ses her som den blev modtaget.

Væskeprøve										
Prøve	mg/L Al	mg/l Ca	mg/l Fe	mg/l K	mg/l Mg	mg/l Na	mg/l P	mg/l Cl	mg/l NO3	mg/l SO4
Pil salthold væske 2/11-15	0,1196	1,2313	0,6241	7418,5600	0,0000	632,2830	0,1547	1024,7229	66,4238	1943,7985

DTU Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Technical University of Denmark

Brovej, Building 118
2800 Kgs. Lyngby
Telephone +45 45 25 17 00

www.byg.dtu.dk