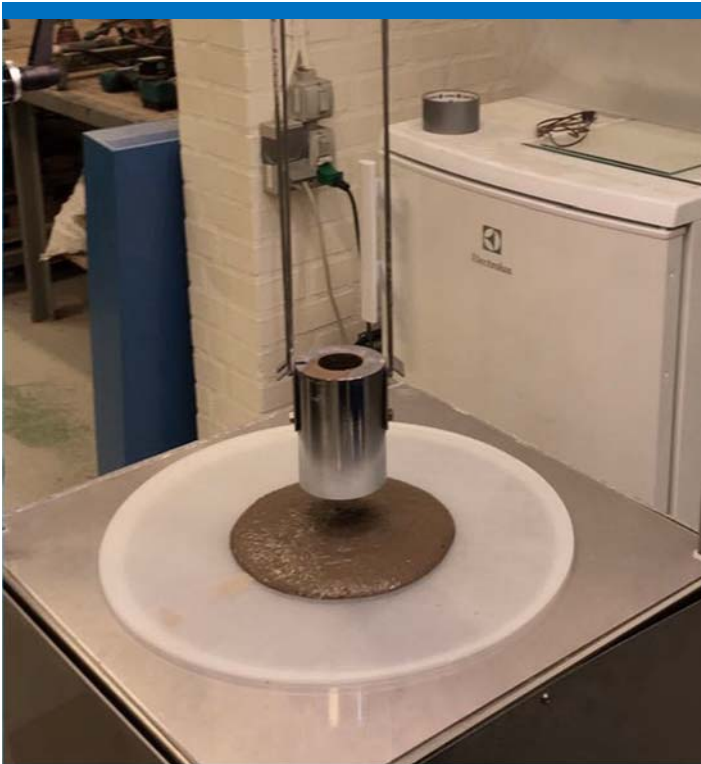


Grøn SCC til passive miljøklasser

Undersøgelse af rheologiske egenskaber



Helena A. Jappe s114737

Christian R. Thomsen s123737

BEng

Department of Civil Engineering
2016

DTU Civil Engineering
Juni 2016

Forord

Denne rapport er udarbejdet i foråret 2016 på Danmarks Tekniske Universitet. Rapporten er et afgangsprøveprojekt på uddannelsen diplom byg og svarer til 20 ECTS-point. Den henvender sig til studerende på samme niveau, og det forventes, at læser har en grundviden inden for emnet beton.

Forsøgene i denne rapport er udført i samarbejde med Teknologisk Institut, som en del af projektet Grøn Beton [12]. Der rettes en stor tak til Lars Nyholm Thrane og Thomas Svensson, som har hjulpet med vejledning og sparring gennem hele projektet, samt til Teknologisk Institut, for lån af forsøgshal og materialer.

Opgaven er udarbejdet i samarbejde med vejleder Lisbeth Ottosen fra DTU BYG Institut for Byggeri og Anlæg. Stor tak til Lisbeth for hjælp og vejledning, samt laboranterne Ebba Cederberg Schnell og Malene Grønvold.

Rapport og forsøg er udført i et samarbejde mellem Helena Anderson Jappe og Christian Raunkær Thomsen.

Danmarks Tekniske Universitet, Kongens Lyngby, juni 2016

Helena Anderson Jappe

Christian Raunkær Thomsen

Resumé

En velkendt måde, hvorpå man kan reducere CO₂-udslippet i beton-industrien, er at sænke indholdet af cementklinker i betonen. Det skyldes, at processen der gennemgås, når cementklinkerne opvarmes og knuses, er meget CO₂-krævende. Det er normalt, at erstatte en del af cementen med flyveaske, af netop samme årsag. Det er tidligere fundet, at flyveasken har puzzolansk effekt og endda kan have nogle fordelagtige egenskaber i forhold til bearbejdelighed. Kalkfiller og kalcineret ler er andre biprodukter, som kan erstatte en del af cementen. Grundet de normer og standarder vi bruger i dag, kan ingen af disse cementerstatninger medregnes i v/c-forholdet. Det vil derfor resultere i nogle lavere vand-binder-forhold, og dermed også en mere klistret og udførelsesmæssig svær beton. Dette ses som en hindring for udbredelsen af disse alternative og mere bæredygtige betontyper i branchen.

Derfor er det interessant at karakterisere disse alternative betoners rheologiske egenskaber med henblik på, bedre at kunne styre bearbejdeligheden. Formålet er at kunne designe nye betontyper, som både er bæredygtige og udførelsesmæssigt lette at arbejde med. Teknologisk Institut har i en rapport fra 2015 [6] karakteriseret rheologiske egenskaber i SCC-beton med flyveaske, kalkfiller og kalcineret ler. Der er i rapporten fokuseret på beton til aggressive miljøklasser, hvorfor det kunne være interessant at lave samme karakteristik af rheologiske egenskaber for de passive betoner.

Denne rapport beskæftiger sig med SCC-beton i den passive miljøklasse. Der er opstillet en række betoner, hvor en del af cementen er erstattet med hhv. flyveaske, kalkfiller og kalcineret ler. For at undersøge hvordan de forskellige elementer i betonsammensætningen, påvirker den friske betons konsistens, er der opsat en række variable, herunder vand-cement-forholdet, mængden af fint tilslag, indholdet af superplast (SP), og indholdet af cementerstatning. Alle betoner testes på Teknologisk Instituts nyeste version af 4C-mini-rheometer, som måler flydesætmål og tid, hvorefter den beregner betonens flydespænding og viskositet.

Flyveasken der testes i dette projekt, bruges allerede i beton i dag. Derfor ønskes det at undersøge hvorvidt den overholder kravene fra dansk standard. Der er foretaget en askekaraktistik, som viser at asken har et forholdsvis lavt indhold af hhv. organisk materiale, vand, salte og tungmetaller. Indholdet af cadmium placerer asken i kategori 2, hvilket giver den begrænsede anvendelsesmuligheder.

Det er undersøgt, hvor stor en påvirkning, mængden og typen af cementerstatning, har på betonens rheologiske egenskaber. Her er det fundet at viskositeten forbliver stort set konstant, når indholdet af flyveaske øges. Når indholdet af kalkfiller øges stiger viskositeten en smule, mens hvis indholdet af kalcineret ler øges, vil viskositeten stige væsentligt. Flyveaske og kalkfiller har derfor en mindre påvirkning på viskositeten end kalcineret ler.

Ved arbejdet med de tre forskellige alternativer, er det erfaret at konsistensen af blandinger med kalcineret ler opfattes mere klistret og langsomt flydende, end blandinger med flyveaske og kalkfiller. Dette afspejles ved lerblandingernes højere viskositet. Flydespændingen er dog ofte lidt lavere hos kalcineret ler, hvilket betyder at blandingerne flyder længere, og der fås et højere flydesætmål. Blandingerne med kalkfiller og flyveaske opfattes som lettere at arbejde med og hurtigtflydende, men havde ofte en tendens til bleeding eller separation, hvor blandinger med kalcineret ler opfattes som mere stabile.

For prøverne med variabel mængde af fint tilslag, er det fundet at viskositeten stiger, ved en øgning af tilslaget. Ligeledes vil viskositeten stige, hvis indholdet af vand reduceres. Det er dog muligt at sænke både flydespænding og viskositet væsentligt, ved rette dosering af superplastificerende stoffer.

Projektet er en del af en projektfamilie, som i foråret 2016 består af 3 andre individuelle projekter. Der er, også fra tidligere år, gjort mange erfaringer med styrkeudviklingen, men knap så mange med bearbejdigheden i fokus. Samtidig bruges en SCC-beton, i stedet for en traditionel beton, og der ses udelukkende på de passive miljøklasser, hvilket gør dette projekt usædvanligt.

Abstract

A well-known way of reducing the CO₂- waste in the concrete industry is to reduce the content of cement clinker in the concrete. The process of heating and crushing the cement clinker produces a lot of CO₂. For the exact same reason, part of the cement is normally replaced by fly ash. It has previously been established that the fly ash has a pozzolanic effect, and can even have some favorable qualities in relation to its workability. Limestone filler and calcined clay are other residuals that can replace part of the concrete. Due to the norms and standards we use today, none of these cement replacements can be included in the water to cement ratio. It will therefore result in a lower water to binder ratio, and subsequently also a more sticky and performance heavy concrete. This can be perceived as an obstacle for spreading these alternative and more sustainable concrete types in the industry.

This makes it interesting to characterize the alternative concretes' rheological qualities, with the aim of improving the control of the workability. The purpose is to enable design of new concrete types, which are both sustainable and performance wise easy to work with. Institute of Technology has characterized rheological qualities in SCC-concrete with fly ash, limestone filler and calcined clay in a report from 2015[6]. In the report, they focus on concrete for aggressive environmental classes, why it could be interesting to create the same characteristics of rheological qualities for the passive concretes.

This report deals with SCC-concrete in the passive environmental classes. A number of concretes have been selected, where part of the cement has been replaced by fly ash, limestone filler and calcined clay, respectively. To examine how the different elements in the concrete composition affect the fresh concrete's workability, a number of variables have been set up, including the water to cement ratio, the content of fine aggregate, the content of superplasticiser (SP) and the content of cement replacement. All concretes are tested at the Institute of Technology's newest version of 4C-mini-rheometer, which measures slump flow and time, and from these the concrete's yield stress and plastic viscosity can be measured.

The fly ash tested in this report is already being used in concrete today. It is therefore interesting to examine whether it complies with today's standards. A characteristic of the fly ash shows that the amount of organic material, water, salts and heavy metals, respectively, contained in the ash, is very small. The amount of cadmium places the ash in category 2, which limits the usability of the ash.

It is examined how much influence the amount and type of cement replacement, has on the rheological properties of the concrete. Here it is found, that the viscosity remains virtually constant when the content of fly ash increases. When the content of limestone filler increases, the viscosity increases slightly, while if the content of calcined clay is increased, the viscosity will increase significantly. Fly ash and limestone filler has a smaller impact on the viscosity than calcined clay.

By working with the three different alternatives, it is learned that the consistency of mixtures with calcined clay perceived more sticky and slowly spreading, than mixtures with fly ash and limestone filler. The higher viscosity of the mixtures containing clay reflects this. The yield stress is often slightly lower for the calcined clay, meaning that the mixtures spreads wider, and has a bigger slump flow. The mixtures with limestone filler and fly ash perceived as easier to work with and easily flowing, but they had a tendency to separate or bleed, wherein the mixtures containing calcined clay seemed to be more stable.

For samples with variable content of fine aggregate, it is found that the viscosity increases, as a consequence of an increase in the aggregate. Similarly, the viscosity will increase if the water content is reduced. However, it is possible to lower both the yield stress and viscosity significantly, by using the proper dosage of superplasticizer.

The project is part of a project family, who in the spring of 2016, consists of three other individual projects. The experience of the strength development has been examined a lot from earlier reports, but not so many focuses on the rheology of the fresh concrete. At the same time this report focuses on SCC in the passive environmental class, which makes this project unusual.

Indhold

Forord	1
Resumé	2
Abstract	4
1. Indledning	8
2. Teori	10
2.1 Beton	10
2.1.1 Betons sammensætning	10
2.1.2 Selvkompakterende beton (SCC)	10
2.1.3 Rheologi	10
2.1.4 Flydespænding og plastisk viskositet	11
2.1.5 Miljøklasser	12
2.1.6 Trykstyrke	13
2.2 SCM	14
2.2.1 Flyveaske	14
2.2.2 Kalkfiller	15
2.2.3 Kalcineret ler	15
3. Eksperimentelt arbejde	16
3.2 Karakteristik af flyveaske	16
3.3 Undersøgelse af rheologiske egenskaber	16
3.1 4C-mini-rheometer	18
3.4 Trykstyrke	20
3.5 CO ₂	20
4 Resultater og diskussion	21
4.1 Karakteristik af flyveaske	21
4.2 Undersøgelse af rheologiske egenskaber	26
4.2.1 Referenceprøver	27
4.2.2 Cementerstatning og v/c-forhold	27
4.2.3 Vand-pulver-forhold	29
4.2.4 Sammenligning af SCM	30
4.2.5 Indhold af fint tilslag	31
4.2.6 Superplastens påvirkning	32
4.2.7 Kombination	33
4.3 Trykstyrke	34

4.3.1	Teoretisk trykstyrke	36
4.4	CO2	38
4.5	Videre forskning	40
5	Konklusion	41
	Litteraturliste	42
	Bilagsliste	45

1. Indledning

Der er stigende efterspørgsel efter grønne betonkonstruktioner. Det forudsiges, at der i år 2050 på verdensplan vil blive brugt dobbelt så meget beton, som der bruges nu [6]. I Danmark bruges der alene 8 millioner tons beton om året, hvilket svarer til 3,5 gange mængden til Storebæltsbroen [6]. Ca. 5 % af CO₂-udledningen i verden kommer fra cementproduktionen, og da mængden af beton stiger, vil det medføre et større CO₂-udslip. Disse tal er så høje, at der skal findes alternativer til cementen.

På nuværende tidspunkt er der lavet utallige undersøgelser med erstatning af en procentdel af cementen i beton. Mange af forsøgene fokuserer udelukkende på betonens styrke. I denne rapport vil der blive fokuseret på konsistensen af den friske beton. Dette er en vigtig parameter set fra et udførelsesmæssigt synspunkt.

Teknologisk Institut i Taastrup har en afdeling, hvor der arbejdes med at gøre beton mere bæredygtig eller "grøn". Denne rapport koncentrerer sig om beton i den passive miljøklasse, hvor de tidligere på Teknologisk Institut, primært har beskæftiget sig med beton i aggressiv miljøklasse. I den passive miljøklasse, er styrken lav og vand-cement-forholdene høje, derfor vil den friske beton opføre sig anderledes end de aggressive betoner.

Både flyveaske, kalkfiller og kalcineret ler er biprodukter fra en anden industri, som alternativt skulle deponeres. Prisen for deponeringen ligger i dag på ca. 1200 kr. pr. ton [14], som kan spares, hvis materialerne kan anvendes andetsteds. Derved er der også et økonomisk aspekt, der spiller ind.

Der produceres ikke uanede mængder af flyveaske, og i Danmark kan betonindustrien allerede bruge alt det flyveaske, der er i overskud. Grundet udfasning af fossile brændsler, hvor flyveasken kommer fra, vil der i fremtiden produceres mindre af asken. Derfor søges der efter nye alternativer, og her kommer kalcineret ler og kalkfiller ind i billedet. I denne rapport vil de blive sammenlignet med flyveaske.

For at karakterisere de rheologiske egenskaber hos betoner med de nævnte materialer, opstilles en række mørtelblandinger. Disse undersøges med et 4c-mini-rheometer, som måler flydesætmål, samtidig med, at den registrerer tid. Ud fra dette fås flydespændingen og viskositeten, som kan

bruges til at beskrive betonens konsistens. Til sidst vil udvalgte prøver tryktestes for at undersøge, om de overholder kravene for passive betoner.

Projekt giver et indblik i de rheologiske egenskaber samt brugbarheden af de alternative materialer i beton. Der skal foretages nærmere undersøgelser af de kemiske egenskaber for kalkfiller og kalcineret ler for at finde ud af, om materialerne egner sig som cementerstatning.

2. Teori

I det følgende afsnit gennemgås relevant teori til forståelse af det eksperimentelle arbejde.

2.1 Beton

2.1.1 Betons sammensætning

Beton består af en række delmaterialer, som tilsammen kan opfattes som en homogen væske. Cement og vand blandet, kaldes for cementpasta og fungerer som limen i en betonblanding. Det er disse to elementer, der reagerer og danner et fast produkt. Vægtforholdet mellem vandet og cementen er den vigtigste blandingsparameter med hensyn til styrken. Jo højere indhold af cement i forhold til vand, des højere styrke vil betonen opnå.

Sand og sten kaldes tilslag, og sammen med cementpastaen, danner det cementmørtel. Til mørtlen kan tilsættes forskellig stoffer for at opnå en bestemt effekt. I dette projekt er der til cementmørtlen tilsat superplastificerende stoffer (SP), for at forbedre fluiditeten af den friske beton. Superplasten er et vandreducerende stof, som gør det muligt at lave betoner med lavere vand-cement-forhold og selvkompakterende betoner.

2.1.2 Selvkompakterende beton (SCC)

Denne rapport beskæftiger sig med SCC-beton, som er en selvkompakterende beton. Det vil sige, at den i modsætning til traditionel sætmålsbeton ikke kræver vibrering under udstøbning. Det skyldes, at SCC-betonens konsistens i frisk tilstand, er meget mere flydende end én traditionel beton, og flyder selv ud i formen. Det er derfor vigtigt at have kendskab til konsistensen og vide, hvordan man kan styre den i forskellige retninger.

2.1.3 Rheologi

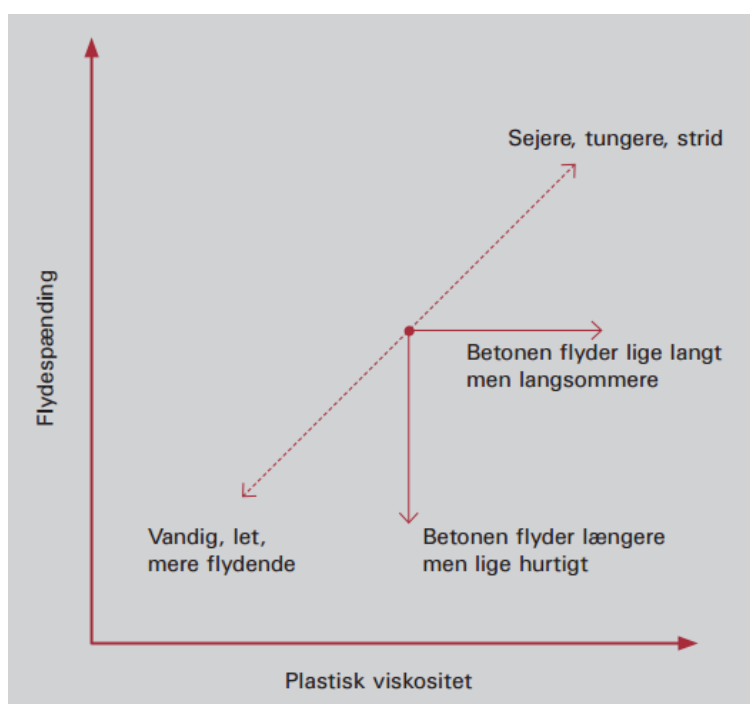
Rheologi er græsk og betyder "læren om flydeegenskaber" [8]. Når man skal beskrive konsistensen af en traditionel beton, bruges ofte et sætmål, hvor man på SCC-betonen i stedet måler et flydesætmål. Flydesætmålet beskriver, hvor langt betonen flyder uden nogen form for påvirkning, og det er blandt andet denne parameter, entreprenøren bestiller betonen efter. Fra et udførelsesmæssigt perspektiv er det dog ikke nok at beskrive betonens konsistens kun ved hjælp af flydesætmålet. To betoner kan nemlig godt have samme flydesætmål, men føles helt forskellige at arbejde med. Én kan være letflydende og nem at arbejde med, mens den anden beton, som flyder

lige langt, kan opfattes som sej og klistret. I den sammenhæng er det derfor vigtigt at have kendskab til to andre parametre – nemlig flydespændingen og den plastiske viskositet.

2.1.4 Flydespænding og plastisk viskositet

Flydespændingen, τ_0 , er en parameter, der er direkte forbundet med flydesætmålet. Den kan betegnes som den kraft, der skal til for at få en væske til at starte med at flyde [8]. En beton med lav flydespænding vil resultere i et højt flydesætmål og omvendt. Flydespændingen er en helt afgørende faktor i SCC-støbninger. Det er vigtigt at flydespændingen er lav nok til, at betonen selv kan omstøbe armering og fylde formen, kun ved hjælp af tyngdekraften. Dog må flydespændingen ikke blive så lav, at betonen separerer.

Den plastiske viskositet, η_{pl} , beskriver betonens sejhed, altså hvor hurtigt betonen flyder. En hurtigt flydende beton føles let at arbejde med, mens en langsomt flydende beton vil føles tyk og klistret. Det er dog ikke altid en fordel med en lav viskositet. Hvis flydespændingen er lav, er det en fordel med en høj viskositet. Også ved eksempelvis vægstøbninger, er en højere viskositet at foretrække, da denne tilfører mindre tryk på formen.



Figur 1 - De rheologiske parametres indflydelse på hvordan SCC flyder og opfattes af brugeren (betonarbejderen) [1]

På Figur 1 ses de rheologiske parametres indflydelse på flydeevnen af betonen. Til måling af rheologiske egenskaber bruges i denne rapport et 4C-mini-rheometer. 4C-rheometeret er et fuldautomatisk flydesætmål og kan erstatte den ældre manuelle, meget usikre målemetode, samt de klassiske rotationsrheometre. Målemetoden er baseret på Roussel og Causso's simple ligninger, som beskriver en sammenhæng mellem flydemålet og flydespændingen.

2.1.5 Miljøklasser

Når beton skal klassificeres i de forskellige miljøklasser, afhænger det af typen af miljøpåvirkningen samt intensiteten. I forhold til normen indenfor beton DS 411 er der fire miljøklasser. Der er 1. ekstra aggressiv, 2. aggressiv, 3. moderat samt 4. passiv miljøklasse. I Tabel 1 ses beskrivelsen af de forskellige klasser.

Tabel 1 - Beskrivelse af miljøklasser [5]

Miljøklasse	Beskrivelse	Praktisk brug	Min. fck
Ekstra aggressiv	Fugtigt miljø, hvor der enten tilføres eller ophobes store mængder alkalier, og/eller chlorider ved betonoverfladen.	Fx svømmebad og parkeringsdæk	40 MPa
Aggressiv	Fugtigt miljø hvor der tilføres alkalier og/eller chlorider til betonoverflader eller hvor der forekommer kraftigt fugtbelastning med risiko vandmætning samt frostpåvirkning	Fx udvendigt dæk/bjælke uden beskyttet overside, konstruktionsdele i moderat aggressivt grundvand.	35 MPa
Moderat	Fugtigt miljø uden risiko for frostpåvirkning i kombination af vandmætning, samt uden ubetydelig grad kan tilføres alkalier/chlorider til betonoverflader.	Fx elevatorgruber, installationskanaler samt fundamenter delvis over terræn	25 MPa
Passiv	Tørt miljø uden risiko for korrosion.	Konstruktioner i indendørs miljø samt jorddækkende fundamenter	12 MPa

2.1.6 Trykstyrke

Beton kan modstå store påvirkninger af tryk, da materialet er hårdt og stærkt. Der er flere ting, som bidrager til betonens styrke, blandt andet v/c-forholdet, cementtype, luft og tilslag. V/c-forholdet, som er beskrevet tidligere, er den primære faktor, der bestemmer styrken. Hvis v/c-forholdet er højt, er styrken lav og omvendt. Derudover gælder det, at styrken afhænger af betonens alder.

Traditional beton har en styrke mellem 5 MPa og 50 MPa. Beton til husbygning har normalt en styrke på ca. 25 MPa, hvilket kategoriseres som passiv beton. En beton med en styrke på over 50 MPa kaldes højstyrkebeton. Hvis beton udsættes for træk, skal der anvendes armering i betonen, så den kan optage kraften. Trækraften, som betonen kan modstå, er meget lavere end trykstyrken.

Ved brug af Bolomeys formel, kan man beregne den teoretiske trykstyrke. Denne formel gælder, hvis v/c-forholdet er mellem 0,4 og 1,25, og luftindholdet mellem 1,5 og 2 %.

$$f_C = K * \left(\frac{1}{v} - \alpha \right) \quad \text{Ligning 1}$$

I $f_C = K * \left(\frac{1}{v} - \alpha \right)$ Ligning 1 er K og α konstanter, som afhænger af typen af cement, og tiden den har hærdet. Men hvis der bruges tilsætningsstoffer skal dette medregnes. Den teoretiske styrke for beton med tilsætningsstoffer med puzzolansk effekt, med aktivitetsfaktor, k, udregnes ved hjælp af $f_C = K * \left(\frac{1}{\frac{v}{c+k*p}} - \alpha \right)$ Ligning 2.

$$f_C = K * \left(\frac{1}{\frac{v}{c+k*p}} - \alpha \right) \quad \text{Ligning 2}$$

De forskellige konstanter for rapid cement, ses i nedenstående tabel.

Tabel 2 ses konstanterne for rapid cement [11]

Cementtype	Termin	K	α
Rapid cement	1	13	0,9
Rapid cement	7	24	0,6
Rapid cement	28	30	0,5

2.2 SCM

Det bliver mere og mere populært at bruge restprodukter fra én branche, til en anden. SCM står for supplementary cementitious materials, eller alternative cementlignende materialer, og dækker over en række materialer fx flyveaske, kalkfiller og kalcineret ler, som kan tilsættes betonen for at erstatte en del af cementen.

2.2.1 Flyveaske

Flyveasken (FA) der bruges i dette projekt er fra Nordjyllandsværket, som biproduktet fra kul og biomasse(træpiller) forbrænding. Når kul bliver brændt dannes en aske, som opfanges i filtre i skorstenen. Denne aske ville ellers "flyve" væk, deraf navnet flyveaske.

Flyveaske er hyppigt anvendt i SCC-beton. Den består af kugleformede partikler, cirka samme størrelse som cement. Densiteten af flyveasken på 2300 kg/m³, er dog betydelig lavere end cementen. Flyveaskens k-faktor er 0,5, det vil sige, at 1kg flyveaske kan erstatte 0,5kg cement i udregning af v/c-forholdet [1].

Flyveasken gavner betonens tæthed. Det gør den blandt andet, fordi asken er puzzolanreaktiv, hvilket betyder, at den danner bindemiddel med calciumhydroxid, som dannes ved cementens reaktion med vand. [4]

Krav til flyveaske

For at en aske kan bruges i beton, er der i DS/EN 450-1:2012, opskrevet nogle krav, der skal overholdes. Asker kan indeholde organisk materiale, som nedbrydes med tiden. En stor mængde af dette er ikke acceptabel, når asken tilsættes beton. Mængden af organisk materiale findes ved at lave et glødetabsforsøg, og i nedenstående tabel ses kravene.

Tabel 3 – viser grænseværdierne for glødetab [4]

Kategori A	< 5 %
Kategori B	< 7 %
Kategori C	< 9 %

En anden ting, som skal undersøges, er saltindholdet i asken. Hvis den har et højt indhold af salt, kan den forårsage korrosion på armeringen og mindske styrken af betonen. Dermed er der opsat nogle krav til saltindholdet i de forskellige miljøklasser. Grænseværdierne for mængden af chlorid i forhold til cement ses i Tabel 4.

Tabel 4 – maksimale chloridindhold [15]

Anvendelse	Miljøklasse			
	Passiv	Moderat	Aggressiv	Ekstra aggressiv
Uden armering	Cl 1,0	Cl 1,0	Cl 1,0	Cl 1,0
Med armering	Cl 0,4	Cl 0,2	Cl 0,2	Cl 0,2
Med spændarmering af stål	Cl 0,2	Cl 0,2	Cl 0,2	Cl 0,1

2.2.2 Kalkfiller

Kalkfiller, eller på engelsk, limestone filler (L), udvindes fra kalk, som er naturligt forekommen i Danmark. Materialet er derfor både billigt og let tilgængeligt, da det i forvejen bruges i cementindustrien. Kalkfiller har samme eller mindre kornstørrelse end cement, og kan på samme måde som flyveaske, erstatte en del af cementen. Materialet er dog stort set inaktivt og bidrager derfor ikke til betonens styrke. Den fungerer blot som fylde i betonen, deraf navnet "filler". Derfor kan kalkfiller ikke medregnes i det ækvivalente v/c-forhold, og dens k-faktor er med nutidens normer defineret til 0. [12]

2.2.3 Kalcineret ler

Kalcineret ler (Q), eller metakaolin, fremstilles ved opvarmning af naturligt kaolin. Leret bliver opvarmet for at aktivere det termisk, og fjerne de vandmolekyler, der er kemisk bundet til mineralerne. Dette er en proces, der er mere CO₂-krævende end både flyveaske og kalkfiller, men mindre end cementklinker. Leret har en vis grad af puzzolansk effekt. Tidligere tests har vist, at leret kan erstatte op til 35% procent af cementen, uden at påvirke den færdige cements styrke [7]. Der er dog den ulempe, at den forsinker styrkeudviklingen en smule. Kalcineret ler kan med nutidens normer ikke medregnes i det ækvivalente v/c-forhold og har derfor en k-faktor på 0. [16]

3. Eksperimentelt arbejde

3.2 Karakteristik af flyveaske

I Tabel 5 ses en oversigt over forsøgene, som er lavet for at karakterisere flyveasken.

Tabel 5 oversigt over askeforsøg

Forsøg	Formål	Fremgangsmåde
Kornstørrelsen	Bestemme størrelse på asken	Bilag M
Glødetab	Bestemme indholdet af organisk materiale.	Bilag B
Ledningsevne	Indblik i flyveaskens saltindhold.	Bilag C
pH	Bestemme pH-værdien	Bilag E
Vandopløselighed	Bestemme mængden af vandopløselige dele	Bilag G
Vandindhold	Bestemme vandindholdet i flyveasken	Bilag F
Anioner (IC-målinger)	Bestemmer mængden af salte i flyveasken	Bilag A
Oplukning (ICP-målinger)	Bestemmer mængden af tungmetaller i flyveasken.	Bilag D

3.3 Undersøgelse af rheologiske egenskaber

Der er opsat en række alternative mørtelblandinger, med varierende vand-cement-forhold og indhold af cement-erstatning. De testede cement-alternativer er flyveaske (FA), kalkfiller (L) og kalcineret ler (Q). Der er også udført forsøg med kombinationer af kalkfiller og kalcineret ler.

For at opnå bedst mulige sammenlignelige resultater, forsøges der ved reguleringen på mængden af superplast, at opnå flydesætmål inden for grænserne 160-230 mm. Dette har været nødvendigt, da variationen af vand/binder-forholdet er forholdsvis høj. Det er vigtigt, at flydesætmålene er nogenlunde ens, da det er én af de parametre, entreprenøren bestiller beton efter.

I tidligere parameterstudier på Teknologisk Institut, er der brugt en pastavolumen på 0,22, og derfor bruges det samme pastavolumen i dette projekt. På den måde er det lettere at sammenligne resultater på tværs af studier. I langt de fleste prøver holdes volumen af fint tilslag derfor konstant på 741kg/m³, som følge af et pastavolumen på 0,22. I en række prøver ændres dog på pastavolumen, ved at variere volumen af fint tilslag fra 400-900kg/m³, for at undersøge effekten af dette. I disse forsøg er det svært at holde flydesætmålet indenfor de opstillede rammer, især ved de høje sandmængder, hvor der nærmere kunne måles på sætmål fremfor flydesætmål.

Referenceprøven er lavet med udgangspunkt i en Unicon-recept 25MPa med v/c-tal 0,69 og FA/C-forhold 0,25, dog er mængden af fint tilslag justeret, så den passer med størstedelen af de øvrige prøver. Der laves også en referenceprøve med et højere vand-cement-forhold på 0,75, til sammenligning.

Alle prøver er blandet ved brug af samme fremgangsmåde. Materialerne er blandet i en Eirich RV02 mixer (se Figur 3) i 7 min. før de rheologiske egenskaber måles ved hjælp af et 4C-mini-rheometer.

Til receptudregning af de forskellige prøver, bruges følgende fremgangsmåde:

1. Mængden af fint tilslag fastsættes efter det ønskede pastavolumen.
2. Massen af cement udregnes på baggrund af pastavolumen, vand-cement-forholdet og de ønskede SCM-cement-forhold:

$$m_{cement} \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \frac{V_{pasta}}{\frac{1}{\rho_{cement}} + \frac{FA}{\rho_{FA}} + \frac{v}{c} \cdot \left(1 + \frac{FA}{c} \cdot 0,5 \right) + \frac{L}{\rho_L} + \frac{Q}{\rho_Q}}$$

3. Massen af SCM udregnes ud fra massen af cement:

$$m_{SCM} \left[\frac{kg}{m^3} \right] = m_{cement} \cdot \frac{SCM}{c}$$

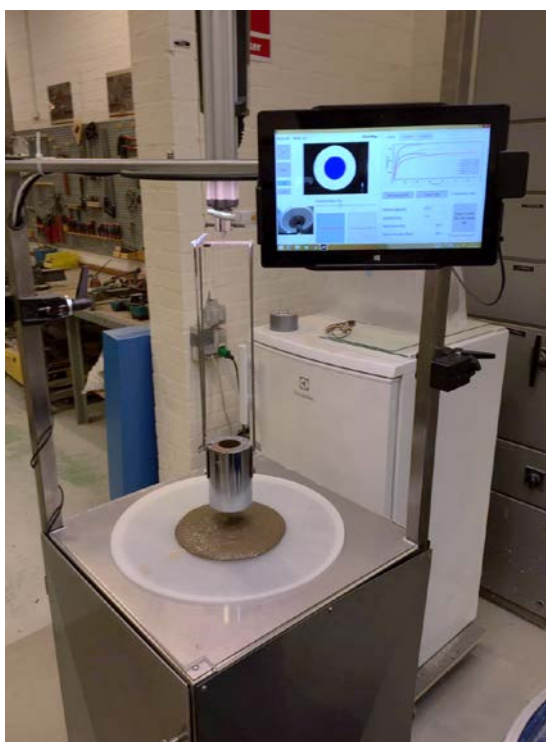
4. Massen af vand udregnes ud fra vand-cement-forholdet og massen af cement. Er der flyveaske i blandingen ganges massen af dette med k-faktor=0,5. K-faktoren for kalkfiller og kalcineret ler er begge 0.

$$m_{vand} \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \frac{v}{c} \cdot (m_{cement} + k \cdot m_{SCM})$$

5. Ud fra erfaring vurderes mængden af superplast, og der korrigeres for dette i vandindholdet.



Figur 3 - blandemaskine

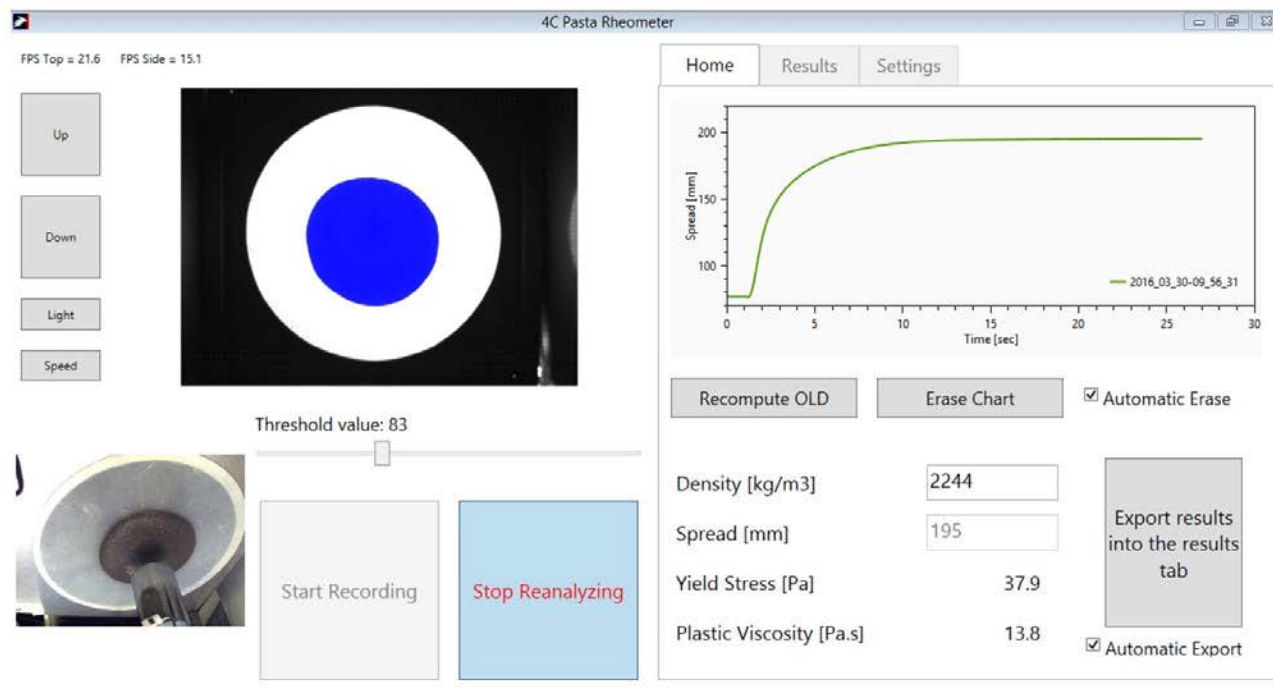


Figur 2- 4c-mini-rheometer

3.1 4C-mini-rheometer

På Figur 3 ses 4C-mini-rheometer er et nyt værktøj, udviklet af Teknologisk Institut, til måling af rheologiske egenskaber i SCC-beton.

Rheometeret består af en kegle, som er placeret på en glasplade. Keglen fyldes med 0,290 liter mørtel, og en motor løfter keglen med en konstant hastighed, så mørtlen flyder ud på glaspladen. Et kamera i bunden registrerer mørtlens udbredelsen i pixels og omregner til mm, derved fås et meget præcist flydesætmål. Samtidig registreres tiden, og ud fra disse to parametre, opstilles en flydekurve som viser sammenhængen mellem udbredelse og tid, se Figur 2. Ud fra kurvens forløb udregnes både flydespænding og viskositet vha. Roussel og Causot relationerne.



Figur 4 Screenshot af programmet 4C-Rheometer

Hvis en prøve viser et flydesætmål under 170 mm, laves prøven om, og der tilføjes mere superplast, for at få flydesætmålet op. Alle sammensætninger har dog et mætningspunkt for hvor meget superplast prøven kan tåle, hvor tilføjelse af mere superplast ikke vil have nogen virkning. Dette vil vise sig som bobler og sorte aflejringer i overfladen samt separation.

3.4 Trykstyrke

I Tabel 6 ses udvalgte blandinger som udstøbes til prismer og trykprøves iht. DS/EN 196-1:2005, for at undersøge om de overholder styrkekravet for en passiv beton. Der udvælges prøver med høje v/c-forhold, da disse vil have de laveste styrker. Nogle af prøverne er kun testet efter 7 døgn, til sammenligning.

Tabel 6 - Oversigt over trykprøvede blandinger

Prøve nr.	SCM (SCM/c)	v/c	7 døgn	28 døgn
R1	Ref.	0,69	X	X
R2	Ref.	0,75	X	
3	FA (0,5)	0,6	X	
11	FA (0,5)	0,75	X	X
12	FA (1,0)	0,75	X	X
21	L (0,5)	0,75	X	X
22	L (0,5)	0,8	X	
28	Q (0,5)	0,75	X	X
29	Q (0,5)	0,8	X	
31	Q + L 1:3 (0,5)	0,75	X	
32	Q + L 1:3 (0,5)	0,8	X	

3.5 CO₂

For hver blanding udregnes mængden af CO₂ der udledes pr. m³. I Tabel 7 er det angivet hvor mange kg CO₂ der udledes pr. ton af et bestemt materiale. Det ses at den helt store synder i CO₂-udledning, er cementen, som udleder 828kg/m³. Flyveasken er med de lige knap 4 kg/m³, det alternativ som udleder mindst CO₂.

Tabel 7 - oversigt over CO₂ påvirkning for de forskellige delmaterialer anvendt i betonen

		CO ₂ [kg/ton]
Cement	AaP Rapidcement	828
SCM	Flyveaske, silikatholdig (FA)	3,92
	Kalkfiller (L)	100
	Kalcineret ler (Q)	270
Total vand	Vand	
Fint tilslag	NCC RN 0/4 kl. E	2,89
Luft	0,02%	
Additiver	Glenium 631 (superplastificering)	770

4 Resultater og diskussion

4.1 Karakteristik af flyveaske

Flyveaske bliver som tidligere beskrevet allerede anvendt i beton, men der foretages en askekarakteristik for at kontrollere, om den overholder kravene for brug som tilsætning i beton.

Glødetab

Tabel 8 – viser resultatet for glødetabet

Prøve	Skål[g]	Aske[g]	Efter ovn [g]	Aske efter[g]	Glødetab[%]
1	22,7095	2,5016	25,1673	2,4578	1,782
2	14,1966	2,5008	16,6524	2,4558	1,799
3	23,6525	2,5051	26,1188	2,4663	1,549

Som beskrevet i afsnit 2.2.1, er der forskellige kategorier, når der ses på glødetabet. Resultatet fra flyveasken, viser, at den ligger i kategori A, da glødetabet er under 5 %. Denne flyveaske har et meget lavt glødetab, hvilket betyder, at der næsten intet uforbrændt kul er i asken. Et højt indhold af organisk materiale, ville betyde at betonen ville kunne nedbrydes med tiden.

Resultaterne for glødetabet stemmer overens med databladet i Bilag J for flyveasken, som er beskrevet med en mængde under 4,0.

pH-værdi

pH-værdien for en betonmørtel er basisk og ligger normalt i intervallet 12 – 14.

Tabel 9 viser pH i 3 prøver

pH	
Prøve 1	11,79
Prøve 2	11,79
Prøve 3	11,80

Flyveaskens pH-værdi er i dette tilfælde lidt under det normale. Dog har det ikke nogen virkning, idet asken stadig er basisk.

Vandindhold

Tabel 10 - vandindholdet i flyveasken

Vandindhold	Skål	Aske	Efter ovn	Vandindhold [%]
1	4,37	5,06	9,41	0,4
2	4,39	5,00	9,35	0,8
3	4,43	5,01	9,41	0,6

Vandindholdet i flyveasken er igen lavt, hvilket betyder, at det ikke vil påvirke v/c-forholdet. Hvis resultatet havde været markant højere, skulle det medregnes i v/c-forholdet.

Ledningsevne

Ledningsevnen giver, som beskrevet i forsøgsplanen, et indblik i, om der er et indhold af salt i asken.

Tabel 11 resultatet for ledningsevne

Ledningsevne		
Prøve 1	3,75	mS/cm
Prøve 2	3,81	mS/cm
Prøve 3	3,83	mS/cm

Resultaterne viser, at indholdet af salte i flyveasken er lavt. Dette bør afspejle sig i forsøget med anioner, som giver et mere eksakt resultat om, hvilke salte flyveasken indeholder samt mængden.

Vandopløselighed

Målte værdier:

$$\text{Aske tilbage} = (211,23) - (6,76 + 105,81) = 98,66 \text{ g}$$

$$\text{Opløst materiale} = 100 \text{ g} - 98,66 \text{ g} = 1,34 \text{ g}$$

Dette svarer til en vandopløselighed på 1,34 %. Dette stemmer også overens med, at mængden af salte er lille, da det primært er saltene i asken, der opløses i vand.

Anioner

Indholdet af salte i asken bliver sammenlignet med de andre asker i projektklyngen på DTU. Der arbejdes med flyveaske, to typer træasker samt en slamaske. Flyveasken fra dette projekt, er gruppe nr. 1, gruppe 2 er en træaske fra Avedøreværket, gruppe 3 er en træaske fra Køge, og den sidste aske er en slamaske fra Mølleåværket i Lyngby.

I nedenstående Tabel 12, ses resultaterne for alle grupper i projektklyngen.

Tabel 12 viser saltindholdet for de forskellige asker

Type	Gruppe nr.	Cl [mg/kg]	NO3 [mg/kg]	SO4 [mg/kg]
Flyveaske	1	19,63	14,75	3665,77
Træaske	2	50199,53	169,44	38931,63
Træaske	3	39458,85	1112,08	81738,23
Slamaske	4	53,25	7,64	2437,59

Der ses i Tabel 12, at flyveasken og slamasken har et lavt indhold af salte. I teoriafsnittet 2.2.1 står grænseværdierne for den maksimale mængde chlorid, der må være i blandingen. En for stor mængde af salte, kan skade armeringen.

Tabel 4 viser, hvor stor mængde der er tilladt i de forskellige miljøklasser. Dette ses igen i nedenstående tabel, hvor der udelukkende er tal for passiv miljøklasse.

Tabel 13 grænseværdier for Cl-indholdet i flyveaske

Anvendelse	Passiv miljøklasse	Maksimum Cl ift. cement
Uden armering	Cl 1,0	1,00 %
Med armering	Cl 0,40	0,40 %
Med spændarmering af stål	Cl 0,20	0,20 %

Det kontrolleres, om der er for højt indhold af Cl i blandingerne. Dette gøres i Tabel 14:

Tabel 14 viser resultaterne for Cl-indholdet

Prøvenr.	FA/C	Cement	Flyveaske	Cl pr. kg aske	Mængde Cl i prøve	Cl / cement
	[-]	[g]	[g]	[g/kg]	[g]	[%]
R1	0,25	1457	364	0,0196	0,0071	0,0005
1	0,33	1511	498	0,0196	0,0098	0,0006
4	0,40	1446	578	0,0196	0,0113	0,0008
7	0,50	1363	682	0,0196	0,0134	0,0010
10	1,00	1060	1060	0,0196	0,0208	0,0020

Disse resultater kan nu sammenlignes og se om de overholder kravene i et passivt miljø.

Tabel 15 viser om asken overholder kravene

Anvendelse	Overholder kravet
Uden armering	OK
Med armering	OK
Med spændarmering af stål	OK

Ifølge databladet er indholdet af Cl under 0,02, hvilket overholdes efter askekarakteristikken.

Oplukning

Som beskrevet i Tabel 5, er formålet at finde ud af, hvilke tungmetaller der i flyveasken samt mængden. Grænseværdierne for tungmetallerne i asken ses i nedenstående Tabel 16.

Tabel 16 viser grænseværdierne for tungmetaller

Tungmetaller	Kategori 1	Kategori 2
	[mg/kg]	[mg/kg]
Arsen (As)	0 – 20	> 20
Bly (Pb)	0 – 40	> 40
Cadmium (Cd)	0 – 0,5	> 0,5
Chrom (Cr)	0 – 500	> 500
Kobber (Cu)	0 – 500	> 500
Nikkel (Ni)	0 – 30	> 30
Zink (Zn)	0 – 500	> 500

Alle resultaterne skal ligge i det første interval, før det kan betegnes som en kategori 1.

Resultaterne for forsøgene kan ses i nedenstående Tabel 17, hvor den kritiske værdi er blevet brugt.

Tabel 17 mængden af de forskellige tungmetaller

Tungmetaller	Resultat	Acceptabel mængde til Kat.1
	[mg/kg]	
Arsen (As)	39,71	OK
Bly (Pb)	22,15	OK
Cadmium (Cd)	0,70	Ikke OK
Chrom (Cr)	29,82	OK
Kobber (Cu)	24,94	OK
Nikkel (Ni)	22,09	OK
Zink (Zn)	51,44	OK

Som det kan ses i Tabel 17, skal denne flyveaske betegnes som en kategori 2. Testen viser en for høj mængde af cadmium, hvilket medfører begrænsede anvendelsesmuligheder. Dette kan dog mindskes ved at lave en udvaskning af tungmetaller. Dette kan få mængden af cadmium under grænseværdien og dermed have ubegrænsede muligheder.

4.2 Undersøgelse af rheologiske egenskaber

Alle opstillede prøver er målt med 4C-rheometer, og resultater er vist i Tabel 18. Farvekoderne for de forskellige prøveserier, vil være gennemgående i rapporten. Mørtelrecepter, samt ikke brugte resultater kan findes i bilag L.

Tabel 18 - Resultater fra mørtelforsøg med 4C-rheometer

Nr.	V/C	P/(P+V)	FA/C	L/C	Q/C	[indhold i kg/m ³]						tilslag	SP	flydemål [mm]	flydesp. [Pa]	visko [Pa*s]	CO2
						C	FA	L	Q	W							
R1	Ref.	0,69	0,35	0,25		183	46			142	741	1,1	169	76,5	3,1	155	
R2		0,75	0,34	0,25		173	43			146	741	1	173	68,1	2,4	147	
1	FA+C	0,60	0,40	0,33		190	63			133	741	3,3	182	53,8	8,8	162	
2		0,60	0,41	0,40		182	73			131	741	3,1	190	43,4	13,4	155	
3		0,60	0,42	0,50		171	86			129	741	3,1	184	51,2	9	146	
4		0,60	0,45	1,00		133	133			120	741	4	195	38,7	14	116	
5		0,66	0,38	0,33		180	59			137	741	2,6	201	32,4	7,2	153	
6		0,66	0,38	0,40		172	69			136	741	2,6	207	28,1	7,9	147	
7		0,66	0,40	0,50		163	82			133	741	2,7	184	50,8	6,6	140	
8		0,66	0,44	1,00		127	127			124	741	2,8	223	19,3	7,2	110	
9		0,75	0,34	0,33		165	54			144	741	1,8	224	18,7	3,6	140	
10		0,75	0,35	0,40		158	63			142	741	1,6	204	30,8	3,6	135	
11		0,75	0,36	0,50		150	75			140	741	1,6	200	33,5	4,2	127	
12		0,75	0,40	1,00		117	117			132	741	1,6	207	27,6	6,1	101	
13	L+C	0,60	0,42	0,33		212		70		127	741	5,2	213	25,4	19	189	
14		0,60	0,44	0,40		207		83		124	741	5,3	210	27	20,5	186	
15		0,60	0,46	0,50		200		100		120	741	5,4	207	29,5	21,8	182	
16		0,66	0,40	0,33		201		66		132	741	3,4	196	38,4	13	178	
17		0,66	0,41	0,40		193		77		130	741	3,7	192	43,4	11	173	
18		0,66	0,43	0,50		187		93		126	741	3,6	183	52,9	14,7	169	
19		0,75	0,37	0,33		185		61		139	741	2,4	188	46	4,9	163	
20		0,75	0,38	0,40		181		72		136	741	2,5	216	22,9	7,1	161	
21		0,75	0,40	0,50		176		88		132	741	2,5	186	49,4	6,5	158	
22		0,80	0,39	0,50		169		85		135	741	1,7	181	56,2	5,3	152	
23	Q+C	0,60	0,41		0,25	217			54	130	741	8,7	224	18,7	24,9	203	
24		0,60	0,42		0,33	211			70	127	741	12	219	21,8	39,6	205	
25		0,60	0,44		0,40	206			82	123	741	14,4	226	18,6	51,9	206	
26		0,66	0,40		0,33	197			65	133	741	8,9	200	34,2	24,2	189	
27		0,75	0,37		0,33	184			61	138	741	7,4	200	33,3	15,2	177	
28		0,75	0,40		0,50	217			87	130	741	8,9	197	36,6	28,4	177	
29		0,80	0,39		0,50	168			84	134	741	8,6	225	18,9	17,6	171	
30	L+Q+C	0,66	0,40	0,11	0,22	200		22	44	131	741	5,2	185	50,6	19,6	186	
31		0,75	0,40	0,17	0,33	175		30	58	131	741	5,3	166	87,2	21,9	170	
32		0,80	0,39	0,17	0,33	168		29	56	135	741	5,1	205	29,7	13,4	163	
33	Mængde af fint tilslag FA+C	0,65	0,40	0,50		163	82			133	400	0,4	207	26,2	1	137	
34		0,65	0,40	0,50		163	82			133	500	0,7	221	20,4	1,3	138	
35		0,65	0,40	0,50		163	82			133	600	1,2	237	14	2,1	138	
36		0,65	0,40	0,50		163	82			133	625	1,2	213	24,1	2,7	138	
37		0,65	0,40	0,50		163	82			133	650	1,2	221	20	3,7	138	
38		0,65	0,40	0,50		163	82			133	700	2,2	236	14,4	4	139	
39		0,65	0,40	0,50		163	82			133	800	3,2	154	123,7	7,2	140	

4.2.1 Referenceprøver

Til undersøgelse af de rheologiske egenskaber er opstillet to referenceprøver. Referenceprøve 1, R1, er baseret på en Passiv C25 beton fra Unicon, med v/c-forhold 0,69 og 25% flyveaske (Bilag I). Referenceprøve 2, R2, har et højere v/c-forhold på 0,75. I Tabel 18 ses resultater fra forsøg med 4C-rheometer.

Begge referenceprøver har en forholdsvis høj flydespænding men en lav viskositet. Det betyder, at de flyder hurtigt, men ikke langt.

4.2.2 Cementerstatning og v/c-forhold

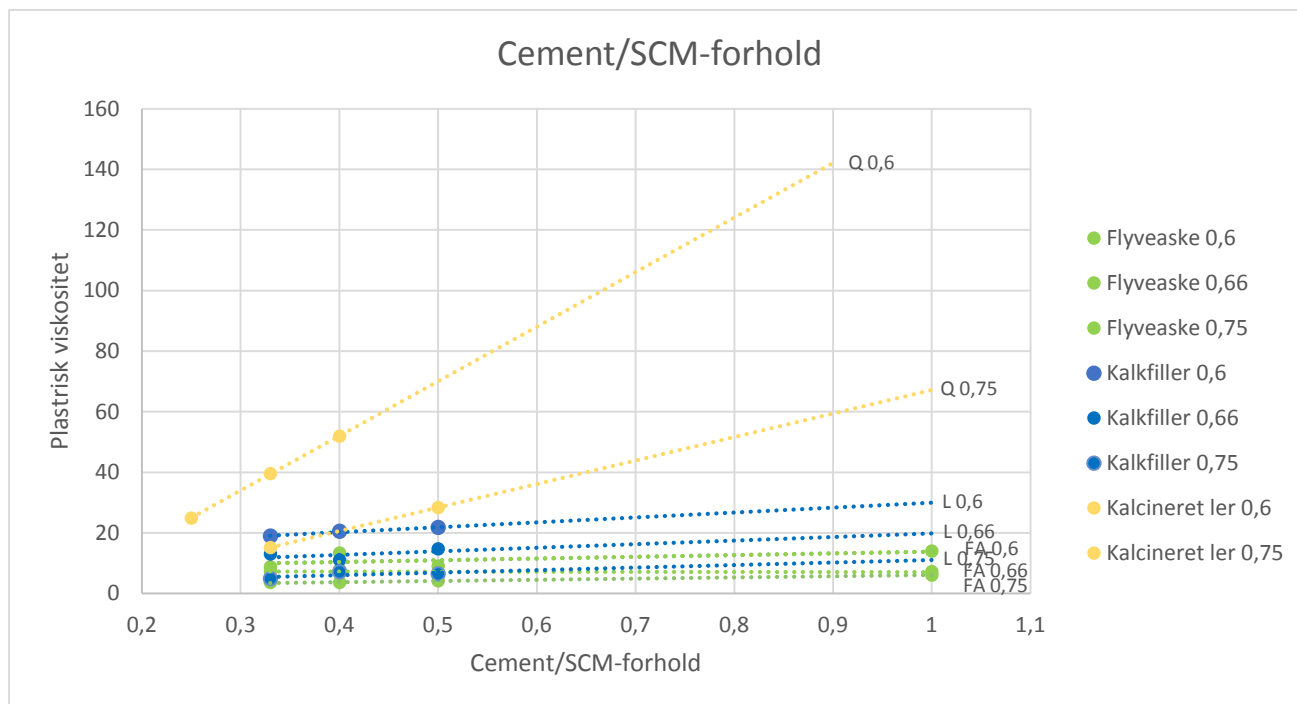
Til første undersøgelse er der opstillet en forsøgsmatrix for hver SCM; flyveaske, kalkfiller og kalcineret ler. I Tabel 19 ses en oversigt over, hvilke prøver der er udført og tilhørende prøvenumre. For alle prøver er der fundet flydesætmål, flydespænding og viskositet, som kan ses i resultattabellen, Tabel 18.

Tabel 19 - Oversigt over prøvenumre

v/c-forhold	Flyveaske				Kalkfiller			Kalcineret ler			
	0,33	0,4	0,5	1	0,33	0,4	0,5	0,25	0,33	0,4	0,5
0,6	1	2	3	4	13	14	15	23	24	25	
0,66	5	6	7	8	16	17	18				26
0,75	9	10	11	12	19	20	21		27		28
0,8							22				29

Det er oplagt at undersøge effekten af variationer i mængden af cementerstatning. Jo større mængde cement, der kan erstattes, des "grønnere" bliver betonen. Derfor undersøges det, hvor stor en andel af cementen der kan erstattes med mere miljøvenlige alternativer, uden at forringe betonens bearbejdelighed.

Samtidig varieres vand-cement-forholdet, da det er den parameter, der styrer betonens styrke. Beton, som hører til passive miljøklasser, har typisk et v/c-tal som ligger mellem 0,6-0,8. Der vælges derfor blandinger i denne kategori.



Figur 5 – Den plastiske viskositet som funktion af cement/SCM-forholdet, vist for flyveaske, kalkfiller og kalcineret ler, med forskellige v/c-forhold. V/c-forholdet for de forskellige serier, er angivet udfor tendenslinjen.

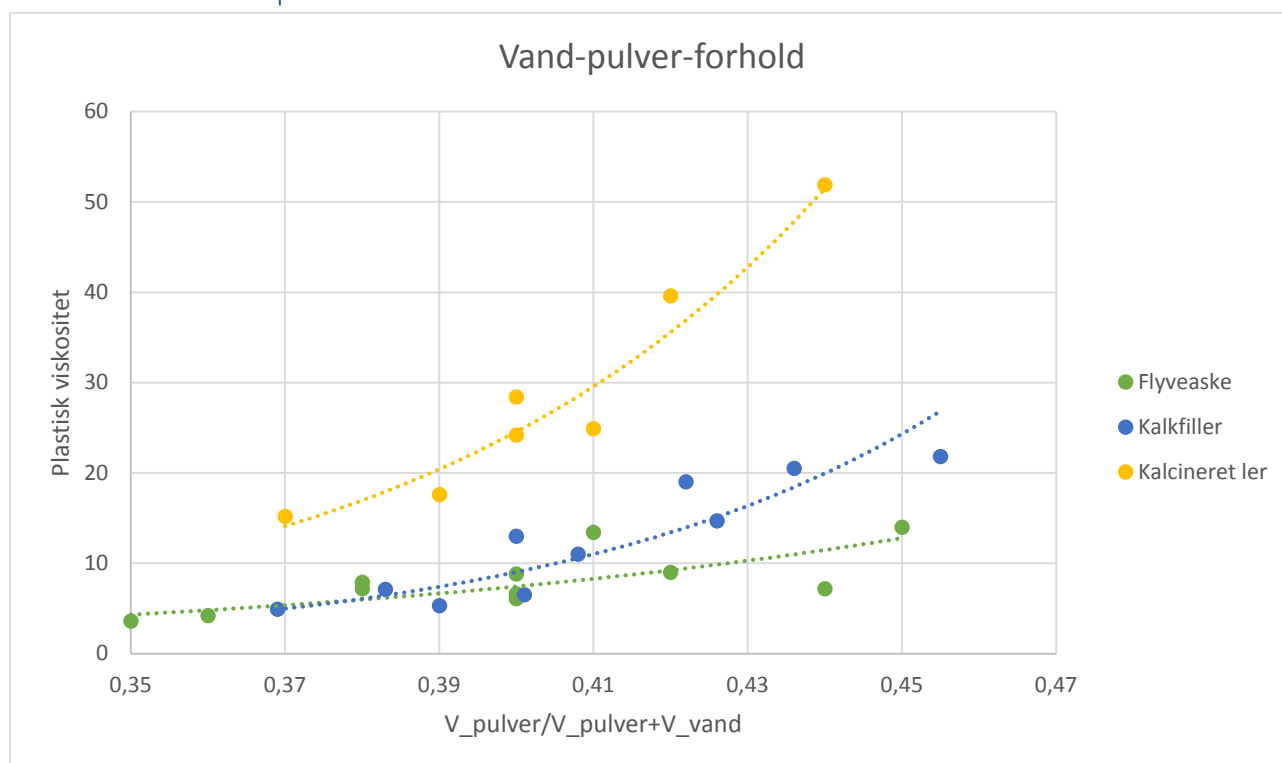
På Figur 5 ses viskositeten, som funktion af cement/SCM-forholdet for hhv. flyveaske, kalkfiller og kalcineret ler. Der er indlagt tendenslinjer for serierne med samme v/c-forhold. Det ses, at prøverne med lave v/c-forhold, generelt har en højere viskositet end prøverne med høje vand-cement-forhold. Dette skyldes, at vandet gør mørtlen mere flydende og mindre klistret. Betoner med et højt v/c-forhold, vil ofte opfattes lettere at arbejde med. Det er dog ikke altid en fordel, med meget flydende betoner, da for meget vand kan føre til, at betonen vil separere eller bløde.

Det er interessant at se på grafernes hældning. Det giver et billede af, hvor stor en påvirkning de forskellige SCM'er har på viskositeten, når man øger mængden af den. For blandinger med flyveaske forbliver viskositeten stort set konstant, trods en fordobling af flyveaske-indholdet. En øgning i mængden af kalkfiller-indholdet vil resultere i en lille stigning i viskositeten, mens øgning i indholdet af kalcineret ler vil få viskositeten til at stige meget.

Det ses, at prøverne med kalcineret ler, generelt har en højere viskositet end både flyveasken og kalkfilleren. Lerets grove struktur gør, at det kan indeholde mere vand på overfladen. Dette gør også, at blandingerne kræver langt mere superplast end de andre anvendte SCM'er.

Det er svært at sammenligne viskositeten af prøverne med flyveaske med de to andre SCM'er med samme v/c-forhold. Dette skyldes, at man i udregningen af vandindholdet ikke kan medregne hverken kalkfiller eller kalcineret ler i det ækvivalente v/c-forhold, flyveasken kan medregnes 50%. Det vil sige, at man i en prøve med flyveaske vil få et højere indhold af vand end i en prøve med kalkfiller, selv om begge prøver har samme SCM/cement-forhold og v/c-forhold. Prøverne med flyveaske vil derfor også have en lavere viskositet. Derfor vil det give mening at opstille viskositeten som funktion af vand-pulver-forholdet. Dette er gjort i Figur 6.

4.2.3 Vand-pulver-forhold



Figur 6 – Den plastiske viskositet som funktion af vand-pulverforholdet for prøvenummer 1-29 med flyveaske, kalkfiller og kalcineret ler.

I Figur 6 ses den plastiske viskositet som funktion af vand-pulver-forholdet. Alle prøver fra nr. 1 til nr. 29 er plottet, og der er indlagt tendenslinjer for hver SCM.

Fordelen ved at sætte viskositeten som funktion af vand-pulver-forholdet fremfor vand-cement-forholdet er, at det giver et mere sammenligneligt billede af de tre SCM'ers påvirkning på den plastiske viskositet. Som tidligere nævnt, kan hverken kalcineret ler eller kalkfiller medregnes i det ækvivalente v/c-forhold, hvorfor prøven vil have et lavere vandindhold. Ved at forholde sig til hele

mængden af pulver, altså cement+SCM, ses det hvordan den plastiske viskositet afhænger stærkt af mængden af pulver, uanset hvilken type.

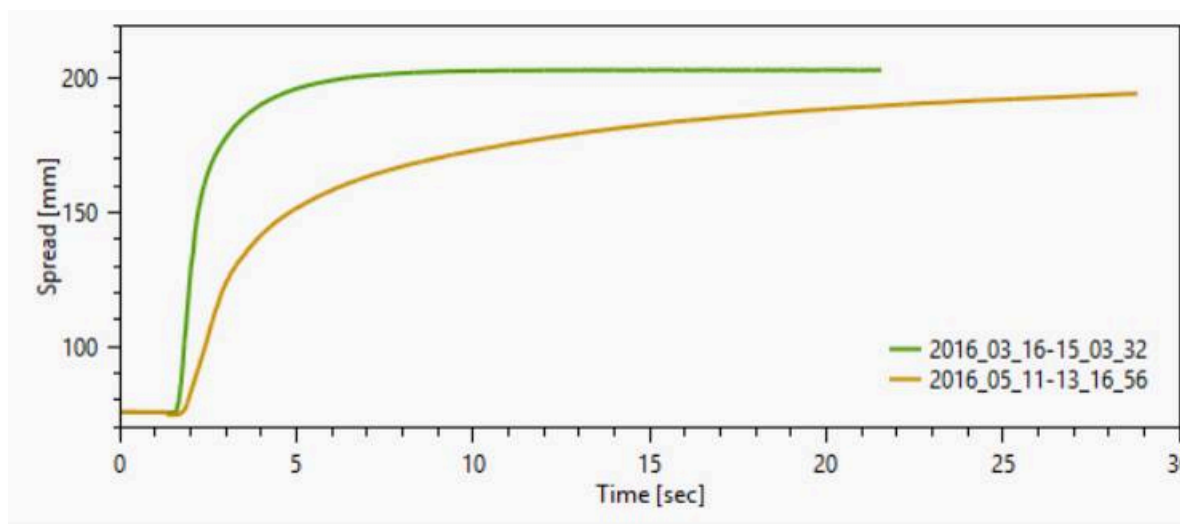
4.2.4 Sammenligning af SCM

Der er stor forskel på hvordan blandingen opfører sig ved tilsætning af de tre forskellige alternativer. Holdes v/c-forholdet og SCM/cement-forholdet konstant, kan de rheologiske egenskaber sammenlignes.

Tabel 20 - Resultater fra rheometer-forsøg med prøve nr. 11, 21 og 28, med hhv. flyveaske, kalkfiller og kalcineret ler.

Prøvenr.	Alternativ	v/c	SCM/ c	Flydesætmål	Flydespænding	Viskositet
11	FA	0,75	0,5	200 mm	33,5 Pa	4,2 Pa*s
21	L	0,75	0,5	186 mm	49,4 Pa	6,5 Pa*s
28	Q	0,75	0,5	197 mm	36,6 Pa	28,4 Pa*s

ses tre blandinger med samme v/c-forhold på 0,75. Viskositeten for flyveaske og kalkfiller er meget lig, mens viskositeten for kalcineret ler er betydelig højere. Det betyder at de tre prøver flyder ca. lige langt, men prøven med kalcineret ler flyder langsommere. Dette er ikke nødvendigvis en ulempe, det kan være en fordel til visse former for støbninger, at betonen er sejere.



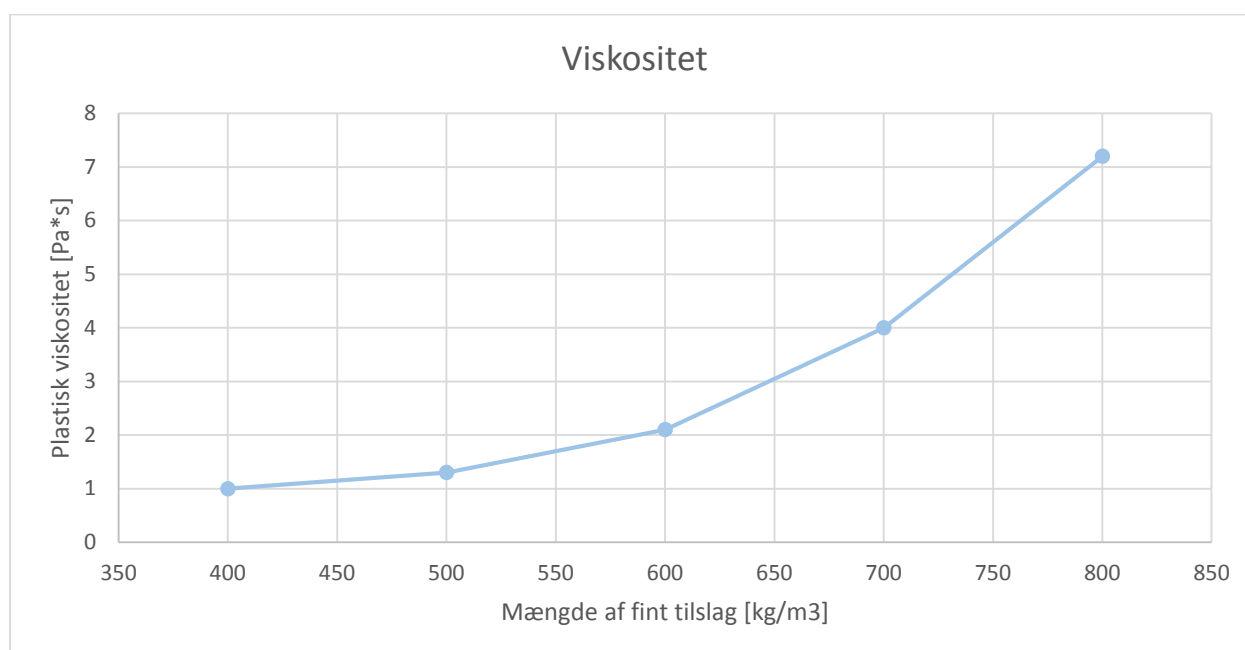
Nr.		v/c	SCM/c	P/(P+V)	Flydemål	Flydespænding	Viskositet
10	Flyveaske	0,75	0,4	0,35	204	30,8	3,6
28	Kalcineret ler	0,75	0,5	0,4	197	36,6	28,4

Figur 7 - Flydediagram for prøve nr. 10 og 28

Der er på *Figur 7* opstillet et flydediagram for to forskellige blandinger. Begge blandinger har et flydesætmål på omkring 200mm. Blanding nr. 10 med flyveaske har en meget lav viskositet, mens blanding nr. 28 med kalcineret ler, har en forholdsvis høj viskositet. Der ses en tydeligt forskel på flydekurvernes hældning, selvom begge blandinger ender med nogenlunde samme flydesætmål.

4.2.5 Indhold af fint tilslag

Det ønskes, at undersøge hvor stor påvirkning indholdet af fint tilslag har på de rheologiske egenskaber. Der er valgt en blanding, hvor v/c- og FA/c-forholdet holdes konstante, mens der ændres på pastavolumen, ved at øge indholdet af fint tilslag.



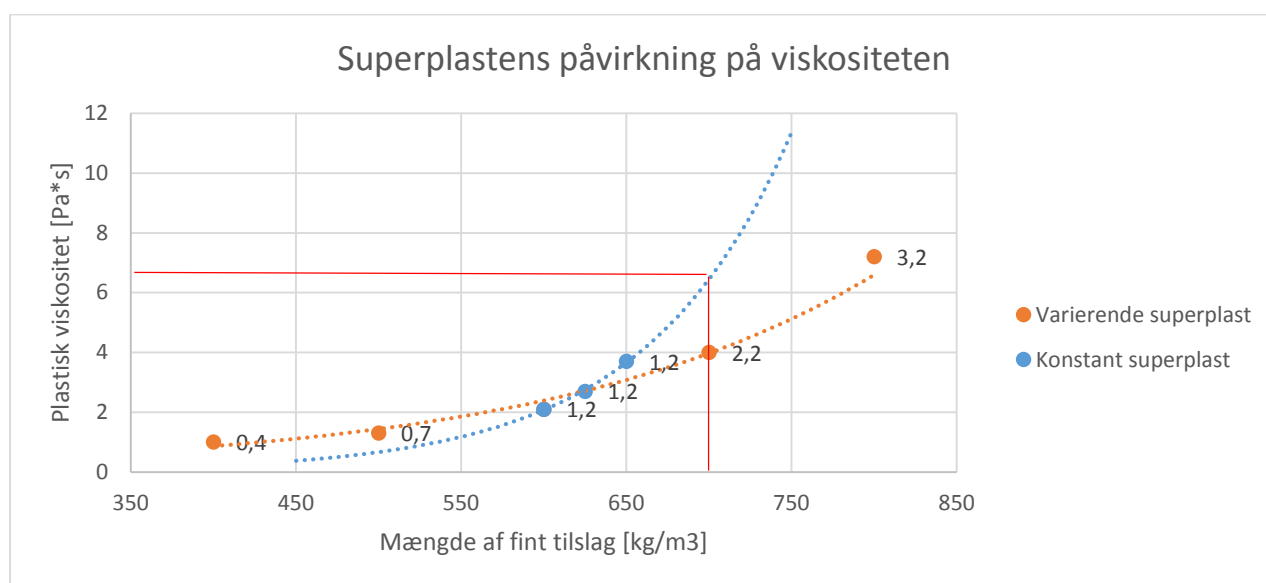
Figur 8 - Viskositeten som funktion af mængden af fint tilslag. Prøve nr. 33,34, 35, 38 og 39 er plottet.

I *Figur 8* ses en tydelig sammenhæng mellem plastiske viskositet og mængden af fint tilslag. Blandingerne med lavt indhold af sand har en lav viskositet, og omvendt. Det betyder at med en stigende mængde af fint tilslag, og dermed også et mindre pastavolumen, vil betonen flyde langsommere. Grafen går fra 400 til 800 kg sand pr. m³. Der blev i tillæg lavet en blanding med 900kg/m³. Det lykkedes dog ikke at måle et flydesætmål på blandingen, da den var så tør, at den blot blev stående i keglen.

4.2.6 Superplastens påvirkning

I tidligere forsøg har det været muligt at holde flydesætmålet for blandingerne nogenlunde indenfor opsatte rammer. Dette skyldes at mængden af superplastificerende stof, varieres fra blanding til blanding.

Da det har vist sig fra nogle forsøg, at der kan være et stort udsving på resultatet når man tilsætter mere eller mindre superplast, ønskes det at undersøge effekten af superplasten på viskositeten. Derfor holdes mængden af superplast konstant på 1,2 kg/m³ i et lille interval (prøve nr. 35, 36 og 37), hvor kun indholdet af fint tilslag varierer. Indholdet af superplast ses ud for hvert punkt.

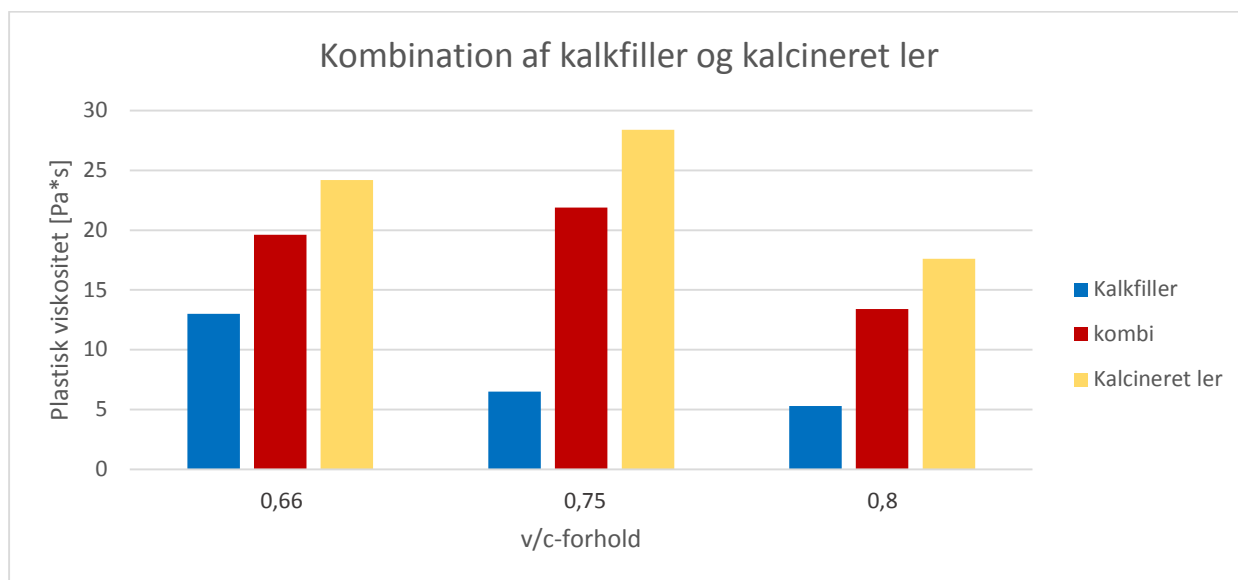


Figur 9 - Den plastiske viskositet som funktion af mængden af fint tilslag med hhv. konstant og varierende superplast.

Som beskrevet i teorien, kan viskositeten holdes nede, ved at dosere mere superplast til en blanding. Hvis mængden af sand stiger og superplasten holdes konstant, vil viskositeten dernæst stige. Dette er gældende for både den konstante og varierende superplast i Figur 9. Det interessante er derfor hældningen på de to grafer. Det ses på grafen for konstant superplast, at hvis man med en mængde af fint tilslag på 700kg/m³ holder superplasten på 1,2kg/m³, vil den teoretiske viskositet være på omkring 6,6 Pa*s, hvilket er højere end de 4 Pa*s ved en dosering på 2,2kg/m³ superplast. Jo mere mængden af fint tilslag øges, des større bliver forskellen på de to grafer. Det tegner altså et billede af, at uden tilsætning af superplast, vil viskositeten stige langt hurtigere, når der ændres på de andre parametre i betonsammensætningen.

4.2.7 Kombination

I en række prøver (nr. 30, 31 og 32) kombineres kalcineret ler og kalkfiller. Prøve nr. 30 har et SCM/c-forhold på 0,33, mens prøve nr. 32 og 33 har et SCM/c-forhold på 0,5. alle tre prøver har et L/Q-forhold på 0,5, hvilket vil sige at prøverne indeholder dobbelt så meget kalcineret ler, som kalkfiller.



Figur 10 - Den plastiske viskositet af hhv. kalcineret ler, kalkfiller og en kombi af de to.

I Figur 10 ses en sammenligning af de tre blandinger, med hhv. kalkfiller, kalcineret ler og en kombination af de to. Som tidligere beskrevet, har kalcineret ler en høj viskositet, hvorimod kalkfiller ligger lavere. Når disse to alternativer kombineres, vil viskositeten ligge et sted midt imellem. Der fås altså en beton som er mindre klistret end blandinger udelukkende med kalcineret ler, og mere stabil end blandinger udelukkende med kalkfiller. Viskositeten af kombinationsblandingerne ligger over gennemsnittet af de to andre prøver, da indeholdet af kalcineret ler er dobbelt så højt som kalkfillerindholdet. Det vurderes, at der med fordel kan bruges en kombination af de to alternativer, og at forholdet mellem dem, kan justeres ud fra behov. På den måde kan viskositeten styres op og ned. Samtidig kan man ved tilsætning af kalkfiller til en blanding med kalcineret ler, få en grønnere beton.

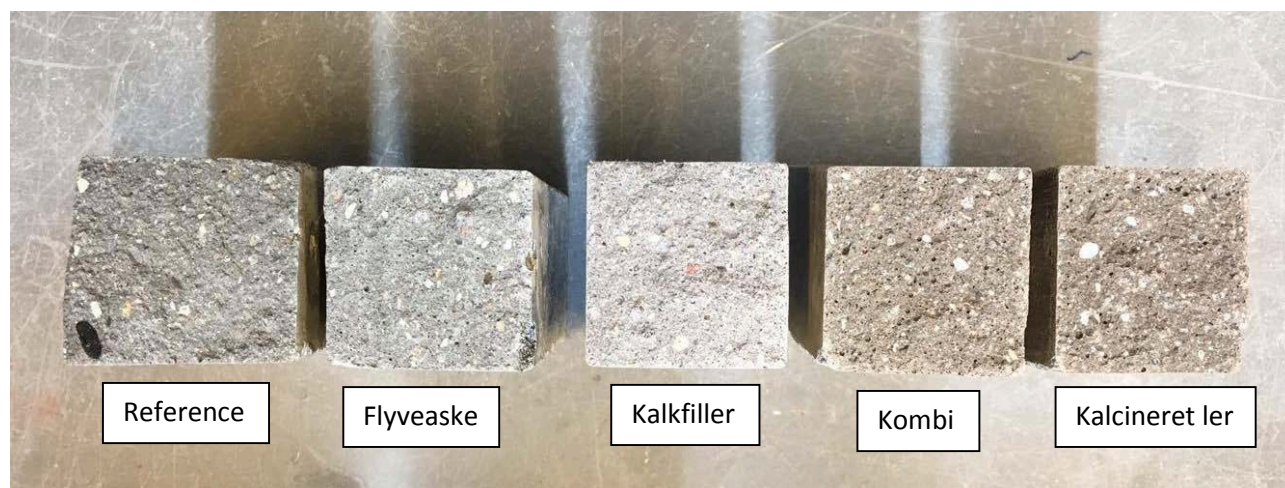
4.3 Trykstyrke

Det skal sikres at de undersøgte blandinger har tilstrækkelig styrke til passiv miljøklasse. Som det kan ses i Tabel 1 (afsnit 2.1.5), er minimumsgrænsen for passive betoner 12 MPa. Der sammenlignes med en referenceprøve C25, med en styrke på minimum 25MPa.

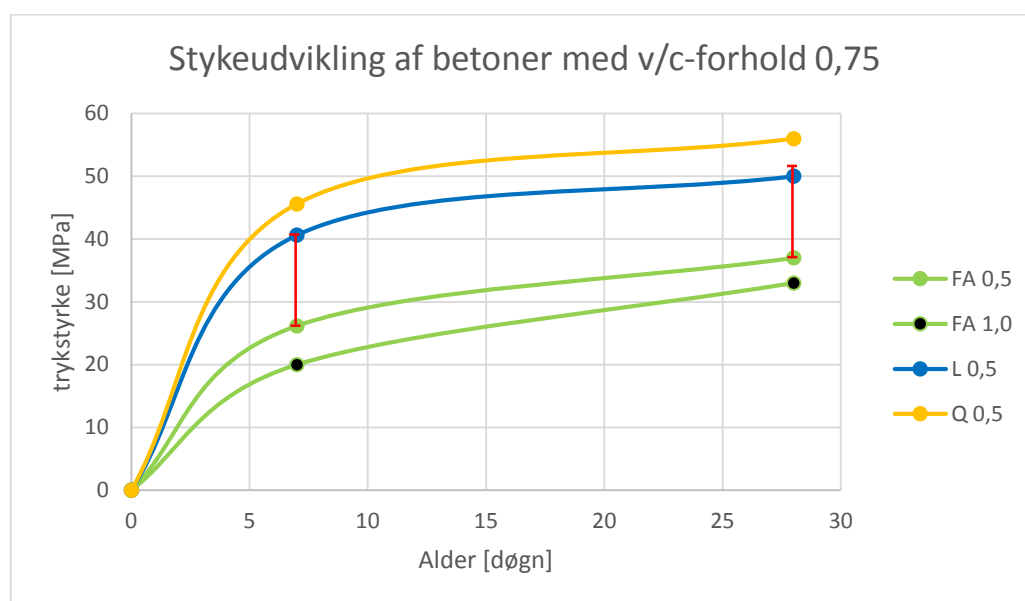
Tabel 21- Resultater af trykforsøg. Tallene er et gennemsnit af 6 prøver. Alle resultater findes i bilag H

Prøve nr.	SEM/cement	v/c	Styrke [Pa]	
			7 dage	28 dage
R1	FA 0,25	0,69	37	47
R2	FA 0,25	0,75	30	
3	FA 0,5	0,6	39	
11	FA 0,5	0,75	26	37
12	FA 1,0	0,75	20	33
21	L 0,5	0,75	41	50
22	L 0,5	0,8	38	
28	Q 0,5	0,75	46	56
29	Q 0,5	0,8	37	
31	Q+L 0,33	0,75	43	
32	Q+L 0,5	0,8	38	

Udvalgte prøver for alle tre alternativer, samt kombinationen af kalcineret ler og kalkfiller, er trykprøvet. I Tabel 21 ses resultater af de forskellige prøver. Resultaterne af trykforsøgene i Tabel 21 repræsenterer et gennemsnit af 6 prøver med samme blanding. Alle resultaterne kan findes i bilag H. Det viser sig at alle de prøvede blandinger opnår en styrke som er over 25MPa og overholder dermed også de 12MPa, som er minimumskravet for passiv miljøklasse.



Da de udvalgte prøver med henholdsvis flyveaske, kalkfiller, kalcineret ler og kombinationen, alle er blandinger med det højeste SCM/c- og v/c-forhold i serien, vil de også repræsentere de laveste og mest kritiske styrker i serierne. Dermed kan det konkluderes at hvis de kritiske prøver overhoveder styrkekravet, vil alle prøver fra nr. 1 til og med 32 højst sandsynligvis også vil overholde styrkekravet.



Figur 11 - Styrkeudvikling som funktion af betonens alder

I Figur 11 ses styrkeudviklingen som funktion af betonens alder for betoner med v/c-forhold 0,75. Teoretisk burde det primært være v/c-forholdet, som bestemmer styrken af den færdige beton. Det ses dog at 4 blandinger med samme v/c-forhold opnår vidt forskellige styrker. De tre øverste grafer har samme SCM/c-forhold på 0,5. Blandingen med flyveaske opnår den laveste trykstyrke. Dette er, som tidligere nævnt, fordi flyveasken har en aktivitetsfaktor på 0,5 mens de andre alternativer ikke medregnes. Dermed er vandindholdet i blandingen med flyveaske, højere end for de to andre blandinger.

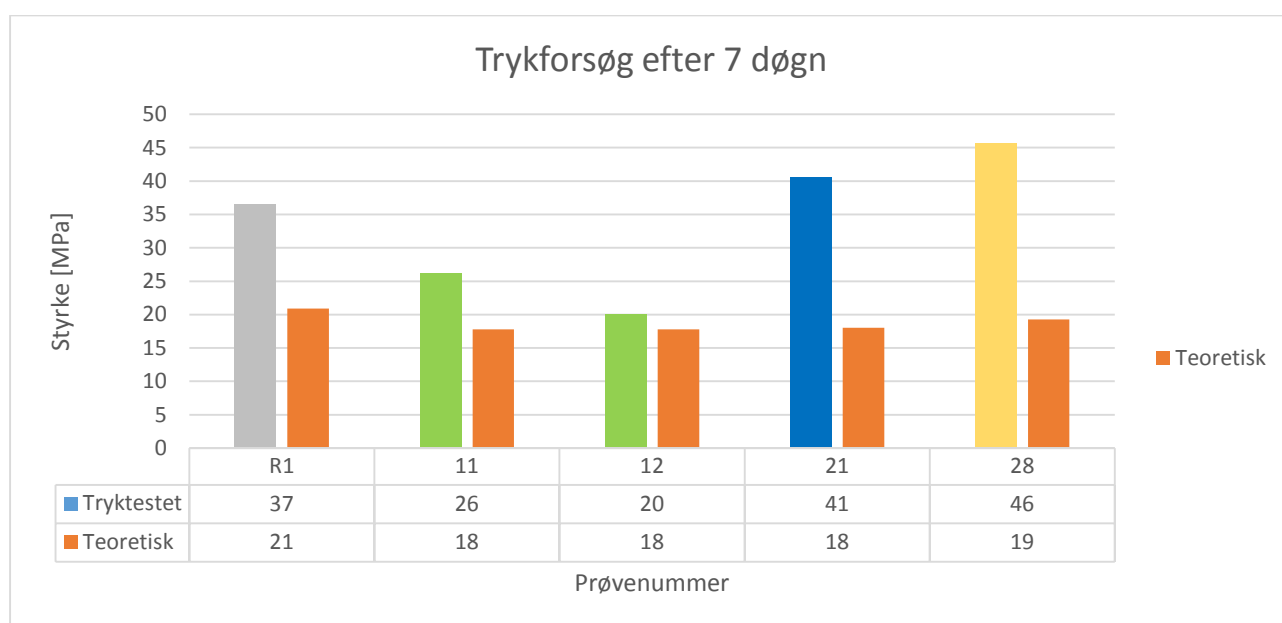
Blandingen med kalcineret ler opnår en højere trykstyrke, end blandingen med kalkfiller. Dette skyldes at kalcineret ler har en grad af puzzolansk virkning, som bidrager til styrken. Kalkfilleren er derimod inaktiv, og bidrager ikke til styrken. I forhold til flyveasken har kalkfilleren, dog den virkning, at den accelererer styrkeudviklingen, så betonen opnår en lidt højere, tidlig styrke. Det ses bedst

som forskellen mellem graferne for flyveaske og kalkfiller for henholdsvis 7 og 28 dage (de to røde streger er præcis lige lange). Det kan være en fordel at opnå en højere tidlig styrke på konstruktioner, hvor man ønsker at afforskalle tidligt, eller skal opnå en vis styrke inden eksempelvis opspænding af armering.

4.3.1 Teoretisk trykstyrke

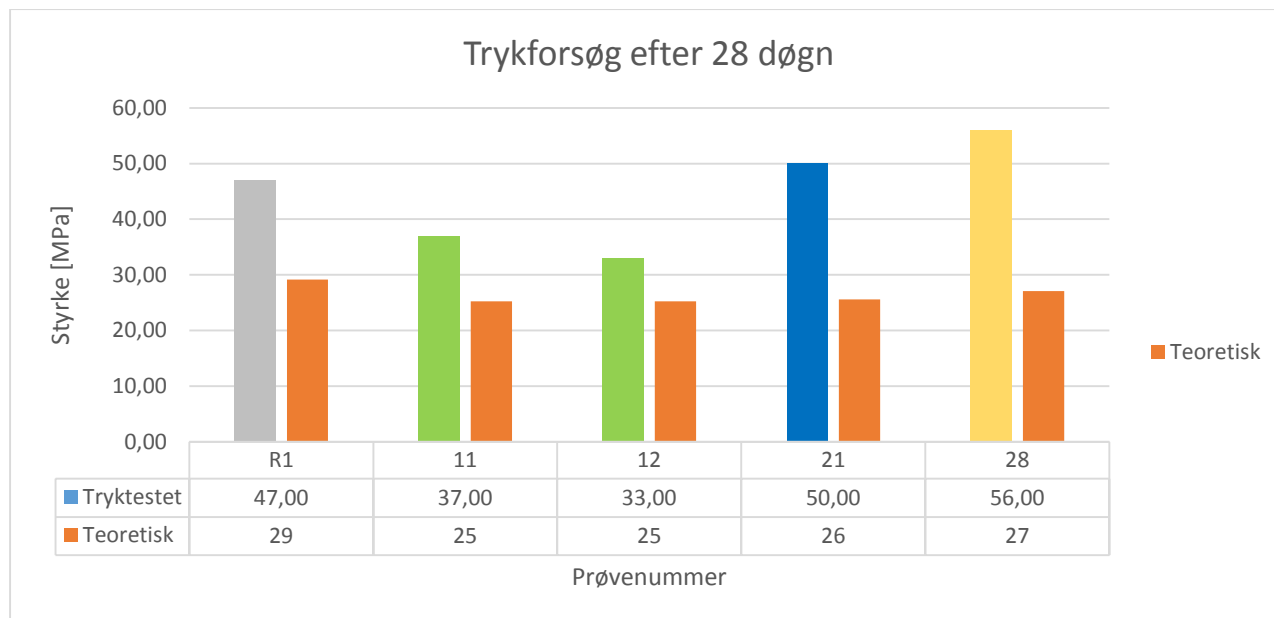
Den teoretiske trykstyrke beregnes og sammenlignes med forsøgene på Teknologisk Institut. Flyveasken har en k-faktor på 0,5, mens kalkfiller og kalcineret ler ikke medregnes. Til at udregne den teoretiske trykstyrke er $f_C = K * \left(\frac{1}{v} - \alpha\right)$ Ligning 1 er K og α konstanter, som afhænger af typen af cement, og tiden den har hærdet. Men hvis der bruges tilsætningsstoffer skal dette medregnes. Den teoretiske styrke for beton med tilsætningsstoffer med puzzolansk effekt, med aktivitetsfaaktor, k, udregnes ved hjælp af $f_C = K * \left(\frac{1}{c+k*p} - \alpha\right)$ Ligning 2.

$f_C = K * \left(\frac{1}{c+k*p} - \alpha\right)$ Ligning 2 brugt, da prøverne indeholder tilsætningsstoffer. Alle resultater kan findes i bilag H.



Figur 12 viser teoretisk samt tryktestet forsøg efter 7 døgn

Som Figur 12 viser, er trykstyrken af forsøgsblandingerne generelt højere, end de udregnede, teoretiske trykstyrker. Flyveasken ligger nærmest den teoretiske, hvilket giver god mening, da den har et højere indhold af vand.



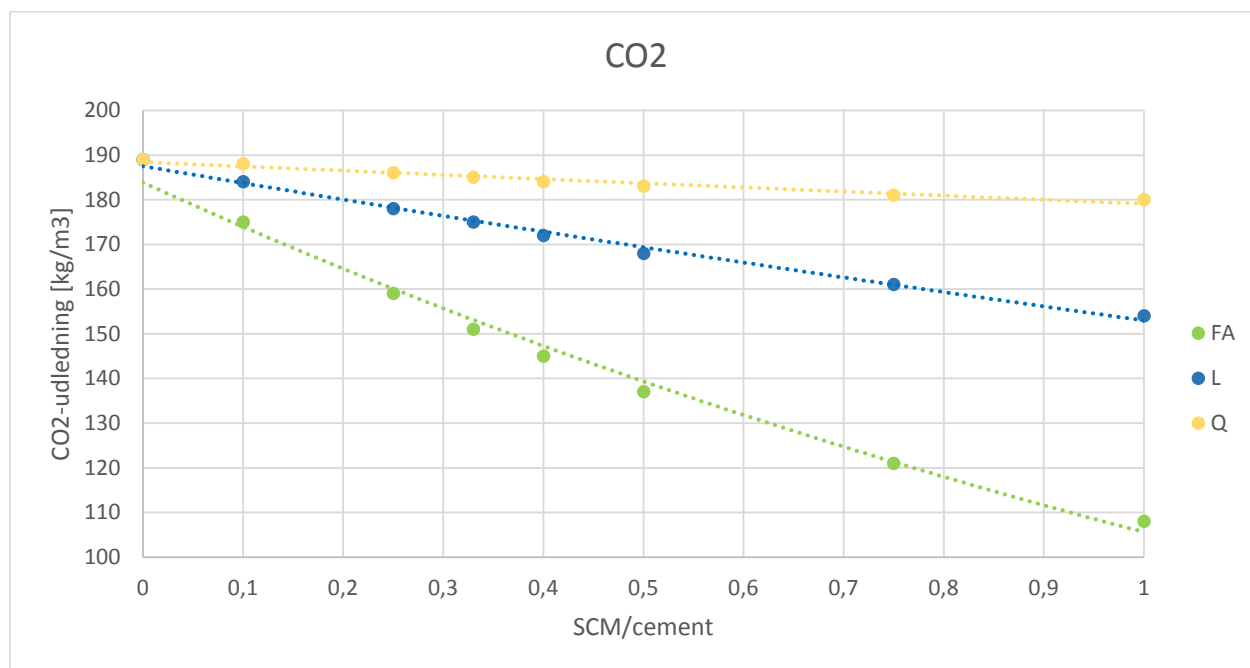
Figur 13 viser teoretisk og tryktestet resultater efter 28 døgn

Det samme resultat vises i Figur 13 efter 28 døgn. Den eneste forskel er dog at trykstyrken stiger, hvilket stemmer overens med teorien, som siger betonen bliver stærkere med alderen.

Prøve nr. 28 med kalcineret ler, opnår en trykstyrke på 56 MPa, med et SCM/c- og v/c-forhold som begge er højere end referenceprøven. Den egentlige trykstyrke er over dobbelt så høj som den teoretiske, hvorfor det bør være muligt, at definere en aktivitetsfaktor for kalcineret ler, som gør at den kan erstatte en større del af cementen.

4.4 CO₂

I en teoretisk beton med konstant v/c-forhold, konstant indhold af fint tilslag, og ingen tilsætningsstoffer, hvor kun forholdet mellem cement og SCM varierer, vil CO₂ påvirkningen se ud som på Figur 14.



Figur 14 – Udledning af CO₂ som funktion af SCM/c-forholdet

Det ses hvordan CO₂ påvirkningen falder, når en større andel af cementen bliver erstattet. En erstatning med flyveaske vil give en stor besparelse på CO₂-udledningen, mens en erstatning med kalcineret ler kun sænker CO₂ udledningen minimalt.

Det der dog ofte sker, når indholdet af kalcineret ler stiger, er at viskositeten samtidig stiger. Dette giver anledning til at tilsætte superplast, for at sænke viskositeten, hvilket medfører en stigning i CO₂ påvirkningen.

4.5 Videre forskning

I løbet af dette projekt, er der observeret nogle emner som er interessante at se nærmere på. Ved yderligere forskning i dette emne, ville nedenstående kunne undersøges.

Det kunne være interessant, at foretage en grundig karakteristik af kalkfiller og kalcineret ler. Dette er primært for at kontrollere, at indholdet af salt og tungmetaller ikke overstiger grænseværdierne.

I dag kan kalcineret ler- og kalkfiller-indholdet ikke medregnes i v/c-forholdet. Men som det ses på trykstyrkeresultaterne, opnår begge en højere styrke, end den teoretiske. Der vil derfor, med flere undersøgelser, kunne defineres en aktivitetsfaktor. Dette ville bevirke, at mere af cementen kan erstattes, uden at påvirke vandindholdet, og dermed også betonens styrke. Således vil CO₂-indholdet også kunne sænkes.

Jo ældre en beton er, jo stærkere er den. Så styrkeforsøg med alternativerne samt kombinationen, over længere tid vil give et indblik i om tilslagsstofferne reagerer anderledes end cement over længere tid.

5 Konklusion

Ved karakteristik af asken er det fundet, at mængden af organisk materiale indeholdt i asken, er næsten ikke eksisterende. Ved forsøg med ledningsevne viser det sig, at mængden af salte i asken er meget lille. Mængden af vandopløselige stoffer er derfor også kun på 1,34%. Ved udregning af cloridindhold i udvalgte mørtelprøver, ses det, at prøverne overholder alle krav for passive betoner. Den målte pH-værdi af asken er på 11,79, hvilket er basisk og ikke vil have påvirkning på betonens i forvejen basiske miljø. Ved oplukning er det fundet, at asken ligger i kategori 2, hvilket giver den begrænsede anvendelsesmuligheder. Kun cadmium-grænsen er overskredet, alle andre forsøg med tungmetaller vil placere asken i kategori 1. Det vil derfor være muligt at sænke mængden af cadmium, for at få asken op i kategori 1, så den vil have ubegrænset anvendelsesmuligheder

Under undersøgelserne af de rheologiske egenskaber er det fundet, at der er betydelig forskel på de tre alternativer, flyveaske, kalkfiller og kalcineret ler. Det faktum, at 50% af flyveasken medregnes i vand-cement-forholdet, gør at den adskiller sig fra de andre alternativer, og gør en sammenligning svær. Bearbejdigheden af blandingerne med kalcineret ler, skiller sig ud fra de to andre alternativer. Viskositeten er højere, hvilket betyder en mere klistret og sej beton.

Det konkluderes, at de forskellige parametre i betonsammensætningen, kan påvirke viskositeten og flydespændingen i forskellige retninger. Det er fundet, at hvis v/c-forholdet øges, vil viskositeten falde, og omvendt. En øgning i mængden af fint tilslag vil få viskositeten til at stige, mens tilsætning af superplast vil sænke både flydespændingen og viskositeten.

Kalkfiller og kalcineret ler adskiller sig fra flyveaske, når det kommer til styrkeudviklingen. De accelererer hurtigere end flyveaske, hvilket betyder at de opnår en højere, tidlig styrke. Resultaterne for trykstyrkerne viser, at både kalkfiller og kalcineret ler ligger væsentligt højere end den teoretiske. Dette skyldes, at disse ikke kan medregnes i v/c-forholdet.

Det er svært at konkludere hvilket af alternativerne der er bedst, da de alle har gode og dårlige sider. Det kan dog konkluderes at flyveasken er den mest CO₂-venlige af de tre, mens kalcineret ler udleder mest CO₂. De er dog alle et bedre alternativ end cementklinkerne, med hensyn til bæredygtighed. Kalcineret ler er et godt alternativ, hvis der ønskes en klistret eller sej beton, mens flyveaske og kalkfiller giver en mere hurtigt-flydende beton. Typen af alternativ skal altså vælges efter behov, og alternativerne kan med fordel kombineres.

Litteraturliste

- [1] Thrane, L.N.; Pade, C.; Nielsen, C.V.
(2007) Håndbog for sammensætning af SCC, Teknologisk Institut, Beton.

- [2] Thrane, L.N.; Pade, C.; Nielsen, C.V.
(2007) Håndbog for udførelse af SCC, Teknologisk Institut, Beton.

- [3] DS/EN 196-1, (2005)
Metoder til prøvning af cement – Del 1: Styrkebestemmelser, Dansk Standard 2. udgave, ICS: 91.100.10

- [4] DS/EN 450-1, (2012)
Flyveaske til beton – Del 1: Definition, specifikationer og overensstemmelseskriterier Dansk Standard 3. udgave, ICS: 91.100.30

- [5] Jensen, B.C (2008)
Betonkonstruktioner efter DS/EN 1992-1-1, Nyt Teknisk Forlag 2.udgave, ISBN: 978-87-571-2766-9

- [6] Thrane, L.N; Svensson, T; Svec, O; Pade, C (2015)
Rheology – one parameter in a performance based design framework for the selection of concretes with environmental friendly binder systems Teknologisk Institut, Beton.

- [7] Ingeniøren (2013)
<https://ing.dk/artikel/dansk-projekt-erstatte-35-procent-af-cementen-i-beton-med-ler-162331>
(besøgt: 15/05/16)
- [8] Betonhåndbogen(2013)
https://issuu.com/webeditordk/docs/kap_7.0_produktion_af_frisk_beton/1?e=5264220/32039146 (besøgt: 21/05/16)
- [9] Betonhåndbogen(2013)
https://issuu.com/webeditordk/docs/kap_10_1_betons_trykstyrke_17022016/2?e=5264220/33614839 (besøgt: 21/05/16)
- [10] Retsinformation(2015)
<https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=175523> (besøgt: 02/06/16)
- [11] Aalborg Portland (2010)
http://www.danskbeton.dk/files/Servicebutik/Dansk%20Beton%20publikationer%20til%20s_ervicebutikken/Diverse/CementOgBeton_2010.pdf
(besøgt: 21/06/16)
- [12] Viden om SCC (2016)
<http://www.voscc.dk/>
(besøgt: 04/04/16)
- [13] Grøn Beton (2014)
<http://www.gronbeton.dk/>
(besøgt: 04/04/16)
- [14] RenoNord(2016)
www.renonord.dk (besøgt: 02/06/16)

- [15] DS/EN 206-1 (2011)
Beton – Materialer – Regler for anvendelse af EN 206-1 i Danmark
Dansk standard 4. udgave
ICS: 91.100.30
- [16] Betonhåndbogen
[http://betonhaandbogen.dk/media/bogen/kap_21.1_gron_beton_03112014.p
df](http://betonhaandbogen.dk/media/bogen/kap_21.1_gron_beton_03112014.pdf)
side 21.1-8 (besøgt:14/05/16)

Bilagsliste

Forsøgsbeskrivelser

Bilag A – Anioner

Bilag B – Glødetab

Bilag C – Ledningsevne

Bilag D – Oplukning

Bilag E – pH

Bilag F – Vandindhold

Bilag G - Vandopløselighed

Bilag H - Trykstyrke samt resultater

Bilag I - Recept fra Unicon

Bilag J – Datablad flyveaske

Bilag K – Datablad kalkfiller

Bilag L - Forsøgsopskrifter og resultater

Bilag M - Kornkurve

Anioner

A Princip

En jordvæskes indhold af ioner og opløste forbindelser er af stor interesse. Denne analyse viser de primær opløselige anioner som er i jorden.

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes ICP og IC

C Analysens udførelse

10,00 g jord eller aske afvejes på teknisk vægt til 50 mL plastikflasker.

Der tilsættes forsigtig 25,00mL destilleret vand med fuld pipette. Prøverne stilles på rystebord natten over

Prøverne tages af og sedimenteres i 15 min. Der måles pH på prøverne.

Efter pH-målingerne filtreres prøverne gennem et 0,45µm sprøjtefilter over en 20 mL plast-vial og gemmes til ICP og IC.

D Bestemmelse af metaller

Ekstraktens indhold af metaller måles på ICP under benyttelse af de standarder som hører til de enkelte metaller.

E Beregning af resultat

På baggrund af standardkurverne beregnes jordens indhold af salte angivet i mg/kg.

$$mg / kg = \frac{A \cdot 0,100L \cdot C}{B \cdot 10^{-3} kg / g \text{ jord}}$$

hvor

A = ekstraktens metal koncentration, mg/L = ppm

B = g jord afvejet

C = fortyndingsfaktor

F Affaldshåndtering

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Filterpapiret smides ud i skraldespanden i stinkskalet

Jord og aske skal opsamles i jord – og askeaffaldsspand

Glødetab

A Princip

Jordens indhold af organisk materiale svarer stort set til det opnåede glødetab ved 550°C. I en tungmetalforurenede jord vil tungmetallerne i høj grad reagere med det organiske materiale i jorden og sidder bundet i denne fraktion.

B Specielt apparatur

Til analysen benyttes et muffelovn.

C Analysens udførelse

3 digler sættes i muffelovn, som er opvarmet til 550°C, hvor de står i 30 minutter (1 time hvis ovnen er kold). Diglerne afkøles i ekssikkator og vejes på analyse vægt.

NB: Diglerne transporteres med tang, da fingrene afsætter fugt og derved ændrer vægten.

Derefter afvejes 2,5 g tør, knust jord på analysevægt til hver digel. Diglerne med den tørre jord stilles i en opvarmet muffelovn og glødes ved 550°C i 1 time.

Diglerne med den glødede jord afkøles i ekssikkator og vejes på analyse vægt.

D Beregning af resultat

Glødetabet, som nogenlunde svarer til prøvens indhold af organisk stof, angives i procent af tørstofindholdet.

$$\% \text{ glødetab} = \frac{m(\text{før muffelovn}) - m(\text{efter muffelovn})}{m(\text{før muffelovn})} \cdot 100$$

E **Affaldshåndtering**

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

Ledningsevne i jord

A Princip

En jordvæskes indhold af ioner og opløste forbindelser er af stor interesse, da dette kan give et billede af en jordvæskes samlede koncentration (ionstyrke), ionernes aktivitetsforhold i væsken samt give et indtryk af ligevægtsforholdene mellem faste bestanddele og opløste forbindelser. Ledningsevnen for en jordvæske er et udtryk for, hvor godt en elektrisk strøm kan ledes gennem den givne væske og den afhænger af, hvor mange ladede partikler, der er til stede i væsken.

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes ledningsevne måler.

C Analysens udførelse

10,00 g tør knust jord afvejes på teknisk vægt til en 50 mL plastikflaske.

Der tilsættes 25,00 mL destilleret vand med fuld pipette og ryst i 30 min.

Jorden skal nu bundfælde i ca. 10 minutter, indtil en væskefase har udskilt sig over jorden.

Ledningsevne elektroden skylles med destilleret vand. Sæt elektroden ned i væske. Når displayet viser "STAB" og aflæs resultatet og noteres som mS/cm.

D Beregning af resultat

Ledningsevnen anvendes uden yderlig beregning som mS/cm.

E Affaldshåndtering

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Oplukning af jord- og askeprøve efter DS 259

A Princip

Denne oplukningsmetode er en Dansk Standard (DS 259) til bestemmelse af syreopløselige metaller i jorden. Metalkoncentrationen fundet ved denne metode svarer til en "total-koncentration" af det pågældende metal i jorden. Ved en fuldstændig destruktion af jorden, vil man dog have mulighed for at finde en højere værdi af de forskellige metaller, så DS 259 giver derfor snarere et fastlagt niveau for en metalkoncentration, end en fuldstændig bestemmelse af metalkoncentrationen i jorden.

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes ICP
Autoklave

C Kemikalie sikkerhed

Salpetersyre - Brandnærende; Ætsende; Brandfarlig ved kontakt med brandbare stoffer. Alvorlig ætsningfare. Undgå indånding af dampe. Brug syrehandsker, plastikforklæder, sikkerhedsbriller og stinkskab ved afmåling.

Salpetersyre halv konc. (1:1) - Lokalirriterende; Irriterer øjnene og huden. Brug engangshandsker, sikkerhedsbriller og stinkskab ved afmåling.

Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.

D Reagenser

1) **Salpetersyre halvkonc, (1:1) HNO₃:**

500 mL koncentreret HNO₃ overføres med måleglas til en 1000,00 mL målekolbe som er ½ fyldt med destilleret vand. Der blandes godt og tilsættes vand til mærket. Efter blanding overføres opløsningen til en plastikflaske og mærkes.

E **Analysens udførelse**

1,00 g tør, knust jord afvejes på teknisk vægt i et pyrex-glas med skruelåg (autoklaveglas) og der tilsættes 20,00 mL halvkoncentreret HNO₃ med fuld pipette (skal foregå i stinkskab).

Autoklavflaskerne lukkes helt, da HNO₃ ellers ville fordampe. Flaskerne stilles i autoklaven.

Der hældes 1,5L destilleret vand i autoklaven og låget lukket helt og den orange låseknop lukkes. Den sorte ventil midt på låget åbnes helt og drejes derefter en ½ omgang tilbage. Autoklaven tændes og der går ca. 10-15 min indtil den er varmet op. Efter 3 min med damp ud at ventilen lukkes denne og trykket begynder at sige. Når trykket er kommet op i det blå felt på manometeret tages der tid på autoklaveringen (30min). Derefter slukkes autoklaven.

Flaskerne afkøles derefter til stuetemperatur.

Prøverne filtreres med sug gennem et 0,45 µm filter i stinkskab. **Brug engangshandsker.** Autoklaveflasken skylles med 3 gange destilleret vand. Filtreret skal suge tør mellem hvert skyl.

Filtratet hældes i en 100,00 mL målekolbe og der tilsættes destilleret vand til mærket og blandes. Væsken hældes på en 20 mL plast-vials og gemmes til ICP.

F **Bestemmelse af metaller**

Ekstraktens indhold af metaller måles på ICP under benyttelse af de standarder som hører til de enkelte metaller.

G **Beregning af resultat**

På baggrund af standardkurverne beregnes jordens indhold af metaller angivet i mg/kg.

$$mg / kg = \frac{A \cdot 0,100L \cdot C}{B \cdot 10^{-3} kg / g jord}$$

hvor

A = ekstraktens metal koncentration, mg/L = ppm

B = g jord afvejet

C = fortyndingsfaktor

H **Affaldshåndtering**

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Filterpapiret bortkastes i skraldespanden i stinkskalet.

Jorden og asken skal opsamles i beholder til jordaffald.

pH i 1 M KCl opslemning. L/S: 2,5

A Princip

Jordens pH måles potentiometrisk i en opslemning af jord og kaliumchlorid i forholdet 1:2,5

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes pH-meter

C Kemikalie sikkerhed

Kaliumchlorid - Der foreligger ikke information, der gør det muligt at klassificere stoffet. Bruges med omtanke.

Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.

D Reagenser

1) **Kaliumchlorid 1 M KCl:**

74,56 g KCl afvejes på teknisk vægt og opløses i destilleret vand i en 1000,00 mL målekolbe.

2) **Bufferopløsning, pH 4,00:**

Radiometer pH 4.

3) **Bufferopløsning, pH 7,00:**

Radiometer pH 7

E Analysens udførelse

5,00 g tør, knust jord afvejes på teknisk vægt i en 20 mL plast-vials.

Der tilsættes 12,5 mL 1 M KCl med finpipette. Prøverne stilles på rystebord i 1 time.

Prøverne tages af og sedimenteres i 10 min. Der måles pH på prøverne.

F **Beregning af resultat**

Resultatet aflæses direkte på apparatet og angives som pH (KCl) med en decimal. Aflæsningen anses for stabil når der står "STAB" på displayet.

G **Affaldshåndtering**

Kaliumchlorid og Metrohm pH 4 og pH 7 hældes i vasken.

Plast-vials med jordopslemningen skal opsamles i beholder til jordaffald.

Vandindhold

A Princip

I forbindelse med den elektrodialytiske jordrensning har jordens vandindhold stor betydning, da den elektriske strøm ledes gennem jorden via jordvæsken. Er vandindholdet i jorden mindre end ca. 15 %, er det nødvendigt for forsøgets gennemførelse at tilføre jorden ekstra væske.

B Specielt apparatur

Til analysen benyttes et varmeskab.

C Analysens udførelse

Ved meget præcis måling:

3 bægerglas stilles i varmeskab ved 105°C natten over. Bægerglassene stilles til afkøling i eksikator og vejes på analysevægt.

Dette gøres vha. en tang, fingrene afsætter fugt.

Der afvejes 5 g jord i hvert bægerglas og prøverne tørres ved 105°C i varmeskab. Bægerglassene med den tørrede jord vejes på analyse vægt efter afkøling i eksikator.

Ved mindre præcis måling (mest anvendt):

3 bægerglas afvejes på teknisk vægt. Der overføres en vis mængde til hvert bægerglas som igen vejes på teknisk vægt. Bægerglassene stilles i varmeskab natten over ved 105°C. Bægerglassene med den tørrede jord vejes efter afkøling på teknisk vægt.

D **Beregning af resultat**

Vandindholdet angives i procent af vægten af den fugtige jord.

$$\% \text{ vandindhold} = \frac{m(\text{våd prøve}) - m(\text{tør prøve})}{m(\text{våd prøve})} \cdot 100$$

E **Affaldshåndtering**

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald og bægerglassene rengøres.

Vandopløselighed

A Princip

Ved at foretage en skylning af asken skal der bestemmes hvor meget at materialet som er vandopløselig. De vandopløselige materialer er i de fleste tilfælde salte.

B Analysens udførelse

100,00 g tørret aske afvejes på teknisk vægt til en 1L plastikflaske med låg. Der tilsættes 500 mL destilleret vand. Prøven rystes og henstilles til bundfældning.

Et filterpapir vejes og sættes i en tragt i et måleglas.

Topvæsken hældes over i filterpapiret. Der tilsættes igen 500 mL destilleret vand til asken og prøven omrystes og henstilles.

Topvæsken hældes over i det samme filter og der tilsættes igen 500 destilleret vand til asken og prøven omrystes.

Hele prøven hældes over i filteret og der skylles efter med destilleret vand for at få alle partiklerne med over i filteret. Det stilles til afdrypning.

Når asken i filteret er næste tør, lægges filter med asken i en petriskål og vejes og derefter stilles dem i varmeskab ved 105°C natten over.

Asken og filteret afkøles og vejes.

C Beregning af resultat

$$\text{Aske tilbage} = (\text{tørfilter} + \text{aske} + \text{petri}) - (\text{filter} + \text{petri})$$

$$\text{Opløst materiale} = (\text{askefør}) - (\text{asketilbage})$$

D **Affaldshåndtering**

Filter med aske skal opsamles i beholder til jord- og askeaffald.

Trykstyrke

Fremgangsmåde:

- Mørtelprøve fyldes i form og hærder i 24 timer
- Afformes og prøver kommes i et vandbad på 20,0 grader
- Efter 7 døgn tages prøver op, og er klar til at blive testet efter 20 minutter
- Prøven deles i to
- Der skræbes eventuelle ujævnheder af prøven
- Trykprøvningen kan nu startes
- Resultater noteres
- Dette gentages efter 28 døgn

7 DØGN

nr.	SCM	v/c	MPa	snit	1a	1b	2a	2b	3a	3b
R1	Ref.	0,69	37	58,53	58,01	57,2	60,59	57,96	58,79	58,6
R2	Ref.	0,75	30	47,75	47,94	47,28	47,84	48,79	47,25	47,39
3	FA 0,5	0,6	39	62,40	64,7	62,4	61,74	59,64	62,47	63,46
11	FA 0,5	0,75	26	41,89	41,4	41,3	42,99	42,04	42,69	40,93
12	FA 1,0	0,75	20	31,99	34,81	33,97	35,01	33,41	25,31	29,44
21	L 0,5	0,75	41	64,99	65,02	64,94	64,32	66,14	64,85	64,69
22	L 0,5	0,8	38	60,63	61,16	61,88	59,85	59,5	60,85	60,55
28	Q 0,5	0,75	46	72,96	71,07	70,58	74,88	74,71	74,46	72,07
29	Q 0,5	0,8	37	59,93	58,43	58,41	61,53	60,58	60,79	59,83
31	Q+L 0,5	0,75	43	68,25	66,65	68,32	69,5	68,74	66,93	69,35
32	Q+L 0,5	0,8	38	61,28	50,77	61,15	60,97	60,32	62,24	61,73

28 DØGN

nr.	SCM	v/c	MPa	snit	1a	1b	2a	2b	3a	3b
R1	Ref.	0,69	47	74,45	75,11	74,17	74,75	73,87	74,35	69,16
11	FA 0,5	0,75	37	59,84	59,62	62,95	59,82	58,41	59,22	59,03
12	FA 1,0	0,75	33	53,35	53,34	53,15	52,94	53,99	53,01	53,64
21	L 0,5	0,75	50	79,37	80,52	76,13	77,69	81,97	79,43	80,47
28	Q 0,5	0,75	56	90,14	89,7	86,69	93,36	92,81	88,14	84,11

Trykstyrkeresultater for recepten samt de tre alternativer. Der er både de teoretiske, som er regnet vha. Bolomey og trykstyrkeresultater som er testet på Teknologisk Institut.

Bolomey	Type	Teoretisk 7	Praktisk 7	Teoretisk 28	Praktisk 28
R1	Ref.	20,91	36,58	29,14	47,00
11	FA 0,5	17,77	26,18	25,21	37,00
12	FA 1,0	17,80	19,99	25,25	33,00
21	L 0,5	18,05	40,62	25,56	50,00
28	Q 0,5	19,26	45,60	27,08	56,00

Recept.....: UP25R-FEM16IFKNV--

Fabrik: Avedøre--1

Version 0018

 Grøn Beton II
 Lava beton C25/30 fra Avedøre fabrikken

 Miljøklasse PASSIV
 Styrkeklasse C25
 Kontrolklasse Normal
 Største sten 16
 Tilstræbt konsistens 120 mm
 Forprøvning. attestnr.

Sammensætning	Navn	Densitet kg/m ³	Mængde kg/m ³	Volumen l/m ³
Cement	Rapid CEM I 52,5N(MS/LA<2)	3.160	206,0	65
Flyveaske	Flyveaske B4	2.300	51,5	22
UPVANDAVID	Procesvand Avedøre	1.049	171,8	164
Luftiblanding	UM.AIR 22SB (luftindblanding)	1.010	0,6	1
Plastificering	UM.POZZOLITH 20N (sortplast)	1.160	1,5	1
Superplast	UM.GLENIUM SKY 631 (superplast)	1.050	2,8	3
Sand	E0004 RN Avedøre Metro	2.620	836,0	319
Sten	M0408 RN Avedøre	2.610	140,9	54
Sten	M0816 RN Avedøre	2.610	798,7	306
Tilstræbt luftindhold i beton, volumen %		6,5		65,0
			2.210	1.000

Kontrolpunkt	Værdi	Beregning
Microsilica	0 %	$100 * 0 / 206$
Flyveaske	25 %	$100 * 52 / 206$
Ækv. Cementindhold	232 kg/m ³	$206 + 0,5 * 51,5$
Effektivt vandindhold	160 kg/m ³	$0,56 + 1,00 + 2,10 + 156,34$
Ækv. V/Cforhold	0,690	$160 / 232$
Fillerindhold i beton	426 kg/m ³	$206 + 52 + 0 + 168.62 (<0.25 \text{ mm})$
Mørtelindhold	647 l/m ³	$1000 - 352.62 (>4\text{mm})$
Ækv. alkaliindhold 60% mør.	1,60 kg/m ³	$(1,720 * 1000 * 60 / 100) / 647$
Alkaliindhold	1,72 kg/m ³	
Max. chloridindhold	0,20 %	$100 * 0,507 / (206 + 0 + 52)$

Chlorid- og alkaliregnskab

Delmateriale	kg/m ³	%(Alkali)	kg/m ³ (Alkali)	%(Chlorid)	kg/m ³ (Chlorid)
Cement	206,00	0,60	1,24	0,03	0,062
Flyveaske	51,50	0,00	0,00	0,02	0,010
Luftiblanding	0,57	0,50	0,00	0,30	0,002
Plastificering	1,55	0,80	0,01	0,02	0,000
Superplast	2,78	2,00	0,06	0,01	0,000
Sand	836,04	0,02	0,17	0,02	0,167
Sten	140,94	0,01	0,02	0,01	0,020
Sten	798,66	0,02	0,16	0,02	0,160
Procesvand	171,80	0,04	0,07	0,05	0,086
Total	2.210,00		1,72		0,507

Kornkurve, gennemfald i %

Sigte, mm.	0.075	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	32	64	128
Sammensat Vægt	0	2	9	24	35	43	48	58	98	100	100	100
UE0004RN-AVD-METRO	1	4	20	50	75	90	100	100	100	100	100	100
UM0408RN-AVEDØRE	0	0	1	1	1	1	8	98	100	100	100	100
UM0816RN-AVEDØRE	0	0	0	0	0	1	1	8	95	100	100	100

Receipt.....: UP25R-FEM16IFKNV--

Fabrik: Avedøre--1

Version 0018

Materialeegenskaber:

sand	UE0004RN-AVD-METRO	Humus	Lys	Kemisk svind	0,08	Reakt. korn	0,50
		Absorption	0,2	Mørtelprism8	-	Mørtelprism20	0,14
		Acc. mørtel	-				
Stone	UM0408RN-AVEDØRE	Korn<2500	-	Korn<2400	2,00	Korn<2200	-
		Absorption	0,8	Krit. abs.	0,9	Acc. mørtel	-
Stone	UM0816RN-AVEDØRE	Korn<2500	-	Korn<2400	0,90	Korn<2200	-
		Absorption	0,8	Krit. abs.	0,6	Acc. mørtel	-

Konsistensvarianter**Min.****Max.****Basis**

Konsistens	100,00	150,00	120,00
V/C-forhold	0,69	0,69	0,69
Effektivt Vandindhold	156,48	164,32	160,00
Ækv cement indh.	226,78	238,14	231,75
Sand	850,69	817,78	836,04
Sten	939,60	939,60	939,60
Luftibland.	0,55	0,58	0,57
Tilsæt.	4,23	4,45	4,33
Chlorid indhold	0,20	0,19	0,20
Ækv. Alkaliindhold	1,79	1,86	1,82
Ækv. Alkaliindhold 60%	1,66	1,72	1,69

YDEEVNEDEKLARATION

Bilag J

Nr. 0615-CPR-9808/02

Gyldighedsdato 01.07 2013

1. Byggevaretype: Flyveaske fra kul og biomasse forbrænding i henhold til EN 450-1:2012.
2. Byggevarereidentifikation: **Type B4**
3. Byggevarens tilsigtede anvendelse: Beton produktion i henhold til EN 206-1
4. Fabrikantens navn og adresse: Emineral a/s Nefovej 50 9310 Vodskov
5. System for vurdering og kontrol af byggevarens ydeevne: System 1+
6. Notificeret Organ: Bureau Veritas Certification Denmark A/S. 0615. har udført 3. parts overvågning efter system 1+ og udstedt certifikat nr. 0615-CPR-9808
7. Deklareret ydeevne



Egenskab	Ydeevne	Harmoniseret teknisk specifikation	
Glødetab / Restkulstof (Kategori A) ⁽¹⁾	< 4,0 (4,0)	EN 450-1: 2012	
Chlorid (Cl ⁻)	< 0,02 (0,02)		
Svovlsyre anhydrid (SO ₃)	≤ 3,0 (3,5)		
Fri calciumoxid (Fri CaO)	≤ 1,5 (1,6)		
Calciumoxid (CaO)	≤ 10,0 (11,0)		
Finhed + 0,045 mm (Kategori N)	≤ 40 (45)		
- variation ₍₄₎	Dekl.værdi ± 10 % (± 15) % -point		
Aktivitetsindeks	28 døgn		≥ 75 (70) %
	90 døgn		≥ 85 (80) %
Volumenbestandighed (hvis krævet) ⁽²⁾	≤ 10 (10,0) mm		
Partikel densitet	2300 kg/m ³ ± 200 (± 225) kg/m ³		
Reaktivt silicium dioxid (Reakt SiO ₂) ⁽³⁾	≥ 25		
Sum SiO ₂ / Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃ ⁽⁴⁾	≥ 70 (65)		
Total alkali (Na ₂ O _{ækv}) ⁽⁴⁾	≤ 5,0 (5,5)		
Magnesium oxide (MgO) ⁽³⁾	≤ 4,0		
Total fosfat (P ₂ O ₅)	≤ 5 %		
Opløseligt fosfat	≤ 100 mg/kg (110) mg/kg		
Afbindingstid	≤ 100 % test cement x 2		
Holdbarhed	Given		
Farlige stoffer	Sikker iht. EC-No.: 931-322-8		

Noter:

- ⁽¹⁾ Emineral bestemmer restkulstof i stedet for glødetab, med anvendelse af LECO- eller ELTRA-udstyr. Ved leverancer fra ELK er det oplyste restkulstofindhold et beregnet gennemsnit af siloens indhold. Min og maks. værdier oplyses ved henvendelse til Emineral.
- ⁽²⁾ Volumenbestandighed bestemmes når indholdet af fri CaO er mellem 1,5 og 1,6 % -point.
- ⁽³⁾ Bestemmes kun i forbindelse med typetest.
- ⁽⁴⁾ Værdier for disse egenskaber oplyses på forlangende.

8. Ydeevnen for den byggevarer, der er anført i punkt 1 og 2, er i overensstemmelse med den deklarerede ydeevne i punkt 7.

Denne ydeevnedeklaration udstedes på eneansvar af den fabrikant, der er anført i punkt 4.

Underskrevet for og på vegne af producenten af:

Peter Lundquist
Kvalitetskoordinator



YDEEVNEDEKLARATION

Nr. 12 / August 2015

1. Byggevaretype:

Fillerprodukt

2. Byggevaridentifikation:

Mikrofiller, Grå

3. Byggevarens tilsigtede anvendelse(r):

Anvendes som fillertilslag til fremstilling af letbeton med åben struktur, f.eks. iht. DS/EN 1520 (passiv miljøklasse)

4. Fabrikantens navn og adresse:

Aalborg Portland A/S, Rørdalsvej 44, 9100 Aalborg

5. Navn og adresse på den bemyndigede repræsentant:

Ikke relevant

6. Systemerne for vurdering og kontrol af konstansen af byggevarens ydeevne (AVCP):

FPC certificering iht. DS/EN 12620

7. Notificeret Organ's opgave:

Notificeret produktcertificeringsorgan Bureau Veritas Certification, Identifikationsnummer 0615 - har udført

bestemmelse af produkttyperne på grundlag af prøvning, prøveudtagning og den indledende inspektion af fabriksanlæggets produktionskontrol, den løbende overvågning, overensstemmelse og evaluering af fabrikkens produktionskontrol og har udstedt overensstemmelsescertifikat/ydeevneerklæring.



8. Deklareret ydeevne

Egenskaber	Typiske værdier	Prøvningsmetode
Densitet, kg/m ³	2700	EN 196-6 med pyknometer
Chlorid, vandopløseligt	1,0	EN 1744:1:1998 pkt. 2

9. Ydeevnen for den byggevare, der er anført i punkt 1 og 2, er i overensstemmelse med den deklarerede ydeevne i punkt 8.

Denne ydeevnedeklaration udstedes på eneansvar af den fabrikant, der er anført i punkt 4.

Aalborg, den 20. august 2015

Underskrevet for og på vegne af producenten af:



Birgit Jensen, Kvalitets- og Arbejdsmiljøchef, Aalborg Portland A/S

Senest opdateret: 2015-08-20



Result Analysis Report

Sample Name:
Averaged Result- Christian og Helena

SOP Name:
askeTør

Measured:
Wednesday, April 20, 2016 9:53:30 AM

Sample Source & type:
Paris

Measured by:
malm

Analysed:
Wednesday, April 20, 2016 9:53:31 AM

Sample bulk lot ref:
123-ABC

Result Source:
Averaged

Particle Name:
aske

Accessory Name:
Scirocco 2000

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Enhanced

Particle RI:
1.500

Absorption:
0

Size range:
0.020 to 2000.000 μm

Obscuration:
2.53 %

Dispersant Name:

Dispersant RI:
1.000

Weighted Residual:
0.655 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0006 %Vol

Span :
5.065

Uniformity:
1.65

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.788 m^2/g

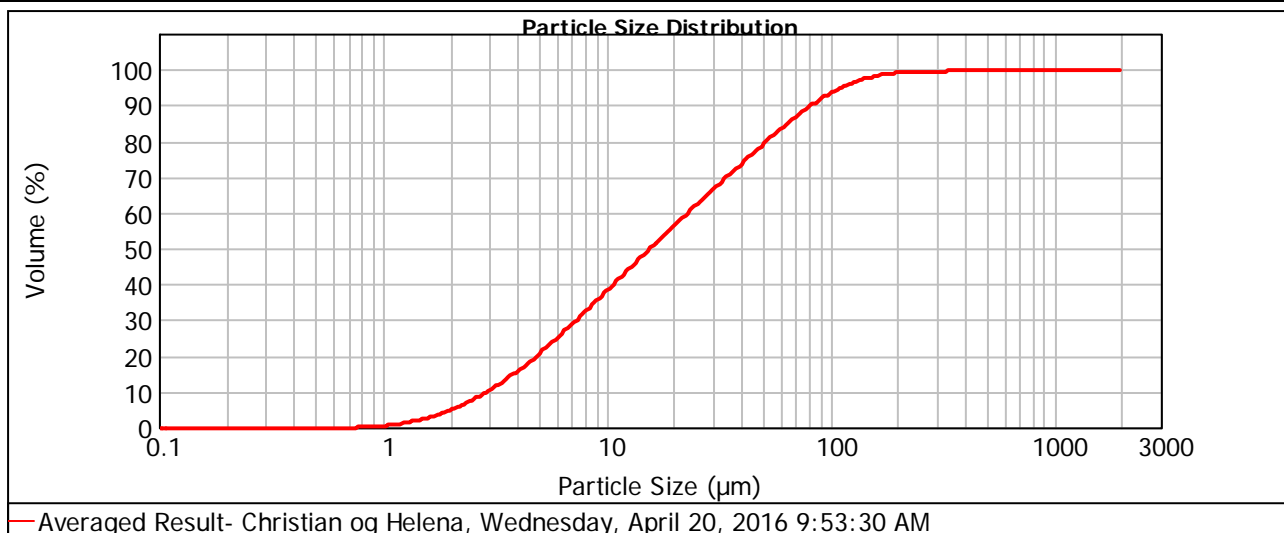
Surface Weighted Mean D[3,2]:
7.618 μm

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
32.650 μm

d(0.1): 2.933 μm

d(0.5): 15.652 μm

d(0.9): 82.206 μm



Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.56	11.482	3.67	120.226	1.36	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.77	13.183	3.65	138.038	0.98	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.00	15.136	3.61	158.489	0.64	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.26	17.378	3.56	181.970	0.37	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.53	19.953	3.51	208.930	0.19	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	1.81	22.909	3.47	239.883	0.10	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	2.09	26.303	3.44	275.423	0.08	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	2.37	30.200	3.42	316.228	0.11	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	2.63	34.674	3.41	363.078	0.12	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	2.87	39.811	3.38	416.869	0.13	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	3.08	45.709	3.33	478.630	0.09	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	3.26	52.481	3.23	549.541	0.03	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	3.41	60.256	3.06	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	3.52	69.183	2.82	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.09	7.586	3.60	79.433	2.52	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.22	8.710	3.65	91.201	2.16	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.39	10.000	3.68	104.713	1.77	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925			

Operator notes: Average of 3 measurements from 160411Rita

Result Analysis Report

Sample Name:
Christian og Helena Flyveaske A

SOP Name:
askeTør

Measured:
Wednesday, April 20, 2016 9:53:30 AM

Sample Source & type:
Paris

Measured by:
malm

Analysed:
Wednesday, April 20, 2016 9:53:31 AM

Sample bulk lot ref:
123-ABC

Result Source:
Measurement

Particle Name:
aske

Accessory Name:
Scirocco 2000

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Enhanced

Particle RI:
1.500

Absorption:
0

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Obscuration:
1.81 %

Dispersant Name:

Dispersant RI:
1.000

Weighted Residual:
0.993 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0004 %Vol

Span :
5.237

Uniformity:
1.88

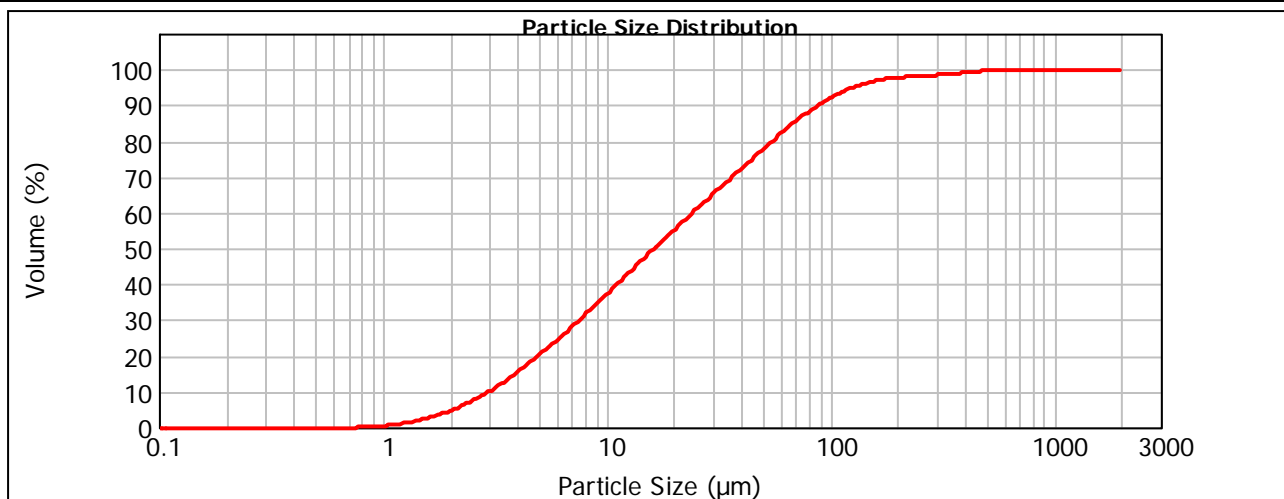
Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.771 m²/g

Surface Weighted Mean D[3,2]:
7.781 um

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
37.630 um

d(0.1): 2.974 um d(0.5): 16.310 um d(0.9): 88.388 um



— Christian og Helena Flyveaske A, Wednesday, April 20, 2016 9:53:30 AM

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.55	11.482	3.63	120.226	1.36	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.76	13.183	3.61	138.038	0.97	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.98	15.136	3.57	158.489	0.64	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.23	17.378	3.51	181.970	0.39	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.50	19.953	3.46	208.930	0.25	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	1.77	22.909	3.42	239.883	0.21	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	2.04	26.303	3.39	275.423	0.21	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	2.31	30.200	3.38	316.228	0.25	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	2.56	34.674	3.38	363.078	0.38	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	2.79	39.811	3.37	416.869	0.38	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	3.00	45.709	3.33	478.630	0.31	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	3.17	52.481	3.24	549.541	0.08	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	3.32	60.256	3.07	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	3.44	69.183	2.83	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.08	7.586	3.53	79.433	2.52	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.22	8.710	3.59	91.201	2.17	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.38	10.000	3.62	104.713	1.77	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925			

Operator notes:

Result Analysis Report

Sample Name:
Christian og Helena Flyveaske B

SOP Name:
askeTør

Measured:
Wednesday, April 20, 2016 9:56:43 AM

Sample Source & type:
Paris

Measured by:
malm

Analysed:
Wednesday, April 20, 2016 9:56:45 AM

Sample bulk lot ref:
123-ABC

Result Source:
Measurement

Particle Name:
aske

Accessory Name:
Scirocco 2000

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Enhanced

Particle RI:
1.500

Absorption:
0

Size range:
0.020 to 2000.000 μm

Obscuration:
3.00 %

Dispersant Name:

Dispersant RI:
1.000

Weighted Residual:
0.456 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0006 %Vol

Span :
4.998

Uniformity:
1.53

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.799 m^2/g

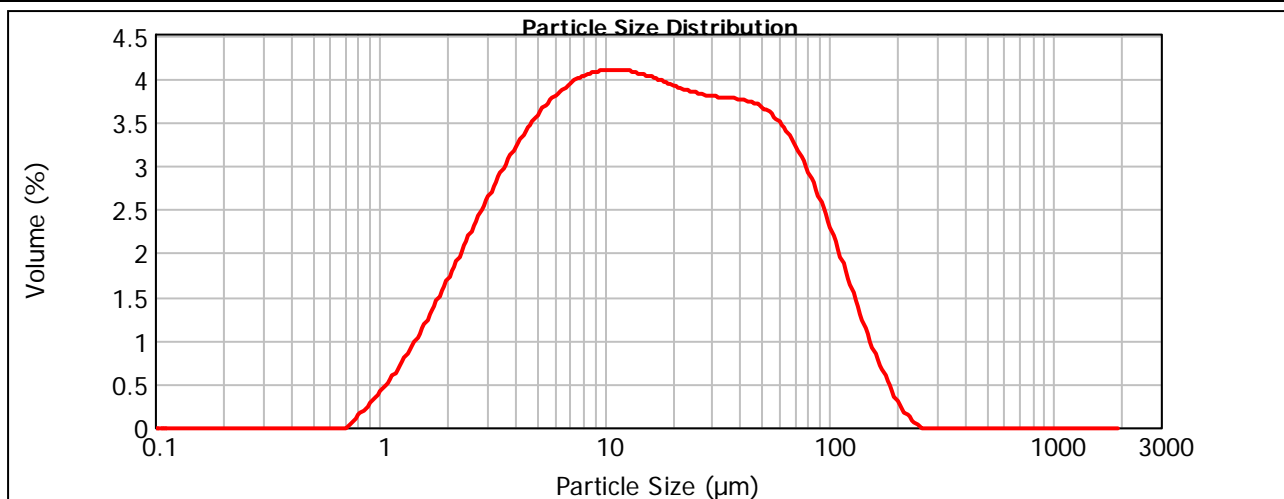
Surface Weighted Mean D[3,2]:
7.506 μm

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
29.968 μm

d(0.1): 2.898 μm

d(0.5): 15.263 μm

d(0.9): 79.183 μm



— Christian og Helena Flyveaske B, Wednesday, April 20, 2016 9:56:43 AM

Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.57	11.482	3.69	120.226	1.37	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.79	13.183	3.67	138.038	0.98	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.02	15.136	3.62	158.489	0.63	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.29	17.378	3.57	181.970	0.33	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.56	19.953	3.52	208.930	0.13	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	1.85	22.909	3.47	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	2.14	26.303	3.44	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	2.41	30.200	3.42	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	2.68	34.674	3.40	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	2.92	39.811	3.38	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	3.13	45.709	3.33	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	3.31	52.481	3.23	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	3.45	60.256	3.07	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	3.56	69.183	2.83	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.09	7.586	3.64	79.433	2.53	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.23	8.710	3.68	91.201	2.18	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.39	10.000	3.70	104.713	1.78	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925			

Operator notes:

Result Analysis Report

Sample Name:
Christian og Helena Flyveaske C

SOP Name:
askeTør

Measured:
Wednesday, April 20, 2016 9:59:21 AM

Sample Source & type:
Paris

Measured by:
malm

Analysed:
Wednesday, April 20, 2016 9:59:23 AM

Sample bulk lot ref:
123-ABC

Result Source:
Measurement

Particle Name:
aske

Accessory Name:
Scirocco 2000

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Enhanced

Particle RI:
1.500

Absorption:
0

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Obscuration:
2.79 %

Dispersant Name:

Dispersant RI:
1.000

Weighted Residual:
0.516 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0006 %Vol

Span :
4.975

Uniformity:
1.53

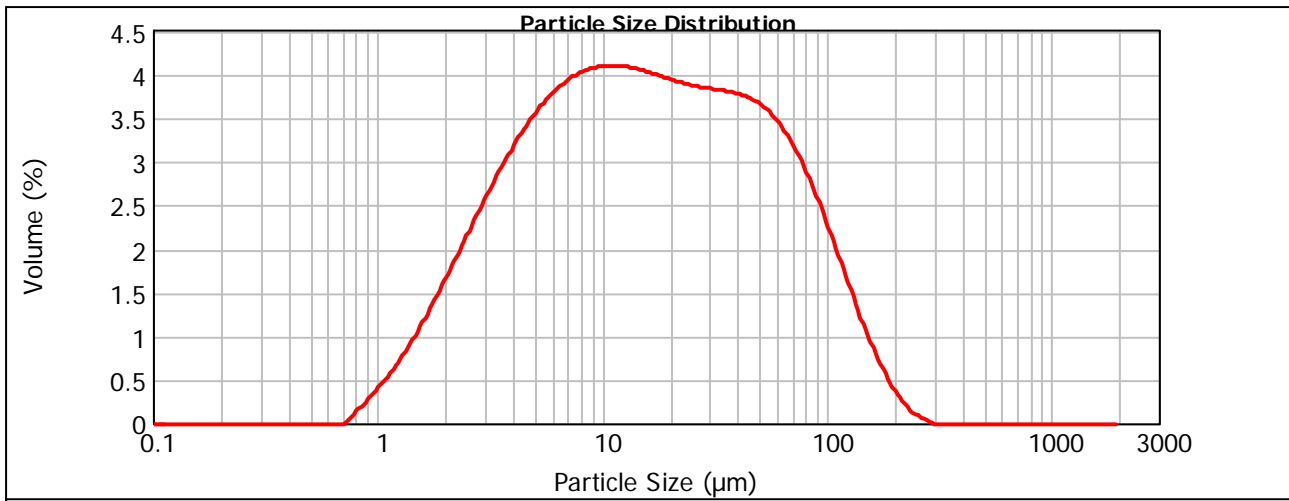
Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.793 m²/g

Surface Weighted Mean D[3,2]:
7.571 um

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
30.352 um

d(0.1): 2.928 um d(0.5): 15.415 um d(0.9): 79.621 um



— Christian og Helena Flyveaske C, Wednesday, April 20, 2016 9:59:21 AM

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.56	11.482	3.70	120.226	1.36	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.77	13.183	3.67	138.038	0.98	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.01	15.136	3.64	158.489	0.65	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.26	17.378	3.59	181.970	0.39	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.53	19.953	3.55	208.930	0.20	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	1.82	22.909	3.51	239.883	0.08	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	2.10	26.303	3.48	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	2.38	30.200	3.46	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	2.65	34.674	3.44	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	2.89	39.811	3.40	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	3.11	45.709	3.33	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	3.30	52.481	3.21	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	3.45	60.256	3.04	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	3.56	69.183	2.80	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.09	7.586	3.64	79.433	2.49	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.22	8.710	3.69	91.201	2.14	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.39	10.000	3.71	104.713	1.75	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.56	11.482	3.70	120.226	1.36	1258.925	0.00		

Operator notes:

DTU Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Technical University of Denmark

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

www.byg.dtu.dk