

Egenskaber ved beton ved samtidig, delvis erstatning af cement og sand med træaske

-Undersøgelse af træaskes indflydelse på betons trykstyrke



Kasper Larsen – s113795
Kristian N. Jensen – s113804

BEng

Department of Civil Engineering
2015

Forord

Denne opgave er udarbejdet som et afgangsprøve på diplomingeniøruddannelsen på DTU. Afgangsprøvet er på 20 ECTS point, og det er udført i perioden 1. september 2014 til 5. januar 2015 i samarbejde med BYG DTU, med Lisbeth Ottosen og Per Goltermann som vejleder.

Projektet er udført, for at undersøge hvilke egenskaber beton får, ved erstatning af sand eller cement med træaske fra Verdo kraftvarmeværk. Målgruppen er studerende samt undervisere på DTU.

Der skal rettes en stor tak til Lisbeth M. Ottosen, Per Goltermann, Ebba Cederberg Schnell, Sabrina June Hviid, Camilla Nielsen og Malene Grønvold, som i forbindelse med udarbejdelse af projektet har været en stor hjælp med vejledning, assistance og gode råd.

Projektet er udført af Kasper Larsen og Kristian Nyvang Jensen.

Danmarks Tekniske Universitet, Kongens Lyngby d. 5. januar 2015

Kasper Larsen
s113795

Kristian Nyvang Jensen
s113804

Sammenfatning

Beton er det byggemateriale, der produceres mest af i verden, nemlig omkring 33 milliarder tons per år. Derfor vil det have en enorm betydning, hvis man blot kunne erstatte en lille procentdel af det anvendte cement og/eller aggregater med affaldsprodukter, som ellers bare ville ligge i depot.

Karakteristik

Der kan i forbindelse med produktion og anvendelse af beton, opstå en række problemer, såsom korrosion af armering, frostangreb, forsinket ettringit dannelse, carbonatisering og sulfatangreb. Derfor er det vigtigt at lave forsøg, for at forebygge disse mulige problemer. Der er i forbindelse med dette projekt anvendt en træaske fra Verdo kraftvarmeværk i Randers. Udvalgte egenskaber for denne aske er blevet karakteriseret vha. en række forsøg. Af resultaterne opnået ved karakteriseringen kan det nævnes, at asken har et vandindhold på 1,80 %, hvilket der ikke blev taget hensyn til ved støbning af mørtelprøver, men derimod ved beregning af vand/cementforholdet. Herudover blev der også fundet et glødetab på 13,90 %, hvilket er for højt i forhold til kravene opstillet i DS/EN-450, som ligger på 5,00 %, 7,00 % og 9,00 % for henholdsvis kategori A, B og C. Indholdet af tungmetaller i asken er ligeledes blevet undersøgt, hvilket viste at indholdet af cadmium og nikkel overskrider grænseværdierne for anvendelseskategori 1 i bekendtgørelsen om anvendelse af restprodukter til bygge- og anlægsarbejder, og tilhører dermed kategori 2. Ydermere er indholdet af alkalier og sulfat for højt, da de ligger på henholdsvis 5,58 % og 5,75 % mens grænseværdierne er på 5,00 % og 3,00 %. Indholdet af chlorid er på 0,0004 %, for den recept med størst mængde aske, og overholder dermed chloridindholdsklasse 0.1. Asken kan for denne parameter bruges til al slags armering.

Bearbejdning af aske

Asken er blevet bearbejdet på forskellige måder, med henblik på at se indvirkningen på egenskaberne for disse forskellige asketyper. Asken er blevet knust i ringknuser, blevet brændt i muffelovn, samt en kombination af både brænding og knusning. I forlængelse af dette er der lavet en SEM-undersøgelse samt målinger af kornstørrelser for alle benyttede asketyper. Dette har vist at knusning samt afbrænding resulterer i en mere homogen aske, dog med en tendens til at lægge sig sammen i klumper.

Resultater for bearbejdede asker

Det blev ved knusning af asken, undersøgt om dette havde en indvirkning på trykstyrken af en mørtelprøve tilsat knust aske, sammenlignet med tilsvarende tilsat ubehandlet aske. Det forventes at en finere kornstørrelse vil føre til en bedre pakning, som vil give en højere styrke. For disse prøver viste det sig, at det ikke havde nogen positiv indvirkning på trykstyrkerne. Der blev lavet kornkurver for asken - både før og efter knusning, hvilket viste at knusningen havde en meget lille effekt på kornstørrelserne, da disse allerede inden knusning var meget fine.

Da asken fra Verdo havde et højt glødetab, blev indflydelsen af et sådant glødetab undersøgt. Dette foregik ved at afbrænde asken ved 550°C i muffelov, for derefter at lave mørtelprøver med den afbrændte aske. Der blev lavet to forskellige afbrændinger af aske, hvor asken mistede 8,86 % og 11,21% organisk materiale (procent i forhold til total masse af asken). Ved trykprøvning af mørtelprøverne med brændt aske tilsat, viste det sig, at trykstyrken generelt var svagere end for de mørtelprøver med ubehandlet aske tilsat. Der var for disse prøver kun en lille reducere eller endda en øgning af styrken for prøverne med 10 % cementerstatning i forhold til 5 % cementerstatning.

Der blev ligeledes bearbejdet en aske ved først at brænde den, for derefter at knuse den i ringknuser. Mørtelprøverne med denne type aske viste sig at have den laveste trykstyrke af alle mørtelprøverne. Da asken har en tendens til at klumpe sammen pga. den fine kornstørrelse, tænkes dette at være årsagen til den lavere styrke.

For at undersøge om asken har puzzolansk effekt, omskrives bolomeys formel til $\left(\frac{f_c}{K} + \alpha\right) \cdot v - c = k \cdot p$, hvor venstre side af lighedstegnet plottes langs y-aksen og mængden af aske tilføjet plottes langs x-aksen. Herefter laves der en lineær regression mellem punkterne, hvor hældningen af denne linje svarer til aktivitetsfaktoren, k . Aktivitetsfaktoren ligger på 0,50 for kulflyveaske og 2,00 for microsilica. De højeste værdier for aktivitetsfaktoren blev fundet for den brændte aske, hvor den for de fire forskellige målinger lå mellem 1,08 og 1,92. Ud fra dette kan det konkluderes at asken fra Verdo har en puzzolansk effekt, hvis det organiske indhold reduceres. Der er dog højst sandsynligt tale om en lille puzzolansk effekt, da alle prøverne med iblandet aske har en trykstyrke, der er lavere end referenceprøvernes trykstyrke.

Abstract

Concrete is the most commonly used construction material in the world, at about 33 billion tons per year. Therefore, it will have a tremendous impact if only a small percentage of the cement and/or aggregates used could be replaced with waste products that would otherwise not be used.

Characteristic

The production and use of concrete, can cause a number of problems such as corrosion of the reinforcement, frost attack, delayed ettringite formation, carbonation and sulfate attack. Therefore it is important to make experiments, to prevent these kinds of problems. In connection with this project a wood ash from Verdo power plant in Randers has been used. Selected properties of this ash have been characterized using a series of tests. From the results obtained by the characterization of the ash it should be mentioned that the ash has a water content of 1.80%, which were not taken into account when casting mortar tests, but it was included in the calculation of the water/cement ratio. In addition, there was also found a loss on ignition of 13.90%, which is too high in relation to the requirements set by the DS/EN-450, which is 5.00%, 7.00% and 9.00% for category A , B and C. The content of heavy metals in the ash have also been examined, which showed that the content of cadmium and nickel exceed the limit values for category 1 of the " bekendtgørelsen om anvendelse af restprodukter til bygge- og anlægsarbejder" and therefore belongs to category 2. Furthermore, the content of alkalis and sulphate is too high, as they are respectively 5.58% and 5.75% while the limit is 5.00% and 3.00%. Chloride content is 0.0004% in the prescription with the highest ash content, and thus comply with chloride content class 0.1. The ashes can for this parameter be used for all kinds of reinforcement.

Treatment of the ash

The ash has been treated in various ways, in order to see the effect on these different treated ashes' abilities. The ashes have been milled in a ring crusher, been burned in a muffle furnace and a combination of both treatments. Further to this, a SEM-examination and measurements of particle sizes for all used ash types has been made. It has been found that crushing, and burning results in a more homogeneous ash, but with a tendency to clump together.

Results of the treated ashes

It was by crushing the ashes, examined whether this had an impact on the compressive strength of mortar samples added with crushed ash compared with similar mortar samples added untreated ash. It is expected that a finer grain size will lead to a better packing that will give a higher strength. For these samples, it was found that it had no positive effect on the compressive strengths. Grading curves were made for ashes - both before and after crushing, which showed that the crushing had a very small effect on grain sizes, which already before crushing was very fine.

Since the ash from Verdo had a high loss on ignition, the influence of such a loss on ignition was studied. This was carried out by burning the ash at 550°C in a muffle furnace, and then to make mortar samples with the burned ash. There were made two different burnings of ash, wherein the ash lost 8.86% and 11.21% organic matter (percent of total ash weight). When pressure testing mortar samples with burnt ash added, it was found that the strength was weaker than the mortar samples with untreated ash added. It was for these samples, only a small reduction or even an increase of the strength for the samples with 10% cement replacement, compared to 5% cement replacement.

There were also processed an ash by first burning it, then mill it in the ring crusher. Mortar tests of this type of ash was found to have the lowest compressive strength of all the samples of mortar. Since the ash tends to clump together due to the fine grain size, it is suspected that this is the reason for the lower strength.

To examine if the ash has a pozzolanic effect, bolomeys formula was re-written to $\left(\frac{f_c}{K} + \alpha\right) \cdot v - c = k \cdot p$, where the left side of the equation is plotted along the y-axis and the amount of ash added is plotted along the x-axis. Then a linear regression between the points were made, where the slope of this line corresponds to the activity factor, k. The activity factor is 0.50 for coal fly ash and 2.00 for microsilica. The highest values for the activity factor was found for the burnt ashes where the four different measurements ranged between 1.08 and 1.92. From this it can be concluded that the ash from Verdo has a pozzolanic effect, provided that the organic content is reduced. However, this is most likely a small pozzolanic effect because all the samples

of mixed ash has a compressive strength which is lower than the compressive strength of the reference samples.

Indholdsfortegnelse

1	Indroduktion	10
2	Teori	11
2.1	Beton	11
2.1.1	Sammensætning af beton	12
2.1.1.1	Tilslag	12
2.1.1.2	Cement	13
2.1.1.3	Kulflyveaske og mikrosilica	14
2.1.1.4	Blanding af beton	15
2.1.2	Styrke	15
2.1.2.1	Trykstyrke	16
2.1.2.2	Trækstyrke	18
2.2	Karakteristik af træaske	20
2.2.1	pH-værdi	20
2.2.2	Ledningsevne	20
2.2.3	Glødetab	20
2.2.4	Oplukning af aske	21
2.2.5	Vandindhold	21
2.2.6	Vandopløselighed + Vandopløselige anioner	22
2.2.7	Porøsitet & Densitet	22
2.2.8	Kapillarsugning	23
3.1	Metoder til karakteristik af aske	25
3.1.1	pH-værdi	25
3.1.2	Ledningsevne	25
3.1.3	Glødetab	25
3.1.4	Kornstørrelse	25
3.1.5	Oplukning af aske	25
3.1.6	Vandindhold	25
3.1.7	Vandopløselighed	26
3.1.8	Vandopløselige anioner	26
3.1.9	Askens hærdeegenskaber	26
3.1.10	SEM	26
3.2	Støbning af mørtelprismer	26
3.2.1	Knusning af aske	28
3.2.2	Brænding af aske	28
3.2.3	Tryk- og trækøjestykke af mørtelprisme	28
3.2.4	Porøsitet, densitet og kapillarsugning	28
4	Eksperimentelle arbejde	29
4.1	Karakteristik af asken	29
4.2	SEM og Kornkurver	34
4.3	Mørtelprøver	38
4.3.1	Indledende mørtelprøver	38
4.3.2	- 6, 7, 8 og 9% cementerstatning	40

4.3.3 Brændt, knust og brændt&knust aske	44
4.4 Porevolumen og kapillarsugning.....	48
4.4.1 Porevolumen	48
4.4.2 Kapillarsugning	49
4.5 Sammenligning med teoretisk styrke samt undersøgelse af aktivitetsfaktor	51
4.6 Videre forskning	56
4.6.1 Indledende laboratorieforsøg.....	56
4.6.2 Kornkurver	56
4.6.3 Trykstyrkeforsøg	56
5 Konklusion	57
6 Referenceliste	58
7 Figuroversigt	59
8 Tabeloversigt.....	60
9 Bilag.....	61

1 Introduktion

I takt med at forbruget stiger, bliver ressourcerne færre og affaldsmængderne vokser sig større og dyre at komme af med. Det ønskes derfor at finde en måde, hvorpå nogle af disse affaldsprodukter kan genbruges og derved spare på ressourcerne. Et af de affaldsprodukter er aske fra forbrændinger på kræftværker. Det skal undersøges om hvorvidt dette restprodukt er velegnet som råmateriale i beton. Ved at erstatte noget af cementen i beton, er det muligt at nedsætte de CO₂ mængder, som hvert år føres ud i atmosfæren, pga. cementproduktionen. Der er desuden også en økonomisk gevinst at hente, ved at benytte affaldsprodukter som alternativ aske i beton, da der kan spares mange penge på deponering og transport, samt tjenes penge på at sælge det til byggeindustrien.

Den benyttede aske i dette projekt kommer fra Verdo's kraftvarmeværk i Randers, der udelukkende fyrer med biobrændsel. Dette karakteriserer derfor asken som værende en bioaske/træaske. Asken har ikke været igennem nogen form for bearbejdning forud for projektet. For at undersøge om hvorvidt denne aske kan være med til at forbedre betonen, enten ved at øge trykstyrken eller som erstatningsprodukt for fx cement, foretages en karakteristik af asken. Resultaterne for denne karakteristik holdes op mod forskellige standarder for anvendelse af aske i beton, hvor det på baggrund af dette, kan bestemmes om den er velegnet eller ej. Karakteristikken er udført i samarbejde med 5 andre grupper, bestående af studerende fra DTU, som hver i sær har haft en bestemt aske. Undersøgelserne er desuden lavet i samarbejde med DTU BYG instituttet.

Der vil igennem projektet blive lagt vægt på forskellige laboratorieforsøg, såsom blandt andet bestemmelse af pH, ionindhold og glødetab. Endvidere vil der blive støbt mørtelprøver med forskellige asketyper og mængder, som erstatning for henholdsvis cement og sand. Trykstyrken for disse forskellige mørtelprøver, sammenlignes med referenceprøver, der er støbt med Aalborg basis cement. Alle mørtelprøverne er støbt ud fra recepten opgivet i DS/EN 196-1. Trykstyrkerne er blevet målt efter henholdsvis 7, 14 og 28 hærdedøgn, så styrkeforløbet for 28 døgn kan illustreres. Mørtelprøverne er støbt med henholdsvis ubehandlet aske, knust aske, brændt aske og en kombination af brændt og knust. Bearbejdningen af asken er blevet udført, for at finde ud af hvorvidt det var muligt at optimere asken egenskaber til brug i beton.

2 Teori

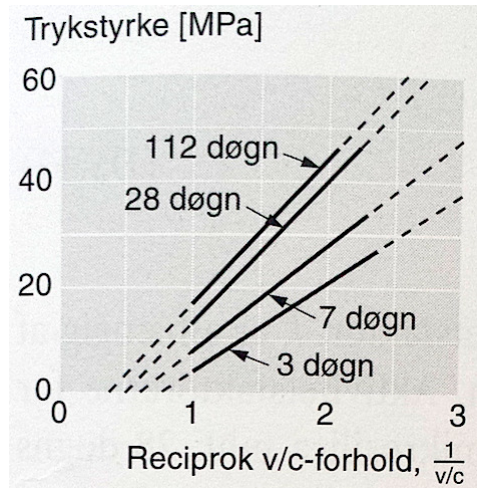
2.1 Beton

Beton er et byggemateriale, som består af cement, sand, sten og vand. Cement er et pulverformigt materiale, der blandet med vand reagerer kemisk med en del af vandet (hydratiserer), og derved danner en hård masse, der holder sammen på grus og sten. Det er med tiden blevet opdaget at tilsætning af puzzolaner, såsom flyveaske og mikrosilica, kan optimere betonens egenskaber. Disse puzzolaner bruges som erstatning for dele af cementen og har desuden pga. deres lille partikelstørrelse den effekt, at de er med til at gøre betonen tættere, idet materialet kan pakkes tættere. Tætheden af betonen kaldes pakningsgraden og afhænger af hvilken type tilslag, der benyttes i betonblandingen. Pakningsgraden er et udtryk for hvor meget luft betonblandingen indeholder. Jo højere pakningsgrad, jo mindre luftindhold.

Under hydratiseringen bindes, som tidligere nævnt, en del af vandet kemisk til cementen, flyveasken og mikrosilicaen. Da det samlede produkt af hydratiseringen fylder mindre end i "våd" tilstand, vil der altid forekomme hulrum i den hærdede cementpasta. I disse hulrum findes dels gelvand og dels kapillarvand. Kapillarvandet er frit vand, der let kan fordampe og som med tiden danner ligevægt med omgivelserne, hvorimod gelvandet har svært ved at fordampe, da dette er bundet af de svage tiltrækningskræfter mellem molekyler (van der Waals-kræfter).

Det kemisk bundne vand og gelvandet udgør ca. 40% af cementvægten, hvilket resulterer i at det teoretisk optimale vand/cementforhold (v/c-forhold) er på 0,4. Eftersom at hydratiseringen aldrig er fuldstændig, anvendes i praksis et v/c-forhold på under 0,4. Iblendes der f.eks. flyveaske i betonblandingen omtales v/c-forhold i stedet vand-/pulverforhold (v/p-forhold).

Det er især v/c-forholdet (v/p-forhold), der er afgørende for betonens styrke. Et højt v/c-forhold resulterer i en lav styrke. Dette skyldes at det overskydende vand vil fordampe under hærningen og efterlade luftporer. Dog må det heller ikke blive for lavt, da dette kan påvirke den kemiske reaktion mellem vand og cement, og forringe hærdeprocessen. Forholdet mellem v/c-forhold og styrke, kan ses på figur 1, som tager udgangspunkt i styrkeberegning ud fra Bolomeys formel. Denne empiriske model vil blive omtalt i afsnittet "2.1.2 Styrke".



Figur 1 - Beton styrke på baggrund af v/c-forhold (Bolomeys formel) ¹

Beton er karakteriseret ved at være formbart under støbningen, have en høj trykstyrke/lav trækstyrke efter hærdning og en god vejrbestandighed. Da betons trækstyrke typisk er 1/10 af trykstyrken, kan betonen kombineres med armeringsjern, for derved at øge denne betydeligt. Denne egenskab udnyttes til at støbe bjælker af beton, som derved kan optage trækkræfterne i konstruktionen. Da beton og armering har en varmeudvidelseskoefficient meget lig hinandens, arbejder disse to materialer godt sammen, hvilket er en fordel ved støbningen. Endvidere formår sund beton at beskytte armeringen mod rustangreb, idet beton er basisk med en pH på typisk 12-14.

2.1.1 Sammensætning af beton

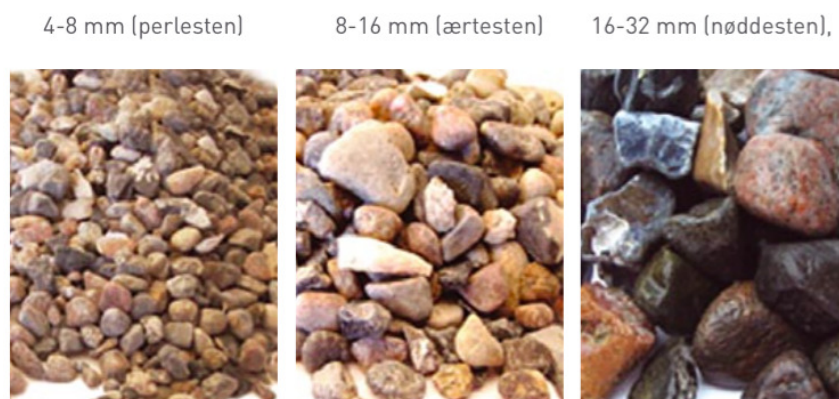
Som nævnt tidligere er cement, vand, tilslag og evt. bindemidler som flyveaske og mikrosilica, bestanddelene i beton. Disse vil i det følgende blive beskrevet.

2.1.1.1 Tilslag

Tilslagsmaterialer kategoriseres ofte på baggrund af, hvor de stammer fra. Dette kan være fra en grusgrav (bakkematerialer), fra havet (sømaterialer) eller fra knuste klipper (ofte granitskærver). Kvaliteten af tilslagsmaterialet afhænger af geografi, men sædvanligvis er søsten af bedre kvalitet end bakkesten. Det er dog i sidste ende kategorisering af tilslaget i forhold til miljøklasserne Passiv, Moderat, Aggressiv og Ekstra aggressiv, der bestemmer kvaliteten af tilslaget.

¹ Figur fra: Bygningsingeniørernes materialer – uddrag af materialebogen Kap. 5.

Udover den grove inddeling af tilslagsmaterialet, er der også en finere inddeling. Fint tilslag er sand eller grus med en kornstørrelse under 4 mm, groft tilslag er sten med en kornstørrelse over 4 mm. Materiale under 1/4 mm betegnes som filler. Sten indeles yderligere i tre fraktioner, som det fremgår af figur 2:



Figur 2 - De tre fraktioner som sten indeles i, ved brug som tilslag ²

Sammensætningen af tilslag sker ofte på baggrund af erfaringsmæssige kornkurver for det samlede tilslag, eftersom at dette har stor betydning for betonens pakningsgrad. Et blandet tilslag bestående af afrundede korn, kan pakkes bedre end et ensformigt tilslag med kantede korn. Dette er en af grundene til, at sømaterialer foretrækkes frem for bakke- og klippematerialer.

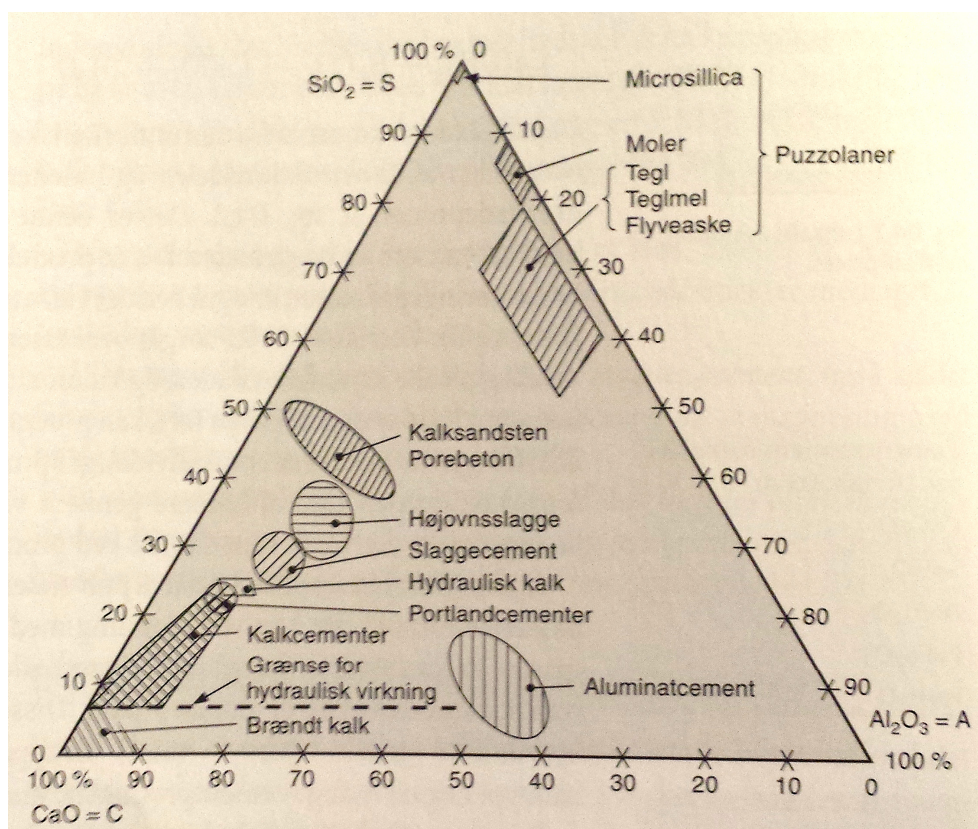
Grundet fare for frostskeer og alkalikiselreaktioner, bør porøst flint undgås i alle miljøklasser. Alkalikiselreaktion er en betegnelse for de ekspansive reaktioner, der kan forekomme mellem alkalier (natrium og kalium) og reaktivt kisel i tilslaget. Den reaktive kisel (f.eks. porøst flint) vil blive opløst i det stærkt basiske miljø i betonen og reagere med alkalierne, hvorved der vil dannes en gel. Denne gel kan afhængigt af forholdene udvide sig og danne et indre tryk i betonen, som med tiden ødelægger både tilslaget og cementpastaen. For at alkalikiselreaktionen kan finde sted, kræver det at der er vand tilstede og at der sker en transport af dette frem til de reaktive partikler.

2.1.1.2 Cement

Cement kaldes for et uorganisk bindemiddel. Uorganiske bindemidler er stoffer, som hovedsageligt består af oxider af calcium, silicium eller aluminium. De mest kendte er kalk, cement og gips. På figur 3 kan ses fordelingen af oxider af calcium, silicium og aluminium alt efter hvilket

² Aalborg Portland 2012 – *Cement og beton* – Beton afsnit

stof, der tales om. Portlandcementer har en inddeling, der er ca.: 70% Calciumoxid (CaO), 20% siliciumdioxid (SiO_2) og 10% aluminiumoxid (Al_2O_3).



Figur 3 - Uorganiske bindemidlers placering efter kemisk sammensætning³

Portlandcement er et hydraulisk bindemiddel, hvilket vil sige at det mister sin formbarhed (afbinder) og hærder ved tilstedeværelse af vand. Processen kan foregå under vand uden tilstedeværelse af luft, og restprodukterne er stabile i vand.

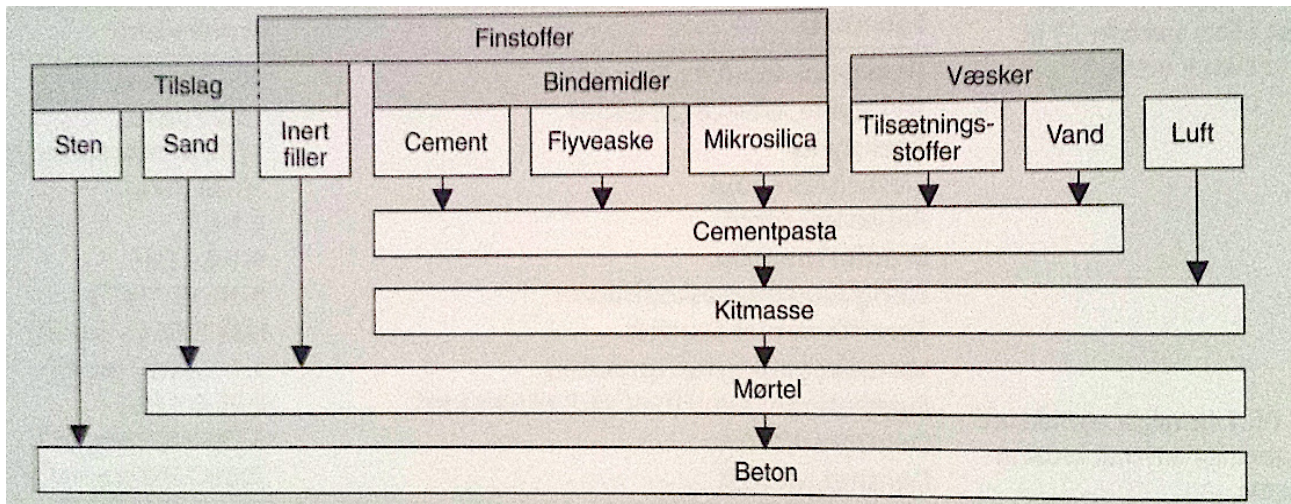
2.1.1.3 Kulflyveaske og mikrosilica

Disse materialer kaldes, som tidligere nævnt, for puzzolaner. Dette skyldes at de har puzzolanegenskaber, hvilket indebærer at de reagerer med calciumhydroxiden ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), der optræder i det basiske miljø i betonen, og derved bidrager til øget tæthed og styrke. Cement er derfor en forudsætning for at puzzolanerne kan reagere, eftersom at calciumhydroxiden dannes ved blanding af cement og vand. Puzzolaner er ikke bindemidler i sig selv, men er som nævnt i stand til at reagere med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og danne produkter, der minder om cementens reaktionsprodukter. Endvidere har puzzolanerne også en positiv indvirkning på det omtalte problem med alkaliselreaktioner, da de reagerer med alkalierne og binder dem i reaktionsprodukterne.

³ Figur fra: Bygningsingeniørernes materialer – uddrag af materialebogen Kap. 4

2.1.1.4 Blanding af beton

Blanding af beton kan beskrives ud fra forskellige stadier. Disse stadier er opdelt på flere niveauer, som det fremgår af figur 4⁴.



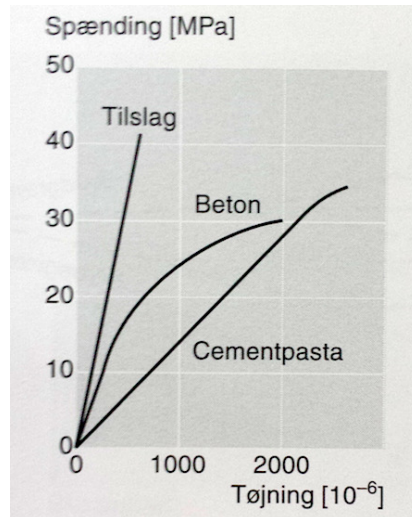
Figur 4 - Delmaterialer og faser i beton ⁴

Cementpastaen dannes ved reaktion mellem vand og mineralske bindemidler, hvoraf hovedparten består af portlandcement. De fleste betoner indeholder også tilsætningsstoffer, for at forbedre betonens egenskaber i frisk, hærdende eller hærdet tilstand. "Kitmasse" er en betegnelse for cementpasta og luft tilsammen, som bruges i sammenhæng med vurdering af betons frostbestandighed. Kitmasse, inert filler og sand danner mørtel. Mørtel og sten danner beton.

2.1.2 Styrke

Som tidligere nævnt har v/c-forholdet stor indvirkning på styrken af betonen, men den primære faktor er cementpastaens styrke. Som for andre materialer falder styrken som funktion af stigende porøsitet. Det er her v/c-forholdet og hydratiseringsgraden kommer ind i billedet. Endvidere afhænger styrken af cementtypen, cementmængden og tilslagets art. Der er dog forskel på arbejdskurverne (forholdet mellem spænding og tøjning) for de forskellige materialer, hvilket fremgår af figur 5. Arbejdskurven for beton er, foruden selve betonen, afhængig af prøvens størrelse, form, fugtindhold osv.

⁴ Figur fra: Bygningsingeniørernes materialer – uddrag af materialebogen Kap. 5.



Figur 5 - Arbejdskurver for tryk for henholdsvis tilslag, beton og cementpasta ⁵

Ved en lav spænding er spænding-tøjningsforholdet konstant for henholdsvis tilslag, beton og cementpasta. Kigges der på arbejdskurven for beton, begynder denne at krumme efter en spænding på ca. 25% af brudstyrken. Dette skyldes, at der dannes små revner i grænsefladen mellem tilslaget og cementpastaen, pga. forskel i elasticitetsmodul. Når en spænding på ca. 50% af brudstyrken nås, begynder cementpastaen at revne, hvilket resulterer i en yderligere reduktion af spændings-tøjningsforholdet. Efter ca. 75% vil disse revner være ustabile og efterfølgende konstant belastning vil føre til brud. Bruddet sker ved, at materialet begynder at smuldre som følge af at blive trykket sammen, hvilket medfører at strukturen af betonen ikke længere har nogen bæreevne. Da dette brud er en følge af hele belastningsforløbet, kan det i praksis blive opdaget inden konstruktionen falder sammen.

2.1.2.1 Trykstyrke

Styrken af betonen kan findes ud fra forskellige empiriske modeller, og i følgende afsnit bruges Bolomeys formel. Bolomeys formel bruges når en teoretisk styrke af prøvelegement skal beregnes. I praksis kan trykstyrken beregnes ved at belaste prøvelegemet til brud, for derefter at dividere denne last med tværsnitsarealet. Denne formel er som følgende, hvor trykstyrke er spænding angivet i enheden megapascal.

⁵ Figur fra: Bygningsingeniørernes materialer – uddrag af materialebogen Kap. 5.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Hvor:

$\sigma = \text{Spænding [MPa]}$

$F = \text{Kraft [N]}$

$A = \text{Prøvelegements tværsnitsareal [mm}^2\text{]}$

For at finde trykstyrken ud fra formel 1, kræves det at der støbes et prøvelegeme først for derefter at ødelægge det. Ønskes det derimod at dimensionere prøvelegemet inden støbningen kan Bolomeys formel med fordel bruges, da denne tager højde for v/c-forholdet. Styrken af beton med $0,45 < v/c < 1,25$ og et luftindhold på 1,5-2% kan ud fra erfaring beskrives vha.:

$$f_c = K \cdot \left(\frac{1}{v/c} - \alpha \right) \quad (2)$$

Hvor:

K = Er en standard værdi for styrken af beton med danske cementer, almindeligt dansk tilslag og hærdet ved 20 grader i 28 døgn [MPa]

$\alpha = 0,5$ (typisk)

K er altså erfaringstal som er defineret i forhold til hvilken type cement, der benyttes til støbningen. Disse værdier kan aflæses i tabel 1 for Aalborg Portland cement.

Tabel 1 - Typisk værdier for K i Bolomeys formel på baggrund af danske cementer⁶

Cementtyper	Termin døgn	K	α
BASIS CEMENT	1	17	0,9
	7	26	0,6
	28	30	0,5
RAPID CEMENT	1	13	0,9
	7	24	0,6
	28	30	0,5
LAVALKALI SULFATBESTANDIG CEMENT	1	5	0,8
	7	19	0,8
	28	29	0,7
AALBORG WHITE	1	14	1,0
	7	28	0,8
	28	35	0,7
BASIS AALBORG CEMENT	1	13	1,0
	7	24	0,7
	28	29	0,6

⁶ Aalborg Portland 2012 – *Cement og beton* – Beton afsnit

Ved tilføjelse af ekstra bindemidler (f.eks. puzzolaner) i betonblandingen, ses der som tidligere nævnt på vand/pulver-forholdet. Dette medfører en omskrivning af Bolomeys formel, hvori der ikke er indblandet ekstra luft:

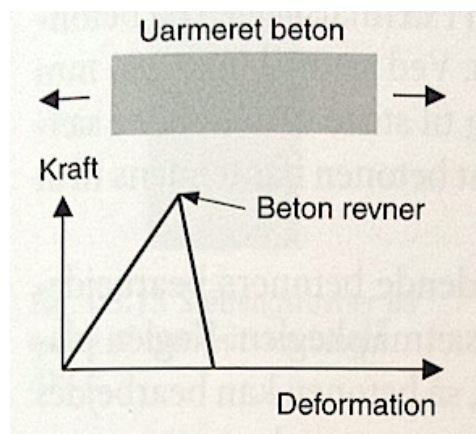
$$f_c = K \cdot \left(\frac{1}{\frac{c+k \cdot P}{v}} - 0,5 \right) \quad (3)$$

Hvor k er en aktivitetsfaktor, der er afhængig af tiden samt typen og mængden af bindemidlet. Denne ligger f.eks. for flyveaske og mikrosilica på henholdsvis 0,3-0,5 og 3-5. P er mængden af bindemidlet.

2.1.2.2 Trækstyrke

Da trækstyrken for denne opgave ikke er lige så relevant som trykstyrken, vil formler ikke blive nævnt.

Beton har endvidere en trækstyrke, som ud fra en tommelfingerregel er ca. 1/10 af trykstyrken. Ved brud forårsaget af træk, ser arbejdskurven en del anderledes ud end for tryk. Selve bruddet er også forskelligt i forhold til tryk. Når bruddet sker som følge af trækkræfter, kommer det tit meget pludseligt, hvor betonelementet knækker midtover. Dette kan ses på figur 6:

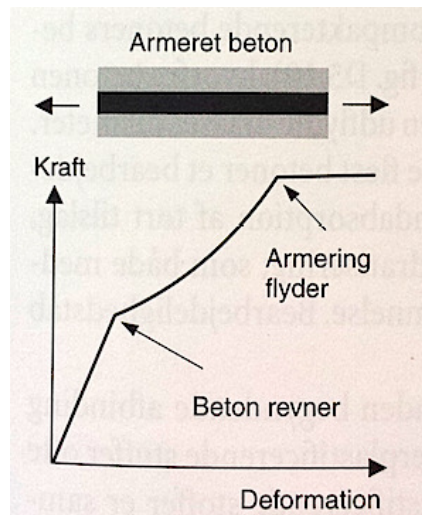


Figur 6 - Arbejdskurve for trækstyrke – Beton ⁷

Da der ved tryk kan ses synlige revner ved en spænding på ca. 50% af brudstyrken, går der ved træk ikke længe fra at betonen begynder at revne, til den har mistet al bæreevne (knækker). Dette er altså en brudform, der er meget svær at modarbejde, efter de første tegn er indtrådt.

⁷ Figur fra: Bygningsingeniørernes materialer – uddrag af materialebogen Kap. 5.

Det er her armering af beton kommer ind i billedet. Det er dog ikke relevant for dette projekt, men for at give et indblik i hvad armeringen gør for trækstyrken, er på figur 7 vist arbejdskurven for armeret beton:



Figur 7 - Arbejdskurve for trækstyrken - Armeret beton ⁸

⁸ Figur fra: Bygningsingeniørernes materialer – uddrag af materialebogen Kap. 5.

2.2 Karakteristik af træaske

Den benyttede aske kommer fra Verdo's kraftvarmeværk i Randers, der udelukkende fyrer med biobrændsel. Dette gør at asken kan karakteriseres som værende en træaske.

Asken er udtaget ved skorstenen ved røgrensningen. Den er fremkommet af asken ved afbrænding af træ (ca. 90 %), Nøddeskaller, korn afharpninger mv. (10 %). Asken er efter forbrænding tilsat vand.

Dette kapitel beskriver teorien tilhørende de forskellige metoder, der er valgt til at karakterisere asken. Næste kapitel (3. Metode) er metodebeskrivelsen.

2.2.1 pH-værdi

Når der arbejdes med beton er det vigtigt at have en høj pH-værdi (basisk), for at undgå korrosion af armeringen, og derved forlænge betonens levetid. Det er derfor af interesse, at asken, der benyttes, ligeledes er meget basisk. pH-værdien for cement ligger typisk i intervallet 12-14.

2.2.2 Ledningsevne

Der kan skabes et indtryk af ionkoncentrationen i en askeprøve, ved at måle ledningsevnen. Ledningsevne fortæller, hvor godt elektrisk strøm kan ledes gennem en væske. Strømmen ledes ved hjælp af ledende partikler, også kaldet ioner (saltioner), så jo flere ioner, jo højere ledningsevne. Ved at blande askeprøven med demineraliseret vand, kan der efter bundfældning af aske, måles indholdet af ioner i den overliggende vandfase.

Elektrisk ledningsevne måles i enheden Siemens, som af det benyttede måleinstrument angives i mS/cm – millisekund/centimeter.

2.2.3 Glødetab

Når en jord eller sedimentprøve opvarmes til glødning, vil indholdet af organiske stoffer forbrændes. Dette betyder at vægttabet af prøven efter glødning er et godt udgangspunkt for indholdet af organiske stoffer.

I en aske med høj koncentration af tungmetaller, vil tungmetallerne i højere grad reagere med det organiske materiale og binde sig hertil.

Glødetabet angives i procent af tørstofindholdet:

$$Glødetab, \% = \frac{m_{aske}(før) - m_{aske}(efter)}{m_{aske}(før)} \cdot 100\% \quad (4)$$

Jævnfør DS/EN 450-1 må glødetabet for aske ikke overstige følgende:

Kategori A – 5%

Kategori B – 7%

Kategori C – 9%

Det organiske materiale i asken, vil på længere sigt, ligge og rådne i betonen. Dette vil føre til hulrumdannelse, som svækker betonens styrke. Derfor er det i Danmark i henhold til DS/EN 450-1 kun tilladt, at benytte flyveaske med et glødetab på max 5% til støbning af beton.

2.2.4 Oplukning af aske

Oplukningsmetoden bruges til at give en god indikation af metalkoncentrationen i en askeprøve. Oplukningen foregår ud fra DS 259, som er en standard til bestemmelse af syreopløselige metaller i jord. Eftersom at der skal en fuldstændig destruktion af asken til at finde total koncentrationen for det pågældende materiale, giver denne standard snarere et fastlagt niveau for metalkoncentrationen.

2.2.5 Vandindhold

Det er vigtigt at måle vandindholdet i asken, da dette kan øge det samlede vand-cement forhold i betonen, hvilket vil nedsætte styrken. Hvis asken har et højt vandindhold skal den enten tørres, ellers må man regulere blandeopskriften, for at få det ønskede v/c-forhold. Fordampningen foregår ved en temperatur lidt over vands kogepunkt, 105 grader, for at fjerne det fysisk bundne vand i asken.

Askens vandindhold kan efter et døgn's tørring, beregnes ud fra formel 5:

$$Vandindhold, \% = \frac{m_{aske}(før) - m_{aske}(efter)}{m_{aske}(før)} \cdot 100\% \quad (5)$$

2.2.6 Vandopløselighed + Vandopløselige anioner

Det er nødvendigt at teste vandopløseligheden ved at udvaske asken, da man herved måler hvor stor en mængde ioner, der er vandopløselige. Det er især salte, der er vandopløselige. En lav vandopløselighed ønskes, da det medfører et mere homogent materiale, fordi der herved er en mindre mængde stoffer, der kan reagere med betonen.

I forlængelse af vandopløselighed kigges der også på vandopløselige anioner, som især kan være salte. Det er vigtigt at vide indholdet af disse, eftersom at en højere koncentration af salt (chlorid) i betonen, fører til en større korrosionsmængde af armeringsstålet. Derfor kan mængden af salt have betydning for, om hvorvidt aske kan anvendes i armeret beton.

2.2.7 Porøsitet & Densitet

Porøsiteten af beton har indflydelse på dens styrke, eftersom at porøsitet fortæller hvor meget af materialet, der er lufthuller. Sagt med andre ord, er porøsiteten af et materiale, forholdet mellem porevolumen og materialets ydre volumen. I beton afhænger poremængden og porestørrelsen dels af vand/cement forholdet og dels af pakningsgraden. Tages der udgangspunkt i v/c-forholdet, så medfører et lavt v/c-forhold lavere porøsitet og derved højere styrke.

I de fleste porøse materialer er poresystemet åbent, og derfor betegnes den åbne porøsitet som den totale porøsitet:

$$p = p_a = \frac{V_a}{V} = \frac{\frac{m_{ov} - m_0}{\rho_w}}{\frac{m_{ov} - m_u}{\rho_w}} = \frac{m_{ov} - m_0}{m_{ov} - m_u} \quad (6)$$

hvor

V_a = De åbne porers volumen [m^3]

V = Prøvelegemets volumen [m^3]

m_{ov} = Prøvelegemets masse i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand [kg]

m_0 = prøvelegemets masse efter ovntørring ved 105 grader celsius [kg]

m_u = Prøvelegemets masse under vand [kg]

ρ_w = Vands densitet [kg/m^3] (Er 998 kg/m^3 ved 20 grader celsius)

Kendes ovenstående værdier, kan prøvens densitet udregnes. Der kigges her på tørdensiteten af materialet og densiteten af prøvelegemet i vandmættet, overfladetør tilstand.

$$\rho_d = \frac{m_0}{V} \quad (7)$$

$$\rho_{ssd} = \frac{m_{ov}}{V} \quad (8)$$

hvor ρ_d er tørdensiteten [kg/m^3] og ρ_{ssd} er densiteten i vacuumvandmætte, overfladetør tilstand [kg/m^3].

2.2.8 Kapillarsugning

Kapillarsugning er et udtryk for materialets evne til at transportere vand fra overfladen og ind i materialet. Dette sker ved hjælp af de såkaldte kapillarporer. For disse gælder, at små diametre på porerne, gør at opsugningen af vandet sker langsommere, men at det derimod kan nå længere ind i materialet. Overfladespændingerne er samtidig afgørende for vandtransporten i porer med små diametre, idet den resulterer i en opadrettet kraft, der er større end tyngdekraften, større end friktionen med rørvæggen og derved trækker vandet op. Grundet overfladespændingerne dannes der et hydrostatisk undertryk under menisken, som kan regnes således:

$$P_h = -\frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{r} \quad (9)$$

Hvor P_h er det hydrostatiske undertryk [Pa], σ er overfladespændingen [N/m], θ er kontaktvinklen [grader] og r er radius i menisken [m].

Det ses ud fra formlen, at en for stor poreradius vil resultere i manglende kapillartransport, idet det hydrostatiske undertryk ikke vil være tilstrækkelig stort.

For at finde kapillartallet for et materiale, skal den opsugede masse pr. areal bestemmes. Dette betegnes Q og kan regnes således:

$$Q = \frac{m_t - m_0}{A} \quad (10)$$

Hvor Q er den opsugede masse pr. opsugningsareal [kg/m^2], m_t er massen af prøvelegemet til tiden t [kg], m_0 er tørmassen af prøvelegemet [kg] og A er opsugningsarealet [m^2].

Når Q er bestemt, kan kapillartallet, k , også bestemmes:

$$k = \frac{Q}{\sqrt{t}} \quad (11)$$

Hvor k er kapillartallet [$\text{kg/m}^2/\text{s}^{1/2}$] og t er tiden prøven har stået i vand [minutter]

Er kapillartallet højt foregår transporten af vandet hurtigt, mens et lavt kapillartal giver udtryk for en langsom vandtransport i materialet.

3. Metode

I dette kapitel beskrives de udførte forsøg og deres formål. I tabel 2 ses en oversigt over dette.

Tabel 2 - Udførte forsøg inklusiv formål og beskrivelse

Forsøg	Formål	Beskrivelse af metode
pH-værdi	Askens pH-værdi måles, for at få et større indblik i askens kemiske egenskaber og om den egner sig til armeret beton	Bilag 8
Ledningsevne	Ledningsevnen beskriver hvor mange ioner, der er i asken	Bilag 8
Glødetab	Undersøgelse af mængde organisk stof i asken	Bilag 8
Kornstørrelse	Der laves kornkurver for asken, for at bestemme kornstørrelserne	Afsnit 3.1.4
Oplukning af aske	Asken lukkes op, for at måle hvor stor mængde syreopløselige metaller den besidder	Bilag 8
Vandindhold	Vandindholdet måles, for at se om der skal tages hensyn til dette i banderecepterne	Bilag 8
Vandopløselighed	Askens vandopløselighed måles, for at se hvor meget af asken, der "forsvinder" ved iblanding af vand	Bilag 8
Vandopløselige anioner	Mængden af vandopløselige anioner måles	Bilag 8
Askens hærdeegenskaber	Der laves en blanding med vand og aske, for at se om asken hælder uden cement tilsat	Afsnit 3.1.9
SEM	Der laves SEM-billeder af asken, for at få et bedre indblik af kornenes struktur	Afsnit 3.1.10
Støbning af mørtelprismer	Prøver med brændt, knust og ubehandlet aske støbes efter forskrifterne i DS/EN 196-1	DS/EN 196-1
Knusning af aske	Asken ringknuses for at se om dette har indvirkning på styrken af mørtelprøverne	Afsnit 3.2.1
Brænding af aske	Afbrænding af organisk indhold i asken med henblik på at benytte den brændte aske i mørtelprøver til træk- og tryktest	Afsnit 3.2.2
Trykstyrke af mørtelprisme	Trykstyrkerne måles, for at se hvilken indvirkning asken har haft på denne	DS/EN 196-1
Trækbøjestykke af mørtelprisme	Trækbøjestykkerne måles, for at se hvilken indvirkning asken har haft på denne	DS/EN 196-1
Porøsitet & densitet	Porøsiteten og densiteten måles bl.a. for at se hvor frostbestandig mørtelprøven er	Bilag 8
Kapillarsugning	Undersøgelse af mørtelprøvens evne til at absorbere vand	Bilag 8

3.1 Metoder til karakteristik af aske

De forsøgsvejledninger, der refereres til i følgende afsnit kan findes i Bilag 8.

3.1.1 pH-værdi

Dette forsøg blev udført efter anvisningerne i forsøgsvejledningen "pH 1 M KCl opslemning. Jord-væske forhold 1:2,5". Forsøget blev udført to gange. En gang for ubehandlet aske, samt en gang for brændt aske.

3.1.2 Ledningsevne

Forsøget blev udført som beskrevet i forsøgsvejledningen "Måling af ledningsevne i jord", hvor der i stedet for jord er benyttet aske. Forsøget er lavet for almindelig aske og brændt aske.

3.1.3 Glødetab

Forsøget blev udført som beskrevet i forsøgsvejledningen "Glødetab i jord", hvor der i stedet for jord er benyttet aske. Forsøget er lavet to gange.

3.1.4 Kornstørrelse

Dette forsøg laves, for at få kornkurver for asken. Det er blevet udført fire gange i tør tilstand, hvor der blev konstrueret 3 kornkurver for ubehandlet, knust, brændt og knust+brændt aske. Forsøget er blevet udført fem gange i våd tilstand. I våd tilstand tilsættes asken peptisator. Her blev der konstrueret 3 kornkurver for ubehandlet, knust, brændt, knust+brændt aske og kulflyveaske. Prøverne blev udført vha. et laserdiffraktometer kaldet Mastersizer 2000.

3.1.5 Oplukning af aske

Forsøget blev udført som beskrevet i forsøgsvejledningen "Oplukning af jordprøve efter DS259", hvor der i stedet for jord er benyttet aske. Efter oplukningen af asken blev den totale koncentration af syreopløselige metaller i asken målt med et atomabsorptionsspektrofotometer (AAS). AAS-målingerne blev udført af laboranter. Dette forsøg er lavet en gang.

3.1.6 Vandindhold

Forsøget blev udført som beskrevet i forsøgsvejledningen "Vandindhold i jord", hvor der i stedet for jord er benyttet aske. Dette forsøg er lavet en gang.

3.1.7 Vandopløselighed

Forsøget blev udført som beskrevet i forsøgsvejledningen "Vandopløselighed". Forsøgsproceduren måtte gentages 5 gange, før al asken var bundfældet, og der dermed ikke var mere aske tilbage i plastikflasken. Dette forsøg er lavet en gang.

3.1.8 Vandopløselige anioner

Forsøget blev udført som beskrevet i forsøgsvejledningen "Vandopløselige anioner". Målingerne vha. ionchromotograf og AAS blev udført af laboranter. Dette forsøg er lavet en gang.

3.1.9 Askens hærdeegenskaber

40 g aske blev blandet med 40 g vand i en kop, for derefter at blive rørt sammen med ske. Efter et døgn afformes prøven. Prøven observeres den efterfølgende uge.

3.1.10 SEM

Der blev lavet SEM-billeder af almindelig, knust, brændt og knust+brændt på SEM-maskinen Quanta 200. Forsøget blev foretaget af en laborant.

3.2 Støbning af mørtelprismer

Der er i dette projekt støbt mørtelprismer med 12 forskellige opskrifter. Alle blandingerne er støbt i forme á tre prismen, og er lavet efter samme procedure, som følger kravene i DS/EN 196-1:

- Cement og evt. aske blandes i skål til Hobert mixer
- Vand tilsættes, mixeren startes på "low" og tiden startes.
- Efter 30 sekunder tilsættes sand over yderligere 30 sekunder
- Mixeren sættes på "high" og mixer i 30 sekunder
- Der stoppes i 90 sekunder, hvoraf der skræbes mørtel ned fra kanten de første 30 sekunder
- Mixeren sættes på "high" og mixer i 60 sekunder
- Mørtelformen placeres på vibratorbordet. Formen fyldes halvt op
- Vibratorbordet tændes med speed sat til 45. Bordet vibrerer i 30 sekunder
- Formen fyldes helt op
- Vibratorbordet tændes med speed sat til 45. Bordet vibrerer i 30 sekunder, mens overskydende aske skræbes af
- Plastik liggens stramt over formen, som skal afformes dagen efter.

De benyttede opskrifter kan ses i tabel 3. Den eneste recept, hvor vandmængden er ændret, er prøve D, da denne ellers var for tør. Derfor blev der tilsat yderligere 67,5 g vand, for at opnå et v/p-forhold på 0,50, som de andre prøver ligeledes besidder.

Tabel 3 - Blandingsrecepter benyttet i projektet

Prøve	Recept
A - Reference	450 g cement, 225 g vand og 1350 g sand
B - 5% cementerstatning	427,5 g cement, 22.5 g aske, 225 g vand og 1350 g sand
C - 10% cementerstatning	405 g cement, 45 g aske, 225 g vand og 1350 g sand
D - 10% sanderstatning	450 g cement, 135 g aske, 292.5 g vand og 1215 g sand
E - 6% cementerstatning	423 g cement, 27 g aske, 225 g vand og 1350 g sand
F - 7% cementerstatning	418.5 g cement, 31.5 g aske, 225 g vand og 1350 g sand
G - 8% cementerstatning	414 g cement, 36 g aske, 225 g vand og 1350 g sand
H - 9% cementerstatning	409.5 g cement, 40.5 g aske, 225 g vand og 1350 g sand
I - 5% cement erstattet med brændt aske ¹	427,5 g cement, 22.5 g brændt aske, 225 g vand og 1350 g sand
J - 10% cement erstattet med brændt aske ¹	405 g cement, 45 g brændt aske, 225 g vand og 1350 g sand
K - 5% cement erstattet med brændt aske ²	427,5 g cement, 22.5 g brændt aske, 225 g vand og 1350 g sand
L - 10% cement erstattet med brændt aske ²	405 g cement, 45 g brændt aske, 225 g vand og 1350 g sand
M - 5% cement erstattet med knust aske	427,5 g cement, 22.5 g knust aske, 225 g vand og 1350 g sand
N - 10% cement erstattet med knust aske	405 g cement, 45 g knust aske, 225 g vand og 1350 g sand
O - 5% cement erstattet med knust og brændt aske	427,5 g cement, 22.5 g knust+brændt aske, 225 g vand og 1350 g sand
P - 10% cement erstattet med knust og brændt aske	405 g cement, 45 g knust+brændt aske, 225 g vand og 1350 g sand

3.2.1 Knusning af aske

Asken blev knust i ringknuser i portioner á ca. 50 g i 30 sekunder pr. portion.

3.2.2 Brænding af aske

Dette forsøg blev lavet ligesom glødetab-forsøget, dog med større mængder aske, da der var behov for en stor mængde aske, med henblik på støbning af prøver. Glødetabet blev noteret, grundet en ufuldstændig afbrænding af organisk materiale i asken.

3.2.3 Tryk- og trækbøjestykke af mørtelprisme

For at finde henholdsvis trækbøjestykken og trykstyrken er der benyttet en tryktestmaskine af mærket Mohr & Federhoff. Først blev mørtelprismen placeret centralt i maskinens trepunkts-tryksystem, hvorefter den blev belastet af maskinen. Dette skulle foregå med en lastforøgelse på (50 ± 10) N/s. Det har dog vist sig svært, at overholde dette, med denne type maskine. Prøven blev belastet indtil brud. Bruddet af mørtelprøven forekom på midten som forventet. De to halvdele blev derefter brugt til tryktest, som foregik ved, at opstillingen blev ændret fra et trepunkts-tryk til et fladetryk. Herefter blev den delte prøve (én halvdel af gangen) belastet med en lastforøgelse på (2400 ± 200) N/s indtil brud.

Inden træk- og tryktest af prøverne, blev dimensionerne målt, for senere at blive brugt til beregning af tryk- og trækbøjestykke.

3.2.4 Porøsitet, densitet og kapillarsugning

Forsøget blev udført som beskrevet i "Porøsitet, densitet og kapillarsugning". Forsøget for kapillarsugning er udført to gange på blanding E, F, G og H efter henholdsvis 11 og 14 døgn. Densitet og porøsitet er udført efter LBM-metoden, og er udført på alle typer blandinger undtagen A, B, C og D. Dette forsøg blev foretaget på to halvdele fra hver prøvetype. Disse var kun blevet udsat for trækprøvning.

4 Eksperimentelle arbejder

I dette afsnit vil de opnåede resultater blive præsenteret samt diskuteret.

4.1 Karakteristik af asken

I forbindelse med den indledende karakteristik af asken blev der opnået følgende resultater, ved brug af metoderne beskrevet i afsnit 3, som kan ses i tabel 4:

Tabel 4 - Resultater fra indledende karakteristik af aske

Indledende karakteristik	
pH	12,5
Ledningsevne	46,4 ms/cm
Vandindhold	1,80%
Vandopløselighed	17%
Glødetab	13,90%

Det ses i tabel 4 at glødetabet er på 13,90 %, hvilket overskrider kravene i DS/EN-450-1:2012, som ses i tabel 5. Da bestemmelsen af vandopløselighed er et upræcist forsøg, er resultatet rundet op til nærmeste hele procenttal. Dette resultat skal altså kun ses som et skøn, for at få et overblik over hvilken størrelsesorden vandopløseligheden for asken er.

Tabel 5 - Krav til glødetab

Krav til glødetab iht. DS/EN 450-1	
Kategori	Højst acceptable glødetab
A	5,00%
B	7,00%
C	9,00%

Da glødetabet er højere end det maksimalt tilladte, betyder det, at der er en for stor mængde organisk materiale i asken. Dette bliver nødt til at blive bearbejdet, før asken kan blive benyttet i beton. En oplagt måde at løse dette på er, at asken bliver brændt bedre på kraftvarmeværket. En reduktion af det organiske indhold i asken vil samtidig betyde en ændring af askens egenskaber i forbindelse med brug i beton. Dette vil blive undersøgt senere.

Der blev i forbindelse med karakteristikken foretaget en oplukning, for at fastlægge mængderne af grundstoffer i asken. Resultaterne fra oplukningen ses i tabel 6.

Tabel 6 - Resultater fra oplukning

Grundstof	[mg/kg]	% [-]
Al	5056,443	0,506
As	5,320	0,001
Ca	155230,667	15,523
Cd	4,072	0,000
Cr	22,373	0,002
Cu	82,527	0,008
Fe	12845,533	1,285
K	42100,000	4,210
Mg	20414,400	2,041
Mn	9638,893	0,964
Na	13687,900	1,369
Ni	33,838	0,003
P	4623,923	0,462
Pb	50,374	0,005
Zn	407,952	0,041

Oplukningen viser at indholdet af alkalier er 4,210 % (kalium) + 1,369 % (natrium) = 5,579 % af askens vægt. Kravet for indhold af alkalier i kulflyveaske, er ifølge DS/EN 450-1 på 5,0 % af vægten. Dette krav er derfor ikke overholdt. En for stor mængde alkalier kan resultere i at alkaliet reagerer med tilslaget, og danner en alkalisk reaktion, hvilket kan resultere i en opbygning af interne trækspændinger i betonen. Dette er ikke ønsket og det er nødvendigt at undersøge nærmere, hvorvidt dette forekommer.

Som det ses i tabellen, er der et forholdsvis stort indhold af calcium i asken. Dette er en god ting, da cement bl.a. består af en stor mængde calcium, hvilket kunne tyde på at asken har nogle af de samme egenskaber som cement.

De andre tungmetallerne tjekkes i henhold til grænseværdierne opgivet i slambekendtgørelsen⁹.

⁹ Slambekendtgørelsen - <https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=13056>

Tabel 7 - Tjek af tungmetaller iht. slambekendtgørelsen

Grundstof	Maksimalt tilladeligt indhold [mg/kg]	Indhold i Verdo-asken [mg/kg]	Tjek
Cd	0,8	4,1	Ikke OK
Cr	1000,0	22,4	OK
Cu	100,0	82,5	OK
Ni	30,0	33,8	Ikke OK
Pb	120,0	50,4	OK
Zn	4000,0	408,0	OK

Som det ses i tabel 7 er indholdet af cadmium og nikkel for højt.

Det maksimalt tilladelige indhold iht. bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter til bygge- og anlægsarbejder¹⁰ tjekkes ligeså, da det giver et bedre indblik i, om denne aske kan anvendes til dette.

Tabel 8 - Tjek af tungmetaller iht. bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter til bygge- og anlægsarbejder

Grundstof	Indhold for Verdo-asken [mg/kg]	Kategori 1 [mg/kg]	Kategori 2 [mg/kg]	Tjek
Cd	4,1	0-0.5	> 0.5	Kategori 2
Cr	22,4	0-500	> 500	Kategori 1
Cu	82,5	0-500	> 500	Kategori 1
Ni	33,8	0-30	> 30	Kategori 2
Pb	50,4	0-40	> 40	Kategori 1
Zn	408,0	0-500	> 500	Kategori 1

I henhold til tabel 8 – bekendtgørelsen om anvendelse af restprodukter til bygge- og anlægsarbejder tilhører asken kategori 2 for cadmium og nikkel. Det ønskes at alle tungmetallerne hører under kategori 1, da dette vil medføre at asken kan bruges til bygge- og anlægsarbejder uden nogen form for specieltilladelse, medmindre andet følger af lov om miljøbeskyttelse og øvrige lovgivning.

Indholdet af vandopløselige anioner samt vandopløselige kationer er ligeledes blevet målt. Disse kan ses i tabel 9 og 10.

¹⁰ Bekendtgørelsen om anvendelse af restprodukter til bygge- og anlægsarbejder - <https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=134831>

Tabel 9 - Vandopløselige kationer

Type	[mg/kg]	% [-]
Ca	53,6	0,005
K	47266,2	4,727
Mg	353,3	0,035
Ma	62,4	0,006
Na	1037,8	0,104

Tabel 10 - Vandopløselige anioner

Type	[mg/kg]	% [-]
Cl	3648,5	0,365
NO ₃	1535,0	0,154
SO ₄	57517,6	5,752

Indholdet af chlorid er vigtigt at kende, da det har indflydelse på om betonen er egnet til armering eller ej. Det meste beton inden for byggeri armeres i dag, så derfor er det vigtigt, at betonen er egnet til armering. I tabel 11 ses kravene til chloridindholdet i beton, for at denne kan armeres. Chloridindholdet blev målt til 0,365 % under forsøget "vandopløselige anioner".

Tabel 11 - Maksimalt chloridindhold iht. DS/EN 206-1

	Miljøklasse			
	P	M	A	E
Uden armeringsstål eller andet indstøbt metal med undtagelse af korrosionsbestandige løfteanordninger	Cl 1.00	Cl 1.00	Cl 1.00	Cl 1.00
Med armeringsstål eller andet indstøbt metal	Cl 0.40	Cl 0.20	Cl 0.20	Cl 0.20
Med spændarmering af stål	Cl 0.20	Cl 0.20	Cl 0.20	Cl 0.10

Der tjekkes for det skrappeste krav, som er Cl 0.1. Dette betyder at 0,1 % af cementvægten (pulvervægten) må bestå af chlorid. Der tjekkes for den blanding med mest aske i, som er blanding C, hvor der er iblandet 45 g aske og 405 g cement. Dette giver følgende chloridindhold:

Tabel 12 - Beregning af chloridindhold

Recept	Cement [g]	Aske [g]	Chlorid pr. portion [g]	Chloridindhold [%]
C	405	45	0,16425	0,000365

Da chloridindholdet er under 0,1 % overholder det chloridindholdsklasse Cl 0.1 og de andre klasser overholdes også.

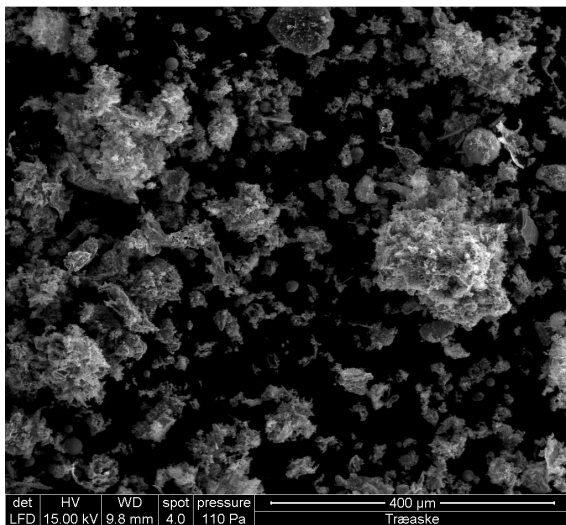
Sulfat-indholdet (SO_4) må maksimalt være på 3,0 % af vægten iht. DS/EN 450-1. Dette er ikke overholdt, da det for denne aske ligger på 5,752 %. Et for højt indhold af sulfat kan resultere i sulfatangreb, som er en dannelse af ettringit, der kan forårsage en ekspansion i betonen, hvilket kan danne revner. Dette skal undersøges nærmere, før asken evt. kan bruges kommercielt.¹¹

Asken overskrider kravene for maksimalt indhold af alkalier, cadmium, nikkel og sulfat. Det skal dog understreges, at disse forsøg ikke er endegyldige, da der kun er udført 3 forsøg for hver type, og der derfor ikke er dannet et godt nok overblik over dette. Det er oplagt at lave et udvaskningsforsøg, for at undersøge hvor stor en mængde af stofferne, der kommer ud i miljøet. Hvis det viser sig, at stofferne bliver bundet i mørtlen, vil det ikke være et problem, at grænseværdierne er overskredet ud fra de heri udførte forsøg.

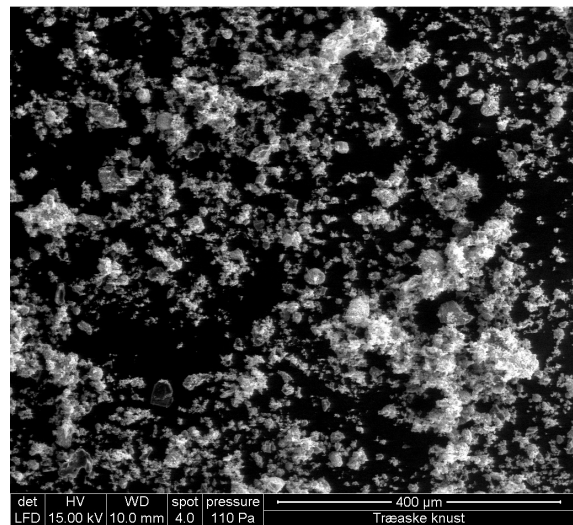
¹¹ P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro: *Concrete. Microstructure, properties, and materials*, 4th edition, McGraw-Hill Education (2013) s. 148-156.

4.2 SEM og Kornkurver

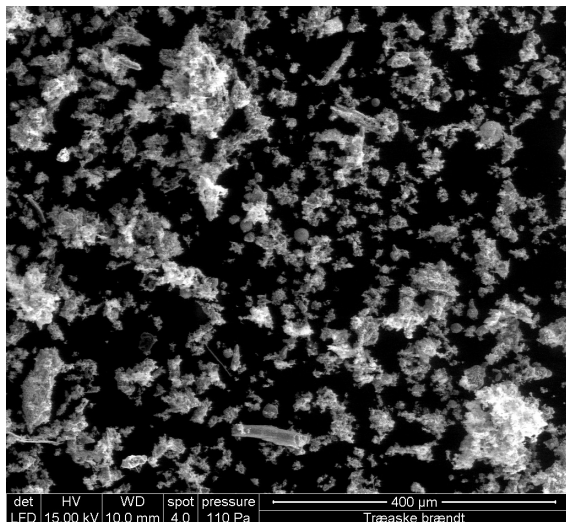
I forbindelse med arbejdet med asken, er der blevet taget billeder af den, for at få en bedre forståelse for sammensætningen af materialet. Billederne af asken er forstørret 160 gange, og der er endvidere også taget billeder, som er forstørret 500 gange (Se side 13-16 i bilag 4). Asken er igennem forløbet blevet bearbejdet på forskellige måder, alt efter hvilke fokuspunkter, der er blevet valgt. På figur 8, 9, 10 og 11, kan ses henholdsvis almindelig, knust, brændt og brændt & knust træaske.



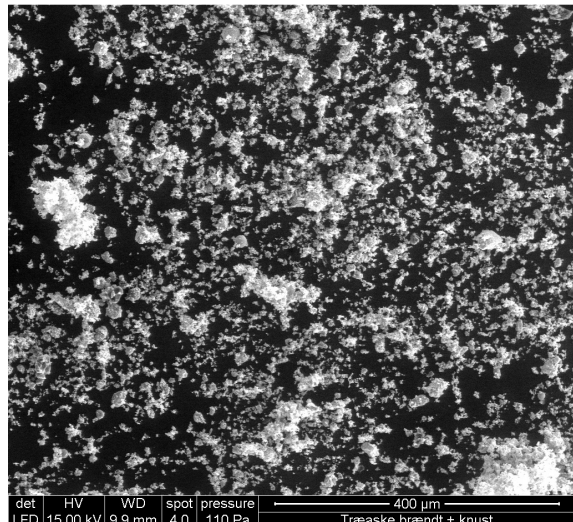
Figur 8 - Træaske forstørret 160 gange



Figur 9 - Knust træaske forstørret 160 gange



Figur 10 - Brændt træaske forstørret 160 gange

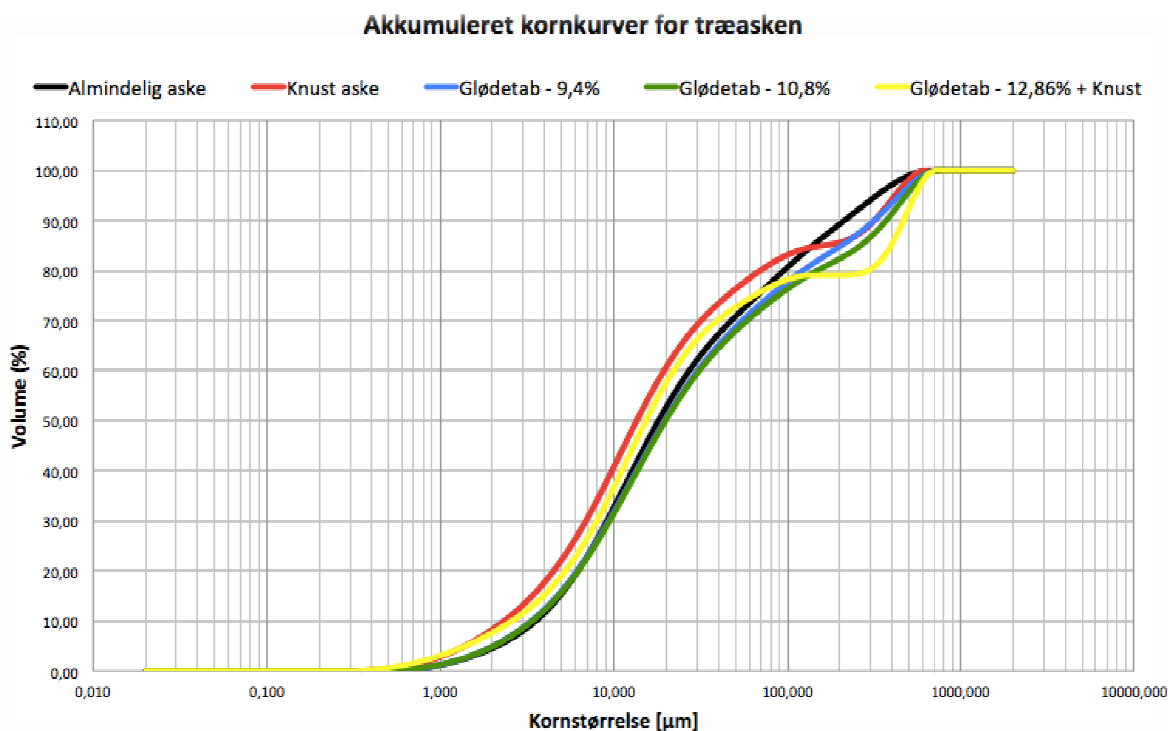


Figur 11 - Brændt & Knust træaske forstørret 160 gange

Det kan ses, at de store partikler, som forekommer på figur 8, bliver reduceret når asken enten brændes eller knuses. At de reduceres under brænding af asken, skyldes at partikler af denne

størrelse, er det organiske materiale i asken. Eftersom at knusningen kun nedbryder det organiske materiale i mindre dele, blev det valgt også at lave en kombination mellem knusning og brænding. Dette skyldes at knusning gør asken mere homogen, men det fremtidssikre ikke betonen mod hulrum, der på længere sigt vil opstå i takt med, at det organiske materiale rådner. Sammenlignes figur 8 og figur 11 er der stor forskel i askens sammensætning, hvor partikelstørrelserne er reduceret.

For at få et bedre overblik over det præcise sammensætning af partikler i asken, er der som tidligere nævnt, lavet kornkurver for asken. Udover kornkurve for den ubearbejdede aske og aske efter knusning, er der blevet lavet yderligere målinger for brændt og brændt & knust aske. Ud fra %-volumen af de forskellige partikelstørrelser, er der blevet lavet en akkumuleret kornkurve, som kan ses på figur 12¹²

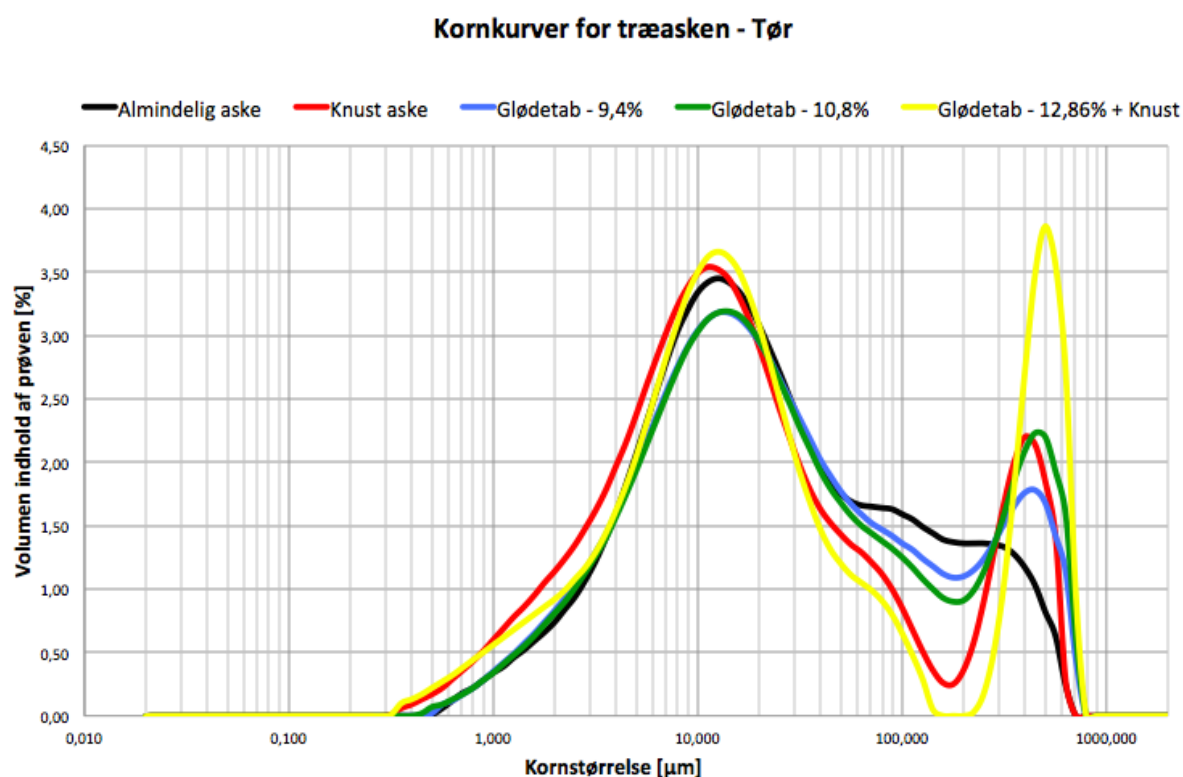


Figur 12 - Akkumuleret kornkurver for alm.-, knust-, brændt- og brændt & knust træaske

De partikelstørrelser, der varierer i forhold til den almindelige aske, ligger ca. i intervallet fra 100 til 250 µm. Det kan yderligere ses på figur 12, at disse partikel efter asken er blevet brændt, ikke nedbrydes i mindre stykker, men fordamper helt fra asken. Der er altså ikke nogen forøgelse i %-volumen af mindre partikler, efter asken er blevet brændt. Det skal hertil bemærkes at vægten af

¹² Data kan ses i bilag 4

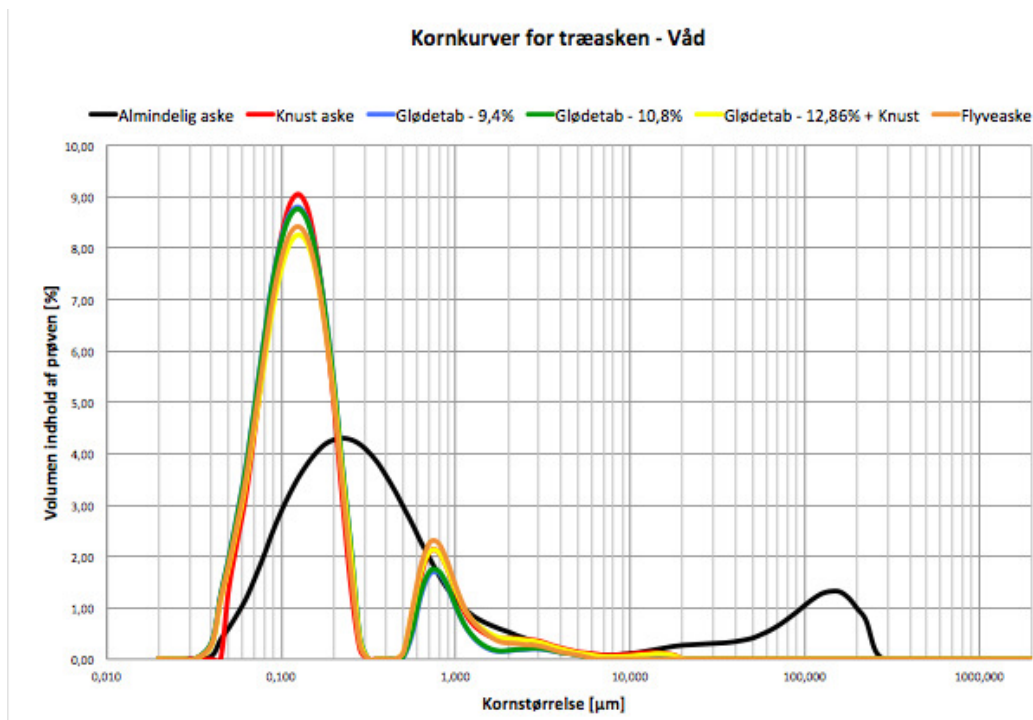
asken faldt, som et resultat af dette. For at give et bedre overblik over sammensætningen af asken, er der på figur 13 vist kornkurver for de samme typer af asken som på figur 12.



Figur 13 - Kornkurver for alm.-, knust-, brændt- og brændt & knust træaske - Tør

Forløbet for kornkurverne på figur 13 er ret specielle, i den forstand at alle kurverne bortset fra den almindelige (sort), har et mærkeligt opsving ved partikelstørrelser af ca. 300-600 μm. Tages der f.eks. udgangspunkt i den røde graf, som tilhører knust aske, skulle de store partikler blive nedbrudt i mindre dele, hvilket ville reducere %-volumen af disse. Dette er dog ikke tilfældet, og det er en generel tendens for kornkurverne for træasken, at mængden af partiklerne af størrelsen 300-600 μm stiger, i takt med at træasken bliver bearbejdet. Det er dog ikke til at sige, hvorfor det forholder sig således, men asken må i et vist omfang klumpe sammen. Derfor vil der blive lavet nye kornkurver for de forskellige asketyper, men denne gang gøres det i våd tilstand. Med våd tilstand menes der, at blande asken med peptisator, som skal holde partiklerne separeret.

Resultaterne for målingen af kornstørrelserne i våd tilstand, kan ses i figur 14:



Figur 14 -- Kornkurver for alm.-, knust-, brændt- og brændt & knust træaske - Våd

Som det kan ses på figur 14 er der ikke den store forskel på de bearbejdede asker. Den eneste forskel mellem de forskellige typer af brændt aske og den knuste aske, er mængden af partikler af størrelsen 0,100-0,150 µm. Denne er nemlig større for den knuste aske. Dette skyldes at brændingen af asken forårsager et vægttab, så der derfor generelt er et mindre indhold af de forskellige partikler. Ses der på forløbet på kornkurverne, er der en forventet sammenhæng mellem den almindelige aske og den bearbejdede aske. Når asken enten knuses eller brændes, nedbrydes partiklerne ved ca. 100-300 µm, og fordeler sig ud over de mindre kornstørrelser. Udover reference prøven, som i dette tilfælde er den almindelige aske (sort), er der til yderligere sammenligning også lavet en kornkurve for flyveaske. Som det kan ses, ligner flyveasken alle typer for træasken, efter den er blevet bearbejdet.

Sammenlignes figur 14 derimod med figur 13, er der en stor forskel på kornstørrelserne. Da hovedparten ved tør lå omkring de 10 µm, ligger de nu i stedet for ved 0,100 µm. Dette er en stor forskel, som godt kunne give anledning til, at antagelsen, om at asken klumper sammen, er korrekt. Der vil i det følgende, når der nævnes partikelstørrelser og lignende, blive refereret til kornkurverne for tør aske, da det ikke vides om hvorvidt klumperne opløses under blandingen af mørtelprøverne.

4.3 Mørtelprøver

I dette afsnit bliver resultaterne for mørtelprøverne præsenteret og diskuteret. Der er for alle mørtelprøver forsøgt at opnå et v/c- eller v/p-forhold på 0,5. Det skal dog bemærkes at der ikke er taget hensyn til vandindholdet i asken. Dette er vurderet tilstrækkelig lavt til, at der kan ses bort fra det. Ved eventuelle beregninger vil det præcise v/p-forhold dog blive benyttet. Alle mørtelprøverne er støbt og trykprøvet bedst muligt efter DS/EN 196-1.

4.3.1 Indledende mørtelprøver

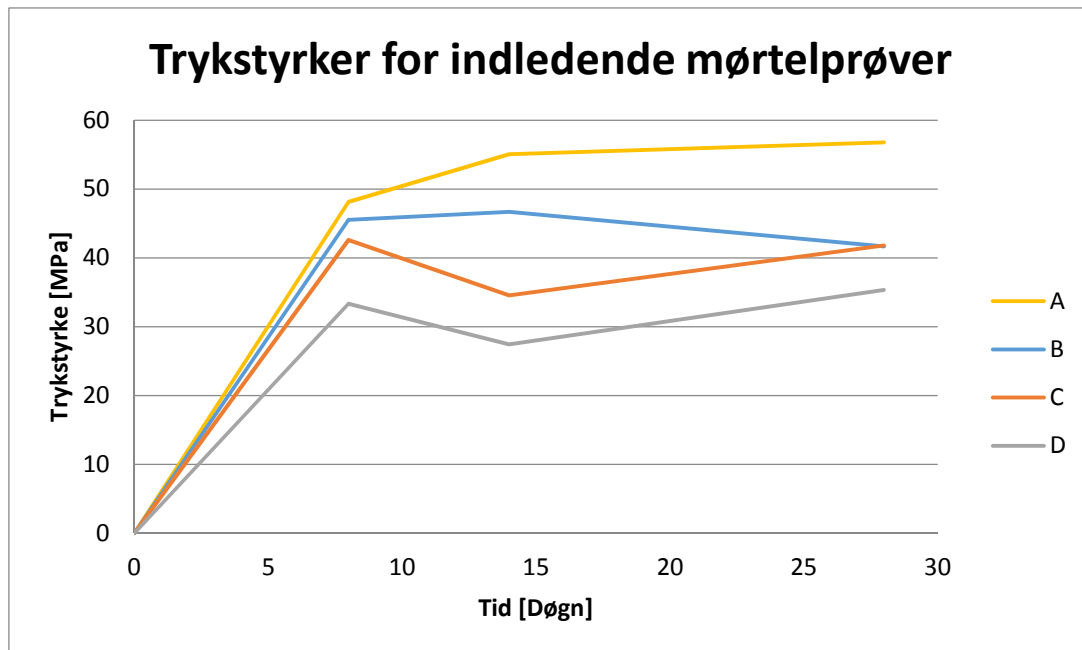
Der er blevet lavet indledende mørtelprøver med henblik på, at finde den bedste blanderecept med asken fra Verdo. Det forventes rent teoretisk at betonens egenskaber for trykstyrke samt trækstyrke stiger over tid. Eftersom det er en ukendt aske, der bruges som sand- eller cementerstatning, vides det ikke hvordan denne reagerer under hærdeprocessen. Det er derfor ikke sikkert at denne sammenhæng opnås.

Mørtelprøverne blev udført som beskrevet i afsnit 3.3 "Støbning af mørtelprismer". Der blev lavet tre forskellige prøver, med ubehandlet aske, af typen B, C og D. Hver prøve blev lavet á 3 stk., hvor 3 af hver type blev træk- og trykstyrketestet efter henholdsvis 7, 14 og 28 døgn. Trykstyrkernes data er behandlet efter metoden i DS/EN 196-1, hvor gennemsnittet af alle trykstyrkerne findes, og herefter tjekkes det om alle trykstyrker er inden for $\pm 10\%$ af dette gennemsnit. Databehandlingen af trykstyrkerne kan ses i bilag 1. I samme bilag kan trækstyrker også ses.

Trykstyrkerne er plottet i figur 15. Her er der også plottet en reference, som er lavet ud fra resultater fra "Slamaske i beton" af Asger B. Carlsen og Søren R. Petersen¹³ og "Brug af aske i beton - nye problemer nye muligheder" af Katharina Lyngholm¹⁴.

¹³ B. Carlsen, Asger, & R. Petersen, Søren, "Slamaske i beton"

¹⁴ Lyngholm, Katharina, "Brug af aske i beton - nye problemer nye muligheder"



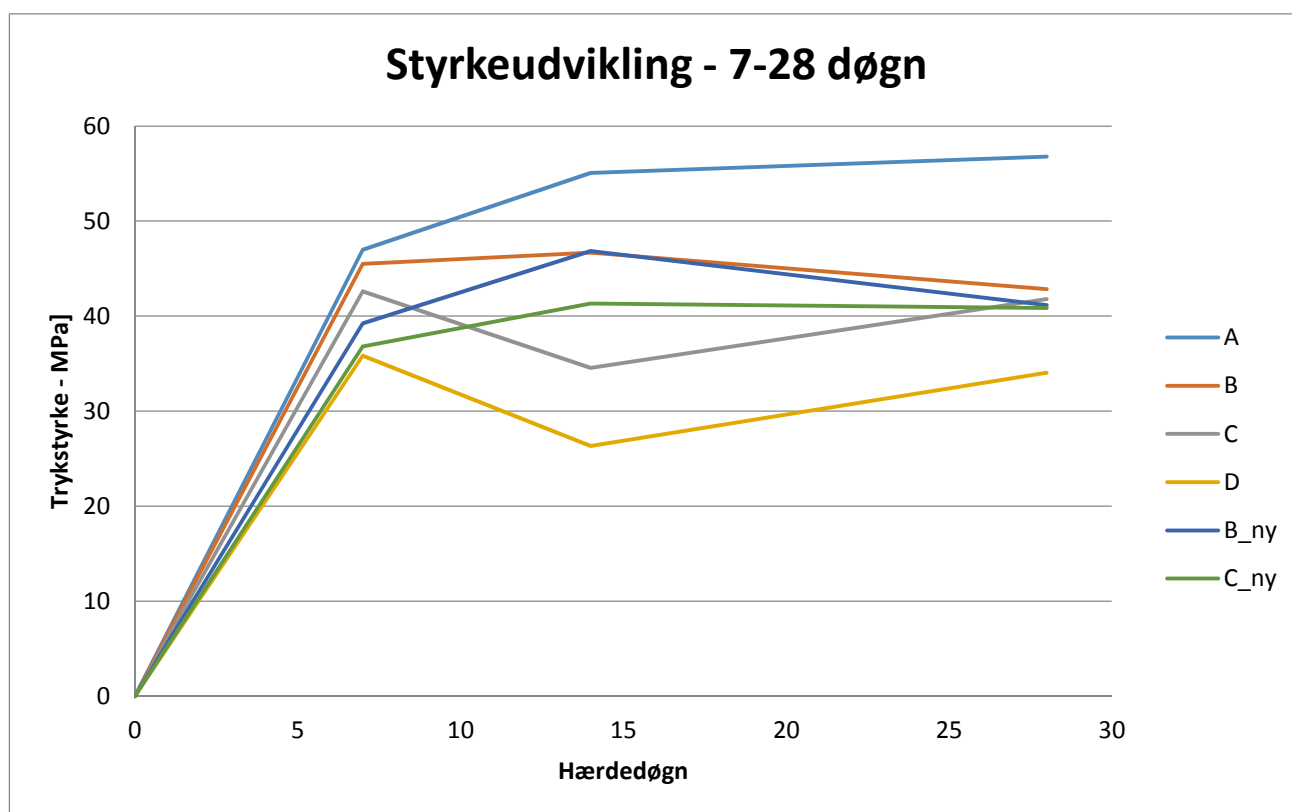
Figur 15 - Trykstyrker for indledende mørtelprøver

Som det kan ses i figur 15 blev 7-døgnsprøven lavet efter 8 døgn. Det skulle dog ikke vise sig, at blive et problem, da resultaterne alligevel blev forkastet. Det skyldes, at mørtelprøverne blev vibreret på det lille rystebord i betonkælderen, da det store rystebord var optaget. Det viste sig senere at resultaterne ved vibrering på det lille rystebord ikke var pålidelige, da trykstyrkerne blev lavere samt spredningerne steg. På trods af dette, blev det skønnet at tendensen for prøverne alligevel kunne bruges. Tendensen for prøverne var at trykstyrkerne ikke steg og endda faldt fra 7-14 døgn, for derefter at stige fra 14-28 døgn. Dette vil blive undersøgt i næste afsnit.

4.3.2 - 6, 7, 8 og 9% cementerstatning:

Som nævnt i forrige afsnit, vil det gerne undersøges, hvad der skete i tidsrummet 7-14 dages hærkning, eftersom at trykstyrken for både 10% cementerstatning (CE) og 10% sanderstatning (SE) viste et aftag. Da trykstyrken af mørtelprøverne med sanderstatningen generelt var svagere end prøverne med cementerstatning, vil der i de følgende støbninger kun blive arbejdet med regulering af cementindholdet.

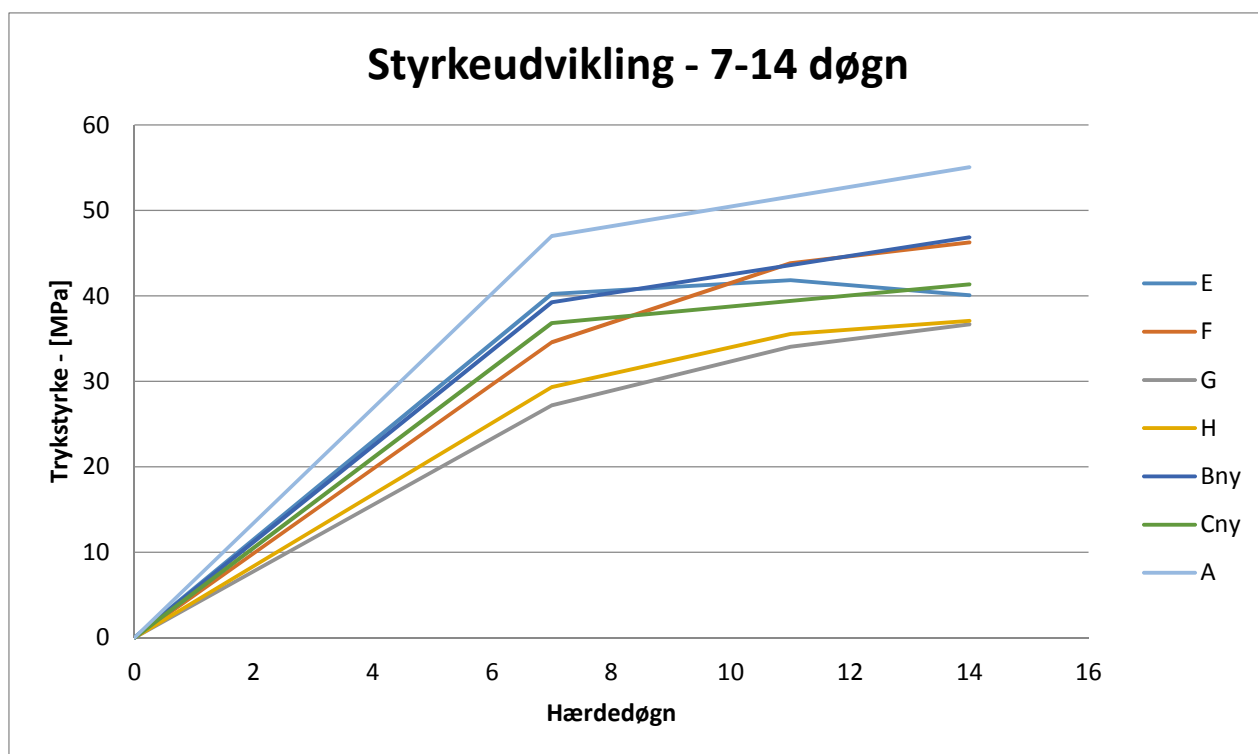
I det videre arbejde med bearbejdning af asken og støbning af mørtelprøver, vil målingerne for prøvetype B, C og D, blive kasseret. Der vil derfor til sammenligning af styrkerne, blive brugt resultater for referenceprøver fra tidligere rapporter, udarbejdet hos DTU Byg, samt trykstyrkerne for de nystøbte 5% og 10% CE også kaldet B_{ny} og C_{ny} . Sammenlignes B, C og D, som er støbt ved brug af det lille rystebord, med B_{ny} og C_{ny} , som er støbt med det store rystebord, fås figur 16:



Figur 16 - Styrkeudvikling ved 7-28 døgn for prøvetype A,B,C,D, B_{ny} og C_{ny}

Både for B_{ny} og C_{ny} er der mere valide data omkring de 14 hærdedøgn, eftersom at styrken, denne gang, ikke falder fra 7 til 14 døgn. Det er derfor disse styrker, der bliver sammenlignet data op imod i det videre arbejde.

Eftersom at trykstyrken for 5% CE ikke aftog ligesom 10% CE gjorde under de første støbninger, vil der derfor blive sat spørgsmålstejn ved, om hvorvidt det er mængden af aske i mørtelprøven, der forårsager dette fald i styrken. Der er derfor blevet støbt 3x3 prøver af henholdsvis 6%, 7%, 8% og 9% CE (prøvetype E, F, G og H), som skal hærde i 7, 11 og 14 dage. Efter disse hærdetider, er trykstyrken for de forskellige prøver blevet testet. Eftersom at der har været usikkerhed om, hvorvidt trykstyrkerne for de første støbninger er pålidelige, grundet det benyttede rystebord, er der blevet støbt nye 5% og 10% CE (B_{ny} og C_{ny}). Dette er gjort for at give et mere realistisk billede af mørtelprøvens styrkeudvikling, i forhold til indholdet af aske. Sammenhængen i styrkeudviklingen er afbildet i figur 17:



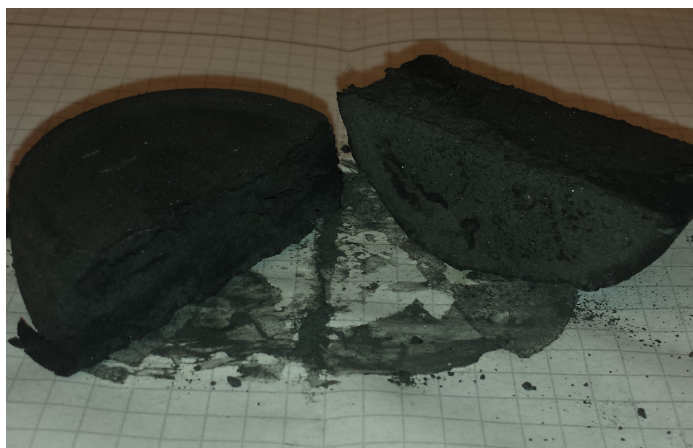
Figur 17 - Styrkeudvikling for 7-14 døg for prøvetype, B_{ny} , C_{ny} , A, E, F, G og H

Som det fremgår af figur 17, fås der ikke et resultat som stemmer overens med det foregående resultat for udviklingen af styrken, nemlig at trykstyrken faldt fra 7 til 14 dages hærdning. Det er derfor meget sandsynligt, at det de første trykmålinger for prøvetyperne B, C og D ikke er korrekte. Figur 17 viser en styrkeudvikling, som kunne forventes rent teoretisk, nemlig at trykstyrken fra 7 til 14 døg stiger. Hvis der ses bort fra målingerne foretaget ved 11 døgns hærdning, er det kun prøve E, som har et lille aftag i styrken fra 7 til 14 døg. Da aftaget er meget

småt, er det dog ikke noget, der har større relevans for den overordnede tendens. Det er dog værd at bemærke at styrken efter 14 dage for C_{ny} , som er 10% CE, ligger højere end prøverne E, G og H. Endvidere ses det, at alle prøverne ligger under referenceprøven.

Eftersom at prøverne E, G og H, har en lavere styrke end C_{ny} , kan det være svært at drage en endegyldig konklusion, vedrørende hvor stor indflydelse på styrken, som mængden af aske i mørtelprøven har. Det kan dog ses at der er en tendens mellem sammenhængen af aske og styrken, hvor styrken generelt er mindre ved højere indhold af aske. Dette giver teoretisk god mening, eftersom at cementindholdet reduceres, hvilket resulterer i at der er en mindre %-volumen af mørtelprøven, som kan hydratiseres med vand. Grundet dette bliver prøverne ikke lige så kompakte som tilfældet uden aske, og styrken reduceres.

Det har i denne sammenhæng været interessant at undersøge, hvorvidt asken opfører sig som cement ved tilsætning af vand. Der er derfor blevet lavet et lille forsøg, hvor en blanding af vand og aske i forholdet 1:1 er blevet sat til at hærde natten over. Efter én dags hærkning, var den flydende blanding blevet solid, men stadigvæk meget våd i konsistensen. Der gik omkring en uge, før vandet var fordampet og asken var blevet en hel tør klump. Se figur 18:

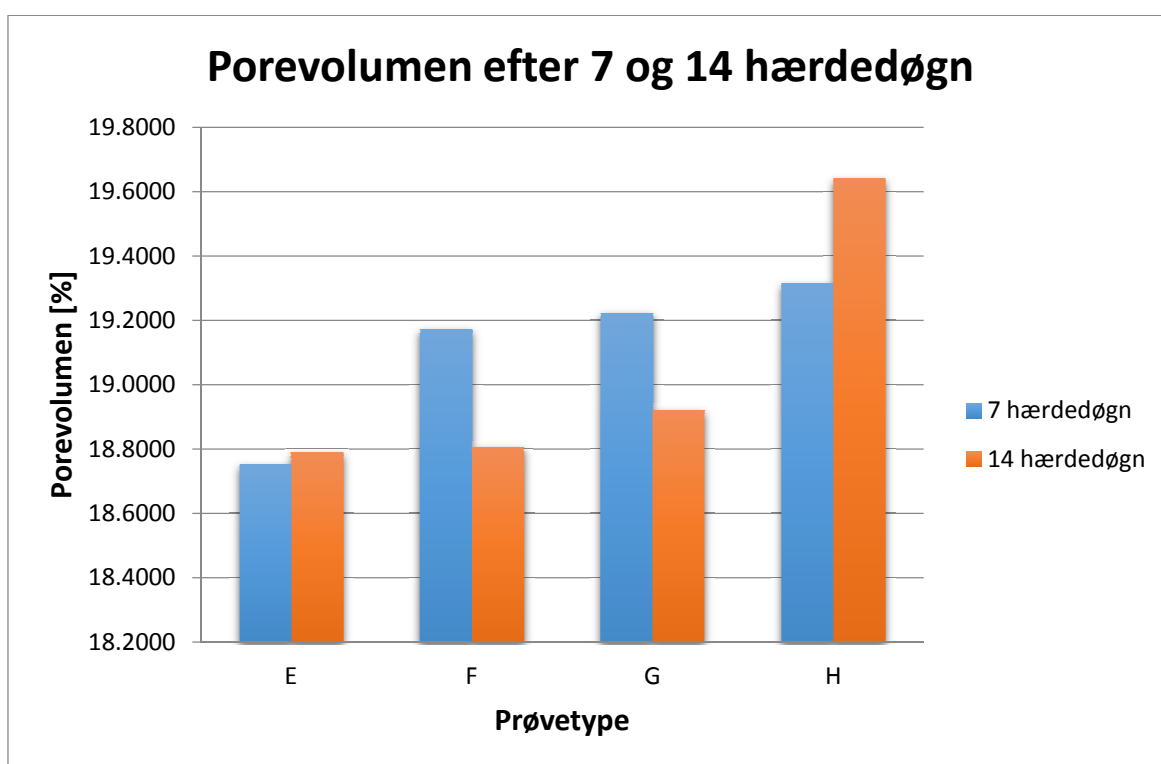


Figur 18 - Vand og aske i blandingsforhold 1:1 - Efter 7 dages hærkning

Selvom asken var størknet, var bindingen mellem vand og aske meget svag, og den kunne uden videre knuses med fingrene. Asken ligner altså cementen i den forstand, at det i en vis grad hydratiseres. Men hvorvidt den lave styrke skyldes manglende vand, så hydratiseringsgraden derfor ikke er særlig høj, eller om asken mangler potentiale, er ud fra dette forsøg, ikke til at sige.

Selvom mængden af aske har indvirkning på styrke, er det dog ikke muligt at give et konkret tal på, hvor stor en reduktion i styrken, der opnås, når en bestemt procentdel af cementen erstattes med aske. Dette kan have noget at gøre med, det ovennævnte forsøg, eller at den ubearbejdede aske er inhomogen, så mængden af de forskellige partikelstørrelser varierer fra prøve til prøve, hvilket kan have indflydelse på pakningsgraden af mørtelprøverne¹⁵.

I sammenhæng med pakningsgraden af mørtelprøverne, er der blevet lavet forsøg vedrørende porøsitet og densitet. Dette er blevet gjort for de støbte prøver E, F, G og H, for at se hvordan mængden af aske og porevolumen hænger sammen. Resultatet kan ses i figur 19:



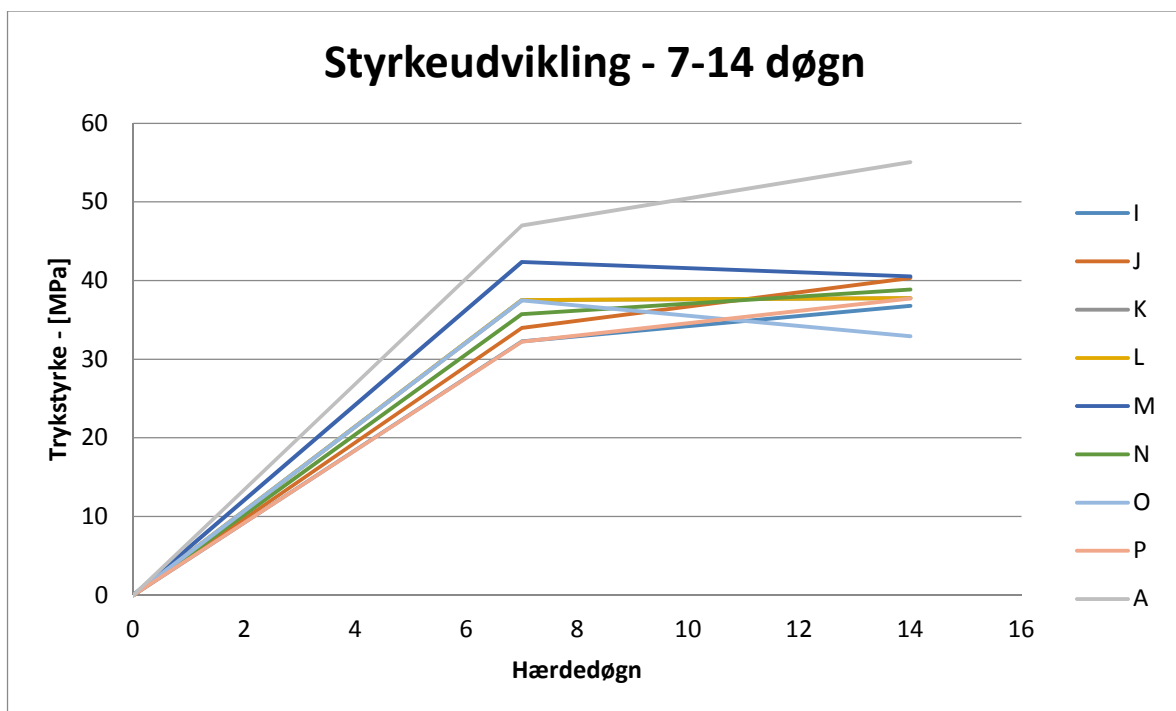
Figur 19 - Porøsitet af prøverne E, F, G og H - Efter 7 og 14 døgns hærdning

Forsøget er lavet for 2 stykker af mørtelprøverne, som er blevet udtaget efter de er blevet delt på midten under trækstyrkeundersøgelsen. Dette betyder, at søjlerne er gennemsnitsværdien for de to målinger. Det kan ses ud fra bilag 3, at der indenfor sammen prøvetype kan forekomme variation for porevolumen. Dette må støtte op omkring askens inhomogenitet, da mængden af asken, for de forskellige typer er ens.

¹⁵ Se SEM af almindelig aske – figur 8 side 35

4.3.3 Brændt, knust og brændt&knust aske

Da det ikke var muligt at få nogen reduktion i styrken fra 7 til 14 døgns hærkning, forårsaget af mængden af aske i prøverne, skulle det besluttes, hvad der kunne være relevant at arbejde med i forhold til asken. Eftersom at styrken, af mørtelprøverne med indhold af aske, var lavere end referenceprøven (A), ville det være oplagt at undersøge om asken kunne optimeres for at give bedre resultater. Under karakteristikkene af asken, blev der fundet et indhold af organisk materiale på 13,90%. Dette må som nævnt tidligere kun være på max 5,00%, hvis asken skal benyttes i beton i Danmark. Af denne årsag blev det besluttet at brænde asken yderligere, for at reducere dette indhold. Der blev lavet forskellige asketyper, to med henholdsvis 4,50% og 3,10% indhold af organisk materiale (I,J og K,L) og én med 1,04%, som samtidig også blev knust (O og P). Tabeller for glødetab kan ses i bilag 2. Endvidere blev der også lavet én asketype, hvor den ubearbejdede aske blev knust, for at gøre den mere homogen. Dette kan muligvis have indflydelse på pakningsgraden af de støbte mørtelprøver og derved porevolumen samt densiteten. Styrkesammenhængen for disse prøver kan ses på figur 20:



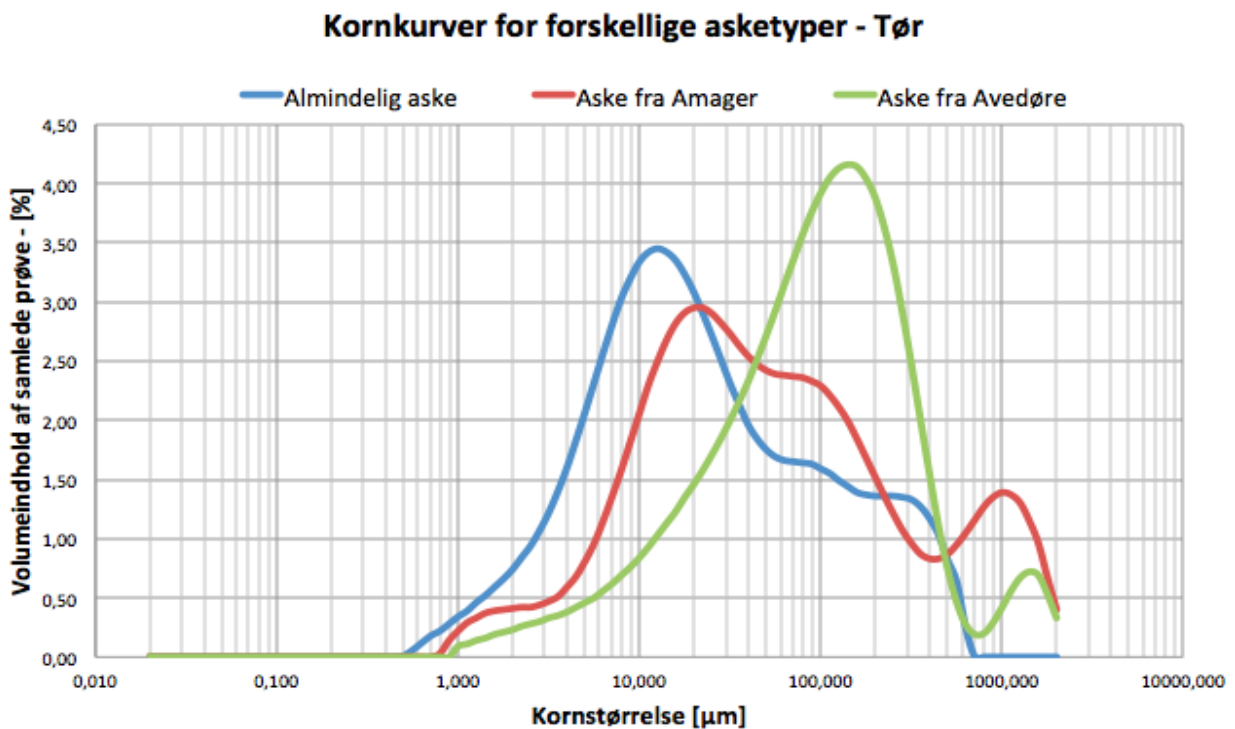
Figur 20 - Styrkeudvikling ved 7-14 døgnet for prøvetype I,J,K,L,M,N,O,P og A

Til figur 20, skal det pointeres at grafen for K ligger under L. Selvom asken er blevet mere homogen efter den er blevet bearbejdet (se figur 8-11 SEM), er styrken ikke blevet bedre. Sammenlignes figur 20 og figur 17 ligger styrkerne efter 14 hærededøgn stort set i samme interval fra ca. 35-42

MPa. Det har derfor ikke været muligt at optimere asken, med hensyn til at få en højere styrke indenfor dette hærdeinterval. Det kunne dog have været spændende at se styrkeudviklingen over længere tid. Især for prøverne, der er blevet brændt, eftersom at indholdet af organiskmateriale er blevet reduceret markant. Her burde der rent teoretisk være en forskel efter længere hærdetid, da der ville være mindre materiale, som kunne ligge og rådne inde i prøven og derved gøre den svagere. Det lavere indhold af organiskmateriale burde dog også give en hvis form for effekt, allerede ved styrkeprøverne efter 7 og 14 døgn. Dette skyldes for det første at organisk materiale ikke bidrager med nogen styrke til prøven, og for det andet kunne det tænkes at prøverne ville få en højere pakningsgrad, når nu asken er blevet finere efter brænding. Det har dog ikke været til at se ud fra resultaterne for styrkeprøvningerne.

Der er i denne sammenhæng, blevet sat spørgsmålstegn ved om hvorvidt det er muligt at ødelægge asken, når den nedbrydes i mindre partikler, da den i forvejen er meget finkornet. Der blev under støbningen observeret at nogle af mørtelprøverne, støbt med brændt aske, smuldrede en lille smule i hjørnerne. Dette var ikke noget, som blev observeret, under støbningen med almindelig aske. Det kan ikke udelukkes, at nogle af de ønskede mineraler i asken, også bliver reduceret, når den brændes ved 550°C. Dette kan have indflydelse på hvordan asken opfører sammen med cementen, hvilket evt. kan ses på styrken.

Det er ikke til at sige helt præcis, hvilken effekt knusningen af asken har, ud fra de opnåede resultater. Generelt knuses asken for at gøre den mere homogen, men det er typisk ved mere grovkornede asketyper. Resultaterne for 7 hærdedøgn, tegner godt for mørtelprøve M, hvor en højere styrke end de andre prøver opnås. Der er dog ikke den store forskel, når 14 hærdedøgn opnås. Hvis der endvidere sammenlignes 14 døgn styrkerne for M og N på figur 20 med B_{ny} og C_{ny} figur 17, kan det ses, at ved knusning fås en svagere styrke. For at give et bud på hvad dette kan skyldes, kigges der endnu engang på kornstørrelserne. Der har været stort fokus på askens sammensætning og partikelstørrelser gennem hele arbejdsforløbet. Sammenlignes den benyttede træaske med fx slamaske fra Avedøre og træaske fra Amager, er størrelsen af partiklerne generelt mindre. Dette er illustreret på figur 21.



Figur 21 - Akkumuleret kornkurve for forskellige asketyper

At asken allerede er så finkornet, i forhold til andre restasker, kan formentlig have indflydelse på omfanget af udbyttet ved knusning af asken med hensyn til styrken. Dette kan muligvis forklare, hvorfor der ikke er den store forskel på styrkerne for den almindelige aske og den knuste aske.

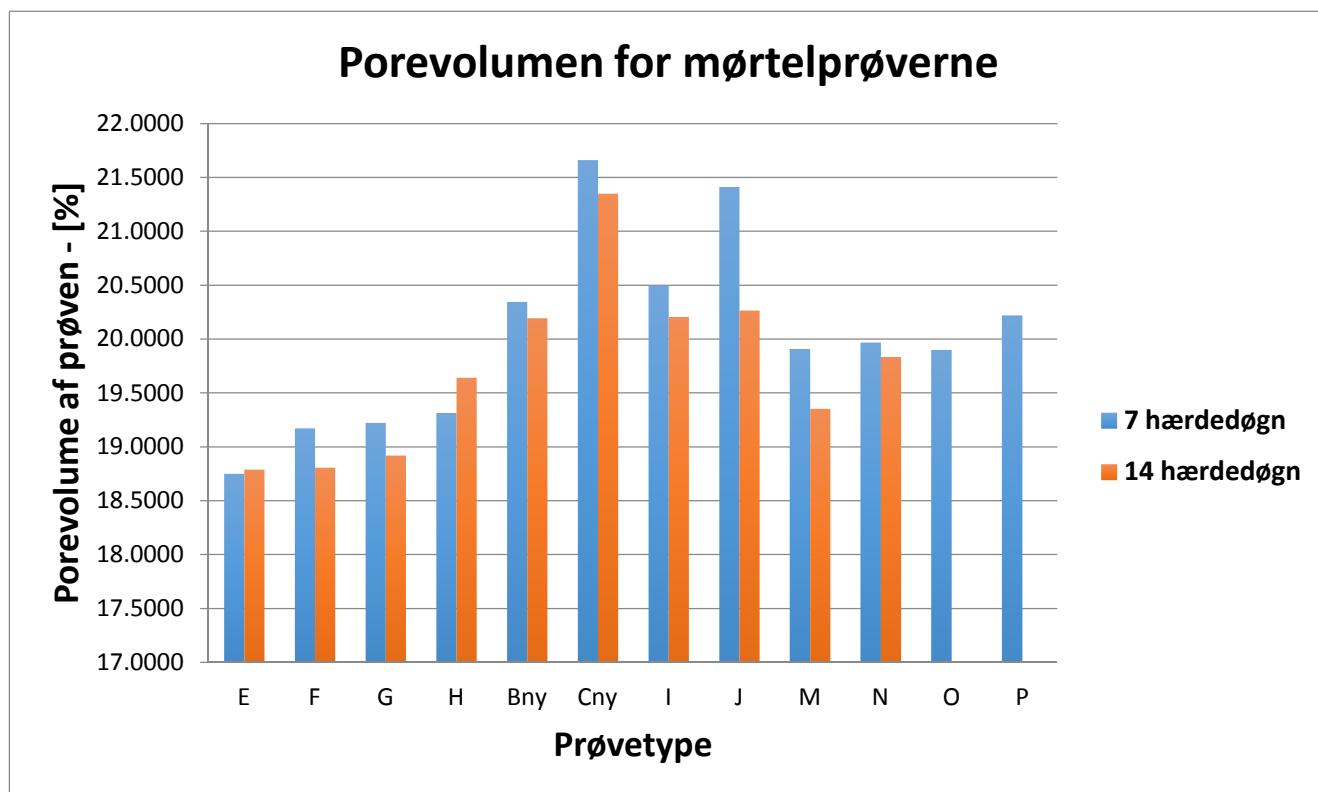
Der har været en generel tendens under styrkemålingerne, at de har varieret meget, og der ikke rigtigt har været nogen sammenhæng at se, ud fra de forskellige blandinger. Det er derfor svært at danne et konkret overblik over, hvordan asken opfører sig når den bruges som cementerstatning. Styrkemålingerne er alt for utilregnelige til at der kan laves et nøjagtigt skøn af, mængden af aske i forhold til styrken. Denne type aske, er altså ikke anbefalelsesværdig til brug i beton, hvor en høj trykstyrke skal opnås, eftersom at undersøgelserne ikke er tilstrækkelig dybdegående. Hvis en høj trykstyrke ikke er nødvendigt, skal det ikke udelukkes at bruge denne aske til betonstøbning. Dette skyldes at den er meget mørk, hvilket kan udnyttes til at danne et hvis æstetisk udtryk i sin konstruktion.

At kombinationen mellem brænding og knusning, ligger tæt på at have den svageste styrke af alle prøverne, var i et vis omfang forventet. Kigges der på figur 13, kan det nemlig ses at denne type aske, er den der klumper mest sammen. Hvis figur 22 fra næste afsnit (afsnit 4.4) her tages i betragtning kan det dog ses, at porevolumen for prøver O og P, ligger gennemsnitligt. Det er altså ikke grundet en større porøsitet at prøverne har lavere styrke. Det kan dog tænkes, at selvom den samlede porevolumen ikke er større end de andre mørtelprøvers, så er størrelsen af porerne større, hvilket kan give udslag på styrken.

4.4 Porevolumen og kapillarsugning

4.4.1 Porevolumen

Porøsiteten for prøverne E, F, G og H har tidligere i opgaven været omtalt, i sammenhæng med trykstyrken af prøverne samt pakningsgraden. For at give et samlet overblik over porevolumen for samtlige af de støbte mørtelprøver henvises der til figur 22.



Figur 22 - Udviklingen af porevolumen fra 7 til 14 dages hærkning

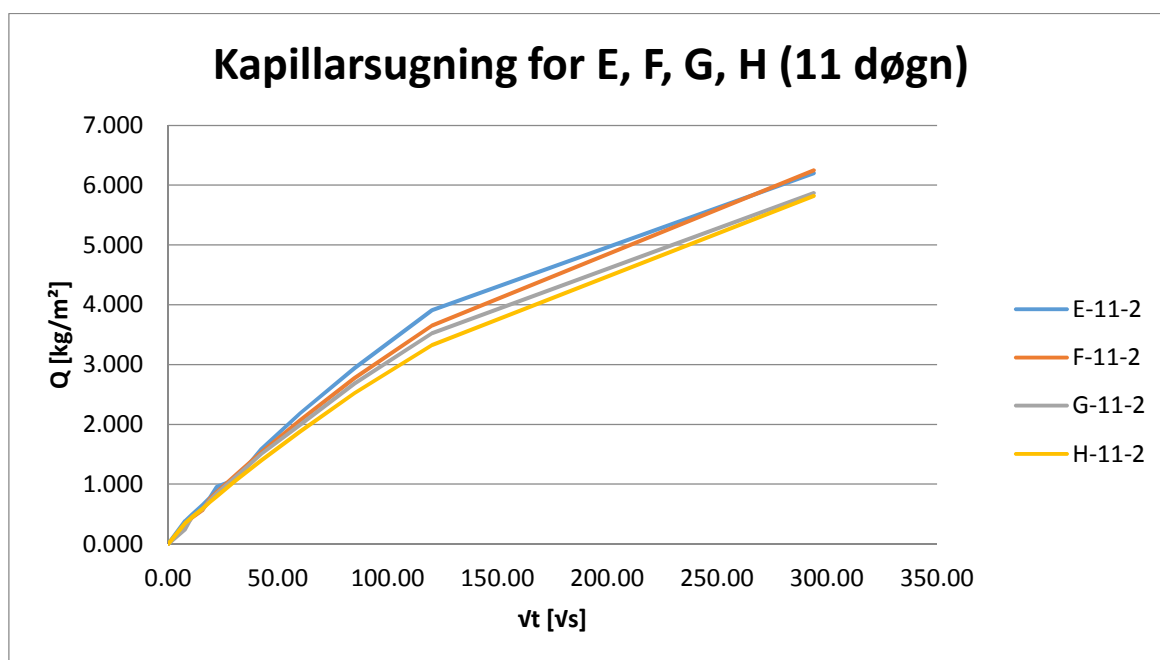
Kigges der på figur 22, er det værd at bemærke at E, F, G og H har et mindre porevolumen end nogle af de andre mørtelprøver. Det er dog umiddelbart uvist hvorfor B_{ny} ikke har et lavere porevolumen end disse prøver, eftersom at aske indholdet i denne er mindre. Det skal hertil knyttes, at prøverne for B_{ny}, C_{ny}, I, J, M, N, O og P, har tørret ved 105°C, mens E, F, G og H har tørret ved 50°C.

Ellers er resultaterne som forventet, både med hensyn til porevolumen ud fra mængden af asken og ud fra hvilken asketype, der benyttes i støbningerne. Endvidere er der en generel tendens til at porevolumen falder fra 7 til 14 døgns hærkning, hvilket stemmer fint overens med, at en større del af prøven er hydratiseret. Det kunne dog forventes at den knuste aske M,N og den brændte aske I,J, havde et mindre porevolumen end den almindelige aske, da de burde være mere homogene.

Kigges der dog på figur 13, som er kornkurver med tør aske, kan det ses at asken klumper sammen og derfor indeholder større partikler end den almindelige aske. Dette kan være årsagen til at porevolumen er højere for disse asketyper.

4.4.2 Kapillarsugning

Der er lavet to kapillarsugningsforsøg for prøverne E, F, G og H, som har hærdet i henholdsvis 11 og 14 dage. Resultaterne for 11 døgns prøverne ses herunder på figur 23, mens resultaterne for 14 døgns prøverne kan ses i bilag 3, side 3-4.



Figur 23 - Kapillarsugningsforsøg for E, F, G og H

Som det kan ses på figuren, var mørtelprøverne ikke færdige med at suge vand efter 4 timer, derfor blev de stående natten over, indtil de havde suget vand i 24 timer. Efter de havde suget vand i 24 timer var de helt vandmættet. For at finde kapillaritetstallet, k , er der lavet lineær regression på resultaterne fra 0-240 minutter, hvilket har givet resultaterne, som ses i tabel 13.

Tabel 13 - Kapillaritetstal for E, F, G og H

Prøve	k [kg/(m ² /√s)]
E-11-2	0,0344
F-11-2	0,0325
G-11-2	0,0314
H-11-2	0,0296

Ud fra tabel 13 ses det ligeledes at kapillaritetstallet falder for mørtelprøven ved erstatning af cement med aske. Kapillaritetstallet ligger normalt mellem 0,05-0,6 for cementmørtel og mellem 0,01-0,3 for beton.¹⁶ Ved sammenligning med disse tal, minder mørtelprøvernes evne til at opsuge vand mest om beton.

¹⁶ Bygningsmaterialer - Grundliggende egenskaber, tabel 5, s. 218

4.5 Sammenligning med teoretisk styrke samt undersøgelse af aktivitetsfaktor

Der er udført adskillige forsøg på asken fra Verdo, for at finde anvendelige egenskaber for denne. De undersøgte muligheder for brug af asken er ikke endt ud i, at asken kan bruges i beton med høj styrke. I dette afsnit vil det blive tjekket hvor meget mørtelprøvernes trykstyrke med iblandet aske, afviger fra de teoretiske værdier, som man får ved brug af bolomeys formel. Det tjekkes samtidig, også ved brug af bolomeys formel, hvilken aktivitetsfaktor de forskellige typer asker har. Ved at finde aktivitetsfaktoren tjekkes det samtidigt også om asken har puzzolanske egenskaber.

Bolomeys formel bruges til at udregne de teoretiske trykstyrker for beton. Denne gælder for beton med et v/c-forhold, der ligger mellem 0,45-1,25. Da formelen er udarbejdet til at finde de karakteristiske trykstyrker for beton, som er den nedre 5 % fraktile af trykstyrken, udregnes nye K-værdier til mørtelprøver ud fra referenceprøverne. Disse nye K-værdier, hvor K₁₁ og K₁₄ er fundet vha. linear interpolation kan ses i tabel 14. I tabellen findes også α -værdier, som bestemmes ud fra cementtypen og terminen, hvilket der ikke er ændret ved. α_{11} og α_{14} er ligeledes fundet vha. lineær interpolation mellem α_7 og α_{28} .

Tabel 24 - K- og α -værdier

K ₇	33,56	α_7	0,60
K ₁₁	36,33	α_{11}	0,58
K ₁₄	38,41	α_{14}	0,57
K ₂₈	37,86	α_{28}	0,50

I bolomeys formel tilføjes nu aktivitetsfaktoren, k, som indgår i beregningerne af v/p-forholdet.

$$\text{Ækvivalent v/p-forhold: } \frac{v}{c+k \cdot p}$$

Dette giver det ækvivalente v/p-forhold, hvor aktivitetsfaktoren, k, normalt ligger på 0,5 for flyveaske og 2,0 for mikrosilica. Da kornstørrelserne for Verdo asken minder om flyveaske og der samtidig ikke er målt trykstyrker, som tyder på en høj aktivitetsfaktor, bruges aktivitetsfaktoren 0,5, og de forventede ækvivalente v/p-forhold udregnes.

Ved brug af de ækvivalente v/p-forhold, de nye K- og α -værdier opnås nu teoretiske styrker, som kan ses i tabel 15. Udregningerne af de teoretiske styrker kan ses i bilag 5.

Tabel 15 - Trykstyrker udregnet med Bolomeys formel, samt trykstyrker målt.

Recept	Målt trykstyrke				Teoretisk trykstyrke				Procentdel af teoretisk trykstyrke			
	7 døgn	11 døgn	14 døgn	28 døgn	7 døgn	11 døgn	14 døgn	28 døgn	7 døgn	11 døgn	14 døgn	28 døgn
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[-]
A	47,0	-	55,1	56,8	47,0	51,6	55,1	56,8	100,0%	-	100,0%	100,0%
B	45,5	-	46,7	42,8	45,3	49,7	53,1	54,9	100,4%	-	87,8%	78,1%
C	42,6	-	34,5	41,8	43,6	47,9	51,2	53,0	97,7%	-	67,4%	78,9%
D	35,8	-	26,3	34,1	39,2	43,2	46,2	48,0	91,3%	-	57,0%	70,9%
E	40,2	41,8	40,1	-	45,0	49,4	52,8	54,5	89,5%	84,7%	75,9%	-
F	34,6	43,8	46,2	-	44,6	49,0	52,4	54,1	77,4%	89,3%	88,3%	-
G	27,2	34,0	36,7	-	44,3	48,7	52,0	53,8	61,4%	70,0%	70,5%	-
H	29,3	35,5	37,1	-	44,0	48,3	51,6	53,4	66,7%	73,6%	71,9%	-
I	32,3	-	36,8	-	45,3	49,7	53,1	54,9	71,3%	-	69,3%	-
J	34,0	-	40,3	-	43,6	47,9	51,2	53,0	77,8%	-	78,8%	-
K	37,5	-	37,8	-	45,3	49,7	53,1	54,9	82,8%	-	71,1%	-
L	37,8	-	37,8	-	43,6	47,9	51,2	53,0	86,6%	-	73,8%	-
M	42,4	-	40,5	-	45,3	49,7	53,1	54,9	93,5%	-	76,2%	-
N	35,7	-	38,9	-	43,6	47,9	51,2	53,0	81,9%	-	75,9%	-
O	37,5	-	32,9	-	45,3	49,7	53,1	54,9	82,7%	-	61,9%	-
P	32,2	-	37,7	-	43,6	47,9	51,2	53,0	73,9%	-	73,7%	-
B _{ny}	39,2	-	46,8	41,1	45,3	49,7	53,1	54,9	86,6%	-	88,2%	75,0%
C _{ny}	36,8	-	41,3	40,9	43,6	47,9	51,2	53,0	84,4%	-	80,7%	77,1%

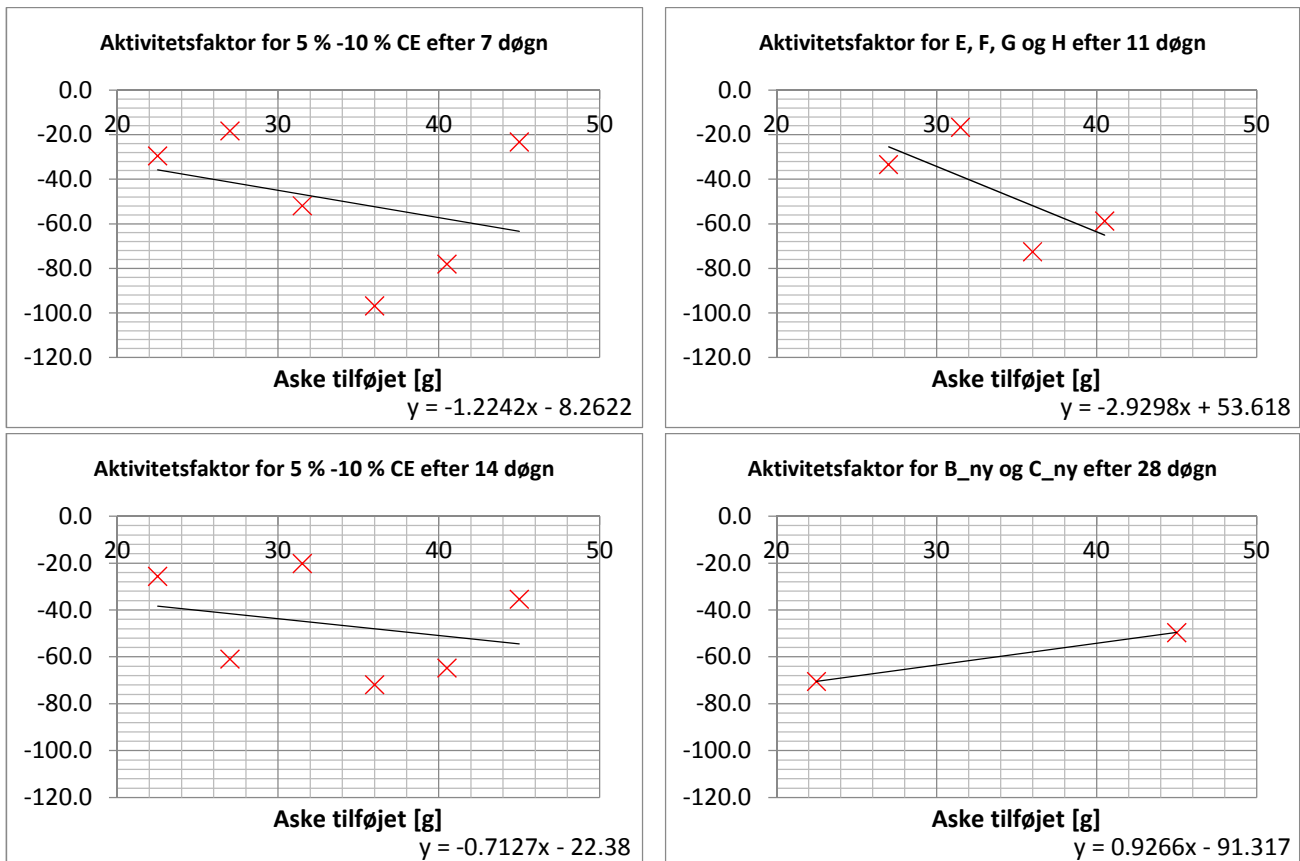
Her ses det, at de prøver, der kommer tættest på den teoretiske styrke er prøverne med ubehandlet aske (B_{ny} og C_{ny} samt E og F), som har omkring 85% af den teoretiske trykstyrke efter 7 og 14 døgn og omkring 75% af den teoretiske trykstyrke efter 28 døgn. Mørtelprøverne med bearbejdet aske ligger på omkring 80% af den teoretiske trykstyrke efter 7 døgn og omkring 70-75% af den teoretiske trykstyrke efter 14 døgn.

Da de målte trykstyrker ligger meget lavt i forhold til de forventede trykstyrker, må det betyde at asken enten er meget dårlig i forhold til brug i beton, eller at der er lavet forkerte antagelser i forbindelse med beregningerne.

Det tilstræbes nu, at finde en passende aktivitetsfaktor. Aktivitetsfaktoren kan findes ved en omskrivning af bolomeys formel:

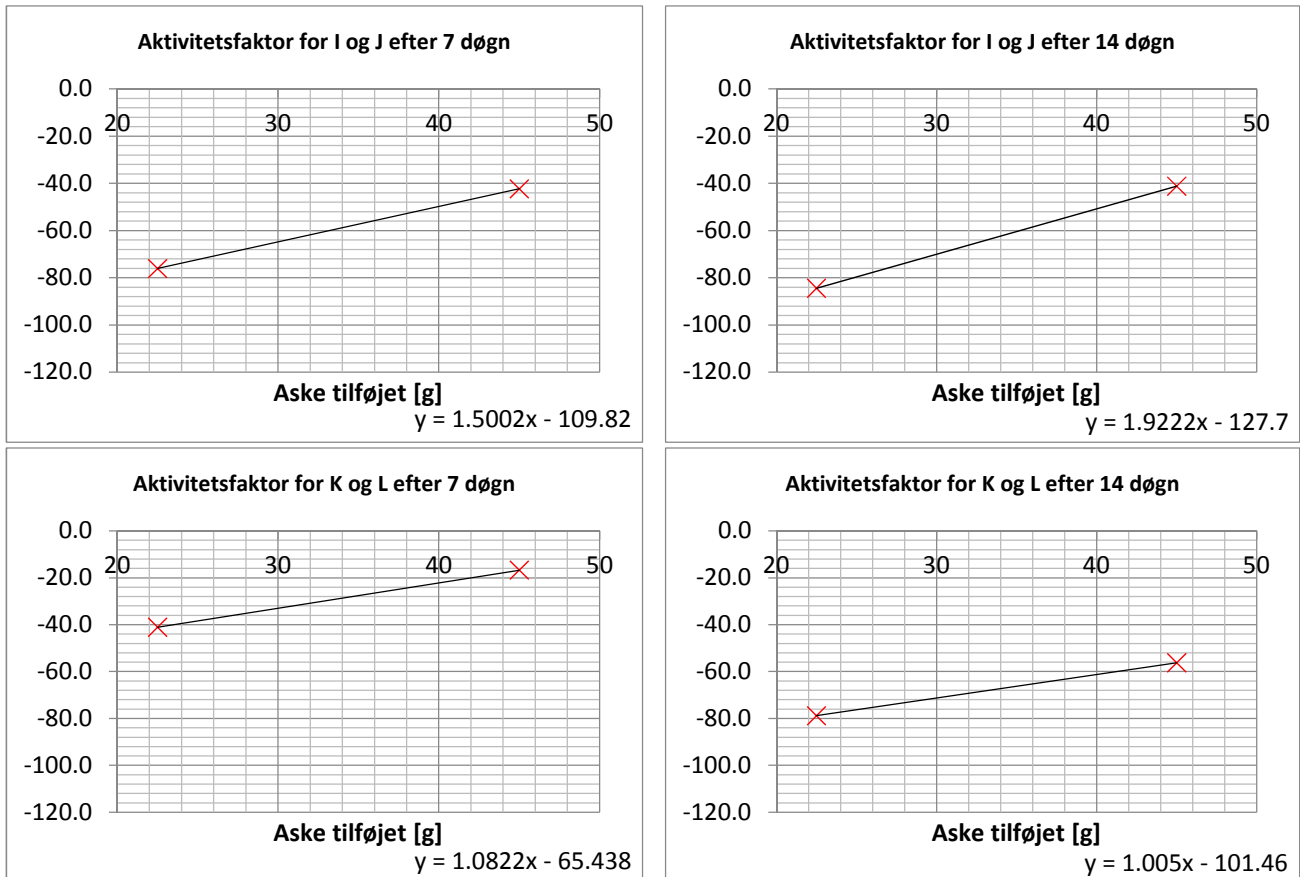
$$f_c = K \cdot \left(\frac{1}{\frac{v}{c + k \cdot p}} - \alpha \right) \Leftrightarrow \left(\frac{f_c}{K} + \alpha \right) \cdot v - c = k \cdot p$$

hvor $\left(\frac{f_c}{K} + \alpha \right) \cdot v - c$ plottes på y-aksen, og p ud ad x-aksen. Dette resulterer i at hældningen på den rette linje er aktivitetsfaktoren, k .



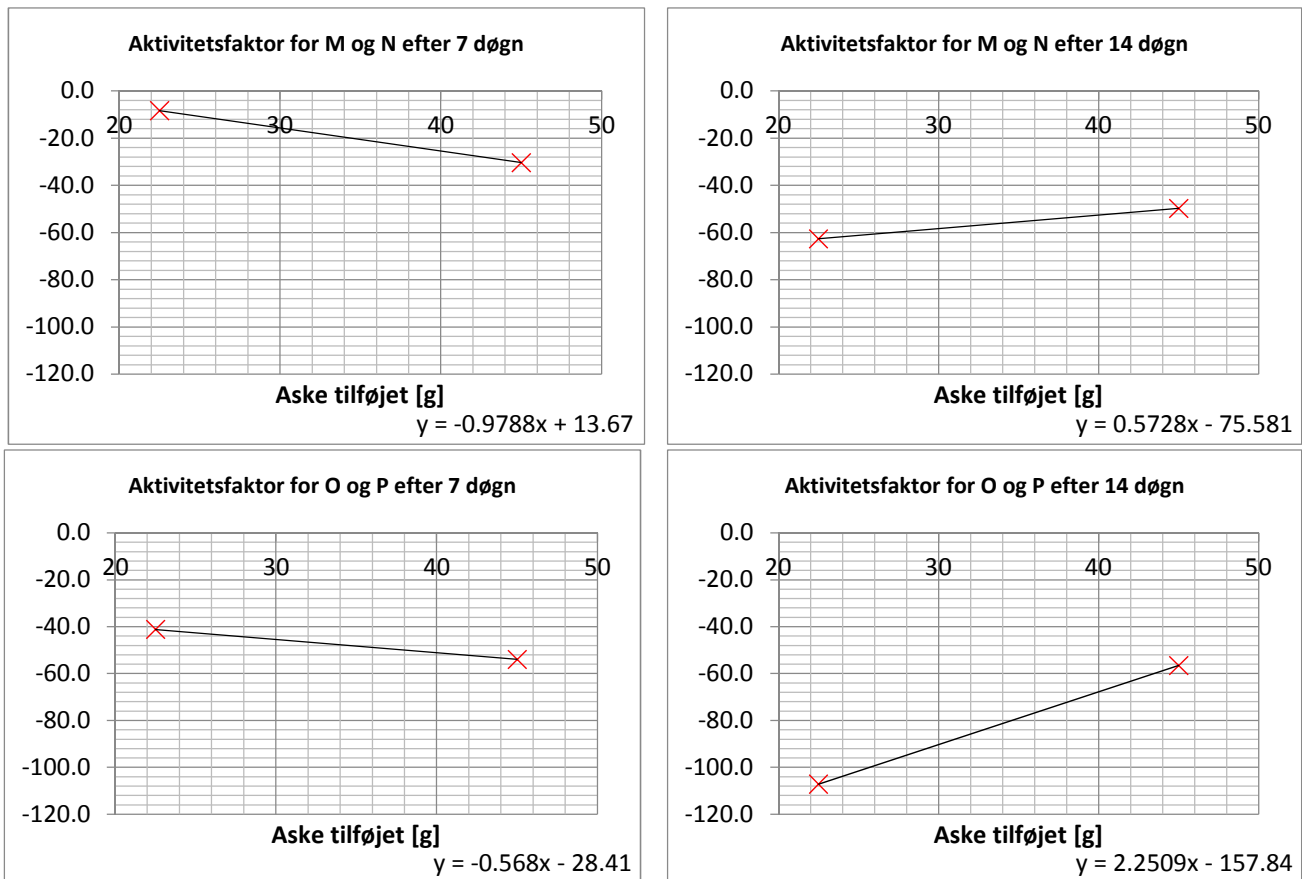
Figur 24 - Aktivitetsfaktorer for ubehandlede asker

For den ubehandlede aske (figur 24) er aktivitetsfaktoren negativ i 3 ud af 4 tilfælde, hvor det ene tilfælde, hvor den ligger på 0,93, er for den situation med færrest målinger. Ud fra denne tendens, tolkes det, at den ubehandlede aske enten har en meget lille puzzolansk effekt eller slet ingen. Det skal bemærkes at den linjere tendenslinje ikke passer særlig godt på punkterne, da disse ligger meget spredt. Der kigges nu på den brændte aske, som ses på figur 25.



Figur 25 - Aktivitetsfaktorer for brændte asker

For den brændte aske er aktivitetsfaktoren positiv i alle 4 tilfælde, og den ligger i intervallet fra 1,08 til 1,92. Ud fra aktivitetsfaktoren for den brændte aske tolkes det, at denne har en puzzolansk effekt. Hvis aktivitetsfaktoren for et pulver, der tilsættes en beton, ligger på 1,92, betyder det at cementen skal erstattes 1,92:1. Altså skal der næsten tilføjes halvt så meget pulver, som der er blevet tilføjet i dette tilfælde, for at få et ækvivalent v/p-forhold på det samme. Dette stemmer dog ikke overens med resultaterne for styrkeprøverne, da disse viste en reducereing i styrke ift. referenceprøverne. Der må derfor være tale om en lille puzzolansk effekt. Det skal samtidigt bemærkes at det statistiske grundlag bag den fundne aktivitetsfaktor er svagt, da der kun er to sæt resultater som grundlag for hver k-værdi.



Figur 26 - Aktivitetsfaktorer for knust og både brændt&knust aske

For både den knuste aske og den knuste og brændte aske (figur 26) er aktivitetsfaktoren negativ for målingerne ved 7 døgn og positiv for målingerne ved 14 døgn. Det har været tendensen for alle asketyperne i dette projekt, at aktivitetsfaktorerne bliver højere desto længere prøverne har hærdet. Det stemmer meget fint overens med teorien om puzzolaner, hvor et pulver med puzzolanske egenskaber først begynder at reagere efter cementen er hydratiseret, da puzzolanerne reagerer med det calcium hydroxid, som cementens hydratisering har skabt. Det vil sige at en puzzolansk reaktion er langsom, hvilket altså stemmer overens med at aktivitetsfaktoren er mere markant efter længere tids hærkning. Det bemærkes samtidigt at tendenslinjen for alle prøverne med positiv hældning, skærer y-aksen i en negativ værdi.

4.6 Videre forskning

4.6.1 Indledende laboratorieforsøg

I forbindelse med de indledende laboratorieforsøg ville det ved evt. videre forskning være oplagt at udføre flere forsøg, for at få en stærkere statistisk base for forsøgene. I samme forbindelse blev grænseværdier for nikkel, cadmium, sulfat og alkalier overskredet. Det kunne i forbindelse med dette være interessant at udføre en udvaskningstest på støbte mørtelprøver, for at se hvor mange af disse stoffer i virkeligheden ville komme ud i miljøet og hvor stor en del, der ville blive bundet i mørtlen.

4.6.2 Kornkurver

Eftersom at der var stor forskel på kornkurverne i tør og våd tilstand, ville det være i interesse at arbejde videre med dette, for at give et korrekt billede af hvordan askens sammensætning er, idet den blandes i mørtelprøverne. Et mere præcis billedet af askens sammensætning, vil til videre forskning, hjælpe til med at finde måder hvorpå asken kan optimeres til brug som cementerstatning i støbning af beton.

4.6.3 Trykstyrkeforsøg

Resultaterne for støbningerne, beskriver kun tendenser, for en kort hærdetid, for styrkeudviklingen ved brug af aske. Fremtidige styrkeforsøg bør derfor foregå over en længere periode, for at give en bedre billede af styrkeudviklingen. Især i forlængelse af at nogle af asketyperne har puzzolansk efftekt, vil den længere hærdetid være godt for det overordnede resultat.

Disse tendenser bør undersøges nærmere, samt en mere grundig karakteristik af askens kemiske egenskaber, for endegyldigt at kunne fastlægge om asken kan bruges eller ej.

Hvis det ønskes at forske videre inden for brug af denne aske, ville det være oplagt at prøve, at støbe beton med asken iblandet. I dette projekt, er det antaget at mørtelprøverne kan repræsentere beton, da beton ved brud ikke bryder igennem stenene, men igennem mørtlen. Dette kunne være interessant at undersøge.

5 Konklusion

Ved den indledende karakteristik af asken blev det bestemt, at indholdet af tungmetallerne cadmium og nikkel er for højt iht. bekendtgørelsen om anvendelse af restprodukter til bygge- og anlægsarbejder. Det blev ligeledes bestemt at glødetabet samt indholdet af alkalier og sulfat iht. til DS/EN 450-1 er for højt i forhold til det tilladelige i flyveaske. I forhold til de brugte recepter overholdes chloridindholdsklasse 0.1, og asken kan derfor bruges til alle typer armering.

Askens sammensætning er blevet undersøgt ved en SEM-undersøgelse, hvor det kunne ses at den ubearbejdede aske, var inhomogen. Af denne årsag blev asken knust, brændt og en kombination af de to, for at gøre den mere homogen. Dette lykkedes, men efter at asken var blevet bearbejdet, havde den en tendens til at klumpe sammen, og derved danne et højere indhold af større partikler. Dette kunne ses ved undersøgelse af porevolumen af mørtelprøverne, hvor prøverne med bearbejdet aske, generelt havde et større porevolumen end prøver med almindeligt aske. Kigges der på styrkemålingerne har det ikke været muligt at opnå styrker, svarende til styrken af referenceprøven, hvor intet cement erstattes af aske. Der har været en generel tendens til at styrkerne af mørtelprøverne støbt med ubearbejdet aske, har haft en højere styrke, end prøver med bearbejdet aske. Det har altså ikke været muligt at optimere asken, ved at gøre den mere homogen vha. knusning, brænding eller en kombination af de to.

Ved en omskrivning af bolomeys formel kunne en aktivitetsfaktor, k , bestemmes ud fra trykprøvningerne på mørtelprismene. Denne aktivitetsfaktor blev bestemt til negativ, men tiltagende over længere hærdetid, for den ubehandlede aske. For de fire prøver med to forskellige typer brændt aske blev k bestemt til en positiv værdi, som lå mellem 1,08 og 1,92. Til sammenligning ligger kulflyveaske på 0,50 og mikrosilica på 2,00. For knust aske samt knust&brændt aske blev fundet både negative og positive aktivitetsfaktorer - igen var k større desto længere hærdetid mørtelprøven havde fået. Ud fra de bestemte aktivitetsfaktorer kan det konkluderes at brændt aske besidder puzzolanske egenskaber. Disse puzzolanske egenskaber må dog være små, da trykprøvningerne viste en reducere i styrke ift. referenceprøverne. Ubehandlet aske besidder enten ingen eller meget få puzzolanske egenskaber. Den mest markante forbedring ift. puzzolansk effekt fås altså ved at fjerne det organiske indhold fra asken, mens knusning har vist en ganske lille forbedring. Ved bearbejdning af asken på begge måder, fås tvetydige resultater.

6 Referenceliste

- 1** - *Bygningsingeniørernes materialer - uddrag af Materialebogen*. Redigeret af: Thomas Rump. 1. udgave, 2. oplag. Nyt Teknisk Forlag, 2008. (Bog).
- 2** - *Aalborg Portland*. (2012). Cement og beton - en håndbog om cement, beton og mørtel, 19. udgave.
- 3** - Retsinformation: Slambekendtgørelsen. Udgivet af Miljøministeriet. Sidst opdateret: 23.12.2006. Internetadresse: <https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=13056> - Besøgt d. 02.01.2015 (Internet)
- 4** - Retsinformation: Bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret, uforurenede bygge- og anlægsaffald. Udgivet af Miljøministeriet. Sidst opdateret: 21.12.2010.
Internetadresse: <https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=134831> - Besøgt d. 02.01.2015 (Internet)
- 5** - Kumar Mehta, P. og Paulo J. M. Monteiro: *Concrete - Microstructure, Properties, and Materials*. 1. udgave, 4. oplag. Mc Graw Hill Education, 2006. (Bog)
- 6** - B. Carlsen, Asger og Søren R. Petersen: *Slamaske i beton*. DTU Byg, 07.01.2013.
- 7** - Lyngholm, Katharina: *Brug af aske i beton - nye problemer nye muligheder*. DTU Byg, 07.01.2013.
- 8** - R. Gotfredsen, Finn og Anders Nielsen: *Bygningsmaterialer - Grundlæggende egenskaber*. 1. udgave, 6. forlag. Polyteknisk Forlag, 2010. (Bog)

7 Figuroversigt

Figur 1 – Beton styrke på baggrund af v/c-forholdet (Bolomeys formel).....	12
Figur 2 – De tre fraktioner som sten inddeles i, ved brug som tilslag.....	13
Figur 3 – Uorganiske bindemidlers placering efter kemisk sammensætning.....	14
Figur 4 – Delmaterialer og faser i beton.....	15
Figur 5 – Arbejdskurver for tryk for henholdsvis tilslag, beton og cementpasta.....	16
Figur 6 – Arbejdskurve for trækstyrke – Beton.....	18
Figur 7 – Arbejdskurve for trækstyrke – Armeret Beton.....	19
Figur 8 – Træaske forstørret 160 gange.....	34
Figur 9 – Knust træaske forstørret 160 gange.....	34
Figur 10 – Brændt træaske forstørret 160 gange.....	34
Figur 11 – Brændt & Knust træaske forstørret 160 gange.....	34
Figur 12 – Akkumuleret kornkurver for alm.-, knust-, brændt- og brændt & knust træaske.....	35
Figur 13 – Kornkurver for alm.-, knust-, brændt- og brændt & knust træaske – Tør.....	36
Figur 14 – Kornkurver for alm.-, knust-, brændt- og brændt & knust træaske – Våd.....	37
Figur 15 – Trykstyrker for indledende mørtelprøver.....	39
Figur 16 – Styrkeudvikling ved 7-28 døgn for prøvetype A, B, C, D, Bny og Cny.....	40
Figur 17 – Styrkeudvikling ved 7-14 døgn for prøvetype Bny, Cny, A, E, F, G og H.....	41
Figur 18 – Vand og aske i blandingsforhold 1:1 – Efter 7 dages hærkning.....	42
Figur 19 – Porøsitet af prøverne E, F, G og H – Efter 7 og 14 dages hærkning.....	43
Figur 20 – Styrkeudvikling ved 7-14 døgn for prøvetype I, J, K, L, M, N, O, P og A	44
Figur 21 – Akkumuleret kornkurve for forskellige asketyper.....	46
Figur 22 – Udvikling af porevolumen fra 7 til 14 dages hærkning.....	48
Figur 23 – Kapillarsugningsforsøg for E, F, G og H.....	49
Figur 24 – Aktivitetsfaktorer for ubehandlede asker.....	53
Figur 25 – Aktivitetsfaktorer for brændte asker	54
Figur 26 – Aktivitetsfaktorer for knust og både brændt & knust aske	55

8 Tabeloversigt

Tabel 1 – Typiske værdier for K i Bolomeys formel på baggrund af danske cementer.....	17
Tabel 2 – Udførte forsøg inklusiv formål og beskrivelse.....	24
Tabel 3 – Blandingsrecepter benyttet i projektet.....	27
Tabel 4 – Resultater fra indledende karakteristik af aske.....	29
Tabel 5 – Krav til glødetab.....	29
Tabel 6 – Resultater fra oplukning.....	30
Tabel 7 – Tjek af tungmetaller iht. Slambekendtgørelsen.....	31
Tabel 8 – Tjek af tungmetaller iht. Bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter til bygge- og anlægsarbejder.....	31
Tabel 9 – Vandopløselige kationer.....	32
Tabel 10 – Vandopløselige anioner.....	32
Tabel 11 – Maksimale chloridindhold iht. DS/EN 206-1.....	32
Tabel 12 – Beregning af chloridindhold.....	32
Tabel 13 – Kapillaritetstal for E, F, G og H	49
Tabel 14 – K- og α -værdier.....	51
Tabel 15 - Trykstyrker udregnet med Bolomeys formel, samt trykstyrker målt.....	52

9 Bilag

Bilagsoversigt:

1. Styrkemålinger af mørtelprøver
2. Glødetab
3. Porøsitet, densitet og kapillarsugning
4. Kornkurver og SEM
5. Sammenligning med teoretisk styrke samt udregning af aktivitetsfaktor
6. Mail udveksling med Verdo (Kraftvarmeværk – Randers)
7. Vandopløselige kationer og anioner
8. Forsøgsbeskrivelser

Bilag 1 – Styrkemålinger af mørtelprøver

8 døgns mørtelprøver

Prøve	Prøvenummer	Dato for støbning	Dato for styrketest	Højde	Længde	Træk	Tryk 1	Tryk 2	Bøjetrækstyrke	Trykstyrke 1	Trykstyrke 2	Middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Kommentar						
				[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]								
B1	4	24/09/14	02/10/14	40,20	160,10	329	725	691	3,7	44,9	42,8	45,5	50,1	41,0	OK	OK																		
B2	5	24/09/14	02/10/14	40,10	160,30	303		754	3,4	0,0	46,9							-	OK															
B3	6	24/09/14	02/10/14	40,50	160,20	303	790	736	3,3	48,2	44,9							OK	OK															
C1	7	24/09/14	02/10/14	40,80	160,10	302	705	700	3,3	42,4	42,1	42,6	46,9	38,3	OK	OK																		
C2	8	24/09/14	02/10/14	40,70	160,10	312	700	749	3,4	42,3	45,2							OK	OK															
C3	9	24/09/14	02/10/14	40,10	160,20	321	711	636	3,6	44,2	39,6							OK	OK															
D1	10	24/09/14	02/10/14	40,00	160,10	284	461	678	3,2	28,8	42,4	34,8	38,3	31,3	OK	IKKE OK				IKKE OK	-													
D2	11	24/09/14	02/10/14	40,20	160,20	309	582	575	3,5	36,0	35,6							OK	OK	33,3	36,7	30,0	OK	OK	34,5	37,9	31,0	OK	OK	35,8	39,4	32,2	OK	OK
D3	12	24/09/14	02/10/14	40,20	160,40	271	580	490	3,1	35,9	30,3							OK	OK				OK	OK				OK	IKKE OK				OK	-

14 døgns mørtelprøver

Prøve	Prøvenummer	Dato for støbning	Dato for styrketest	Højde	Længde	Træk	Tryk 1	Tryk 2	Bøjetrækstyrke	Trykstyrke 1	Trykstyrke 2	Middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Kommentar							
				[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]					
B1	13	24/09/14	08/10/14	40,70	160,10	394	655	765	4,3	39,5	46,2	45,5	50,0	40,9	IKKE OK	OK															
B2	14	24/09/14	08/10/14	40,50	160,10	340	733	760	3,7	44,7	46,3							OK	OK	46,7	51,3	42,0	OK	OK							
B3	15	24/09/14	08/10/14	40,50	160,10	360	754	823	4,0	46,0	50,2							OK	OK												
C1	16	24/09/14	08/10/14	40,60	160,40	331	577	577	3,6	35,0	35,0	33,7	37,1	30,3	OK	OK															
C2	17	24/09/14	08/10/14	40,40	160,30	352	483	584	3,9	29,6	35,8							IKKE OK	OK	34,5	38,0	31,1	-	OK							Stub 1 tilrettet
C3	18	24/09/14	08/10/14	40,40	160,40	365	571	521	4,0	35,0	31,9							OK	OK				OK	OK							
D1	19	24/09/14	08/10/14	40,20	160,20	273	445	514	3,1	27,5	31,8	28,4	31,2	25,5	OK	OK				OK	IKKE OK								OK	-	
D2	20	24/09/14	08/10/14	40,20	160,20	311	535	448	3,5	33,1	27,7							IKKE OK	OK	27,4	30,2	24,7	-	OK	26,3	29,0	23,7	-	OK		
D3	21	24/09/14	08/10/14	40,10	160,50	318	400	405	3,6	24,9	25,2							OK	OK				OK	OK							Stub 1 meget lille

28 døgns mørtelprøver

Prøve	Prøvenummer	Dato for støbning	Dato for styrketest	Højde	Længde	Træk	Tryk 1	Tryk 2	Bøjetrækstyrke	Trykstyrke 1	Trykstyrke 2	Middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Kommentar				
				[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]						
A1	1	24/09/14	22/10/14	40,10	160,90	426	604	787	15,9	37,6	48,9	45,0	49,5	40,5	IKKE OK	OK	46,5	51,2	41,9	-	OK	47,7	52,5	42,9	-	OK	Trykprøve 1 tilpasset med hammer	
A2	2	24/09/14	22/10/14	40,10	161,10	399	671	751	15,0	41,7	46,7				OK	OK				OK	OK				-	OK		
A3	3	24/09/14	22/10/14	40,50	160,70	396	741	821	14,4	45,2	50,1				OK	OK				OK	OK				OK	OK		
B1	22	24/09/14	22/10/14	40,60	160,40	380	609	640	13,7	36,9	38,8	43,7	48,1	39,4	OK	OK	41,7	45,8	37,5	IKKE OK	OK	42,8	47,1	38,6	-	OK		
B2	23	24/09/14	22/10/14	40,30	160,20	369	682	727	13,5	42,0	44,8				OK	OK				OK	OK				OK	OK		
B3	24	24/09/14	22/10/14	40,20	160,20	381	875	740	14,1	54,1	45,8				IKKE OK	OK				-	OK				-	OK		
C1	25	24/09/14	22/10/14	40,20	160,30	367	720	667	13,6	44,6	41,3	42,7	46,9	38,4	OK	OK	41,8	46,0	37,6	OK	OK							
C2	26	24/09/14	22/10/14	40,80	160,10	379	736	674	13,4	44,2	40,5				OK	OK				OK	OK						OK	OK
C3	27	24/09/14	22/10/14	41,20	161,20	349	799	653	12,1	47,1	38,5				IKKE OK	OK				-	OK						-	OK
D1	28	24/09/14	22/10/14	40,40	160,80	291	564	546	10,6	34,6	33,5	36,2	39,8	32,6	OK	OK	35,3	38,9	31,8	OK	OK	34,1	37,5	30,7	OK	OK		
D2	29	24/09/14	22/10/14	40,30	160,50	338	555	553	12,4	34,2	34,0				OK	OK				OK	OK				OK	OK		
D3	30	24/09/14	22/10/14	40,10	160,20	349	653	649	13,0	40,6	40,4				IKKE OK	OK				-	OK				-	OK		

7 døgns mørtelprøver

Prøve	Prøvenummer	Dato for støbning	Dato for styrketest	Højde	Længde	Træk	Tryk 1	Tryk 2	Bøjetrækstyrke	Trykstyrke 1	Trykstyrke 2	Middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Kommentar	
				[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]			
B1,ny	67	20/11/14	27/11/14	40,90	160,30	369	689	0	3,9	41,2	0,0	39,2	43,2	35,3	OK	-									
B2,ny	68	20/11/14	27/11/14	40,70	160,00	369	653	675	4,0	39,4	40,7				OK	OK									
B3,ny	69	20/11/14	27/11/14	41,00	160,20	343	0	598	3,6	0,0	35,6				-	OK									
C1,ny	70	20/11/14	27/11/14	40,30	160,20	338	492	602	3,8	30,3	37,1	35,2	38,7	31,7	IKKE OK	OK	36,8	40,5	33,1	OK	-				
C2,ny	71	20/11/14	27/11/14	41,10	160,20	329	598	0	3,5	35,4	0,0				OK	-									
C3,ny	72	20/11/14	27/11/14	40,60	160,20	343	0	626	3,7	0,0	38,0				-	OK									

14 døgns mørtelprøver

Prøve	Prøvenummer	Dato for støbning	Dato for styrketest	Højde	Længde	Træk	Tryk 1	Tryk 2	Bøjetrækstyrke	Trykstyrke 1	Trykstyrke 2	Middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Kommentar	
				[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]			
B1,ny	91	20/11/14	04/12/14	40,05	160,05	335	772	0	3,8	48,1	0,0	46,8	51,5	42,2	OK	-									
B2,ny	92	20/11/14	04/12/14	40,08	162,00	347	752	0	3,9	46,8	0,0				OK	-									
B3,ny	93	20/11/14	04/12/14	40,08	161,00	343	756	729	3,9	47,1	45,4				OK	OK									
C1,ny	94	20/11/14	04/12/14	41,20	160,50	352	0	640	3,7	0,0	37,7	41,3	45,5	37,2	-	OK									
C2,ny	95	20/11/14	04/12/14	40,02	162,50	347	696	0	4,0	43,5	0,0				OK	-									
C3,ny	96	20/11/14	04/12/14	40,02	161,00	365	664	684	4,2	41,5	42,7				OK	OK									

28 døgns mørtelprøver

Prøve	Prøvenummer	Dato for støbning	Dato for styrketest	Højde	Længde	Træk	Tryk 1	Tryk 2	Bøjetrækstyrke	Trykstyrke 1	Trykstyrke 2	Middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Kommentar										
				[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]												
B1,ny	133	20/11/14	18/12/14	40,40	160,00	349	573	720	3,9	35,1	44,1	40,1	44,1	36,1	IKKE OK	OK	41,1	45,3	37,0	-	OK													
B2,ny	134	20/11/14	18/12/14	40,80	160,20	349	660	675	3,8	39,6	40,5				OK	OK				OK	OK													
B3,ny	135	20/11/14	18/12/14	40,30	160,20	350	696	626	3,9	42,9	38,5				OK	OK				OK	OK									-				
C1,ny	136	20/11/14	18/12/14	40,80	160,40	352	680	595	3,8	40,8	35,7	38,5	42,4	34,7	OK	OK	39,8	43,8	35,9	OK	-	40,9	45,0	36,8	OK	-								
C2,ny	137	20/11/14	18/12/14	40,60	160,50	376	526	651	4,1	31,9	39,5				IKKE OK	OK				OK	OK												-	OK
C3,ny	138	20/11/14	18/12/14	40,60	160,30	327	714	656	3,6	43,3	39,8				OK	OK				OK	OK													OK

7 døgns mørtelprøver

Prøve	Prøvenummer	Dato for støbning	Dato for styrketest	Højde	Længde	Træk	Tryk 1	Tryk 2	Bøjetrækstyrke	Trykstyrke 1	Trykstyrke 2	Middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Kommentar												
				[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]														
E1	31	06/11/14	13/11/14	40,50	160,50	370	678	0	4,1	41,3	0,0	40,2	44,3	36,2	OK	-																				
E2	32	06/11/14	13/11/14	40,80	162,00	394	0	651	4,2	0,0	39,1				-	OK																				
E3	33	06/11/14	13/11/14	40,80	161,00	387	635	705	4,2	38,1	42,4				OK	OK																				
F1	34	06/11/14	13/11/14	41,20	160,50	385	0	508	4,0	0,0	29,9	34,9	38,3	31,4	-	IKKE OK	34,6	38,0	31,1	-	-				Hærdet skævt i formen											
F2	35	06/11/14	13/11/14	40,20	162,50	359	611	506	4,0	37,8	31,3				OK	OK				OK	OK															
F3	36	06/11/14	13/11/14	40,20	161,00	340	0	653	3,8	0,0	40,4				-	IKKE OK																				
G1	37	06/11/14	13/11/14	40,20	160,50	345	0	575	3,9	0,0	35,6	32,4	35,7	29,2	-	OK	30,0	33,0	27,0	-	IKKE OK	27,2	29,9	24,5	-	-	Pause i støbning pga. rundvisning									
G2	38	06/11/14	13/11/14	40,40	161,50	340	0	649	3,8	0,0	39,8				-	IKKE OK																		-	-	Pause i støbning pga. rundvisning
G3	39	06/11/14	13/11/14	42,00	161,20	316	495	464	3,1	28,1	26,3				OK	OK				OK	OK															
H1	40	06/11/14	13/11/14	40,90	160,80	318	526	0	3,4	31,4	0,0	29,3	32,2	26,4	OK	-																				
H2	41	06/11/14	13/11/14	40,90	162,00	374	443	484	4,0	26,5	28,9				OK	OK																				
H3	42	06/11/14	13/11/14	40,90	160,60	352	0	508	3,8	0,0	30,4				-	OK																				

11 døgns mørtelprøver

Prøve	Prøvenummer	Dato for støbning	Dato for styrketest	Højde	Længde	Træk	Tryk 1	Tryk 2	Bøjetrækstyrke	Trykstyrke 1	Trykstyrke 2	Middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Kommentar										
				[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]												
E1	43	06/11/14	17/11/14	40,60	160,00	360	640	0	3,9	38,8	0,0	39,8	43,7	35,8	OK	-	41,8	46,0	37,6	OK	-													
E2	44	06/11/14	17/11/14	40,20	160,10	370	725	0	4,2	44,9	0,0				OK	-				OK	-													
E3	45	06/11/14	17/11/14	40,80	160,10	370	695	559	4,0	41,8	33,6				OK	IKKE OK				OK	-													
F1	46	06/11/14	17/11/14	40,90	160,30	379	0	0	4,1	0,0	0,0	43,8	48,2	39,4	-	-																		
F2	47	06/11/14	17/11/14	40,10	160,20	347	680	0	3,9	42,3	0,0				OK	-																		
F3	48	06/11/14	17/11/14	40,30	160,40	365	722	725	4,1	44,5	44,6				OK	OK																		
G1	49	06/11/14	17/11/14	40,20	160,70	323	503	0	3,6	31,1	0,0	34,9	38,4	31,4	OK	-	34,0	37,4	30,6	OK	-													
G2	50	06/11/14	17/11/14	40,50	160,20	333	615	0	3,7	37,5	0,0				IKKE OK	-																		
G3	51	06/11/14	17/11/14	40,40	160,20	360	553	606	4,0	33,9	37,1				OK	OK				OK	OK													
H1	52	06/11/14	17/11/14	40,40	160,10	313	542	0	3,5	33,2	0,0	35,5	39,1	32,0	OK	-																		
H2	53	06/11/14	17/11/14	40,20	160,30	323	593	564	3,6	36,7	34,9				OK	OK																		
H3	54	06/11/14	17/11/14	40,20	160,30	318	604	0	3,6	37,4	0,0				OK	-																		

14 døgns mørtelprøver

Prøve	Prøvenummer	Dato for støbning	Dato for styrketest	Højde [mm]	Længde [mm]	Træk [kN]	Tryk 1 [kN]	Tryk 2 [kN]	Bøjetrækstyrke [Mpa]	Trykstyrke 1 [Mpa]	Trykstyrke 2 [Mpa]	Middel [Mpa]	Plus 10% middel [Mpa]	Minus 10% middel [Mpa]	Tjek		Ny middel [Mpa]	Plus 10% middel [Mpa]	Minus 10% middel [Mpa]	Tjek		Ny middel [Mpa]	Plus 10% middel [Mpa]	Minus 10% middel [Mpa]	Tjek		Kommentar			
E1	55	06/11/14	20/11/14	40,20	160,00	347	790	0	3,9	48,9	0,0	40,3	44,3	36,3	IKKE	-	37,4	41,2	33,7	-	-	40,1	44,1	36,0	-	-				
E2	56	06/11/14	20/11/14	40,80	160,00	381	635	0	4,1	38,1	0,0				OK	-				OK	-				OK	-				
E3	57	06/11/14	20/11/14	40,70	160,10	394	695	533	4,3	42,0	32,2				OK	OK				OK	IKKE				OK	OK	-			
F1	58	06/11/14	20/11/14	39,85	160,50	340	475	0	3,9	29,9	0,0	42,2	46,4	37,9	IKKE	-	46,2	50,9	41,6	-	-									
F2	59	06/11/14	20/11/14	40,40	160,50	342	730	772	3,8	44,7	47,3				OK	OK				OK	OK	OK	OK							
F3	60	06/11/14	20/11/14	40,10	160,30	352	751	0	4,0	46,7	0,0				OK	-				OK	-	OK	-							
G1	61	06/11/14	20/11/14	40,60	160,70	331	593	0	3,6	36,0	0,0	36,7	40,3	33,0	OK	-														
G2	62	06/11/14	20/11/14	40,20	161,20	343	631	0	3,9	39,0	0,0				OK	-	OK	-	OK	-										
G3	63	06/11/14	20/11/14	40,20	160,20	337	595	562	3,8	36,8	34,8				OK	OK	OK	OK	OK	OK										
H1	64	06/11/14	20/11/14	40,40	160,10	300	608	0	3,3	37,3	0,0	35,6	39,2	32,0	OK	-														
H2	65	06/11/14	20/11/14	40,40	160,20	356	508	0	3,9	31,1	0,0				IKKE	-	OK	-	37,1	40,8	33,4	-	-							
H3	66	06/11/14	20/11/14	40,30	160,30	325	627	575	3,6	38,6	35,4				OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK							

7 døgns mørtelprøver

Prøve	Prøvenummer	Dato for støbning	Dato for styrketest	Højde [mm]	Længde [mm]	Træk [kN]	Tryk 1 [kN]	Tryk 2 [kN]	Bøjetrækstyrke [Mpa]	Trykstyrke 1 [Mpa]	Trykstyrke 2 [Mpa]	Middel [Mpa]	Plus 10% middel [Mpa]	Minus 10% middel [Mpa]	Tjek		Ny middel [Mpa]	Plus 10% middel [Mpa]	Minus 10% middel [Mpa]	Tjek		Ny middel [Mpa]	Plus 10% middel [Mpa]	Minus 10% middel [Mpa]	Tjek		Kommentar	
I1	73	26/11/14	03/12/14	40,50	160,50	387	533	0	4,3	32,5	0,0	30,5	33,6	27,5	OK	-	32,3	35,5	29,1	-	-							
I2	74	26/11/14	03/12/14	40,40	160,00	369	542	0	4,1	33,2	0,0				OK	-				OK	-	OK	-					
I3	75	26/11/14	03/12/14	40,90	160,10	378	421	521	4,0	25,2	31,1				IKKE	OK				OK	OK	OK						
J1	76	26/11/14	03/12/14	41,00	160,20	368	557	0	3,9	33,1	0,0	34,0	37,4	30,6	OK	-												
J2	77	26/11/14	03/12/14	41,00	160,50	350	540	0	3,7	32,1	0,0				OK	-	OK	-	OK	-								
J3	78	26/11/14	03/12/14	40,80	160,50	341	560	615	3,7	33,6	36,9				OK	OK	OK	OK	OK	OK								
K1	79	26/11/14	03/12/14	39,90	160,10	356	495	609	4,1	31,1	38,3	36,4	40,1	32,8	IKKE	OK	37,5	41,2	33,7	-	OK						Stub 1 rettet med hammer	
K2	80	26/11/14	03/12/14	39,90	160,00	358	560	593	4,1	35,2	37,2				OK	OK				OK	OK	OK	OK					
K3	81	26/11/14	03/12/14	39,90	160,10	360	586	637	4,1	36,8	40,0				OK	OK				OK	OK	OK	OK					
L1	82	26/11/14	03/12/14	41,00	160,00	320	617	685	3,4	36,7	40,7	37,8	41,6	34,0	OK	OK												
L2	83	26/11/14	03/12/14	40,80	160,10	347	640	600	3,7	38,4	36,0				OK	OK	OK	OK	OK	OK								
L3	84	26/11/14	03/12/14	41,10	160,00	323	642	620	3,4	38,0	36,7				OK	OK	OK	OK	OK	OK								
M1	85	26/11/14	03/12/14	40,50	160,00	350	711	0	3,9	43,3	0,0	42,4	46,6	38,1	OK	-												
M2	86	26/11/14	03/12/14	40,50	160,00	379	696	0	4,2	42,4	0,0				OK	-	OK	-	OK	-								
M3	87	26/11/14	03/12/14	40,00	160,10	325	666	674	3,7	41,6	42,1				OK	OK	OK	OK	OK	OK								

14 døgns mørtelprøver

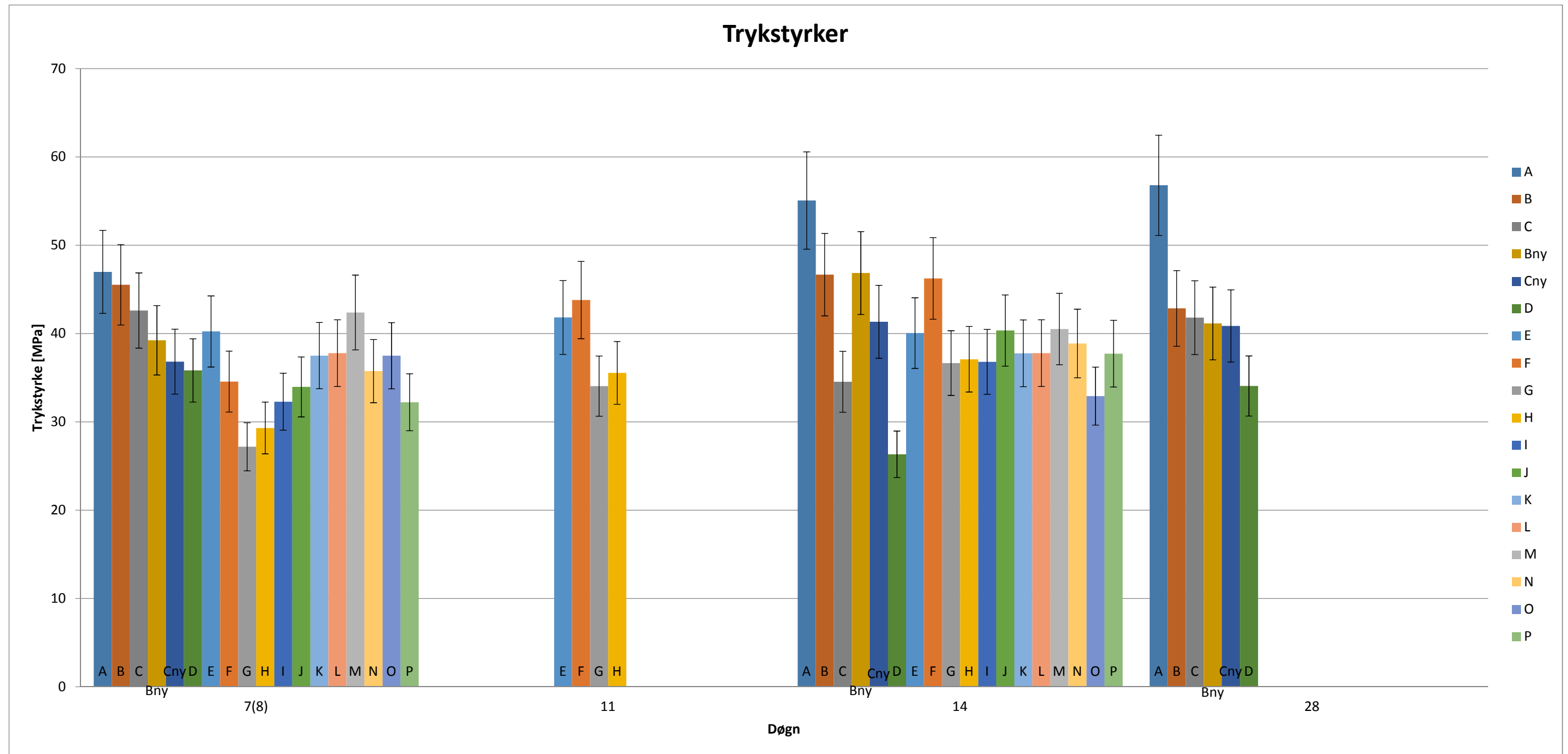
Prøve	Prøvenummer	Dato for støbning	Dato for styrketest	Højde	Længde	Træk	Tryk 1	Tryk 2	Bøjetrækstyrke	Trykstyrke 1	Trykstyrke 2	Middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek		Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek		Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek		Kommentar				
				[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
I1	97	26/11/14	10/12/14	40,60	160,20	367	644	0	4,0	39,1	0,0	35,5	39,1	32,0	OK	-	36,8	40,5	33,1	OK	-							Smuldrede ved 300 kN (tryk)			
I2	98	26/11/14	10/12/14	40,50	160,10	349	577	0	3,8	35,2	0,0				OK	-				OK	-										
I3	99	26/11/14	10/12/14	40,50	160,50	356	593	519	3,9	36,2	31,6				OK	IKKE OK				OK	-										
J1	100	26/11/14	10/12/14	41,00	160,10	355	711	0	3,8	42,3	0,0	40,3	44,4	36,3	OK	-															
J2	101	26/11/14	10/12/14	41,20	160,20	351	666	0	3,7	39,2	0,0				OK	-													OK	-	
J3	102	26/11/14	10/12/14	40,60	160,20	358	631	685	3,9	38,3	41,6				OK	OK													OK	OK	
K1	103	26/11/14	10/12/14	40,30	160,20	349	615	675	3,9	37,9	41,6	38,0	41,8	34,2	OK	OK	39,3	43,2	35,3	OK	OK	37,8	41,5	34,0							
K2	104	26/11/14	10/12/14	40,00	160,70	352	608	725	4,0	38,0	45,3				OK	OK				OK	IKKE OK										
K3	105	26/11/14	10/12/14	40,90	160,30	347	562	528	3,7	33,6	31,6				OK	IKKE OK				OK	-										
L1	106	26/11/14	10/12/14	41,40	160,30	387	553	559	4,0	32,3	32,6	36,1	39,8	32,5	IKKE OK	OK	36,9	40,6	33,2	-	IKKE OK	38,0	41,8	34,2	-	-					
L2	107	26/11/14	10/12/14	40,90	160,20	349	604	638	3,7	36,1	38,1				OK	OK				OK	OK										
L3	108	26/11/14	10/12/14	41,40	160,20	338	684	649	3,5	39,9	37,9				OK	OK				OK	OK										
M1	109	26/11/14	10/12/14	41,50	160,50	367	693	0	3,8	40,2	0,0	40,5	44,6	36,5	OK	-															
M2	110	26/11/14	10/12/14	41,00	161,00	370	665	0	3,9	39,6	0,0				OK	-														OK	-
M3	111	26/11/14	10/12/14	40,90	160,30	358	669	707	3,8	40,0	42,3				OK	OK														OK	OK
N1	112	26/11/14	10/12/14	40,70	160,30	351	559	0	3,8	33,7	0,0	37,6	41,3	33,8	IKKE OK	-	38,9	42,8	35,0	-	-										
N2	113	26/11/14	10/12/14	40,90	160,20	347	682	0	3,7	40,8	0,0				OK	-				OK	-										
N3	114	26/11/14	10/12/14	41,00	160,40	383	631	644	4,1	37,5	38,3				OK	OK				OK	OK										

7 døgns mørtelprøver

Prøve	Prøvenummer	Dato for støbning	Dato for styrketest	Højde	Længde	Træk	Tryk 1	Tryk 2	Bøjetrækstyrke	Trykstyrke 1	Trykstyrke 2	Middel	Plus 10% middel	Minus 10% midde l	Tjek		Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% midde l	Tjek		Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek		Kommentar	
				[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]
N1	115	03/12/14	10/12/14	40,60	160,20	347	624	0	3,8	37,9	0,0	37,8	41,6	34,0	OK	-	35,7	39,3	32,2	OK	-							
N2	116	03/12/14	10/12/14	40,70	160,40	332	555	0	3,6	33,5	0,0				OK	-				OK	-							
N3	117	03/12/14	10/12/14	40,80	160,50	338	597	734	3,6	35,9	44,1	39,0	42,9	35,1	OK	IKKE OK	37,5	41,2	33,7	OK	-							Tryk 2 - prøve muligvis for bred, så den fik ekstra styrke
O1	118	03/12/14	10/12/14	40,80	160,90	347	622	0	3,7	37,4	0,0				OK	-				OK	-							
O2	119	03/12/14	10/12/14	41,40	160,80	360	608	0	3,7	35,5	0,0				IKKE OK	OK				-	OK							
O3	120	03/12/14	10/12/14	40,60	160,20	329	718	653	3,6	43,6	39,6	32,2	35,4	29,0	OK	OK	30,2	33,3	27,2	-	OK	32,2	35,4	29,0	OK	-		
P1	121	03/12/14	10/12/14	40,70	160,20	334	562	0	3,6	33,9	0,0				OK	-				IKKE OK	-							
P2	122	03/12/14	10/12/14	41,10	160,50	340	444	0	3,6	26,3	0,0				OK	-				OK	-							
P3	123	03/12/14	10/12/14	41,00	160,10	345	638	513	3,7	38,0	30,5				IKKE OK	OK				-	OK							

14 døgns mørtelprøver

Prøve	Prøvenummer	Dato for støbning	Dato for styrketest	Højde	Længde	Træk	Tryk 1	Tryk 2	Bøjetrækstyrke	Trykstyrke 1	Trykstyrke 2	Middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Ny middel	Plus 10% middel	Minus 10% middel	Tjek	Kommentar		
				[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]				
O1	127	03/12/14	17/12/14	40,80	160,20	365	658	568	3,9	39,5	34,1	34,9	38,4	31,4	IKKE OK	OK	34,0	37,4	30,6	-	OK	32,9	36,2	29,6	-	OK
O2	128	03/12/14	17/12/14	40,50	160,40	381	524	555	4,2	31,9	33,8				OK	OK				OK	OK					
O3	129	03/12/14	17/12/14	40,50	160,40	370	521	626	4,1	31,8	38,2				OK	OK				OK	IKKE OK					
P1	130	03/12/14	17/12/14	41,20	160,20	387	439	586	4,0	25,9	34,5	35,7	39,3	32,2	IKKE OK	OK	37,7	41,5	33,9	-	OK					
P2	131	03/12/14	17/12/14	41,20	160,30	356	653	669	3,7	38,5	39,4				OK	OK				OK	OK					
P3	132	03/12/14	17/12/14	41,00	160,40	350	607	674	3,7	36,1	40,1				OK	OK				OK	OK					



Bilag 2- Glødetab

Onsdag d. 19/11-14 - 2 timers brænding - Prøve 1 (Mørtelprøver – I og J)

Prøve nr.	Digle vægt [g]	Aske [g]	Digle + aske efter [g]	Aske efter [g]	Glødetab [%]
1	51,6624	19,7423	69,3981	17,7357	10,16396266
2	53,3185	19,5621	70,8214	17,5029	10,52647722
3	50,8888	23,2381	71,7303	20,8415	10,31323559
4	53,2312	22,1813	73,1077	19,8765	10,39073454
5	48,1177	20,4135	66,3816	18,2639	10,53028633
Samlet		105,1373		94,2205	
Gennemsnit					10,38493927

Torsdag d. 20/11-14 - 1,5 times brænding - Prøve 2 (Mørtelprøver – K og L)

Prøve nr.	Digle vægt [g]	Aske [g]	Digle + aske efter [g]	Aske efter [g]	Glødetab [%]
1	53,3115	22,9883	74,3799	21,0684	8,351639747
2	50,8830	22,8740	71,8012	20,9182	8,55031914
3	53,2245	22,5477	73,7235	20,4990	9,086070863
4	48,1123	22,1283	68,2702	20,1579	8,904434593
5	51,6585	23,1885	72,6642	21,0057	9,413286759
Samlet		113,7268		103,6492	
Gennemsnit					8,86115022

Torsdag d. 27/11-14 - 4 timers brænding (Mørtelprøver – O og P)

Prøve nr.	Digle vægt [g]	Aske [g]	Digle + aske efter [g]	Aske efter [g]	Glødetab [%]
1	50,8902	28,2227	75,5418	24,6516	12,65328973
2	50,3214	28,9021	77,6822	27,3608	5,332830486
3	50,2324	30,2038	76,9316	26,6992	11,60317576
4	51,6670	26,0285	74,1621	22,4951	13,57511958
5	48,1190	30,0575	74,1930	26,0740	13,25293188
6	54,3586	29,0709	79,5634	25,2048	13,29886588
Samlet		172,4855		152,4855	
Gennemsnit					12,87667656

Målingen markeret med rød, er ikke medregnet i det gennemsnitlige glødetab.

Forsøg til kontrol af glødetab - Mandag d. 15/11-14 - 1 timers

Prøve nr.	Digle vægt [g]	Aske [g]	Digle + aske efter [g]	Aske efter [g]	Glødetab [%]
1	13,6373	2,4924	15,8000	2,1627	13,2282
2	13,7099	2,5173	15,8855	2,1756	13,5741
1	10,3683	3,4701	13,3352	2,9669	14,5010
2	10,0604	3,3738	12,9505	2,8901	14,3369
3	14,0163	3,3108	16,8586	2,8423	14,1507
4	14,3463	3,6903	17,5340	3,1877	13,6195
Samlet		13,8450		11,8870	
Gennemsnit					13,9017

Onsdag d. 26/11-14 - 2 timers samt 2,5 times brænding

Prøve nr.	Brænding [time]	Digle vægt [g]	Aske [g]	Digle + aske efter [g]	Aske efter [g]	Glødetab [%]	Gennemsnit [%]
1	2	50,8872	27,1053	75,0942	24,2070	10,69274275	10,65063526
2	2	53,2308	25,7934	76,2879	23,0571	10,60852776	
3	2,5	53,3248	27,0688	77,2208	23,8960	11,72124365	11,76298059
4	2,5	51,6641	26,6834	75,1976	23,5335	11,80471754	
Samlet			106,6509		94,6936		

Bilag 3 – Porøsitet og densitet

Porøsitet for 7 Hærdedøgn

Prøve type	Prøve nr.	Vægt tør		Vandmættet over vand		Vandmættet under vand		Volumen faststof		Volumen af åbne porer		Porevolume		Tørstofdensitet	
		[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[m ³]	[m ³]	[m ³]	[m ³]	[%]	[%]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
E	7-E-1	267,37	273,44	291,71	297,96	163,43	167,17	0,1283	0,1308	0,0243	0,0245	18,9741	18,7519	2084,27	2090,56
	7-E-2	279,51		304,21		170,91		0,1333		0,0247		18,5296			
F	7-F-1	274,58	269,025	300,52	293,89	167,61	164,26	0,1329	0,1296	0,0259	0,0249	19,5170	19,1728	2065,91	2075,57
	7-F-2	263,47		287,26		160,91		0,1264		0,0238		18,8287			
G	7-G-1	287,56	269,985	314,35	295,015	175,68	164,85	0,1387	0,1302	0,0268	0,0250	19,3192	19,2232	2073,70	2074,21
	7-G-2	252,41		275,68		154,02		0,1217		0,0233		19,1271			
H	7-H-1	273,41	270,785	298,8	296,035	166,92	165,3	0,1319	0,1307	0,0254	0,0253	19,2524	19,3144	2073,17	2071,23
	7-H-2	268,16		293,27		163,68		0,1296		0,0251		19,3765			
Bny	7-Bny-1	275,99	276,685	302,93	303,84	172,26	170,33	0,1307	0,1335	0,0269	0,0272	20,6168	20,3451	2112,11	2073,22
	7-Bny-3	277,38		304,75		168,4		0,1364		0,0274		20,0733			
Cny	7-Cny-2	286,34	280,93	316,07	309,995	178,24	175,805	0,1378	0,1342	0,0297	0,0291	21,5701	21,6621	2077,49	2093,97
	7-Cny-3	275,52		303,92		173,37		0,1306		0,0284		21,7541			
I	7-I-1	284,74	279,58	311,41	306,005	180,65	177,07	0,1308	0,1289	0,0267	0,0264	20,3961	20,4962	2177,58	2168,25
	7-I-2	274,42		300,6		173,49		0,1271		0,0262		20,5963			
J	7-J-1	280,34	278,39	308,92	306,54	176,48	175,075	0,1324	0,1315	0,0286	0,0282	21,5796	21,4113	2116,73	2117,60
	7-J-3	276,44		304,16		173,67		0,1305		0,0277		21,2430			
M	7-M-1	273,13	273,985	298,54	299,685	169,3	170,595	0,1292	0,1291	0,0254	0,0257	19,6611	19,9089	2113,35	2122,44
	7-M-2	274,84		300,83		171,89		0,1289		0,0260		20,1567			
N	7-N-1	278,3	276,69	304,6	303,15	171,87	170,64	0,1327	0,1325	0,0263	0,0265	19,8147	19,9686	2096,74	2088,05
	7-N-2	275,08		301,7		169,41		0,1323		0,0266		20,1225			
O	7-O-1	256	261,84	280,15	286,705	158,17	161,765	0,1220	0,1249	0,0242	0,0249	19,7983	19,8992	2098,70	2095,79
	7-O-2	267,68		293,26		165,36		0,1279		0,0256		20,0000			
P	7-P-1	272,97	271,705	299,82	298,04	168,75	167,805	0,1311	0,1302	0,0269	0,0263	20,4852	20,2194	2082,63	2086,29
	7-P-2	270,44		296,26		166,86		0,1294		0,0258		19,9536			

Porøsitet for 14 Hærdedøgn

Prøve type	Prøve nr.	Vægt tør [g]	snit [g]	Vandmættet over vand [g]	snit [g]	Vandmættet under vand [g]	snit [g]	Volumen faststof [m ³]	snit [m ³]	Volumen af åbne porer [m ³]	snit [m ³]	Porevolumen [%]	snit [%]	Tørstofdensitet [kg/m ³]	snit [kg/m ³]
E	14-E-1	297,72	297,72	324,63	324,63	181,41	181,41	0,1432	0,1432	0,0269	0,0269	18,7893	18,7893	2078,76	2078,76
	-	0		0		0		0,0000		0,0000		0,0000			
F	14-F-2	265,81	265,81	289,84	289,84	162,06	162,06	0,1278	0,1278	0,0240	0,0240	18,8058	18,8058	2080,22	2080,22
	-	0		0		0		0,0000		0,0000		0,0000			
G	14-G-1	273,51	273,51	298,23	298,23	167,58	167,58	0,1307	0,1307	0,0247	0,0247	18,9208	18,9208	2093,46	2093,46
	-	0		0		0		0,0000		0,0000		0,0000			
H	14-H-2	263,21	263,21	288,33	288,33	160,43	160,43	0,1279	0,1279	0,0251	0,0251	19,6403	19,6403	2057,94	2057,94
	-	0		0		0		0,0000		0,0000		0,0000			
Bny	14-5-1	284,19	276,725	311,62	303,54	175,52	170,755	0,1361	0,1328	0,0274	0,0268	20,1543	20,1953	2088,10	2083,90
	14-5-2	269,26		295,46		165,99		0,1295		0,0262		20,2363		2079,71	
Cny	14-10-1	271,91	265,905	300,05	293,195	168,71	165,385	0,1313	0,1278	0,0281	0,0273	21,4253	21,3499	2070,28	2080,76
	14-10-2	259,9		286,34		162,06		0,1243		0,0264		21,2745		2091,25	
I	14-5-1	285,85	286,63	313,33	314,425	176,41	176,875	0,1369	0,1376	0,0275	0,0278	20,0701	20,2066	2087,72	2083,84
	14-5-2	287,41		315,52		177,34		0,1382		0,0281		20,3430		2079,97	
J	14-10-1	256,79	259,485	281,65	284,44	158,76	161,29	0,1229	0,1232	0,0249	0,0250	20,2295	20,2638	2089,59	2107,03
	14-10-2	262,18		287,23		163,82		0,1234		0,0251		20,2982		2124,46	
M	14-5-1	285,55	289,62	311,98	316,175	176,92	178,95	0,1351	0,1372	0,0264	0,0266	19,5691	19,3548	2114,25	2110,61
	14-5-2	293,69		320,37		180,98		0,1394		0,0267		19,1405		2106,97	
N	14-10-1	280,05	278,1	306,7	304,525	172,34	171,29	0,1344	0,1332	0,0267	0,0264	19,8348	19,8334	2084,33	2087,31
	14-10-2	276,15		302,35		170,24		0,1321		0,0262		19,8320		2090,30	

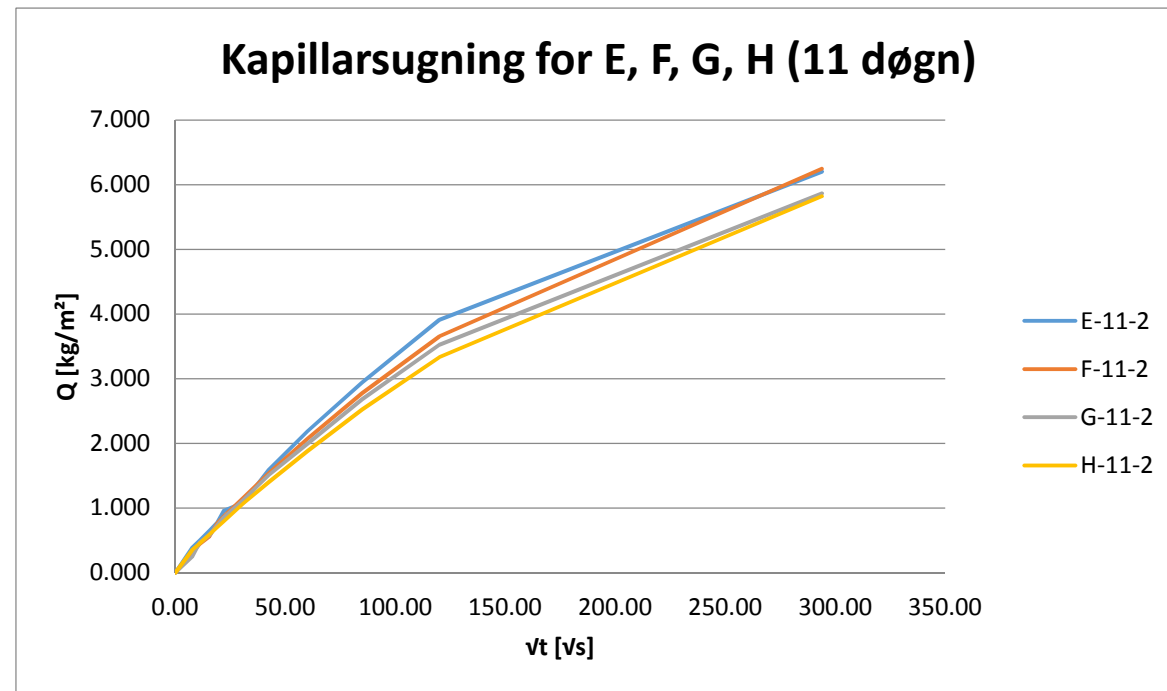
Kapillarsugning for E, F, G og H efter 11 døgns hærkning

Temp. i rum: 24 grader				Temp. vand: 22 grader				Opstart 11-12-2014 kl. 8.50							
E-11-2				F-11-2				G-11-2				H-11-2			
	Bredde [mm]	Længde [mm]	Højde [mm]		Bredde [mm]	Længde [mm]	Højde [mm]		Bredde [mm]	Længde [mm]	Højde [mm]		Bredde [mm]	Længde [mm]	Højde [mm]
	40	78	40		40	78	40		39	82	40		40	83	40
t [min]	√t [vs]	m _t [g]	Q [kg/m ²]	t [min]	√t [vs]	m _t [g]	Q [kg/m ²]	t [min]	√t [vs]	m _t [g]	Q [kg/m ²]	t [min]	√t [vs]	m _t [g]	Q [kg/m ²]
0	0.00	266.70	0.000	0	0.00	272.47	0.000	0	0.00	261.94	0.000	0	0.00	277.99	0.000
1	7.75	267.91	0.388	1	7.75	273.43	0.308	1	7.75	262.73	0.247	1	7.75	279.15	0.349
2	10.95	268.25	0.497	2	10.95	273.85	0.442	2	10.95	263.42	0.463	2	10.95	279.48	0.449
4	15.49	268.73	0.651	4	15.49	274.23	0.564	4	15.49	263.80	0.582	4	15.49	279.95	0.590
6	18.97	269.12	0.776	6	18.97	274.85	0.763	6	18.97	264.28	0.732	6	18.97	280.31	0.699
8	21.91	269.67	0.952	8	21.91	275.18	0.869	8	21.91	264.65	0.847	8	21.91	280.62	0.792
16	30.98	270.08	1.083	16	30.98	276.10	1.163	16	30.98	265.55	1.129	16	30.98	281.55	1.072
30	42.43	271.65	1.587	30	42.43	277.26	1.535	30	42.43	266.76	1.507	30	42.43	282.63	1.398
60	60.00	273.52	2.186	60	60.00	278.92	2.067	60	60.00	268.32	1.995	60	60.00	284.23	1.880
120	84.85	275.87	2.939	120	84.85	281.13	2.776	120	84.85	270.52	2.683	120	84.85	286.36	2.521
240	120.00	278.90	3.910	240	120.00	283.87	3.654	240	120.00	273.21	3.524	240	120.00	289.04	3.328
1440	293.94	286.04	6.199	1440	293.94	291.96	6.247	1440	293.94	280.70	5.866	1440	293.94	297.31	5.819

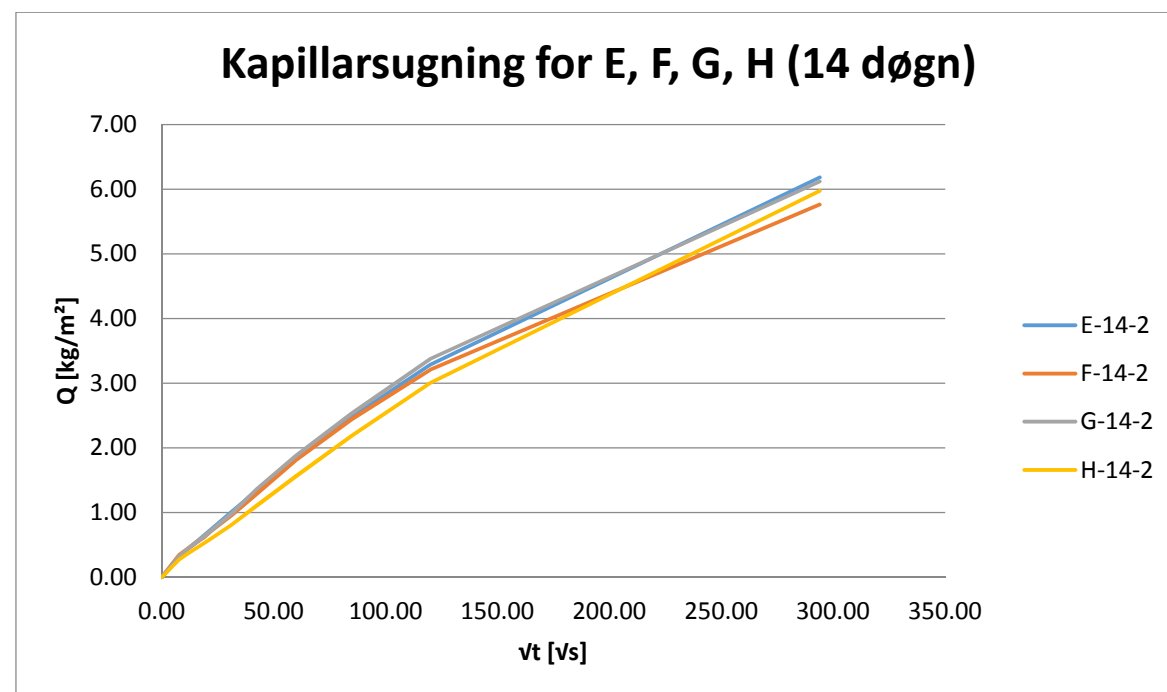
Kapillarsugning for E, F, G og H efter 14 døgns hærkning

Temp. i rum: 22 grader				Temp. vand: 20 grader				Opstart 11-12-2014 kl. 9.10							
E-14-2				F-14-2				G-14-2				H-14-2			
	Bredde [mm]	Længde [mm]	Højde [mm]		Bredde [mm]	Længde [mm]	Højde [mm]		Bredde [mm]	Længde [mm]	Højde [mm]		Bredde [mm]	Længde [mm]	Højde [mm]
	40.5	80	40		40	83	40		40	82	40		40	84	40
t [min]	√t [vs]	m _t [g]	Q [kg/m ²]	t [min]	√t [vs]	m _t [g]	Q [kg/m ²]	t [min]	√t [vs]	m _t [g]	Q [kg/m ²]	t [min]	√t [vs]	m _t [g]	Q [kg/m ²]
0	0.00	271.80	0.000	0	0.00	273.98	0.000	0	0.00	274.70	0.000	0	0.00	280.35	0.000
1	7.75	272.81	0.312	1	7.75	275.10	0.337	1	7.75	275.75	0.320	1	7.75	281.25	0.268
2	10.95	273.15	0.417	2	10.95	275.39	0.425	2	10.95	276.09	0.424	2	10.95	281.52	0.348
4	15.49	273.56	0.543	4	15.49	275.76	0.536	4	15.49	276.46	0.537	4	15.49	281.86	0.449
6	18.97	273.89	0.645	6	18.97	276.03	0.617	6	18.97	276.79	0.637	6	18.97	282.13	0.530
8	21.91	274.16	0.728	8	21.91	276.32	0.705	8	21.91	277.04	0.713	8	21.91	282.34	0.592
16	30.98	275.05	1.003	16	30.98	277.15	0.955	16	30.98	277.91	0.979	16	30.98	283.06	0.807
30	42.43	276.12	1.333	30	42.43	278.27	1.292	30	42.43	279.18	1.366	30	42.43	284.07	1.107
60	60.00	277.77	1.843	60	60.00	280.01	1.816	60	60.00	280.86	1.878	60	60.00	285.60	1.563
120	84.85	279.81	2.472	120	84.85	282.09	2.443	120	84.85	283.01	2.534	120	84.85	287.69	2.185
240	120.00	282.44	3.284	240	120.00	284.62	3.205	240	120.00	285.77	3.375	240	120.00	290.44	3.003
1440	293.94	291.83	6.182	1440	293.94	293.10	5.759	1440	293.94	294.76	6.116	1440	293.94	300.42	5.973

Graf over kapillarsugning for E, F, G og H efter 11 døgns hærkning



Graf over kapillarsugning for E, F, G og H efter 14 døgns hærkning



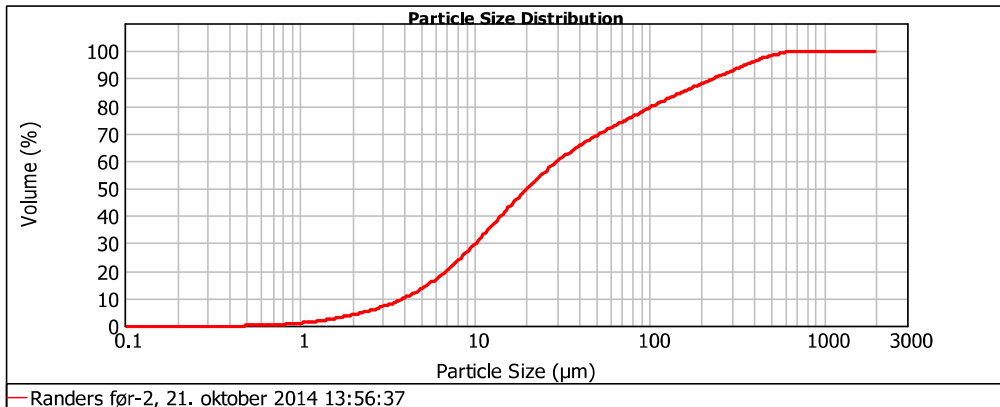
Bilag 4 – Kornkurver og SEM

Kornkurve data for almindelig aske – Tør måling:



Result Analysis Report

Sample Name: Randers før-2	SOP Name: 141021 stud	Measured: 21. oktober 2014 13:56:37	
Sample Source & type: Paris	Measured by: f-user	Analysed: 21. oktober 2014 13:56:38	
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: 2.27 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.539 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0006 %Vol	Span : 11.487	Uniformity: 3.17	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.649 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 9.243 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 73.074 um	
d(0.1): 3.947 um		d(0.5): 20.158 um	
		d(0.9): 235.510 um	



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.34	7.096	2.81	50.238	1.75	355.656	1.27
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.39	7.962	3.03	56.368	1.69	399.052	1.17
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.46	8.934	3.20	63.246	1.66	447.744	1.03
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.52	10.024	3.34	70.963	1.65	502.377	0.82
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.59	11.247	3.42	79.621	1.64	563.677	0.63
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.66	12.619	3.45	89.337	1.63	632.456	0.24
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.74	14.159	3.42	100.237	1.59	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	0.84	15.887	3.35	112.468	1.55	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	0.94	17.825	3.23	126.191	1.49	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	1.07	20.000	3.08	141.589	1.44	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.01	3.170	1.22	22.440	2.90	158.866	1.39	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.06	3.557	1.40	25.179	2.71	178.250	1.37	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.09	3.991	1.60	28.251	2.51	200.000	1.36	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.12	4.477	1.83	31.698	2.31	224.404	1.36	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.18	5.024	2.07	35.566	2.13	251.785	1.36	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.22	5.637	2.32	39.905	1.96	282.508	1.35	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.28	6.325	2.57	44.774	1.84	316.979	1.33		
0.142	0.00	1.002		7.096		50.238		355.656			

Operator notes:

Kornkurve data for knust aske – Tør Måling:



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
E14-efter-knusning-grpC-2
Sample Source & type:
Paris
Sample bulk lot ref:
123-ABC

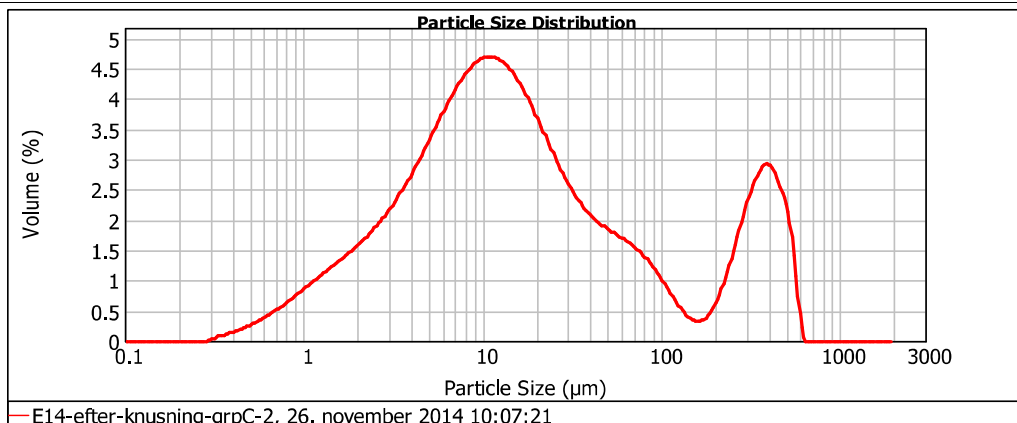
SOP Name:
141126 stud
Measured by:
f-user
Result Source:
Measurement

Measured:
26. november 2014 10:07:21
Analysed:
26. november 2014 10:07:22

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: 5.92 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.582 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0009 %Vol	Span : 23.143	Uniformity: 4.86	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.04 m^2/g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 5.787 μm	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 71.622 μm	

d(0.1): 2.327 μm d(0.5): 13.494 μm d(0.9): 314.609 μm



E14-efter-knusning-grpC-2, 26. november 2014 10:07:21

Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.69	7.096	3.23	50.238	1.35	355.656	2.20
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.78	7.962	3.38	56.368	1.29	399.052	2.14
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.86	8.934	3.49	63.246	1.21	447.744	2.14
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.95	10.024	3.54	70.963	1.12	502.377	1.85
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	1.05	11.247	3.52	79.621	1.00	563.677	1.42
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	1.14	12.619	3.45	89.337	0.85	632.456	0.27
0.040	0.00	0.283	0.01	2.000	1.24	14.159	3.31	100.237	0.68	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.01	2.244	1.35	15.887	3.13	112.468	0.51	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.06	2.518	1.48	17.825	2.91	126.191	0.36	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.09	2.825	1.62	20.000	2.67	141.589	0.26	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.13	3.170	1.78	22.440	2.42	158.866	0.25	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.22	3.557	1.97	25.179	2.19	178.250	0.36	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.29	3.991	2.16	28.251	1.97	200.000	0.58	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.36	4.477	2.38	31.698	1.78	224.404	0.91	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.43	5.024	2.61	35.566	1.63	251.785	1.30	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.51	5.637	2.83	39.905	1.52	282.508	1.69	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.60	6.325	3.04	44.774	1.43	316.979	2.01		
0.142	0.00	1.002	0.69	7.096	3.23	50.238	1.35	355.656	2.20		

Operator notes:

Kornkurve data for brændt aske 1 – Tør Måling:



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
E14-Brændt-grpC-prøve1-1
Sample Source & type:
Paris
Sample bulk lot ref:
123-ABC

SOP Name:
141126 stud
Measured by:
f-user
Result Source:
Measurement

Measured:
27. november 2014 13:16:42
Analysed:
27. november 2014 13:16:43

Particle Name:
aske
Particle RI:
1.500
Dispersant Name:

Accessory Name:
Scirocco 2000
Absorption:
0
Dispersant RI:
1.000

Analysis model:
General purpose
Size range:
0.020 to 2000.000 μm
Weighted Residual:
0.642 %

Sensitivity:
Enhanced
Obscuration:
3.84 %
Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0009 %Vol

Span :
18.474

Uniformity:
4.39

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.721 m^2/g

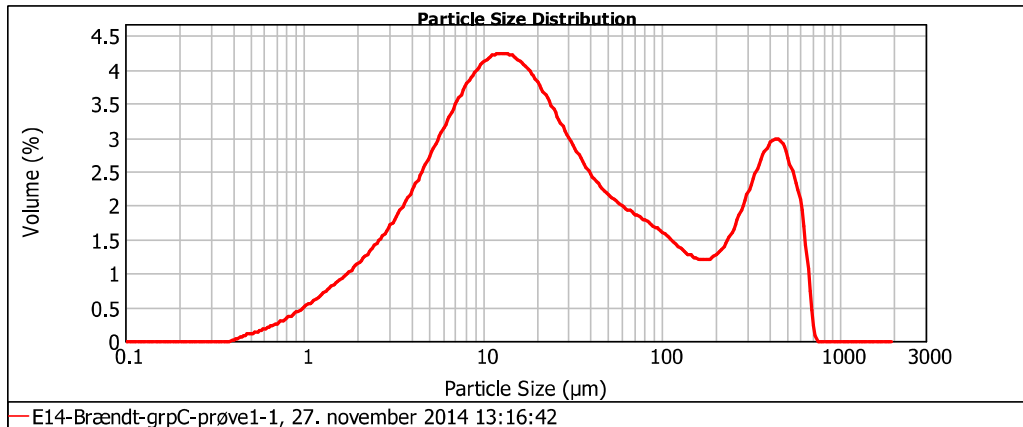
Surface Weighted Mean D[3,2]:
8.322 μm

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
95.469 μm

d(0.1): 3.386 μm

d(0.5): 19.801 μm

d(0.9): 369.191 μm



E14-Brændt-grpC-prøve1-1, 27. november 2014 13:16:42

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.41	7.096	2.73	50.238	1.58	355.656	2.09
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.48	7.962	2.90	56.368	1.50	399.052	2.23
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.55	8.934	3.03	63.246	1.44	447.744	2.20
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.63	10.024	3.13	70.963	1.38	502.377	1.93
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.72	11.247	3.18	79.621	1.32	563.677	1.59
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.81	12.619	3.19	89.337	1.25	632.456	0.82
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.90	14.159	3.16	100.237	1.17	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	0.90	15.887	3.16	112.468	1.17	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	1.01	17.825	3.08	126.191	1.08	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	1.13	20.000	2.96	141.589	1.00	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.02	3.170	1.26	22.440	2.81	158.866	0.93	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.07	3.557	1.40	25.179	2.64	178.250	0.90	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.09	3.991	1.57	28.251	2.46	200.000	0.91	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.13	4.477	1.75	31.698	2.27	224.404	0.99	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.17	5.024	1.94	35.566	2.10	251.785	1.14	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.22	5.637	2.14	39.905	1.93	282.508	1.35	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.28	6.325	2.34	44.774	1.79	316.979	1.60		
0.142	0.00	1.002	0.34	7.096	2.54	50.238	1.68	355.656	1.87		

Operator notes:

Kornkurve data for brændt aske 2 – Tør måling:



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
E14-Brændt-grpC-prøve2-1

Sample Source & type:
Paris

Sample bulk lot ref:
123-ABC

SOP Name:
141126 stud

Measured by:
f-user

Result Source:
Measurement

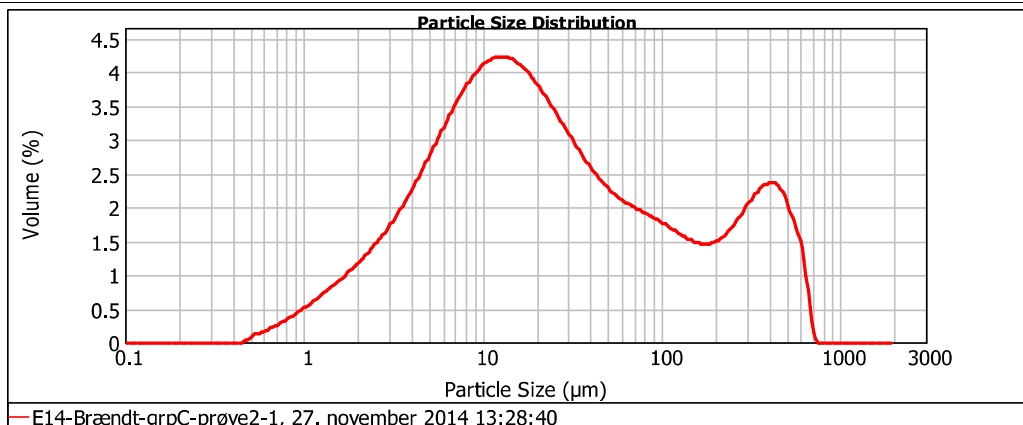
Measured:
27. november 2014 13:28:40

Analysed:
27. november 2014 13:28:42

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: 4.21 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.459 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0009 %Vol	Span : 15.916	Uniformity: 3.93	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.723 m^2/g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 8.302 μm	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 85.091 μm	

d(0.1): 3.342 μm d(0.5): 19.526 μm d(0.9): 314.111 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 %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.42	7.096	2.75	50.238	1.67	355.656	1.76
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.49	7.962	2.91	56.368	1.59	399.052	1.78
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.57	8.934	3.04	63.246	1.52	447.744	1.68
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.65	10.024	3.13	70.963	1.47	502.377	1.42
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.74	11.247	3.18	79.621	1.42	563.677	1.14
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.83	12.619	3.18	89.337	1.36	632.456	0.44
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.93	14.159	3.14	100.237	1.31	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	1.04	15.887	3.06	112.468	1.24	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	1.15	17.825	2.95	126.191	1.18	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	1.29	20.000	2.82	141.589	1.12	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	1.43	22.440	2.66	158.866	1.09	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.02	3.557	1.60	25.179	2.50	178.250	1.10	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.09	3.991	1.78	28.251	2.34	200.000	1.15	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.17	4.477	1.97	31.698	2.18	224.404	1.24	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.22	5.024	2.17	35.566	2.02	251.785	1.37	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.28	5.637	2.37	39.905	1.89	282.508	1.52	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.35	6.325	2.57	44.774	1.77	316.979	1.66		
0.142	0.00	1.002	0.42	7.096	2.75	50.238	1.77	355.656	1.66		

Operator notes:

Kornkurve data for brændt & knust aske – Tør måling:



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
E14-Brændt&Knust-grpC-1
Sample Source & type:
Paris
Sample bulk lot ref:
123-ABC

SOP Name:
141126 stud
Measured by:
f-user
Result Source:
Measurement

Measured:
3. december 2014 12:15:41
Analysed:
3. december 2014 12:15:43

Particle Name:
aske
Particle RI:
1.500
Dispersant Name:

Accessory Name:
Scirocco 2000
Absorption:
0
Dispersant RI:
1.000

Analysis model:
General purpose
Size range:
0.020 to 2000.000 um
Weighted Residual:
0.682 %

Sensitivity:
Enhanced
Obscuration:
3.44 %
Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0006 %Vol

Span :
30.206

Uniformity:
6.78

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.98 m²/g

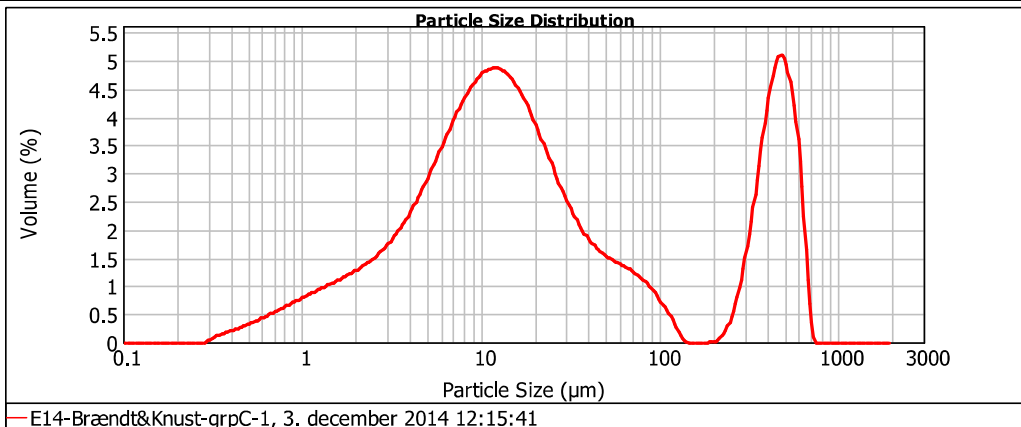
Surface Weighted Mean D[3,2]:
6.120 um

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

d(0.1): 2.570 um

d(0.5): 15.225 um

d(0.9): 462.465 um



E14-Brændt&Knust-grpC-1, 3. december 2014 12:15:41

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.62	7.096	3.10	50.238	1.11	355.656	2.71
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.68	7.962	3.33	56.368	1.05	399.052	3.48
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.74	8.934	3.50	63.246	0.99	447.744	3.86
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.80	10.024	3.62	70.963	0.91	502.377	3.56
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.86	11.247	3.66	79.621	0.80	563.677	2.71
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.92	12.619	3.62	89.337	0.65	632.456	0.94
0.040	0.00	0.283	0.01	2.000	0.99	14.159	3.51	100.237	0.48	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.01	2.244	1.08	15.887	3.32	112.468	0.29	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.10	2.518	1.17	17.825	3.08	126.191	0.05	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.17	2.825	1.29	20.000	2.80	141.589	0.00	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.22	3.170	1.44	22.440	2.50	158.866	0.00	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.27	3.557	1.62	25.179	2.20	178.250	0.00	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.32	3.991	1.82	28.251	1.92	200.000	0.00	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.38	4.477	2.05	31.688	1.68	224.404	0.03	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.44	5.024	2.31	35.566	1.47	251.785	0.18	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.50	5.637	2.58	39.905	1.31	282.508	1.07	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.56	6.325	2.85	44.774	1.20	316.979	1.85		
0.142	0.00	1.002	0.56	7.096	2.85	50.238	1.20	355.656	1.85		

Operator notes:

Kornkurve data for almindelig aske – Våd måling:



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
E14 - Alm aske - våd -2 - Average

Sample Source & type:
Paris

Sample bulk lot ref:
123-ABC

SOP Name:
141021stud våd2

Measured by:
f-user

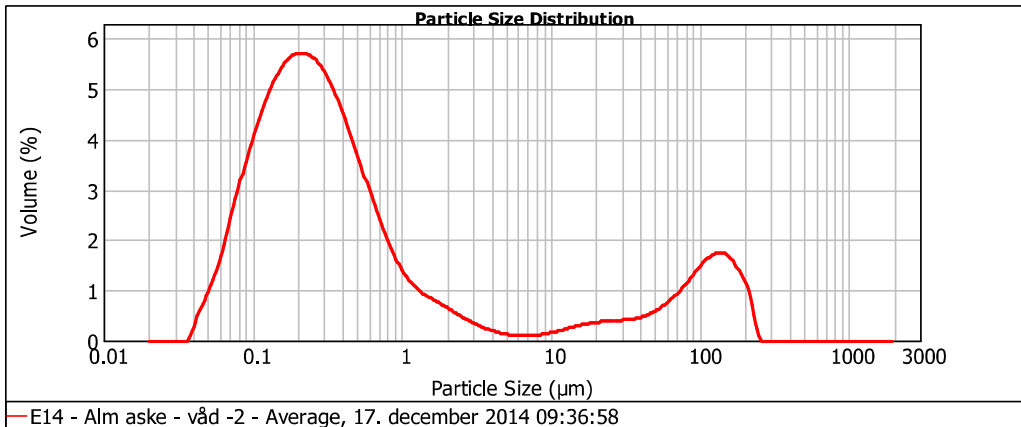
Result Source:
Averaged

Measured:
17. december 2014 09:36:58

Analysed:
17. december 2014 09:36:59

Particle Name: aske	Accessory Name: Hydro 2000SM (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 1.500	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 19.28 %
Dispersant Name: peptisator	Dispersant RI: 1.478	Weighted Residual: 4.072 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.4274 %Vol	Span : 270.609	Uniformity: 56.8	Result units: Volume
Specific Surface Area: 27.9 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 0.215 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 17.220 um	

d(0.1): 0.093 um d(0.5): 0.300 um d(0.9): 81.337 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	4.02	1.002	0.98	7.096	0.08	50.238	0.48	355.656	0.00
0.022	0.00	0.159	4.18	1.125	0.84	7.962	0.09	56.368	0.56	399.052	0.00
0.025	0.00	0.178	4.27	1.262	0.74	8.934	0.11	63.246	0.66	447.744	0.00
0.028	0.00	0.200	4.30	1.416	0.66	10.024	0.13	70.963	0.78	502.377	0.00
0.032	0.00	0.224	4.27	1.589	0.59	11.247	0.16	79.621	0.91	563.677	0.00
0.036	0.06	0.252	4.18	1.783	0.53	12.619	0.19	89.337	1.05	632.456	0.00
0.040	0.38	0.283	4.03	2.000	0.46	14.159	0.22	100.237	1.18	709.627	0.00
0.045	0.60	0.317	3.83	2.244	0.40	15.887	0.25	112.468	1.28	796.214	0.00
0.050	0.87	0.356	3.57	2.518	0.33	17.825	0.27	126.191	1.32	893.367	0.00
0.056	1.18	0.399	3.28	2.825	0.27	20.000	0.28	141.589	1.31	1002.374	0.00
0.063	1.59	0.448	2.96	3.170	0.22	22.440	0.29	158.866	1.19	1124.683	0.00
0.071	2.03	0.502	2.63	3.557	0.17	25.179	0.30	178.250	0.98	1261.915	0.00
0.080	2.46	0.564	2.28	3.991	0.14	28.251	0.31	200.000	0.98	1415.892	0.00
0.089	2.87	0.632	1.96	4.477	0.11	31.698	0.32	224.404	0.75	1588.656	0.00
0.100	3.22	0.710	1.65	5.024	0.09	35.566	0.34	251.785	0.50	1782.502	0.00
0.112	3.54	0.796	1.38	5.637	0.07	39.905	0.37	282.508	0.30	2000.000	0.00
0.126	3.81	0.893	1.16	6.325	0.07	44.774	0.41	316.979	0.00		
0.142		1.002		7.096	0.07	50.238		355.656			

Operator notes:

Kornkurve data for knust aske – Våd Måling:



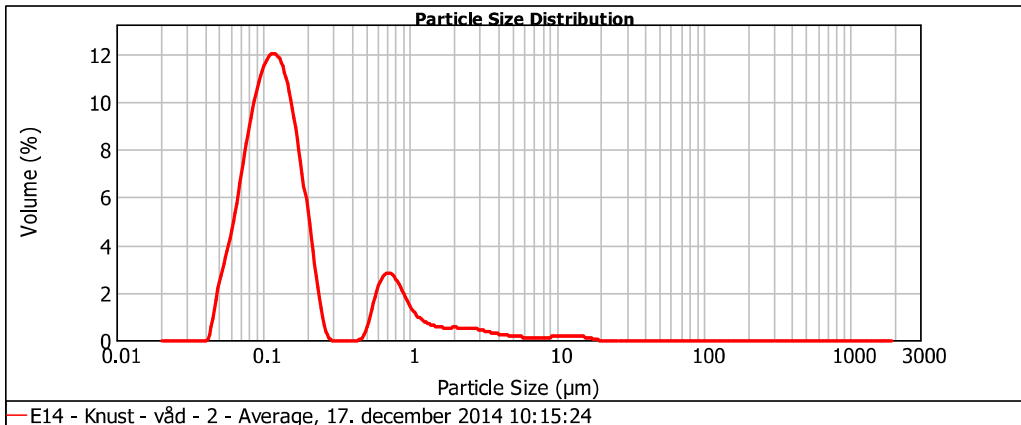
MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name: E14 - Knust - våd - 2 - Average	SOP Name: 141021stud våd2	Measured: 17. december 2014 10:15:24	
Sample Source & type: Paris	Measured by: f-user	Analysed: 17. december 2014 10:15:26	
Sample bulk lot ref: 123-ABC	Result Source: Averaged		
Particle Name: aske	Accessory Name: Hydro 2000SM (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 1.500	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 28.71 %
Dispersant Name: peptisator	Dispersant RI: 1.478	Weighted Residual: 8.032 %	Result Emulation: Off
Concentration: 1.3153 %Vol	Span : 5.743	Uniformity: 2.5	Result units: Volume
Specific Surface Area: 50.3 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 0.119 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 0.401 um	

d(0.1): 0.069 um d(0.5): 0.125 um d(0.9): 0.788 um



E14 - Knust - våd - 2 - Average, 17. december 2014 10:15:24

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	7.95	1.002	0.91	7.096	0.08	50.238	0.00	355.656	0.00
0.022	0.00	0.159	6.65	1.125	0.67	7.962	0.09	56.368	0.00	399.052	0.00
0.025	0.00	0.178	5.00	1.262	0.53	8.934	0.10	63.246	0.00	447.744	0.00
0.028	0.00	0.200	3.13	1.416	0.44	10.024	0.12	70.963	0.00	502.377	0.00
0.032	0.00	0.224	1.36	1.589	0.40	11.247	0.13	79.621	0.00	563.677	0.00
0.036	0.00	0.252	0.19	1.783	0.40	12.619	0.13	89.337	0.00	632.456	0.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.40	14.159	0.11	100.237	0.00	709.627	0.00
0.045	1.34	0.317	0.00	2.244	0.38	15.887	0.08	112.468	0.00	796.214	0.00
0.050	2.28	0.356	0.00	2.518	0.37	17.825	0.07	126.191	0.00	893.367	0.00
0.056	3.21	0.399	0.00	2.825	0.37	20.000	0.01	141.589	0.00	1002.374	0.00
0.063	4.51	0.448	0.00	3.170	0.33	22.440	0.00	158.866	0.00	1124.683	0.00
0.071	5.93	0.502	0.00	3.557	0.27	25.179	0.00	178.250	0.00	1261.915	0.00
0.080	7.20	0.564	0.00	3.991	0.22	28.251	0.00	200.000	0.00	1415.892	0.00
0.089	8.21	0.632	1.60	4.477	0.18	31.698	0.00	224.404	0.00	1588.656	0.00
0.100	8.85	0.710	2.09	5.024	0.14	35.566	0.00	251.785	0.00	1782.502	0.00
0.112	9.05	0.796	2.09	5.637	0.12	39.905	0.00	282.508	0.00	2000.000	0.00
0.126	8.76	0.893	1.77	6.325	0.10	44.774	0.00	316.979	0.00		
0.142		1.002	1.30	7.096	0.08	50.238	0.00	355.656	0.00		

Operator notes:

Kornkurve data for brændt aske 1 – Våd Måling:



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
E14 - Brændt P1 - våd - 2 - Average
Sample Source & type:
Paris
Sample bulk lot ref:
123-ABC

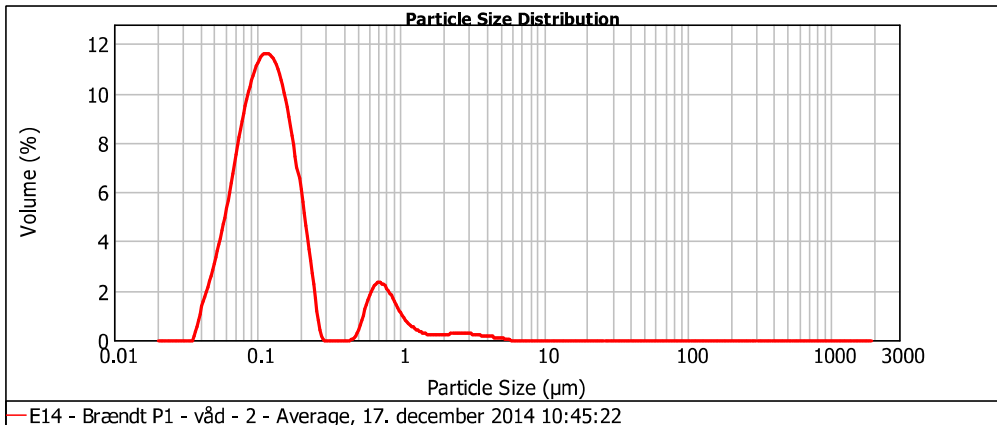
SOP Name:
141021stud våd2
Measured by:
f-user
Result Source:
Averaged

Measured:
17. december 2014 10:45:22
Analysed:
17. december 2014 10:45:23

Particle Name: aske
Accessory Name: Hydro 2000SM (A)
Analysis model: General purpose
Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 1.500
Absorption: 0
Size range: 0,020 to 2000,000 um
Obscuration: 13,27 %
Dispersant Name: peptisator
Dispersant RI: 1.478
Weighted Residual: 8,299 %
Result Emulation: Off

Concentration: 1.0082 %Vol
Span : 4.412
Uniformity: 1.22
Result units: Volume
Specific Surface Area: 56.1 m²/g
Surface Weighted Mean D[3,2]: 0.107 um
Vol. Weighted Mean D[4,3]: 0.229 um

d(0.1): 0.063 um d(0.5): 0.120 um d(0.9): 0.591 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	7.85	1.002	0.67	7.096	0.00	50.238	0.00	355.656	0.00
0.022	0.00	0.159	6.79	1.125	0.44	7.962	0.00	56.368	0.00	399.052	0.00
0.025	0.00	0.178	5.41	1.262	0.29	8.934	0.00	63.246	0.00	447.744	0.00
0.028	0.00	0.200	3.78	1.416	0.20	10.024	0.00	70.963	0.00	502.377	0.00
0.032	0.00	0.224	2.13	1.589	0.16	11.247	0.00	79.621	0.00	563.677	0.00
0.036	0.33	0.252	0.41	1.783	0.17	12.619	0.00	89.337	0.00	632.456	0.00
0.040	1.24	0.283	0.00	2.000	0.19	14.159	0.00	100.237	0.00	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	0.20	15.887	0.00	112.468	0.00	796.214	0.00
0.050	1.94	0.356	0.00	2.518	0.21	17.825	0.00	126.191	0.00	893.367	0.00
0.056	2.79	0.399	0.00	2.825	0.20	20.000	0.00	141.589	0.00	1002.374	0.00
0.063	3.75	0.448	0.06	3.170	0.17	22.440	0.00	158.866	0.00	1124.683	0.00
0.071	4.98	0.502	0.56	3.557	0.13	25.179	0.00	178.250	0.00	1261.915	0.00
0.080	6.23	0.564	1.30	3.991	0.11	28.251	0.00	200.000	0.00	1415.892	0.00
0.089	7.30	0.632	1.71	4.477	0.08	31.698	0.00	224.404	0.00	1588.656	0.00
0.100	8.12	0.710	1.72	5.024	0.04	35.566	0.00	251.785	0.00	1782.502	0.00
0.112	8.61	0.796	1.45	5.637	0.00	39.905	0.00	282.508	0.00	2000.000	0.00
0.126	8.76	0.893	1.03	6.325	0.00	44.774	0.00	316.979	0.00		
0.142	8.51	1.002		7.096	0.00	50.238	0.00	355.656	0.00		

Operator notes:

Kornkurve data for brændt aske 2 – Våd Måling:



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
E14 - Brændt P2 - våd - 2 - Average
Sample Source & type:
Paris
Sample bulk lot ref:
123-ABC

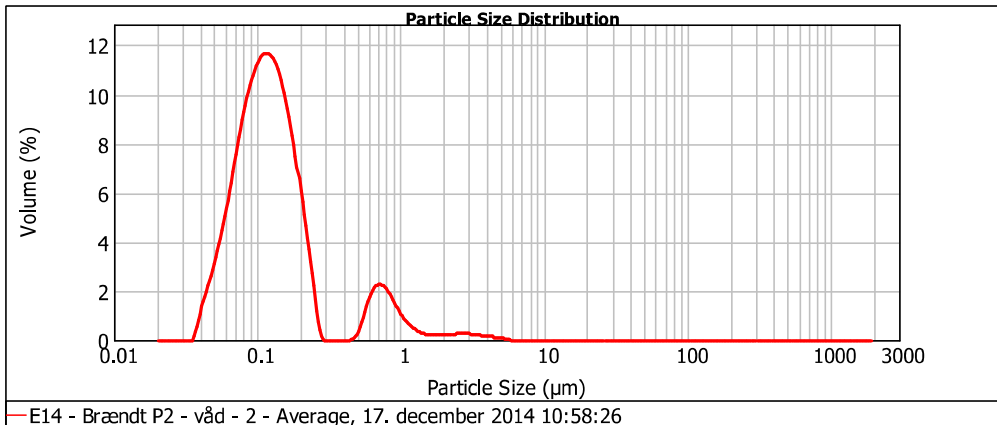
SOP Name:
141021stud våd2
Measured by:
f-user
Result Source:
Averaged

Measured:
17. december 2014 10:58:26
Analysed:
17. december 2014 10:58:27

Particle Name: aske	Accessory Name: Hydro 2000SM (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 1.500	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 17.05 %
Dispersant Name: peptisator	Dispersant RI: 1.478	Weighted Residual: 8.572 %	Result Emulation: Off

Concentration: 1.3537 %Vol	Span : 4.277	Uniformity: 1.2	Result units: Volume
Specific Surface Area: 56.4 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 0.106 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 0.226 um	

d(0.1): 0.063 um d(0.5): 0.119 um d(0.9): 0.573 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	7.87	1.002	0.66	7.096	0.00	50.238	0.00	355.656	0.00
0.022	0.00	0.159	6.81	1.125	0.42	7.962	0.00	56.368	0.00	399.052	0.00
0.025	0.00	0.178	5.42	1.262	0.27	8.934	0.00	63.246	0.00	447.744	0.00
0.028	0.00	0.200	3.78	1.416	0.18	10.024	0.00	70.963	0.00	502.377	0.00
0.032	0.00	0.224	2.11	1.589	0.15	11.247	0.00	79.621	0.00	563.677	0.00
0.036	0.00	0.252	0.40	1.783	0.16	12.619	0.00	89.337	0.00	632.456	0.00
0.040	0.33	0.283	0.00	2.000	0.18	14.159	0.00	100.237	0.00	709.627	0.00
0.045	1.25	0.317	0.00	2.244	0.19	15.887	0.00	112.468	0.00	796.214	0.00
0.050	1.96	0.356	0.00	2.518	0.20	17.825	0.00	126.191	0.00	893.367	0.00
0.056	2.81	0.399	0.00	2.825	0.20	20.000	0.00	141.589	0.00	1002.374	0.00
0.063	3.78	0.448	0.00	3.170	0.19	22.440	0.00	158.866	0.00	1124.683	0.00
0.071	5.02	0.502	0.05	3.557	0.13	25.179	0.00	178.250	0.00	1261.915	0.00
0.080	6.27	0.564	0.49	3.991	0.11	28.251	0.00	200.000	0.00	1415.892	0.00
0.089	7.35	0.632	1.23	4.477	0.08	31.698	0.00	224.404	0.00	1588.656	0.00
0.100	8.17	0.710	1.65	5.024	0.04	35.566	0.00	251.785	0.00	1782.502	0.00
0.112	8.66	0.796	1.42	5.637	0.00	39.905	0.00	282.508	0.00	2000.000	0.00
0.126	8.80	0.893	1.01	6.325	0.00	44.774	0.00	316.979	0.00		
0.142	8.54	1.002	1.01	7.096	0.00	50.238	0.00	355.656	0.00		

Operator notes:

Kornkurve data for brændt & knust aske – Våd måling:



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
E14 - Brændt+Knust - våd - 2 - Average

Sample Source & type:
Paris

Sample bulk lot ref:
123-ABC

SOP Name:
141021stud våd2

Measured by:
f-user

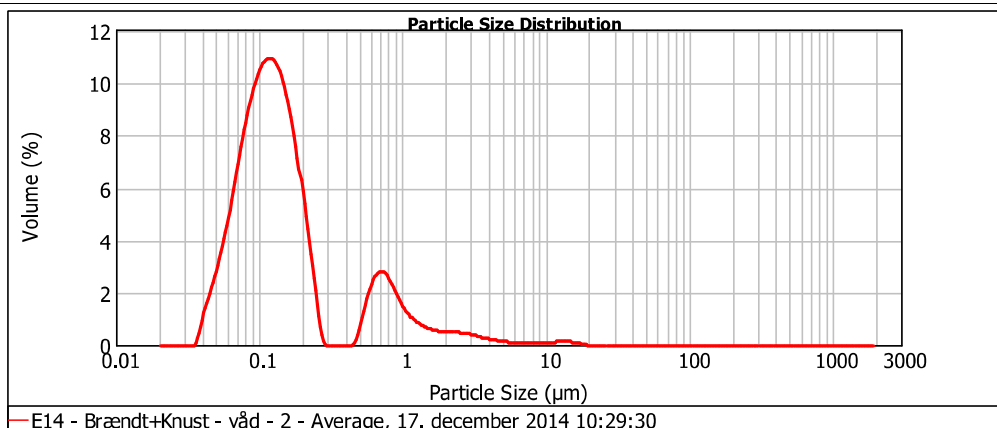
Result Source:
Averaged

Measured:
17. december 2014 10:29:30

Analysed:
17. december 2014 10:29:31

Particle Name: aske	Accessory Name: Hydro 2000SM (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 1.500	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 21.51 %
Dispersant Name: peptisator	Dispersant RI: 1.478	Weighted Residual: 7.395 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.9901 %Vol	Span : 5.702	Uniformity: 2.29	Result units: Volume
Specific Surface Area: 52.5 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 0.114 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 0.374 um	

d(0.1): 0.065 um d(0.5): 0.126 um d(0.9): 0.783 um



E14 - Brændt+Knust - våd - 2 - Average, 17. december 2014 10:29:30

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	7.49	1.002	0.97	7.096	0.05	50.238	0.00	355.656	0.00
0.022	0.00	0.159	6.51	1.125	0.74	7.962	0.05	56.368	0.00	399.052	0.00
0.025	0.00	0.178	5.20	1.262	0.60	8.934	0.06	63.246	0.00	447.744	0.00
0.028	0.00	0.200	3.62	1.416	0.49	10.024	0.08	70.963	0.00	502.377	0.00
0.032	0.00	0.224	1.99	1.589	0.40	11.247	0.09	79.621	0.00	563.677	0.00
0.036	0.27	0.252	0.37	1.783	0.39	12.619	0.10	89.337	0.00	632.456	0.00
0.040	1.13	0.283	0.00	2.000	0.37	14.159	0.11	100.237	0.00	709.627	0.00
0.045	1.77	0.317	0.00	2.244	0.35	15.887	0.07	112.468	0.00	796.214	0.00
0.050	2.55	0.356	0.00	2.518	0.31	17.825	0.05	126.191	0.00	893.367	0.00
0.056	3.43	0.399	0.00	2.825	0.25	20.000	0.04	141.589	0.00	1002.374	0.00
0.063	4.57	0.448	0.14	3.170	0.20	22.440	0.03	158.866	0.00	1124.683	0.00
0.071	5.74	0.502	0.93	3.557	0.16	25.179	0.02	178.250	0.00	1261.915	0.00
0.080	6.76	0.564	1.68	3.991	0.12	28.251	0.01	200.000	0.00	1415.892	0.00
0.089	7.56	0.632	2.09	4.477	0.10	31.698	0.01	224.404	0.00	1588.656	0.00
0.100	8.07	0.710	2.09	5.024	0.07	35.566	0.00	251.785	0.00	1782.502	0.00
0.112	8.26	0.796	1.77	5.637	0.05	39.905	0.00	282.508	0.00	2000.000	0.00
0.126	8.07	0.893	1.33	6.325	0.04	44.774	0.00	316.979	0.00		
0.142		1.002		7.096		50.238		355.656			

Operator notes:

Kornkurve data for flyveaske – Våd måling:



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
E14 - Flyveaske - våd - 3 - Average

Sample Source & type:
Paris

Sample bulk lot ref:
123-ABC

SOP Name:
141021stud våd2

Measured by:
f-user

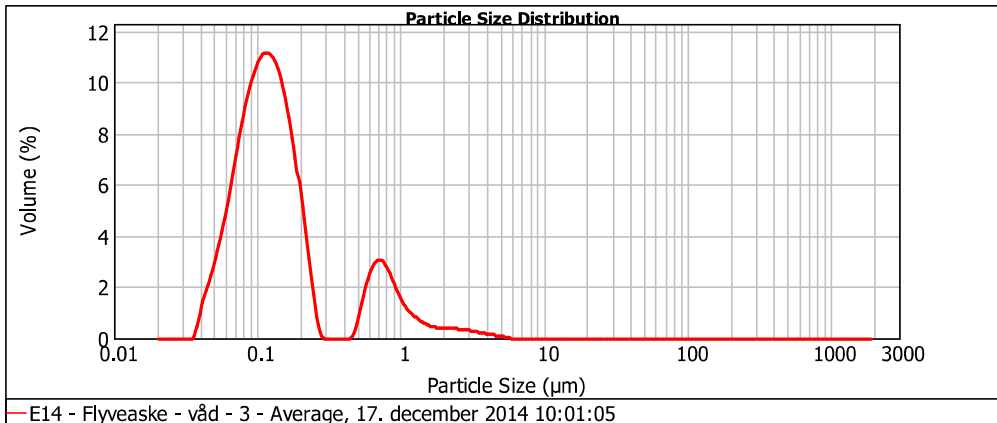
Result Source:
Averaged

Measured:
17. december 2014 10:01:05

Analysed:
17. december 2014 10:01:06

Particle Name: aske	Accessory Name: Hydro 2000SM (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 1.500	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 17.47 %
Dispersant Name: peptisator	Dispersant RI: 1.478	Weighted Residual: 8.320 %	Result Emulation: Off
Concentration: 1.0659 %Vol	Span : 5.410	Uniformity: 1.52	Result units: Volume
Specific Surface Area: 53.7 m²/g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 0.112 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 0.272 um	

d(0.1): 0.064 um d(0.5): 0.123 um d(0.9): 0.732 um

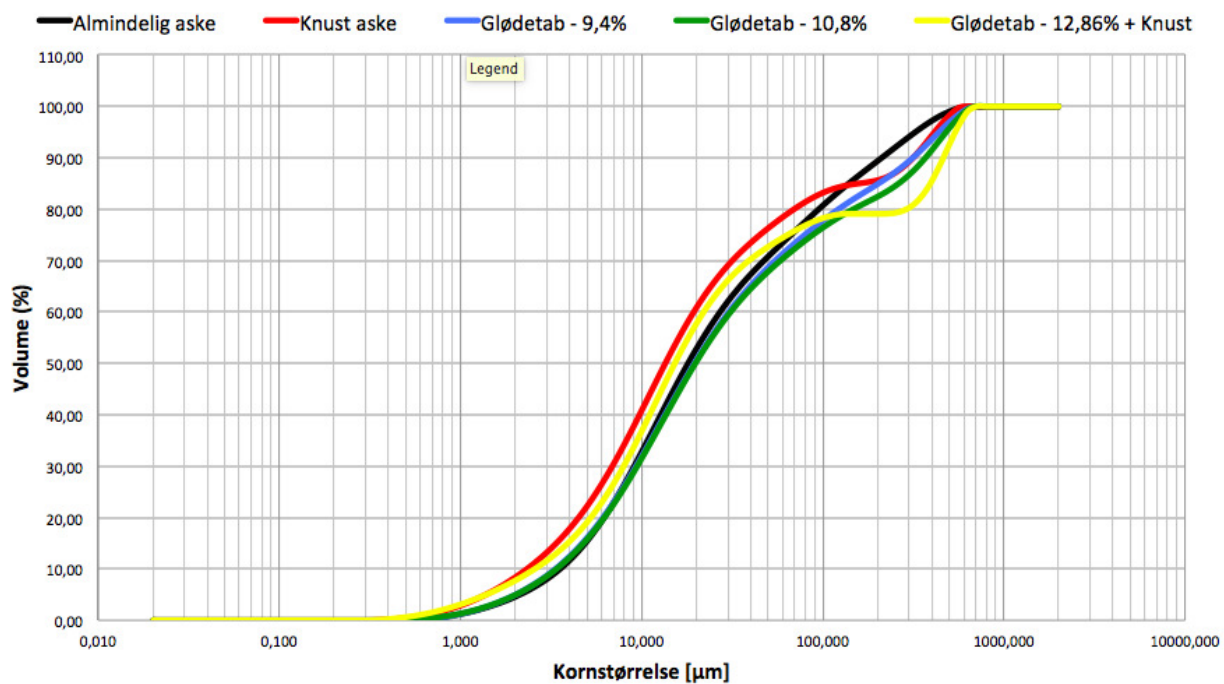


Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	7.53	1.002	1.00	7.096	0.00	50.238	0.00	355.656	0.00
0.022	0.00	0.159	6.47	1.125	0.73	7.962	0.00	56.368	0.00	399.052	0.00
0.025	0.00	0.178	5.07	1.262	0.56	8.934	0.00	63.246	0.00	447.744	0.00
0.028	0.00	0.200	3.40	1.416	0.43	10.024	0.00	70.963	0.00	502.377	0.00
0.032	0.00	0.224	1.66	1.589	0.34	11.247	0.00	79.621	0.00	563.677	0.00
0.036	0.00	0.252	0.86	1.783	0.31	12.619	0.00	89.337	0.00	632.456	0.00
0.040	0.29	0.283	0.27	2.000	0.28	14.159	0.00	100.237	0.00	709.627	0.00
0.045	1.17	0.317	0.00	2.244	0.30	15.887	0.00	112.468	0.00	796.214	0.00
0.050	1.84	0.356	0.00	2.518	0.28	17.825	0.00	126.191	0.00	893.367	0.00
0.056	2.64	0.399	0.00	2.825	0.27	20.000	0.00	141.589	0.00	1002.374	0.00
0.063	3.55	0.448	0.00	3.170	0.24	22.440	0.00	158.866	0.00	1124.683	0.00
0.071	4.73	0.502	0.14	3.557	0.19	25.179	0.00	178.250	0.00	1261.915	0.00
0.080	5.93	0.564	0.97	3.991	0.14	28.251	0.00	200.000	0.00	1415.892	0.00
0.089	6.97	0.632	1.82	4.477	0.11	31.898	0.00	224.404	0.00	1588.656	0.00
0.100	7.78	0.710	2.27	5.024	0.08	35.566	0.00	251.785	0.00	1782.502	0.00
0.112	8.27	0.796	2.26	5.637	0.04	39.905	0.00	282.508	0.00	2000.000	0.00
0.126	8.42	0.893	1.91	6.325	0.00	44.774	0.00	316.979	0.00		
0.142	8.18	1.002	1.42	7.096	0.00	50.238	0.00	355.656	0.00		

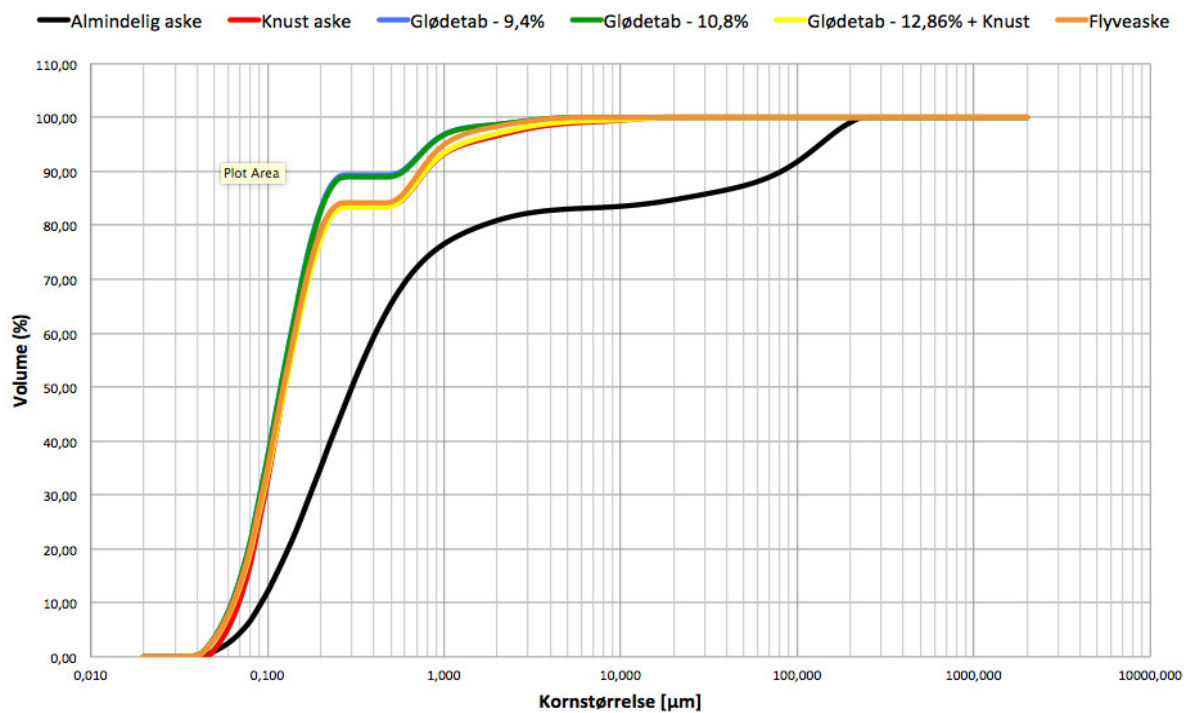
Operator notes:

Akkumulerede kornkurver for tør og våd måling:

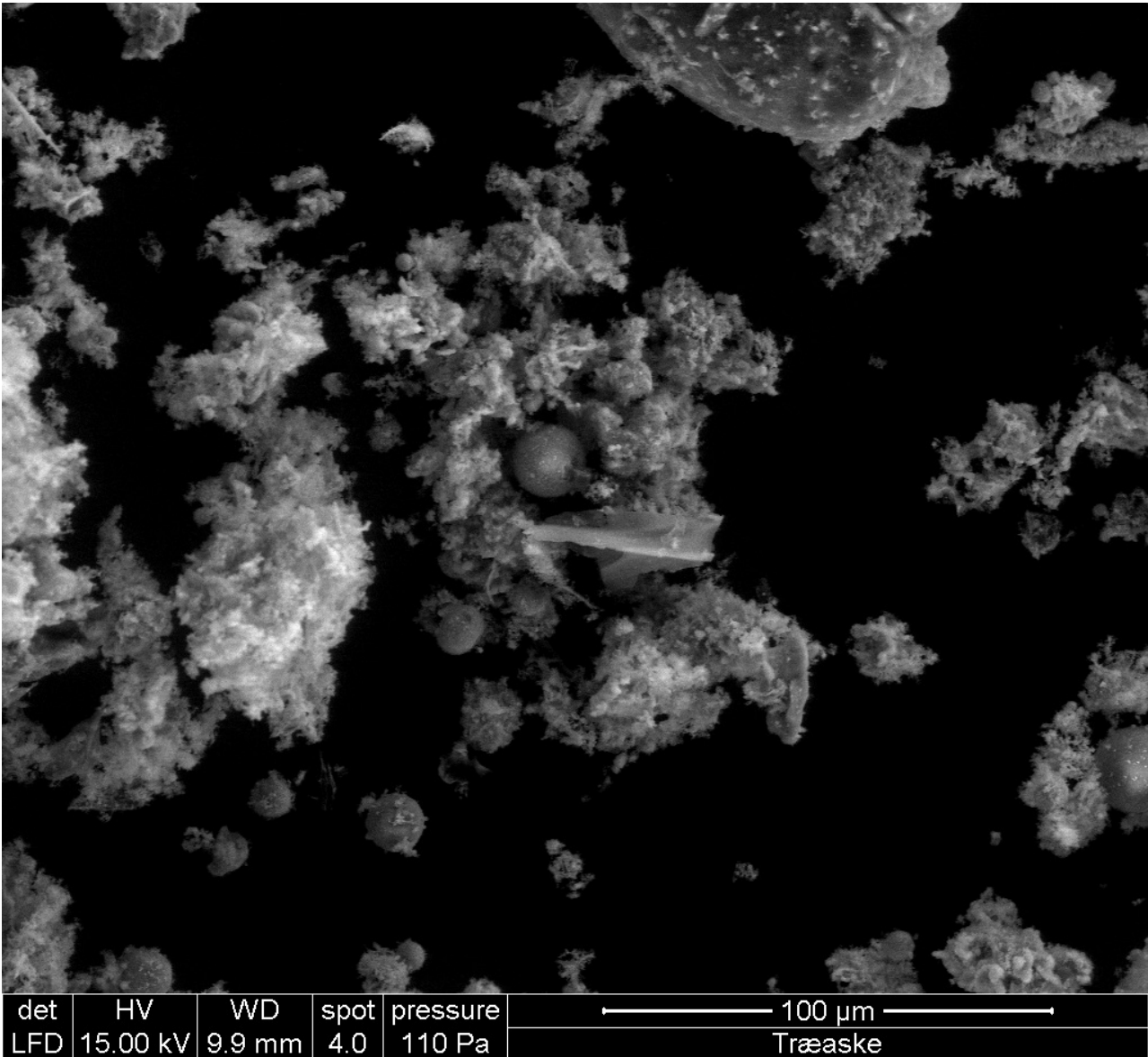
Akkumuleret kornkurver for træasken - Tør



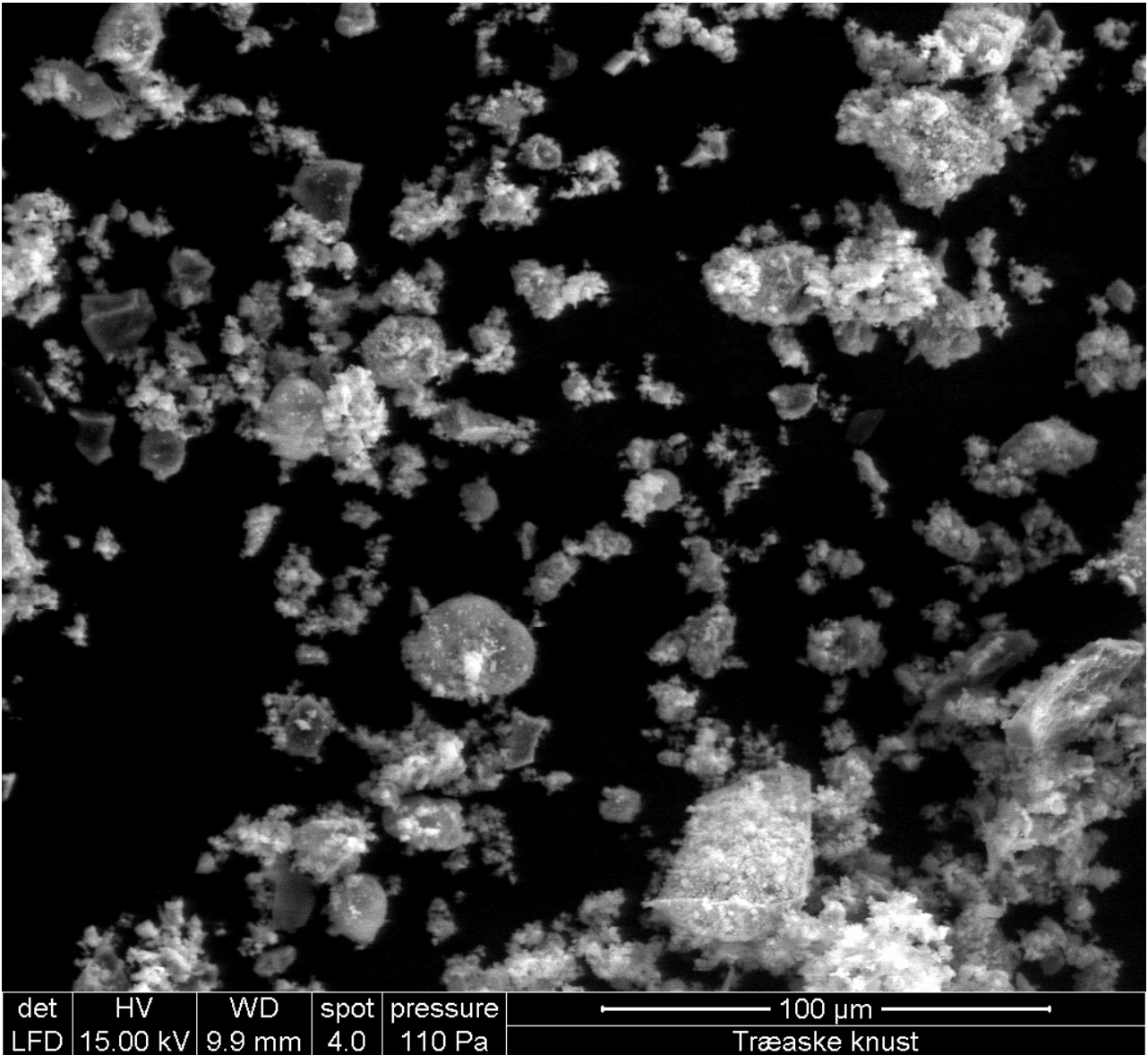
Akkumuleret kornkurver for træasken - Våd



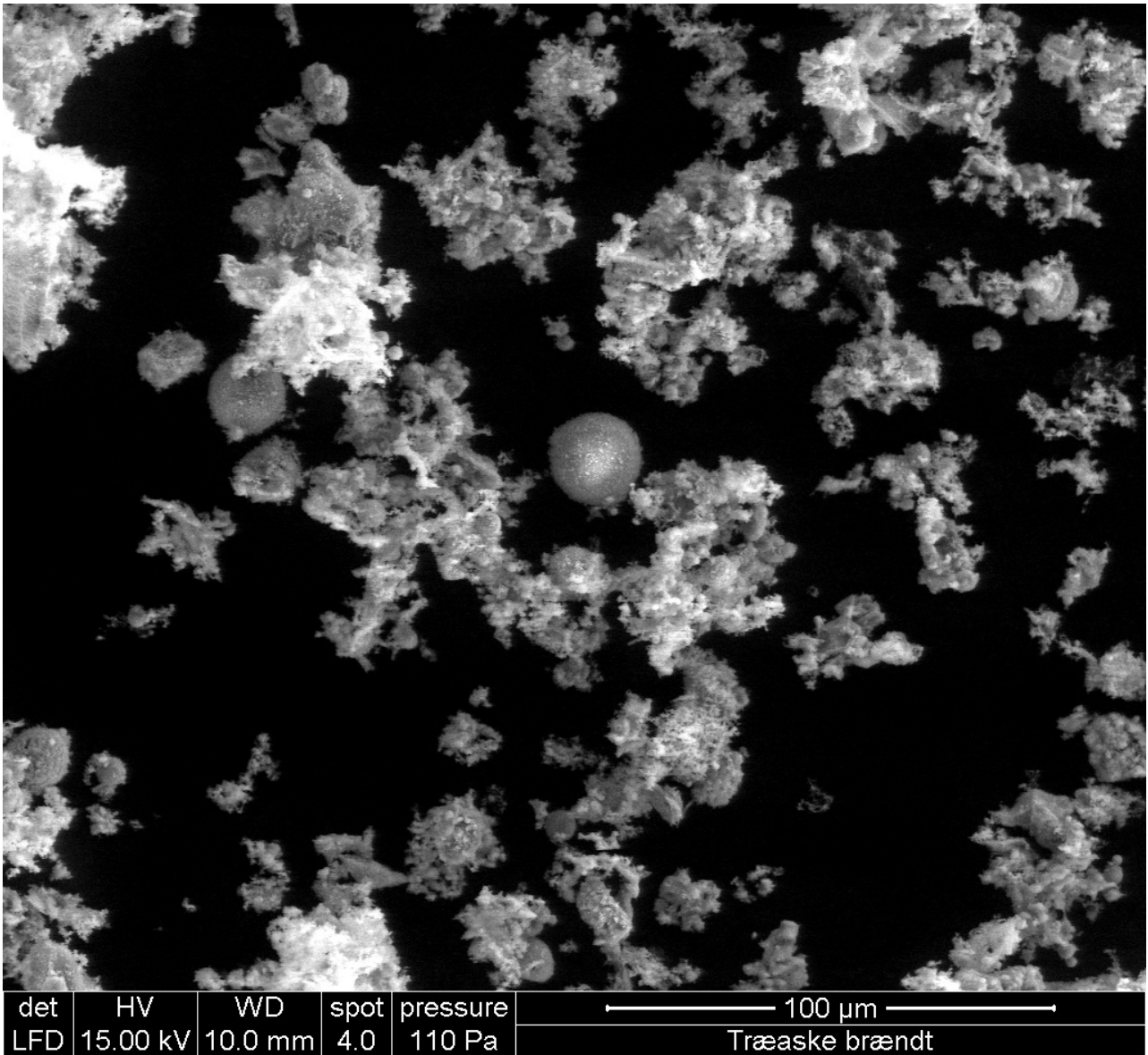
Almindelig træaske – Forstørret 500 gange



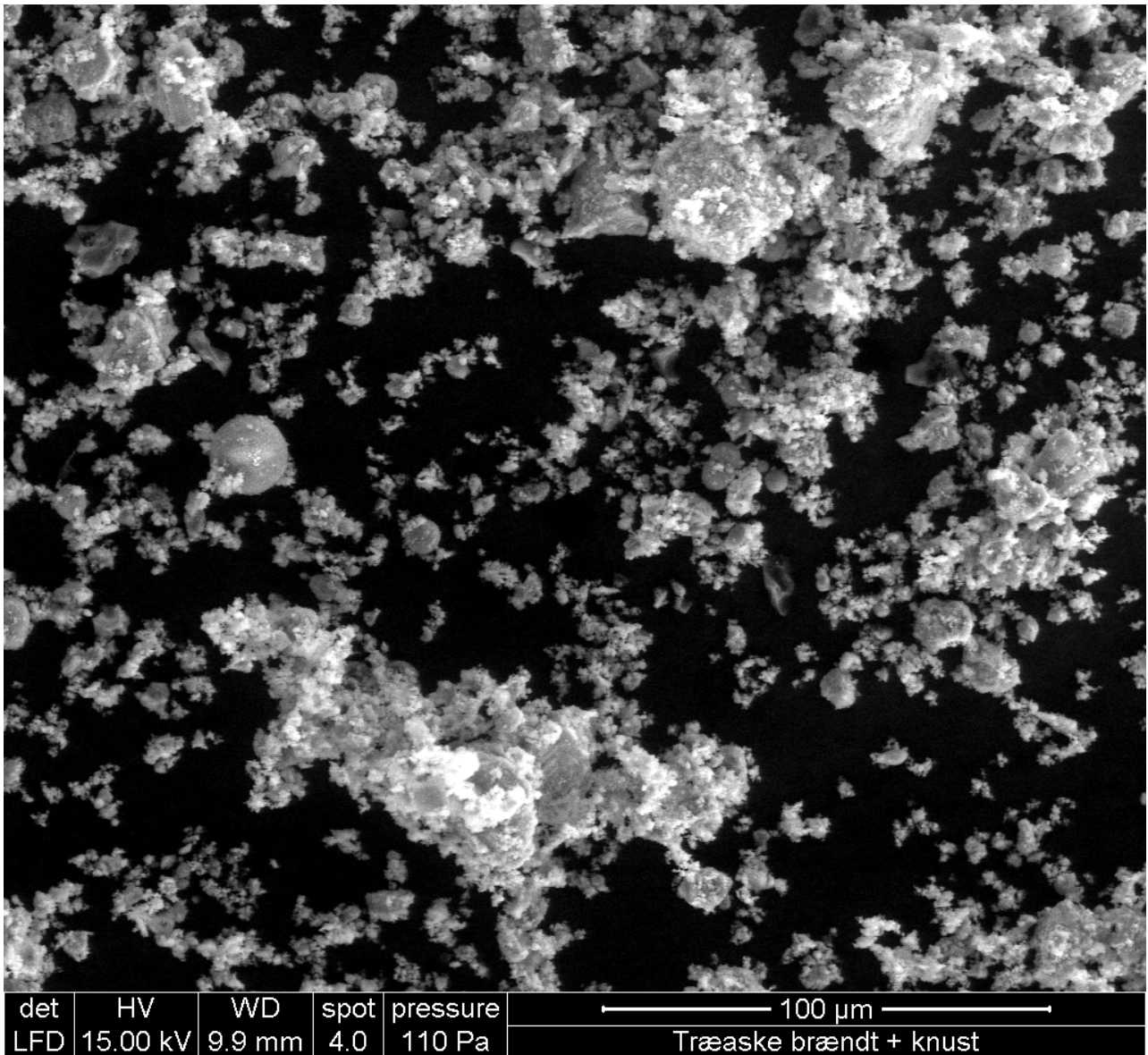
Knust træaske – Forstørret 500 gange



Brændt træaske – Forstørret 500 gange



Brændt & Knust træaske – Forstørret 500 gange



Bilag 5 – Sammenligning med teoretiske styrker samt udregning af aktivitetsfaktor

Udregning af α -værdier:

$$\alpha_7 = 0,6$$

$$\alpha_{28} = 0,5$$

$$\alpha_{14} = \alpha_7 - \frac{\alpha_7 - \alpha_{28}}{28 - 7} \cdot 7 = 0,57$$

$$\alpha_{11} = \alpha_7 - \frac{\alpha_7 - \alpha_{28}}{28 - 7} \cdot 4 = 0,58$$

Udregning af K-værdier:

$$K_7 = \frac{f_{c7}}{\frac{1}{\left(\frac{225g}{450g}\right)^{-\alpha_7}} - \alpha_7} = \frac{46,98 \text{ MPa}}{\frac{1}{\left(\frac{225g}{450g}\right)^{-0,60}} - 0,60} = 33,56 \text{ MPa}$$

$$K_{14} = \frac{f_{c14}}{\frac{1}{\left(\frac{225g}{450g}\right)^{-\alpha_{14}}} - \alpha_{14}} = \frac{55,06 \text{ MPa}}{\frac{1}{\left(\frac{225g}{450g}\right)^{-0,57}} - 0,57} = 38,41 \text{ MPa}$$

$$K_{28} = \frac{f_{c28}}{\frac{1}{\left(\frac{225g}{450g}\right)^{-\alpha_{28}}} - \alpha_{28}} = \frac{56,78 \text{ MPa}}{\frac{1}{\left(\frac{225g}{450g}\right)^{-0,50}} - 0,50} = 37,86 \text{ MPa}$$

$$K_{11} = \frac{K_7 - K_{14}}{14 - 7} \cdot 4 + K_7 = 36,33 \text{ MPa}$$

Teoretisk styrke udregnet med Bolomeys formel:

Som eksempel udregnes den teoretiske trykstyrke for en recept C, altså med 10% cementerstatning, (45 g aske) efter 28 døgn.

$$f_{c28} = K_{28} \cdot \left(\frac{1}{\frac{v}{c + k \cdot p}} - \alpha_{28} \right) = 37,86 \text{ MPa} \cdot \left(\frac{1}{\frac{225g}{405g + 0,5 \cdot 45g}} - 0,5 \right) = 53,00 \text{ MPa}$$

Udregnede værdier for $\left(\frac{f_c}{K} + \alpha\right) \cdot v - c$:

Recept	$\left(\frac{f_c}{K} + \alpha\right) \cdot v - c$ [g]			
	7 døgn	11 døgn	14 døgn	28 døgn
	[g]	[g]	[g]	[g]
A	0.0		0.0	0.0
B	12.6	-	-26.6	-60.4
C	15.7	-	-75.2	-44.1
D	60.2	-	-33.3	-0.1
E	-18.2	-33.3	-60.9	-
F	-51.8	-16.6	-20.1	-
G	-96.8	-72.5	-71.8	-
H	-78.0	-58.7	-64.8	-
I	-76.1	-	-84.4	-
J	-42.3	-	-41.2	-
K	-41.1	-	-78.8	-
L	-16.7	-	-56.2	-
M	-8.4	-	-62.7	-
N	-30.4	-	-49.8	-
O	-41.2	-	-107.2	-
P	-54.0	-	-56.5	-
B_ny	-29.5	-	-25.6	-70.5
C_ny	-23.2	-	-35.4	-49.6

Bilag 6 – Mail udveksling med Verdo (Kraftvarmeværk – Randers)

Vedrørende brug af slamaske til afsluttende projekt DTU Lyngby

4. sep. 2014 | 15.22 | 5 KB

Fra: [Kasper Larsen](#)

Til: info@verdo.dk

Cc: kristiannyvang@gmail.com

Hej Verdo A/S

Vi er to studerende fra DTU Lyngby, som skal til og igang med at skrive vores afsluttende projekt på Diplom-Byg retningen. Her er en lille del af projektbeskrivelsen :

"Vi ønsker at udnytte slamaske som et nyt råmateriale i beton, ligesom vi tidligere har set kulflyveakse, microsilica og stenmel gå fra at være et farligt affald til et værdifuldt råmateriale"

Det er derfor i vores interesse at lave betonforsøg, hvori noget af betonen erstattes med slamaske, for derefter at teste styrken af betonen. Vi har desværre ikke kunne anskaffe os slamaske fra det kraftværk der oprindeligt var tiltænkt, og har derfor modtaget følgende svar fra vores projektvejleder:

"Jeg foreslår, at I tager kontakt til Randers Kraft-Varme anlæg. De har biomasseforbrænding, men vi har aldrig tidligere fået aske derfra. Vi har før fået aske fra Jyske værker, som de har sendt med posten."

Her kommer så vores spørgsmål. Er det muligt at få 10kg slamaske tilsendt til DTU Lyngby fra jeres Kraftvarmeværk i Randers? I er meget velkomne til at svare tilbage per mail eller på tf: 20 15 22 57 (Kasper)

Med venlig hilsen

Kasper Larsen og Kristian Nyvang Jensen

SV: Vedrørende brug af slamaske til afsluttende projekt DTU Lyngby

4. sep. 2014 | 16.18 | 98 KB

Fra: [Allan Abildskov](#)

Til: kasper@j-wiegand.dk, Kristiannyvang@gmail.com

Cc: [Jens Ole Hougaard](#)

Hej Kasper Larsen og Kristian Nyvang Jensen

Vil i ikke eftersende mig jeres telefonnummer og et muligt tidspunkt i kan træffes på, så kan vi tage drøftelse om jeres projekt og hvor Verdo kan være behjælpelig.

Vi har tidligere fået udarbejdet rapporter omkring anvendelse af aske i cement og beton industrien, dem kan i evt. læse for at få øget indsigt i vores restprodukter. Vi er meget interesseret i "Trash to Treasury" tanken.

Allan Abildskov

Environment and Hydrogen Verdo Production A/S

Kulholmsvej 12, 8930 Randers NØ

Tel.: +45 89114811, Dir.: +45 89114736, Mob.: +45 51980736

E-mail: alab@verdo.dk

Re: SV: Vedrørende brug af slamaske til afsluttende projekt DTU Lyngby

4. sep. 2014 | 17.31 | 85 KB

Fra: Kasper Larsen

Til: Allan Abildskov

Cc: kristiannyvang@gmail.com

Hej Allan,

Tak for det hurtige svar. Det kunne være rigtig spændende at se de rapporter du nævner i mailen. Her er vores telefon numre:

Kasper: 20 15 22 57

Kristian: 20 87 49 98

Vi er til at træffe på mandag d. 8/9 mellem 11-12.30.

Som lidt yderligere information til projektet, kan jeg fortælle, at det er et projekt som DTU-byg selv har stablet på benene. Kristian og jeg er altså i en "projektfamilie" sammen med 3 andre grupper, som hver især skal lave de samme forsøg, men med brug af slamaske fra forskellige værker. Og eftersom at jeres restprodukt aldrig er blevet benyttet i sammenhæng med DTU's egne undersøgelser, kunne det være spændende at sammeligne resultater fra brug af jeres aske, med resultater fra forrige års forsøg her på DTU.

Vi skal selvfølgelig nok stå for betaling af forsendelsen.

Med venlig hilsen

Kasper Larsen og Kristian Nyvang Jensen

Leveringsadresse

8. sep. 2014 | 12.00 | 2 KB

Fra: Kasper Larsen

Til: Allan Abildskov

Hej Allan,

Her er leveringsadressen:

DTU BYG,

Nordvej bygn 119, port 7, 2800 Lyngby

Att. Ebba Schnell

Vi bekræfter hermed, at i modtager en kopi af den færdige rapport.

Mvh

Kasper Larsen og Kristian Nyvang Jensen

SV: Leveringsadresse

8. sep. 2014 | 12.59 | 40 KB

Fra: Allan Abildskov

Til: Kasper Larsen

Hej Kasper

Du får en flyveaske prøve for en god ordensskyld, kan det oplyses at jeg ikke er bekendt med hvad slamaske er.

Asken du vil modtage er udtaget ved skorstenen ved røgrensningen. Den er fremkommet af som asken ved afbrænding af træ (ca. 90 %), Nøddeskaller, korn afharpninger mv. (10 %). Asken er efter forbrænding tilsat vand med ca. 20 %.

Allan Abildskov

Environment and Hydrogen Verdo Production A/S
Kulholmsvej 12, 8930 Randers NØ
Tel.: +45 89114811, Dir.: +45 89114736, Mob.: +45 51980736

E-mail: alab@verdo.dk

Spørgsmål vedrørende leveret aske - DTU afgangprojekt

30. dec. 2014 | 10.42 | 2 KB

Fra: Kasper Larsen

Til: "Allan Abildskov"

Hej Allan,

Så er projektet ved at være ved vejs ende, men jeg har lige nogle hurtige spørgsmål vedrørende asken, som jeg håber du måske kan svare på.

- Ved godt det er noget tid siden at asken blev sent, men kan du huske om den havde ligget på depot eller om vi fik en frisk prøve?
- Du snakkede noget om at asken var udtaget ved røgrensning af skorstenen, men hvordan fungerer denne røgrensning helt præcis?
- Er det en speciel type træ som i brænder af eller er der en største del af en vis type?

På forhånd tak og rigtig godt nytår.

Kasper Larsen, DTU
tlf.: 20 15 22 57

Automatisk svar: Spørgsmål vedrørende leveret aske - DTU afgangprojekt

30. dec. 2014 | 10.42 | 10 KB

Fra: [Allan Abildskov](#)

Til: [Kasper Larsen](#)

Out of office. I will return on the 5th of Januar.

In urgent matter send an sms to my mobile +45 51980736

Bilag 7 – Vandopløselige kationer og anioner

Vandopløselige kationer

Dato: 04-11-14

prøve	afvejning [g]	tilsat mL dest	mg/l Ca	mg/kg Ca	mg/l K	mg/kg K	mg/l Mg	mg/kg Ma	mg/l Na	mg/kg Na
Gr C vandopl anioner A	10	50	9,2743	46,3713	7826,3500	36291,8024	0,0210	76,1765	60,6030	461,6524
Gr C vandopl anioner B	10	50	11,9740	59,8700	10294,9000	61635,5663	0,0276	170,0649	64,1235	1090,5154
Gr C vandopl anioner C	10	50	10,9037	54,5185	8047,0600	43871,3641	0,0244	107,0330	145,8650	1561,2364

Oversigt

Type	[mg/kg]	% [-]
Ca	53,587	0,005
K	47266,244	4,727
Mg	353,274	0,035
Ma	62,363	0,006
Na	1037,801	0,104

afviger for meget til at kunne bruges

Vandopløselige Anioner

Dato: 04-11-14

prøve	Afvejning [g]	mg/l Al	mg/kg Al	mg/L As	mg/kg As	mg/l Ca	mg/kg Ca	mg/l Cd	mg/kg Cd	mg/l Cr	mg/kg Cr	mg/l Cu	mg/kg Cu	mg/l Fe	mg/kg Fe	mg/l K
Gr. C opl flas 4	1,0000	49,7362	4973,6200	0,0597	5,9735	1223,3400	122334,0000	0,0398	3,9793	0,2230	22,2964	0,8140	81,4013	131,5300	13153,0000	399,1980
Gr. C opl flas 5	1,0000	52,0137	5201,3700	0,0459	4,5867	1716,8500	171685,0000	0,0419	4,1858	0,2273	22,7313	0,8449	84,4907	128,2400	12824,0000	437,4460
Gr. C opl flas 6	1,0000	49,9434	4994,3400	0,0540	5,4011	1716,7300	171673,0000	0,0405	4,0505	0,2209	22,0912	0,8169	81,6889	125,5960	12559,6000	426,3560

prøve	Afvejning [g]	mg/kg K	mg/l Mg	mg/kg Mg	mg/l Mn	mg/kg Mn	mg/l Na	mg/kg Na	mg/l Ni	mg/kg Ni	mg/l P	mg/kg P	mg/l Pb	mg/kg Pb	mg/l Zn	mg/kg Zn
Gr. C opl flas 4	1,0000	39919,8000	204,6150	20461,5000	93,8783	9387,8300	126,0390	12603,9000	0,3256	32,5623	47,8550	4785,5000	0,5089	50,8866	4,0183	401,8320
Gr. C opl flas 5	1,0000	43744,6000	207,6130	20761,3000	98,4430	9844,3000	154,1680	15416,8000	0,3550	35,4982	45,9509	4595,0900	0,5082	50,8190	4,2316	423,1570
Gr. C opl flas 6	1,0000	42635,6000	200,2040	20020,4000	96,8455	9684,5500	130,4300	13043,0000	0,3345	33,4534	44,9118	4491,1800	0,4942	49,4168	3,9887	398,8670

Oplukning af aske d. 04-11-2014

Type	[mg/kg]	% [-]
Al	5056,443	0,506
As	5,320	0,001
Ca	155230,667	15,523
Cd	4,072	0,000
Cr	22,373	0,002
Cu	82,527	0,008
Fe	12845,533	1,285
K	42100,000	4,210
Mg	20414,400	2,041
Mn	9638,893	0,964
Na	13687,900	1,369
Ni	33,838	0,003
P	4623,923	0,462
Pb	50,374	0,005
Zn	407,952	0,041

Bilag 8 – Forsøgsbeskrivelser

Oversigt for forsøgsbeskrivelser:

- pH	Side 2-3
- Ledningsevne	Side 4-5
- Glødetab	Side 6-7
- Oplukning af aske	Side 8-10
- Vandindhold	Side 11-12
- Vandopløselighed	Side 13
- Vandopløselige anioner	Side 14
- Porøsitet og densitet	Side 15-17
- Kapillarsugning	Side 18-34

pH i 1 M KCl opsløsning. Jord-væske forhold 1:2,5

A **Princip**

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

B **Specielt apparatur**

Til målingen benyttes kombinationsselektrode i forbindelse med et pH-meter, der tillader en nøjagtighed på 0,05 pH-enheder.

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 4,01:

Radiometer pH 4.

3) Bufferopløsning, pH 7,00:

Radiometer pH 7.

E Analysens udførelse

1) Fremstilling af jordopslemningen

5,00 g tør, knust jord afvejes på teknisk vægt i en 20 mL plastvials. Der tilsættes 12,5 mL 1 M KCl-opløsning med pipette. Opslemningen stilles på rystebord i 1 time, hvorefter jorden bundfældes i 5-10 minutter, indtil en væskefase har udskilt sig over jorden.

2) Målingens udførelse

Elektroden anbringes i den øvre kolloidfattige del af opslemningen således at diafragmaet er under væskeoverfladen (under måling skal gummiproppen være aftaget). Undgå at elektroden ikke rammer jorden. Forud for hver måling skylles elektroden grundigt med destilleret vand, hvorefter en evt. dråbe aftørres forsigtigt med et stykke papir.

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.

Plastvial med jorden/KCl skal opsamles i beholder til jordaffald.

Måling af 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 lede partikler, der er til stede i væsken.

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes ledningsevнемåler.

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. Plastikflaskerne stilles ca. ½ time på rysteapparat, hvorefter jorden bundfældes i ca. 20 minutter, indtil en væskefase har udskilt sig over jorden.

Ledningsevneelektroden skylles med destilleret vand. Sæt elektroden ned i væske og der trykkes på "**SAMPLE**". Når displayet viser "STAB" tryk på "**PRINT**" og aflæs resultatet.

D Beregning af resultat

På baggrund af ledningsevne målingen beregnes jordens ionindhold i jordvæsken.

Det samlede ionindhold i jordvæsken:

$$S_{\text{væske}} (\text{mækv.} / L) = \frac{10 \text{ cm} \cdot \text{mækv.} \cdot \text{ledningsevnen} (\text{mS} / \text{cm})}{L \cdot \text{mS}}$$

Det samlede ionindhold i jordvæsken kan omregnes til et samlet ionindhold af ioner pr.

$$S_{\text{jord}} = \frac{S_{\text{væske}} \cdot V_{\text{vandtilsat}}}{M_{\text{jord}}}$$

E **Affaldshåndtering**

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Glødetab i jord

A Princip

Jordens indhold af organisk materiale svarer stort set til det opnåede glødetab ved 550°C. I en tungmetalforurenet 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 (1time hvis ovnen er kold). Diglerne afkøles i eksikkator og vejes på analyse vægt.

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

Derefter afvejes omkring 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 eksikkator og vejes på analyse vægt.

D **Beregning af resultat**

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

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

E **Affaldshåndtering**

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

Oplukning af jordprøve 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 metal-koncentrationen i jorden.

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes et atomabsorptionspektrofotometer (AAS).

C Kemikalie sikkerhed

Salpetersyre - Brandnærende; Ætsende; Brandfarlig ved kontakt med brandbare stoffer. Alvorlig ætsningsfare. 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 til, da HNO₃ ellers vil fordampe. Flaskerne stilles i autoklaven ved 200 kPa (120°C) i 30 minutter. 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 AAS.

F **Bestemmelse af metaller**

Ekstraktens indhold af metaller måles ved AAS 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**

Salpetersyre hældes i affaldsdunke mærket X 4.18.

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Filterpapiret bortkastes i skraldespanden i stinkskabet.

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

Vandindhold i jord

A Princip

I forbindelse med den elektrodialytisk 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.

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

E Affaldshåndtering

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald og bægerglassene rengøres.

Vandopløselighed

Analyse:

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 over et måleglas.

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

Væsken 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 stilles til afdrypning.

Når asken er næste tør stilles filteret med asken i varmeskab ved 105°C natten over.

Asken og filteret vejes og vægten noteres.

Vandopløselige anioner

Analyse:

10g tørret aske afvejes på teknisk vægt til 100mL plastikflaske. Der tilsættes 50mL destilleret vand.

Prøven stilles på rystebord natten over.

Prøven filtreres med sprøjtefilter og prøven gemmes til ionchromotograf og AAS

	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 prøvelemets 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/m^2
- 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 ^{kontinuerligt} 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. ~~_____~~ 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 af-tørring 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.

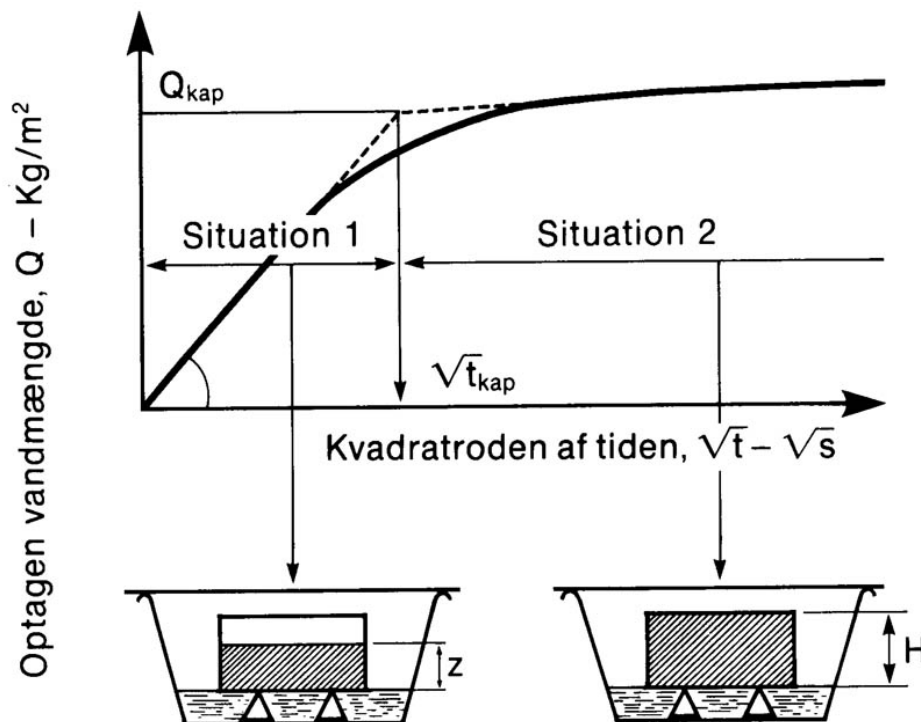
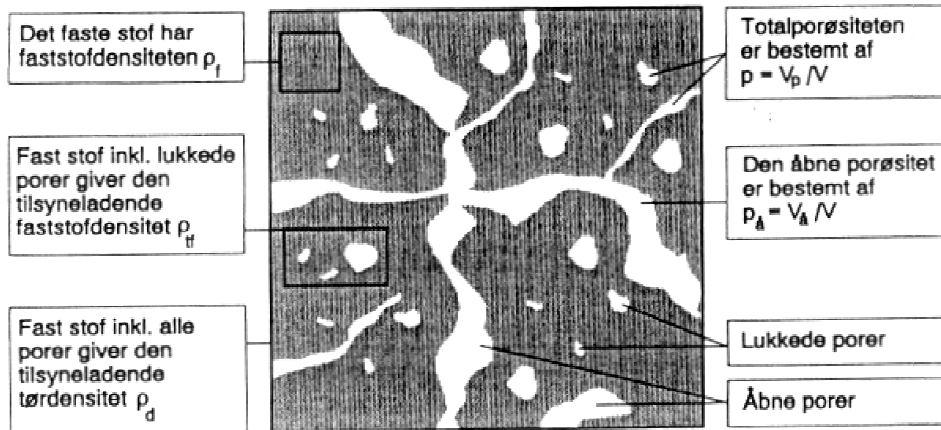
Parametrene bestemmes som vist med formlerne i skema 1.

	PORØSITET OG DENSITET, SKEMA 1	Hold:
	Sag:	Date:
		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			
$P_{\ddot{a}} = V_{p\ddot{a}} / V$ 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:				
---------------	--	--	--	--

PORØSITET, DENSITET OG KAPILLARSUGNING



Indholdsfortegnelse

1. Formål	20
2. Omfang.....	20
3. Baggrund	21
3.1. Generelt.....	21
3.2. Porøsitet og densitet	21
3.3. Kapillarsugning.....	24
4. Eksperimenter.....	27
4.1. Porøsitet og densitet	27
4.2. Kapillarsugning i mursten	27
5. Rapportering.....	29
6. Litteratur	30
Bilag 1: Skema 1 – Porøsitet og densitet.....	30
Bilag 2: Skema 2 – Kapillarsugning I	32
Bilag 3: Skema 3 – Kapillarsugning II	33

Forside:

Øverst: Skitse af et porøst materiale med forskellige materialeparametre defineret.

Nederst: Illustration af opsuqinasforsøq.

1. Formål

Øvelsens formål er dels at måle porøsitet og densitet for et eller flere byggematerialer, dels at måle et eller flere byggematerialers kapillarsugningsevne. De anvendte byggematerialer oplyses på forsøgsdagen.

2. Omfang

Indledning: Øvelsen indledes med en fælles orientering om det apparatur, der skal anvendes.

Gruppearbejde: Herefter arbejder grupperne med hver deres prøvelegemer.

Afslutning: Øvelsen slutes med, at

alle grupper indtaster måleresultater på Campusnet til brug ved rapporteringen.

Manglende resultater fra en gruppe medfører nedsat karakter i den endelige bedømmelse!

3. Baggrund

3.1 Generelt

En bygningskonstruktions egenskaber afhænger af hvilket materiale den bygges af. Disse egenskaber kan fx være bæreevnen eller isolansen. Mange af byggematerialernes egenskaber påvirkes af hvor våde de er. Det gælder fx træ som vil angribes af svamp hvis der er et højt fugtindhold i det. Anbringes træet tæt sammen med våd beton vil svamp således angribe træet, ligesom styrken af træet vil mindskes med et øget fugtindhold.

3.2 Porøsitet og densitet

Et materiales densitet er afgørende for mange af dets egenskaber. En generel regel er at jo tungere et materiale er, jo stærkere er det, og jo lettere det er, jo bedre isolerer det. *Densiteten kan bestemmes som massen delt med rumfanget.* Dog kan materialet indeholde en ukendt mængde vand, og den bestemte densitet er derfor en dårligt anvendelig størrelse, hvis masseandelen som vand udgør er ukendt. Derfor arbejdes ofte med følgende fire densitetsbegreber:

faststofdensitet ρ_f

tilsyneladende faststofdensitet ρ_{tf}

tørdensitet ρ_d

densitet i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand ρ_{ssd}

og de dermed sammenhørende parametre til karakterisering af porøsitetsforholdene

total porøsitet p

åben porøsitet ρ_a

absorption w_a

Størrelserne ρ_f og ρ_{tf} anvendes dog temmelig sjældent. Fig. 1 illustrerer de tre rumfangsdefinitioner.

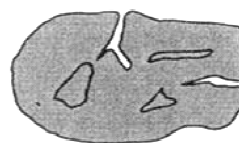
I det følgende gives en mere udførlig forklaring på anvendte begreber til karakterisering af porøse eller kornede materialer.

Faststofdensiteten defineres som materialets masse i tør tilstand divideret med faststofrumfanget, der er vist på figur 1. Faststofrumfanget er selve det faste materiale uden nogen form for porer. Faststofdensiteten kan bestemmes ved pulverisering af prøven.

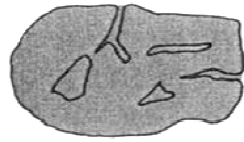
Den tilsyneladende faststofdensitet defineres som materialets masse i tør tilstand divideret med det tilsyneladende faststofrumfang. Det tilsyneladende faststofrumfang betegner rum-fanget af det der set udefra fremtræder som faststof, dvs. faststof inklusiv lukkede porer.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. Rumfangsdefinitioner. (a) absolut faststofrumfang (faststof), (b) tilsyneladende faststofrumfang (faststof + lukkede porer), (c) kornrumfang (faststof + lukkede porer + åbne porer).

Tørdensiteten defineres som materialets masse i tør tilstand delt med prøvelegemets rumfang. Prøvelegemets rumfang betegner det rumfang, faststoffet beslaglægger hvor alle typer porer medtages. Det er altså det ydre rumfang.

Densiteten i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand (saturated surface dry, s.s.d.) defineres som prøvelegemets masse i s.s.d.-tilstanden divideret med prøvelegemets ydre rumfang.

Lukkede porer betegner porer der ikke er tilgængelige for vand fra materialets overflade.

Åbne porer betegner porer der er tilgængelige for vand fra materialets overflade.

Totalporøsiteten er forholdet mellem porerumfang (lukkede + åbne porer) og prøvelegemets ydre rumfang. Udtrykt ved de tidligere definerede densiteter haves porøsiteten som

$$p = p_a = \frac{\rho_f - \rho_d}{\rho_f} \quad (1)$$

I de fleste porøse materialer er poresystemet åbent, og derfor vil den åbne porøsitet være lig med totalporøsiteten.

Absorptionen er betegnelsen for massen af det vand der kan optages i de åbne porer via kapillarsugning divideret med massen af det tørre materiale. Den hænger sammen med de to tidligere omtalte densiteter ved følgende ligning.

$$w_a = \frac{\rho_{ssd} - \rho_d}{\rho_d} \quad (2)$$

Vandindholdet er vand-tørstofforholdet defineres som massetabet af en prøve der tørres ved 105 °C, udtrykt i % af prøvens masse efter tørringen.

Fugtoptagelsen der foregår i de åbne porer, vil være afhængig af porøsiteten. Hvis der ingen hulrum er, dvs. porøsiteten er nul, vil der ikke kunne optages vand. Hvis der derimod haves en stor porøsitet i et materiale, samtidig med poreradius er mellem $10^{-7}\text{m} < r < 10^{-4}\text{m}$, er der mulighed for at optage meget vand i det givne materiale. Dette er fx tilfældet med teglsten.

3.2.1 Bestemmelse af porøsitet og densitet

Ved den såkaldte veje-dyppe-veje metode kan densiteten og porøsiteten for et materiale findes. Metoden udnytter Archimedes lov der siger at opdriften på et legeme i en væske er lig tyngdekraften på det fortrængte væskevolumen. Dette betyder altså at vægten af prøvelegemet under vand m_u har en opdrift som gør, at

prøvelegemet ikke vejer lige så meget under vand, som det gør over vand. Forskellen på vægten under vand og vægten over vand er lig vægten af den væske som prøvelegemet fortrænger.

Volumen af prøvelegemet nedsænket i vand kan bestemmes ud fra nedenstående formel.

$$V = \frac{m_{ov} - m_u}{\rho_w} \quad (3)$$

hvor

V er prøvelegemets volumen [m^3]

m_{ov} er massen i luft af prøvelegemet i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand [kg]

m_u er det målte masse af prøvelegemet neddyppet i vand [kg]

ρ_w er vands densitet [kg/m^3]

Massen m_{ov} angiver hvor meget prøvelegemet vejer, når det er fyldt med vand i de åbne porer. Massen af prøvelegemet under vand, m_u er mindre end m_{ov} som følge af opdriften beskrevet ved Archimedes Lov.

Voluminet af de åbne porer i prøvelegemet findes efter formlen:

$$V_{\hat{a}} = \frac{m_{ov} - m_0}{\rho_w} \quad (4)$$

hvor

$V_{\hat{a}}$ er voluminet af de åbne porer [m^3]

m_0 er tørmassen af prøvelegemet [kg]

Tørmassen er den målte masse efter ovntørring ved 105 °C, hvorved alt vand i det åbne poresystem fordampes. Ud fra det åbne porevolumen kan den åbne porøsitet beregnes ved (5).

$$p_{\hat{a}} = \frac{V_{\hat{a}}}{V} = \frac{m_{ov} - m_0}{m_{ov} - m_u} \quad (5)$$

hvor

$p_{\hat{a}}$ er den åbne porøsitet [-]

Endvidere kan tørdensiteten af materialet bestemmes ved (6) ud fra den fundne tørmasse og det totale volumen.

$$\rho_d = \frac{m_0}{V} \quad (6)$$

hvor

ρ_d er materialets tørdensitet [kg/m^3]

Densiteten af prøvelegemet i vandmættet, overfladetør tilstand bestemmes ved (7).

$$\rho_{ssd} = \frac{m_{ov}}{V} \quad (7)$$

hvor

ρ_{ssd} er materialets densitet i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand [kg/m^3]

3.3 Kapillarsugning

En vandoverflade i en vandfyldt pore – en menisk – vil altid være krum. I små porer med lille diameter kan denne krumning være betydelig, hvorimod den for meget store diametre – fx i en kop – er uden praktisk relevans. Det hydrostatiske undertryk i vandet umiddelbart under menisken er afgørende for et af de vigtigste transportfænomener i mange porøse materialer – kapillarsugning.

Figur 2 viser stighøjden i et kapillarrør, der ækvivalerer en vandfyldt pore. Som det ses danner meniskens kontakt til kapillarrørets inderside en vinkel med overfladen af kapillarrøret, kaldet kontaktvinklen. Desuden virker en overfladespænding i vandet som vist.

I tilfældet med små diametre, er overfladespændingen afgørende for vandtransporten idet den resulterer i en opadrettet kraft der overstiger tyngdekraften og friktionen med rørvæggen og trækker vandet op i røret.

Hastigheden hvormed vandet bevæger sig op i røret vil aftage med tiden, idet friktionen mellem væg og vand vil stige når vandet dækker et større indre areal i røret. Endvidere øges tyngdekraften med vægten af vandet i røret.

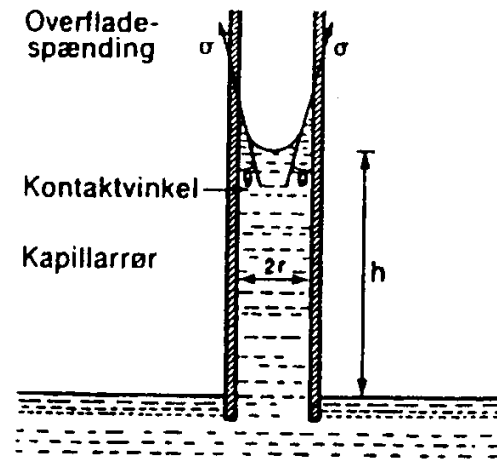


Fig. 2. Stighøjde i et kapillarrør.

Hvis porerne er meget små, vil der være en betydelig modstand mod vandtransporten, der derfor vil foregå meget langsomt. Samtidig vil der være en meget stor kraft idet krumningen på menisken er stor. En væskesøjle kan således i teorien blive flere kilometer høj i meget tynde rør. Dette vil dog tage lang tid at opbygge, samtidig med at det kræver at der ikke er nogen luftbobler i væskesøjlen, idet disse vil bryde kapillarvirkningen. Det er fx ved kapillartransport at et træ får transporteret vand fra rødderne og op til bladene.

Af nedenstående formel ses hvor stort det hydrostatiske undertryk under menisken bliver.

$$p_h = -\frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (8)$$

hvor

p_h er det hydrostatiske undertryk [Pa]

σ er overfladespændingen [N/m]

θ er kontaktvinklen [°]

r er radius i menisken [m]

Som det fremgår af (8) bliver undertrykket stort når radius mindskes. I porer over en vis størrelse vil der ikke forekomme kapillartransport, idet det hydrostatiske undertryk ikke vil resultere i en tilstrækkelig stor kraft til at flytte vandet. Derfor er det ikke alle åbne hulrum som kan fyldes ved kapillartransport af vand.

Når et materiale anbringes i kontakt med vand, vil der ved kapillarsugning transporteres vand op igennem materialet. Dette vil foregå ved aftagende hastighed når vandoverfladen har nået toppen af prøvelegemet, eller der er ligevægt mellem kapillarkræfterne på vandet og de modsatrettede kræfter hidrørende fra friktion og tyngdekraft. Ved et kapillarsugningsforsøg anbringes et materiale med kendt overfladeareal i kontakt med en fri vandoverflade, og der foretages en vejning af prøven til forskellige tidspunkter. Resultaterne fra et sådan forsøg ses i figur 3.

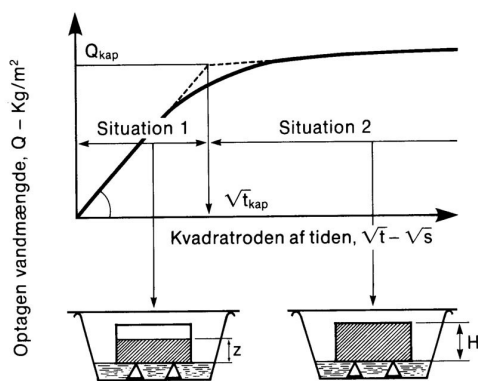


Fig. 3. Illustration af kapillarsugningsforsøg.

Den stiplede linje viser det ideelle forhold, hvor den optagne vandmængde pr. areal, Q som funktion af $t^{1/2}$ afbilder en ret linje, indtil vandmængden svarende til Q_{kap} er opsøget jf. situation 1 i figur 3. Herefter optages ikke mere vand, og hældningen af

kurven er derfor nul, jf. situation 2 i figur 3. I virkeligheden vil en kurve se ud som vist ved den fuldt optrukne linje, fordi alle porerne ikke fyldes lige hurtigt. Ligeledes vil der for nogle materialer være en svagt stigende tendens efter vandoverfladen har nået toppen af prøvelegemet; dette skyldes at fyldningen af de mindste porer i materialet tager lang tid.

På figur 3 ses skæringspunktet mellem de to stiplede linjer. Dette skæringspunkt ($t_{kap}^{1/2}, Q_{kap}$) findes ud fra tangenter til den krumme kurve. Ud fra koordinaterne til punktet kan kapillaritetstallet, k ($kg/(m^2 \cdot s^{1/2})$) udregnes. Denne parameter angiver hældningen af den første kurve som vist i (9).

$$k = \frac{Q_{kap}}{\sqrt{t_{kap}}} \quad (9)$$

Et stort kapillaritetstal betyder at opsugningen foregår hurtigt, mens et lavt omvendt angiver at opsugningen foregår langsomt. Dette har fx betydning for hvor meget vand en mursten når at opsuge i regnvejr.

3.3.1 Bestemmelse af opsugningsparametre

Ved et opsugningsforsøg kan en række materialeegenskaber bestemmes. I første omgang skal den opsugede masse pr. areal bestemmes ud fra (10).

$$Q = \frac{m_t - m_0}{A} \quad (10)$$

hvor

- Q er den opsugede masse pr. opsugningsareal [kg/m^2]
- m_t er massen af prøvelegemet til tiden t [kg]
- m_0 er tørrmassen af prøvelegemet [kg]
- A er opsugningsarealet [m^2]

hvor

M er modstandstallet [s/m^2]

h er højden på prøvelegemet [m]

Massen af det forkonditionerede prøvelegeme, m_0 henviser til en vedtagen standardtilstand som prøvelegemet skal være i ved forsøgets start. Prøvelegemet har ved denne øvelse været udsat for en temperatur på $105\text{ }^\circ\text{C}$ i to døgn inden forsøgets start.

Som tidligere beskrevet kunne den åbne porøsitet bestemmes ud fra veje-dyppe-veje metoden, der benytter sig af Archimedes lov. Ved opsugningsforsøg kan denne porøsitet ligeledes bestemmes ved (12).

$$p_{\hat{a}} = \frac{(m_{slut} - m_0)}{h \cdot A \cdot \rho_w} \quad (12)$$

Når t_{kap} er bestemt som tidligere beskrevet kan modstandstallet M beregnes af (11). Dette siger noget om den indre modstand i materialet der påvirker opsugningshastigheden.

hvor

$p_{\hat{a}}$ er den åbne porøsitet [-]

m_{slut} er massen af prøvelegemet til tiden t_{slut} [kg]

$$M = \frac{t_{kap}}{h^2} \quad (11)$$

4. Eksperimenter

4.1 Porøsitet og densitet

4.1.1 Apparatur og materialer

- 1 halv mursten
- Ekssikkator til opbevaring af prøvelegeme under vakuumsugning
- Vægt med nøjagtighed på 0,1 %
- Kontrollod
- Udstyr til vejning af prøvelegeme under vand
- Destilleret vand
- Termometer med inddeling på 0,1 °C
- Vakuumpumpe
- Klude til aftørring af prøvelegeme
- Varmeskab til forkonditionering af prøvelegeme
-

4.1.2 Fremgangsmåde

Først foretages en kontrolvejning vha. et kontrollod, og den målte masse noteres. Prøvelegemerne skal i udgangssituationen være udtørret i en ovn ved 105 °C. Pga. tidsnød er dette gjort i forvejen, og den målte masse udleveres af vejlederen og noteres i skema 1, bilag 1. Det udtørrede prøvelegeme evakueres tørt i ekssikkator i mindst 3 timer. Pga. tidsnød befinder prøverne sig allerede i ekssikkator, hvor de har været evakueret i ovennævnte tidsrum.

Hanen på ekssikatoren lukkes, og pumpen tages af. Herefter sættes en slange på hanen, hvor den anden ende af slangen er neddykket i en spand med destilleret vand. Når hanen åbnes vil undertrykket i ekssikatoren suge vandet ind i ekssikatoren. Temperaturen af vandet samt af rumluften måles og noteres. Når vandet når ca. 50 mm op over det øverste prøvelegeme lukkes hanen på ekssikatoren og vandslangen tages af. Der pumpes ned til vands damptryk.

Prøvelegemerne med vand henstår i 15 min. med undertryk i ekssikatoren. Hanen på ekssikatoren åbnes, og der ledes luft ind i ekssikatoren. Prøverne henstår i vandet ved atmosfæretryk i 15 min. De vakuumvandmættede prøver vejes (m_u) under vandet, og værdien noteres. Hvorledes der vejes under vand vises af vejlederen. Prøvelegemerne aftørres med en hårdt opvredet klud, og vejes (m_{ov}) i luft. Til sidst foretages en kontrolvejning med kontrollod på vægten. Alle omtalte værdier noteres i skema 1, se bilag 1.

4.2 Kapillarsugning i mursten

4.2.1 Apparatur og materialer

- 1 halv mursten
- Ekssikkator med silicagel til opbevaring af prøvelegeme under afkøling.
- Vægt med nøjagtighed på 0,1 %
- Kontrollod
- Fotobakke med afstandsholdere
- Destilleret vand
- Termometer med inddeling på 0,1 °C
- Stopur
- Klude til aftørring af prøvelegeme
-

4.2.2 Fremgangsmåde

Principielt set skal prøvelegemet være i ligevægt med det klima, hvor det skal bruges. Til sammenligningsgrundlag bør en standardiseret udgangssituation dog benyttes. Den standardiserede udgangssituation opnås i denne øvelse ved at prøvelegemet forkonditioneres i en ovn ved 105 °C i mindst to døgn.

Ekssikatoren er en lufttæt plast- eller glasbeholder. Silicagelen er et tørremiddel

som sørger for, at der ikke er fugt i luften inde i eksikkatoren. Der benyttes kontrollod til sikring af at vægten vejer korrekt både før og efter forsøget. Prøvelegemet vejes i modtagelsessituationen (m_0), mens dets sugeflade og højdes opmåles.

Fotobakken fyldes med destilleret vand indtil vandet når ca. 5 mm op over afstandsholderne. Herefter anbringes prøvelegemets sugeflade på afstandsholderne, således at vandet går op på siden af materialet. Stopuret startes i det øjeblik der er kontakt med vandet.

Temperaturen i lokalet måles (T_{rum}) og noteres, mens temperaturen af vandet i fotobakken skal være $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, hvilket måles (T_{vand}). Ved forsøg over længere tid

bør fotobakken overdækkes for at udgå fordampning. Med passende tidsintervaller regnet fra starttidspunktet tages prøvelegemet op, aftørres med en hårdt opvredet klud og vejes (m_t). Stopuret stoppes når prøvelegemet ikke er i kontakt med vandet i fotobakken. Der foretages målinger efter 1, 2, 4, 8, 16, 32, 60, 120, evt. 240 minutter fra starttidspunktet. Til sidst kontrolles vægten ved en kontrolvejning og værdien noteres.

Når målearbejdet er færdigt, indtastes måleresultater i et resultatskema der ligger under fildeling på Campusnet. Husk at gemme det indtastede regneark på egen PC og 'uploade' det indtastede regneark på Campusnet.

5. Rapportering

På artikelform (altså ikke en teknisk rapport!) sammenfattes fremgangsmåde, forsøgsresultater, diskussion og konklusion i et omfang af **max. 4 sider**. Dersom sideantallet overskrides, trækker det ned i bedømmelsen!

Da modtageren regnes bekendt med teorien, opstilles kun de vigtigste formler anvendt i beregningen af forsøgsresultater, og der refereres til øvelsesvejledningen. Fremgangsmåden ved forsøgene beskrives særdeles kortfattet (se det udleverede eksempel på artikel), og de vigtigste forsøgsresultater trækkes frem!

Hvad skal artiklen indeholde af resultater?

Porøsitet og densitet

- Søjlediagram over porøsiteter for samtlige gruppers materialeprøver. Angiv materialet ud for hver enkelt søjle.
- Søjlediagram indeholdende tørdensitet og densitet i s.s.d.-tilstand for samtlige gruppers materialeprøver. Inddel diagrammet således at de to densiteter for hver materialeprøve sammenstilles.

Kapillarsugning

- Tabel over Q_{kap} og t_{kap} for alle gruppers resultater. Anfør endvidere porøsiteten for hver enkelt prøvelegeme.
- Tabel over kapillaritetstal og modstandstal for alle gruppers resultater.
- Er der sammenhæng mellem målte porøsiteter og tilhørende kapillaritetstal?

Alle disse resultater diskuteres i videst muligt omfang inden for det anførte maksimale sideantal.

6. Litteratur

- [1] Gottfredsen, F.R.; Nielsen, A.: Bygningsmaterialer: Grundlæggende egenskaber. Polyteknisk Forlag, 1997.

Skema 1 – Porøsitet og densitet

Materiale							
Målinger							
Temperatur	$T_{rum} =$	°C	$T_{vand} =$	°C	$\rho_w =$	998	kg/m ³
Kontrollod	$m_{før} =$	g	$m_{efter} =$	g			
Prøvelegeme							
Masse	$m_0 =$	kg	$m_u =$	kg	$m_{ov} =$	kg	
Beregninger							
Volumen og densitet	$V =$	m ³	$V_{\hat{a}} =$	m ³	$\rho_{\hat{a}} =$		
	$\rho_d =$	kg/m ³	$\rho_{ssd} =$	kg/m ³			
Bemærkninger							
				Gruppenr.			
				Dato			

Skema 2 – Kapillarsugning I

Materiale					
Temperatur	$T_{rum} =$	°C	$T_{vand} =$	°C	$\rho_w =$ 998 kg/m ³
Målinger					
Prøvelegeme					
Dimensioner	$h =$	m	$A =$	m ²	
Masse	$m_0 =$	kg	m_{slut}	kg	
Beregninger					
Opsugnings- parametre	$Q_{kap} =$	kg/m ²	$t_{kap} =$	s ^{1/2}	$k =$ kg/(m ² ·s ^{1/2})
	$M =$	s/m ²	$\rho_{\dot{a}} =$		
Bemærkninger					
Gruppenr. Dato					

Skema 3 – Kapillarsugning II

Materiale							
Temperatur	$T_{rum} =$	°C	$T_{vand} =$	°C	$\rho_w =$	998	kg/m ³
Kontrollod	$m_{før} =$	g	$m_{efter} =$	g			
Prøvelegeme							
t [min]	$t^{1/2}$ [s ^{1/2}]	m_t [kg]	Q [kg/m ²]	t [min]	$t^{1/2}$ [s ^{1/2}]	m_t [kg]	Q [kg/m ²]
0				0			
1				1			
2				2			
4				4			
8				8			
16				16			
32				32			
60				60			
120				120			
240				240			

Bemærkninge

r:

Dette Skema 3 kan anvendes til to prøvelegemer.

Gruppenr

.

Dato

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