

Anvendelse af ny asketype – vurdering af væsentligste egenskaber

Undersøgelse af slammaskens indflydelse på betons
trykstyrke og egenskaber



Mikkel Darre – s124261

B.Eng

Department of Civil
Engineering 2016

DTU Civil Engineering
Juli 2016

Forord

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

Opgaven er udarbejdet i samarbejde med Lisbeth Ottesen fra DTU BYG Institut for Byggeri og Anlæg. Stor tak til Lisbeth for vejledning og hjælp.

En særlig tak skal henvendes til laboranterne Ebbe Cederberg Schnell og Malene Grønvold, som altid var behjælpelige ved laboratorieforsøg.

Rapporten er udført af Mikkel Darré.

Danmarks Tekniske Universitet, Kongens Lyngby, juli 2016

Mikkel Darré

Sammendrag

Formålet med denne rapport er at undersøge muligheden for brug af slamaske i betonblandinger, med henblik på at optimere betonens styrke, sammensætning af tilslag eller forbedre bindingerne imellem tilslagene. Tidligere forskning har vist positive resultater med flyveaske som erstatningsprodukt i en betonblending. Flyveaske viser puzzolansk effekt og har fordelagtige egenskaber i forhold til bearbejdelighed af en betonblending.

Slamasken der bruges i denne rapport er fra Møllåværket i Lyngby.

Slamaske er forbrændt spildevandsslam, som er et restprodukt ved rensningen af spildevand. Det bliver i dag deponeret, hvilket er et spild af resurser og penge. Hvis slamasken kan bruges som erstatningsprodukt, vil det kunne skabe store besparelser både økonomisk men også miljømæssigt.

Der bliver i denne rapport udført diverse forsøg med en slamaske fra Møllåværket i Lyngby, for at undersøge muligheden for at bruge den som erstatningsprodukt i en betonblending.

Trykstyrkeforsøg vil blive gennemført i henhold til DS 196-1. Forsøgene har til formål at få et indblik i trykstyrken på betonstøbninger med et indhold af slamaske. Der blev lavet støbninger med henholdsvis 5; 7,5 og 10 % cementerstatning med slamaske. Styrken blev undersøgt efter 7, 14 og 28 hærdedøgn. Alle prøver med slamaske har en reference blanding med den samme mængde flyveaske, så der kan sammenlignes. Ved 10 % slamaske blev blandingen meget tør og kunne ikke vibreres ud, og der måtte tilsættes ekstra vand. Det gav et højere v/c-forhold og derved en lavere styrke, og kunne derfor ikke sammenlignes med de resterende blandinger. Derudover blev der undersøgt om knusning af slamaske havde indflydelse på askens vandbehov. Der blev støbt en 10 % knust slamaske blanding, hvilken kunne vibreres og trykprøves. Til slut blev alle prøver sammenlignet med en referenceprøve uden aske, lånt af en medstuderende fra DTU.

Afbindingstiden blev undersøgt for at få et indblik i hærdningsprocessen på forskellige mørtelblandinger.

Der blev lavet en askekarakteristik af slamasken, da den indeholder tungmetaller og salte. Tungmetaller kan være farlige for miljøet pga. deres giftighed, mens salte kan skabe korrosion hvis betonen skal armeres.

Trykstyrkeforsøgene viste at slamske er et godt erstatningsprodukt i beton. Det var 10 % knust slamaske der gav det bedste resultat. Efter 28 hærdedøgn nåede den samme styrke som referencen uden aske. Resten af prøverne med slamaske lå lidt under styrken af referenceprøven uden aske.

Når trykstyrkerne efter 7 hærdedøgn sammenlignes støbningerne efter 28 hærdedøgn, er det iøjnefaldende at alle prøver med aske er kommet tættere på referencen uden aske. Det beviser teorien omkring cementen først skal hydratisere inden askens puzzolanreaktion starter.

Derudover opnåede støbningerne med slamske næsten samme styrke som støbningerne med flyveaske. Derved kan det konkluderes at slamaske har samme effekt som flyveaske med hensyn til trykstyrken af betonstøbninger.

Ved laboratorieforsøgene blev der fundet en række tungmetaller der overskred grænseværdierne for kategori 1 i henhold til miljøstyrelsens bekendtgørelse [15]. Det betyder at slamasken har begrænsede anvendelses muligheder. For at kunne begrænse tungmetallernes mængde, kunne der foretages en udvaskning af slamasken, hvilket måske ville kunne få tungmetallerne inden for grænseværdierne for kategori 1, og medføre at slamasken kunne bruges inden for alle bygge- og anlægsområder. Kloridindholdet af slamasken overholdte grænseværdierne der er gældende for flyveaske, hvilket er vigtigt med hensyn til korrosion i armeret beton. Derudover overholder slamasken også kravet for glødetab som skal være under 5 %.

Summary

Concrete is the most widely used building material in the world. This means a large cash flow and also a large CO₂ emission mainly due to the cement production. Cement production requires very high temperatures and therefore much energy. If the cement could be replaced by products which are deposited it will have a favorably impact in terms of costs, but also CO₂ emission. In previous research fly ash has already been approved for partial replacement of cement due to the ash pozzolanic effect. This report examines the possibility of replacing the cement with sludge ash.

Sludge ash is burned sewage sludge which is a residual product in the purification of waste water. Today it is deposited which is a waste of resources and money. If sludge ash can be used as a replacement it will generate important savings both economically but also environmentally.

This report includes various experiments that have been conducted with sludge ash from Mølleåværket in Lyngby, to explore the possibility of using it as a replacement product in a concrete mix.

Compressive Strength Tests will be carried out according to EN 196-1. The experiments are designed to get a glimpse of the compressive strength of concrete with a content of sludge ash. Castings were made by 5; 7.5 and 10 % cement replacement with the sludge ash. All samples with the sludge ash have a reference mixture with the same amount of fly ash in order to be compared. At 10% sludge ash the mixture was very dry and could not be vibrated, therefore, more water had to be added. It gave a higher water/concrete ratio and therefore a lower strength, and could not be compared with the remaining mixture. In addition there was made a sample of crushed sludge ash to see if that had an impact on the large water need of the sludge ash. The sample was a 10 % crushed sludge ash mixture which could be vibrated and pressure tested. Finally, all samples were compared to a reference sample without ash, borrowed from a fellow student from DTU.

The setting time was studied to gain insight into the curing of various mortar mixes.

There was made a characteristic of the sludge ash because it contains heavy metals and salts. Heavy metals can be hazardous to the environment while salts can cause corrosion if the concrete has to be reinforced.

Compressive strength tests showed that sludge ash is a good substitute in the concrete. It was 10% crushed sludge ash that gave the best results, and reached the same strength as the reference without ash after 28 curing days. The rest of the samples with sludge ash were slightly below the strength of the reference sample without ash.

When comparing the compressive strength at 28 curing days with 7 curing days it is striking that all samples with ash come closer to the reference without ash. This proves the theory that the cement first must be hydrating before the ash pozzolanic reaction starts.

In addition, it can be concluded that sludge ash samples reach almost the same compressive strength as their references with fly ash.

The laboratory experiments showed that a number of heavy metals were exceeding the limit values for category 1 according to the Order of the Environmental Protection Agency.

This means that the sludge ash has limited appliance possibilities. In order to limit the heavy metal amount there could be made a leaching experiment, which might get the heavy metals within the limits for category 1 and lead to the use sludge ash used in all construction areas.

The chloride content of the sludge ash is under the same limit fly ash has to be, which is important if the concrete has to be reinforced. Furthermore, the loss on ignition for the sludge ash is found to be less than 5 % which satisfies the standard limits.

Indholdsfortegnelse

FORORD	1
SAMMENDRAG	2
SUMMARY	4
1. INDLEDNING	8
2. TEORI	9
2.1. BETONSAMMENSÆTNING	9
2.2. STYRKE	10
2.3. TILSLAG	12
2.4. FLYVEASKE.....	12
2.5. SLAMASKE	13
3. EKSPERIMENTELT ARBEJDE	15
3.1. TRYKSTYRKETEST	16
3.2. ASKEKARAKTERISTIK	19
3.2.1. Ledningsevne.....	19
3.2.2. pH-måling	19
3.2.3. Glødetab.....	19
3.2.4. Vandindhold og vandopløselighed	20
3.2.5. Oplukning (ICP – måling)	20
3.2.6. Anioner (IC – måling)	20
3.2.7. Kornstørrelsestørrelse.....	21
3.2.8. SEM (Scanning Electron Microscopy).....	21
3.3. DENSITET OG PORØSITET.....	21
3.4. AFBINDINGSTID	22
4. RESULTATER OG DISKUSSION	24
4.1. TRYKSTYRKE.....	24
4.1.1. Sanderstatning	26
4.1.2. Cementerstatning.....	26
4.2. ASKEKARAKTERISTIK	33
4.2.1. Ledningsevne.....	33
4.2.2. PH-måling	33
4.2.3. Glødetab.....	34
4.2.4. Vandindhold.....	34
4.2.5. Vandopløselighed	35
4.2.6. Oplukning (ICP – måling)	36
4.2.7. Anioner (IC – måling)	38
4.2.8. Kornstørrelse	39
4.2.9. SEM.....	41
4.3. DENSITET OG PORØSITET.....	44
4.4. AFBINDING	45
4.5. BOLOMEYS FORMEL	46
5. VIDERE FORSKNING	49
6. KONKLUSION	50
7. LITTERATURLISTE	52
8. BILAG	55

1. Indledning

Beton er det mest brugte byggemateriale i verden. Alene i Danmark bliver der hvert år brugt ca. 8 millioner tons beton, svarende til 3,5 gange Storebælt. Disse tal afspejles også i CO₂ udledningen, hvor det anslås at cementfremstillingen står for 5 % af alt menneskeskabt CO₂ udledning på verdensplan. Prognoser forudsiger at der i 2050 vil være et dobbelt så stort behov for beton sammenlignet med år 2010. Det er så høje tal, at der skal findes alternativer i betonfremstillingen [16].

Der er sat stor fokus på grøn beton, og der er lavet mange undersøgelser og forøg, som prøver at optimere beton ved hjælp af miljøvenlige alternativer. Flyveaske er allerede blevet godkendt som erstatningsprodukt i en betonblanding. I fremtiden vil produktionen af flyveaske dog falde, da det er et restprodukt ved kulafbrænding.

Denne rapport fokuserer på slamaske som erstatningsprodukt, og undersøger fordele og ulemper der vil opstå. Slammaske bliver i dag deponeret, som er et spild af resurser og penge. Deponering af aske koster ca. 1200 kr. pr. ton [18], hvilket kunne spares, hvis slammaske blev godkendt som erstatningsprodukt i beton. Så der er både miljømæssige og økonomiske aspekter at tage i betragtning.

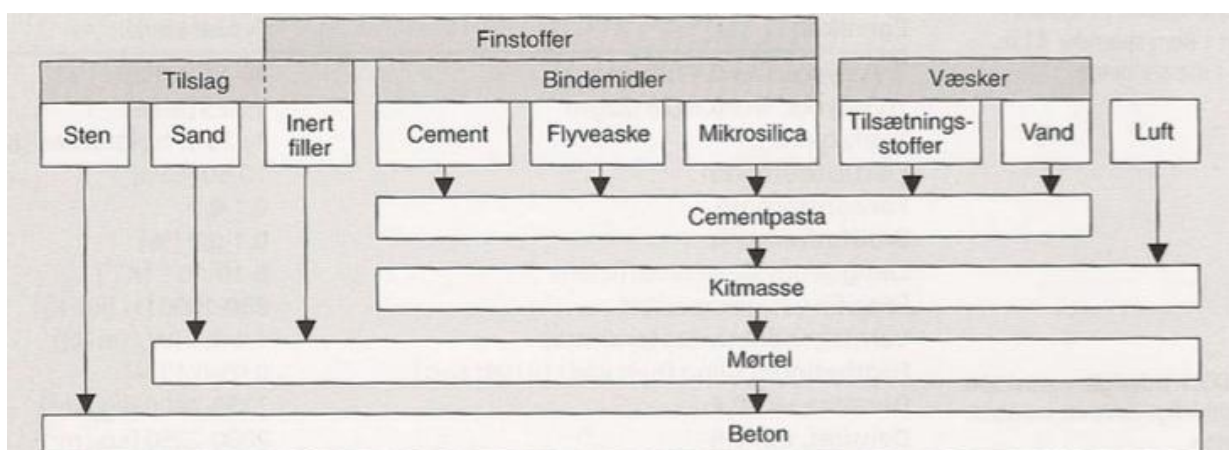
2. Teori

2.1. Betonsammensætning

Beton består af en række delmaterialer, hvor hovedbestanddelene er cement, vand, sand/grus og sten. Cementen reagerer kemisk med vandet i blandingsprocessen, og danner en hård masse som sandet/gruset og stenene holdes sammen af. Denne kemiske reaktion kaldes også for hydratisering. Igennem eksperimentelt arbejde, er der fundet ud af at flyveaske og mikrosilica har puzzolan effekter og derfor kan anvendes som erstatning for dele af cementen. Flyveaske er oftere anvendt end mikrosilica, og bliver i denne rapport brugt som reference, derfor bliver der ikke gået mere i dybden med mikrosilica [1].

Ved hydratiseringen bindes en del af vandet kemisk til cementen. Da volumen af det samlede hydratiseringsprodukt er større i "våd" tilstand end i hærdet tilstand, bliver der skabt hulrum i den hærdede cementpasta. Disse hulrum kan enten være fyldt med gelvand eller kapillarvand. Gelvandet er bundet af de van der Waal'ske kræfter, og har derfor svært ved at fordampe. Kapillarvandet er til gengæld frit tilgængeligt som fordamper let, og vil med tiden indstille sig i ligevægt med omgivelserne. En normal betons densitet ligger hovedsageligt på over 2000 kg/m³ [1].

Figur 1 viser blandingsstadierne for beton, i hvilken rækkefølge de forskellige ingredienser blandes i og hvad de forskellige stadier i blandingen kaldes [2].



Figur 1 - Blandingsstadierne for beton

2.2. Styrke

Betonens vand/cementforhold, v/c forhold, har meget stor betydning for styrken. Et højere v/c -forhold giver lavere styrke [3]. Det overskydende vand efterlader luftporer i den tørre beton og nedsætter styrken. Tidligere forsøg har vist at det kemisk bundne vand og gelvandet udgør ca. 40 % af cementvægten, hvilket betyder at det optimale teoretiske v/c -forhold er ca. 0,4. Dele af cementpartiklerne er kun delvis hydratiseret, som betyder at styrken i betonen vokser igennem hele dens levetid, efterhånden som resten af cementpartiklerne begynder at hydratisere [1].

Nedenfor ses Bolomeys formel som beregner den teoretiske trykstyrke ved normalt luftindhold:

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

Ligning 1 - Bolomeys formel til beregning af trykstyrken

F_c er betonens trykstyrke i MPa, mens K er en konstant som afhænger af cementtype og hærtningsgrad. v/c er vand/cementforholdet i blandingen, og skal i denne ligning ligge mellem 0,45 og 1,25. α er en faktor for et standard luftindhold for basiscement, som afhænger af hærdetiden af betonen.

Der ses ud fra ligningen at et højere v/c forhold giver en lavere styrke af betonen. Da der i denne rapport lægges vægt på iblanding af slammaske, skal Bolomeys formel omskrives. Her skal der i stedet for v/c forholdet kigges på et samlet vand/pulver forhold. Den nye ligning kommer til at se sådan ud:

$$F_c = K \cdot \left(\frac{1}{\frac{v}{c + k \cdot P}} - \alpha \right)$$

Ligning 2 - Bolomeys formel, hvor aktivitetsfaktoren på pulveret er kendt

Her ses k som den specifikke askes aktivitetsfaktor, der er pulverets virkningsgrad i forhold til cementen, mens P er pulverets masse [17].

Aktivitetsfaktoren for flyveaske er 0,5. Samme konstant bruges ved slammaske [5].

Tabel 1 viser konstanterne der skal bruges for basis cement [9].

Hærdedøgn	K	α
7	28	0,6
28	30	0,5

Tabel 1 - Konstanter for basis cement

Udover betonens v/c-forhold er betonens styrke tidsafhængig. Allerede få timer efter støbningen begynder betonen at få en fast struktur, og kan ikke bearbejdes mere. Betonens styrke vil være meget lav i starten, men efterhånden som den gennemgår en kemisk hydratiseringsprocess, bliver den stærkere indtil den har nået sin slutstyrke. Styrken vil stige hurtigt i starten, og allerede efter 7 døgn have nået ca. 70 % af sin slutstyrke. Normalt anses 28 døgn som den tid betonen har brug for at nå sin slutstyrke. Efter 28 døgn vil betonen stadig udvikle sin styrke, men denne styrke tages ikke i betragtning jf. DS/EN 1992-1-1. Derfor betegner man slutstyrken som styrken efter 28 døgn, selvom den bagefter stadig vil stige. I mange tilfælde er der behov for at belaste betonen tidligere end de 28 døgn, f.eks. ved brokonstruktioner, der skal opspændes med kabler, eller betonelementer der skal løftes kort tid efter støbning. Det er derfor vigtigt at kende styrkeudviklingen så man er sikker på betonen har den rette styrke til håndteringen af den. Dette vises også i rapporten hvor der er styrkeprøvet efter 7 og 14 døgn [10].

Traditionel beton har en trykstyrke mellem 5 og 50 MPa. Er trykstyrken over 50 MPa, er der tale om højstyrkebeton. En beton til husbyggeri har normalt en trykstyrke på 25 MPa, hvilket også kaldes passiv beton.

Beton besidder også over en trækstyrke, som dog er ca. 10-20 gange lavere end trykstyrken. Derudover er et trækbrud uvarslet og skørt, og er meget varierende. Disse forudsætninger gør at trækstyrken er en upålidelig størrelse at dimensionere efter. Almindelige dimensioneringsregler for beton forudsætter derfor heller ikke, at beton har en trækstyrke.

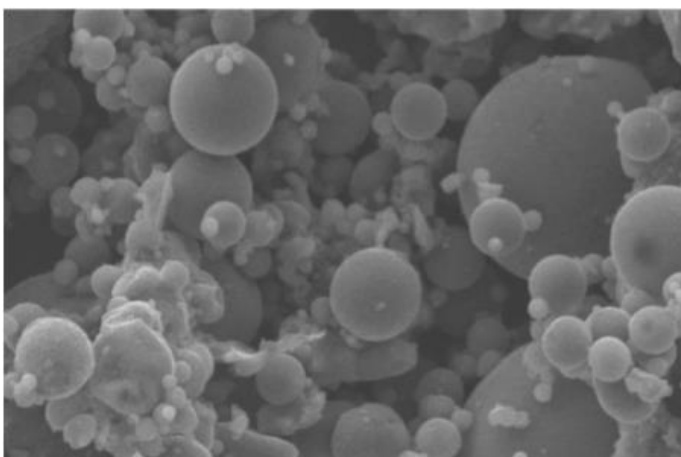
Der vil i denne rapport kun blive undersøgt betonens trykstyrke, og der vil derfor ikke blive gået mere i dybden med trækstyrken [11].

2.3. Tilslag

Tilslaget er den største del i betonen og udgør normalt mellem 65 – 75 % af betonen. I en almindelig betonblanding er tilslaget bestående af sand og sten, men kan i visse tilfælde også bestå af letklinker og andre naturlige eller kunstige materialer. Beton kan ses som en kunstig sten, hvor tilslaget bliver limet sammen af cementpastaen, og skaber en solid masse

Når tilslaget er så stor en del af betonen, er det vigtigt at kende dets vandindhold, så man derved kan beregne det eksakte v/c-forhold. Stenstørrelsen af tilslaget har også stor betydning for betonen i forhold til bearbejdelighed, pakning og vandbehov. Dette er vigtigt at overveje når der arbejdes med slammaske, som suger meget vand og også i sig selv har betydning for bearbejdelighed. Ved en lille stenstørrelse af tilslaget er vandbehovet større, da overfladearealet er større, og omvendt med en stor stenstørrelse [8].

2.4. Flyveaske



Billede 1 – Mikroskopbillede af flyaske [7]

I forsøgene bliver flyveaske brugt som reference, da der ved tidligere forsøg er bevist, at det kan bruges som erstatningsprodukt af cement i beton. Flyveaske har puzzolansk effekt, der bidrager til betonens tæthed og styrke. Flyveaske bliver dannet ved forbrænding af pulveriseret kul. Her opstår der en aske som bliver opfanget i skorstenen. Asken er så finkornet, at den ellers ville flyve ud af skorsten, deraf navnet flyveaske. Asken

består hovedsageligt af kugleformede glaspartikler, som der ses i Billede 1. Det er nemt at få øje på de kugleformede glaspartikler, hvor den store kugle øverst til højre er ca. 20 μm . Mere kemisk består asken hovedsageligt af SiO_2 og Al_2O_3 . Efter EN 197-1 skal SiO_2 være mindst 25 % af asken.

Når flyveasken reagerer i betonen opstår der en såkaldt glasfase, som er en puzzolanreaktiv, hvilket vil sige at den reagerer med calciumhydroxid som dannes ved hydratiseringen af

cement, og danner bindemiddel. Det betyder at puzzolanereaktionen først sker efter noget tid, da cementen først skal hydratisere. Det anslås at reaktionen starter efter 3-14 døgn. Hovedsageligt er flyveaske god at blande i beton grundet det lille partikelstørrelse og runde form. Den pakker betonen godt og har ikke det store vandbehov [7].

2.5. Slammaske

Slammaske, også kaldet bioaske, er et biprodukt under spildevands rensning. En kort opsummering af produktionen af slammaske kan beskrives i fem punkter, og stammer fra Avedøre Spildevandscenter [12]:

1. En blanding af primærslam og biologisk overskudsslam sendes til udrådning i rådnetanke, hvor slammet udrådnes anaerobt. Under udrådningsprocessen dannes biogas, der anvendes til el- og varmeproduktion.
2. Det udrådnede slam afvandes i centrifuger og tørres til et tørstofindhold på 32 %. Derefter transporteres slammet til fluidbed ovnen, hvor det brændes ved en temperatur på 850 °C. Efter en opholdstid i ovnen på mindst 2 sekunder ledes røggas og partikler videre til miljøbehandling.
3. I røggasrensingsanlægget frasorteres aske og partikler i elektrofiltret, røggassen nedkøles og der tilsættes kemikalier for at binde lugt, dioxin og tungmetaller, især kviksølv.
4. Posefiltret opfanger de resterende partikler i røggassen, som sendes til askebeholderen. I scrubberne udvaskes saltsyre og SO₂ af røggassen, hvorefter den opvarmes til 115 °C og sendes ud i fri luft fra den 50 m høje skorsten.
5. Den frasorterede aske transporteres til rensningsanlæggets eget miljøgodkendte askedepot eller transporteres med pulvertransportbil til betonproducenter.

En af ulemperne ved slammaske er at den farve betonen rødlig, som kan skabe nogle æstetiske problemer. Det er noget forbrugeren af betonen skal vide før asken tages i brug. Derudover er slammasken meget ”tørstig”, dvs. at den suger meget vand og gør blandingen og vanskeligere at bearbejde.

Der kan også foreligge nogle problemer med de tungmetaller der er i asken, som ikke må overstige de standarder der er for slamaske.

I denne rapport sammenlignes slamaske med flyveaske. Slamasken skal derfor overholde de samme krav som gælder for flyveaske.

3. Eksperimentelt arbejde

I dette afsnit gennemgås der hvilke forsøg der er blevet udført, og hvad formålet er ved de forskellige forsøg. Tabellen nedenfor giver en kort beskrivelse af de enkelte forsøg, deres formål, samt forsøgsvejledningerne i bilag.

Udførte forsøg		
Forsøgs beskrivelse	Forsøgets formål	Bilags nummer
Trykstyrke test	Undersøge trykstyrken.	Henvises til DS/EN 196-1
Ledningsevne	Undersøge slamaskens saltindhold.	Bilag C
PH-målinger	Undersøge slamaskens pH-værdi.	Bilag E
Glødetab	Undersøge slamaskens organiske materiale.	Bilag B
Vandindhold og vandopløselighed	Undersøge askens vandindhold, samt mængden af de vandopløselige materialer.	Bilag G og H
Oplukning (ICP)	Undersøge mængden af tungmetaller i slamasken.	Bilag D
Anioner (IC)	Undersøge mængden af salte i slamasken.	Bilag A
Kornstørrelse	Undersøge kornstørrelsen af slamasken.	Bilag J
SEM	Undersøge strukturen af asken.	
Densitet og porøsitet	Undersøge densitet og porøsitet på en mørtelstøbning	Bilag F
Afbindingstid	Undersøge hærdningsprocessen for udvalgte blandingsrecepter.	Bilag K

Tabel 2 - Udførte forsøg

3.1. Trykstyrketest

Der blev gennemført en række mørtelblandinger, med forskellige mængder aske, for at teste styrken på dem. Ved alle prøver med slamaske, blev der også lavet en reference med samme mængde flyveaske. De udføres i henhold til DS 196-1.

Som udgangspunkt blev der brugt mængderne: 450 g basis cement, 1350 g sand og 225 g vand. Denne blandingsrecept blev blandet først, for at få et indblik i konsistens og bearbejdelighed. Alle blandingsrecepterne er vist i Tabel 3 nedenfor.

Prøvenummer	Indhold
B - 10 % sanderstatning med slamaske	450 g cement, 135 g aske, 1215 g sand, 225 g vand
BR - 10 % sanderstatning med flyvaske	450 g cement, 135 g aske, 1215 g sand, 225 g vand
D - 7,5 % cementerstatning med slamaske	416,25 g cement, 33,75 g aske, 1350 g sand, 225 g vand
DR - 7,5 % cementerstatning med flyvaske	416,25 g cement, 33,75 g aske, 1350 g sand, 225 g vand
E - 5 % cementerstatning med slamaske	427,5 g cement, 22,5 g aske, 1350 g sand, 225 g vand
F - 5 % cementerstatning med flyvaske	427,5 g cement, 22,5 g aske, 1350 g sand, 225 g vand
G - 10 % cementerstatning med slamaske + vand	405 g cement, 45 g aske, 1350 g sand, 250 g vand
GR - 10 % cementerstatning med flyvaske + vand	405 g cement, 45 g aske, 1350 g sand, 250 g vand
H - 10 % cementerstatning med knust slamaske	405 g cement, 45 g aske, 1350 g sand, 225 g vand
HR - 10 % cementerstatning med flyvaske	405 g cement, 45 g aske, 1350 g sand, 225 g vand

Tabel 3 - Betonsammensætninger

Prøvenumrene følger ikke en bestemt rækkefølge, da de første prøver der blev støbt skulle laves om, grundet fejl. Det blev først opdaget da andre prøver allerede var blevet støbt, derfor den lidt mærkelige nummerering. For at de tilhørende billeder passer overens med blandingsrecepterne, bliver nummereringen nød til at være sådan.

De forskellige blandingsrecepter blev alle vurderet i forhold til konsistens og sammenlignet med reference blandingen uden aske. Det kunne hurtigt ses, at blandinger med slamasken blev tørrere end reference blandingen, selv med små mængder forøgelse af slamasken. Der skulle derfor også forøges i vandmængden i blandingsrecepten G, 10 % cementerstatning med slamaske. Blandingen var for tør og kunne ikke vibreres ordentligt ud, som det ses på Billede 2. For at kunne sammenligne den med noget skulle der også forøges i vandmængden i blanding GR, 10 % flyveaske.



Billede 2 - Eksempel på blandingsrecepten på 10 % cementerstatning uden tilsat vand

Blandingsrecept H blev udført med knust slamaske. Asken blev knust ved hjælp af en ringknuser i 30 sekunder. Tankegangen bag knusningen af asken var, at gøre kornstørrelsen

mere lig med den fra flyveaske. Kornstørrelsen for denne slamaske er meget grov, og ved hjælp af ringknuseren kan den gøres mere fin. Ideen er at, en finere kornstørrelse pakker betonen bedre, og gør den bedre håndterlig. Derudover blev der undersøgt om den finere kornstørrelse havde indflydelse på det store vandbehov, der opstår ved øgede mængder slamaske.

For at finde de enkeltes prøvers trykstyrke, blev der brugt en trykstyrkemaskine, Toni 3000. Prøverne blev enkeltvis lagt på langs i maskinen, og trykket en gang i hver ende. Opstillingen ses på Billede 3 nedenfor. Prøven belastes med en konstant last på $2,40 \text{ kN/s} \pm 0,2 \text{ kN/s}$, indtil brud.



Billede 3 - Trykstyrke test i trykstyrkemaskine

Efter den maksimale trykkraft af prøvelegemet er fundet, kan den maksimale trykstyrke beregnes på følgende måde.

$$R_C = \frac{F_C}{A}$$

Ligning 3 - Beregning af trykstyrke

Hvor R_c er den beregnede trykstyrke i megapascal, F_c er den maksimale styrke prøven bliver udsat for i Newton, og A er det tværsnitsareal der trykkes på i kvadratmillimeter. Før prøverne udsættes for tryk, blev hver prøvelegeme vejet og målt, til beregning af densitet og trykstyrke.

Alle resultater findes i Bilag I.

3.2. Askekarakteristik

3.2.1. Ledningsevne

Ledningsevnen af asken laves for at teste hvor godt en elektrisk strøm ledes igennem asken, som er afhængig af antal ladet partikler, der er til stede. De ladede partikler er et andet udtryk for hvor mange saltioner der er til stede. Hvis antallet af saltioner er højt kan det skabe korrosion, hvis betonen skal armeres

3.2.2. pH-måling

pH-målingen gennemføres for at finde askens pH-værdi når den opløses i vand. Det er vigtigt at kende dens pH, da cementen i sig selv er basisk. pH-værdien kan derudover fortælle om der er risiko for korrosion hvis betonen skal armeres. Lave pH-værdier øger muligheden for korrosion.

3.2.3. Glødetab

Glødetabet findes for at se hvor meget organisk materiale er til stede i asken, som er den mængde der forsvinder ved at sætte en askeprøve i en 550 °C grader varm ovn.

Slamasken sammenlignes i denne rapport med flyveaske, og skal derfor overholde de samme krav.

Græseværdierne for glødetabet er vist i Tabel 4, i henhold til DS/EN 450-1.

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

Tabel 4 – Grænseværdier for glødetab

3.2.4. Vandindhold og vandopløselighed

Vandindhold findes for at sikre hvor meget fugt der er bundet i asken, som kan have en indflydelse på betonens v/c-forhold.

Vandopløseligheden testes for at finde hvor stor en del der er vandopløseligt når asken gennemskylles. Dette materiale er i de fleste tilfælde salte, og siger også noget om hvor homogent asken vil opføre sig. En lav vandopløselighed viser at lidt materiale/få ioner, vil reagere med resten af blandingen.

3.2.5. Oplukning (ICP – måling)

Forsøget tager udgangspunkt i DS 259, som er den danske standard for bestemmelsen af syreopløselige metaller i jordprøver. Formålet er derfor at finde de syreopløselige metaller i asken. Oplukning giver kun en god indikation af de syreopløselige metaller i asken, vil man have en mere konkret værdi skal der foretages en fuldstændig destruktion af asken.

3.2.6. Anioner (IC – måling)

Forsøget blev gennemført for at fastslå mængden af vandopløselige salte i asken. Det er vigtigt at vide hvor meget salt der er til stede i betonen, da der er forskellige krav omkring mængden af salt i beton, både for armeret og uarmeret beton. Er der f.eks. et højt niveau af klorid kan det medføre korrosion i armeret beton.

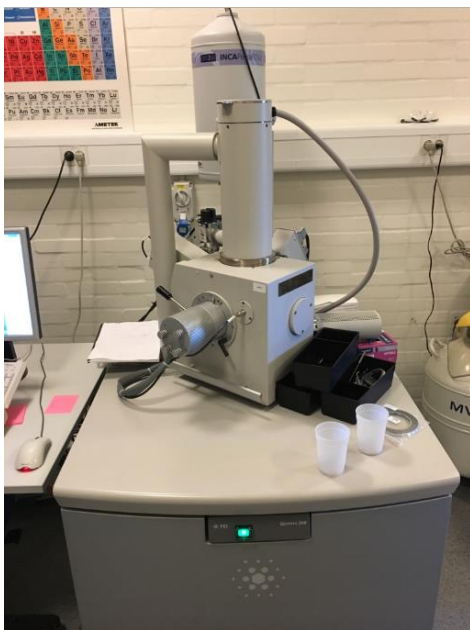
3.2.7. Kornstørrelsestørrelse

Dette forsøg blev gennemført for at få et indblik i hvor store korn slamasken består af. Dette kan hjælpe med at vurdere hvor god pakkeevne den har. Derudover kan man sammenligne med andre typer aske, der allerede er godkendt til iblanding i beton

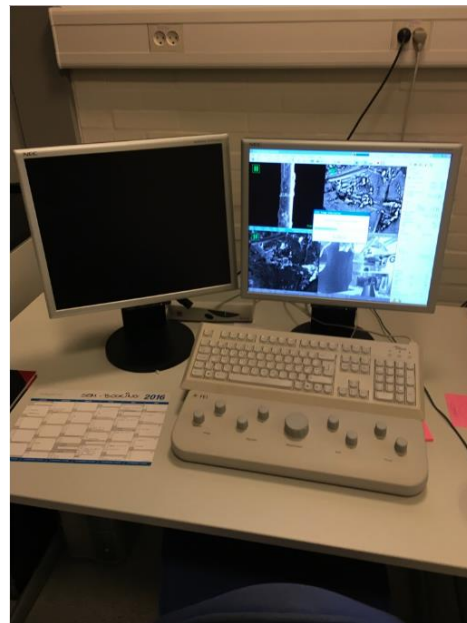
3.2.8. SEM (Scanning Electron Microscopy)

For bedre at danne sig et billede af strukturen af de forskellige slags aske, blev der taget SEM billeder af dem. Maskinen bruger elektroner til at vise hvordan materialet ser ud. Dvs. maskinen kan vise strukturen på selv meget små materialer. For at få det bedste billede af asken blev der forstørret 500 og 1500 gange.

Forsøget blev udført ved at sætte ca. en lillefingernegl aske ind i maskinen der ses på Billede 4. Billedet af prøven blev derefter sendt til den tilhørende computer for at få vist resultatet. Computeren ses på Billede 5.



Billede 4 – SEM maskine



Billede 5 – Computer til SEM maskine

3.3. Densitet og porøsitet

Der blev lavet et densitet og porøsitets forsøg, over en støbning med 5 % cementerstatning med slamaske. Resultatet blev derefter sammenlignet med en reference støbning uden aske, lånt af en medstuderende fra DTU.

Densiteten er materialets masse pr. volumenhed, mens porøsiteten fortæller noget om hvor skrøbeligt materialet er. En højere porøsitet giver en højere evne af materialet til at suge vand.

3.4. Afbindingstid

For at få et bedre indblik i de forskellige blandingers hærdeproces, blev der udført en række afbindingstids forsøg. Ved dette forsøg fås en ide om, hvor hurtigt en blanding hærder, og bliver til fast materiale.

Afbindingstiden er afhængig af forskellige faktorer (13):

- Cementens/askens kemiske sammensætning
- Cementens/askens finhed: En højere finhed giver en lavere afbindingstid
- Temperatur: Høje temperaturer sænker afbindingstiden
- Anvendelse af tilsætningsstoffer

Til måling af afbindingstid blev der brugt et vicatapparat. Opstillingen af forsøget ses på billederne nedenfor.



Billede 6 - Vicatapparat



Billede 7 - Vicatapparatets måleudstyr

Som det ses på billederne er vicatapparatet udstyret med en nål, som måler modstanden i blandingen. Den laver en ny måling hvert tiende minut, og eftersom blandingen hærdes, vil nålen på et tidspunkt ikke have mulighed for at falde helt til bunds. Derefter er der en lille printer i siden på maskinen som viser resultatet. Resultatet kan derefter plottes ind i en graf og blandingens afbindingstid vises.

4. Resultater og diskussion

4.1. Trykstyrke

Trykstyrken er målt ved en Toni 300 trykstyrkemaske, som er beskrevet i afsnit 0.

Hovedformålet var, at undersøge om slamaskens tilstedeværelse i betonblandingen, har nogen positiv effekt på trykstyrken. Derfor har alle blandinger med slamaske en referenceblanding med samme mængde flyveaske. Derudover er alle blandinger blevet sammenlignet med en blandingsrecept uden aske, som er lånt fra en medstudernde på DTU.

Tabel 5 viser de forskellige blandingsrecepter.

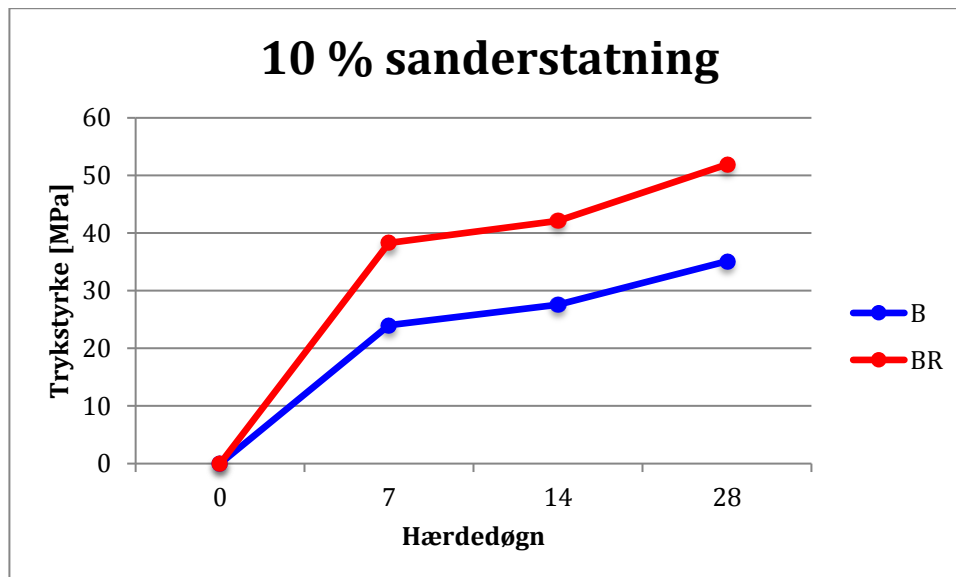
Prøvenummer	Indhold
B - 10 % sanderstatning med slamaske	450 g cement, 135 g aske, 1215 g sand, 225 g vand
BR - 10 % sanderstatning med flyveaske	450 g cement, 135 g aske, 1215 g sand, 225 g vand
D - 7,5 % cementerstatning med slamaske	416,25 g cement, 33,75 g aske, 1350 g sand, 225 g vand
DR - 7,5 % cementerstatning med flyveaske	416,25 g cement, 33,75 g aske, 1350 g sand, 225 g vand
E - 5 % cementerstatning med slamaske	427,5 g cement, 22,5 g aske, 1350 g sand, 225 g vand
F - 5 % cementerstatning med flyveaske	427,5 g cement, 22,5 g aske, 1350 g sand, 225 g vand
G - 10 % cementerstatning med slamaske + vand	405 g cement, 45 g aske, 1350 g sand, 250 g vand
GR - 10 % cementerstatning med flyveaske + vand	405 g cement, 45 g aske, 1350 g sand, 250 g vand
H - 10 % cementerstatning med knust slamaske	405 g cement, 45 g aske, 1350 g sand, 225 g vand
HR - 10 % cementerstatning med flyveaske	405 g cement, 45 g aske, 1350 g sand, 225 g vand

Tabel 5 - Betonsammensætninger

I starten af processen blev der støbt nogle prøvestøbninger med henholdsvis 5 % cementerstatning og 10 % sanderstatning med slamaske og flyvaske, for at se hvad der ville være brugbart at gå videre med.

4.1.1. Sanderstatning

Figur 2 viser trykstyrken for blandingsrecepten B og BR, som er 10 % sanderstatning med slamaske og flyvaske.



Figur 2 - Trykstyrken for 10 % sanderstatning

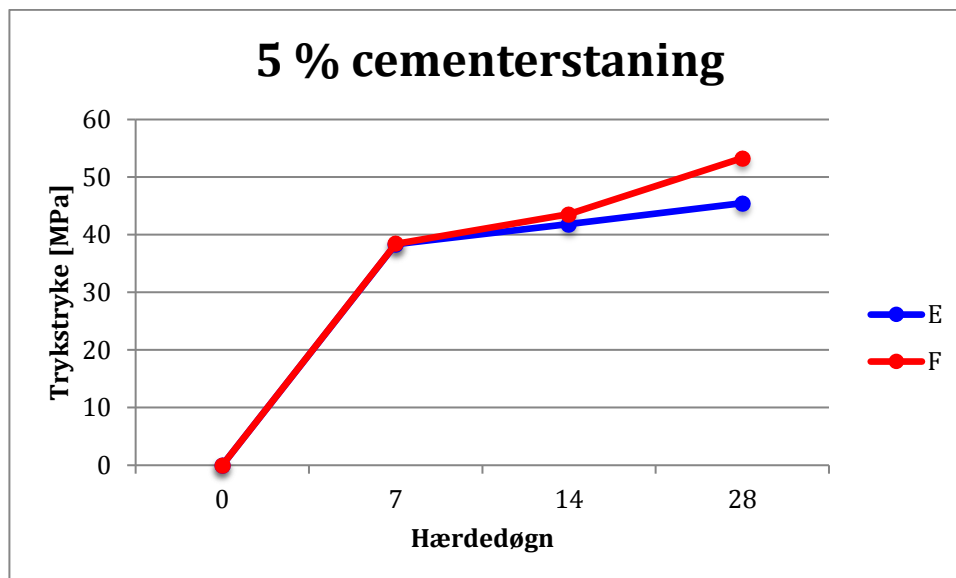
Som det ses på Figur 2 er blandingsrecept B, slamaske, noget lavere end BR, flyveaske. Efter 28 hærdedøgn har blandingen med slamaske kun opnået en styrke som er næsten 70 % af blandingen med flyveasken.

Det blev derfor vurderet ikke at gå videre med blandinger med sanderstatning, men derimod fokusere på cementerstatning.

4.1.2. Cementerstatning

Der vil nu blive gennemgået de resultater af de forsøg der indeholdte forskellige mængder cementerstatninger.

Den nedenfor viste Figur 3 viser trykstyrken for 5 % cementerstatning.



Figur 3 - Trykstyrke for 5 % cementerstatning

Figur 3 viser at trykstyrken for 5 % cementerstatning med slamaske og flyveaske følges næsten identisk indtil 14 hærededøgn. Derefter sker der et lille spring, hvor blandingen med flyveaske kan klare en trykstyrke som er 8 MPa højere end den med slamaske. Det var forudsigeligt at slamasken ville have en mindre trykstyrke, men at den kun er på 8 MPa må siges at være godkendt.

Selvom forskellen i styrken er godkendt, kan der være en fejlkilde der er til grund for det større spring. Da prøvelegemerne, som skulle hærde i 28 døgn, blev støbt, var det store vibrationsbord gået i stykker. Det er det bord som er blevet brugt til resten af prøverne. Derfor blev det lille vibrationsbord taget i brug. Det har åbenbart ikke samme effekt som det store, og havde svært ved at vibrere blandingen med slamaske, da den var mere tør og sværere at håndtere. På de to nedenfor viste billeder kan problemstillingen ses. Blanding E3, slamaske, har store huller i kanterne, og der ses tydeligt at vibrationsbordet ikke har gjort dens arbejde godt nok. Blanding F3, flyveaske, er derimod vibreret fint og har fine lige kanter. Forskellen på støbningerne kan have haft indflydelse på resultatet, og gjort blanding E mindre holdbar over for tryk.

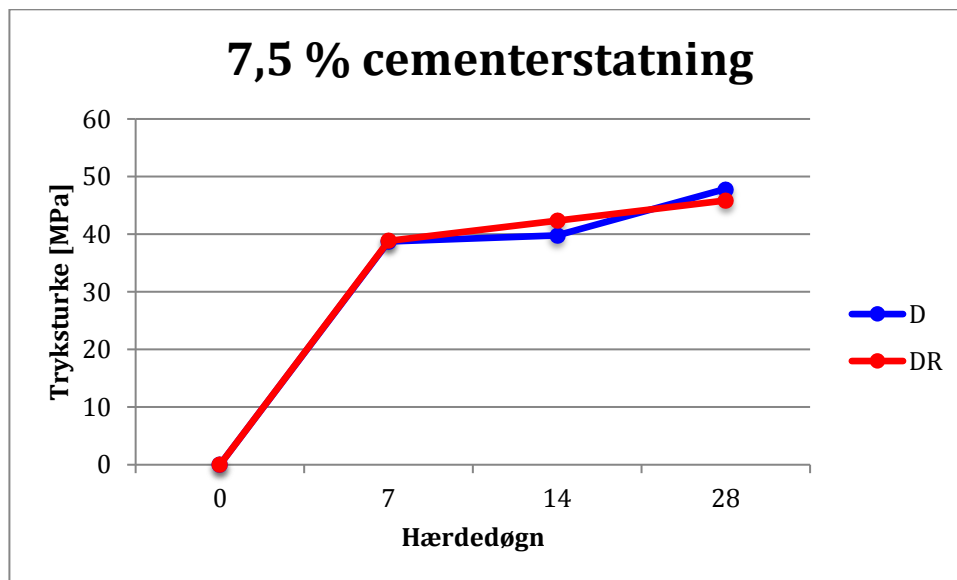


Billede 8 - Blanding E3, slamaske



Billede 9 - Blanding F3, flyvaske

Den nedenfor viste Figur 4 viser resultatet for blandingerne med 7,5 % cementerstatning.

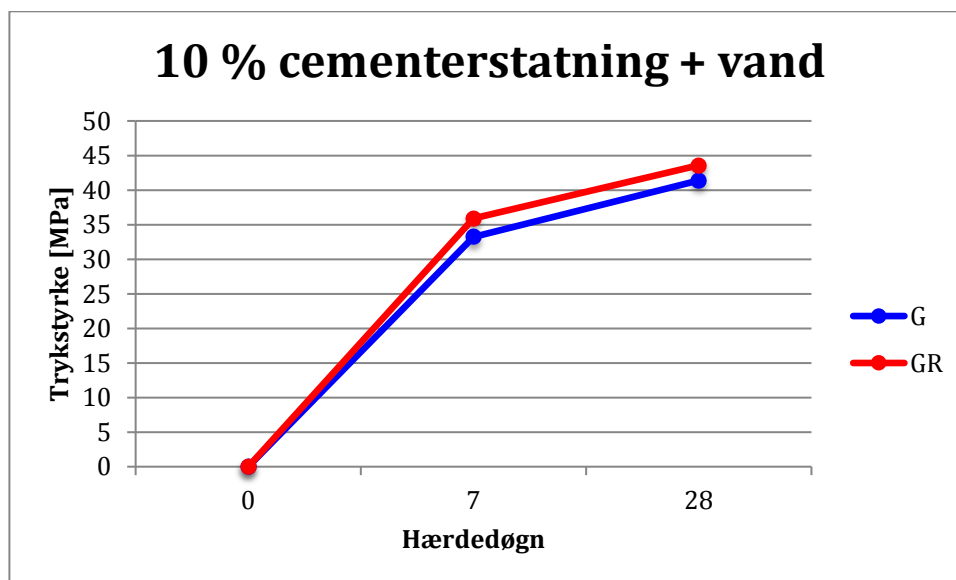


Figur 4 - Trykstyrke for 7,5 % cementerstatning

På Figur 4 ses at de to grafer for 7,5 % cementerstatning følger hinanden. Efter 28 hærdedøgn ligger blandingen med slamaske 2 MPa over blandingen med flyveaske.

Efter blandinger med 7,5 % cementerstatningerne var blevet støbt, blev der gået videre med 10 % cementerstatning. Da den første blanding skulle vibreres, viste det sig at blandingen var for tør, og ikke kunne vibreres ordentligt ud. Derfor blev vandmængden øget for at gøre blandingen mere flydende. Derved blev v/c-forholdet dog også ændret til en højere værdi. Vandmængden blev øget med 25 gram, så den nye mængde var 250 gram. Det gav et nyt v/c-forhold på 0,56. Den nye værdi ville betyde, at trykstyrken for blandingen ville falde i forhold til andre.

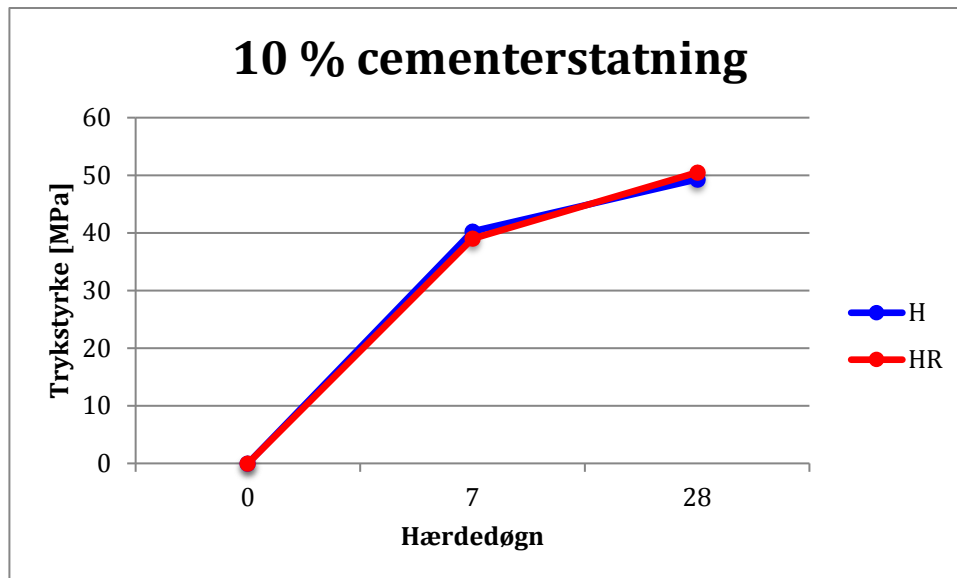
Den nedenfor viste Figur 5 er grafen for 10 % cementerstatning med ekstra tilsat vand.



Figur 5 - Trykstyrke for 10 % cementerstatning + vand

På Figur 5 ses det, at de to grafer følges rimeligt indtil 28 hærdedøgn. Efter 28 døgn er der en forskel på 2 MPa, til fordel for blandingen med flyveaske. Som forudsagt ligger begge blandinger kun lige over 40 MPa, hvilken er lidt lavere end de andre. Men igen er slamaskeblandingen ikke langt fra flyveasken.

Dernæst blev der undersøgt om knusning af slamasken havde nogen positiv indflydelse på blandingens vandbehov. Det blev stadig udført med 10 % cementerstatning, en med knust slamaske og en med flyveaske. Resultatet ses nedenfor i Figur 6.

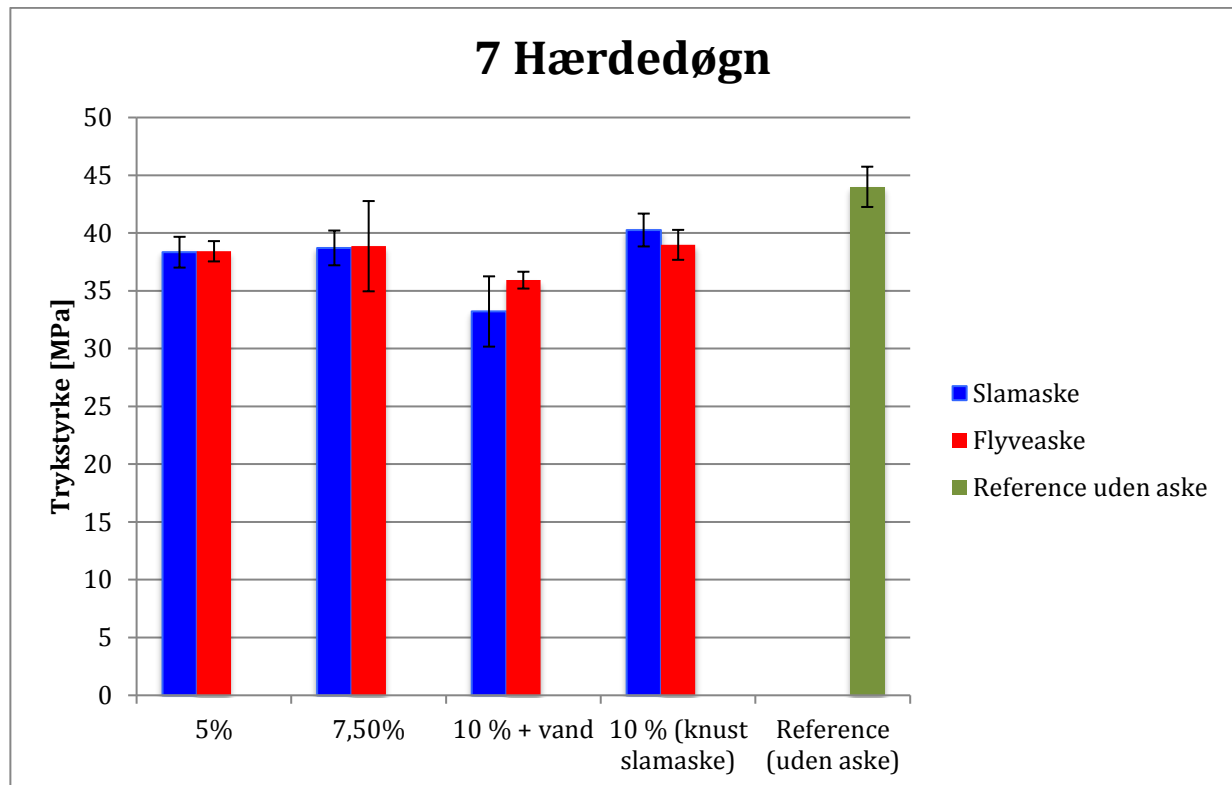


Figur 6 - Trykstyrke for 10 % cementerstatning

Som Figur 6 viser, følges de to grafer næsten identisk. Derudover når begge blandinger op på en trykstyrke på 50 MPa. Der er kun en forskel på 1 MPa efter 28 hærdedøgn, hvilken er den tætteste på alle blandinger.

For at få et bedre overblik over hvordan styrkerne ligger i forhold til hinanden, ligger de op mod hinanden. Henholdsvis efter 7 og 28 hærdedøgn. Derudover bliver alle blandinger sammenlignet med en almindelig betonblanding, dvs. uden tilsat aske. Styrken for den almindelige blanding er blevet lånt af en medstuderende fra DTU.

Nedenstående Figur 7 viser trykstyrkerne for alle blandingsrecepter efter 7 hærdedøgn, samt deres standardafvigelse.



Figur 7 - Trykstyrke efter 7 hærdedøgn

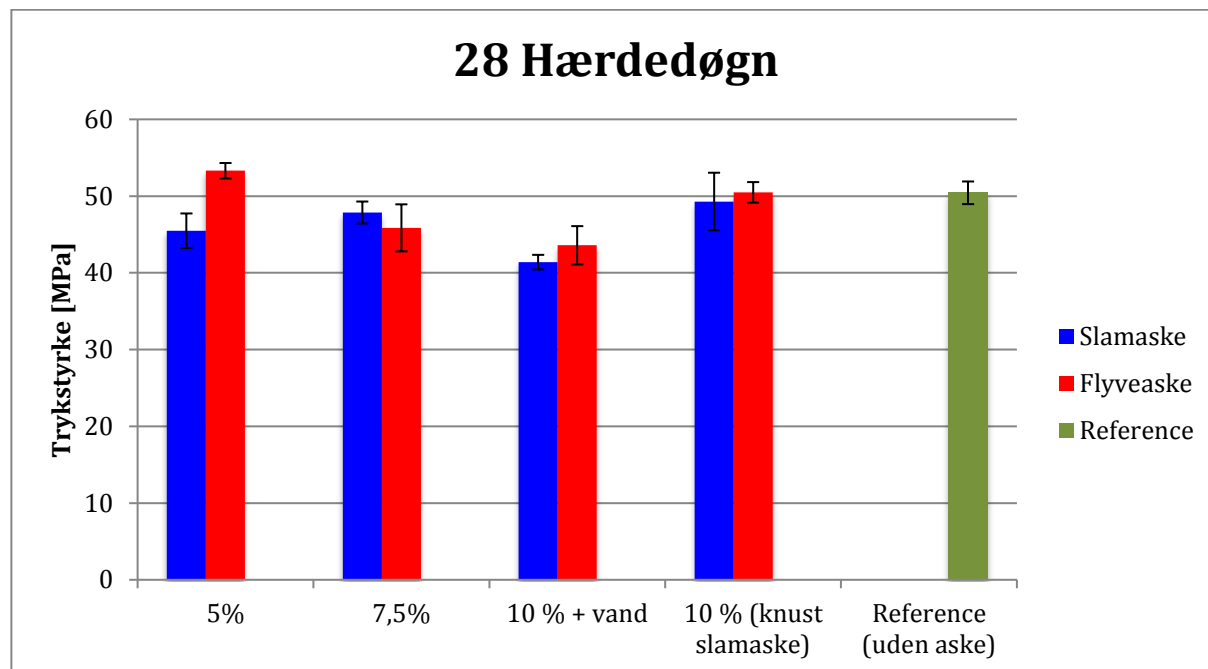
Der skal huskes på når der ses på Figur 7, at blandingen, 10 % + vand har et højere v/c-forhold end de andre blandinger. Det er derfor forståeligt at denne blanding ligger lavere i styrke end den almindelige blanding.

Overordnet kan der konkluderes at efter 7 hærdedøgn ligger alle blandinger under den almindelige blanding.

Derudover er det værd at bemærke at blandingen med knust slamaske, ligger med højere styrke end dens reference med flyveaske. Det kan derfor allerede siges at knusning af slamaske har en positiv indvirkning på betonens trykstyrke.

Derudover lægges der mærke til at de 3 blandinger med flyveaske og samme v/c-forhold har samme styrke. Det samme gælder for blandingerne med slamaske og samme v/c- forhold, foruden den med knust smalasje.

Nedenfor viste Figur 8 beskriver trykstyrkerne for alle blandinger samt en almindelig reference blanding, og deres standardafvigelse.



Figur 8 - Trykstyrke efter 28 hærdedøgn

Som det ses på Figur 8 er alle aske blandinger kommet tættere på den almindelige blanding uden aske. Blanding F, 7,5 % flyveaske, har en højere trykstyrke end referencen. Igen skal der husket på de fejlkilder der var i blanding E, 5 % slamaske, som i realiteten nok ligger tættere på dens reference med flyveaske.

Efter 7 hærdedøgn lå blandingerne med flyveaske meget tætte på hinanden, foruden blandingen med ekstra tilsat vand. Efter 28 døgn er der større forskel i styrken, især blanding 7,5 %, som ligger 5 MPa under de andre.

Derudover er det værd at bemærke at den knuste slamaske blanding nu ligger lavere end sin reference med flyveaske. Men som der også ses på dens standardafvigelse kunne den godt have været en del højere.

Overordnet kan det siges at slamaskerne virker positivt i forhold til betonens trykstyrke, da alle prøver ligger over 40 MPa.

4.2. Askekarakteristik

4.2.1. Ledningsevne

Som tidligere beskrevet er ledningsevnen et udtryk for, hvor god materialet er til at lede elektrisk strøm, som vil være afhængig af antal saltioner.

Prøvenummer	Ledningsevne [mS/cm]
1	1,52
2	1,52
3	1,53
Gennemsnit	1,53

Tabel 6 - Resultater for ledningsevne

Som det ses af tabellen blev gennemsnittet fundet til 1,53 mS/cm, som er en lav værdi når der snakkes ledningsevne. Det betyder at mængden af salte i denne aske er lav. Det bør også afspejles i forsøget med anioner, som giver et eksakt resultat af hvor stor en mængde salte asken indeholder.

4.2.2. PH-måling

Prøvenummer	PH
1	8,83
2	8,73
3	8,69
Gennemsnit	8,75

Tabel 7 - Resultater for PH-måling

pH-værdien for betonmørtel ligger normalt i intervallet 12-14. Slamasken ligger uden for dette interval, men er stadig over 7, hvilket vil sige at den er basisk. Denne slamaske kan have en lavere pH end normalt, da den kan have været i depot udenfor, og derfor er de basiske stoffer blevet skyllet væk af regnen.

4.2.3. Glødetab

Til beregning af glødetabet blev følgende ligning brugt,

$$Glødetab = \frac{\text{masse}(\text{før muffelovn}) - \text{masse}(\text{efter muffelovn})}{\text{masse}(\text{før muffelovn})} \cdot 100$$

Ligning 4 - Glødetab

Prøve-nummer	Vægt af skål [g]	Vægt af våd aske [g]	Vægt af tør aske + skål [g]	Vægt af tør aske [g]	Glødetab [%]
1	15,51	2,50	18,00	2,49	0,51
2	14,36	2,51	16,85	2,50	0,41
3	14,88	2,51	17,37	2,49	0,84
Gennemsnit					0,59

Tabel 8 - Resultater for glødetab

Som det ses af Tabel 8 er den gennemsnitlige glødetab for de tre forsøg fundet til 0,59 %. Dvs. at slamasken overholder kategori A for glødetab, da den er under 5 %.

4.2.4. Vandindhold

Tabel 9 viser resultaterne i forbindelse med forsøget omkring vandindhold i slamasken.

For at finde vandindholdet blev følgende ligning brugt:

$$Vandindhold = \frac{\text{masse}(\text{våd prøve}) - \text{masse}(\text{tør prøve})}{\text{masse}(\text{våd prøve})} \cdot 100$$

Ligning 5 - Vandindhold

Prøve-nummer	Vægt af glas [g]	Vægt af våd aske [g]	Samlet vægt efter ovn [g]	Vægt tør aske [g]	Vandindhold [%]
1	4,37	5,01	9,35	4,98	0,60
2	4,38	5,00	9,34	4,96	0,80
3	4,37	5,11	9,46	5,09	0,39
Gennemsnit					0,60

Tabel 9 - Resultater for vandindhold

Som det fremgår af Tabel 9 er det gennemsnitlige vandindhold for de tre prøver fundet til 0,6 %. Da det er meget lavt, påvirker det ikke v/c-forholdet, og der skal ikke gøres forholdsregler for det. Havde det været en høj værdi, skulle det tages med i betragtning af v/c-forholdet.

4.2.5. Vandopløselighed

For at beregne vandopløseligheden efter forsøget blev gennemført blev følgende ligninger brugt:

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

Ligning 6 - Vandopløselighed

$$\text{Opløst materiale} = (\text{aske før}) - (\text{aske tilbage})$$

Ligning 7 - Vandopløselighed

Efter asken og alt apparaturet havde været i ovnen kunne ligningerne sættes op som følge,

$$(213,61 \text{ g}) - (6,44 \text{ g} + 107,61 \text{ g}) = 99,56 \text{ g}$$

$$100 \text{ g} - 99,56 \text{ g} = 0,44 \text{ g}$$

Resultatet af den vandopløselige mængde er fundet til 0,44 g. Da størstedelen af det vandopløselige materiale er salte, stemmer det overens med de andre forsøg der er blevet udført, som viser at mængden af salte i asken er lille.

4.2.6. Oplukning (ICP – måling)

Slamasken indeholder tungmetaller, som kan være skadelige for miljøet, dyr og mennesker. Der skal derfor undersøges hvilke metaller der er til stede, samt hvilken mængde der er tale om. Der er et stort antal forskellige tungemetaller i asken, der fokuseres på: Arsen, Bly, Cadmium, Chrom, Kobber, Nikkel og Zink.

Tabel 10 viser grænseværdierne der er for de forskellige metaller, fundet inde på Miljøministeriets hjemmeside [15]. Tabellen indeholder kun grænseværdier for kategori 1 og 2, da kategori 3 for disse tungmetaller er de samme værdier som kategori 2.

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

Tabel 10 – Grænseværdier for tungmetaller

Overholder materialet kategori 1 kan det bruges inde for alle bygge- og anlægsområder, hvorimod kategori 2 og 3 har begrænsede anvendelsesområder. Tabel 11 viser udvalgte målte værdier for tungmetaller i slamasken.

Tungmetal	Målte værdier i asken [mg/kg]
Arsen (As)	1,57
Bly (Pb)	93,28
Cadmium (Cd)	0,74
Chrom (Cr)	43,66
Kobber (Cu)	371,99
Nikkel (Ni)	23,93
Zink (Zn)	882,59

Tabel 11 - Målte værdier for tungmetaller i slamasken

For bedre at kunne sammenligne de målte værdier sættes de målte værdier op mod grænseværdierne, som kan ses i Tabel 12.

Tungmetal	Kategori 1 [mg/kg]	Kategori 2 [mg/kg]	Målte værdier i asken [mg/kg]
Arsen (As)	0 – 20	> 20	1,57
Bly (Pb)	0 – 40	> 40	93,28
Cadmium (Cd)	0 – 0,5	> 0,5	0,74
Chrom (Cr)	0 – 500	> 500	43,66
Kobber (Cu)	0 – 500	> 500	371,99
Nikkel (Ni)	0 – 30	> 30	23,93
Zink (Zn)	0 – 500	> 500	882,59

Tabel 12 - Grænseværdier og målte værdier for slamasken

Som det ses i Tabel 12 er der et par tungmetaller der falder uden for kategori 1 og havner i kategori 2. Det drejer sig om Bly, Cadium, og Zink. Det gør at slamasken som helhed må kategoriseres som kategori 2, og derfor har begrænset anvendelses område.

Hvis slamasken skulle bruges som kategori 1, kunne der foretages en udvaskning af tungmetaller, som formentlig ville bringe alle tungmetaller under grænseværdierne for kategori 1. Derved kunne slamasken bruges inden for alle bygge- og anlægsområder.

4.2.7. Anioner (IC – måling)

For at få et bedre indblik i slamaskens indhold af salte, blev mængden sammenlignet med medstuderende fra DTU. Prøve 1 er slamasken beskrevet i denne rapport fra Mølleåværket i Lyngby, prøve 2 er en flyveaske fra Nordjylland, prøve 3 er en træaske fra Avedøreværket, mens prøve 4 er en træaske fra Køge. Resultatet ses i tabellen nedenfor.

Prøvenummer	Aske type	Cl [mg/kg]	NO ₃ [mg/kg]	SO ₄ [mg/kg]
1	Slamaske	53,25	7,64	2437,59
2	Flyveaske	19,63	14,75	3665,77
3	Træaske	50199,53	169,44	38931,63
4	Træske	39458,85	1112,08	81738,23

Tabel 13 – Resultat af anioner

Som det ses af Tabel 13 har slam- og flyveasken en lav mængde salte i forhold til træaskerne. De forskellige miljøklasser har nogle grænseværdier for klorid der skal være overholdt, da for store mængder salte kan skade armeringen [14].

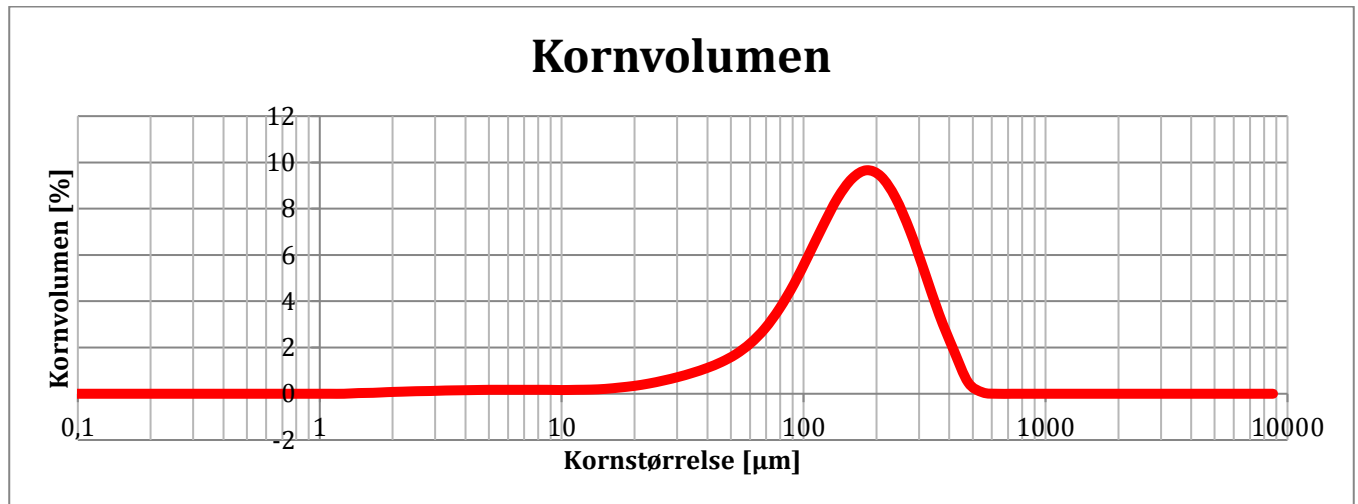
Anvendelse	Miljøklasse			
	Passiv	Moderat	Aggressiv	Ekstra aggressiv
Uden armering	Cl 1,0	Cl 1,0	Cl 1,0	Cl 1,0
Med armering	Cl 0,4	Cl 0,2	Cl 0,2	Cl 0,2
Med spændarmering af stål	Cl 0,2	Cl 0,2	Cl 0,2	Cl 0,1

Tabel 14 – Grænseværdier for indhold af Cl

Beregninger har vist at indholdet af klorid af slamasken er 0,005 procent. Dvs. at slamasken overholder alle miljøklasser og alle armeringstyper.

4.2.8. Kornstørrelse

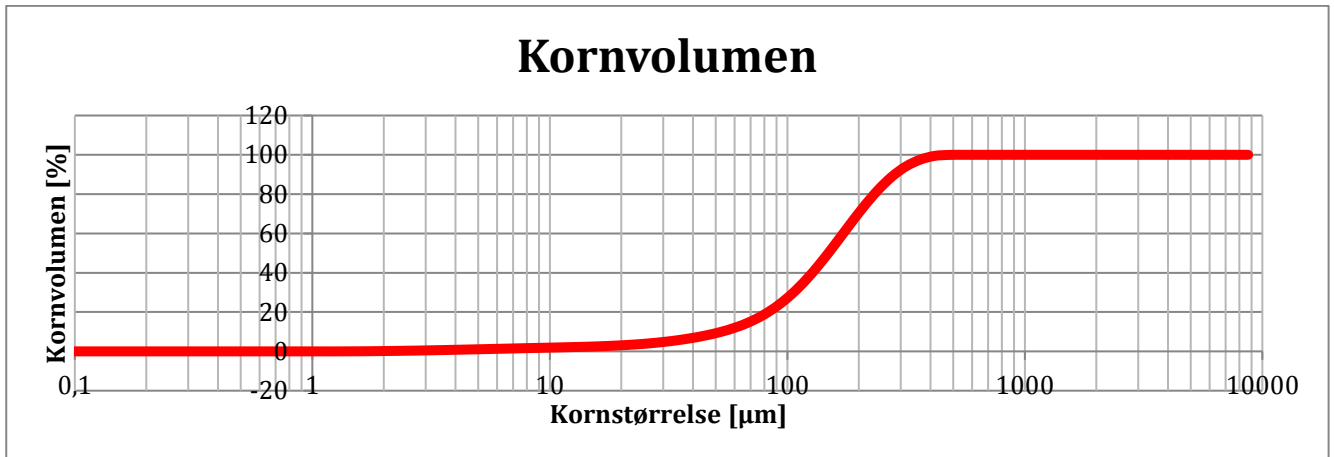
For at få et bedre indblik i størrelsen af kornene i asken blev der foretaget et kornstørrelses forsøg. Der blev i alt lavet tre forsøg som alle kan ses i Bilag J, her vises der kun et gennemsnit for de tre prøver.



Figur 9 - Kornvolumen

Figur 9 viser kornstørrelses fordelingen for slamasken. Det ses at hovedparten af asken har en kornstørrelse på lige under 200 µm. Til sammenligning henvises der til Billede 1, hvor det største korn i flyveasken var 20 µm. Det viser tydeligt hvor stor kornstørrelsen er for denne slamaske.

Derudover er der lavet en beregning over hvor stor en del af kornene der er større og mindre end 45 µm. 6 procent af kornene er mindre end 45 µm mens 94 procent af kornene er større end 45 µm.

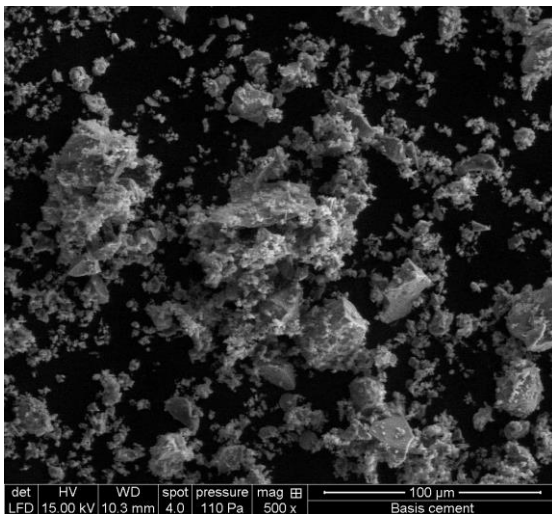


Figur 10 - Kornvolumen

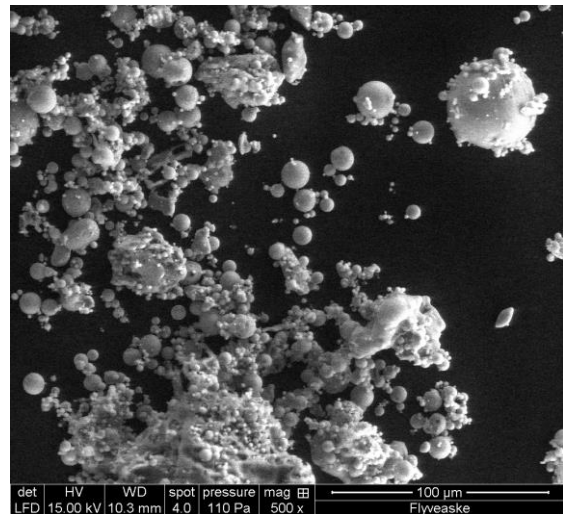
Figur 10 viser stigningen af kornstørrelsen, og i hvilket interval kornene ligger

4.2.9. SEM

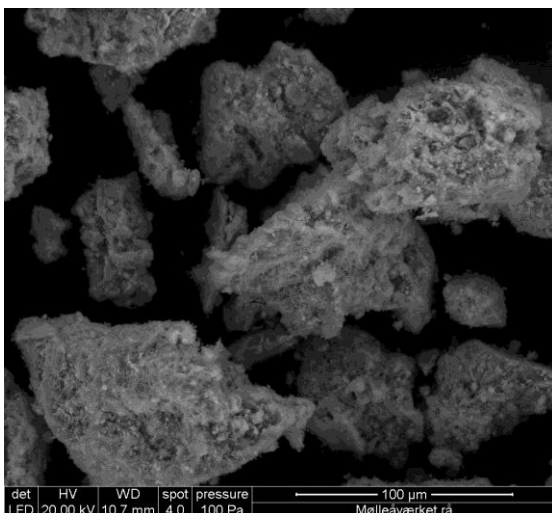
Der er lavet en SEM analyse af den rå slamaske, samt en knust slamaske. Derudover er der blevet udleveret SEM billeder af basis cement og flyveaske. De er blevet udleveret af laboranten Ebba Schnell ansat på DTU af tidligere forsøg.



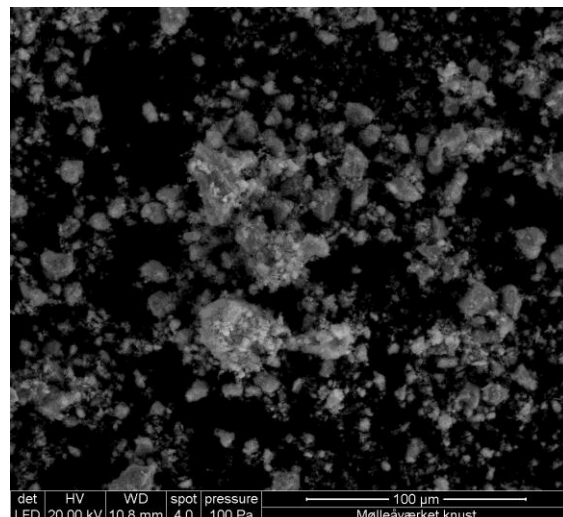
Billede 10 - Struktur af basis cement x 500



Billede 11 - Struktur af flyveaske x 500



Billede 12 - Struktur rå slamaske x 500

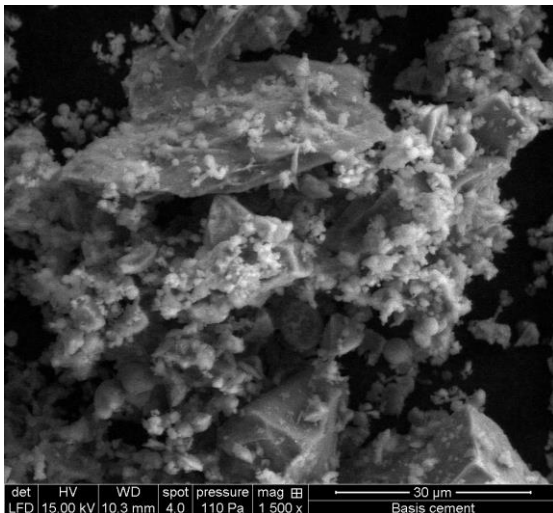


Billede 13 - Struktur knust slamaske x 500

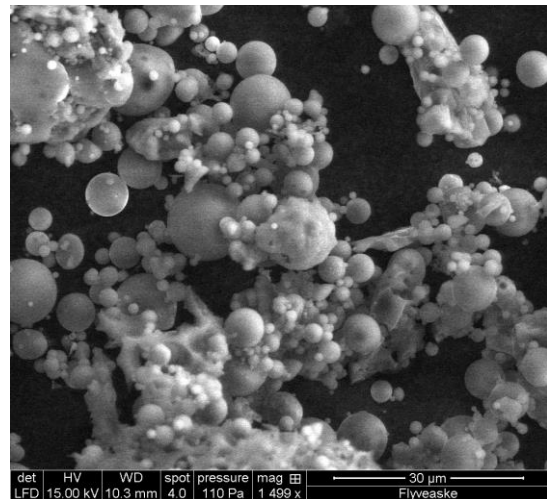
Billede 10 til Billede 13 viser henholdsvis basis cement, flyveaske, rå slamaske og knust slamaske forstørret 500 gange. Basis cementen må være den der sammenlignes med, da det er hovedingrediensen i en betonblanding, og må være det der stiles mod at ligne. Derudover kan slamasken også sammenlignes med flyveasken, da der igennem tidligere forskning er blevet bevist at den har puzzolan-effekter og hjælper med at styrke betonen.

Cementen ses som meget kantet, med både lidt større og mindre stykker. Sammenlignes den med flyveasken ses det at flyveasken har flere runde partikler end cementen, som slet ingen har. Flyveasken har dog uderover de runde former samme struktur som cementen, med både små og lidt større partikler. Den rå slamaske har meget store korn, som det ses på Billede 12. Når disse bliver blandet i betonblandingen vil der være store mellemrum mellem de forskellige korn og resulterer i en dårligere pakningsgrad. Ses der derimod på Billede 13, den knuste slamaske, er kornstørrelsen blevet mindsket gevaldigt, og har fået en struktur mere lig med flyveasken og cementen. Dog er der heller ikke de runde korn som er karaktergivende for flyveasken. Derfor må det antages at pakningsgraden for denne er noget lig med cementens.

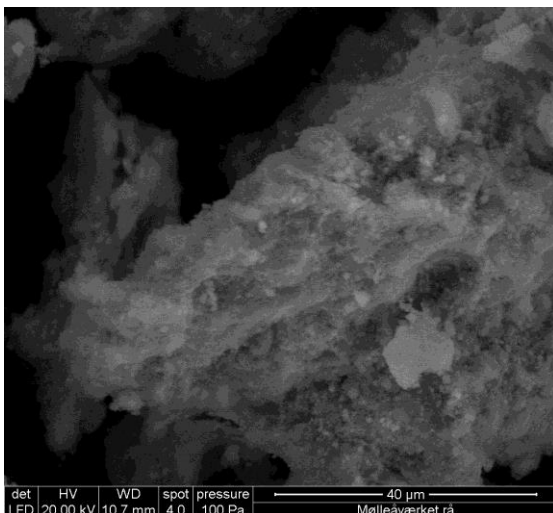
Billede 14 til Billede 17 viser henholdsvis basis cement, flyveaske, rå slamaske og knust slamaske forstørret 1500 gange.



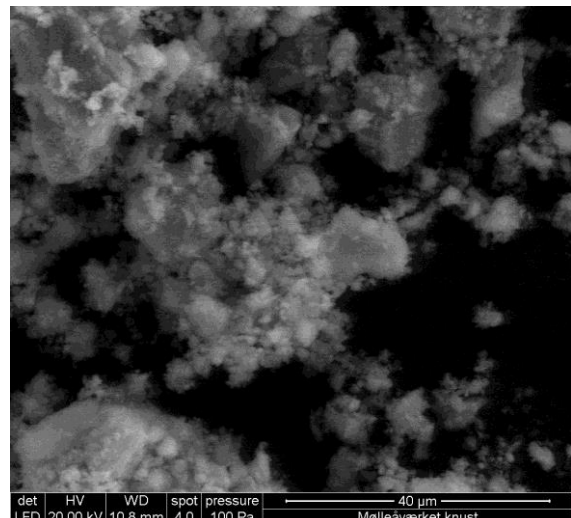
Billede 14 - Struktur basis cement x 1500



Billede 15 - Struktur flyveaske x 1500



Billede 16 - Struktur rå slamaske x 1500



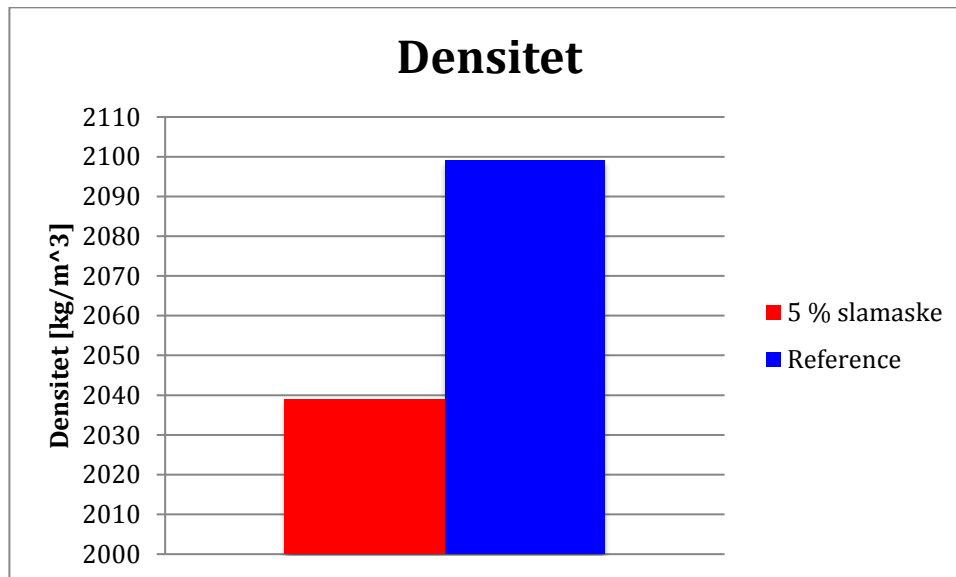
Billede 17 - Struktur knust slamaske x 1500

På billedet hvor flyveasken er forstørret 1500 gange, ses den runde struktur endnu tydeligere. Derimod er cementen meget kantet og ligner en meget rodet sammenblanding, som er god til at blande sig med andre materialer og gøre blandingen tæt.

Billede 16 viser den rå slamaske forstørret 1500 gange. Det der ses på billedet er en side af et stykke korn. Her kan der fornemmes hvor stor kornstørrelsen egentlig er i forhold til de andre. Den knuste slamaske har lidt samme struktur som cementen. En meget rodet blandet med både små og store komponenter. Her kan det også antages at den er god til at blande med.

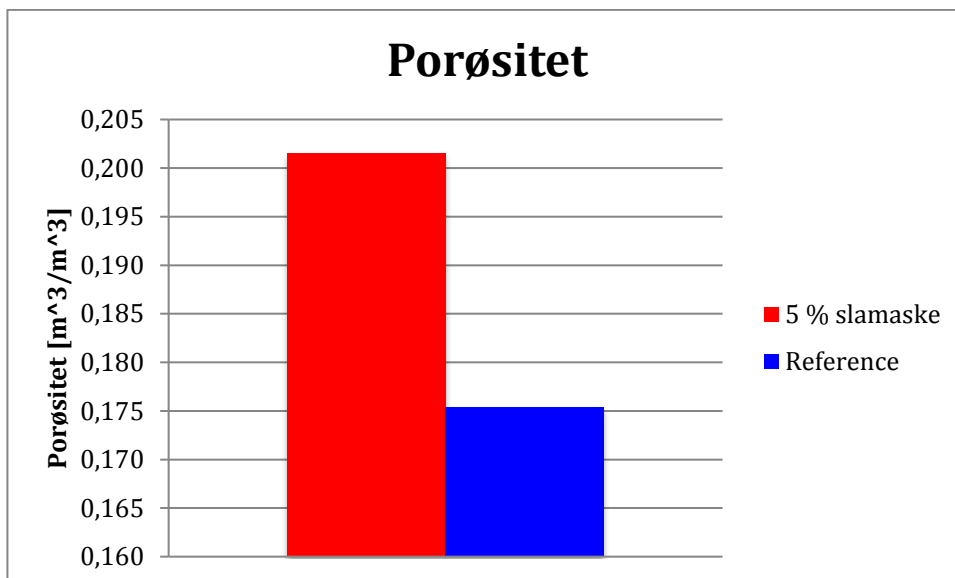
4.3. Densitet og porøsitet

Som led i analysen af hærdet beton, blev der gennemført et densitet og porøsitet forsøg. Forsøget blev gennemført med en 5 % cementerstatning med slamaske, og derefter sammenlignet en almindelig blanding uden tilsat aske, lånt af en medstuderende. Resultatet er vist nedenfor,



Figur 11 - Densitet

Som det ses af Figur 11 har referenceblandingen en højere densitet end blandingen med 5 % slamaske. Dvs. at referenceblandingen har en større masse per volumenend end askeblandingen.

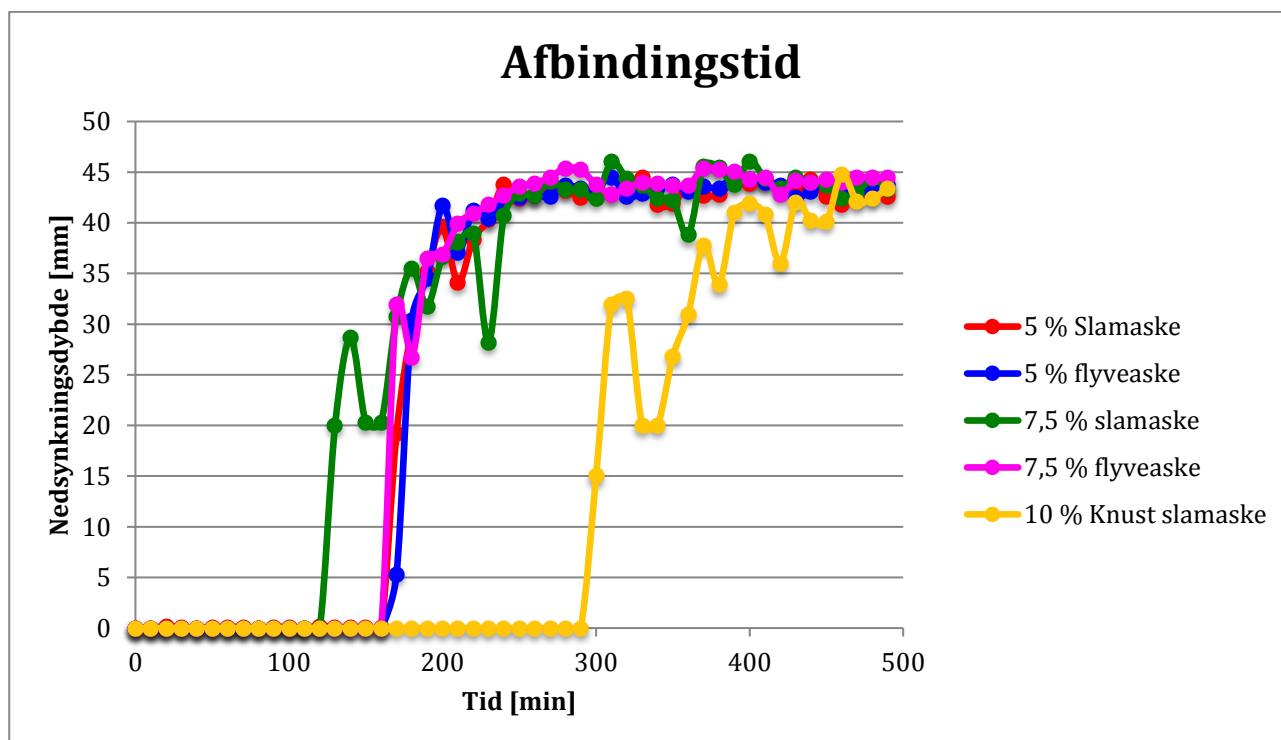


Figur 12 - Porøsitet

Figur 12 viser at askeblandingen har en højere porøsitet end referenceblandingen. Dvs. at askeblandingen er mere skrøbelig end referencen, og at den kan optage mere vand.

4.4. Afbinding

Der er lavet afbindings forsøg over en række forskellige blandinger, 5 % slam- og flyveaske, 7,5 % slam- og flyveaske og 10 % knust slamaske. Resultatet ses i Figur 13 nedenfor.



Figur 13 - Resultat af afbindingstid

Figur 13 viser kun det vigtigste tidsrum af afbindingstiden, da graferne følges efter 500 minutter. Resten af tiden kan ses Bilag K.

5 % slam- og flyveaske samt 7,5 % flyve aske begynder at hærde samtidig, ca. efter 150 min. 7,5 % slamaske hærder før, ca. efter 110 minutter. Mens 10 % knust slamaske hærder senere, ca. efter 290 min.

Det siger noget om konsistensen af de forskellige blandinger. Det er iøjnefaldende at selvom der er en stigning i cementerstatningen fra 5 – 7,5 % med flyveasken, ændres afbindingstiden ikke. Det betyder at flyveasken ikke har den store effekt på afbindingstiden. Hvert fald når der er tale om små mængder forøgelse.

Derudover var det forudsigeligt at forøgelsen af slamaske, ville medføre en hurtigere afbindingstid, da asken som tidligere beskrevet suger meget vand, og gør blandingen tørrere end de andre.

Det var uventet at blandingen med 10 % slamaske ville være så meget længere om at begynde at hærde. Ifølge teorien skulle en finere kornstørrelse betyde hurtigere afbindingstid [13]. Hærdningsprocessen begynder ca. 150 minutter efter de andre blandinger.

4.5. Bolomeys formel

Det næste afsnit vil omhandle sammenligningen med de fundne praktiske styrker med den tilhørende teoretiske styrke beregnet ved hjælp af Bolomeys formel.

Som beskrevet i afsnit 2.2, bliver der brugt en redigeret version af Bolomeys formel,

$$F_c = K \cdot \left(\frac{1}{\frac{v}{c + k \cdot P}} - \alpha \right)$$

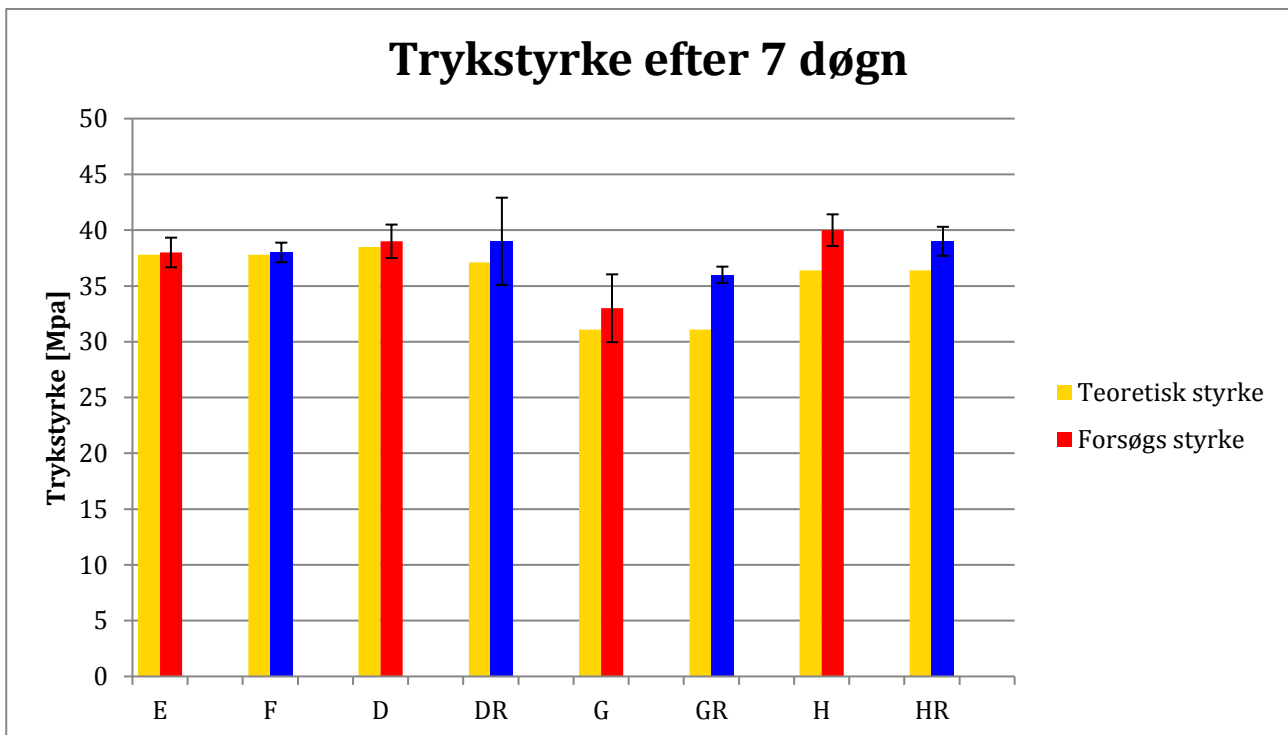
Efter mængderne og konstanterne er sat ind fås følgende resultat. I denne rapport ses flyveaske og slamaske for det samme, med de samme konstanter.

Derfor bliver følgende konstanter brugt for begge asker [9].

Hærdedøgn	K	alfa	k
7	28	0,6	0,6
28	30	0,5	0,5

Tabel 15 - Konstanter til Bolomeys formel

Neden for viste Figur 14 viser den praktiske og teoretiske trykstyrke, samt standardafvigelsen tilhørende de praktiske forsøg, efter 7 hærdedøgn.

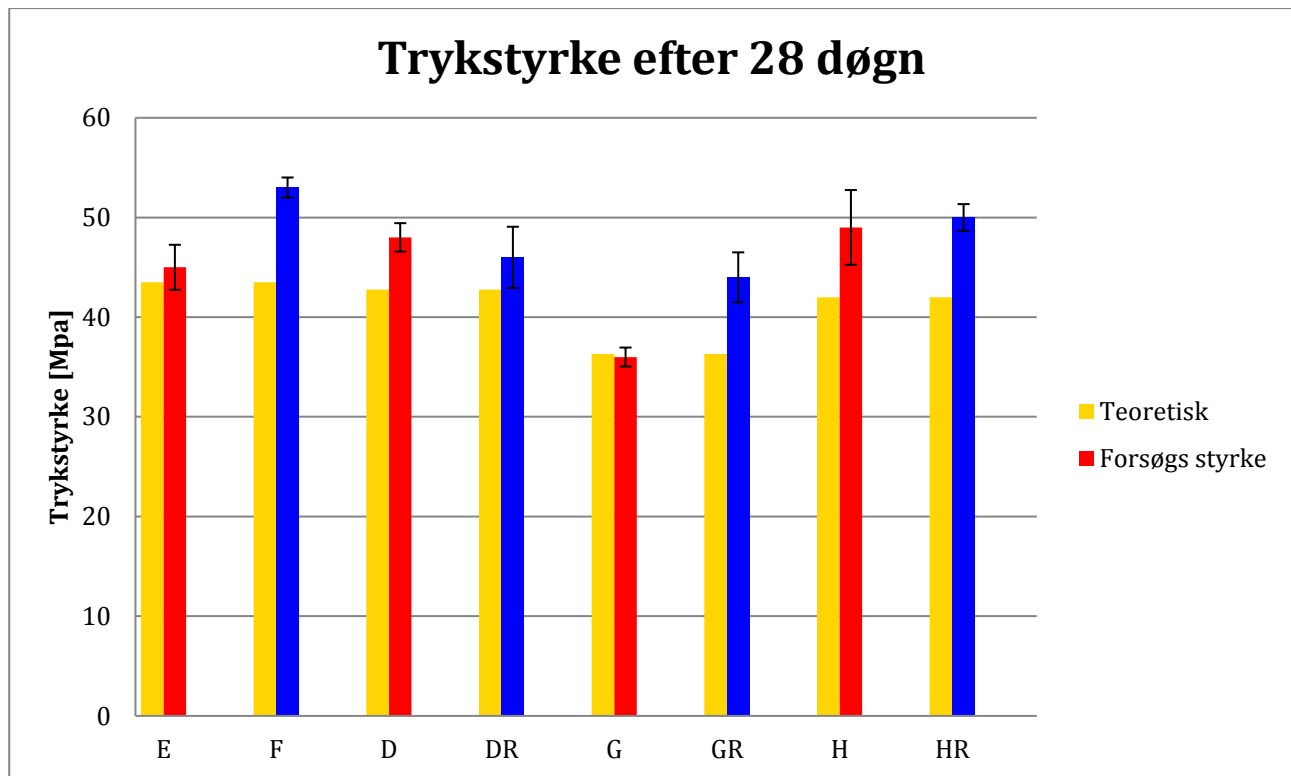


Figur 14 - Praktisk og teoretisk trykstyrke efter 7 hærdedøgn

Farveforskellen på søjlerne for de praktiske forsøg er til for at kende forskel på blandinger med slammaske og flyveaske, hvor som tidligere rød er slammaske og blå er flyveaske.

Der ligger mærke til at alle de praktiske forsøg ligger højere end deres tilhørende teoretiske styrke.

Figur 15 viser den praktiske og teoretiske trykstyrke efter 28 hærdedøgn.



Figur 15 - Praktisk- og teoretisk trykstyrke efter 28 døgn

Farveforskellen på søjlerne for de praktiske forsøg er til for at kende forskel på blandinger med slammaske og flyveaske, hvor som tidligere rød er slammaske og blå er flyveaske.

Der ligger mærke til at forskellen i praktisk og teoretisk styrke er blevet større for alle blandinger.

5. Videre forskning

Da det nu er bevist at slamaske kan bruges som erstatningsprodukt i forhold til trykstyrken, ville det være relevant at gå videre med større mængder cementerstatninger. Der skulle dog tænkes på alternativer i forhold det store vandbehov slamasken har. Hvis erstatningsmængden skal overstige ti procent skal der bruges andre midler, hvis v/c-forholdet skal holdes på 0,5. Det kunne være at tilsætte superplastificerende stoffer, som mindsker vandbehovet for blandingen. På denne måde ville man kunne øge mængden af slamaske i blandingen uden at ændre v/c-forholdet, og formentlig holde samme styrke. Her skal der så opvejes om det kan svare sig økonomisk da superplast er et dyrt materiale. Men hvis erstatningsmængden er høj nok, kunne det måske godt svare sig, da store dele af cement derved kunne spares. Derudover skal der huskes på at store mængder slamaske i en betonblanding farver den hærdede beton rødlig, hvilket kunne skabe æstetiske problemstillinger.

Det ville også være relevant at gå videre med den knuste slamaske. Som forsøgene har vist har den knuste slamaske den største styrke. Derudover er vandbehovet i sådan en blanding ikke så stor som ved en blanding med almindelig slamaske. Derfor kunne det være interessant at kigge på hvor store mængder knust slamaske der kan erstattes med cement, indtil vandbehovet også her ville blive for stor.

Derudover skal der også laves flere undersøgelser omkring tungmetallerne i slamasken. Slamasken i sig selv har for mange tungmetaller som betyder at den kategoriseres som kategori 2, hvilket giver begrænset anvendelsesmuligheder. En udvaskning af asken kunne betyde at alle tungmetaller ville overholde grænseværdierne for kategori 1, og betyde at asken kunne bruges inden for alle bygge- og anlægsområder.

Da slamaske generelt indeholder en stor mængde fosfor, ville det også være relevant at kigge nærmere på det. Fosfor er en begrænset resurse, hvilket ville være ærgerligt at støbe ind i beton. Derfor ville det være relevant at se på muligheder for at udvinde fosfor af slamasken inden det blev givet videre til betonproducenterne.

6. Konklusion

De første trykstyrkeforsøg med 10 % sanderstatning gav at slamaskeprøven kun havde ca. 70 % af styrken i sammenligning med referencen med flyveaske. Der blev derfor vurderet ikke at gå videre med sanderstatning, men derimod fokusere på cementerstatning.

Efter cementerstatningsforsøgene kan det konkluderes at slamaske kan bruges som erstatningsprodukt i forhold til trykstyrken. Efter 7 hærdedøgn havde alle blandinger med en cementerstatning en lavere styrke end en reference blanding uden aske. Styrkeforskellen var dog kun på 5 MPa, hvilket må siges at være godkendt.

Sammenlignes blandingerne med slam- og flyveaske med hinanden, ses det at slamasken stort set har samme styrke som flyveasken efter 7 hærdedøgn. Ved 5 og 7,5 % cementerstatning har begge asker samme styrke som deres reference med flyveaske. Mens den knuste slamaske når en højere styrke end dens reference med 10 % flyveaske. Derved kan der efter 7 hærdedøgn konkluderes at den knuste slamaske når den højeste styrke af prøverne med slamaske.

Efter 28 hærdedøgn er alle prøver med cementerstatning kommet tættere på trykstyrken af referencen uden aske. Blandingen med 10 % knust slamaske har opnået den samme styrke som referencen uden aske. Prøven med 5 % slamaske er ca. 8 MPa lavere end dens reference med flyveaske, men som skyldes fejlkilder i vibrering af blandingen med slamaske. 7,5 % slamaske har opnået en højere værdi end dens reference med flyveaske.

Der kan derfor konkluderes at i forhold til trykstyrke er slamaske et godt alternativ som cementerstatning. Den knuste slamaske opnår den højeste styrke, og vurderes at den er den bedste at gå videre med.

Blandingen med 10 % slamaske + vand opnår en lavere styrke end alle de andre, men stadig samme styrke som sin reference med flyveaske. Det kan derfor konkluderes at det er en mulighed at tilsætte ekstra vand ved større mængder slamaske. Der skal dog huskes på at styrken bliver lavere.

Ved en karakteristik af slamasken, blev der fundet ud af at mængden af organisk materiale er meget lille. Forsøg omkring ledningsevne resulterede i at mængden af salte i asken var lav, hvilket også viste sig i forsøget omkring vandopløselige stoffer som kun gav 0,44 %. Derudover

gav beregninger omkring klorid indholdet også en lav mængde, hvilket overholder alle miljøklasser med og uden armering. pH-værdien af slamasken blev fundet til 8,75, hvilket er lavere end slamaske normalt gør. Den normale pH-værdi ligger mellem 12-14, men kan skyldes at asken har ligget i depot udenfor, og de basiske materialer er blevet skyllet væk af regnen. Da værdien er over 7, hvilket vil sige at den er basisk, er der dog ingen problemer i det.

Oplukningsforsøget resulterede i, at slamasken indeholder en række tungmetaller der ikke overholder grænseværdierne for kategori 1. Det betyder at asken har begrænsede anvendelsesmuligheder. Det drejer sig om tungmetallerne; bly, cadium og zink. Ville mængden af disse tungmetaller reduceres så de overholdte grænseværdierne for kategori 1, ville asken kunne bruges inden for alle bygge- og anlægsområder.

Slamaskens struktur blev undersøgt ved SEM. Af billederne blev der vurderet at kornstørrelsen af slamasken er meget grov i sammenligning med cement og flyveaske. Cement og flyveaske har en mere ensartet struktur og form, som kan pakke en beton blanding bedre. Knusning af slamasken gav en struktur mere lig med cement og flyveaske.

Densiteten af en mørtelstøbning med 5 % slaske blev fundet til ca. 2040 kg/m³, mens en reference støbning uden aske havde en densitet på ca. 2100 kg/m³.

Porøsiteten af en mørtelstøbning med 5 % slaske blev fundet til ca. 0,2 m³/m³, mens en reference støbning uden aske havde en porøsitet på ca. 0,175 m³/m³. Det betyder at en støbning med slamaske er mere porøst end en støbning uden aske.

Afbindingstiden var den samme for blandinger med 5 % slam- og flyveaske og 7,5 % flyveaske. Disse blandinger begyndte at hærde efter 150 minutter. Blandingen med 7,5 % slamaske begyndte at hærde før, efter 120 minutter. Hvilket var forudsigeligt da slamasken suger meget vand, og gør blandingen tør. Blandingen med 10 % slamaske begyndte at hærde senere, ca. efter 300 minutter.

7. Litteraturliste

- [1] Jensen, B.C. (2012)
Betonkonstruktioner efter DS/EN 1992-1-1 (2. Udgave)
Nyt Teknisk Forlag
- [2] Hansen, K.K. (2012)
Bygningsingeniørens materialer–uddrag af Materialebogen (1. Udgave, 2. Opslag)
Nyt Teknisk Forlag
- [3] Johanneson, B. (2012)
Introduction to concrete technology (3. Udgave)
Department of Civil Engineering
- [4] DS/EN 196-1 (2005)
Metoder til prøvning af cement – Del 1: Styrkebestemmelser (2. Udgave)
Dansk Standard
- [5] DS/EN 450-1 (2012)
Flyveaske til beton – Del 1: Definition, specifikationer og
overensstemmelseskriterier (3. Udgave)
Dansk Standard
- [6] Betonhåndbogen (2013)
http://betonhaandbogen.dk/media/bogen/kap_1.3_arkitektur_13112014.pdf
Besøgt den 01/06/16
- [7] Betonhåndbogen (2013)
http://betonhaandbogen.dk/media/bogen/kap_3.5.1_flyveaske_27112013.pdf#page=1&search=flyveaske
Besøgt den 03/06/16
- [8] Betonhåndbogen (2013)
http://betonhaandbogen.dk/media/bogen/kap_3.2_tilslag_27112013.pdf
Besøgt den 05/06/13

- [9] Betonhåndbogen (2013)
http://betonhaandbogen.dk/media/bogen/kap_6.0_proportionering_27112013.pdf
Besøgt den 05/06/16
- [10] Betonhåndbogen (2013)
http://betonhaandbogen.dk/media/bogen/kap_10_1_betons_trykstyrke_17022016.pdf
Besøgt den 07/06/16
- [11] Betonhåndbogen (2013)
http://betonhaandbogen.dk/media/bogen/kap_10_2_betons_tr_kstyrke_17022016.pdf
Besøgt den 07/06/16
- [12] Bioaske til beton – en håndbog (2007)
Spildevandscenter Avedøre, Unicon, Lynettefællesskabet I/S, Teknologisk Institut
- [13] Aalborg Portland
: http://www.aalborgportland.dk/media/pdf_filer/2015-06-10_b_-_sammenhaeng_mellem_cement-_egenskaber_og_betonegenskaber_-_jacob_thrysoee.pdf
Besøgt den 06/07/16
- [14] DS/EN 206-1 (2002]
Beton – Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse
Dansk Standard
- [15] Bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret, uforurenset bygge- og anlægsaffald
<https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=134831#K3>
Besøgt den 10/06/16

- [16] Grøn Betons hjemmeside
<http://www.gronbeton.dk>
Besøgt den 07/06/16
- [17] Aalborg Portland
<http://www.aalborgportland.dk/default.aspx?m=4&i=462&pi=23&pr=5>
Besøgt den 12/06/16
- [18] RenoNord hjemmeside
<http://www.renonord.dk/default.aspx?m=2&i=74>
Besøgt den 05/07/16

8. Bilag

Forsøgsbeskrivelser: Bilag A – H

Bilag A: Anioner

Bilag B: Glødetab

Bilag C: Ledningsevne

Bilag D: Oplukning

Bilag E: pH

Bilag F: Porøsitet og densitet

Bilag G: Vandindhold

Bilag H: Vandopløselighed

Bilag I: Trykstyrke resultater

Bilag J: Kornstørrelse

Bilag K: Afbindingstid

Anioner

A Princip

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

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes ICP og IC

C Analysens udførelse

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

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

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

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

D Bestemmelse af metaller

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

E Beregning af resultat

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

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

hvor

A = ekstraktens metal koncentration, mg/L = ppm

B = g jord afvejet

C = fortyndingsfaktor

F Affaldshåndtering

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Filterpapiret smides ud i skraldespanden i stinkskalet

Jord og aske skal opsamles i jord – og askeaffaldsspand

Glødetab

A Princip

Jordens indhold af organisk materiale svarer stort set til det opnåede glødetab ved 550°C. I en 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 eksikator og vejes på analyse vægt.

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

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

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

D Beregning af resultat

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

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

E **Affaldshåndtering**

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

Ledningsevne i jord

A Princip

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

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes ledningsevne måler.

C Analysens udførelse

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

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

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

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

D Beregning af resultat

Ledningsevnen anvendes uden yderlig beregning som mS/cm.

E Affaldshåndtering

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Oplukning af jord- og askeprøve efter DS 259

A Princip

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

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes ICP
Autoklave

C Kemikalie sikkerhed

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

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

Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.

D Reagenser

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

500 mL koncentreret HNO₃ overføres med måleglas til en 1000,00 mL målekolbe som er 1/2 fyldt med destilleret vand. Der blandes godt og tilsættes vand til mærket. Efter blanding overføres opløsningen til en plastikflaske og mærkes.

E **Analysens udførelse**

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

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

Der hældes 1,5L destilleret vand i autoklaven og låget lukket helt og den orange låseknop lukkes. Den sorte ventil midt på låget åbnes helt og drejes derefter en 1/2 omgang tilbage. Autoklaven tændes og der går ca. 10-15 min indtil den er varmet op. Efter 3 min med damp ud at ventilen lukkes denne og trykket begynder at sige. Når trykket er kommet op i det blå felt på manometeret tages der tid på autoklaveringen (30min). Derefter slukkes autoklaven.

Flaskerne afkøles derefter til stuetemperatur.

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

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

F **Bestemmelse af metaller**

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

G **Beregning af resultat**

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

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

hvor

A = ekstraktens metal koncentration, mg/L = ppm

B = g jord afvejet

C = fortyndingsfaktor

H **Affaldshåndtering**

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Filterpapiret bortkastes i skraldespanden i stinkskalet.

Jorden og asken skal opsamles i beholder til jordaffald.

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

A Princip

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

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes pH-meter

C Kemikalie sikkerhed

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

Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.

D Reagenser

1) **Kaliumchlorid 1 M KCl:**

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

2) **Bufferopløsning, pH 4,00:**

Radiometer pH 4.

3) **Bufferopløsning, pH 7,00:**

Radiometer pH 7

E Analysens udførelse

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

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

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

F Beregning af resultat

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

G Affaldshåndtering

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

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

Porøsitet og densitet (LBM-standard)

A Princip

Porøsiteten i et materiale fortæller hvor porøst materialet er, dvs. hvor skrøbeligt det er. Jo højere porøsiteten er, des større evne har materialet til at optage vand. Det betyder også at en god evne til at optage vand. Densiteten er materialets masse pr. volumenenhed. Massen af et porøst materiale kan være en tør masse eller en masse med vand i de åbne porer, dvs. ved at finde densiteten kan man udregne massen ved forskellige forhold.

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes vakuumpumpe, teknisk vægt med mulighed for at veje under vand.

C Analysens udførelse

Prøven tørres ved 105°C til prøven er hel tør dvs. ved kontant vægt.

Hvis der er tale om en betonprøve skal denne tørres ved 50°C i min 3 uger, da en tørring ved høj temperatur vil medføre ændring i porestrukturen.

Prøven vejes på teknisk vægt og vægten noteres som (m_{105})

Prøven placeres i en eksikator med låg og hane. Eksikatorens tilsluttes vakuumpumpen og pumpes ned i minimum 3 timer.

Destilleret vand med rumtemperatur ledes ind i eksikatorens vha en slange og undertrykket i eksikatorens hane lukkes lige så snart vandstanden er 3 cm over prøvelegemet. Derefter skal den stå lukket i 1 time.

Herefter lukkes luften ind og prøven skal stå under vand natten over ved atmosfæretryk.

Den vandmættede prøve vejes først under vand på en teknisk vægt med ophæng under. Vandet i karret skal have rumtemperatur. Vægten noteres som (m_{sw}).

Prøven duppes med en hårdt opvredet klud inden den vejes over vand. Vægten noteres som (m_{ssd}).

For at kontrollere om der er sket en udvaskning af prøven ved vandmætning tørres prøven ved 105°C og kontrolvejes.

D Beregning af resultat

Rumtemp: °C	Vandtemp: °C	Vanddensitet $\rho_w =$	kg/m ³
Kontrollod:			
Før: kg	Efter: kg		
Prøvelegement nr:			
m_{105}	Kg		
m_{ssd}	Kg		
m_{sw}	Kg		
$V = (m_{ssd} - m_{sw}) / \rho_w$	m ³		
$V_{p\grave{a}} = (m_{ssd} - m_{105}) / \rho_w$	m ³ /m ³		
$P_{\grave{a}} = V_{p\grave{a}} / V$	Kg/m ³		
$\rho_d = m_{105} / V$	Kg/m ³		
$\rho_f = m_{105} / (V - V_{p\grave{a}})$	Kg/m ³		
$\rho_{ssd} = m_{ssd} / V$	Kg/m ³		
$u_{ssd} = (m_{ssd} - m_{105}) / m_{105}$	Kg/kg		

Definitioner, begreber og symboler

- m_{105} Masse af prøvelegemet efter tørring ved 105°C (kg)
- m_{ssd} Masse af prøvelegemet over vand efter vakuumvandmætning (kg)
- m_{sw} Masse af vakuumvandmættet prøvelegeme vejet i vand (kg)
- V Prøvelegemets volumen (m³)
- $V_{p\grave{a}}$ Volumen af åbne porer (m³)
- ρ_f Faststoffdensitet (kg/m³)
- ρ_d Tørdensitet (kg/m³)
- ρ_{ssd} Densitet af prøvelegeme i vakuumvandmættet overfladetør tilstand (kg/m³)
- $p_{\grave{a}}$ Prøvelegemets åbne porøsitet (m³/m³)
- u_{ssd} Vandtørstofforhold i vakuumvandmættet overfladetør tilstand (kg/kg)

Vandindhold

A Princip

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

B Specielt apparatur

Til analysen benyttes et varmeskab.

C Analysens udførelse

Ved meget præcis måling:

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

Dette gøres vha. en tang, fingrene afsætter fugt.

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

Ved mindre præcis måling (mest anvendt):

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

D **Beregning af resultat**

Vandindholdet angives i procent af vægten af den fugtige jord.

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

E **Affaldshåndtering**

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald og bægerglassene rengøres.

Vandopløselighed

A Princip

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

B Analysens udførelse

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

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

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

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

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

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

Asken og filteret afkøles og vejes.

C Beregning af resultat

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

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

D **Affaldshåndtering**

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

Bilag I

TRYKTEST, side 1 af 1

			Geometri						Øgsresultater								
Prøvenr. * [nr.]	Hærdetid [døgn]	Prøvedag [dato]	Bredde [mm]	Snit [mm]	Højde [mm]	Snit [mm]	Længde [mm]	Snit [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m ³]	Tryk 1 [kN]	[Mpa]	Tryk 2 [kN]	[Mpa]	gennemsnit [kN]	Gennemsnit [Mpa]	Standard afvigelse [Mpa]
A1-1	7	16.03.16	39,5	39,67	39	39,33	159	159,5	570	2289	56	36	52	33	54	34	1,49
			39,5		39		160										
			40		40												
A1-2	7	16.03.16	40	39,67	39	39,33	160	159,5	567	2277	56	36	55	35	54	34	1,49
			39		39,5		159										
			40		39,5												
A1-3	7	16.03.16	39,5	39,83	40	40,00	160	160	564	2212	51	32	53	33	54	34	1,49
			40		40		160										
			40		40												
A2-1	14	23.03.16	40	40,00	40	40,00	161	160,75	567	2205	53	33	64	40	60	37	2,14
			40		40		160,5										
			40		40												
A2-2	14	23.03.16	40	40,00	40	40,00	161	161	568	2203	60	38	59	37	60	37	2,14
			40		40		161										
			40		40												
A2-3	14	23.03.16	41	40,67	40	40,00	160,5	160,75	573	2193	63	39	62	38	60	37	2,14
			40,5		40		161										
			40,5		40												
A3-1	28	06.04.16	40	40,33	40	40,00	160	160	571	2213	61	38	65	40	69	43	2,73
			41		40		160										
			40		40												
A3-2	28	06.04.16	40	40,33	40	40,00	160,5	160,25	575	2223	74	46	72	45	69	43	2,73
			40,5		40		160										
			40,5		40												
A3-3	28	06.04.16	40	40,00	40	40,00	160	160	568	2219	69	43	70	44	69	43	2,73
			40		40		160										
			40		40												

AR1-1	7	22.03.16	40	40,00	40	40,00	161	161	570	2214	56	35	52	33	56	35	1,17
			40		40		161										
			40		40												
AR1-2	7	22.03.16	40	40,00	40	40,00	161	161	570	2214	54	34	57	36	56	35	1,17
			40		40		161										
			40		40												
AR1-3	7	22.03.16	40	40,33	40	40,00	161	161	575	2212	58	36	56	35	56	35	1,17
			40		40		161										
			41		40												
AR2-1	14	29.03.16	40	40,00	39,5	39,67	160	160	569	2242	62	39	58	37	61	38	0,97
			40		39,5		160										
			40		40												
AR2-2	14	29.03.16	40	39,83	40	39,83	159,5	159,5	569	2249	62	39	62	39	61	38	0,97
			40		40		159,5										
			39,5		39,5												
AR2-3	14	29.03.16	39,5	39,50	40	40,00	160	162,75	559	2176	60	38	62	39	61	38	0,97
			39,5		40		165,5										
			39,5		40												
AR3-1	28	12.04.16	41	40,67	40	40,00	160	160	576	2213	72	44	70	43	71	44	0,66
			41		40		160										
			40		40												
AR3-2	28	12.04.16	40	40,33	40	40,00	160	160	578	2238	70	43	72	45	71	44	0,66
			40		40		160										
			41		40												
AR3-3	28	12.04.16	40	40,33	40	40,00	160	160	579	2241	70	43	69	43	71	44	0,66
			40		40		160										
			41		40												
B1-1	7	23.03.16	42	41,33	40	40,00	161	161	559	2100	41	25	29	18	42	24	3,09
			41		40		161										
			41		40												
B1-2	7	23.03.16	41,5	41,67	40	40,00	160	160	567	2127	43	26	42	25	42	24	3,09
			42		40		160										
			41,5		40												
B1-3	7	23.03.16	41	41,00	40	40,00	160	160	562	2143	44	27	42	26	42	24	3,09
			41		40		160										
			41		40												
B2-1	14	31.03.16	40	40,50	40	40,00	160	160,5	553	2126	45	28	44	27	45	28	0,91
			40		40		161										
			41,5		40												
B2-2	14	31.03.16	41	41,00	40	40,00	160	160	552	2103	47	29	43	26	45	28	0,91
			41		40		160										
			41		40												

B2-3	14	31.03.16	41	41,00	40	40,00	160	160	550	2098	47	29	44	27			
			41		40		160										
			41		40												
B3-1	28	14.04.16	40	40,00	40	40,00	161	161	555	2155	57	36	57	36	57	35	0,83
			40		40		161										
			40		40												
B3-2	28	14.04.16	40	40,33	40	40,00	160,5	160,5	550	2125	58	36	56	35			
			40		40		160,5										
			41		40												
B3-3	28	14.04.16	40	40,33	40	40,00	160,5	160,5	549	2122	57	35	54	33			
			40,5		40		160,5										
			40,5		40												
BR1-1	7	24.03.16	40	40,00	40	40,00	160,5	160,25	573	2235	58	36	61	38			
			40		40		160										
			40		40												
BR1-2	7	24.03.16	39	39,33	40	39,83	160	160	558	2226	62	40	58	37	45	38	1,30
			39		39,5		160										
			40		40												
BR1-3	7	24.03.16	40	39,83	39,5	39,83	160	160	570	2244	62	39	63	40			
			39,5		40		160										
			40		40												
BR2-1	14	31.03.16	40	40,83	40	40,00	160	160	576	2205	72	44	67	41	68	42	3,56
			41		40		160										
			41,5		40												
BR2-2	14	31.03.16	40,5	40,33	40	40,00	160	160	574	2224	72	45	56	35			
			40,5		40		160										
			40		40												
BR2-3	14	31.03.16	40,5	40,50	40	40,00	160	160	576	2221	70	43	73	45			
			40		40		160										
			41		40												
BR3-1	28	14.04.16	41	41,00	40	40,00	161	161	577	2186	85	52	84	51	85	52	1,18
			41		40		161										
			41		40												
BR3-2	28	14.04.16	41	40,50	40	40,00	160,5	160,5	574	2206	85	52	81	50			
			40,5		40		160,5										
			40		40												
BR3-3	28	14.04.16	40,5	40,83	40	40,00	160,5	160,75	575	2191	85	52	88	54			
			41		40		161										
			41		40												
D1-1	7	19.04.16	40,5	40,83	40	40,00	160	160	578	2212	66	40	61	37			
			41		40		160										
			41		40												

D1-2	7	19.04.16	41	41,00	40	40,00	160,5	160,5	579	2198	63	38	61	37	62	39	1,50
			41		40		160,5										
			41		40												
D1-3	7	19.04.16	38	38,33	40	40,00	160	160	539	2198	63	41	58	38			
			38,5		40		160										
			38,5		40												
D2-1	14	26.04.16	39,5	40,17	40	40,00	160	160	570	2218	64	40	68	42			
			41		40		160										
			40		40												
D2-2	14	26.04.16	39,5	39,67	40	40,00	160	160	550	2167	58	37	62	39	63	40	1,76
			39,5		40		160										
			40		40												
D2-3	14	26.04.16	38,5	38,83	40	40,00	160	160	544	2189	63	41	63	41			
			39		40		160										
			39		40												
D3-1	28	10.05.16	40	40,00	40	40,00	160	160	557	2175	78	49	80	50			
			40		40		160										
			40		40												
D3-2	28	10.05.16	40	39,67	40	40,00	160	160	558	2200	77	49	74	47	75	48	1,43
			39		40		160										
			40		40												
D3-3	28	10.05.16	38	38,33	40	40,00	160,5	160,5	546	2220	70	46	73	48			
			38,5		40		160,5										
			38,5		40												
DR1-1	7	19.04.16	39	39,67	40	40,00	160,5	160,5	558	2193	64	40	49	31			
			40		40		160,5										
			40		40												
DR1-2	7	19.04.16	39	38,67	40	40,00	160	160	541	2187	58	38	62	40	61	39	3,91
			39		40		160										
			38		40												

DR1-3	7	19.04.16	40	40,00	40	40,00	160,5	160,5	564	2197	67	42	68	43			
			40		40		160,5										
			40		40												
DR2-1	14	26.04.16	38,5	39,17	40	40,00	161	161	552	2189	67	43	70	45	67	42	3,21
			39		40		161										
			40		40												
DR2-2	14	26.04.16	42	41,17	40	40,00	161	161	578	2181	77	47	60	36			
			41		40		161										
			40,5		40												
DR2-3	14	26.04.16	40	39,00	40	40,00	160	160	549	2198	64	41	66	42			
			39		40		160										
			38		40												
DR3-1	28	10.05.16	41	40,67	40	40,00	160	160	571	2192	64	39	76	47			
			41		40		160										
			40		40												
DR3-2	28	10.05.16	39	39,00	40	40,00	160	160	548	2196	74	47	71	46	73	46	3,07
			39		40		160										
			39		40												
DR3-3	28	10.05.16	39	39,00	40	40,00	160	160	551	2207	74	47	76	49			
			39		40		160										
			39		40												
E1-1	7	4.05.16	40	39,67	40	40,00	160	160	561	2208	65	41	59	37	61	38	1,33
			40		40		160										
			39		40												
E1-2	7	4.05.16	40	39,33	40	40,00	160	160	549	2180	61	39	60	38			
			40		40		160										
			38		40												
E1-3	7	4.05.16	40	40,00	40	40,00	160	160	554	2164	61	38	59	37			
			40		40		160										
			40		40												
E2-1	14	11.05.16	38	38,67	40	40,00	160	160	547	2209	64	41	66	43	65	42	1,49
			39		40		160										
			39		40												
E2-2	14	11.05.16	39	39,33	40	40,00	160	160	558	2215	69	44	68	43			
			39		40		160										
			40		40												
E2-3	14	11.05.16	39	39,00	40	40,00	160	160	550	2202	62	40	63	40			
			39		40		160										
			39		40												
E3-1	28	25.05.16	41	41,00	40	40,00	160	160	576	2197	76	46	76	46	72	45	2,26
			41		40		160										
			41		40												
E3-2	28	25.05.16	39	38,67	40	40,00	160	160	543	2195	73	47	73	47			
			39		40		160										
			38		40												
E3-3	28	25.05.16	40	39,33	40	40,00	161	161	542	2140	71	45	64	41			
			40		40		161										
			38		40												

F1-1	7	04.05.16	40	40,00	40	40,00	160	160	553	2162	61	38	60	38			
			40		40		160										
			40		40												
F1-2	7	04.05.16	41	41,00	40	40,00	160	160	580	2210	66	40	63	38	62	38	0,88
			41		40		160										
			41		40												
F1-3	7	04.05.16	40	39,67	40	40,00	160	160	553	2177	60	38	61	38			
			40		40		160										
			39		40												
F2-1	14	12.05.16	38	38,67	40	40,00	160	160	551	2228	61	39	59	38	68	44	3,47
			39		40		160										
			39		40												
F2-2	14	12.05.16	40	39,33	40	40,00	160	160	560	2225	74	47	73	46			
			39		40		160										
			39		40												
F2-3	14	12.05.16	38	38,67	40	40,00	160	160	544	2198	70	45	70	45			
			39		40		160										
			39		40												
F3-1	28	26.05.16	40	40,00	40	40,00	160	160	567	2213	84	53	86	54			
			40		40		160										
			40		40												
F3-2	28	26.05.16	39	39,00	40	40,00	161	161	557	2217	83	53	84	54	84	53	1,01
			39		40		161										
			39		40												
F3-3	28	26.05.16	40	39,67	40	40,00	160	160	567	2235	87	55	82	52			
			40		40		160										
			39		40												
G1-1	7	11.05.16	39	39,00	40	40,00	160	160	534	2140	52	33	53	34	51	33	3,04
			39		40		160										
			39		40												
G1-2	7	11.05.16	37	37,00	40	40,00	160	160	519	2192	50	34	40	27			
			37		40		160										
			37		40												
G1-3	7	11.05.16	39	39,00	40	40,00	161	161	545	2169	58	37	53	34			
			39		40		161										
			39		40												
G2-1	28	01.06.16	40	39,33	40	40,00	160	160	545	2165	66	42	64	41	65	41	0,95
			39		40		160										
			39		40												
G2-2	28	01.06.16	41	40,33	40	40,00	160	160	563	2180	69	43	68	42			
			40		40		160										
			40		40												
G2-3	28	01.06.16	39	38,67	40	40,00	161	161	528	2122	62	40	63	41			
			38,5		40		161										
			38,5		40												
GR1-1	7	11.05.16	40	39,67	40	40,00	160	160	565	2227	56	35	57	36			
			40		40		160										
			39		40												

GR1-2	7	11.05.16	39	39,67	40	40,00	160	160	563	2218	59	37	56	35	57	36	0,73
			40		40		160										
			40		40												
GR1-3	7	11.05.16	40	39,67	40	40,00	160	160	565	2226	56	35	58	37			
			40		40		160										
			39		40												
GR2-1	28	01.06.16	40	40,00	40	40,00	160,3	160,3	566	2208	73	46	73	46			
			40		40		160,3										
			40		40												
GR2-2	28	01.06.16	39	39,00	40	40,00	160,5	160,5	557	2224	66	42	68	44	69	44	2,50
			39		40		160,5										
			39		40												
GR2-3	28	01.06.16	40	40,00	40	40,00	160	160	566	2210	62	39	73	46			
			40		40		160										
			40		40												
H1-1	7	11.05.16	40	39,67	40	40,00	160	160	557	2194	66	42	64	40	63	40	1,42
			40		40		160										
			39		40												
H1-2	7	11.05.16	38	38,00	40	40,00	160	160	539	2216	60	39	59	39			
			38		40		160										
			38		40												
H1-3	7	11.05.16	40	39,33	40	40,00	160	160	552	2194	67	43	61	39			
			39		40		160										
			39		40												
H2-1	28	01.06.16	37	37,33	40	40,00	161	161	526	2188	63	42	74	50	76	49	3,75
			37,5		40		161										
			37,5		40												
H2-2	28	01.06.16	39	39,33	40	40,00	161	161	561	2215	74	47	81	51			
			39,5		40		161										
			39,5		40												
H2-3	28	01.06.16	40	39,33	40	40,00	161	161	560	2211	83	53	83	53			
			39		40		161										
			39		40												
HR1-1	7	11.05.16	40	39,33	40	40,00	160	160	562	2234	64	41	63	40	61	39	1,30
			39		40		160										
			39		40												
HR1-2	7	11.05.16	38	38,00	40	40,00	160	160	538	2211	56	37	58	38			
			38		40		160										
			38		40												
HR1-3	7	11.05.16	40	39,67	40	40,00	160	160	560	2205	63	40	61	38			
			40		40		160										
			39		40												
HR2-1	28	01.06.16	39	39,00	40	40,00	160	160	554	2221	75	48	80	51	80	50	1,34
			39		40		160										
			39		40												
HR2-2	28	01.06.16	39,5	39,50	40	40,00	160	160	566	2241	78	49	82	52			
			40		40		160										
			39		40												
HR2-3	28	01.06.16	40	39,83	40	40,00	160,5	160,5	566	2214	81	51	82	51			
			40		40		160,5										
			39,5		40												

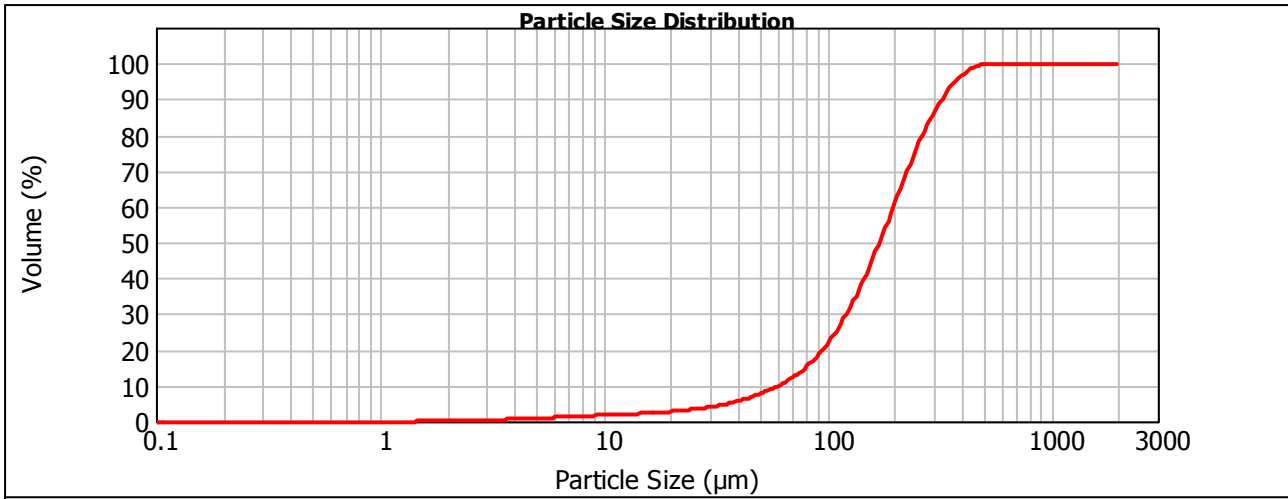
Result Analysis Report

Sample Name: Averaged Result - Mikkel	SOP Name: askeTør	Measured: Wednesday, April 20, 2016 10:03:26 AM
Sample Source & type: Paris	Measured by: malm	Analysed: Wednesday, April 20, 2016 10:03:28 AM
Sample bulk lot ref: 123-ABC	Result Source: Averaged	

Particle Name: aske	Accessory Name: Scirocco 2000	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 1.500	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 1.28 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.468 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0034 %Vol	Span : 1.544	Uniformity: 0.475	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.0744 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 80.641 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 183.745 um	

d(0.1): 60.698 um d(0.5): 170.871 um d(0.9): 324.554 um



— Averaged Result - Mikkel, Wednesday, April 20, 2016 10:03:26 AM

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.17	120.226	7.26	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	0.18	138.038	8.45	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.03	15.136	0.21	158.489	9.30	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.04	17.378	0.27	181.970	9.66	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.06	19.953	0.34	208.930	9.39	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.09	22.909	0.44	239.883	9.39	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.11	26.303	0.57	275.423	7.03	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.12	30.200	0.72	316.228	5.26	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.14	34.674	0.90	363.078	3.43	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.15	39.811	1.11	416.869	1.89	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.17	45.709	1.37	478.630	0.49	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.17	52.481	1.71	549.541	0.06	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.17	60.256	2.18	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.17	69.183	2.82	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.17	79.433	3.68	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.17	91.201	4.74	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.16	104.713	5.98	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.16	120.226		1258.925	0.00		

Operator notes: Average of 3 measurements from 160411Rita

Result Analysis Report

Sample Name:
Mikkel Darre Slamaske tør A

Sample Source & type:
Paris

Sample bulk lot ref:
123-ABC

SOP Name:
askeTør

Measured by:
malm

Result Source:
Measurement

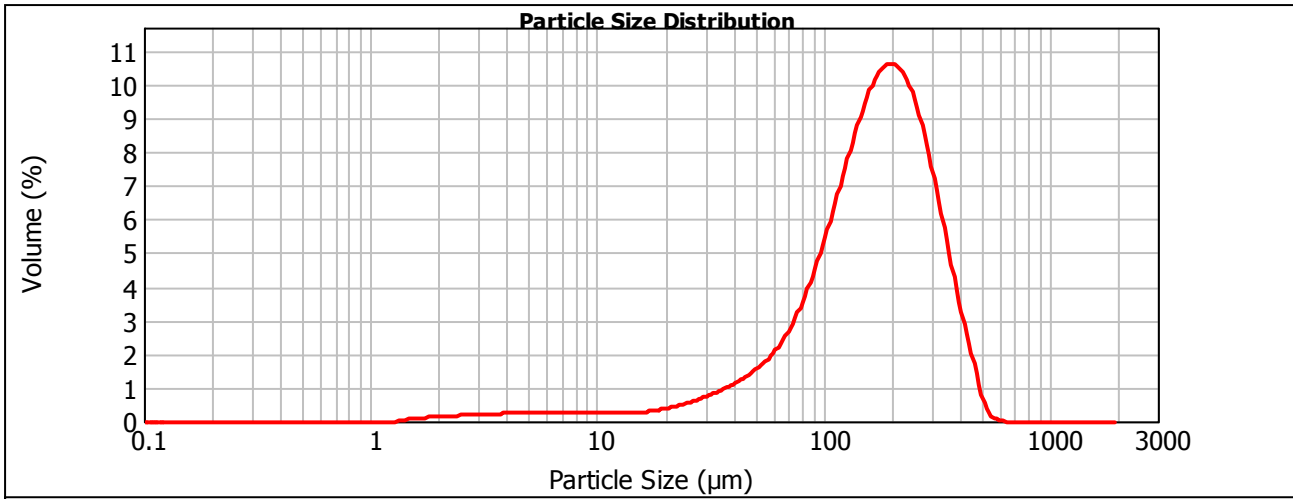
Measured:
Wednesday, April 20, 2016 10:03:26 AM

Analysed:
Wednesday, April 20, 2016 10:03:28 AM

Particle Name: aske	Accessory Name: Scirocco 2000	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 1.500	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 1.28 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.481 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0026 %Vol	Span : 1.578	Uniformity: 0.482	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.0913 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 65.689 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 183.000 um	

d(0.1): 55.662 um d(0.5): 171.083 um d(0.9): 325.620 um



— Mikkel Darre Slamaske tør A, Wednesday, April 20, 2016 10:03:26 AM

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.21	120.226	7.09	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.01	13.183	0.23	138.038	8.29	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.09	15.136	0.25	158.489	9.18	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.10	17.378	0.30	181.970	9.59	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.13	19.953	0.38	208.930	9.37	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.15	22.909	0.48	239.883	8.49	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.17	26.303	0.60	275.423	7.08	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.19	30.200	0.74	316.228	5.33	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.21	34.674	0.90	363.078	3.49	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.22	39.811	1.09	416.869	1.93	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.23	45.709	1.32	478.630	0.48	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.23	52.481	1.64	549.541	0.05	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.23	60.256	2.08	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.23	69.183	2.69	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.23	79.433	3.52	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.22	91.201	4.56	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.21	104.713	5.80	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.21	120.226		1258.925	0.00		

Operator notes:

Result Analysis Report

Sample Name:
Mikkel Darre Slamaske tør B

SOP Name:
askeTør

Measured:
Wednesday, April 20, 2016 10:06:06 AM

Sample Source & type:
Paris

Measured by:
malm

Analysed:
Wednesday, April 20, 2016 10:06:08 AM

Sample bulk lot ref:
123-ABC

Result Source:
Measurement

Particle Name:
aske

Accessory Name:
Scirocco 2000

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Enhanced

Particle RI:
1.500

Absorption:
0

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Obscuration:
1.24 %

Dispersant Name:

Dispersant RI:
1.000

Weighted Residual:
0.413 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0034 %Vol

Span :
1.540

Uniformity:
0.474

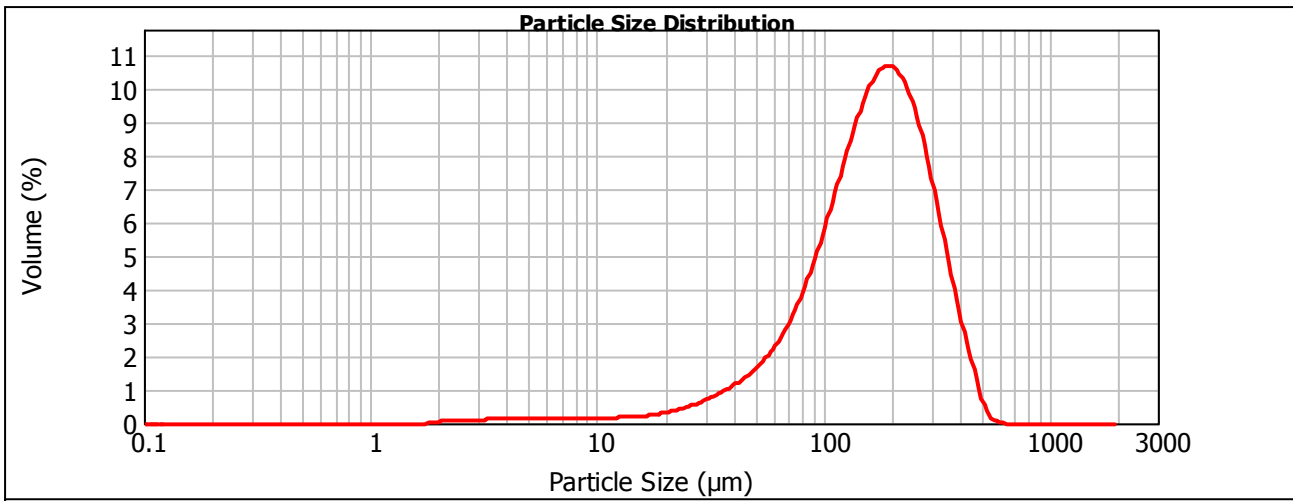
Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.0692 m²/g

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

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

d(0.1): 61.658 um d(0.5): 168.730 um d(0.9): 321.552 um



— Mikkel Darre Slamaske tør B, Wednesday, April 20, 2016 10:06:06 AM

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.16	120.226	7.42	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	0.17	138.038	8.55	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.00	15.136	0.20	158.489	9.35	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.00	17.378	0.25	181.970	9.63	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.06	19.953	0.32	208.930	9.30	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.07	22.909	0.43	239.883	8.32	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.09	26.303	0.56	275.423	6.86	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.10	30.200	0.71	316.228	5.09	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.12	34.674	0.90	363.078	3.30	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.13	39.811	1.13	416.869	1.80	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.14	45.709	1.42	478.630	0.47	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.14	52.481	1.79	549.541	0.06	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.15	60.256	2.30	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.15	69.183	2.97	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.15	79.433	3.85	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.15	91.201	4.93	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.15	104.713	6.16	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.15	120.226		1258.925	0.00		

Operator notes:

Result Analysis Report

Sample Name:
Mikkel Darre Slamaske tør C

SOP Name:
askeTør

Measured:
Wednesday, April 20, 2016 10:08:47 AM

Sample Source & type:
Paris

Measured by:
malm

Analysed:
Wednesday, April 20, 2016 10:08:49 AM

Sample bulk lot ref:
123-ABC

Result Source:
Measurement

Particle Name:
aske

Accessory Name:
Scirocco 2000

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Enhanced

Particle RI:
1.500

Absorption:
0

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Obscuration:
1.31 %

Dispersant Name:

Dispersant RI:
1.000

Weighted Residual:
0.510 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0040 %Vol

Span :
1.517

Uniformity:
0.467

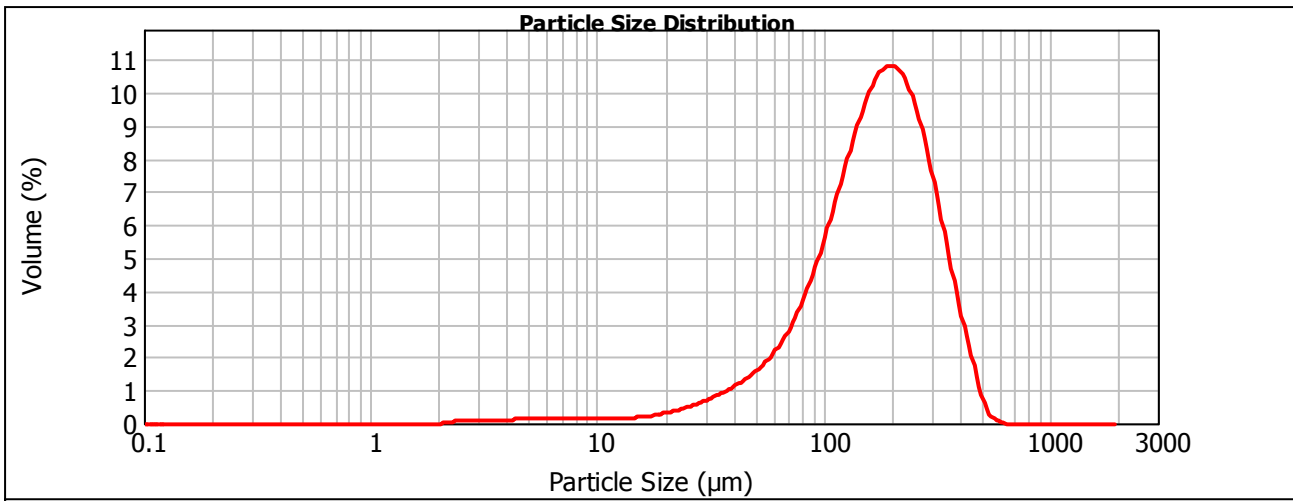
Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.0627 m²/g

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

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

d(0.1): 64.300 um d(0.5): 172.822 um d(0.9): 326.474 um



— Mikkel Darre Slamaske tør C, Wednesday, April 20, 2016 10:08:47 AM

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.14	120.226	7.29	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	0.15	138.038	8.50	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.00	15.136	0.19	158.489	9.38	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.00	17.378	0.24	181.970	9.77	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.00	19.953	0.32	208.930	9.51	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.00	22.909	0.43	239.883	9.51	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.05	26.303	0.56	275.423	7.15	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.07	30.200	0.71	316.228	5.36	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.09	34.674	0.89	363.078	3.51	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.10	39.811	1.10	416.869	1.95	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.11	45.709	1.36	478.630	0.52	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.12	52.481	1.70	549.541	0.07	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.13	60.256	2.17	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.13	69.183	2.81	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.13	79.433	3.66	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.13	91.201	4.73	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.13	104.713	5.99	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.13	120.226		1258.925			

Operator notes:

Bilag K

Afbindingstid

5 % slammaske		5 % flyveaske		7,5 % slammaske		7,5 % flyveaske		10 % knust slmaske	
Pen [mm]	I [m.s.]	Pen [mm]	I [m.s.]	Pen [mm]	I [m.s.]	Pen [mm]	I [m.s.]	Pen [mm]	I [m.s.]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	10	0	10	0	10	0	10	0	10
0,2	20	0	20	0	20	0	20	0	20
0,1	30	0	30	0	30	0	30	0	30
0	40	0	40	0	40	0	40	0	40
0,1	50	0	50	0	50	0	50	0	50
0,1	60	0	60	0	60	0	60	0	60
0,1	70	0	70	0	70	0	70	0	70
0	80	0	80	0	80	0	80	0	80
0,1	90	0	90	0	90	0	90	0	90
0,1	100	0	100	0	100	0	100	0	100
0	110	0	110	0	110	0	110	0	110
0,2	120	0	120	0	120	0	120	0	120
0,1	130	0	130	20	130	0	130	0	130
0,1	140	0	140	28,7	140	0	140	0	140
0,1	150	0	150	20,3	150	0	150	0	150
0,1	160	0	160	20,3	160	0	160	0	160
19,2	170	5,3	170	30,7	170	31,9	170	0	170
29,5	180	30,4	180	35,5	180	26,7	180	0	180
35,2	190	34,5	190	31,8	190	36,5	190	0	190
39,6	200	41,7	200	36,7	200	36,9	200	0	200
34,1	210	37,1	210	38,1	210	39,9	210	0	210
38,4	220	41,2	220	39	220	40,9	220	0	220
40,3	230	40,4	230	28,2	230	41,8	230	0	230
43,8	240	42,2	240	40,7	240	42,7	240	0	240
42,4	250	42,5	250	42,9	250	43,6	250	0	250
42,7	260	42,7	260	42,7	260	43,9	260	0	260
43,3	270	42,6	270	44,1	270	44,5	270	0	270
43,2	280	43,7	280	43,3	280	45,4	280	0	280
42,5	290	43,4	290	43,3	290	45,2	290	0	290
43,2	300	43,3	300	42,4	300	43,8	300	15	300
42,8	310	44,5	310	46	310	42,8	310	31,9	310
43,5	320	42,6	320	44,4	320	43,4	320	32,5	320
44,5	330	42,9	330	43,7	330	44	330	20	330
41,8	340	43,5	340	42,4	340	43,9	340	20	340
41,9	350	43,8	350	42,2	350	43,7	350	26,8	350
43,6	360	43,1	360	38,8	360	43,7	360	31	360
42,7	370	43,6	370	45,6	370	45,4	370	37,8	370
42,8	380	43,4	380	45,5	380	45,2	380	33,9	380
44,1	390	44,7	390	43,8	390	45,1	390	41	390
43,9	400	44,3	400	46,1	400	44,3	400	41,9	400
44,1	410	44	410	44,4	410	44,5	410	40,8	410
43,5	420	43,7	420	43,4	420	42,8	420	36	420
43,5	430	42,5	430	44,5	430	44,2	430	42	430
44,3	440	43,1	440	44	440	44	440	40,2	440
42,6	450	44	450	43,7	450	44,3	450	40,1	450
41,8	460	43,3	460	42,4	460	44	460	44,8	460
42,5	470	43	470	43	470	44,5	470	42,1	470
42,6	480	43,2	480	44,4	480	44,5	480	42,4	480
42,6	490	43,8	490	43,3	490	44,5	490	43,4	490
44,8	500	43,9	500	44,7	500	44,5	500	45,8	500
44,2	510	44,3	510	46,5	510	44	510	44,9	510

44	520	44,6	520	44,3	520	45,1	520	44,3	520
43,5	530	44,1	530	43,3	530	44,3	530	45,9	530
44,1	540	44,1	540	44,2	540	44,2	540	46,7	540
43,7	550	43,4	550	44,6	550	44,5	550	45,2	550
43,8	560	43,5	560	44,1	560	44,3	560	45,2	560
43,6	570	43,8	570	43,7	570	44,1	570	45,9	570
44,4	580	43,3	580	45	580	44,2	580	42,8	580
44,1	590	43,7	590	43,4	590	44,3	590	45,9	590
44,1	600	44,4	600	45,5	600	44,6	600	45,2	600
44,3	610	44,1	610	43,5	610	45,2	610	46,4	610
44	620	44	620	43,2	620	44,4	620	45,9	620
43,8	630	43,3	630	44,1	630	44,8	630	46,6	630
44,6	640	43,3	640	44,6	640	44,5	640	45,2	640
43,5	650	43,8	650	43,3	650	44,8	650	47,3	650
43	660	43,8	660	44,1	660	44,2	660	44,9	660
43,5	670	44,3	670	45,4	670	44,9	670	45	670
43,8	680	44,3	680	42,9	680	44,6	680	47	680
44,1	690	44,2	690	43,3	690	44,7	690	46,3	690
43,9	700	44	700	43,9	700	44,8	700	47,9	700
44,1	710	43,8	710	45,7	710	44,3	710	46,4	710
44,5	720	43,4	720	44,9	720	44,8	720	46,9	720
44,4	730	43,5	730	43,6	730	44,2	730	47,8	730
43	740	44	740	44,3	740	44,6	740	43,7	740
45	750	44	750	45,2	750	44,5	750	46,1	750
45	760	44,7	760	45,4	760	45,1	760	46,1	760
44,1	770	44,1	770	43,5	770	45,2	770	45,9	770
44,2	780	43,8	780	44,9	780	44	780	45,3	780
43	790	44,3	790	44	790	44,9	790	46,2	790
43,5	800	44	800	43,3	800	44,8	800	44,2	800
44,2	810	44	810	45,7	810	44,8	810	45,6	810
44,2	820	44,1	820	46,9	820	45,2	820	46,1	820
44,4	830	44	830	46,1	830	45,2	830	46,7	830
44,4	840	44,1	840	44,7	840	44,9	840	47,5	840
43,7	850	43,9	850	45,6	850	44,3	850	45,9	850

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