Anvendelse af slamaske fra depot i beton

- den friske betons egenskaber

DTU Civil Engineering
Juni 2014

DTU Civil Engineering
Department of Civil Engineering

Anvendelse af slamaske fra depot i beton

- den friske betons egenskaber

Udarbejdet af:

Rikke Klavstrup Mathiasen
stud.polyt. S102916

Udarbejdet på:

Institut for Byggeri og Anlæg
Danmarks Tekniske Universitet

Vejledere:

Lektor MSK, Lisbeth M. Ottosen
Docent, Per Goltermann

Laborantteam:

Laboratoriekoordinator, Ebba Cederberg Schnell

Projektperiode:

02.02.2014 - 04.06.2014

Forsidebillede:

Salamaske: *http://videnskab.dk/sites/all/files/imagecache/300x/article_images/foto1.jpg*

Mørtelprøver: *(Foto: Listbeth M. Ottosen)*

1 Forord

Denne rapport er udarbejdet som et Bachelorprojekt indenfor Civilingeniør-linjen Byggeteknologi. Projektet er forløbet over perioden fra 3. februar 2014 til 4. juni 2014.
Rapporten tager udgangspunkt i betonteori og resultater fra de i perioden udførte forsøg. Projektet er blevet vejledt af Lisbeth M. Ottosen i samarbejde med Per Goltermann og indgår som en lille del af DTU's overordnede forskningsprogram ZeroWaste Byg.

Projektet er udført med henblik på at undersøge mulighederne for, at benytte slamaske fra Spildevandscenter Avedøres depot som cement- eller sanderstatning i beton. Rapporten er tiltænkt studerende og undervisere på DTU BYG, og det forventes at læser har en grundlæggende viden omkring emnet.

I forbindelse med udførelsen af projektet, rettes der en stor tak til Lisbeth M. Ottosen for vejledning og sparring gennem hele projektet. Desuden rettes en stor tak til laboranten Ebba Cederberg Schnell, for demonstrationer af forsøg og generel hjælp og vejledning gennem alle forsøgene.

Rapporten er udarbejdet af Rikke Klavstrup Mathiasen og er sat til 20 ECTS point.

Rikke Klavstrup Mathiasen, S102916
Kongens Lyngby, Forår 2014

2 Resume

Denne rapport omhandler brugen af slamasker i beton, med fokus på askens indhold af fosfor samt den indflydelse dette fosfor har på betonens fysiske egenskaber. Fosfor er i dag en mangelfuld ressource og ifølge seniorforsker Peter Sørensen fra Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet ved Aarhus Universitet, vil den naturlige fosfor slippe op om 40-100 år.

Det vil derfor være en miljømæssig fordel at kunne udvinde og genbruge denne fosfor til bl.a. gødning, samtidig med at slamasken efterfølgende ville kunne bruges i beton, ligesom kulflyveaske bliver det i dag. Genbruget af slamasken vil ikke blot medføre miljømæssige fordele, men også økonomiske, idet der alene fra Spildevandcenteret Avedøre (SCA) og Lynettefællesskabet ville kunne spares 6.000.000-10.000.000 kr. årligt på deponering, såfremt det blev muligt at genanvende 100% af den producerede aske.

Slamasken, der undersøges i dette projekt, kommer fra SCA, hvor det har ligget til opbevaring på et udendørs og uoverdækket depot i en ukendt periode. I begyndelsen af projektet blev der udført en screening af asken, hvor der for asken blev bestemt kornstørrelse, pH-værdi og ledningsevne, glødetab, vandindhold, vandopløselighed, indhold af grundstoffer (ved oplukning) og indhold af vandopløselige anioner.

Ud fra askekarakteristikken kunne det konkluderes at en syrevaskning af asken vil være nødvendig, for at kunne overholde de for kulflyveaske gældende krav om indholdet af tungmetaller, der sammenlignes med. Glødetab, kornstørrelse og chlor-indholdet overholdt dog alle kravene for kulflyveasken.

Under screeningsprocessen blev der desuden støbt 33 mørtelprismer ud fra tre forskellige recepter, hvoraf den ene var en referencerecept. I de to aske-indeholdende recepter var der i den ene erstattet 5% af cementen med knust, ikke syrevasket slamaske og i den anden erstattet 10% af sandet med knust, ikke syrevasket slamaske.

Udover forsøg med porøsitet, densitet og kapillarsugning, efter 28 hærdedøgn, blev mørtelprismerne også trykstyrketestet efter hhv. 1, 3 og 5 hærdedøgn, hvor det blev fundet at trykstyrken, for recepten med 5% cementerstatning, efter 5 døgn var 8% lavere end styrken for referenceprøven, men for recepten med 10% sanderstatning var styrken 0,9% højere end den for referenceprøven.

Ifht. trykstyrken vil recepten med 10% sanderstatning derfor være at foretrække, men ifht. miljøet, vil det optimale være at reducere brugen af cement. Da trykstyrken for recepten med 5% cementerstatning kun ligger 8% lavere end referenceprøven, vil denne recept stadig kunne anvendes.

Efter screeningsprocessen blev resultaterne brugt til at afgrænse et fokusområde, hvor der i dette projekt blev valgt askens indhold af fosfor pga. askekarakteristikkens afsløring af et fosforindhold

på hele 12%. Ved tilsætning af fosfor (i projektet anvendt Ammonium Dihydrogen Phosphate, ADP) til referece-recepten i samme koncentrationer, som de var at finde i de aske-indeholdende recepter, blev det undersøgt, hvorvidt askens indhold af fosfor var en fordel eller en ulempe for mørtelens fysiske egenskaber. Såfremt dette fosfor var en ulempe for betonen, ville det være yderligere ønskeligt, at bruge ressourcer på udvinding af denne fosfor (samtidig med de andre stoffer).

Ud fra undersøgelse af afbindingstid og trykstyrketests med de fosforindeholdende mørteler, blev det fundet at den laveste koncentration af ADP ikke havde nogen betydelig indflydelse på mørtelens trykstyrke, men for den højeste koncentration af ADP, lå trykstyrken hele 12,4 MPa under referenceprøvens trykstyrke på 45,9 MPa.

Pga. de lave pH-værdier for slamasken og det tilsatte ADP, blev der udført et ekstra forsøg, for at bestemme pH-værdierne for de hærdede mørtelprøver, for at sikre, at en ændring i pH-værdien, som følge af tilsætningsstofferne, ikke var skyld i de lave trykstyrker fra trykstyrkeforsøgene. Idet pH-værdierne for alle mørtelrecepterne lå mellem 12,39 og 12,55, var der ikke noget alarmerende ved disse og det kunne dermed konkluderes, at det var fosforen, der påvirkede trykstyrken negativt og en udvinding af denne, ville være fordelagtig for den hærdede betons fysiske egenskaber.

Der er sideløbende kigget overfladisk på konsekvenserne af askens udendørs opbevaring under åben himmel, hvilket ifht. indholdet af chlor-ioner er fundet fordelagtigt pga. den naturlige udvaskning, der er sket. Idet der, ved modtagelsen, var både sten og plantevækster i asken, er det dog et vurderingsspørgsmål om askens udvaskning af chlor, opvejer arbejdet/omkostningerne ved at skulle sigte asken inden knusning og den samtidige risiko for et øget indhold af organisk materiale i asken, der kan påvirke askens ensartethed.

3 Abstract

This project deals with the use of sewage sludge ashes in concrete, focusing on the content of phosphorous in the ash and the impact it has on the physical properties of the concrete. Already, phosphorus is an inadequate resource and, according to senior researcher Peter Sørensen from the Faculty of Agricultural Sciences at Aarhus University, the natural phosphorus will run out in 40-100 years.

Therefore it will be an environmental benefit to be able to extract and recycle this phosphorus in e.g. fertilizer, while the sludge ash subsequently could be used in concrete, like coal fly ash is today. The reuse of sludge ash will not only entail environmental benefits, but also economic ones, since the sole savings from Spildevandscenter Avedøre (SCA) and Lynettefællesskabet will amount to approximately 6 million to 10 million dkkr. per year due to the price of landfill, if it should become possible to recycle 100% of the ash produced.

The sludge ash under examination in this project comes from SCA, where it has been stored outdoors in an open-air facility for an unknown period of time. In the beginning of the project, a screening process of the ash where the particle size, pH and conductivity, loss on ignition, water content, water solubility, content of elements and content of water-soluble anions was determined.

From the ash characteristics the conclusion was, that an acid washing of the ash will be required to meet the requirements of the heavy metal content, for the coal fly ashes, set by Danish Standards and used for comparison, since requirements for sewage sludge ashes are nonexistent. Loss on ignition, grain size and chlorine content is observed, however, to fulfill all the requirements for the coal fly ash.

During the screening process 33 mortar prisms were cast using three different recipes, where one of them was a reference recipe. In the two ash-containing recipes one was made by replacing 5% of the cement with crushed, not acid washed sewage sludge ash and the other made by replacing 10% of the sand with crushed, not acid washed sewage sludge ash.

In addition to experiments with porosity, density and capillary suction after 28 days of hardening, the compressive strength of the mortar prisms was tested after 1, 3 and 5 days of hardening respectively, where it was found that the compressive strength, for the recipe with 5% cement replacement, after 5 days was 8% lower than the strength of the reference sample, but the recipe with 10% sand replacement had a 0.9% higher strength than that of the reference sample.

In relation to the compressive strength the recipe where 10 % sand is substitute is preferable, but when it comes to the environmental perspective, it would be ideal to reduce the use of cement. Since the compressive strength of the recipe where 5 % cement is replacement is only 8 % lower than that of the reference sample, this recipe could still be used.

After the screening process, the results were used to define a focus area in which the the content of phosphorus in the ash due to the results from the ash characteristic where a phosphorus content of 12% was detected. By the addition of phosphorus (in the project Ammonium Dihydrogen Phosphate, ADP, was used) to the reference-recipe in the approximately same concentrations as the ones found in the the results from the ash-containing recipes, it was examined whether the content of phosphorus in the ash was an advantage or a disadvantage for the physical properties of the mortar. If in fact phosphorus would turn out to be a disadvantage for the concrete, it would be even more desirable to spend resources on the extraction of this phosphorus (together with the other substances).

Based on the study of setting time and compressive strength of the phosphorus-containing mortars, it was found that the lowest concentration of ADP had no significant influence on the compressive strength of the prisms, but for the mortar prisms containing the highest concentration of ADP, the compressive strength was 12.4 MPa lower than the compressive strength of reference sample of 45.9 MPa.

Due to the low pH values for the sewage sludge ash and the added ADP, an additional experiment was performed in order to determine the pH values of the hardened mortar samples. This was done to ensure, that a change in the pH value, due to the additives, was not the cause of the the low compressive strengths of the mortar prisms. The pH values of all of the mortar recipes was found to be between 12.39 and 12.55, which was not alarmingly different, thus it was concluded, that it in fact was the the phosphorus, which negatively affected the compressive strengths, wherefore an extraction of this phosphorous, would be advantageous for the physical properties of the hardened concrete.

A superficial discussion about the impact of the outdoor storage arrangements, which in the relation to the content of chlorine ions is found advantageous due to the natural leaching that has happened. Since there, upon receipt of the ash, was both small rocks and vegetation in the ash, it was determined to be a matter of judgement whether the leaching of chlorine outweighs the work/cost of having to sieve the ash before crushing and the simultaneous risk of increased organic matter content in the ash, which may affect the uniformity.

Indholdsfortegnelse

1 Forord **iv**

2 Resume **vi**

3 Abstract **viii**

4 Indledning **2**

5 Teori **4**

5.1 Beton 4

5.1.1 Opbygning og sammensætning 5

5.1.2 Egenskaber 10

5.1.3 Miljøklasser 12

5.2 Slamaske 13

5.2.1 Slamasker i beton 14

5.2.2 Behandling af slamasken 15

5.2.3 Askekarakteristik 16

5.3 Fosfor 17

6 Eksperimentielt Arbejde **20**

6.1 Askekarakteristik 20

6.1.1 Knusning af aske 20

6.1.2 Kornstørrelse 21

6.1.3 pH og ledningsevne 21

6.1.4 Glødetab 21

6.1.5 Vandindhold 22

6.1.6 Vandopløselighed 22

6.1.7 Oplukning 22

6.1.8 Vandopløselige anioner 22

6.2 Mørtelens fysiske egenskaber 23

6.2.1 Blanding og støbning af mørtelprøver 23

6.2.2 Sætmål 24

6.2.3 Afbindingstid 24

6.2.4 Trykstyrkemåling 25

6.2.5 Porøsitet/Densitet 25

6.2.6 Kapillarsugning . . . 26

7 Resultater og diskussion **28**
7.1 Screeningsproces . . . 28
7.2 Askekarakteristik . . . 29
7.2.1 Kornstørrelse . . . 30
7.2.2 pH og ledningsevne . . . 31
7.2.3 Glødetab . . . 33
7.2.4 Vandindhold . . . 33
7.2.5 Vandopløselighed . . . 34
7.2.6 Oplukning . . . 34
7.2.7 Vandopløselige anioner . . . 35
7.3 Mørtelens fysiske egenskaber . . . 36
7.3.1 Sætmål . . . 37
7.3.2 Afbindingstid . . . 38
7.3.3 Trykstyrketest . . . 39
7.3.4 Porøsitet/Densitet . . . 41
7.3.5 Kapillarsugning . . . 43
7.4 Videre forskning . . . 44
7.4.1 Antal forsøg – sikkerhed . . . 45
7.4.2 Askens ensartethed . . . 45
7.4.3 Optimalt v/c-forhold og Bolomey . . . 45
7.4.4 Syrevask af aske . . . 45
7.4.5 Kapillarsugning, porøsitet og densitet . . . 46
7.4.6 Beton . . . 46
7.4.7 Fosfor . . . 46

8 Konklusion **48**

9 Litteraturliste **52**

Appendix **54**

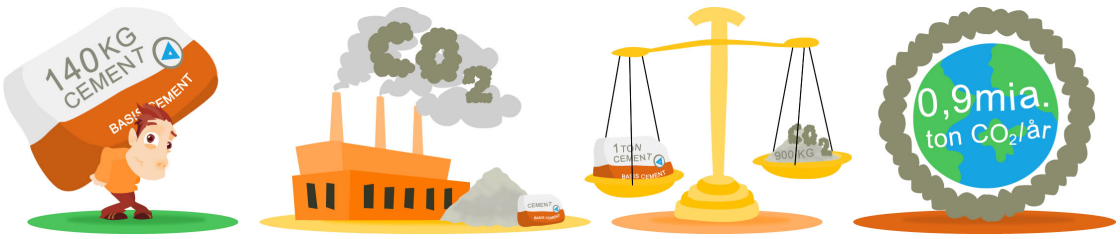
A Forsøgsvejledninger **56**
A.1 Askekarakteristik . . . 56
A.2 Mørtelens fysiske egenskaber . . . 62

B Forsøgsresultater **65**
B.1 Støbningsskema . . . 65
B.2 Resultater for askekarakteristik af slamasken . . . 65
B.3 Mørtelens fysiske egenskaber . . . 70
B.4 Posterpræsentation . . . 74

4 Indledning

Beton er det mest anvendte byggemateriale i verden idet der årligt produceres lige under 3 tons beton pr. person i verden, hvormed den overordnede brug af beton er dobbelt så stort som stål, træ, plastik og aluminium til sammen [Concrete Trust].

Især ulande og tidligere ulande har taget betonen til sig, da materialet både er billigt at fremstille og nemt at arbejde med, hvorfor materialet desuden er en stor del af den infrastrukturelle- og industrielle udvikling verden over. Den cement, der anvendes til at producere beton, fremstilles ved meget høje temperaturer, der opnås ved afbrændingen af fossile brændsler, hvormed der udslippes store mængder af CO_2. Ud fra et miljømæssigt synspunkt er betonproduktionen et stort problem bl.a. på grund af cementfremstillingen. Iht. [Johanneson (2012)] udledes ca. 900 kg. CO_2 for hvert ton produceret cement. Af de 3 ton beton, der produceres pr. person, består de 140 kg af cement og med en nuværende verdenspopulation på ca. 7,2 mia. mennesker, svarer det til 0,9 mia. ton CO_2, fra cementproduktionen alene pr. år. Fordelen ved, at der produceres så store mængder beton på verdensplan er dog, at selv små ændringer og besparelser, har potentialet til at blive skaleret op til bemærkelsesværdige og betydningsfulde størrelser.



Figur 4.0.1: Illustration af omfanget af det miljømæssige problem ved cementproduktion.

DTU Byg har opstartet projektet ZeroWaste, hvor forskellige nye byggematerialer og tilslag undersøges med henblik på fremtidig brug i byggesektoren. Heriblandt undersøges også alternative asker, såsom flyveasker fra træ/halm-afbrænding og slamaske fra afbrænding af spildevandscentrenes overskudsslam. Udover de åbenlyse miljømæssige fordele ved at anvende asker i beton, enten til erstatning af cement eller sand, er de økonomiske fordele ej at forglemme. Flyveasker og slamasker, der endnu ikke er godkendt til genbrug i beton, opbevares på depoter eller deponeres til lossepladser for ca. 600-1000 kr. pr. ton [Skov & Ingerslev 2005]. Med en årlig produktion af slamaske på 10.000 ton alene fra Spildevandscenteret Avedøre og Lynettefællesskabet, vil der være en økonomisk besparelse på ca. 6.000.000-10.000.000 kr. pr. år, forudsat at man kunne genanvende 100% af den deponerede aske. [Spildevandscenteret Avedøre (2004)].

Som et led i ZeroWaste-projektet, udføres der en række bachelorprojekter med fokus på de førnævnte alternative asker til anvendelse i beton. Der arbejdes i dette projekt med slamaske, der har ligget til opbevaring på udendørs depoter fra Spildevandscenteret Avedøre (SCA). På baggrund af gennemgående bekymringer om verdens og især EU's forsvindende fosfor ressourcer, fokuseres der i dette projekt på den mængde fosfor, der sidder tilbage i asken, på trods af fosforudvindelse allerede inden afbrændingen af slammet. Der fokuseres i særdeleshed på fosforens indflydelse på den friske betons fysiske egenskaber, ved styrketests efter 5 hærdedøgn samt undersøgelse af afbindingstid og sætmål. Mørtelprøverne blandes efter en standardrecept jf. [DS/EN 196 − 1], kun tilført forskellige koncentrationer af fosfor, for at kunne se fosforens indflydelse uden påvirkning fra diverse tungmetaller og salte, der er i asken. Til sammenligning udføres samme forsøg med referenceprøver med tilsvarende mængder slamaske samt referenceprøver uden tilsætninger.

Midlerne til udvinding af fosforen fra slamaske, er stadig i forsøgsstadiet og, hvis det er muligt, at vise, at fosforen har en negativ indflydelse på betonens egenskaber, vil dette kunne understøtte argumentet for, at bruge ressourcer på udvaskning af fosfor sammen med andre stoffer og tungmetaller. Dermed kan resultater fra disse forsøg i sidste ende være med til, at gøre asken brugbar i beton og desuden sætte en stopper for det ressourcespild, der er ved deponering af fosfor-holdig aske. Et skridt nærmere den brune betons gennembrud.

5 Teori

5.1 Beton

Beton er et menneskeskabt blandingsprodukt, hvori hovedbestanddelene er cement, vand, grus og sten. Et materiale meget lig det beton, der produceres i dag, blev brugt til opbygning af det Romerske Rige i en periode på ca. 700 år fra 300 f.Kr til Romerigets fald i år 400 e.Kr., hvor en blanding af brændt kalksten, vulkansk aske og vand, skabte et formbart materiale, der efter hærdning i saltvand blev hårdt og stærkt. Det, der gjorde Romernes beton speciel, var brugen af en pulveriseret bjergart fra Pozzuoli-området, der gjorde blandingen hydraulisk, hvormed den kunne hærde under vand. Denne hydraulisering er stadig et vigtigt led i betonproduktionen og på baggrund af Romernes opdagelse, kaldes materialer med en hydrauliserende effekt i dag for et Puzzolan. Den tidlige mørtel gik dermed fra at være et simpelt bindemiddel, til et selvstændigt byggemateriale med imponerende styrke og holdbarhed, idet bygninger som Collussæum og Phanteon står den dag i dag, næsten uberørt af 2000 års vind og vejr. Efter Romerrigets fald blev teknikken dog glemt og først i 1824 blev den genopdaget og patenteret af den britiske ingeniør Joseph Aspdin. Af kommercielle årsager, blev denne type cement kaldt Portland-cement, pga. den visuelle lighed med den populære stentype, der blev udvundet på halvøen Portland i Sydengland. [Johanneson (2012)]

(a) Funktionalismens montagebyggeri.

(b) Den Sorte Diamant, nymodernismens stål og glas.

Figur 5.1.1: Eksempler på byggeriets udvikling. (a) [By og Bolig], (b) [Den Store Danske, Københavns fornyelse]

I forbindelse med de arkitektoniske perioder modernisme og funktionalisme i årene fra 1930'erne til 1970'erne, var beton meget populært og blev brugt i et bredt omfang til både boligkomplekser,

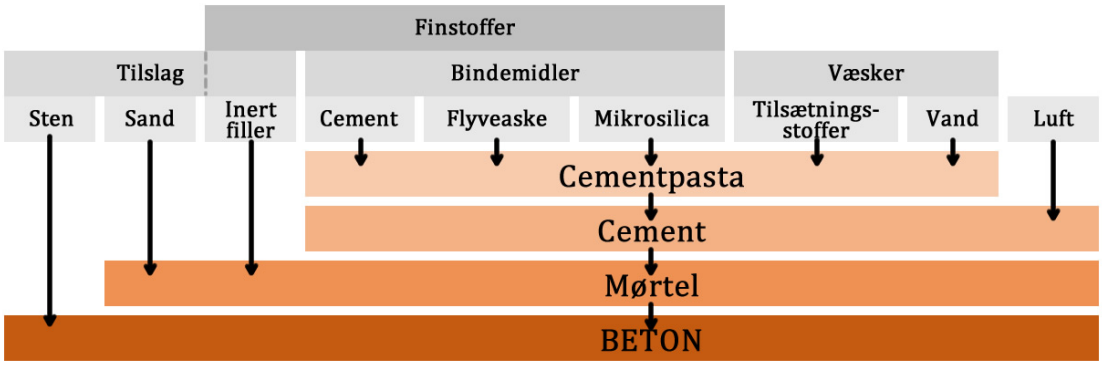
indkøbscentre, sportsarenaer, villaer og broer. Betonen var især populær til den minimalistiske arkitektur pga. formbarheden og de mange muligheder, der følger med denne.

Bygningsmaterialer som fx døre og vinduer blev standardiseret og det blev muligt at prefabrikere beton elementer, hvilket var essentielt for funktionalismen, hvor funktion og effektivisering var i højsædet og montagebyggeriet var især populært i denne arkitektoniske periode.

Beton-boostet ved montagebyggeri havde dog en skadende effekt på materialets image. En kombination af uafprøvede byggemetoder med ubeskyttet beton og et nu forældet arkitektonisk udtryk efterlod bygninger, som vist på figur 5.1.1a og resulterede i mistillid til det ellers så populære materiale. På trods af at den danske arkitektur ikke fulgte med de udenlandske arkitekters postmodernisme, men i stedet videreudviklede i nymodernismen, fulgte betonen ikke med. Til de super-minimalistiske bygninger som fx Det Kongelige Bibliotek, også kendt som "Den Sorte Diamant"på figur 5.1.1b, var stål og glas at foretrække [Dansk Arkitektur Center]. Betonens pris og medgørlighed har dog alligevel betydet at mange anvender det i dag til skjulte konstruktioner, i fx halvmurede huse, hvor bygningens bærende konstruktion består af betonelementer, beklædt med en skalmur i teglsten, som ofte blot er til pynt. I de seneste år har den arkitektoniske minimalisme dog gjort et comeback og i takt med det stigende fokus på det grønne byggeri og betonens mange muligheder for optimering, ses materialet ikke længere som et discount-produkt.

5.1.1 Opbygning og sammensætning

Beton er et blandingsprodukt, der som vist på figur 5.1.2, gennemgår 4 faser, afhængig af de delmaterialer, der kommes i blandingen.



Figur 5.1.2: Delmaterialer og faser i beton [Geiker (2008), s. 50].

Bindemidler

Cement er et uorganisk materiale og en af hovedingredienserne i beton. Det er et hydraulisk materiale, der reagerer med vand og dermed skaber det bindemiddel, som sammenholder betonens aggregater. [Johanneson (2012)]

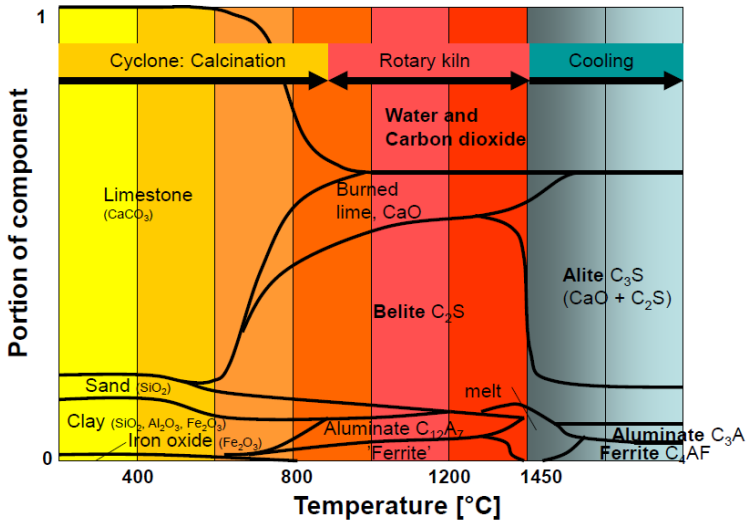
Cement produceres af råmaterialerne kalksten ($CaCiO_3$), sand (SiO_2) og ler (Al_2O_3 og Fe_2O_3) i et blandingsforhold på hhv. 70%, 20% og 10%, for at opnå optimale kemiske forhold.

Cementproduktionen består i store træk af 3 delprocesser, som beskrevet i det følgende og illustreret på figur 5.1.3. I første del af produktionen (step 1-6 på figur 5.1.3) blandes opslemmet kridt og fintformalet sand til en ovnslam. Blandingsforholdet mellem kridt og sand reguleres alt efter hvilken type cement, der ønskes.

Anden del af produktionen (step 7-12 på figur 5.1.3) består af brænding af materialerne ved $1400 - 1500\,°C$ hvor der ved ca. $800\,°C$ frigives CO_2 fra kridtet (kalcinering). Afbrændingen sker i en lang roterovn med et par graders hældning, således at materialet ved hjælp af ovnens rotation, bevæger sig langsomt ned igennem den lange cylinder. Det er denne afbrændingsproces, der er meget energikrævende, og derfor også er et af de miljømæssige problemer ved betonproduktionen. Materialet smeltes ved den sidste del af brændingen, hvilket resulterer i cementklinker i småstensstørrelse pga. nedkøling under fortsat rotation.

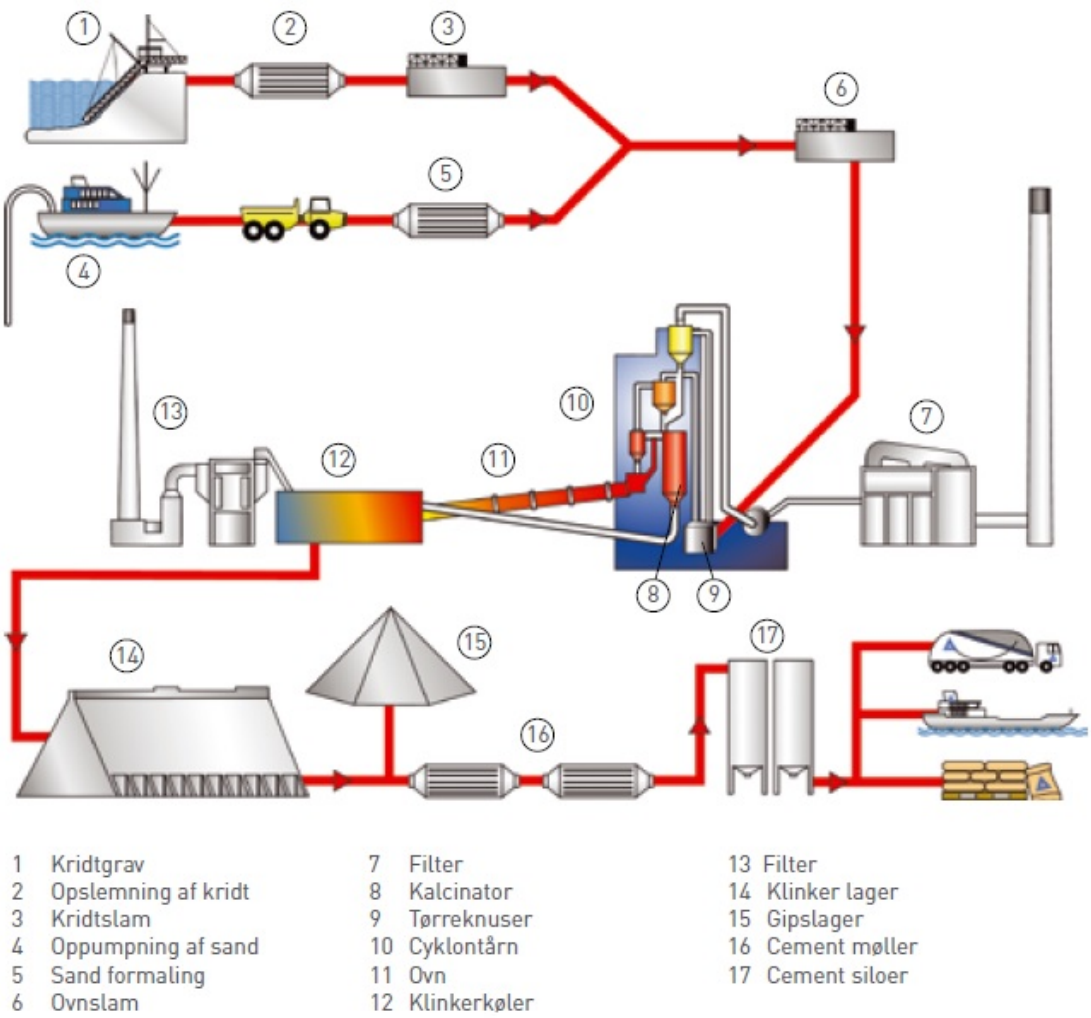
Disse cementklinker afkøles inden sidste del af produktionen (step 13-17 på figur 5.1.3), hvor klinkerne males i kuglemøller til den ønskede kornstørrelse. For cement ligger kornstørrelsen typisk i området 0,001-0,050 mm. Det er desuden under denne formaling, at der kan tilsættes gips, for at regulere afbinding og styrkeudvikling.

Igennem processen udvikles kemiske reaktioner ved forskellige temperaturer. På figur 5.1.4 ses den kemiske udvikling, der sker ved temperaturerne fra $200 - 1450\,°C$ igennem cyklontårnet, roterovnen og klinkerkøleren (step 10-12 på figur 5.1.3).



Figur 5.1.4: Cementens kemiske udvikling ved varmepåvirkning [Johanneson (2012), s. 24].

Flyveaske var tidligere et affaldsprodukt, ligesom slamaske er det i dag. Da oliekrisen ramte Danmark i 1973, skiftede mange kraftværker til afbrænding af kul, hvilket medførte et endnu større behov for bortskaffelses- og/eller genbrugsmuligheder for den kulflyveaske, der blev opfanget i filtre i skorstenene og deponeret på samme måde, som slamasken bliver det i dag. Man undersøgte derfor mulighederne for at genbruge asken i byggematerialer og Aalborg Portland A/S var, i samarbejde med de resterende aktører fra DANASKE i/s, frontløbere i den danske udbredelse af kulflyveasken. Kulflyveaskens succes i Danmark skyldtes bl.a., at man ikke kun brugte asken som cementerstatning, men at Aalborg Portland A/S også anvendte flyveasken i selve cementpro-



Figur 5.1.3: Cementproduktion [Aalborg (2010), s. 13].

duktionen, som erstatning for ler. Dette betød at der, i modsætning til i mange andre lande, ikke opstod interessekonflikt mellem brugen af flyveaske og brugen af cement. Efter flere års forskning er materialet i dag et anerkendt delmateriale, der har været anvendt i den danske betonproduktion siden 1970'erne. [Betonhåndbog, kap. 3.5.1]

Da kulflyveaske er et affaldsprodukt, der produceres over hele verden, kræves der en vis form for ensartethed til anvendelse i beton. Dansk Standard har udviklet standarden [DS/EN 450 – 1] specifikt for kulflyveaske, hvor der stilles krav til både fysiske og kemiske egenskaber for asken. I tabel 5.1.1 ses kravene til askens kornstørrelse og afbindingstid. Disse krav er opstillet på baggrund af den færdige betons fysiske egenskaber, hvor kornstørrelsen påvirker betonens styrke og afbindingstiden påvirker betonens styrkeudvikling og bearbejdelighed.

Fysiske krav	**Metode**			
Kornstørrelse	EN 451-2/	Mængden der ikke passerer en si	Kategori N	< 40,0%
	EN 933 − 10	med maskestørrelse på 0,045mm	Kategori S	< 12,0%
Afbindingstid (Initial)	DS/EN 196 − 3	≤ 2.25· afbindingstid af referenceprøve*		

* Testet på blanding med 25%-vægt flyveaske og 75%-vægt reference cementblanding.

Tabel 5.1.1: Fysiske krav til flyveaske [DS/EN 450 − 1].

Udover de fysiske krav, stilles der også kemiske krav til kulflyveasken. I tabel 5.1.2 er de kemiske krav til flyveasken opstillet i kategorier. Kulflyveaskens kategori afgør således, hvor materialet må anvendes af enten miljømæssige eller almene sikkerhedsmæssige årsager.

Kemiske krav	**Metode**		
Organisk materiale	DS/EN 196 − 2	Kategori A <	5,0%
		Kategori B <	7,0%
		Kategori C <	9,0%
Chlorid-indhold (Cl)z	DS/EN 196 − 2	<	9,0%
Sulfit (SO_3) indhold	DS/EN 196 − 2	<	3,0%
Fri Calciumoxid (CaO)	DS/EN 451 − 1	<	1,5%
Reaktiv Calciumoxid (CaO)	DS/EN 197 − 1	<	3,0%
Reaktiv Siliciumdioxid (SiO_2)	DS/EN 197 − 1	>	25,0%
Siliciumdioxid (SiO_2)		Tilsammen	
Aluminiumoxid (Al_2O_3)	DS/EN 196 − 2	>	75,0%
Jernoxid (Fe_2O_3)			
Total indhold af alkalier	DS/EN 196 − 2	<	5,0%
Magnesiumoxid (MgO)	DS/EN 196 − 2	<	4,0%
Fosfat (P_2O_5)	ISO 29581 − 2	<	5,0%

Tabel 5.1.2: Kemiske krav til flyveaske fra [DS/EN 450 − 1].

Kravet til afbindingstiden jf. [DS/EN 450 − 1] er, som vist i tabel 5.1.1 baseret på en prøve med 25%-vægt flyveaske og 75%-vægt reference cementblanding. I dette projekt er den maksimale anvendte mængde slamaske på bare 15%-vægt, hvorfor en sammenligning ikke vil være korrekt. På trods af dette anvendes dette krav dog alligevel til diskussion af projektets forsøgsresultater, af mangel på bedre sammenligningsgrundlag. Derfor antages det, at denne sammenligning til formålet vil være tilstrækkelig.

Microsilica er et restprodukt fra fremstillingen af silicium og ferrosilicium. Det består næsten udelukkende af glas, (SiO_2) og med en kornstørrelse på 0,1-1,0 μm går microsilicaen ind og udfylder alle de små hulrum, der opstår ved pakningen af de øvrige delmaterialer, hvilket både øger betonens styrke og vandtæthed (se figur 5.1.5).

Væsker

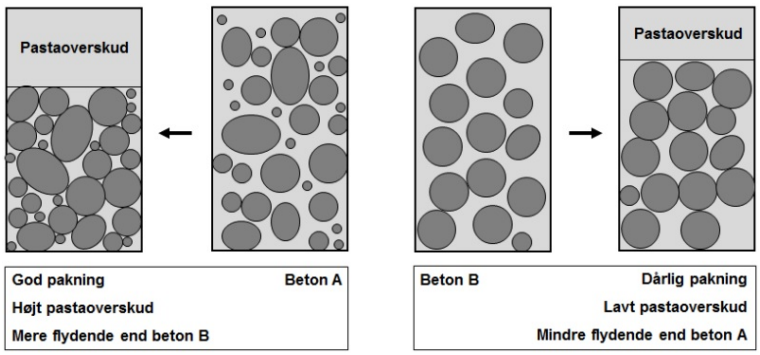
Vand tilsættes bindemidlerne, for at få disse til at reagere, kitte sammen og danne cementpasta/cement. Som tommelfingerregel siges det at, "hvis vand kan drikkes, kan det bruges i beton", forstået på den måde, at betonblanding kræver ikke-forurenet ferskvand med en pH på omkring 7. Vandindholdet påvirker betonens konsistens og er med til at gøre betonen bearbejdelig i den tidlige fase. Det er vigtigt for betonens egenskaber, især trykstyrken af den hærdede beton, at den færdige blanding hverken indeholder for meget eller for lidt vand [Johanneson (2012)]. For at sikre den rette mængde vand, kan vand/cement (v/c) forholdet eller vand/pulver (v/p) forholdet udregnes ved brug af Bolomey's formel 5.1.1, hvor der anvendes K-faktoren for den i projektet anvendte Aalborg Portland BASIS cement efter 7 døgn (i projektet 5 døgn, men denne forskel negligeres), K = 26 MPa og α = 0,6. [Aalborg (2010)]

$$f_c = K \cdot (\frac{1}{v/c} - \alpha) \tag{5.1.1}$$

Tilslag

Sand med en kornstørrelse på ca. 0-2 mm, blandes i cementen, for at få mørtel. Det er denne fase, der arbejdes med i dette projekt, da det er mørtelen, der er den dimensionsgivende faktor mht. betonens styrke (se afsnit 5.1.2, Styrke (tryk og træk)).

Mængden af tilslag skal tilpasses, således at der opnås en favorabel pakningsgrad. I en velproportioneret blanding, vil de forskellige størrelser tilslag og pulvere (cement, flyveaske, mikrosilica, slamaske m.v.) gå ind og udfylde hullerne imellem de større tilslag (sand), der så igen vil udfylde hulrum imellem de endnu større tilslag (sten). Som illustreret på figur 5.1.5, har denne pakning indflydelse på betonens konsistens og med dette også på styrken for den hærdede beton. [Betonforening, kap. 5.1 (2013)]



Figur 5.1.5: Illustration af pastaoverskud for to betoner med samme mængde tilslag og pasta, men med forskellige kornkurver [Betonforening, afsnit 5.1.5 (2013)].

Sten er, som vist på figur 5.1.2, det tilslag, der resulterer i materialet beton. Mængden af tilslagene som sand og sten, styres ofte mere af økonomiske årsager, end deres fysiske egenskaber. Da cement er et dyrt materiale, består ofte 70-80%-volumen af beton, af disse tilslag. Betonens pakningsgrad styres af mængden af de forskellige tilslag og spiller en stor rolle for styrken af den hærdede beton.

5.1.2 Egenskaber

Forholdet mellem de i afsnit 5.1.1 nævnte delmaterialer, afhænger af, hvilke egenskaber, der ønskes for den færdige beton. Ved regulering af forholdet mellem delmaterialerne, samt tilføjelse af forskellige regulativer, er det muligt at få en beton med høj eller lav styrke, hurtig eller langsom afbindingstid osv.

Sætmål

Betonens sætmål anvendes til at sikre en ensartet konsistens for hver blanding. Desuden er der opstillet krav til betonens sætmål ved forskellige anvendelsesområder, men da disse krav er baseret på beton (og ikke mørtel), udført med en stor betonkegleform med en indre diameter på 20 cm og forsøgene i dette projekt er udført med mørtel i en lille kegleform med en indre diameter på 10 cm, kan disse krav ikke anvendes til sammenligning.

Porøsitet og densitet

Beton er et porøst materiale og i den hærdede beton vil der være naturligt opståede hulrum, også kaldet porer. Pga. disse porer, vil den tørre beton opsuge vand, når det kommer i nærheden, fx ved konstruktioner i jord eller vand, men også betonvægge over jord, kan opsuge vand, hvilket sker ved fx slagregn eller lign. påvirkning. Der skelnes mellem to typer af porer, nemlig åbne og lukkede, som illustreret på figur 5.1.6. På grund af porernes forholdsvis små diametre, skabes der ved vandpåvirkning hårrørseffekt, hvilket betyder at vandet trækkes ind i de åbne porer og derfra transporteres gennem faststoffet til de lukkede porer. [Herholt(1985)]

(a) Faststof. (b) Faststof + lukkede porer. (c) Faststof + lukkede og åbne porer.

Figur 5.1.6: Rumfangsdefinitioner. [Kapillarsugningsvejledning afsnit A.2]

Der undersøges porøtitet og densitet, da det opsugede vand både kan have en indflydele på betonen ved udsættelse af frost og vandets udvidelse, men også fordi betonens styrke er kædet sammen med porøsiteten og dermed også densiteten.

Materialets porøsitet angives ved "den åbne porøsitet"($P_{å}$), som bestemmes ved brug af formlerne fra 5.1.2 jf. forsøgsvejledningen for porøsitet i afnit A.2, hvori der også findes definition af elementerne i de pågældende formler.

$$V = \frac{m_{ssd} - m_{sw}}{\rho_w} \qquad V_{på} \frac{m_{ssd} - m_{105}}{\rho_w} \qquad p = \frac{V_{på}}{V} \tag{5.1.2}$$

Densiteten hænger sammen med porøsiteten og kan derfor også bestemmes ved samme forsøg. En højere densitet vil skyldes færre hulrum/porer i materialet, hvormed porøsiteten vil være mindre.

$$\rho_f = \frac{m_{105}}{V} \qquad \rho_d = \frac{m_{105}}{(V - V_p)} \qquad \rho_{ssd} = \frac{m_{ssd}}{V} \tag{5.1.3}$$

Kapillarsugning

Når den hærdede beton udsættes for vand og fugt, enten i konstruktioner i jord eller vand, eller ved fx slagregn, trænger vandet ind i materialet. Pga. de små diametre, porerne har, danner vandet en krum overflade, også kaldet en *minisk*, som trækker vandet ind i de yderste porer og derefter transporterer det mellem porerne inde i selve materialet.

$$k = \frac{Q_{kap}}{\sqrt{t_{kap}}} \tag{5.1.4}$$

Da forsøget i dette projekt ikke varer længe nok til at der opnås Q_{kap}, vil det ikke være muligt at udregne kapillaritetstallet, k. Ved antagelse af at Q_{kap} er lig med vægten af den vandmættede prøve fra porøsitets/densitetsforsøget, ville det være muligt at udregne et estimat for k, men denne vandmættede prøve ville indeholde betydeligt mere vand, end det ville have været muligt for den at opsuge i kapillarsugningsforsøget, hvorfor dette ikke forsøges.

Styrke (tryk og træk)

Betonens vigtigste egenskab og grunden til materialets popularitet, er den høje trykstyrke kombineret med de lave omkostninger ved selve materialet. Stål kan opnå betydeligt højere styrker end beton, men da materialet både er dyrere, tungere og ikke mindst mindre bearbejdeligt på pladsen, anvendes i stedet beton, hvor det er muligt. Betonens svaghed er trækstyrken, der er meget lav (5-10% af trykstyrken), i forhold til den i træk. Det er for at kompensere for dette, at beton armeres, hvormed stålets trækstyrke kan udnyttes ved minimalt materialeforbrug.

Uarmeret beton anvendes oftest kun ved konstruktioner med minimal påvirkning og krav til styrke, da konstruktioner aldrig udsættes for tryk uden træk. En betonvæg vil fx (groft sagt) bære vægt af tag og ovenliggende etager i form af tryk, men vandrette kræfter, såsom vind, vil medvirke til påvirkning af væggen i form af et træk på "undersiden"vinkelret på den vandrette påvirkning.

For at sikre, at beton kan holde til det formål, den støbes til, er der opstillet trykstyrkeklasser, som dikterer anvendelsesområderne for de forkellige styrker. Omvendt kan disse trykstyrkeklasser hjælpe til at fremstille beton med den ønskede styrke, til anvendelsesformålet og dermed kan der undgås overdimensionering og økonomisk spild. Som det fremgår af figur 5.1.7, ligger de mest anvendte styrkeklasser mellem 8 MPa og 40 MPa. Styrkeklasserne stopper dog ikke ved 40 MPa, men fortsætter til styrker på over 100 MPa.

Anvendelse		Miljø-klasse	Styrke-klasse	V/C - max
Altanplader, P-dæk, svømmebade, søjler og kantbjælker på broer, marine konstruktioner i splashzone		E	40	0,40
Udvendige dæk, og bjælker, parkeringsdæk, støttemure, lyskasser, udvendige trapper, kælderydervægge delvis over terræn		A	35	0,45
Fundamenter delvis over terræn, udvendige vægge, facader og søjler, udvendige bjælker med konstruktiv beskyttet overside, ingeniørgange		M	25	0,55
Konstruktioner i indendørs tørt miljø f.eks. gulve, jorddækkede fundamenter i lav eller normal sikkerheds-klasse	Gulve udsat for kraftigt slid	P	35	0,48
		P	30	0,53
	Gulve udsat for moderat slid	P	25	0,60
	Gulve udsat for let slid, undergulve for slidlag	P	20	0,68
	Undergulv for afretningslag	P	16	0,76
	Fundamenter til parcelhuse og lignende	P	12	0,86
	Klaplag, renselag	P	8	0,99

Figur 5.1.7: Udsnit fra beton receptforslag [Aalborg (2010)], s. 142.

Styrkerne på figur 5.1.7 gælder for beton efter 28 hærdedøgn, men af mangel på et mere passende sammenligningsgrundlag, anvendes disse data alligevel til sammenligning med resultaterne fra trykstyrkeforsøgene fra dette projekt, efter maks. 5 hærdedøgn.

Det er gennem utallige forsøg vist, hvorledes mørtelen bryder inden de store tilslag (sten) og på figur 5.1.8 er vist et eksempel på en betoncylinder, efter endt trykstyrkeforsøg. På figuren kan det anes, hvorledes bruddet løber udenom de store sten, hvilket skyldes stenenes overlegene trykstyrke ifht. cementens. Det er derfor mørtelen, der er dimensionsgivende ifht. trykstyrken og grunden til at der i projektets forsøg arbejdes med mørtel fremfor beton. Der udføres forsøg med små prøvelegemer, hvor de store tilslag ikke ville kunne få den naturlige pakning og på baggrund af ovenstående teori antages det at de fundne resultater kan sammenlignes direkte med krav og teori for beton.

(a) Snit gennem beton. (b) Brud gennem mørtel.

Figur 5.1.8: Snit og brud i beton. (a) [www.vmmb.org] (b) [www.intechopen.com]

5.1.3 Miljøklasser

Miljøklasserne er et system, der ganske enkelt sikrer at betonen kan holde til det, den skal kunne og gør det muligt at producere og anvende både "stærk"og "svag"beton, da det fx vil være unødvendigt at anvende en beton i "Ekstra Aggressiv"miljøklassen til et "Passivt"miljø. Alle standarderne for beton henviser til disse klasser og for beton med slamaske, vil indholdet af bl.a. tungmetaller kunne have en indflydelse på, hvor i byggeriet, den alternative beton kan anvendes.

Miljøklasserne har være anvendt i Danmark side 1970'erne, men i forbindelse med det fælles europæiske normsystem, blev der indført eksponeringsklasser, der hænger sammen med de danske miljøklasser som vist i tabel 5.1.4. Ud fra trykstyrken kan beton opdeles i kategoriseringsklasser, som dermed giver et indtryk om anvendelsesmuligheder for den pågældende beton.

Miljøklasse	**Beskrivelse**	**Typiske konstruktioner**
Passiv	Tørt miljø. Ingen korrossion	Indendørs konstruktioner i tørt miljø. Jorddækkede fundamenter i lav eller normal sikkerhedsklasse.
Moderat	Fugtigt miljø uden risiko for frostpåvirkning i kombination med vandmætning. Der tilføres ikke nævneværdige mængder af alkalier og/eller klorider til betonoverfladen	Fundamenter delvist over terræn, jorddækkede fundamenter i høj sikkerhedsklasse, udvendige vægge, facader og søjler, udvendige bjælker med konstruktiv beskyttet overside, konstruktionsdele i svagt aggressivt grundvand.
Aggressiv	Fugtigt miljø hvor der kan tilføres alkalier og/eller klorider til betonoverfladen. Kraftig fugtbelastning med risiko for vandmætning i kombination med frostpåvirkning.	Udvendige dæk og bjælker uden konstruktiv beskyttet overside, støttemure, lyskasser, udvendige trapper, kælderydervægge delvis over terræn samt kanaler, gruber og andre konstruktionsdele i moderat aggressivt grundvand
Ekstra Aggressiv	Fugtigt miljø, hvor der enten tilføres eller ophobes store mængder alkalier og/eller klorider ved betonoverfladen.	Altangange, altanplader, altankonsoller, parkeringsdæk, svømmebade, søjler og kantbjælker på broer, marine konstruktioner i splashzone.

Tabel 5.1.3: Miljøklasser, påvirkninger og typiske bygningsdele [Aalborg (2007), s. 39].

Miljøklasser:	**Passiv**	**Moderat**	**Agressiv**	**Ekstra agressiv**
Eksponeringsklasser:	X0	XC2	XD1	XD2
	XC1	XC3	XS1	XD3
		XC4	XS2	XS3
		XF1	XF2	XF4
		XA1	XF3	XA3
			XA2	
Styrkeklasse:	$\geq$ C12*	$\geq$ C25	$\geq$ C35	$\geq$ C40

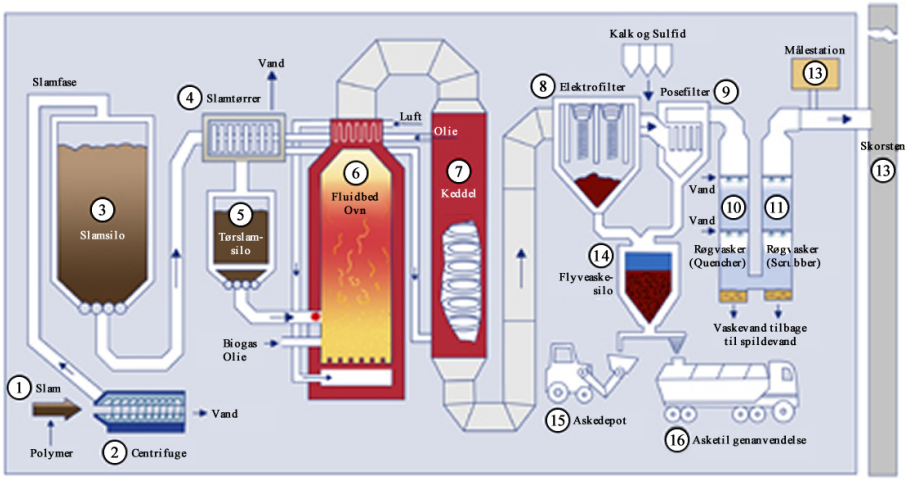
* For armeret beton. Ved uarmeret beton vil C8 være tilstrækkelig.

Tabel 5.1.4: Sammenhæng mellem Miljø-, Eksponerings- og styrkeklasser [Aalborg (2007), s. 40].

5.2 Slamaske

Slamasken, der anvendes i dette projekt, kommer fra Spildevandcenteret Avedøre (SCA), hvor der årligt opsamles slam fra 10 kommuner med en organisk belastning på 25-34 mio. m^3. Processen fra spildevandsslam til slamaske er illustreret på figur 5.2.1.Under rensning af spildevandet, produceres spildevandsslam, som udrådnes og afgasses, for at producere biogas til bl.a. el- og varmeproduktion. Efter denne udrådningsproces tørres slammet inden det brændes ved 850 °C og røggassen derfra ledes videre til miljøbehandling, hvor slamasken sorteres fra. Røggassen renses og ledes ud i fri

luft, imens slamasken udlægges på renseanlæggets eget askedepot til deponering eller i fremtiden til genanvendelse.



Figur 5.2.1: Process fra spildevandsslam til slamaske [Spildevandscenter].

I fællesskab med Lynnettefællesskabet, produceres der på de to rensningsanlæg til sammen ca. 10.000 tons slamaske om året [SCA (2004)] og med en deponeringspris på ca. 600-1000 kr. pr. ton, vil det, som tidligere nævnt, være en god forretning for både miljøet og anlæggene selv, at genanvende den opbevarede aske. [Skov & Ingerslev 2005]

5.2.1 Slamasker i beton

Slamaske er endnu ikke anvendt i industrien, da der stadig forskes i, hvilken indflydelse, denne type aske har på betonens kvaliteter samt hvilken indflydelse askens kemikalie- og tungmetalindhold har på miljøet fx ved udvaskning og nedbrydning af hærdet beton. Der er derfor ikke på nuværende tidspunkt opstillet officielle krav til denne type aske, hvorfor der til sammenligning af projektets forsøgsresultater, anvendes de krav, der er til de flyveasker, som i dag er et effektivt og anerkendt delmateriale i beton.

Udover de store mængder tungmetaller og salte, der er i slamasken, er der også andre udfordringer for slamasken, som ikke var et problem for kulflyveasken. Især askens røde farve, som smitter af og giver den færdige beton en brunlig eller lyserød farve, er et problem, der ikke kan ændres, hvorfor man i stedet forsøger at ændre brugernes holdning til den.

I en rapport fra 2004, udarbejdet af Spildevandcenter Avedøre, til COWI A/S, forsøger Spildevandscenteret Avedøre, i samarbejde med Lynettefællesskabet at skabe interesse og kendskab til anvendelse af slamasker i beton, og ønsker en redegørelse for mulighederne og barrierer for afsætningen. Rapporten er udarbejdet gennem interviews med adskillige aktiver, der var med til at opstille følgende barrierer for anvendelsen af slamasken:

- kan nedknust beton genanvendes?

- er der fare for udvaskning af tungmetaller?

- vil betons image lide skade, hvis der er problemer på lang sigt?

- hvad betyder en eventuel varierende kvalitet af slamaske?

- er der lugtgener?

- hvad betyder farveafsmitningen til betonen (brunlig farve pga. jernforbindelser)?

- er der uafklarede forhold vedrørende arbejdsmiljø ved anvendelse af slamaske?

- er slamaske tilstrækkelig dokumenteret til, at den kan indgå i DS 2426, til brug som mineralsk tilsætning, type II, i passiv miljøklasse?

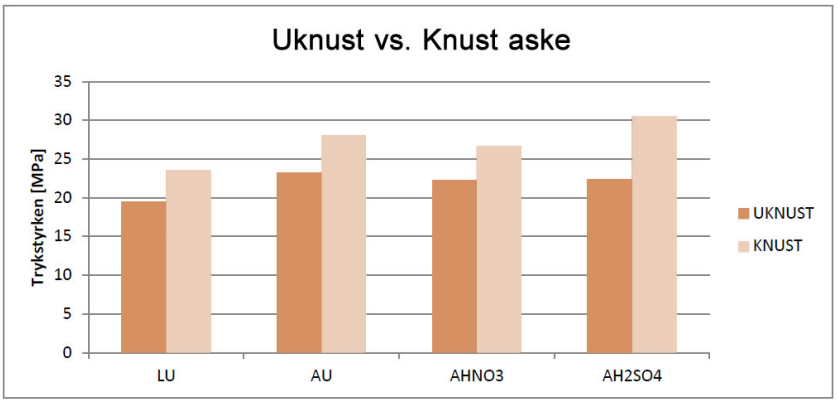
Der vil i dette projekt ikke fokuseres på alle disse problemstillinger, men det er en interessant liste til videre forskning, da den kommer direkte fra projektets vigtigste aktører. De fleste punkter på denne liste er dog problemstillinger, som der i øjeblikket er fokus på og forskes i. Dette projekt fokuserer på den del af dokumentationen, der efterspørges i det sidste punkt, og også spørgsmålet om den varierende kvalitet af asken, diskuteres kort senere i rapporten.

5.2.2 Behandling af slamasken

Knusning

Inden asken kan anvendes til støbning, males denne til en mel-lignende konsistens i en ringknuser, da dette i tidligere forsøg har vist at være en fordel. Fordelen skyldes at et større overfladeareal på asken gavner betonens styrke, da de mindre korn danner en større pakningsgrad (se afsnit 5.1.1, Tilslag).

I det tidligere projekt [Rosenmai & Svendsen (2012)] blev der udført forsøg med knusning af asken, hvor denne positive virkning af askeknusningen er vist på figur 5.2.2 fra den nævnte rapport.



Figur 5.2.2: Resultater for trykstyrkeprøvning af mørtel med knust og ikke knust aske efter 7 hærdedøgn. [Rosenmai & Svendsen (2012), s. 40]

Udtagning af fosfor og tungmetaller

Inden brug i beton, vil det være nødvendigt at reducere indholdet af tungmetaller og fosfor, da koncentrationerne af disse stoffer, i samtlige tidligere projekter er fundet for store. Stofferne kan fjernes ved syrevask og i artiklen [Ottosen (2013)] beskrives forsøg udført med både H_2SO_4 og HNO_3, hvormed tungmetaller og fosfor ender i den udvaskede væske.

Figur 5.2.3: Elekrolytisk seperation af tungmetaller og fosfor fra slamaske (Foto: Listbeth M. Ottosen)

DTU BYG har jf. [Andersen (2013)] patenteret en metode til elektrodialytisk seperation af tungmetaller og fosfor fra den udvaskede væske. Apparatet på figur 5.2.3 består af et kammer med vand, hvor der i hver ende er en ionbyttermembran og et elektrodekammer. Metoden går dermed i grove træk ud på at grundstofferne opkoncentreres i elektronkamrene når væsken påtrykkes et elektrisk felt.

5.2.3 Askekarakteristik

Den anvendte aske karakteriseres gennem en række forsøg og analyser, for at dokumentere dens kemiske og fysiske sammensætning. Der undersøges bl.a. askens indhold af stoffer, der kan have en indflydelse på miljøet, for at sikre at disse ikke vil være skadelige for hverken mennesker eller natur, ved anvendelsen i betonproduktionen. Desuden undersøges der karakteristika, der kan påvirke betonens egenskaber. Da slamaske ikke er et godkendt materiale til anvendelse i beton, er der endnu ikke opstillet krav til materialet og dets egenskaber, som tidligere nævnt, sammenlignes resultaterne fra askekarakteristikken af slamasken, med kravene til kulflyveaske fra [DS/EN 450 − 1], opstillet i tabel 5.1.2 og tabel 5.1.1. Sammenligningen sker på baggrund af [DS/EN 2426] afsnit 5.1.6, hvor der direkte kræves at slamaske overholder [DS/EN 450 − 1].

Miljøstyrelsen har opstillet en tabel til kategorisering af restprodukter i byggearbejde. Ud fra tungmetalindholdet i faststof er der opstillet tre kategorier, der angiver, i hvilke typer konstruktioner, restproduktet må anvendes. Oversigten over koncentrationen af tungmetal faststofindhold, ses i tabel 5.2.1.

	Karegori 1	**Kategori 2**	**Kategori 3**
	Faststofindhold [mg/kg] TS		
Arsen (As)	$0 - 20$	> 20	> 20
Bly (Pb)	$0 - 40$	> 40	> 40
Cadmium (Cd)	$0 - 0{,}5$	$> 0{,}5$	$> 0{,}5$
Chrom, total (Cr)	$0 - 500$	> 500	> 500
Chrom, (IV) (Cr)	$0 - 20$	> 20	> 20
Kobber (Cu)	$0 - 500$	> 500	> 500
Kviksølv (Hg)	$0 - 1$	> 1	> 1
Nikkel (Ni)	$0 - 30$	> 30	> 30
Zink (Zn)	$0 - 500$	> 500	> 500

Tabel 5.2.1: Kategorisering ud fra tungmetal faststoflindhold [Miljøstyrelsen (2010)].

Det er det højest kategoriserede stof, der giver anledning til kategoriseringen i tabel 5.2.1. Kategoriseringen af asken afgør i hvilke områder denne kan anvendes af miljømæssige årsager. Oversigten over anvendelsesområderne for Kategori 1-3 er at finde i udgivelsen [Miljøstyrelsen (2010)], men opstilles ikke her.

5.3 Fosfor

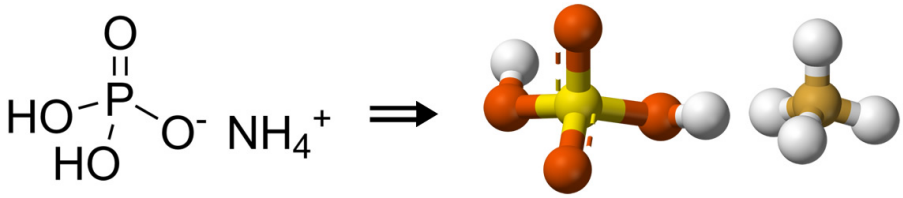
Fosfor er grundstof nr. 15 med atomtegnet P. Det anvendes bl.a. i produkter som tandpasta, fyrværkeri og tændstikker, men hele 85% af den udvundne fosfor anvendes i dag som gødning i landbruget [Nyvold (2008)]. Allerede i oldtiden blev fisk og ekskrementer brugt som gødning i landbruget, inden man fandt ud af at fosfor var grunden til materialernes gødende effekt. Det var først i år 1688, at Bernhard Albinus påviste fosfors tilstedeværelse i planteriget og i det efterfølgende århundrede var man overbevist om at fosfor kun var at finde i organiske materialer. I 1779 blev fosfor dog fundet i et mineral og i 1783 forklarede A.L. Lavoisier, at fosfor er et grundstof. Alt levende og organisk indeholder fosfor og menneskekroppen er ingen undtagelse. Størstedelen af kroppens fosfor findes i knoglerne og efter Napoleonskrigene, da manglen på gødning blev stor, blev slagmarkerne gravet op og knoglerne fra krigens ofre blev knust og spredt ud på markerne. I Egypten i 1800-tallet blev mumier på samme måde anvendt i landbruget, ved efter knusning at blive spredt på markerne.

I dag fremstilles fosfor at bjergarten fosforit, der udvindes i miner, men da landene i EU ikke har naturlige fosfor-ressourcer nok til at fremstille fosfor i de mængder, landbruget kræver, er import en uønsket nødvendighed. [Den Store Danske; Fosfor]

I følge seniorforsker Peter Sørensen fra Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet ved Aarhus Universitet, vil verdens fosfor ressourcer slippe op om 40-100 år. Skulle dette ske, vil det få katastrofale konsekvenser for landbruget, da intet kan gro uden fosfor. På trods af at kvaliteten af fosforen fra minerne allerede i 2008 var faldende, var prisen steget og forventedes fortsat at stige. For de danske landmænd havde prisstigningerne betydet at bruttoudgiften for gødning i 2008 var steget med 10% siden året før. Både de stigende priser og de miljømæssige problemstillinger har på flere områder sat fokus på genanvendelse af fosfor bl.a. ved spildevandsforbrænding og -rensning. Men, på trods af at spildevandsanlæggene udvinder den fosfor, der er naturligt forekommende i

spildevandsslammet, vil der selv efter afbrænding være fosfor tilbage i den producerede slamaske. Fosfor, som man nu, som også tidligere nævnt, forsøger at udvinde til genbrug.

I dette projekt, anvendes Ammonium dihydrogen phosphate (ADP), $NH_4H_2PO_4$ til mørtelforsøgene. Dette fås ved at blande en fosforholdig syre med amonium og resultatet bliver et hvidt krystalliseret produkt, med samme konsistens som fint sukker. På grund af den syre, der anvendes til produktionen af ADP, har det en pH-værdi på 4,2 og er derfor meget surt i forhold til normalen for hærdet beton (pH: 12-14). På trods af at ADP indeholder andre stoffer end blot fosfor, antages det alligevel igennem hele projektet, som værende ren fosfor.



Figur 5.3.1: Kemisk opbygning af Ammonium dihydrogen phosphate (ADP).

6 Eksperimentielt Arbejde

I dette afsnit beskrives de forsøg, der er blevet udført gennem projektets forløb. Der henvises i de fleste tilfælde til de forsøgsvejledninger, der er anvendt til udførelse af det pågældende forsøg, samt eventuelle Danske Standarder, der er fulgt.

Desuden nævnes eventuelle fejlkilder og usikkerheder, samt konsekvenserne af disse. Disse medtages dog kun i tilfælde, hvor de er fundet relevante.

6.1 Askekarakteristik

I den indledende projektfase, blev der udført en række analyser og forsøg, for at bestemme askens karakteristika. Der blev undersøgt såvel fysiske som kemiske egenskaber, for bl.a. at kunne sammenligne disse med de eksisterende krav til flyveaske og for generelt at kunne identificere interessepunkter til videre studier.

6.1.1 Knusning af aske

Som nævnt i teoriafsnittet er der i tidligere projekter udført forsøg med knust og ikke knust aske, hvor resultaterne har vist en øget trykstyrke med den knuste aske, hvorfor al asken til dette projekt knuses.

Forsøgsbeskrivelse:
Til knusning af den tørrede aske, anvendes en ringknuser. Der fyldes ca. 70 g tørret aske i ringknuseren, hvorefter denne kører i 30 sek. ved maksimal hastighed på 1100 omdrejninger.

Der er til dette forsøg ikke uddelt forsøgsbeskrivelse, men blot udført en demonstration af forsøget af en til projektet tilknyttet laborant.

6.1.2 Kornstørrelse

Der er bestemt kornstørrelse både før og efter ringknusningen, for at kunne dokumentere effekten af knusningen og sammenligne med undersøgelser fra tidligere projekter.

Forsøgsbeskrivelse:
Kornstørrelsen måles ved laserdiffraktion. Den tørre aske kommes i apparatet og resultatet aflæses på den tilhørende computer.

Der er til dette forsøg ikke uddelt forsøgsbeskrivelse, men blot udført en demonstration af forsøget af en til projektet tilknyttet laborant.

6.1.3 pH og ledningsevne

For beton er pH-værdien vigtig, da de calciumforbindelser, der dannes under hærdningen, er stabile ved højt pH og nedbrydes ved lavt pH. En tilsætning af et surt stof, vil derfor bringe betonen i ubalance og reducere styrken. [Miljøstyrelsen nr. 38 (2006)]

Forsøgsbeskrivelse:
Til målingen benyttes kombinationsselektrode i forbindelse med et pH-meter. Asken eller den knuste mørtel opløses i demineraliseret vand og stilles på rystebord i en time, hvorefter pH og ledningsevnen måles.

Forsøgsbeskrivelse ses i bilag A.1.

Usikkerheder:
Apparatet, der anvendes til målingen, har en nøjagtighed på 0,05 pH-enheder. Ved måling af pH-værdier for den hærdede mørtel, gjorde en af laboranterne opmærksom på, at de fornyligt havde opdaget, at apparatet havde problemer med målinger af høje pH-værdier og havde et ukendt max. punkt omkring 12,5. Den højest målte pH-værdi i dette projekt var dog 12,55 og da de resterende værdier lå lavere, antages det at den maksimale værdi ikke er nået og at målingerne er valide.

6.1.4 Glødetab

Askens indhold af organisk materiale svarer stort set til det glødetab, der sker ved 550 °C. Dette organiske materiale vil efter betonens hærdning rådne væk og efterlade lufthuller, der kan påvirke betonens styrke, hvorfor denne mængde af organisk materiale er vigtig at fastlægge.

Forsøgsbeskrivelse:
Forsøget udføres med 3 prøver. De 3 digeler afvejes, hvorefter der opfyldes aske og de 3 prøver vejes samlet, inden de stilles i en muffelovn. Prøverne står i ovnen ved 550 °C i 30 min. (1 time, hvis ovnen er kold), hvorefter de køler af i eksikator og vejes igen.

Forsøgsbeskrivelse ses i bilag A.1.

6.1.5 Vandindhold

Askens vandindhold måles, for at vurdere om vandmængden ved erstatning med sand eller cement, skal øges eller reduceres, for at opnå samme v/c- eller v/p-forhold som ved referenceblandingen.

Forsøgsbeskrivelse:
Der fyldes aske i tre bægerglas, som vejes og stilles til tørring i varmeskab ved 105 °C natten over. Prøverne vejes efter afkøling og vandindholdet udregnes ud fra de to vejninger. Forsøgsbeskrivelse ses i bilag A.1.

6.1.6 Vandopløselighed

Der undersøges de vandopløselige stoffer, der udvaskes af asken.

Forsøgsbeskrivelse:
100,00 g tørret aske afvejes og kommes i en 1L plastikflaske med låg. Der tilsættes 500,00 mL destilleret vand, hvorefter prøven rystes og henstilles til bundfældning.

Et filterpapir vejes og sættes i en tragt over et måleglas. Væsken hældes over i filterpapiret. Der tilsættes igen 500 mL destilleret vand til asken, prøven omrystes og henstilles. Væsken hældes over i det samme filter og der tilsættes igen 500 mL destilleret vand til asken og prøven omrystes. Hele prøven hældes over i filteret og stilles til afdrypning.

Når asken er næsten tør, stilles filteret med asken i varmeskab ved 105 °C natten over. Asken og filteret vejes og vægten noteres.

Forsøgsbeskrivelse ses i bilag A.1.

6.1.7 Oplukning

Der udføres en oplukning af asken iht. [DS/EN 259], for at få et overblik over de syreopløselige metaller, den indeholder.

Forsøgsbeskrivelse:
1,00 g tørret aske afvejes og kommes i et autoklaveglas med skruelåg, hvorefter der tilsættes 20,00 mL halvkoncentreret HNO_3. Prøverne stilles i autoklaven ved 200 kPa i 30 minutter. Flaskerne afkøles derefter til stuetemperatur og filtreres med sug gennem et 0,45 μm filter. Autoklaveflasken skylles med 3 gange destilleret vand, hvor filtreret skal suge tør mellem hvert skyl. Filtratet hældes i en 100,00 mL målekolbe og der tilsættes destilleret vand. Væsken hældes pa en 20 mL plast-vials og gemmes til AAS.

Forsøgsbeskrivelse ses i bilag A.1.

6.1.8 Vandopløselige anioner

Der findes indholdet af vandopløselige anioner

Forsøgsbeskrivelse:
10g tørret aske afvejes og kommes i 100 mL plastikflasker. Der tilsættes 50 mL destilleret vand, hvorefter prøven stilles på rystebord natten over. Prøven filtreres med sprøjtefilter og gemmes til ionchromotograf og AAS.

Forsøgsbeskrivelse ses i bilag A.1.

6.2 Mørtelens fysiske egenskaber

Gennem en række forsøg er mørtelens fysiske egenskaber undersøgt. På den våde mørtel testes afbindingstid og sætmål og på den hærdede mørtel testes trykstyrke, porøsitet/densitet og kapillarsugning.

6.2.1 Blanding og støbning af mørtelprøver

Alle mørtelprøver blandes efter en referencerecept jf. [DS/EN 196 − 1], hvor enten cement eller sand erstattes med slamaske. I recepter med fosfor, redureres de øvrige delmaterialer ikke, men der opløses i stedet de respektive mængder ADP i blandevandet. Mængderne af tilsat ADP er valgt til at svare til de mængder af fosfor, der vil være i de aske-indeholdende recepter jf. resultaterne fra oplukningen af asken. Recepterne er i resten af rapporten angivet med et bogstav jf. tabel 6.2.1, for at lette læsning og minimere tekst i tabellerne.

(B) =	5%	cementerstatning	=	12% af 5% af 450g	=	2,7g fosfor (ADP)	= (E)
(C) =	10%	sanderstatning	=	12% af 10% af 1350g	=	16,2g fosfor (ADP)	= (F)
(D) =	15%	sanderstatning	=	12% af 15% af 1350g	=	24,3g fosfor (ADP)	= (G)

I tabel 6.2.1 ses mængden af delmaterialer for hver af de syv recepter, hvor (A) er referenceprøven uden tilsat aske eller fosfor. Der er i recepterne, hvor sand er erstattet med aske, tilføjet ekstra vand, for at opnå en acceptabel konsistens.

Recept	**Cement [g]**	**Vand [g]**	**Sand [g]**	**Aske [g]**	**ADP [g]**
(A)	450,0	225,0	1350,0	0,0	0,0
(B)	427,5	225,0	1350,0	22,5	0,0
(C)	450,0	250,0	1215,0	135,0	0,0
(D)	450,0	275,0	1147,5	202,5	0,0
(E)	450,0	225,0	1350,0	0,0	2,7
(F)	450,0	225,0	1350,0	0,0	16,2
(G)	450,0	225,0	1350,0	0,0	24,3

Tabel 6.2.1: Oversigt over mørtelrecepter.

6.2.2 Sætmål

Sætmålet udføres for at kunne sammenligne fastheden af de forskellige mørtelrecepter og blandinger. For rigtigt at kunne sammenligne forskellige mørtelprøver, bør sætmålet være meget ens, for dem alle, da både afbindingstid og styrke kan påvirkes af det v/c-forhold, der også er det, der påvirker mørtelens konsistens.

Forsøgsbeskrivelse:
Der fyldes 2,5 cm friskblandet mørtel i kegleformen (lille) og der stampes 20 gange med det dertil hørende instrument. Kegleformen fyldes op, der stampes igen 20 gange og overskydende mørtel "skæres"af med savende bevægelse af afretningsværktøjet. Der fjernes evt. vand, som er løbet ud under keglen, hvorefter denne fjernes og bordet droppes med håndsving 25 gange på 15 sek. Flydesætmålet måles som den udflydte betons diameter.

Forsøgsbeskrivelse ses i bilag A.2

6.2.3 Afbindingstid

Formålet med forsøget er at bestemme afbindingstiden for de enkelte mørtelblandinger. Ved forsøget dannes der et billede af mørtelens hærdeforløb, hvilket er interessant for både bearbejdelighed og styrkeudvikling.

Forsøgsbeskrivelse:
Der fyldes 40 mm mørtel i et plastikbæger, som stilles i Vicatronic-apparatet. Testen sættes igang, hvormed maskinen automatisk dropper en nål i den hærdende mørtel og registrerer penetrationsdybden med et givent interval. Efter 90 målinger med, i dette tilfælde, et interval på 10 min. udskrives testresultaterne. Der registreres følgende tre testresultater til diskussion:

- "Ingen ændring": Tiden for den første måling forskellig fra 0.

- "Initial afbindingstid: Tiden for den første måling, hvor det efterfølgende tal er forskellig fra 0.

- "Afluttende afbindingstid": Tiden for målingen, hvor de efterfølgende målinger er relativt stabile.

Der er til dette forsøg ikke uddelt forsøgsbeskrivelse, men blot udført en demonstration af forsøget af en til projektet tilknyttet laborant.

Usikkerheder:
Da der i dette projekt er anvendt et Vicatronic-apparat, der automatisk udfører hele forsøget, er fejlkilderne, som den menneskelige operatør altid medfører i et forsøg, helt undgået. Apparatet sikrer at nålen droppes ensartet hver eneste gang og tiden imellem hvert enkelt drop, vil ligeledes være mere præcis ved at det gøres automatisk.

Ved aflæsning af data opstår dog usikkerheder, idet tiderne for de førnævnte tre testresultater, vurderes manuelt. Ved "Ingen ændring"og "Initial afbindingstid"vil der i de fleste forsøg ikke være tvivl, men ved "Afluttende afbindingstid"vil niveau-forskelle i prøvens overflade, medføre små

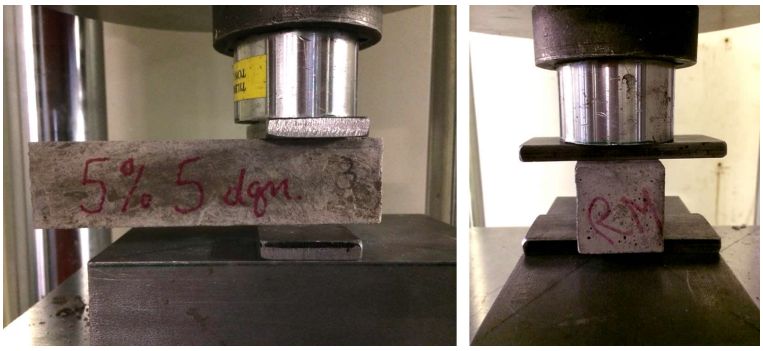
variationer i målingerne og det er op til testens udfører at vurdere, hvornår ændringerne skyldes den fortsatte afbinding og hvornår de skyldes niveau-forskel efter færdig afbinding. Derfor er alle aflæsninger markeret i rådata i appendix B.3, så det er let for læseren at genfinde de anvendte data.

6.2.4 Trykstyrkemåling

Trykstyrkemålingen af mørtelprøverne sker iht. [DS/EN 196 − 1]. For hver prøve er der støbt 3 mørtelprismer, som hver trykkes til brud i hver af prismens ender, således at der fås 6 trykstyrker pr. prøve. Der bestemmes et gennemsnit at disse 6 resultater, der præsenteres som prøvens endelige trykstyrke. Er der enkelte del-resultater, der afviger mere end 10% fra det først fundne gennemsnit, fjernes tallet og et nyt gennemsnit udregnes som værende det endelige resultat. Er der flere end 1 tal, der afviger mere end de acceptable 10%, må støbningen antages at være inhomogen, hvorfor denne kasseres og der må støbes et nyt sæt.

Forsøgsbeskrivelse:
Styrkeprøvningen sker i Toni-testapparatet, hvor prøven placeres som vist på figur 6.2.1. Prøven trykkes til brud og trykstyrken noteres. Prøverne trykkes i hver ende, således at der fås 2 trykstyrker pr. prisme.

Der er til dette forsøg ikke uddelt forsøgsbeskrivelse, men blot udført en demonstration af forsøget af en til projektet tilknyttet laborant.



Figur 6.2.1: Forsøgsopstilling i Tony-apparat for trykstyrkeforsøg.

6.2.5 Porøsitet/Densitet

Ved bestemmelse af betonens porøsitet, findes rumfanget af de åbne og lukkede porer. Porøsiteten er især vigtig, da denne har indflydelse på betonens trykstyrke.

Forsøgsbeskrivelse:
Porøsitet og densitet kan bestemmes ved samme forsøg, hvor hærdede og tørrede mørtelprøver, som udgangspunkt vejes og måles. Herefter sættes prøverne i en eksikator, hvori der over en periode på 4 timer skabes et vacuum. Prøverne tilføres vand, stadig i vacuum og står under vand i 1 time, således at vandet kan suges ind i hele prøven. Når prøven er vandmættet og dermed ikke længere indeholder luft, vejes denne først over og derefter under vand. Porøsiteten og densiteten

kan så udregnes ved brug af formlerne fra afsnit 5.1.2.

Forsøgsbeskrivelse ses i bilag A.2.

6.2.6 Kapillarsugning

Kapillarsugningen bestemmes, for at undersøge hvor meget vand, den hærdede beton kan opsuge samt den hastighed, vandet opsuges med.

Forsøgsbeskrivelse:
Kapillarsugning sker på hærdede og tørrede mørtelprøver, der som udgangspunkt vejes og arealet af endefladen måles. Prøven stilles på metal afstandsstænger i en bakke med demineraliseret vand, således at kun prøvens endeflade er dækket med vand. Prøven vil opsuge vand gennem den udsatte flade og vejes efter givne intervaller, hvor sidste vejning sker efter 4 timer.

Forsøgsbeskrivelse ses i bilag A.2.

Usikkerheder:
Ved kapillarsugning anvendes et areal, til bestemmelse af de endelige resultater. Dette areal er udregnet som arealet af mørtelprøvens ende, men da vandet står 2-4 mm op af prøvens langsider, for at sikre at hele endearealet er dækket, er dette areal teknisk set en smule større end angivet. For at undgå dette ekstra areal, tilføres ofte et lag epoxy på prøvernes langsider, inden førsøget, da dette forsegler overfladen. Desuden sikrer epoxyen også mod at det allerede opsugede vand fordamper.

Der er i dette projekt ikke anvendt epoxy, men da prøverne er små og forsøget kun varer 4 timer, antages det at fejlkilderne her fra er små nok til at negligere.

7 Resultater og diskussion

7.1 Screeningsproces

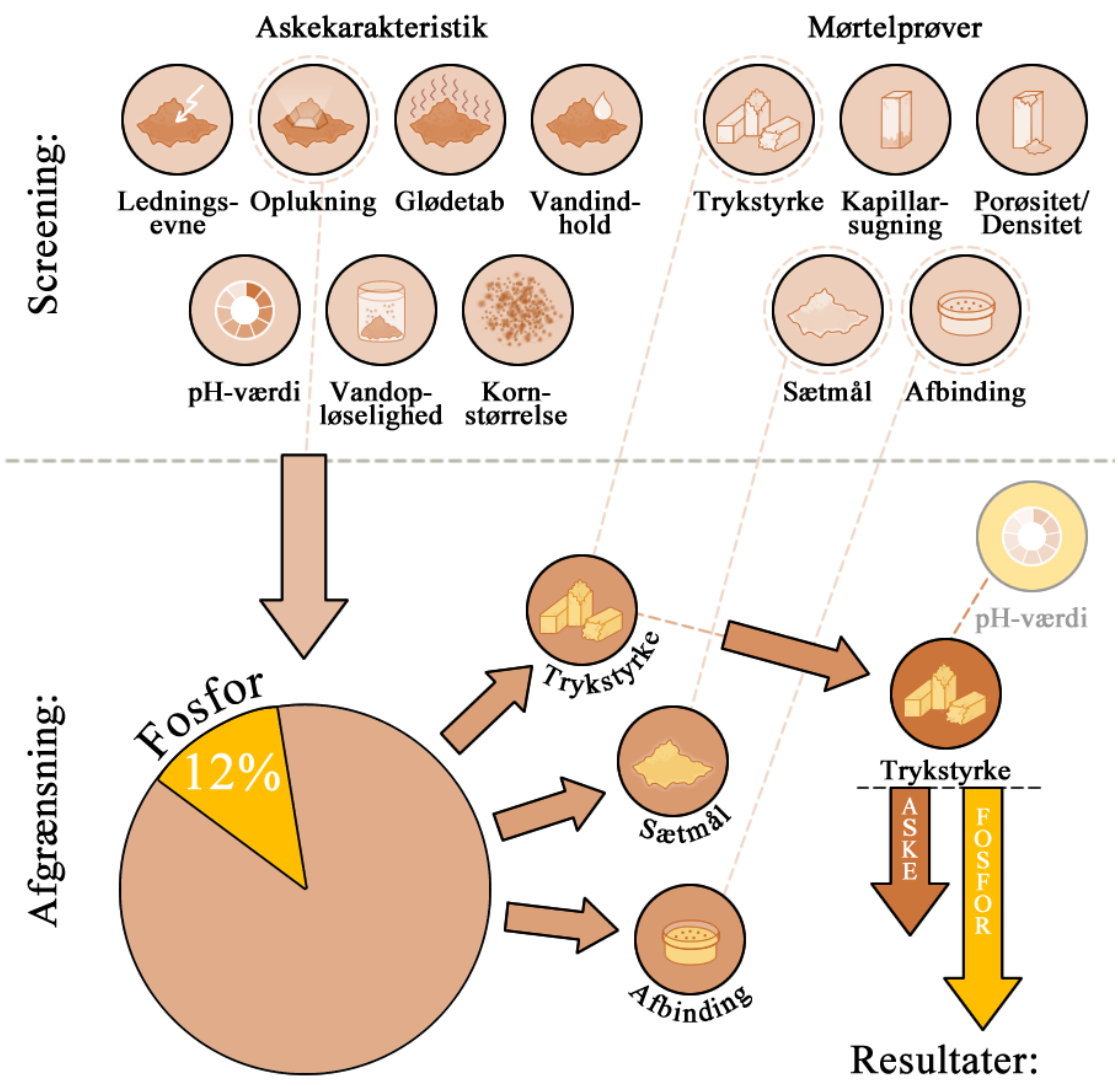
I projektets tidlige fase, blev der udført en række forskellige forsøg og analyser af asken og de aske-indeholdende mørtelprøver, for at få opbygget et videngrundlag omkring den pågældende aske. Samtidig gav det mulighed for at identificere interessante problemstillinger til videre studier i projektets afsluttende fase. Denne screeningsproces er illustreret i flowdiagrammet på figur 7.1.1.

Efter screeningsprocessen, blev de fundne resultater præsenteret for de andre grupper, der deltager i klyngeprojektet, og disse resultater blev diskuteret kollektivt, som hjælp til de enkelte grupper med at finde frem til, interessante fokusområder og afgrænsning. Præsentationen af resultaterne foregik med en poster, som er vedlagt i A4-format i bilag B.4

Ved den indledende askekarakteristik for dette projekt, blev der ved oplukning af asken fra SCA, fundet et fosfor-indhold på 12% ± 3,85%, hvilket er over dobbelt så stort, som de <5% (dog for P_2O_5 i mangel på bedre sammenligningsgrundlag), der stilles til den i dag godkendte flyveaske i [DS/EN 450−1]. Også indholdet af tungmetaller oversteg kravene for flyveaske, men da fosfor, som tidligere nævnt, både er en forsvindende ressource, et dyrt importprodukt og et værdifuldt gødemiddel, blev det fundet interessant at fokusere på mulighederne og konsekvenserne ved udvaskning af denne fosfor til genanvendelse.

DTU BYG er allerede igang med at udvikle en metode til udvaskning og opsamling af dette fosfor, med projektet ZeroWaste Byg, og da det ikke var muligt at anvende præcis denne metode i projektet, blev udvaskning af asken fravalgt. Der er tidligere udført projekter med udvaskning af fosfor, hvorfor resultaterne fra dette projekt ikke kun sammenlignes med værdierne fra den godkendte kulflyveaske, men også med værdier fra det tidligere projekt [Rosenmai & Svendsen (2012)], som ligeledes fokuserer på fosforens indflydelse på mørtelens egenskaber. Der er i projektet [Rosenmai & Svendsen (2012)] foretaget en udvaskning med syren HNO_3, hvorefter der er foretaget oplukning af asken, støbt og trykstyrketestet mørtelprøver med både den vaskede og uvaskede aske fra to spildevandsanlæg, Avedøre og Lundtofte.

For at udvaskningen af fosfor og tungmetaller kan betale sig, burde det ikke påvirke mørtelens egenskaber negativt, at tungmetaller og fosfor fjernes. Alternativt er samme teori derfor i dette projekt forsøgt eftervist ved, i stedet for at fjerne forfor fra asken, så at tilføje fosfor til referencerecepten, for dermed at opnå et negativt resultat. Hvis det kunne eftervises at fosfor påvirker mørtelens egenskaber negativt, vil det være yderligere fordelagtigt at udvaske denne af asken.



Figur 7.1.1: Oversigt over screeningsproces.

7.2 Askekarakteristik

Asken er blevet karakteriseret, for at kunne determinere, om denne kan overholde de krav, der i dag er opstillet for flyveaske, og som det er antaget i dette projekt, at slamaske også ville skulle overholde.

Da asken opfugtes fra spildevandscenterets side for at minimere fygning ved transport og udendørs opbevaring, blev denne stillet til tørring ved 50 °C, inden ringknusning. Dette gøres, for at sikre et så lavt vandindhold i asken som muligt, således at askens vandindhold ikke vil påvirke betonens v/c-forhold (se 5.1.1, Væsker) og de forholdsvis lave temperaturer, vil ikke have påvirket askens opbygning.

I de fleste af analyserne og forsøgene, overskrider slamasken dog kravene, men resultaterne kan så i stedet være med til at vise, hvor det vil være nødvendigt at forbedre asken, for at kunne få den godkendt. I tabel 7.2.1 er alle sammenlignelige resultater fra askekarakteristikken opstillet i

form af middelværdier og standardafvigelser. Til sammenligning er opstillet en tilsvarende askekarakteristik for den udvaskede slamaske fra projektet [Rosenmai & Svendsen (2012)] og for en godkendt kulflyveaske fra betonlaboratoriet på DTU. Askekarakteristikken for kulflyveasken er udført af laborant-teamet til projektet, da så direkte værdier til sammenligning, ikke var til at finde andet steds. De enkelte resultater er desuden kort præsenteret og diskuteret i de følgende afsnit.

Da asken havde ligget til opbevaring på udendørs depot uden overdækning, var der i asken ved afhentningen både sten og plantevækster i forskellige størrelser. For at undgå at resultaterne fra de forsøg, hvor asken indgik, blev påvirket af disse materialer, blev asken sigtet igennem en 1 mm sigte.

Rådata for askekarakteristikken er at finde i bilag B.2.

Forsøg	**Godkendt Kulflyveaske**			**SCA slamaske, syrevasket***			**SCA slamaske fra depot**		
pH-værdi: [-]	12,42	±	0,01	4,65	±	0,03	**7,25**	±	**0,02**
Ledningsevne: [mS/cm]	7,29	±	0,09	2,74	±	0,04	**1,71**	±	**0,15**
Glødetab: [%]	1,26	±	0,01	2,62	±	0,08	**1,11**	±	**0,02**
Vandopløselighed:	1,15	±	-	-	±	-	**1,62**	±	**-**
Oplukning:									
Al [g/kg]	25,0	±	0,33	24,1	±	17,36	**34,5**	±	**8,39**
Cd [g/kg]	0,0004	±	0,00005	0,002	±	0,001	**0,003**	±	**0,001**
Cr [g/kg]	0,054	±	0,003	0,07	±	0,02	**0,073**	±	**0,015**
Cu [g/kg]	0,089	±	0,002	0,35	±	0,06	**0,888**	±	**0,188**
Ni [g/kg]	0,027	±	0,001	0,04	±	0,02	**0,006**	±	**0,008**
Pb [g/kg]	0,052	±	0,004	0,08	±	0,03	**0,129**	±	**27,3**
Zn [g/kg]	0,068	±	0,001	1,34	±	0,5	**3,13**	±	**0,758**
Na [g/kg]	1,402	±	0,007	-	±	-	**2,72**	±	**0,53**
K [g/kg]	0,022	±	0,001	-	±	-	**6,100**	±	**1,301**
P [g/kg]	2,20	±	0,09	61,3	±	10,6	**121**	±	**38,7**
Mg [g/kg]	6,25	±	0,29	-	±	-	**14,61**	±	**4,60**

* Resultater for slamaske vasket i HNO_3 fra [Rosenmai & Svendsen (2012), Tabel 4.2 – 3, s. 34].

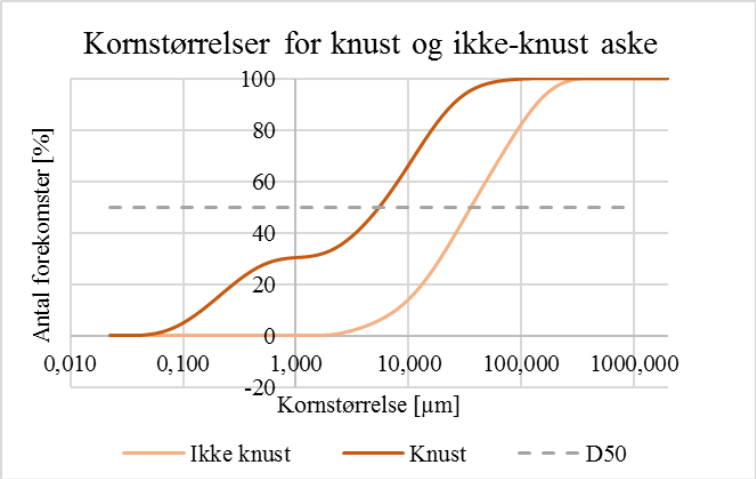
** Kornstørrelse for slamaske efter ringknusning.

Tabel 7.2.1: Samlet overblik over resultater fra askekarakteristik, sammenlignet med værdier for godkendt kulflyveaske og syrevasket slamaske fra [Rosenmai & Svendsen (2012)].

7.2.1 Kornstørrelse

Askens kornstørrelse er målt både før og efter ringknusning. Da det i tidligere projekter er vist, at ringknusning er en fordel for materialets pakningsevne og trykstyrke, vil der ikke sættes fokus på dette i denne rapport. Resultatet kan dog stadig anvendes, til at tjekke at ringknusningen har haft den ønskede effekt ved sammenligning med resultater fra tidligere rapporter. Desuden er der stillet krav til kornstørrelsen for den godkendte flyveaske, hvilke det antages at slamasken også skal overholde.

Den ikke knuste slamaske har en D50 kornstørrelse på 35,96 ± 0,421μm og den knuste aske har en D50 kornstørrelse på 5,52 ± 0,053μm, som illustreret på figur 7.2.1 ved indtegning af linje for 50% fraktilen. På denne figur ses forskydningen af de to grafer tydeligt. Der findes i det tidligere projekt [Rosenmai & Svendsen (2012)] ikke resultater fra en analyse af kornstørrelsen, hvorfor det ikke er muligt at sikre, at knusningen har haft samme effekt, som på den aske, der i det tidligere projekt blev undersøgt for effekt af knusningen. Da forsøgene fra det tidligere projekt også er udført på DTU i samme betonlaboratorie, må det antages at samme ringknusningsapparat er blevet brugt og effekten af denne knusning kan antages at være ens.



Figur 7.2.1: Fordeling af kornstørrelser for knust og ikke knust slamaske.

Sammenlignes der med kravet fra [DS/EN 450 – 1], angivet i tabel 5.1.1, kigges der på mængden af korn, der er større end 0,045 mm (45 μm). Denne grænse er markeret i tabellen med rådata i afsnit B.2 og de udregnede værdier er opstillet i tabel 7.2.2, hvor det ses at den ikke knuste aske vil overholde kravet for Kategori N og efter knusning vil asken overholde Kategori S.

	Værdi ved 45 μm [%]	**Mængde > 45 μm** [%]	**Kategori N** [< 40,0%]	**Kategori S** [< 12,0%]
Ikke knust	57,2	42,8	X	
Knust	97,3	2,7		X

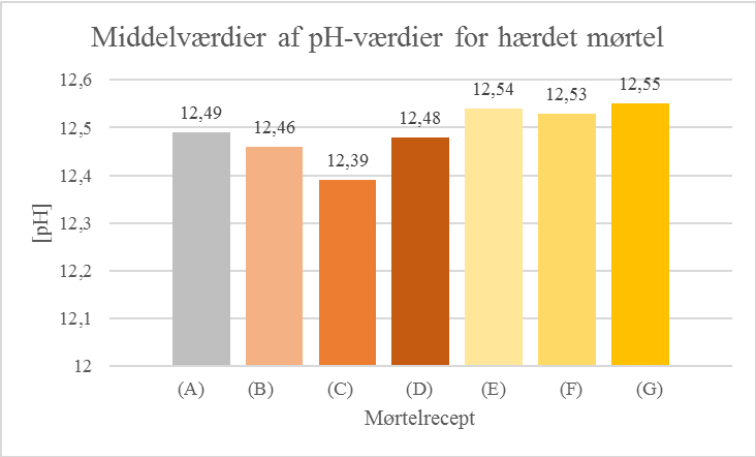
Tabel 7.2.2: Kornstørrelse for slamaske, sammenlignet med krav fra [DS/EN 450 – 1].

7.2.2 pH og ledningsevne

Askens pH-værdi er bestemt til værende 7,25 ± 0,02, hvilket er en smule basisk, men dog kun 0,3 over de 7, der regnes som værende pH-neutral. Da en sund færdigstøbt beton gerne skulle have en pH-værdi på omkring 12 – 14, kan askens lave pH virke til ugunst for betonens stærkt basiske miljø. I betoner uden armering kan en lavere pH værdi accepteres, da den høje pH især er med til at beskytte det indstøbte stål mod korrossion. Det ses desuden i tabel 7.2.1 at den syrevaskede

aske fra det tidligere projekt ([Rosenmai & Svendsen (2012)]), har en pH-værdi på bare 4,65 ± 0,03. Denne værdi ligger nede omkring pH-værdien for det i dette projekt tilsatte ADP og er så surt, at det kunne have en negativ effekt på den hærdede mørtel. Desuden skal det nævnes, at slamasken fra det tidligere projekt, havde en start-pH på 10,37, hvilket er 30% højere end den i dette projekt anvendte aske, på trods af at disse begge kommer fra SCA. Det ville derfor kunne forventes at asken fra dette projekt, ville ende på en endnu lavere pH og dermed formodes at have en endnu mere negativ effekt på pH-værdien for den hærdede mørtel efter syreudvaskning af tungmetaller og fosfor.

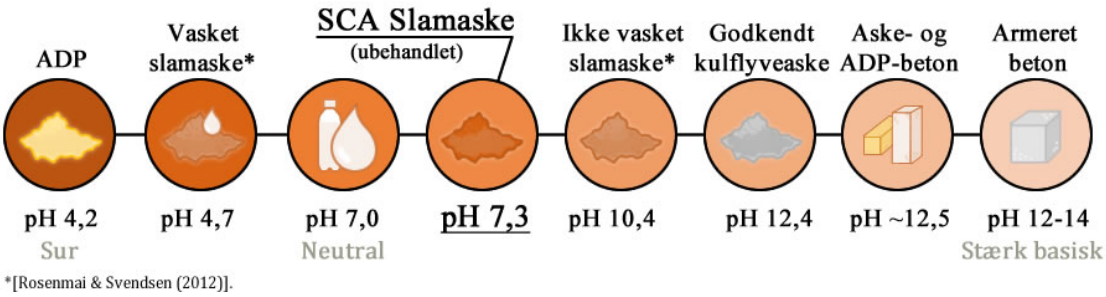
Da både den tilsatte aske og det tilsatte ADP har lavere pH-værdier end referencemørtelen burde have, var det interessant at undersøge pH-værdierne for den hærdede mørtel, for at se om eventuelle ændringer i mørtelens egenskaber, kunne skyldes en ændring i pH. Ved et lavt pH vil de vigtige calciumforbindelser nedbrydes, hvilket kan være med til at reducere styrken. Efter at have støbt mørtelprøver til trykstyrkeforsøg, var det muligt at knuse de hærdede prøver i ringknuseren og bestemme pH-værdierne på samme måde som for asken.



Figur 7.2.2: pH-værdi for de hærdede mørtelprøver.

Som det ses i tabel 7.2.2 har hverken slamasken eller den tilsatte fosfor nogen markant indflydelse på pH-værdien for den hærdede mørtel. Tværtimod ser det ud til at den sureste tilsætning giver den højeste pH-værdi. Da det tilsatte ADP har en pH-værdi på 4,2, hvilket er meget lavere end slamaskens 7,25, forventedes det inden forsøget at den aske-indeholdende mørtel havde en lavere pH end referenceprøven og at pH-værdien for den ADP-indeholdende mørtel var lavere endnu. Resultaterne har dog vist, at forskellen på den højeste og den laveste målte pH-værdi for de syv færdigstøbte recepter, ikke er mere end 1,3%. Udregnes mængderne af tilsatte stoffer, udgør asken i recept (D) blot 10% af den totale blanding og ADP i recept (G) udgør blot 0,1%, så de forholdsvis små koncentrationer af de sure stoffer er, ud fra dette forsøg at bedømme, ikke nok til at påvirke pH-værdien for den hærdede mørtel.

Det iblandede fosfor antages på baggrund af dette, ikke at have nogen indflydelse på pH-værdien for den færdige beton, hvorfor det heller ikke vil have en indflydelse, at fjerne fosforen fra slamasken. Ydermere har undersøgelsen vist, at asken, uden videre behandling, heller ikke har indflydelse på pH-værdien for den hærdede mørtel.



Figur 7.2.3: pH-værdi for den anvendte slamaske, opstillet til sammenligning.

Ledningsevnen er fundet til 1,71 mS/cm ± 0,15, hvilket er 76,5% lavere end for den godkendte kulflyveaske. Jo højere ledningsevne, desto flere negativt ladede ioner (anioner) er der i materialet. Denne ledningsevne hænger derfor sammen med indholdet af let opløselige salte i asken. Da der i dette projekt ikke udvaskes salte og lign. og der ikke er bestemt indhold af vandopløselige anioner for kulflyveasken til sammenligning, fokuseres der ikke på ledningsevnen, hvorfor emnet ikke diskuteres yderligere.

7.2.3 Glødetab

Resultatet for glødetabet i asken ses på figur 7.2.1. Glødetabet ligger på 1,11% ± 0,02%, hvilket er 77,8% under den tilladte grænse for flyveaske i Kategori A jf. tabel 5.1.2. Indholdet af organisk materiale er derfor ikke et problem i den anvendte slamaske og kræver ikke videre opmærksomhed i den retning. Dog er det interessant, at sammenligne glødetabet fra SCA asken i dette projekt, som kommer fra udendørs depot, med SCA asken fra [Huntley (2014)], som kommer direkte fra ovn, da den udendørs opbevaring kan have resulteret i et øget indhold af organisk materiale i form af plantevækster, bakterier og lign. En telefonsamtale med Avedøre Spildevandsanlæg pr. 13.02.2014 kl. 13.00, bekræftede desuden, at asken opbevares udendørs under åben himmel og at der vokser "ting og sager"i/på asken.

Glødetabet for asken fra ovn er fundet til 1,19% ± 0,023%, hvilket er blot 0,08% højere end fra depot.

På baggrund af disse resultater, har den udendørs opbevaring ikke nogen betydelig indflydelse på askens indhold af organiske stoffer.

7.2.4 Vandindhold

Askens vandindhold er bestemt til værende 0,9% ± 0,1%, hvilket er meget lavt. Dette skyldes at asken havde stået til tørring ved 50 °C i ca. 1 uge, direkte efter modtagelse af asken. Dette betyder at asken allerede var tørret inden udførelsen af dette forsøg og det er derfor ikke til at vide, hvordan vandindholdet har været direkte fra SCA.

7.2.5 Vandopløselighed

Vandopløseligheden i SCA slamasken fra depot er bestemt til 1,62%, hvilket kun er 0,47% større end de 1,15%, fundet for den godkendte kulflyveaske. Mere interessant er det at sammenligne med SCA slamasken fra ovn, fra projektet [Huntley (2014)]. Her er fundet en vandopløselighed på 3,05%, hvilket indikerer et næsten dobbelt så stort indhold af vandopløselige kemiske forbindelser end i SCA slamasken fra depot.

Denne forskel kan skyldes, at asken fra dette projekt (depot) har ligget til opbevaring under åben himmel i et ukendt stykke tid, hvormed den må forventes at være blevet skyllet igennem flere gange af regn. Disse gennemskylninger har, ud fra resultaterne at bedømme, opløst størstedelen af de vandopløselige forbindelser.

Det har ikke været muligt at finde et direkte krav til sammenligning af resultatet fra dette forsøg, men ved sammenligning med den godkendte flyveaske, må denne nedbørs-gennemskylning være en fordel, da vandopløseligheden for slamasken ligger tættere på den godkendte aske, efter udendørs opbevaring.

7.2.6 Oplukning

Oplukningen af asken sker med Massespektrometri, hvor koncentrationen af grundstoffer registreres vha. lysbølger og reflektering af disse. Resultaterne fra denne oplukning ses i tabel 7.2.1.

Det var dette forsøg, der lå til grund for det valgte fokusområde, pga. det fundne indhold af fosfor på hele 12,1%. Det har ikke været muligt at finde krav til sammenligning for hvert enkelt stof, men i tabel 7.2.3 er opstillet dem, det har været muligt at finde. Værdierne opstilles som middelværdier ± spredning i %-vægt, da størstedelen af de fundne krav er angivet i denne enhed. Til sammenligning er der i tabellen også opstillet resultater for den syrevaskede aske fra [Rosenmai & Svendsen (2012)], for kort at undersøge syrevaskens virkning og tilstrækkelighed.

	Uvasket slamaske	**Vasket slamaske***	**Krav**	**Overholdt?**	
	[%-vægt]	**[%-vægt]**	**[%-vægt]**	**Uvasket**	**Vasket**
Cd	0,0003	0,0002	0,00005	÷	÷
Cr	0,0073	0,007	0,0500	√	√
Cu	0,0888	0,035	0,0500	÷	√
Ni	0,0006	0,004	0,0030	(√)	÷
Pb	0,0129	0,008	0,0040	÷	÷
Zn	0,313	0,134	0,0500	÷	÷

* resultater fra [Rosenmai & Svendsen (2012)]

Tabel 7.2.3: Resultater fra oplukninger til sammenligning med krav fra [DS/EN 450 − 1] og [Miljøstyrelsen (2010)].

I resultatet for oplukning af SCA slamasken fra dette projekt, var koncentrationen af Nikkel (Ni) meget svingende (som det også fremgår af spredningen i tabel 7.2.1) og der er derfor tvivl om troværdigheden af dette resultat, hvorfor denne √ er i parantes.

Som det ses i tabel 7.2.3, overskrider størstedelen af slamaskens tungmetalindhold, de opstillede krav. Ved en udvaskning med HNO_3, vil det jf. resultaterne fra [Rosenmai & Svendsen (2012)]

være muligt at nedbringe få af tungmetallet så meget, at kravene kan overholdes. På trods af at alle koncentrationerne nedbringes, mangler der stadig yderligere nedbringning, for at kunne overholde alle kravene.

Det har ikke været muligt at finde et krav til indholdet af fosfor (P) i asken, men i [DS/EN 450 − 1] nævnes et krav til fosfat (P_2O_5), der skal være mindre end 5%-vægt. En grov sammenligning, ville være at antage, at askens indhold af P ville danne denne forbindelse med ilt (O) og dermed omskrive kravet til: < 10% P (hvilket ikke overholdes).

Grundet tvivl om lovligheden af denne omskrivning, sammenlignes i stedet blot med værdien for den godkendte kulflyveaske. I tabel 7.2.4 præsenteres forsøgsresultaterne som middelværdier ± spredning og sammenlignes ved den procentvise forskel, der er på resultaterne fra den godkendte kulflyveaske, for at kunne danne et komplet billede af, hvor slamasken befinder sig, ift. kulflyveasken.

	Kulflyveaske (KFA) [**%-vægt**]		**SCA Slamaske (SA)** [**%-vægt**]		**Forskel** [**SA % af KFA**]
Aluminium, (Al)	2,5 ±	0,03	3,4 ±	0,8	136%
Cadmium (Cd)	0,00004 ±	–	0,00030 ±	–	750%
Chrom (Cr)	0,0054 ±	0,0003	0,0073 ±	0,0015	135%
Kobber (Cu)	0,0089 ±	0,0002	0,0888 ±	0,0188	998%
Nikkel (Ni)	0,0027 ±	0,0001	0,0006 ±	0,0008	22%
Bly (Pb)	0,0052 ±	0,0004	0,0129 ±	0,0027	248%
Zink (Zn)	0,0068 ±	0,0001	0,3134 ±	0,0758	4609%
Natrium (Na)	0,1402 ±	0,0007	0,2719 ±	0,0529	194%
Kalium (K)	0,0022 ±	0,0001	0,6097 ±	0,1301	5914%
Fosfor (P)	0,2200 ±	0,009	12,1160 ±	3,8706	5507%
Magnesium (Mg)	0,6250 ±	0,029	1,461 ±	0,4600	234%

Tabel 7.2.4: Sammenligning af opluknings-resultater for slam- og kulflyveaske.

Som forventet er alle koncentrationerne fra oplukningen af slamasken højere end dem fra oplukningen af kulflyveasken. Indholdet af kobber, zink og fosfor er især højt i slamasken ifht. kulflyveasken og efter udvaskning vil zink-indholdet stadig være for højt jf. tabel 7.2.3.

Kalium-koncentrationen er også høj i slamasken, og da det er et vigtigt gødningsstof, kan dette med fordel også udvindes som fosforen. [Pedersen (2006)]

7.2.7 Vandopløselige anioner

De vandopløselige anioner er ikke bestemt for den godkendte kulflyveaske, men sammenlignes i stedet med SCA slamasken direkte fra ovn, for igen at undersøge indflydelsen af den udendørs opbevaring af slamasken fra dette projekt. Resultaterne for de asker er opstillet i tabel 7.2.5.

Der er i [DS/EN 450 − 1] opstillet et krav på maks. 9% chlorid-ioner, da et højt chlorid-indhold medvirker til korrossion af armering. Det lave indhold af chlorid i slamasken fra depot er derfor en

fordel. Som for vandopløseligheden, kan det lave chlor-indhold skyldes opbevaringen under åben himmel.

Det lave indhold af nitrat (NO_3) i askerne, skyldes at kvælstof ikke tilbageholdes i asken ved forbrænding, men i stedet frigives som frit kvælstof (N_2). [Pedersen (2006)]

	SCA Slamaske, ovn [mg/kg]	**SCA Slamaske, depot [mg/kg]**	**Forskel [depot % af ovn]**
Cl	2100 ± 48	26,1 ± 0,2	8046%
NO_3	8,64 ± 1,43	33,5 ± 0,5	388%
SO_4	9439 ± 387	8374 ± 164	88,7%

Tabel 7.2.5: Sammenligning af vandopløselige anioner i slamaske fra hhv. ovn og depot.

7.3 Mørtelens fysiske egenskaber

I dette projekt arbejdes der i forsøgene med mørtelprøver i stedet for betonprøver, da det jf. teoriafsnittet 5.1.2, er mørtelen, der bryder før tilslagene og mørtelen kan derfor antages at være dimensionsgivende mht. betonens endelige styrke. Der er igennem projektet blevet støbt i alt 45 mørtelprismer (ekskl. de resterende gruppers prismer, anvendt til sammenligning), hvoraf 27 stk. udelukkende blev anvendt i screeningsprocessen, 6 stk. blev brugt både i screeningsprocessen og i det videre forløb og de resterende 12 prismer blev støbt alene til brug den afsluttende del af projektet.

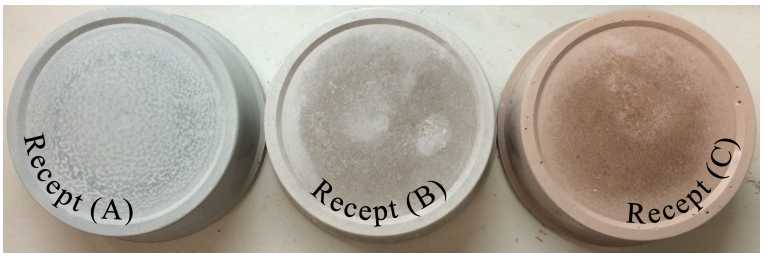
I det følgende angives mørtelblandingerne ved brug af recept-bogstaver jf. tabel 6.2.1, for at minimere teksten i tabellerne og i de forklarende afnsit.

Mørtelens fysiske egenskaber indgik også i screeningsprocessen, og efter at have valgt at fokusere på disse egenskaber i forbindelse med askens fosforindhold, var det muligt at anvende nogle af forsøgsresultaterne fra screeningsprocessen og udvide med flere relevante forsøg med de nye recepter ((D), (E), (F) og (G)).

Fra listen over problemstillinger i afsnit 5.2.1, var et af problemerne slamaskebetonens farve, som også blev observeret under støbningerne i screeningsprocessen. Farven er ikke noget, der vil blive ændret på, men det forsøges i stedet af ændre problemet til en fordel, igennem markedsføring af den brune beton. Farveforskellen mellem recepterne ses på figur 7.3.1.

Gennem projektet blev det observeret, at den brunlige farve falmer med tiden og for recept (B), hvor der kun blev erstattet 5% af cementen, er farveforskellen forholdsvis lille.

Rådata fra forsøgene for mørtelens fysiske egenskaber, er at finde i bilag B.3



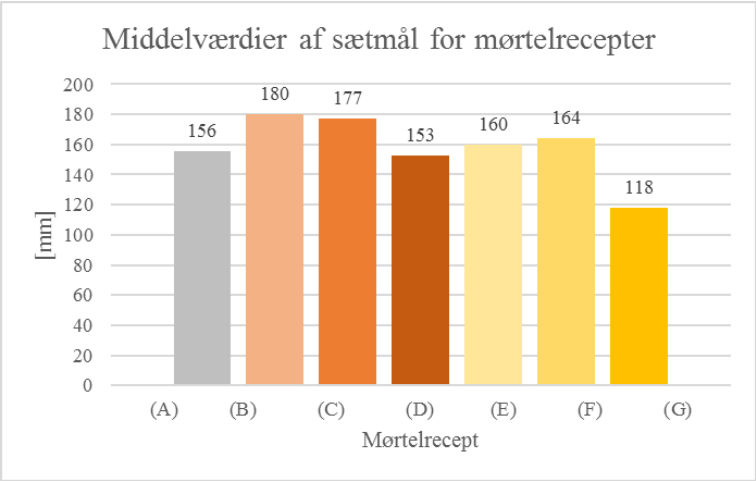
Figur 7.3.1: Sammenligning af farveafsmitning af hærdet mørtel.

7.3.1 Sætmål

For hver af de syv recepter er der udført flydesætmålsprøver, for at undersøge mørtelens konsistens. Da det ikke har været muligt at finde krav til sammenligning med det udførte mørtel-forsøg, med en mindre kegle end den, der anvendes til beton-sætmål, er sætmålene blot sammenlignet indbyrdes.

På figur 7.3.2 er sætmålene for de syv recepter opstillet til sammenligning. Det ses at sætmålet for (B) og (C) ligger tæt på trods af de 25 g ekstra vand, der er tilsat recept (C). Begge recepter ligger ca. 13% højere end (A). Recept (B) er ikke tilsat ekstra vand, hvilket indikerer at asken opsuger mindre vand end cementen, da der i denne recept er erstattet 5% af cementen med aske. For recept (D), hvor der er tilsat 50 g ekstra vand, er sætmålet lavere end for (C), på trods af fordoblingen af tilsat vand. Dette indikerer at asken opsuger mere vand end sandet. Ved en blanding som recept (D), hvor 15% sand erstattes med slamaske, vil den tilsatte mængde af ekstra vand resultere i et flydesæt mål, blot 3 mm mindre end for reference-recepten, (A).

Sætmålene for fosfor-recepterne (E) og (F), ses ud fra figur 7.3.2 at ligge ca. 4% højere end sætmålet, fundet for (A). Stigningen er ikke ligeså høj som for aske-recepterne, men alligevel nok til at der kan anes en tendens. Der ses bort fra resultatet for recept (D), da en ekstremt tidlig afbinding kan have haft indflydelse på sætmålet (se afsnit 7.3.1).



Figur 7.3.2: Sætmål for de 7 recepter.

7.3.2 Afbindingstid

Der er for hver blandingsrecept udført analyse af afbindingstiden og hærdeforløbet ved brug af Vicat-test iht. [DS/EN 196 − 3], for at undersøge om hhv. aske- eller fosfortilsætningen har en indflydelse på denne.

Der opstilles i dette afsnit skemaer med hhv. indledende og afsluttende afbindingstid. Jf. [DS/EN 450 − 1] må afbindingstiden for beton med flyveaske ikke overstige 2,25x afbindingstid af referenceprøven.

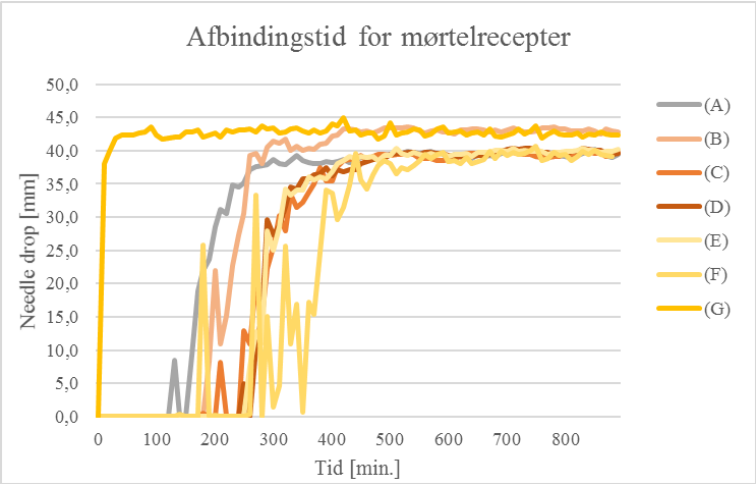
Recept	**Ingen ændring**	**Indledende afbindingstid**	**Afsluttende afbindingstid**
(A)	130	160	330
(B)	190	200	290
(C)	210	250	420
(D)	250	270	470
(E)	260	270	440
(F)	180	300	560
(G)	10	20	40

Tabel 7.3.1: Afbindingstid for mørtelrecepter.

Alle afbindingstiderne overholder kravene til flyveaske, der ud fra den afprøvede referencemørtel er:

$$2{,}25 \cdot 160min. = 360min. \tag{7.3.1}$$

Det ses dog at afbindingstiden stiger i takt med, at aske-mængden øges. Samme tendens ses for fosfor-mørtelen, men ved tilsætning af 24,3 g fosfor (ADP) i recept (G), falder afbindingstiden drastisk. Allerede efter 10 min. var mørtelen næsten færdighærdet og det samme var tilfældet ved støbning af mørtelprismerne med denne recept. Forskydningen af afbindingen for recept (G) ses tydeligt på figur 7.3.3. Denne pludselige ændring i afbindingstiden kan indikere, at den tilsatte mængde fosfor har resulteret i et vendepunkt for mørtelens afbindingstid, hvilket bl.a. kan skyldes ophævelsen af den retarderende effekt, gipsen i cementen har (da gipsen indeholder fosfor og en øget mængde måske ville kunne have indflydelse på stoffet), eller at det er gipsen, der ved tilsættelse af høje mængder fosfor, vil hærde før cementen. Der er dog ikke fundet tilstrækkeligt litteratur til bekræftelse af disse effekter og yderligere forsøg med et lavere interval af fosfor-tilsætning, ville måske kunne vise om et vendepunkt eksisterer.



Figur 7.3.3: Afbindingstider for de syv mørtelrecepter.

Sammenlignes aske- og fosfor-recepterne med referencemørtelen (A), ligger den indledende afbindingstid højere for de alternative mørtelrecepter, hvilket viser en tydelig tendens og kunne betyde at fosforen er skyld i den forlængede afbindingstid. Til sammenligning kigges der på afbindingstiden fra [Rosenmai & Svendsen (2012), s. 40], hvor der er udført afbindingsforsøg med den HNO_3 syrevaskede aske fra SCA. Resultatet for den syrevaskede aske er 266 min., hvilket ligger imellem recept (C) og (D) fra dette projekt og dermed ikke viser tegn på at udvaskning af fosforen vil reducere afbindingstiden.

Det fremgår ikke tydeligt, hvilket blandingsforhold, der er anvendt ved forsøget med den syrevaskede aske, hvorfor det ikke er muligt at anvende resultatet direkte til sammenligning. Er der blevet erstattet 5% cement med syrevasket aske (svarende til recept (B)), er en afbindingstid på 266 min. ikke en forbedring, hvorfor udvaskningen af fosfor ikke vil have haft en positiv effekt. Skulle der på den anden side have været erstattet 25% sand med syrevasket aske (> (D)), vil udvaskningen have fået den indledende afbindings tid ned under afbindingstiden for recepten, hvor 10% af sandet er erstattet med ubehandlet aske.

Ud fra det i dette projekt udførte forsøg alene, ser det ud til, at fosforen har en negativ indflydelse på mørtelens afbindingstid, men kombineret med uvisheden omkring resulatet fra [Rosenmai & Svendsen (2012)], kan det dog ikke bekræftes, at det er fosforen, der er skyld i den øgede afbindingstid.

7.3.3 Trykstyrketest

Da trykstyrken er en af de vigtigste egenskaber for beton, var det oplagt at fokusere på fosforens påvirkning af denne.

Der er for hver blandingsrecept udført trykstyrketests iht. [DS/EN 196 − 1]. I dette afsnit præsenteres middelværdier samt spredning for trykstyrkerne. Skemaer indeholdende de komplette forsøgsresultater samt støbningsskemaer for hver prismestøbning, er at finde i bilag B.3.

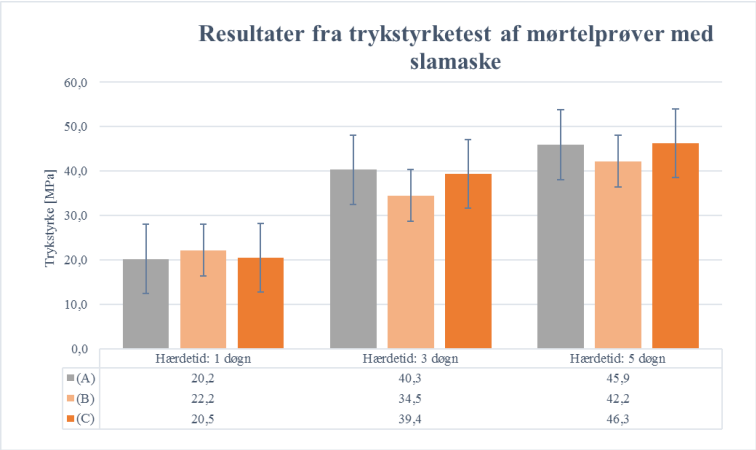
I screeningsprocessen blev der udført trykstyrketests for recept (A), (B) og (C) efter 1, 3 og 5

hærdedøgn. Trykstyrkerne for disse er opstillet i figur 7.3.4, hvor der efter 3 og 5 hærdedøgn ses en tydelig tendens for de to askekoncentrationer. Recept (B), der indeholder den mindste mængde aske, har en trykstyrke, der efter både 3 og 5 døgn, er den laveste af de tre recepter. Recept (B) har trykstyrker, der ligger på 34,5 MPa ± 5,37 efter 3 hærdedøgn og 42,2 MPa ± 2,4. Disse trykstyrker ligger 14% og 8% lavere end reference-recepten (A) efter hhv. 3 og 5 døgn.

Efter 3 hærdedøgn har recepten (C) opnået trykstyrker på 39,4 MPa ± 1,4 og 46,3 MPa ± 1,4 efter 5 hærdedøgn, hvilket er 2,2% lavere end (A) efter de 3 døgn og 0,9% højere efter 5 døgn. Denne forskel er forholdsvis lille og kan skyldes at mængden af cement ikke reduceres. Den lave trykstyrke for (B) skyldes højst sandsynligt den reducerede mængde af cement, da dette resulterer i et højere v/c-forhold.

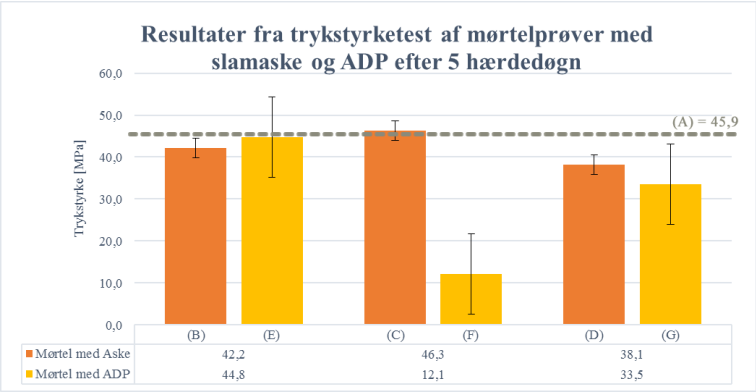
Da man ved anvendelse af slamaske i beton, (fra forskernes synspunkt) først og fremmest ønsker miljømæssige fordele fremfor økonomiske, vil cement-erstatning være at foretrække pga. cementproduktionens forurening med CO_2. En økonomisk gevinst er dog også at finde ved cement-erstatning, da cement er et dyrt materiale.

For at kunne genbruge så meget slamaske som muligt, vil sand-erstatning, på baggrund af de i dette projekt udførte trykstyrketests, være at foretrække, da der her ikke ses den store ændring i trykstyrken. De økonomiske fordele ved sand-erstatning fås ved genbrug af slamaske fremfor deponering, hvor de miljømæssige fordele ved sand-erstatning vil være mængden af udvundet/genbrugt fosfor og aske.



Figur 7.3.4: Trykstyrker fra screeningsproces for recepterne (A), (B) og (C).

Ved iblanding af fosfor blev der udført trykstyrketests på de 3 fosfor-recepter, (E), (F) og (G), samt den nye aske-recept, (D), efter 5 hærdedøgn. Til sammenligning er anvendt trykstyrkerne fra screeningsprocessen. Fosforens indflydelse på trykstyrken efter 5 hærdedøgn ses på figur 7.3.5, hvor der er opstillet søjler for de 6 recepter, som de passer sammen mht. tilsætningskoncentrationer og til yderligere sammenligning er styrken for (A) efter 5 hærdedøgn indtegnet som en horisontal linje, da denne er konstant.



Figur 7.3.5: Trykstyrker for referenceprøver med slamaske og ADP efter 5 hærdedøgn.

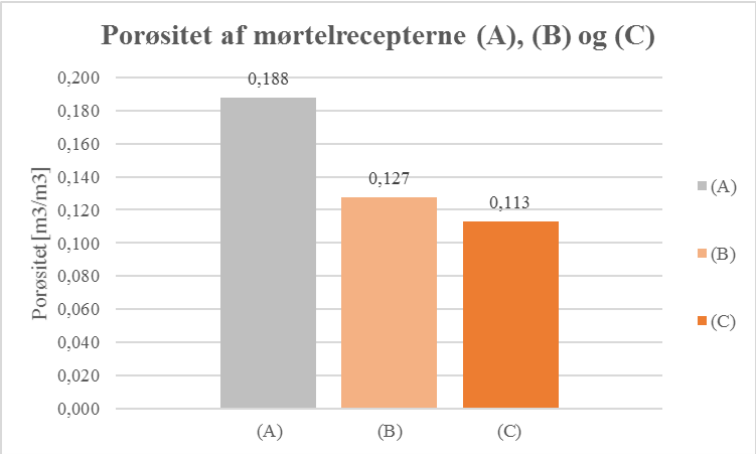
Ved sammenligningen af trykstyrker for aske- og fosfor-recepterne på figur 7.3.5 ses det på fejllinjerne, at resultaterne fra forsøgene med fosfor-recepterne, var meget mere varierende, end resultaterne fra aske-recepterne. Desuden var mørtelen, blandet ud fra recept (F) (16,2g ADP), så porøs, at den smuldrede under påvirkningen af tryk fra Toni-apparatet, hvorfor der ikke automatisk blev registreret en brudstyrke. Apparatet fortsatte med trykket efter prismen var smuldret og display'et viste 0 kN, da der ikke længere var modstand fra mørtelprismen. Den højeste trykstyrke, inden prøverne smuldrede, blev derfor observeret manuelt, men var så lave, at det vil være misvisende at anvende disse til determination af fosforens effekt.

Kigges der udelukkende på recepterne (B)(E) og (D)(G), ligger trykstyrkerne for disse, alle under linjen for reference-recepten. For recepterne (B)(E), er det fosfor-recepten (E), der har den højeste trykstyrke, hvilket kan skyldes den lave tilsætning af ADP på kun 2,7 g. Bortset fra den lille mængde tilsatte ADP, er recept (E) magen til reference-recepten, hvorfor det ikke er overraskende, at denne har en trykstyrke, der kun er 0,9 MPa lavere end (A). Aske-recepten (B) har en lavere trykstyrke end både (A) og (E), pga. den, som også tidligere i afsnittet nævnte, reducerede mængde af cement.

For recepterne (D)(G), har aske-recepten, (D), den højeste trykstyrke. Der er i denne recept samme mængde cement, som i (A) og alligevel ligger trykstyrken for (D), 7,8 MPa lavere end (A). Den reducerede trykstyrke skyldes derfor, i dette tilfælde, ikke cementen. Trykstyrken for recept (G) ligger yderligere 4,6 MPa lavere end (D) og ud fra dette resultat er det sandsynligt at fosforen har en negativ effekt på mørtelens trykstyrke både for recept (G), men også for recept (D).

7.3.4 Porøsitet/Densitet

Porøsitets- og densitetsundersøgelsen indgik kun i screeningsprocessen og er derfor kun udført for recepterne (A), (B) og (C). Ud fra de i forsøget fundte masser, er prøvernes åbne porøsitet ($P_å$) og densiteter (ρ_f, ρ_d og ρ_{ssd}) udregnet ved brug af formlerne 5.1.2 fra afsnit 5.1.2.

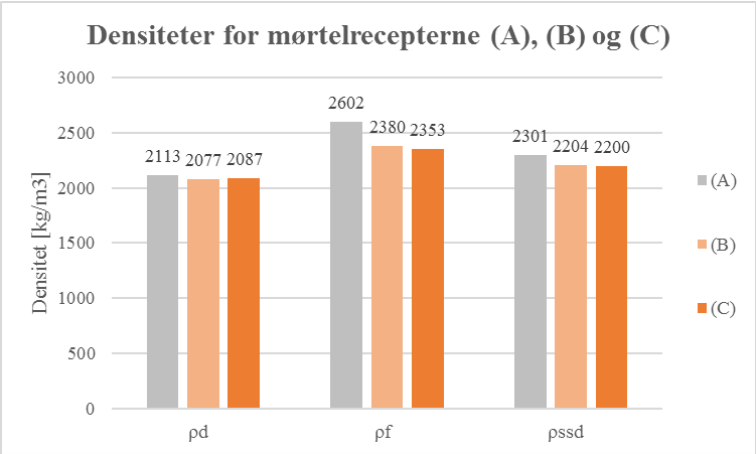


Figur 7.3.6: Porøsitet fra screeningsproces for recepterne (A), (B) og (C) efter 28 hærdedøgn.

På figur 7.3.6 ses forskellen på porøsiteten af de tre recepter. Reference-recepten, (A), der er fundet til 0,188 m^3/m^3 ± 0,002 ligger hhv. 32,4% og 39,9% højere end (B) på 0,127 m^3/m^3 ± 0,005 og (C) på 0,113 m^3/m^3 ± 0,001, som er de askeindeholdende mørtelrecepter. Da begge aske-recepter ligger så meget lavere end reference-recepten, må det skyldes askens indflydelse. Jf. [Aalborg (2010)], s. 87, er en lav porøsitet sammenhængende med et lavt v/c-forhold og en højere styrke. I resultaterne fra trykstyrketests med de forskellige recepter, ses det også at recept (B), der har den højeste porøsitet af de to aske-recepter, har en lavere styrke end recept (C), efter både 3 og 5 døgn. Denne sammenligning kan dog ikke laves direkte mellem reference-recepten og aske-recepterne, da blandingerne indholder forskellige tilsætninger.

På trods af en markant højere porøsitet, har reference-recepten den højeste trykstyrke af de tre recepter, hvilket skyldes indholdet af cement, der er højere i (A) end i (B), hvor 5% af cementen er erstattet med aske. (A) og (C) har forholdsvis ens trykstyrker, hvilket stemmer overens med førnævnte teori, da det i recept (C) er sandet, der erstattes, hvormed mængden af cement i (A) og (C) er den samme.

Udregnes v/c-forholdet for de tre recepter, ligger de på 0,50, 0,53 og 0,56 for hhv. (A), (B) og (C), hvilket er lige modsat af, det, der angives i [Aalborg (2010)] omkring at et lavere v/c-forhold er lig med en lavere porøsitet. Denne afvigelse kan dog skyldes askens pakningsgrad, idet askens kornstørrelse er mindre end både cementens og sandets og en bedre pakning kan medføre færre porer.



Figur 7.3.7: Densitet fra screeningsproces for recepterne (A), (B) og (C) efter 28 hærdedøgn.

På figur 7.3.7 er de fundne værdier for recepternes densiteter illustreret i et søjlediagram. Faststofdensiteten, ρ_f, er fundet til hhv. 2602 kg/m^3 ± 0,81, 2380 kg/m^3 ± 11,9 og 2335 kg/m^3 ± 1,41 for (A), (B) og (C). Denne densitet angiver densiteten af prøvens faststof, uden porer.

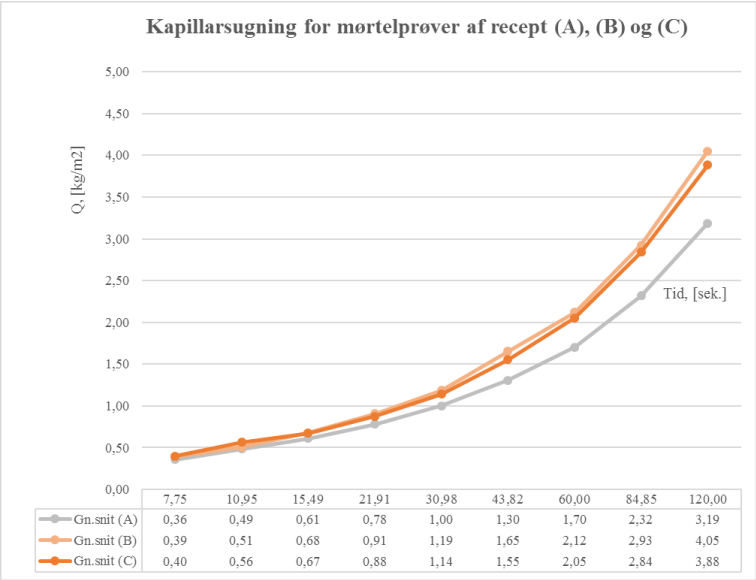
De vacuumvandmættede densiteter, ρ_{ssd}, er fundet til hhv. 2301 kg/m^3 ± 3,55, 2204 kg/m^3 ± 6,96 og 2200 kg/m^3 ± 1,09 for (A), (B) og (C). Denne densitet angiver densiteten af prøvens faststof inkl. både de åbne og lukkede porer.

Den densitet, der anvendes i dagligt brug, er tørdensiteten, ρ_d, som derfor er den af densiteterne, der vil fokuseres på. Den angiver densiteten for prøvens faststof inkl. de lukkede porer, men ikke de åbne og er for de tre recepter fundet til hhv. 2113 kg/m^3 ± 5,52, 2077 kg/m^3 ± 8,04 og 2087 kg/m^3 ± 1,23 for (A), (B) og (C).

Ud fra disse resultater ses det at en tilsætning af slamaske ikke har nogen bemærkelsesværdig indflydelse på mørtelens densitet.

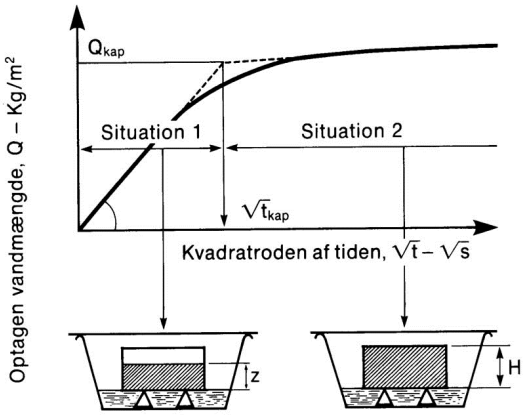
7.3.5 Kapillarsugning

Kapillarsugningsforsøget indgik også kun i screeningsprocessen for recepterne (A), (B) og (C). Som det ses på figur 7.3.8, ligger resultaterne fra de askeindeholdende mørtelrecepter, (B) og (C), meget tæt og ligger ved sidste måling efter 4 timer hhv. 21% og 18% højere end reference-recepten (A).



Figur 7.3.8: Kapillarsugningsresultat for recept (A), (B) og (C).

Q_{kap} er, som nævnt i afsnit 5.1.2, ikke opnået pga. forsøgets korte varighed og det er derfor ikke muligt at bestemme kapillaritetstallet, k. På figur 7.3.9 ses den teoretiske graf for kapillarsugningsforsøget, hvor Q_{kap} og $\sqrt{t_{kap}}$ er indtegnet. Det er den, på grafen viste, udfladning af grafen, der angiver at den vandmættede tilstand er opnået, hvilket, som det ses på figur 7.3.8, ikke opnås i det udførte forsøg.



Figur 7.3.9: Illustration af teoretisk Q over $\sqrt{t}$ [Forsøgsvejledning kapillarsugning].

7.4 Videre forskning

I dette projekt er de fleste af slamaskens egenskaber blevet undersøgt. For at opnå et fuldt overblik over askens egenskaber og indflydelse på betonens egenskaber, bør yderligere undersøgelser dog udføres.

I det følgende er der opstillet eksempler på emner/undersøgelser, der med fordel kan udføres til videre studier.

7.4.1 Antal forsøg – sikkerhed

Generelt vil det være fordelagtigt at udføre alle de anvendte forsøg flere gange, med samme recepter, som anvendt i dette projekt. Flere forsøg med samme recepter, vil præcisere de fundne resultater. Til en endelig godkendelse af asken, vil der være specifikt krav til antallet af forsøg.

7.4.2 Askens ensartethed

Aktørerne i sagen om slamaskens anvendelighed i betonproduktion, satte i rapporten [SCA (2004)] spørgsmålstegn ved betydningen af slamaskernes ensartethed, hvorfor yderligere og mere sammenhængende studier af de forskellige slamasker bør udføres i større skala.

Da asken blev modtaget fra SCA, var der i denne, synlige rødder fra græs eller lign., hvorfor asken blev sigtet igennem en 1 mm sigte, inden ringknusning. Ved sigtningen blev der dog også sorteret en del sten fra med en størrelse på 3-5 mm, samt et par enkelte, der var helt oppe på ca. 10 mm.

Da asken kommer fra depot, kan det være interessant at undersøge opbevaringen af den behandlede aske samt at overveje om denne opbevaringsmetode er med til enten at forurene asken eller medfører nødvendigheden for yderligere behandling (som fx. sigtning) inden knusning. Den del af asken, der kom direkte fra ovnen og er undersøgt i projektet [Huntley (2014)], indeholdt ikke fremmedlegemer og krævede derfor ikke sigtning. Det bør undersøges nærmere om det vil være nødvendigt at kræve, at asken enten kommer direkte fra ovn eller bliver opbevaret anderledes, for at spare et led i behandlingen.

7.4.3 Optimalt v/c-forhold og Bolomey

For at opnå optimale forhold, bør v/c-forholdet udregnes, da asken opsuger vandet anderledes og i andre mængder end cement og sand, hvilket kan have haft indflydelse på bl.a. sætmål og styrke.

Desuden vil det være en fordel at undersøge om slamasken, som kulflyveasken, har puzzolanske egenskaber, da dette ville være en fordel for betonen og ikke er blevet undersøgt i dette projekt, da det kræver en hærdetid på 28 døgn.

7.4.4 Syrevask af aske

På trods af at der tidligere er udført projekter med fokus på syreudvaskning af fosfor (og andre stoffer) fra asken, vil det alligevel være interessant at udføre et sådan projekt med samme forsøg og mørtelrecepter, som for dette projekt, for bedre at kunne sammenligne resultater for bl.a. trykstyrker, afbinding, sætmål mm. efter syrevaskning af asken.

7.4.5 Kapillarsugning, porøsitet og densitet

For at få et samlet overblik over den fosfor-holdige mørtels fysiske egenskaber, vil det være interessant at undersøge kapillarsugning og porøsitet/densitet på recepterne (D), (E), (F) og (G), for at undersøge fosforens indflydelse på disse.

7.4.6 Beton

Da der i projektet udelukkende udføres forsøg med mørtel, vil det være interessant at undersøge relevante resultater med den endelige beton-recept, for at sikre at tilførslen af sten ikke har uventet indflydelse på materialets egenskaber.

7.4.7 Fosfor

Da der i dette projekt er anvendt et sammensat fosfor-produkt og ikke rent fosfor, vil det være interessant at gentage forsøgene med en andet fosfor-produkt, for at sikre at ammoniakken i ADP (Ammonium-Dihydrogen-Phosohate) ikke har påvirket resultaterne.

I samme omgang ville det være interessant at fokusere på afbindingstiden for de fosfor-tilsatte recepter og evt. udføre forsøg med et mindre interval imellem fosfor-koncentrationerne, for at kunne lokalisere det vendepunkt, der diskuteres i afsnit 7.3.2.

8 Konklusion

I rapporten undersøges en slamaske, der har ligget til udendørs opbevaring på Spildevandscenteret Avedøre (SCA). I en sreeningsproces er slamaskens karakteristika undersøgt og der er fastlagt egenskaber for askeindeholdende mørtelrecepter.

Der er i løbet af projektet udført forsøg og analyser med asken og desuden støbt i alt 45 mørtelprismer (ekskl. de resterende gruppers prismer, anvendt til sammenligning), hvoraf 27 stk. udelukkende blev anvendt i screeningsprocessen, 6 stk. blev brugt både i screeningsprocessen og i det videre forløb og de resterende 12 prismer blev støbt til den afsluttende del af projektet.

Der er fokuseret på egenskaberne af den friske beton, hvorfor der i screeningsprocessen er kigget på mørtelprismer efter 1, 3 og 5 hærdedøgn. I den afsluttende del af projektet er der fokuseret på sammenligning af asketilsat og fosfor-tilsat mørtel efter 5 hærdedøgn.
Askens kornstørrelse overholder Kategori N fra [DS/EN 450 − 1] allerede inden knusning og efter knusning overholdes også Kategori S.

pH og ledningsevne for asken blev målt til hhv. 7,25 ± 0,02 og 1,71 ± 0,15. Efter støbning af mørtelprøver ud fra alle syv recepter (1x reference, 3x askeindeholdende og 3x fosforindeholdende), blev pH-værdierne for de hærdede mørtelprøver fundet til at ligge i intervallet fra 12,39-12,55. Da en sund armeret beton bør have en pH-værdi mellem 12 og 14 (for at sikre stålet), viste resultaterne at det tilsatte fosfor ikke havde nogen indflydelse på pH-værdien for den hærdede mørtel, på trods af den meget lave pH-værdi af Ammonium Dihydrogen Phosphate (ADP).

Glødetab, der indikerer askens indhold af organisk materiale, blev fundet til 1,11% ± 0,02 og overholder dermed kravet på <5% fra [DS/EN 450 − 1]. Desuden er glødetabet for den, i dette projekt undersøgte SCA slamaske fra depot, blot 0,08% mindre end de 1,19% ± 0,023%, fundet for SCA slamasken direkte fra ovn i projektet [Huntley (2014)].

Den udendørs opbevaring af slamasken fra depot, medfører dermed ikke et øget indhold af organiske stoffer.

Vandopløseligheden i asken blev fundet til 1,62 og i den forbindelse blev der undersøgt indholdet af de vandopløselige anioner chlor (Cl), nitrat (NO_3) og sulfat (SO_4). Indholdet af chlorid-ioner er fundet til 0,00261% og overholder derfor uden problemer kravet på <9% fra [DS/EN 450−1]. Mere interessant var sammenligningen med SCA slamasken fra ovn, fra projektet [Huntley (2014)], hvor chlorid-indholdet blev fundet til værende 8046% større end i asken fra depot. Det ses derfor at den udendørs opbevaring af asken medfører en naturlig udvaskning af chlor, idet den opbevarede aske ikke beskyttes mod nedbør.

Mht. spørgsmålet om slamaskernes ensartethed, kan denne type opbevaring alligevel være et problem. De planter og sten, der inden knusning blev sigtet fra, ville kunne have påvirket resultaterne, såfremt de ikke var blevet fjernet.
Oplukningen af den ubehandlede aske viste grundstof-koncentrationer, der langt oversteg dem, for den godkendte aske samt overskridelser af alle kravene for tungmetaller, pånær for chrom og nikkel.

Ud fra det tidligere projekt [Rosenmai & Svendsen (2012)] blev asken sammenlignet med den syrevaskede aske og de i [DS/EN 450 − 1] opstillede krav om tungmetalindholdet. Selv efter syrevaskning var kun kobber kommet ned under grænsen fra Dansk Standard, men forskellen på den syrevaskede slamask og de opstillede krav, var blevet betydelig mindre og ved optimering af denne udvaskning, er det ikke usandslynligt, at kravene vil kunne overholdes. Især zink og cadmium ligger højt efter syrevaskning og vil kræve yderligere opmærksomhed i fremtidige studier.

Sætmålet er bestemt for de syv asker og ud fra forsøgsresultaterne, ses det at sætmålene for de aske-indeholdende mørteler ligger ca. 13% højere end sætmålet for reference-mørtelen. Sætmålene for de fosfor-indeholdende mørteler (ekskl. (G)) ligger blot 4% højere end reference-mørtelen.

Ud fra dette forsøg kan det konkluderes at asken opsuger mindre vand end cementen, da sætmålet for (B) er større end (A) uden tilsætning af ekstra vand. Ved erstatning af sandet i recept (C) og (D) er der tilsat ekstra vand og idet sætmålene for disse recepter ikke er markant højere end reference-mørtelen, konkluderes det at asken opsuger mere vand end sandet.

Resultatet for recept (G) anvendes ikke, da det er usikkert om den ekstremt hurtige afbindingstid, har indflydelse på sætmålet.

Afbindingstiden er bestemt for alle syv recepter og overholder alle kravet fra [DS/EN 450 − 1] om en afbindingstid for alternative betoner på $< 2{,}25$x afbindingstiden for referenceprøven. Referencemørtelen, (A), havde en indledende afbindingstid på 160 min., (B), (C) og (D) havde indledende afbindingstider på hhv. 200, 250 og 270 min. og (E), (F) og (G) havde indledende afbindingstider på hhv. 270, 300 og 20 min. De indledende afbindingstider stiger dermed i takt med at både aske- og fosforkoncentrationerne øges, hvorfor er sandsynligt, at det er askens fosforindhold, der påvirker afbindingstiden.

Ved sammenligning med resultatet for mørtel med en ukendt koncentration af den syrevaskede aske fra projektet [Rosenmai & Svendsen (2012)], ses det at afbindingstiden for mørtelen med syrevasket aske ligger på 266 min., hvilket svarer til resultatet for recept (D) med uvasket aske. Ud fra sammenligning er resultaterne fra dette projekt ikke tilstrækkelige til at konkludere om, det er fosforen, der er skyld i den forlængede afbindingstid.

Afbindingstiden for (G) var ekstremt lav, hvilket indikerer et endnu ukendt vendepunkt for fosforens retarderende påvirkning af afbindingen.

Der blev udført trykstyrketest både i den indledende screeningsproces og i den afsluttende fase af projektet. Under screeningen blev der undersøgt askens indflydelse på trykstyrken for den hærdede mørtel efter hhv. 1, 3 og 5 hærdedøgn.

Det blev her fundet, at mørtelprøverne, hvor 5% af cementen var erstattet med aske (recept (B)), havde en trykstyrke på 14% og 8% lavere end reference-recepten (A) efter hhv. 3 og 5 døgn, hvilket skyldes det reducerede indhold af cement og medfører et lavere v/c-forhold.

For prøverne, hvor det i stedet var sandet, der blev erstattet, opnåede recepten med 10% san-

derstatning, (C), tæt på samme trykstyrke som referenceprøven efter både 3 og 5 hærdedøgn, hvormed erstatningen med slamasken her kan antages, ikke at have nogen indflydelse. I den afsluttende fase i projektet, blev der udført trykstyrketest med den nye recept, (D), hvor 15% af sandet blev erstattet af slamaske, hvormed trykstyrken faldt og var 17% lavere end styrken for (A).

Der kan, ud fra dette resultat, erstattes 10% sand med knust uvasket slamaske, uden dette har indflydelse på mørtelens trykstyrke. Ønskes der iblanding af mere aske, for at kunne genbruge større mængder aske, er reduceringen af trykstyrken for recept (D) ikke så stor, at denne recept kan udelukkes.

Da der i dette projekt fokuseres på askens fosfor-indhold og indflydelsen af dette, blev trykstyrkerne også fundet for tre fosfor-indeholdende mørteler, (E), (F) og (G), med hhv. 2,7g, 16,2g og 24,3g ADP. Pga. ekstrem porøsitet af (F) efter de 5 hærdedøgn, ses der bort fra resultaterne med denne recept.

Koncentrationen i recept (E) var ikke stor nok, til at have indflydelse på trykstyrken, hvorfor denne blev fundet til værende blot 0,9 MPa lavere end referenceprøven (A). Trykstyrken for mørtelen med den højeste koncentration af ADP, (G) lå dog hele 12,4 MPa lavere end (A), hvormed det kan konkluderes at fosforet har en retarderende effekt på trykstyrken af den hærdede mørtel.

Porøsitet- og densitetsforsøg er udført i forbindelse med screeningsprocessen og for de askeindeholdende recepter, (B) og (C), ligger porøsiteten, $P_å$ hhv. 32,4% og 39,9% lavere end for referencerecepten, (A). Ud fra denne forskel ses det at tilsætning af aske reducerer mørtelens porøsitet.

Tørstofdensiteterne, ρ_d, for de tre recepter, er fundet til hhv. 2113 kg/m^3 ± 5,52, 2077 kg/m^3 ± 8,04 og 2087 kg/m^3 ± 1,23 for (A), (B) og (C). Forskellen mellem densiteterne for de tre mørtelrecepter indikerer at tilsætningen af aske ikke har nogen indflydelse.

Ud fra de samlede resultater kan det konkluderes at den knuste aske, ikke vil kunne anvendes i beton, uden udvaskning af tungmetaller. Asken har dog vist sig ikke at have nogen betydelig indflydelse på mørtelens densitet og ved 10% sanderstatning, har denne heller ikke nogen indflydelse på trykstyrken af den hærdede mørtel. Ved iblanding af aske, reduceres mørtelens porøsitet pga. den knuste askes lille kornstørrelse og pakningsgrad.

Hverken aske eller fosfor har nogen betydelig indflydelse på pH-værdien for den færdige mørtel og det er ud fra de udførte forsøg ikke muligt at afgøre om det er fosforen, der er skyld i den forsinkede afbindingstid.

Men trykstyrkeforsøgene viser, at den øgede koncentration af både aske og fosfor i mørtelerne, reducerer trykstyrken og på baggrund af dette samt det høje indhold af tungmetaller, kan det konkluderes at en udvinding af fosfor ikke blot gavner miljøet, men i høj grad også askens anvendelighed i betonproduktionen.

9 Litteraturliste

Bøger:

[Aalborg (2010)] Aalborg Portland (2010): *Cement og Beton*, 19. udgave, Aalborg Portland.

[Betonforening (2013)] Dansk Betonforening (2013): *Beton håndbogen* 2013, Dansk Betonforening.

[Geiker (2008)] Geiker, M.; Nielsen A.; Hansen, K. K. (2008): *Bygningsingeniørernes materialer - uddrag af materialebogen, D4 Beton*, 1. udgave, Nyt teknisk forlag.

[Geiker (2010)] Geiker, M. (2010): *Betonstøbning* 2010*, Januar*, Undervisningsmateriale.

[Herholt(1985)] Herholdt, Aage D.; Justensen, Chr. F. P.; Nepper-Christensen, Palle; Nielsen, Anders (1985): *Beton-Bogen*, 2. udgave, Aalborg Portland, Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor.

[Johanneson (2012)] Johanneson, Bjørn (2012): *Introduction to concrete technology*, Kursus 11563 Concrete technology, Danmarks Tekniske Universitet.

[Miljøstyrelsen (2010)] BEK nr. 1662 (2010): *Bekendtgørelsen om anvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret, uforurenet bygge- og anlægsaffald*, Miljøstyrelsen.

[Miljøstyrelsen nr. 38 (2006)] Arbejdsrapport nr. 38 (2006): *Miljøvurdering af nye betontyper*, Miljøstyrelsen.

[SCA (2004)] KIE (2004): *Afsætningsmuligheder for slamaske til anvendelse i beton*, Spildevandscenteret Avedøre.

Internetsider:

[By og Bolig] ; *http://www.bygogbolig.dk/artikel/uproevede − byggemetoder − skyld − i − en − boelge − af − nedrivninger/*, 27-05-2014

[Concrete Trust] ; *http://cementtrust.wordpress.com/a − concrete − plan*, 20-05-2014

[Dansk Arkitektur Center] ; *//www.dac.dk*, 25-05-2014

[Den Store Danske] ; *//www.denstoredanske.dk/It,teknik_og_naturvidenskab/Kemi/Grundstoffer/fosfor*, 15-05-2014

[Spildevandscenter] *http://www.spildevandscenter.dk* , 24-05-2014

Rapporter:

[Huntley (2014)] Huntley, Anders Kjær (2014): *Alternate ash in concrete - Application for sewage sludge ash*, DTU BYG, Danmarks tekniske universitet.

[Rosenmai & Svendsen (2012)] Rosenmai, Liv; Svendsen, Sabine (2012): *Slamaskes anvendelighed i beton - Anvendelse af slamaske i beton efter fosfor indvinding*, DTU BYG, Danmarks tekniske universitet.

[Pedersen (2006)] Pedersen, Anne Juul; Ottosen, Lisbeth M. (2006): *Elektrokemisk fjernelse af Cd fra bioasker i pilotskala og vurdering af mulighederne for nyttiggørelse af behandlet aske i beton*, DTU BYG; Energi E2 A/S; MT Højgaard A/S, Danmarks tekniske universitet.

Dansk Standarder:

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

[DS/EN 196 – 2] Dansk Standard (2005): *Metoder til prøvning af cement - Del* 2*: Kemisk analyse af cement*, 1. udgave, Dansk Standard.

[DS/EN 196 – 3] Dansk Standard (2009): *Metoder til prøvning af cement - Del* 3*: Bestemmelse af afbindingstiden og volumenbestandighed*, 3. udgave, Dansk Standard.

[DS/EN 196 – 6] Dansk Standard (2010): *Metoder til prøvning af cement - Del* 6*: Bestemmelse af finhed*, 2. udgave, Dansk Standard.

[DS/EN 196 – 8] Dansk Standard (2010): *Metoder til prøvning af cement - Del* 8*: Hydratiseringsvarme - Opløsningsmetode*, 2. udgave, Dansk Standard.

[DS/EN 2426] Dansk Standard (2011): *Beton - Materialer - Regler for anvendelse af EN 206-1 i Danmark*, 4. udgave, Dansk Standard.

[DS/EN 259] Dansk Standard (2012): *Bæredygtighed inden for byggeri og anlæg - Vurdering af bygningers miljømæssige kvalitet - Beregningsmetode*, 1. udgave, Dansk Standard.

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

Artikler:

[Andersen (2013)] Andersen, Ulrik (2013): *Lyserød beton af aske fra slam kan gøre byggeriet grønnere*, Ingeniøren

[Nyvold (2008)] Nyvold, Mads (2008): *Overset fosfor-mangel truer fremtidens fødevareproduktion*, Ingeniøren

[Ottosen (2013)] Ottosen, Lisbeth M.; Kirkelund, Gunvor M.; Jensen, Pernille E. (2013): *Extracting phosphorous from incinerated sewage sludge ash rich in iron or aluminium*, Elsevier Ltd., Chemosphere

[Skov & Ingerslev 2005] Skov, Simon; Ingerslev, Morten (2005): *Flisaske skal ikke deponeres*, Fjernvarmen, Skov & Landskab.

Appendiks

A Forsøgsvejledninger

I det følgende er indskrevet de udleverede forsøgsvejledninger, som er blevet udleveret til de i projektet udførte forsøg og analyser. I enkelte tilfælde er der ikke udleveret en skriftlig vejledning, men i stedet henvist til en Dansk Standard eller udført en demonstration af en tilknyttet laborant. I disse tilfælde vil det være nævnt i afsnit 6 og det pågældende forsøg vil derfor ikke være nævnt i det følgende.

A.1 Askekarakteristik

pH og ledningsevne

Forsøgsvejledning for pH i 1 M KCl opslemning. Jord-væske forhold 1:2,5

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

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

C Kemikalie sikkerhed
Kaliumchlorid - Der foreligger ikke information, der gør det muligt at klassificere stoffet. Bruges med omtanke. Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.

D Reagenser

1) Kaliumchlorid 1 M KCl:
74,56 g KCl afvejes på teknisk vægt og opløses i destilleret vand i en 1000,00 mL målekolbe.

2) Bufferopløsning, pH 4,01:
Radiometer pH 4.

3) Bufferopløsning, pH 7,00:
Radiometer pH 7.

E Analysens udførelse

1) Fremstilling af jordopslemningen

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

2) Målingens udførelse

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

F Beregning af resultat

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

G Affaldshåndtering

Kaliumchlorid og Metrohm pH 4 og pH 7 hældes i vasken. Plastvial med jorden/KCl skal opsamles i beholder til jordaffald.

Glødetab

Forsøgsvejledning for glødetab i jord

A Princip

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

B Specielt apparatur

Til analysen benyttes et muffelovn.

C Analysens udførelse

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

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

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

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

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

$$\%\text{glødetab} = \frac{m(\text{muffelovn}) - m(\text{efter muffelovn})}{m(\text{før muffelovn})} \cdot 100 \tag{A.1.1}$$

E Affaldshåndtering
Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

Vandindhold

Forsøgsvejledning for bestemmelse af vandindhold i jord

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

B Specielt apparatur
Til analysen benyttes et varmeskab.

C Analysens udførelse
Ved meget præcis måling:

3 bægerglas stilles i varmeskab ved 105 °C natten over.
Bægerglassene stilles til afkøling i eksikator og vejes på analysevægt.
Dette gøres vha. en tang, fingrene afsætter fugt.
Der afvejes 5 g jord i hvert bægerglas og prøverne tørres ved 105 °C i varmeskab.
Bægerglassene med den tørrede jord vejes på analyse vægt efter afkøling i eksikator.

Ved mindre præcis måling (mest anvendt):

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

D Beregning af resultat
Vandindholdet angives i procent af vægten af den fugtige jord.

$$\%\text{vandindhold} = \frac{m(\text{våd prøve}) - m(\text{tør prøve})}{m(\text{våd prøve})} \cdot 100 \tag{A.1.2}$$

E Affaldshåndtering
Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald og bægerglassene rengøres.

Vandopløselighed

Forsøgsvejledning for vandopløselighed i aske

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

Et filterpapir vejes og sættes i en tragt over et måleglas. Væsken hældes over i filterpapiret. Der tilsættes igen 500 mL destilleret vand til asken og prøven omrystes og henstilles.

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

Hele prøven hældes over i filteret og stilles til afdrypning.

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

Asken og filteret vejes og vægten noteres.

Oplukning

Forsøgsvejledning for oplukning af jordprove efter DS 259

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

B Specielt apparatur
Til målingen benyttes et atomabsorptionsspektrofotometer (AAS).

C Kemikalie sikkerhed

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

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

D Reagenser

Salpetersyre halvkonc, (1:1) HNO_3:
500 mL koncentreret HNO_3 overføres med måleglas til en 1000,00 mL målekolbe som er halvt 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 HNO_3 med fuldpipette (skal forega i stinkskab).

Autoklavflaskerne lukkes helt til, da HNO_3 ellers vil fordampe. Flaskerne stilles i autoklaven ved 200 kPa (120 °C) i 30 minutter. Flaskerne afkøles derefter til stuetemperatur.

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

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

F Bestemmelse af metaller

Ekstraktens indhold af metaller måles ved AAS under benyttelse af de standarder som hører til de enkelte metaller.

G Beregning af resultat

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

$$mg/kg = \frac{A \cdot 0{,}100L \cdot C}{B \cdot 10^{-3} kg/gjord} \tag{A.1.3}$$

hvor
A = ekstraktens metal koncentration, mg/L = ppm
B = g jord afvejet
C = fortyndingsfaktor

H Affaldshandtering
Salpetersyre hældes i affaldsdunke mærket X 4.18.
Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).
Filterpapiret bortkastes i skraldespanden i stinkskabet.
Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

Vandopløselige anioner

Vandopløselige anioner

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

Prøven stilles på rystebord natten over.

Prøven filtreres med sprøjtefilter og prøven gemmes til ionchromotograf og AAS.

A.2 Mørtelens fysiske egenskaber

Sætmål

Forsøgsbeskrivelse for sætmål
(udsnit af udleveret materiale på originalt sprog)

6. Materials
6.1 Hydraulic Cement Mortar—A mortar for which the determination of flow is specified or desired.

7. Procedure
7.1 Determination of Flow:
7.1.1 Carefully wipe the flow table clean and dry, and place the flow mold at the center. Place a layer of mortar about 25 mm (1 in.) in thickness in the mold and tamp 20 times with the tamper. The tamping pressure shall be just sufficient to ensure uniform filling of the mold. Then fill the mold with mortar and tamp as specified for the first layer. Cut off the mortar to a plane surface flush with the top of the mold by drawing the straightedge or the edge of the trowel with a sawing motion across the top of the mold. Wipe the table top clean and dry, being especially careful to remove any water from around the edge of the flow mold. Lift the mold away from the mortar 1 min after completing the mixing operation. Immediately drop the table 25 times in 15 s, unless otherwise specified.
7.1.2 If using the caliper specified in Specification C230/ C230M, measure the diameter of the mortar along the four lines scribed in the table top, recording each diameter as the number of caliper divisions, estimated to one tenth of a division. If some other caliper is being used, measure the diameter of the mortar along the four lines scribed in the table top, recording each diameter to the nearest millimetre.

8. Calculation
8.1 The flow is the resulting increase in average base diameter of the mortar mass, expressed as a percentage of the original base diameter.
8.2 If using the caliper specified in Specification C230/ C230M, add the four readings, and record the total. This gives the flow in percent. If using some other caliper, compute the flow in percent by dividing "A"by the original inside base diameter in millimetres and multiplying by 100.
where:

A = average of four readings in millimetres, minus the original inside base diameter in millimetres. Report the flow to the nearest 1 %.

Porøsitet/Densitet

Forsøgsbeskrivelse for porøsitet og densitet

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

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

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

m_0	[kg]	Masse af prøvelegemet før forsøget.
m_{105}	[kg]	Masse af prøvelegeme efter tørring ved 105 °C.
m_{ssd}	[kg]	Masse i luft af vakuumvandmættet prøvelegeme i overfladetør tilstand.
m_{sw}	[kg]	Masse af vakuumvandmættet prøvelegeme, vejet i vand.
V	[m^3]	Prøvelegemets volumen.
$V_{på}$	[m^3]	Volumen af åbne porrer.
ρ_f	[kg/m^3]	Faststofdensitet.
ρ_d	[kg/m^3]	Tørdensitet.
ρ_{ssd}	[kg/m^3]	Densitet af prøvelegeme i vakuumvandmættet, overfladetør tilstand.
$P_å$	[kg/m^3]	Prøvelegemets åbne porøsitet.
u_{ssd}	[kg/kg]	Vandtørstofforhold i vakuumvandmættet, overfladetør tilstand.

Prøveudtagning:
Antallet af prøver bestemmes ud fra statisk analyse.

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

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

Apparatur:
- Varmeskab til udtørring ved 105 ± 5 °C.
- Ekssikator med silicagel til opbevaring af prøvelegemerne under afkøling.
- Vægt, hvor prøvelegemernes masse kan bestemmes med en nøjagtighed på 0,1%-vægtkontrollod.
- Udstyr til vejning af prøvelegeme under vand.
- Destilleret vand.
- Termometer (0,1 °C deling).
- Vakuumpumpe til tryk på ca. 100 N/m^2.
- Ekssikator til vakuummætning af prøvelegemer.
- Klude.

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

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

Det udtørrede prøvelegeme evakueres kontinuerligt tørt i ekssikkator i mindst 3 timer ved tryk på.

Demineraliseret vand med rumtemperatur ledes ind i ekssikkatoren. Prøvelegemer skal være helt dækket med vand og henstår ved dette tryk i mindst 1 time uden pumpning. Herefter ledes luft ind og prøverne henstår i vandet natten over ved atmosfæretryk.

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

Efter tørringen udtørres prøverne ved 105 ± 5 °C til vægtkonstans og der foretages en kontrolvejning, så det kan konstateres, om der er sket en udvaskning af prøverne ved vandmætning.

Parametrene bestemmes jf. følgende formler:

$$\text{Densitet:} \qquad \rho_f = \frac{m_{105}}{V} \qquad \rho_d = \frac{m_{105}}{(V - V_p)} \qquad \rho_{ssd} = \frac{m_{ssd}}{V} \tag{A.2.1}$$

$$\text{Porøsitet:} \qquad p_{å} = \frac{V_p}{V} \tag{A.2.2}$$

$$\text{Vandtørstofforhold:} \qquad u_{ssd} = \frac{m_{ssd} - m_{105}}{m_{105}} \tag{A.2.3}$$

B Forsøgsresultater

B.1 Støbningsskema

I nedenstående tabel er opstillet data fra støbning af mørtelprismer til dette projekt.

Støbningsskema

Recept	Døgn [dage]	Cement [g]	Aske [g]	ADP [g]	Vand [g]	Sand [g]	Ekstra vand [g]	Færdigt støbt dato	Færdigt støbt kl.	Afformet dato	Afformet kl.	Anvendelse
(C)	28	450	135	0	225	1215	25	20.02	12:00	21.02	12:00	Kapillar
(C)	28	450	135	0	225	1215	25	20.02	12:00	21.02	12:00	Porøsitet/densitet
(B)	1	427,5	22,5	0	225	1350	0	10.03	11:00	11.03	11:00	Styrke-test
(C)	1	450	135	0	225	1215	25	10.03	11:30	11.03	11:30	Styrke-test
(A)	3	450	0	0	225	1350	0	10.03	12:00	11.03	12:00	Styrke-test
(B)	28	427,5	22,5	0	225	1350	0	10.03	12:30	11.03	12:30	Kapillar
(B)	28	427,5	22,5	0	225	1350	0	10.03	12:30	11.03	12:30	Porøsitet/densitet
(B)	3	427,5	22,5	0	225	1350	0	17.03	10:00	18:03	10:00	Styrke-test
(C)	3	450	135	0	225	1215	25	17.03	10:30	18.03	10:30	Styrke-test
(B)	5	427,5	22,5	0	225	1350	0	19.03	09:00	20.03	09:00	Styrke-test
(C)	5	450	135	0	225	1215	25	19.03	09.30	20.03	09:30	Styrke-test
(E)	5	450	0	2,5	225	1350	0	14.05	10:30	15.05	10:30	Styrke-test
(F)	5	450	0	16,2	225	1350	0	14.05	11:00	15.05	11:00	Styrke-test
(G)	5	450	0	24,3	225	1350	0	14.05	11:30	15.05	11:30	Styrke-test
(D)	5	450	405	0	225	945	50	14.05	12:00	15.05	12:00	Styrke-test

B.2 Resultater for askekarakteristik af slamasken

I de følgende afsnit opstilles tabeller og figurer med rådata for hvert af de i projektet udførte forsøg.

Resultater fra analyse af kornstørrelse

D50 for ikke knust og knust aske [µm]

	Forsøg 1	Forsøg 2	Forsøg 3	Gn.snit
Ikke knust aske	36,14	35,48	36,26	**35,96 ± 0,421**
Knust aske	5,56	5,53	5,46	**5,52 ± 0,053**

(Se rådata på de efterfølgende sider.)

Kornstørrelser for ikke knust og knust SCA slamaske fra depot [µm]

Kornstr.	Ikke knust aske					Knust aske				
[µm]	Forsøg 1	Forsøg 2	Forsøg 3	Gn.snit	∑Gn.snit	Forsøg 1	Forsøg 2	Forsøg 3	Gn.snit	∑Gn.snit
0,020										
0,022	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**
0,025	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**
0,028	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**
0,032	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**
0,036	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**
0,040	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,019	0,019	0,019	**0,019**	**0,019**
0,045	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,152	0,152	0,154	**0,153**	**0,172**
0,050	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,243	0,242	0,245	**0,243**	**0,415**
0,056	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,352	0,351	0,355	**0,353**	**0,767**
0,063	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,475	0,474	0,480	**0,477**	**1,244**
0,071	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,642	0,641	0,649	**0,644**	**1,888**
0,080	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,826	0,824	0,834	**0,828**	**2,716**
0,089	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,006	1,005	1,016	**1,009**	**3,725**
0,100	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,178	1,177	1,190	**1,182**	**4,907**
0,112	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,333	1,332	1,347	**1,337**	**6,244**
0,126	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,475	1,474	1,491	**1,480**	**7,724**
0,142	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,597	1,596	1,614	**1,603**	**9,327**
0,159	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,698	1,698	1,717	**1,705**	**11,031**
0,178	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,775	1,776	1,795	**1,782**	**12,813**
0,200	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,824	1,826	1,845	**1,831**	**14,645**
0,224	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,842	1,846	1,865	**1,851**	**16,496**
0,252	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,828	1,833	1,852	**1,838**	**18,334**
0,283	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,781	1,787	1,805	**1,791**	**20,125**
0,317	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,701	1,709	1,725	**1,712**	**21,836**
0,356	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,589	1,598	1,613	**1,600**	**23,436**
0,399	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,448	1,459	1,473	**1,460**	**24,897**
0,448	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,284	1,296	1,307	**1,296**	**26,192**
0,502	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	1,099	1,113	1,122	**1,111**	**27,304**
0,564	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,907	0,921	0,928	**0,919**	**28,222**
0,632	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,711	0,725	0,729	**0,722**	**28,944**
0,710	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,530	0,544	0,546	**0,540**	**29,484**
0,796	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,371	0,383	0,384	**0,379**	**29,863**
0,893	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,249	0,260	0,259	**0,256**	**30,119**
1,002	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,175	0,183	0,182	**0,180**	**30,299**
1,125	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,156	0,162	0,160	**0,159**	**30,458**
1,262	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,196	0,199	0,197	**0,198**	**30,656**
1,416	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,296	0,296	0,295	**0,296**	**30,951**
1,589	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**0,000**	0,445	0,444	0,443	**0,444**	**31,395**
1,783	0,073	0,075	0,074	**0,074**	**0,074**	0,639	0,636	0,635	**0,637**	**32,032**
2,000	0,152	0,156	0,155	**0,155**	**0,228**	0,858	0,855	0,855	**0,856**	**32,888**
2,244	0,286	0,291	0,289	**0,289**	**0,517**	1,096	1,092	1,094	**1,094**	**33,982**
2,518	0,379	0,385	0,382	**0,382**	**0,899**	1,337	1,333	1,336	**1,335**	**35,317**
2,825	0,474	0,481	0,477	**0,478**	**1,377**	1,571	1,567	1,572	**1,570**	**36,887**
3,170	0,564	0,572	0,568	**0,568**	**1,945**	1,794	1,792	1,797	**1,794**	**38,681**
3,557	0,646	0,655	0,649	**0,650**	**2,595**	1,999	1,997	2,003	**2,000**	**40,681**
3,991	0,730	0,740	0,734	**0,734**	**3,330**	2,194	2,192	2,199	**2,195**	**42,876**
4,477	0,818	0,830	0,823	**0,824**	**4,153**	2,375	2,373	2,380	**2,376**	**45,253**
5,024	0,921	0,934	0,928	**0,928**	**5,081**	2,552	2,550	2,556	**2,553**	**47,805**
5,637	1,041	1,057	1,050	**1,049**	**6,130**	2,721	2,719	2,725	**2,722**	**50,527**
6,325	1,184	1,203	1,194	**1,194**	**7,324**	2,884	2,881	2,887	**2,884**	**53,411**
7,096	1,352	1,375	1,364	**1,364**	**8,687**	3,037	3,034	3,040	**3,037**	**56,448**
7,962	1,543	1,569	1,557	**1,556**	**10,244**	3,173	3,169	3,174	**3,172**	**59,621**
8,934	1,760	1,791	1,775	**1,775**	**12,019**	3,287	3,282	3,286	**3,285**	**62,906**
10,024	1,992	2,027	2,007	**2,009**	**14,028**	3,365	3,359	3,363	**3,362**	**66,268**
11,247	2,241	2,280	2,255	**2,258**	**16,286**	3,403	3,396	3,400	**3,400**	**69,668**
12,619	2,493	2,535	2,504	**2,511**	**18,797**	3,393	3,385	3,389	**3,389**	**73,057**

(…) Fortsættes på næste side.

Kornstørrelser for ikke knust og knust SCA slamaske fra depot [µm] (fortsat)

Kornstr.	Ikke knust aske					Knust aske				
[µm]	Forsøg 1	Forsøg 2	Forsøg 3	Gn.snit	∑Gn.snit	Forsøg 1	Forsøg 2	Forsøg 3	Gn.snit	∑Gn.snit
(…)	Fortsat fra forrige side.									
14,159	2,744	2,787	2,750	**2,761**	**21,558**	3,329	3,321	3,326	**3,325**	**76,382**
15,887	2,983	3,027	2,982	**2,997**	**24,555**	3,211	3,202	3,207	**3,207**	**79,589**
17,825	3,199	3,242	3,190	**3,211**	**27,765**	3,041	3,030	3,036	**3,036**	**82,624**
20,000	3,389	3,429	3,370	**3,396**	**31,161**	2,820	2,808	2,814	**2,814**	**85,438**
22,440	3,542	3,577	3,512	**3,544**	**34,705**	2,565	2,550	2,556	**2,557**	**87,995**
25,179	3,659	3,689	3,620	**3,656**	**38,361**	2,277	2,261	2,267	**2,268**	**90,264**
28,251	3,737	3,762	3,689	**3,729**	**42,090**	1,981	1,964	1,968	**1,971**	**92,235**
31,698	3,780	3,801	3,727	**3,769**	**45,860**	1,682	1,663	1,665	**1,670**	**93,905**
35,566	3,793	3,812	3,741	**3,782**	**49,641**	1,398	1,377	1,377	**1,384**	**95,289**
39,905	3,784	3,803	3,737	**3,775**	**53,416**	1,138	1,116	1,112	**1,122**	**96,411**
44,774	3,758	3,781	3,725	**3,755**	**57,171**	0,906	0,884	0,876	**0,889**	**97,299**
50,238	3,722	3,754	3,709	**3,728**	**60,899**	0,712	0,689	0,678	**0,693**	**97,992**
56,368	3,678	3,721	3,692	**3,697**	**64,596**	0,549	0,528	0,512	**0,530**	**98,522**
63,246	3,627	3,683	3,672	**3,661**	**68,257**	0,421	0,402	0,383	**0,402**	**98,924**
70,963	3,566	3,631	3,641	**3,613**	**71,869**	0,320	0,305	0,282	**0,302**	**99,226**
79,621	3,489	3,558	3,590	**3,546**	**75,415**	0,244	0,233	0,206	**0,227**	**99,454**
89,337	3,387	3,452	3,507	**3,449**	**78,864**	0,184	0,180	0,151	**0,171**	**99,625**
100,237	3,252	3,303	3,380	**3,312**	**82,175**	0,140	0,141	0,106	**0,130**	**99,755**
112,468	3,079	3,105	3,201	**3,128**	**85,304**	0,104	0,114	0,079	**0,098**	**99,853**
126,191	2,861	2,852	2,962	**2,891**	**88,195**	0,079	0,093	0,058	**0,076**	**99,929**
141,589	2,605	2,556	2,672	**2,611**	**90,806**	0,017	0,075	0,011	**0,039**	**99,968**
158,866	2,307	2,218	2,332	**2,286**	**93,092**	0,000	0,064	0,000	**0,016**	**99,984**
178,250	1,988	1,865	1,968	**1,940**	**95,032**	0,000	0,044	0,000	**0,016**	**100,000**
200,000	1,651	1,504	1,589	**1,581**	**96,613**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
224,404	1,315	1,160	1,223	**1,233**	**97,846**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
251,785	0,996	0,841	0,882	**0,905**	**98,751**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
282,508	0,700	0,571	0,591	**0,622**	**99,373**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
316,979	0,448	0,352	0,357	**0,389**	**99,762**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
355,656	0,264	0,158	0,153	**0,179**	**99,941**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
399,052	0,051	0,052	0,049	**0,059**	**100,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
447,744	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
502,377	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
563,677	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
632,456	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
709,627	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
796,214	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
893,367	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
1002,374	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
1124,683	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
1261,915	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
1415,892	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
1588,656	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
1782,502	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**
2000,000	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**	0,000	0,000	0,000	**0,000**	**100,000**

= krav til flyveaske, < 40% for Kategori N og < 12% for Kategori S. (Se teoriafsnit)

= tilnærmet D50 for hhv. ikke knust og knust aske.

Resultater fra pH- og ledningsevneforsøg

pH for hærdet mørtel

Recept	pH-værdi [pH]
(A)	**12,49**
(B)	**12,46**
(C)	**12,39**
(D)	**12,48**
(E)	**12,54**
(F)	**12,53**
(G)	**12,55**

pH og ledningsevne for slamaske*

Måling nr.	pH-værdi [pH]	Ledningsevne [mS/cm]
1	7,27	1,57
2	7,26	1,69
3	7,23	1,87
Gn.snit	**7,25 ± 0,02**	**1,71 ± 0,15**

* Fra screeningsprocess

Resultater fra forsøg med glødetab

Glødetab for slamaske

Forsøg nr.	Vægt af digel [g]	Før varme [g] (digel+aske)	(aske)	Efter varme [g] (digel+aske)	(aske)	Glødetab [%]
1	15,56	19,79	4,23	19,75	4,18	1,11
2	14,35	18,38	4,03	18,34	3,99	1,11
3	16,11	21,71	5,60	21,65	5,54	1,13
Gn.snit	15,34	19,96	4,62	19,91	4,57	**1,11 ± 0,02**

Resultater fra forsøg med vandindhold

Vandindhold

Forsøg nr.	Vægt af glas [g]	Før tørring [g] (aske+glas)	(aske)	Efter tørring [g] (aske+glas)	(aske)	(vand)	Vandindhold [%]
1	19,92	30,99	11,07	30,89	10,97	**0,10**	**0,91**
2	18,84	30,38	11,54	30,29	11,45	**0,09**	**0,79**
3	18,58	28,44	9,86	28,34	9,76	**0,10**	**1,02**
Gn.snit							**0,91 ± 0,12**

Resultater fra forsøg med vandopløselighed

Vandopløselighed i aske

Før varme [g] (filter)	(aske)	Efter varme [g] (filter+aske)	Tab [%]
10,11	100,00	108,49	**1,62**

Resultater fra oplukning af asken (ICP)

Grundstofindhold i slamaske [mg/kg]

	Opl 1	Opl 2	Opl 3	Gn.snit		%-vægt	
Aluminium (Al)	29702,10	44183,80	29599,10	**34495,00 ±**	**8390,90**	**3,4495 ±**	**0,8391**
Arsen (As)	0,00	0,00	0,00	**0,00 ±**	**0,00**	**0,0000 ±**	**0,0000**
Cadmium (Cd)	2,61	3,90	3,24	**3,25 ±**	**0,65**	**0,0003 ±**	**0,0001**
Chrom (Cr)	63,22	90,09	64,78	**72,70 ±**	**15,08**	**0,0073 ±**	**0,0015**
Kobber (Cu)	774,26	1105,04	785,15	**888,15 ±**	**187,91**	**0,0888 ±**	**0,0188**
Nikkel (Ni)	1,95	1,22	15,63	**6,26 ±**	**8,12**	**0,0006 ±**	**0,0008**
Bly (Pb)	111,67	160,79	115,54	**129,33 ±**	**27,31**	**0,0129 ±**	**0,0027**
Zink (Zn)	2687,71	4008,82	2704,35	**3133,63 ±**	**757,99**	**0,3134 ±**	**0,0758**
Natrium (Na)	2395,81	3329,51	2431,43	**2718,92 ±**	**529,09**	**0,2719 ±**	**0,0529**
Kalium (K)	5338,84	7598,97	5352,80	**6096,87 ±**	**1300,88**	**0,6097 ±**	**0,1301**
Fosfor (P)	99662,50	165843,00	97973,80	**121159,77 ±**	**38706,03**	**12,1160 ±**	**3,8706**
Magnesium (Mg)	11819,60	19922,10	12097,50	**14613,07 ±**	**4599,86**	**1,4613 ±**	**0,4600**

Resultater for indhold af vandopløselige anioner (IC)

Vandopløselige anioner [g/kg]

	Forsøg 1	Forsøg 2	Forsøg 3	Gn.snit	
Chlor (Cl)	26,4	26,0	26,0	**26,118**	**± 0,245**
Nitrat (NO_3)	33,4	33,1	34,1	**33,516**	**± 0,505**
Sulfat (SO_4)	8392,8	8528,9	8202,5	**8374,72**	**± 163,9**

B.3 Mørtelens fysiske egenskaber

Resultater for afbindingstid med Vicat-test

= Ingen ændring = Indledende afbindingstid = Afluttende afbindingstid

Resultater for afbindingstids-forsøg med Vicatronic

	Recept						
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
Tid	Needle drop						
[min]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0
10	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	38,1
20	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	39,9
30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	41,9
40	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	42,4
50	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	42,4
60	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	42,4
70	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	42,7
80	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	42,8
90	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	43,6
100	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	42,4
110	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	41,7
120	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	41,9
130	8,5	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	42,1
140	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,4	42,1
150	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	42,8
160	9,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	42,8
170	18,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	43,1
180	21,9	0,0	0,5	0,0	0,0	25,8	42,1
190	23,7	8,3	0,0	0,0	0,0	0,1	42,4
200	28,6	21,9	0,0	0,0	0,1	0,2	42,7
210	31,2	10,9	8,1	0,0	0,1	0,0	42,1
220	30,5	15,3	0,0	0,0	0,0	0,0	43,1
230	34,9	22,8	0,1	0,1	0,0	0,0	42,8
240	34,5	27,3	0,0	0,0	0,0	0,0	43,1
250	35,2	30,6	13,0	4,9	0,1	0,0	43,1
260	37,1	39,3	10,9	0,1	7,6	0,4	43,3
270	37,6	39,6	20,2	10,5	12,8	33,3	42,8
280	37,8	38,1	15,1	15,4	11,1	0,0	43,8
290	37,9	40,5	22,2	29,7	27,9	15,1	43,3
300	38,7	41,4	25,5	27,3	25,1	1,5	43,4
310	38,1	41,2	30,3	28,7	28,5	4,6	42,6
320	37,9	41,7	28,0	31,6	34,3	25,6	42,8
330	38,5	40,0	33,4	34,5	33,3	10,9	43,3
340	39,3	40,7	31,4	34,2	34,1	16,9	43,4
350	38,6	40,1	32,3	35,7	34,1	0,6	42,9
360	38,2	40,4	33,7	35,8	36,0	17,2	42,7
370	38,1	40,2	35,0	36,4	35,6	15,4	43,1
380	38,0	41,0	37,5	36,5	36,0	24,8	42,7
390	38,3	41,2	35,4	37,4	35,7	34,1	42,9
400	38,2	42,2	35,4	36,2	36,9	33,6	44,1
410	38,4	42,3	37,6	37,2	38,0	29,7	43,7
420	38,7	43,2	38,6	36,9	38,5	31,5	44,9
430	38,2	43,3	38,7	37,1	39,2	34,8	43,0
440	38,5	43,1	38,7	37,2	38,8	39,6	43,1
(…)	Fortsættes…						

	Recept						
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
Tid	Needle drop						
[min]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
(…)	… Fortsat						
450	39,0	42,8	39,3	38,1	39,1	35,6	42,4
460	39,0	42,9	38,6	38,3	39,0	34,2	42,7
470	38,7	42,7	39,1	38,7	39,2	36,4	42,7
480	39,1	42,9	39,5	38,7	38,6	37,7	41,7
490	39,3	43,4	39,5	38,9	39,3	38,5	42,2
500	39,4	43,4	39,3	39,4	39,3	38,1	44,2
510	39,6	43,4	39,5	39,6	40,3	36,6	42,3
520	39,6	43,4	39,4	39,6	39,6	37,5	42,6
530	39,9	43,6	39,5	39,8	39,3	37,2	42,8
540	39,8	43,5	39,5	39,8	39,8	37,7	43,3
550	39,6	43,0	38,9	39,5	39,4	38,5	43,1
560	39,7	42,6	38,9	39,7	39,3	39,5	42,2
570	39,9	43,0	38,8	39,7	39,6	38,8	42,5
580	39,5	43,1	38,6	39,6	39,3	39,5	43,3
590	39,4	42,8	38,6	39,6	39,6	39,8	43,6
600	39,0	42,8	38,7	39,3	39,2	38,4	42,7
610	39,4	42,5	38,9	39,2	39,5	38,6	42,8
620	39,2	43,1	39,2	39,2	39,4	38,0	42,9
630	39,0	43,1	39,6	39,0	39,6	39,0	42,4
640	38,8	43,3	39,6	39,1	39,2	38,1	42,7
650	39,4	43,2	39,6	39,3	39,8	38,4	42,8
660	39,2	43,1	39,2	39,3	39,8	38,7	42,4
670	39,3	42,8	39,7	39,5	39,7	39,9	43,2
680	39,2	43,1	39,8	39,8	40,0	38,9	42,2
690	39,6	42,8	39,9	39,9	40,1	39,9	42,1
700	39,8	43,1	39,9	40,2	39,9	39,3	42,4
710	40,1	43,4	39,7	40,3	40,4	39,8	42,7
720	40,1	43,1	39,6	40,2	39,9	39,5	43,2
730	39,9	42,8	39,5	40,3	40,1	39,6	42,5
740	39,9	42,8	39,4	40,3	39,9	40,1	43,0
750	39,6	42,9	39,2	40,2	39,9	40,6	43,7
760	39,5	43,4	39,0	39,8	39,9	38,6	41,9
770	39,5	43,5	39,0	39,7	39,5	38,9	42,5
780	39,7	43,6	39,1	39,4	39,7	39,8	42,9
790	39,3	43,3	39,2	39,4	39,8	39,3	42,5
800	39,2	43,2	39,7	39,5	39,9	39,5	42,4
810	39,0	42,9	39,5	39,9	39,9	38,6	42,4
820	39,3	42,9	39,7	39,9	40,0	39,2	42,7
830	39,6	42,9	39,8	40,3	40,3	39,9	42,1
840	39,9	43,2	39,9	40,2	40,0	39,4	42,5
850	40,2	42,9	39,6	40,1	40,0	40,1	42,3
860	39,8	42,5	39,7	40,0	39,8	39,5	42,8
870	39,3	43,2	39,1	39,6	39,9	39,3	42,5
880	39,0	43,0	39,6	39,5	39,9	39,2	42,4
890	39,5	42,8	39,8	39,6	40,2	39,2	42,3

Resultater fra sætmålsforsøg

Sætmål for mørtelblandinger [mm]

Recept	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Gn.snit
(A)	157	158	155	153	**156 ± 2**
(B)	178	181	181	180	**180 ± 1**
(C)	175	180	175	179	**177 ± 3**
(D)	151	153	155	151	**153 ± 2**
(E)	163	155	161	160	**160 ± 3**
(F)	162	167	164	164	**164 ± 2**
(G)	117	118	120	118	**118 ± 1**

Resultater fra forsøg med porøsitet/densitet

Porøsitet/Densitet af mørtelprøver efter 28 hærdedøgn

T_{vand} = 21°C	T_{rum} = 22°C			ρ_w = 1000 kg/m^3		Porøsitet	Densitet		
Prøve	m_{105} [kg]	m_{sw} [kg]	m_{ssd} [kg]	V [m^3]	$V_{på}$ [m^3]	P_d [m^3/m^3]	ρ_d [kg/m^3]	ρ_f [kg/m^3]	ρ_{ssd} [kg/m^3]
(A) 1	0,548	0,337	0,596	0,00026	0,00005	0,188	2112	2601	2300
(A) 2	0,552	0,340	0,602	0,00026	0,00005	0,190	2109	2602	2299
(A) 3	0,559	0,344	0,608	0,00026	0,00005	0,186	2120	2603	2305
Gn.snit recept (A)						**0,188 ± 0,002**	**2113 ± 5,52**	**2602 ± 0,81**	**2301 ± 3,55**
(B) 1	0,529	0,306	0,562	0,00026	0,00003	0,130	2067	2375	2197
(B) 2	0,531	0,307	0,562	0,00025	0,00003	0,122	2083	2371	2204
(B) 3	0,533	0,310	0,566	0,00026	0,00003	0,131	2080	2393	2211
Gn.snit recept (B)						**0,127 ± 0,005**	**2077 ± 8,04**	**2380 ± 11,9**	**2204 ± 6,96**
(C) 1	0,530	0,305	0,559	0,00025	0,00003	0,114	2087	2355	2201
(C) 2	0,530	0,305	0,559	0,00025	0,00003	0,113	2086	2352	2199
(C) 3	0,533	0,306	0,561	0,00026	0,00003	0,113	2088	2353	2201
Gn.snit recept (C)						**0,113 ± 0,001**	**2087 ± 1,23**	**2353 ± 1,41**	**2200 ± 1,09**

Resultater fra kapillarsugning

Kapillarsugning for mørtelprøver efter 28 hærdedøgn

Tid [min]	**0,00**	**1,00**	**2,00**	**4,00**	**8,00**	**16,00**	**32,00**	**60,00**	**120,00**	**240,00**	**h [m]**	**b [m]**	**A [m^2]**	**l [m]**
Tid [sqrt(s)]	**0,00**	**7,75**	**10,95**	**15,49**	**21,91**	**30,98**	**43,82**	**60,00**	**84,85**	**120,00**				
(A) 1, vægt [g]	545,39	546,00	546,21	546,43	546,72	547,07	547,57	548,22	549,25	550,70	0,160	0,040	0,0016	0,0409
Q(A)1 [kg/m2]	0,00	0,37	0,50	0,63	0,81	1,02	1,33	1,72	2,35	3,23				
(A) 2, vægt [g]	549,87	550,46	550,66	550,86	551,13	551,48	551,98	552,64	553,66	555,04	0,160	0,040	0,0016	0,0410
Q(A)2 [kg/m2]	0,00	0,36	0,48	0,60	0,77	0,98	1,28	1,68	2,31	3,14				
(A)f 3, vægt [g]	556,90	557,48	557,69	557,89	558,18	558,55	559,06	559,71	560,71	562,17	0,162	0,040	0,0017	0,0415
Q(A)3 [kg/m2]	0,00	0,35	0,48	0,60	0,77	1,00	1,30	1,70	2,30	3,18				
Gn.snit (A)	**0,00**	**0,36**	**0,49**	**0,61**	**0,78**	**1,00**	**1,30**	**1,70**	**2,32**	**3,19**				
Spredning, ±	**0,00**	**0,01**	**0,01**	**0,02**	**0,02**	**0,02**	**0,02**	**0,02**	**0,03**	**0,04**				
(B) 1, vægt [g]	525,97	526,64	526,82	527,12	527,44	527,89	528,59	529,32	530,49	532,12	0,160	0,040	0,0016	0,0410
Q(B)1 [kg/m2]	0,00	0,41	0,52	0,70	0,90	1,17	1,60	2,04	2,76	3,75				
(B) 2, vægt [g]	524,90	525,55	525,73	526,00	526,37	526,78	527,46	528,13	529,23	530,75	0,160	0,040	0,0016	0,0410
Q(B)2 [kg/m2]	0,00	0,40	0,51	0,67	0,90	1,15	1,56	1,97	2,64	3,57				
(B) 3, vægt [g]	528,32	528,94	529,14	529,41	529,84	530,36	531,27	532,17	533,87	536,25	0,160	0,040	0,0016	0,0410
Q(B)3 [kg/m2]	0,00	0,38	0,50	0,66	0,93	1,24	1,80	2,35	3,38	4,84				
Gn.snit (B)	**0,00**	**0,39**	**0,51**	**0,68**	**0,91**	**1,19**	**1,65**	**2,12**	**2,93**	**4,05**				
Spredning, ±	**0,00**	**0,02**	**0,01**	**0,02**	**0,02**	**0,05**	**0,13**	**0,20**	**0,40**	**0,69**				
(C) 1, vægt [g]	536,82	537,51	537,81	538,00	538,35	538,77	539,51	540,35	541,71	543,60	0,160	0,040	0,0016	0,0410
Q(C)1 [kg/m2]	0,00	0,42	0,60	0,72	0,93	1,19	1,64	2,15	2,98	4,13				
(C) 2, vægt [g]	537,57	538,12	538,35	538,49	538,75	539,11	539,61	540,34	541,40	542,84	0,160	0,040	0,0016	0,0410
Q(C)2 [kg/m2]	0,00	0,34	0,48	0,56	0,72	0,94	1,24	1,69	2,34	3,21				
(C) 3, vægt [g]	536,01	536,72	537,01	537,23	537,61	538,12	538,92	539,81	541,27	543,07	0,160	0,040	0,0016	0,0410
Q(C)3 [kg/m2]	0,00	0,43	0,61	0,74	0,98	1,29	1,77	2,32	3,21	4,30				
Gn.snit (C)	**0,00**	**0,40**	**0,56**	**0,67**	**0,88**	**1,14**	**1,55**	**2,05**	**2,84**	**3,88**				
Spredning, ±	**0,00**	**0,05**	**0,08**	**0,10**	**0,14**	**0,18**	**0,28**	**0,33**	**0,45**	**0,59**				

Resultater fra trykstyrketests

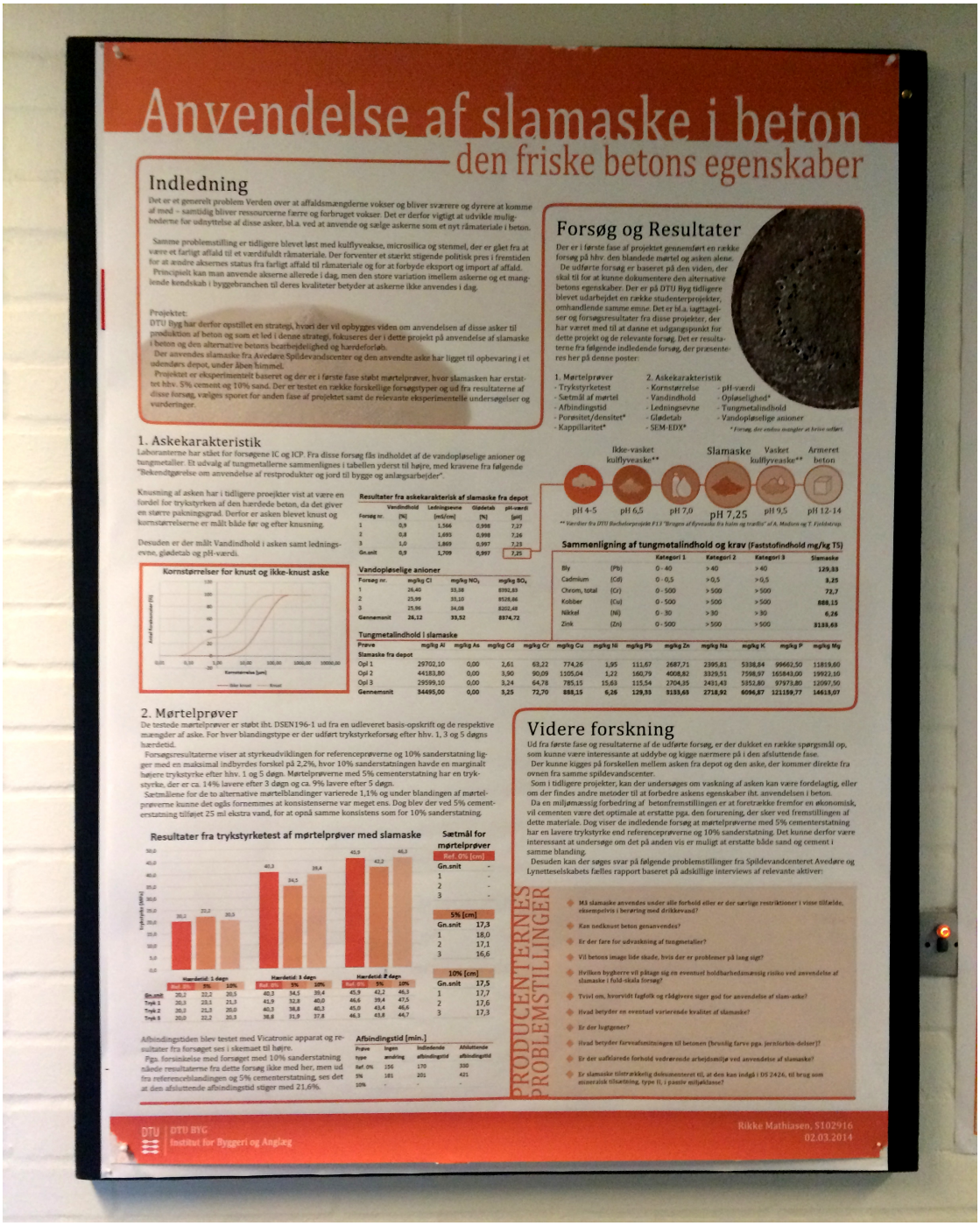
Trykstyrketest af mørtelprøver

	Geometri						Forsøgsresultater				
Recept	Bredde [mm]	Højde [mm]	Længde [mm]	Rumfang [m3]	Vægt [g]	Densitet [kg/m^3]	Tryk 1 [kN]	Tryk 2 [kN]	Gn.snit [kN]	Tal der er fjernet	Trykstyrke [Mpa]
(A)1.1	41,3	40,3	160,8	0,2676	575,70	2151,07	34	31	32,5		20,3
(A)1.2	41,0	40,2	160,8	0,2650	572,31	2159,41	35	30	32,5		20,3
(A)1.3	39,0	40,0	160,0	0,2496	564,20	2260,42	30	34	32,0		20,0
Gn.snit (A) 1 hærdedøgn:									**32,3**		**20,2 ± 0,2**
(A)2.1	40,1	41,5	160,6	0,2673	590,70	2210,19	47	53	50,0		31,3
(A)2.2	39,9	40,7	160,4	0,2605	589,95	2264,87	44	46	45,0		28,1
(A)2.3	40,1	41,1	160,9	0,2652	588,25	2218,30	41	49	45,0		28,1
Gn.snit (A) 2 hærdedøgn:									**46,7**		**29,2 ± 1,8**
(A)3.1	40,0	40,0	161,0	0,2576	586,00	2274,84	39	67	67,0	39,0	41,9
(A)3.2	40,0	40,0	161,0	0,2576	585,00	2270,96	64	65	64,5		40,3
(A)3.3	40,0	40,0	161,0	0,2576	580,00	2251,55	58	66	62,0		38,8
Gn.snit (A) 3 hærdedøgn:									**64,5**		**40,3 ± 1,6**
(A)4.1	40,0	40,1	160,7	0,2576	586,34	2276,43	55	60	57,5		35,9
(A)4.2	40,1	40,6	160,6	0,2615	587,21	2245,83	59	62	60,5		37,8
(A)4.3	39,9	40,9	160,7	0,2619	586,47	2239,06	55	59	57,0		35,6
Gn.snit (A) 4 hærdedøgn:									**58,3**		**36,5 ± 1,2**
(A)5.1	40,2	40,2	160,9	0,2600	577,00	2219,05	73	76	74,5		46,6
(A)5.2	39,7	40,0	160,8	0,2554	574,00	2247,89	72	72	72,0		45,0
(A)5.3	39,8	40,0	160,6	0,2557	573,00	2241,12	75	73	74,0		46,3
Gn.snit (A) 5 hærdedøgn:									**73,5**		**45,9 ± 0,8**
(B)1.1	40,0	40,0	161,0	0,2576	570,00	2212,73	38	36	37,0		23,1
(B)1.2	40,0	40,0	161,0	0,2576	569,00	2208,85	34	34	34,0		21,3
(B)1.3	40,0	40,0	161,0	0,2576	573,00	2224,38	37	34	35,5		22,2
Gn.snit (B) 1 hærdedøgn:									**35,5**		**22,2 ± 0,9**
(B)3.1	40,0	40,0	161,0	0,2576	596,40	2315,22	57	48	52,5		32,8
(B)3.2	40,0	40,0	161,0	0,2576	599,50	2327,25	64	60	62,0		38,8
(B)3.3	40,0	40,0	161,0	0,2576	594,50	2307,84	51	41	51,0	41,0	31,9
Gn.snit (B) 3 hærdedøgn:									**55,2**		**34,5 ± 3,7**
(B)5.1	40,0	40,0	161,0	0,2576	581,50	2257,38	57	69	63,0		39,4
(B)5.2	40,0	40,0	161,0	0,2576	580,90	2255,05	67	72	69,5		43,4
(B)5.3	40,0	40,0	161,0	0,2576	576,60	2238,35	67	73	70,0		43,8
Gn.snit (B) 5 hærdedøgn:									**67,5**		**42,2 ± 2,4**
(C)1.1	40,0	40,0	161,0	0,2576	586,00	2274,84	34	34	34,0		21,3
(C)1.2	40,0	40,0	161,0	0,2576	585,00	2270,96	35	29	32,0		20,0
(C)1.3	40,0	40,0	161,0	0,2576	580,00	2251,55	34	31	32,5		20,3
Gn.snit (C) 1 hærdedøgn:									**32,8**		**20,5 ± 0,7**
(C)3.1	40,0	40,0	161,0	0,2576	573,80	2227,48	64	64	64,0		40,0
(C)3.2	40,0	40,0	161,0	0,2576	572,60	2222,83	65	64	64,5		40,3
(C)3.2	40,0	40,0	161,0	0,2576	570,20	2213,51	63	58	60,5		37,8
Gn.snit (C) 3 hærdedøgn:									**63,0**		**39,4 ± 1,4**
(C)5.1	40,0	40,0	161,0	0,2576	579,60	2250,00	53	76	76,0	53,0	47,5
(C)5.2	40,0	40,0	161,0	0,2576	580,20	2252,33	75	74	74,5		46,6
(C)5.3	40,0	40,0	161,0	0,2576	579,50	2249,61	72	71	71,5		44,7
Gn.snit (C) 5 hærdedøgn:									**74,0**		**46,3 ± 1,4**
(D)5.1	40,0	40,0	161,0	0,2576	579,60	2250,00	69	56	56,0	69,0	35,0
(D)5.2	40,0	40,0	161,0	0,2576	580,20	2252,33	67	63	65,0		40,6
(D)5.3	40,0	40,0	161,0	0,2576	579,50	2249,61	61	63	62,0		38,8
Gn.snit (D) 5 hærdedøgn:									**61,0**		**38,1 ± 2,9**
(E)5.1	40,0	40,0	161,0	0,2576	579,60	2250,00	75	69	72,0		45,0
(E)5.2	40,0	40,0	161,0	0,2576	580,20	2252,33	65	73	69,0		43,1
(E)5.3	40,0	40,0	161,0	0,2576	579,50	2249,61	53	74	74,0	53,0	46,3
Gn.snit (E) 5 hærdedøgn:									**71,7**		**44,8 ± 1,6**
(F)5.1	40,0	40,0	161,0	0,2576	579,60	2250,00	18	18	18,0		11,3
(F)5.2	40,0	40,0	161,0	0,2576	580,20	2252,33	18	23	18,0		11,3
(F)5.3	40,0	40,0	161,0	0,2576	579,50	2249,61	22	23	22,0		13,8
Gn.snit (F) 5 hærdedøgn:									**19,3**		**12,1 ± 1,4**
(G)5.1	40,0	40,0	161,0	0,2576	579,60	2250,00	48	57	52,5		32,8
(G)5.2	40,0	40,0	161,0	0,2576	580,20	2252,33	54	53	53,5		33,4
(G)5.3	40,0	40,0	161,0	0,2576	579,50	2249,61	55	55	55,0		34,4
Gn.snit (G) 5 hærdedøgn:									**53,7**		**33,5 ± 0,8**

B.4 Posterpræsentation

Da posteren er lavet til A0-format, kan brødteksten være svær at læse i A4-format. Der er i teksten blot præsenteret problemstilling og resultater, som også indgår i rapporten, hvorfor det ikke vil være nødvendigt at læse alt hvad der står på posteren.

(A4-format på næste side)



Anvendelse af slamaske i beton

den friske betons egenskaber

Indledning

Det er et generelt problem Verden over at affaldsmængderne vokser og bliver sværere og dyrere at komme af med – samtidig bliver ressourcerne færre og forbruget vokser. Det er derfor vigtigt at udvikle mulighederne for udnyttelse af disse asker, bl.a. ved at anvende og sælge askerne som et nyt råmateriale i beton.

Samme problemstilling er tidligere blevet løst med kulflyveakse, microsilica og stenmel, der er gået fra at være et farligt affald til et værdifuldt råmateriale. Der forventer et stærkt stigende politisk pres i fremtiden for at ændre aksernes status fra farligt affald til råmateriale og for at forbyde eksport og import af affald.

Principielt kan man anvende akserne allerede i dag, men den store variation imellem askerne og et manglende kendskab i byggebranchen til deres kvaliteter betyder at askerne ikke anvendes i dag.

Projektet:

DTU Byg har derfor opstillet en strategi, hvori der vil opbygges viden om anvendelsen af disse asker til produktion af beton og som et led i denne strategi, fokuseres der i dette projekt på anvendelse af slamaske i beton og den alternative betons bearbejdelighed og hærdeforløb.

Der anvendes slamaske fra Avedøre Spildevandscenter og den anvendte aske har ligget til opbevaring i et udendørs depot, under åben himmel.

Projektet er eksperimentelt baseret og der er i første fase støbt mørtelprøver, hvor slamasken har erstattet hhv. 5% cement og 10% sand. Der er testet en række forskellige forsøgstyper og ud fra resultaterne af disse forsøg, vælges sporet for anden fase af projektet samt de relevante eksperimentelle undersøgelser og vurderinger.

Forsøg og Resultater

Der er i første fase af projektet gennemført en række forsøg på hhv. den blandede mørtel og asken alene.

De udførte forsøg er baseret på den viden, der skal til for at kunne dokumentere den alternative betons egenskaber. Der er på DTU Byg tidligere blevet udarbejdet en række studenterprojekter, omhandlende samme emne. Det er bl.a. iagttagelser og forsøgsresultater fra disse projekter, der har været med til at danne et udgangspunkt for dette projekt og de relevante forsøg. Det er resultaterne fra følgende indledende forsøg, der præsenteres her på denne poster:

1. Mørtelprøver
- Trykstyrketest
- Sætmål af mørtel
- Afbindingstid
- Porøsitet/densitet*
- Kappillaritet*

2. Askekarakteristik
- Kornstørrelse
- Vandindhold
- Ledningsevne
- Glødetab
- SEM-EDX*
- pH-værdi
- Opløselighed*
- Tungmetalindhold
- Vandopløselige anioner

* Forsøg, der endnu mangler at blive udført.

1. Askekarakteristik

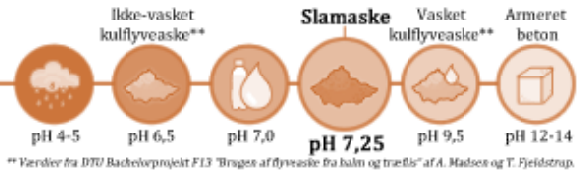
Laboranterne har stået for forsøgene IC og ICP. Fra disse forsøg fås indholdet af de vandopløselige anioner og tungmetaller. Et udvalg af tungmetallerne sammenlignes i tabellen yderst til højre, med kravene fra følgende "Bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter og jord til bygge og anlægsarbejder".

Knusning af asken har i tidligere proejkter vist at være en fordel for trykstyrken af den hærdede beton, da det giver en større pakningsgrad. Derfor er asken blevet knust og kornstørrelserne er målt både før og efter knusning.

Desuden er der målt Vandindhold i asken samt ledningsevne, glødetab og pH-værdi.

Resultater fra askekarakterisk af slamaske fra depot

Forsøg nr.	Vandindhold [%]	Ledningsevne [mS/cm]	Glødetab [%]	pH-værdi [pH]
1	0,9	1,566	0,998	7,27
2	0,8	1,693	0,998	7,26
3	1,0	1,869	0,997	7,23
Gn.snit	0,9	1,709	0,997	7,25



** Værdier fra DTU Bachelorprojekt F13 "Bruges af flyveaske fra halm og træflis" af A. Madsen og T. Fjeldstrup.

Vandopløselige anioner

Forsøg nr.	mg/kg Cl	mg/kg NO_3	mg/kg SO_4
1	26,40	33,38	8392,83
2	25,99	33,10	8528,86
3	25,96	34,08	8202,48
Gennemsnit	26,12	33,52	8374,72

Sammenligning af tungmetalindhold og krav (Faststofindhold mg/kg TS)

		Kategori 1	Kategori 2	Kategori 3	Slamaske
Bly	(Pb)	0 - 40	> 40	> 40	129,33
Cadmium	(Cd)	0 - 0,5	> 0,5	> 0,5	3,25
Chrom, total	(Cr)	0 - 500	> 500	> 500	72,7
Kobber	(Cu)	0 - 500	> 500	> 500	888,15
Nikkel	(Ni)	0 - 30	> 30	> 30	6,26
Zink	(Zn)	0 - 500	> 500	> 500	3133,63

Tungmetalindhold i slamaske

Prøve	mg/kg Al	mg/kg As	mg/kg Cd	mg/kg Cr	mg/kg Cu	mg/kg Ni	mg/kg Pb	mg/kg Zn	mg/kg Na	mg/kg K	mg/kg P	mg/kg Mg
Slamaske fra depot												
Opl 1	29702,10	0,00	2,61	63,22	774,26	1,95	111,67	2687,71	2395,81	5338,84	99662,50	11819,60
Opl 2	44183,80	0,00	3,90	90,09	1105,04	1,22	160,79	4008,82	3329,51	7598,97	165843,00	19922,10
Opl 3	29599,10	0,00	3,24	64,78	785,15	15,63	115,54	2704,35	2431,43	5352,80	97973,80	12097,50
Gennemsnit	34495,00	0,00	3,25	72,70	888,15	6,26	129,33	3133,63	2718,92	6096,87	121159,77	14613,07

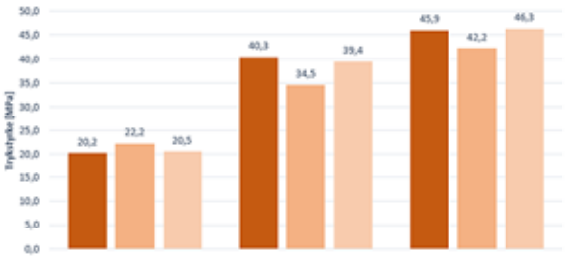
2. Mørtelprøver

De testede mørtelprøver er støbt iht. DSEN196-1 ud fra en udleveret basis-opskrift og de respektive mængder af aske. For hver blandingstype er der udført trykstyrkeforsøg efter hhv. 1, 3 og 5 døgns hærdetid.

Forsøgsresultaterne viser at styrkeudviklingen for referenceprøverne og 10% sanderstatning ligger med en maksimal indbyrdes forskel på 2,2%, hvor 10% sanderstatningen havde en marginalt højere trykstyrke efter hhv. 1 og 5 døgn. Mørtelprøverne med 5% cementerstatning har en trykstyrke, der er ca. 14% lavere efter 3 døgn og ca. 9% lavere efter 5 døgn.

Sætmålene for de to alternative mørtelblandinger varierede 1,1% og under blandingen af mørtelprøverne kunne det ogås fornemmes at konsistenserne var meget ens. Dog blev der ved 5% cementerstatning tilføjet 25 ml ekstra vand, for at opnå samme konsistens som for 10% sanderstatning.

Resultater fra trykstyrketest af mørtelprøver med slamaske



	Hærdetid: 1 døgn			Hærdetid: 3 døgn			Hærdetid: 5 døgn		
	Ref. 0%	5%	10%	Ref. 0%	5%	10%	Ref. 0%	5%	10%
Gn.snit	20,2	22,2	20,5	40,3	34,5	39,4	45,9	42,2	46,3
Tryk 1	20,3	23,1	21,3	41,9	32,8	40,0	46,6	39,4	47,5
Tryk 2	20,3	21,3	20,0	40,3	38,8	40,3	45,0	43,4	46,6
Tryk 3	20,0	22,2	20,3	38,8	31,9	37,8	46,3	43,8	44,7

Sætmål for mørtelprøver

Ref. 0% [cm]	
Gn.snit	-
1	-
2	-
3	-

5% [cm]	
Gn.snit	17,3
1	18,0
2	17,1
3	16,6

10% [cm]	
Gn.snit	17,5
1	17,7
2	17,6
3	17,3

Afbindingstiden blev testet med Vicatronic apparat og resultater fra forsøget ses i skemaet til højre.

Pga. forsinkelse med forsøget med 10% sanderstatning nåede resultaterne fra dette forsøg ikke med her, men ud fra referenceblandingen og 5% cementerstatning, ses det at den afsluttende afbindingstid stiger med 21,6%.

Afbindingstid [min.]

Prøve type	Ingen ændring	Indledende afbindingstid	Afsluttende afbindingstid
Ref. 0%	156	170	330
5%	181	201	421
10%	-	-	-

Videre forskning

Ud fra første fase og resultaterne af de udførte forsøg, er der dukket en række spørgsmål op, som kunne være interessante at uddybe og kigge nærmere på i den afsluttende fase.

Der kunne kigges på forskellen mellem asken fra depot og den aske, der kommer direkte fra ovnen fra samme spildevandscenter.

Som i tidligere projekter, kan der undersøges om vaskning af asken kan være fordelagtig, eller om der findes andre metoder til at forbedre askens egenskaber iht. anvendelsen i beton.

Da en miljømæssig forbedring af betonfremstillingen er at foretrække fremfor en økonomisk, vil cementen være det optimale at erstatte pga. den forurening, der sker ved fremstillingen af dette materiale. Dog viser de indledende forsøg at mørtelprøverne med 5% cementerstatning har en lavere trykstyrke end referenceprøverne og 10% sanderstatning. Det kunne derfor være interessant at undersøge om det på anden vis er muligt at erstatte både sand og cement i samme blanding.

Desuden kan der søges svar på følgende problemstillinger fra Spildevandcenteret Avedøre og Lynetteselskabets fælles rapport baseret på adskillige interviews af relevante aktiver:

PRODUCENTERNES PROBLEMSTILLINGER

- Må slamaske anvendes under alle forhold eller er der særlige restriktioner i visse tilfælde, eksempelvis i berøring med drikkevand?
- Kan nedknust beton genanvendes?
- Er der fare for udvaskning af tungmetaller?
- Vil betons image lide skade, hvis der er problemer på lang sigt?
- Hvilken bygherre vil påtage sig en eventuel holdbarhedsmæssig risiko ved anvendelse af slamaske i fuld-skala forsøg?
- Tvivl om, hvorvidt fagfolk og rådgivere siger god for anvendelse af slam-aske?
- Hvad betyder en eventuel varierende kvalitet af slamaske?
- Er der lugtgener?
- Hvad betyder farveafsmitningen til betonen (brunlig farve pga. jernforbin-delser)?
- Er der uafklarede forhold vedrørende arbejdsmiljø ved anvendelse af slamaske?
- Er slamaske tilstrækkelig dokumenteret til, at den kan indgå i DS 2426, til brug som mineralsk tilsætning, type II, i passiv miljøklasse?

DTU | DTU BYG
Institut for Byggeri og Anlæg

Rikke Mathiasen, S102916
02.03.2014

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