

# Slamaske I beton

Undersøgelse af anvendelsesmuligheder



Asger B. Carlsen – s093398  
Søren R. Petersen – s093394

BEng

Department of Civil Engineering

DTU Civil Engineering  
Januar 2013

## Forord

Denne rapport tager udgangspunkt i betonteori og resultaterne fra forsøg udført i sammenhæng med et bachelorprojekt foretaget i perioden 1. september 2012 til 7. januar 2013. Projektet er udført på BYG DTU, Danmarks Tekniske Universitet, og er blevet vejledt af Lisbeth M. Ottosen og Per Goltermann. Bachelorprojektet er sat til 20 ECTS point.

Rapporten er udarbejdet med henblik på at undersøge de muligheder, der kan ligge gemt i anvendelse af slamasker i beton.

I forbindelse med udførelsen af projektet skal der rettes en stor tak til Lisbeth M. Ottosen for sparring og vejledning igennem hele projektperioden. Derudover rettes der ligeledes en stor tak til laboranterne Ebba Cederberg Schnell, Christina Maria Winther Dufke og Sabrina Madsen for at bistå og vejlede ved forsøgene.

Rapporten er udført som et samarbejde imellem Asger B. Carlsen & Søren R. Petersen.

DTU, Kongens Lyngby, d. 7. januar 2013

---

Asger B. Carlsen

S093398

---

Søren R. Petersen

S093394

## Sammendrag

### Formål med rapport

Denne rapport omhandler brugen af slammaske i betonblandinger med henblik på at optimere enten betonens styrke, dens sammensætning af tilslag og tilsætningsstoffer eller forbedre bindingerne imellem tilslagene, som det tidligere er gjort med f.eks. flyveaske fra kulforbrænding. Der bliver i denne rapport fokuseret på en slammaske fra Lynettefællesskabet I/s, der har ligget i depot i minimum 2 år.

### Baggrundsviden

De karakteristiske egenskaber af slammaske skal fastslås for at sikre, at den ikke vil være skadelig for miljøet og dets omgivelser. Saltindholdet, samt typer og mængden af tungmetaller er særligt vigtige, da saltene kan medfører korrosion i en armeret betonkonstruktion, og tungmetaller kan være farlige for det omkringværende miljø. Betonens sammensætning og indholdets egenskaber udgør grundlaget for, hvor god en beton der opnås, enten med henblik på f.eks. bearbejdelighed eller styrken. Der kan foruden de normale tilslag tilsættes puzzolaner og dette kan være med til påvirke styrken, pakningsgraden og vand/cement – forholdet ( $v/c$  – forholdet).

Trykstyrken i en betonblanding afhænger bl.a. af  $v/c$  – forholdet, luftindholdet og porøsiteten. Den mængde vand som cement og eventuelle puzzolaner ikke reagerer med, vil fordampe og efterlader små hulrum i betonen. Hulrummene skaber et større overfaldeareal, hvilket medfører forhøjet porøsitet og lavere styrke. Et højt  $v/c$  – forhold skaber også en lavere trykstyrke. Dette afspejler sig i Bolomey's formel:

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

Tidligere forskning har vist, at bl.a. flyveaske fra kulforbrænding er velegnet til brug i beton. Denne flyveaske har en puzzolanisk effekt, og kan ydermere pakke blandingen bedre. Disse egenskaber undersøges i asken fra Lynetten. Der udvikles recepter, der bedst muligt bruger de egenskaber, Lynetteasken besidder.

### Undersøgelser

Der er i dette projekt foretaget forsøg, der skal karakterisere askens egenskaber, samt belyse om asken har nogen indvirkning på densiteten, porøsiteten og styrken af mørtelblandinger. Mørtelblandingerne bliver testet med forskellige sammensætninger af tilslag og tilsætningsstoffer, samt måden asken er bearbejdet inden iblandingen.

## Styrkeudvikling af mørtelprøver med slamaske

Resultaterne fra laboratorieforsøgene, der skal fastlægge askens karakteristik, sammenlignes med en aske fra Lynettefælleskabet I/s, som ikke har ligget i depot og med grænseværdi for mængden af chloridindhold og tungmetaller. Der er tryktestet 7 døgns mørtelprøver, som indikerer, at asken har en indvirkning på styrkeudviklingen. Nogle af de prøver der er tilsat aske, og har samme mængde cement som referencen, opnår mindre styrke. Dette fører til flere prøvestøbninger med højere askeindhold for at undersøge, om asken har puzzolanske egenskaber. På baggrund af disse diskuteres det, om asken har en langsomvirkende puzzolaneffekt. Dernæst bliver der foretaget forsøg med en mindre asketilsætning, hvor asken også bliver knust for at undersøge, om asken har effekt på pakningsgraden. Densitets- og kapilarsugnings forsøg underbygger tesen om en øget pakningsgrad. Det viser sig, at prøver med knust aske opnår højere styrke end hidtil forsøgte blandinger, men at der i udvikling fra 7. – 14. hærdedøgn ikke sker nogen særlig forøgelse af styrken. Dette sker dog i udvikling fra det 14. – 23. hærdedøgn. Derfor diskuteres det i rapporten, om prøverne med knust aske starter hydratiseringen hurtigere, og efterfølgende om asken har en langsomvirkende puzzolansk effekt, og at det er de to egenskaber, der i højere grad end en bedre pakning giver den højere styrke. Endeligt undersøges v/c – forholdet i forhold til styrken i prøverne for at fastslå, om asken bidrager til denne. Til sidst bliver der vha. Bolomey's formel udregnet cementbesparelser.

## Knusning af asken forbedrer styrkeudviklingen

Grænseværdierne for nogle tungmetaller overholdes ikke for asken (Cadmium, Kobber, Nikkel, Bly og Zink) . Dette anses dog ikke som noget væsentligt problem, da udvaskningstests viser, at disse tungmetaller bliver bundet i mørtlen. Ud fra undersøgelser af chloridindholdet, konkluderes det, at dette ikke er for højt til brug i beton. Det kan på baggrund af styrkeudviklingen konkluderes, at asken har en langsomvirkende puzzolansk effekt, men at denne dog er mindre end cementens. Det viser sig, at et for højt askeindhold ikke er gavnligt for mørtelprøverne efter 7-hærdedøgn. Det forsøges at efterligne størrelsen på flyveaskens partikler, ved knusning af Lynette-asken, for at opnå en højere pakningsgrad. Det resulterer i, at prøverne med knust aske opnår højere styrke end alle andre prøver. Ligeledes er densiteten på disse højere end referencen, hvilket indikerer højere pakningsgrad. Ligeledes opsuger prøverne med knust aske mindre vand end referencerne ved kapilarsugningsforsøg, hvilket skyldes en mindre porestruktur. Med udgangspunkt i styrkeudvikling og besparelsoverslagene findes prøverne med den tørre knuste aske bedst til brug i beton.

## Summary

### The purpose of the report

This report deals with the use of sewage sludge ash in concrete. The idea is to improve either the strength of the concrete, its composition of aggregates, or improve the bindings between the aggregates which has already been tested e.g. with flyash from coalincineration. This report focus on sewage sludge ash from 'Lynettefællesskabet' I/S that has been stored for at least two years.

### Background knowledge

The characteristic qualities of sewage sludge ashes must be determined to ensure that it will not harm the environment and the surroundings. The content of salt, and the quantity of heavy metals are really important as the salt might cause corrosion in a reinforced concrete structure and heavy metals might be dangerous and therefore harmful to the neighboring environment. The composition of the concrete and the qualities of the content make up the foundation of the quality you will get of the concrete, with a view to either e.g. its ability to adapt or its strength. In addition to the ordinary aggregates pozzolanes can be added and this might have an impact on the strength, the degree of packing and the water and cement ratio (water/cement-ratio).

The compressive strength of concrete depends on – among other things the water/cement-ratio, the content of air and porosity. The amount of water that cement and potential pozzolanes will not react to, will evaporate and leave little hollows in the concrete. The hollows will create a large surface area which will cause increased porosity and less strength. A high water/cement-ratio will also create a low compressive strength. This is shown in Bolomey's formula:

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

Research made earlier has shown that among other things flyash from coalincineration is suitable to use in concrete. This flyash has a pozzolonian effect and is able to pack the concrete mix very well. These qualities are examined in the ashes from Lynetten. Prescriptions that use the qualities the Lynette-ash has will be developed to optimize the use of these qualities.

### Examinations

In this project tests have been made to characterize the characteristics of the ash and to enlighten whether the ash has any impact on the density, porosity or the mortarmix. The mortar composition will be tested with different compositions, with different treatment of the ash before it is added to the mix.

## **Development of mortar tests with sewage sludge ash**

The results from the lab tests which will determine the characteristics of the ash will be compared with ash from 'Lynettefællesskabet' I/S, which has not been stored, and also compared with the limit value of the amount of chloride content and heavy metals. Seven day old mortar specimens have been pressure-tested which indicates that the ash has an impact on the development of the strength. Some specimens into which ash has been added, and has the same amount of cement, as the reference, results in less strength. This leads us to more specimen castings with a higher content of ash to examine if the ash has pozzolanic qualities. On the basis of these tests it is discussed whether the ash has a slow acting pozzolan. Then specimens with less ash added will be made, and in some of these specimens the ash will be milled to examine whether the milled ash has an effect on the degree of packing.

The tests of density and the capillary suction properties of the specimens, support the thesis of an increased degree of packing. The report concludes that specimens with milled ash get a higher strength than previous tested compositions, but in the development from day 7th to the 14th day of hardening there was no significant improvement of the strength. However, this happens in the development period from day 14th to the 23rd day of hardening. Therefore it is discussed in the report if the specimens, with the milled ash, start to hydrate faster and if subsequently whether the ash has a slowly acting pozzolanic effect and whether it is these two elements together and not only a good packing that gives it a higher strength. Finally the report examines the water/cement-ratio in relation to the strength in the tests to determine if the ash contributes to this. Using Bolomey's formula calculations on the cement savings are made.

## **Milling the ash improves the development of strength**

The limit values for some heavy metals are not kept concerning the ash (cadmium, copper, nickel, lead and zinc). However, this is not viewed as a serious problem because leaching tests showed that these heavy metals are bound in the mortar. From examinations of the chloride content, the report concludes that the content is allowable, when compared to regulations. Against a background of strength development the report concludes that the ash does have a slowly acting pozzolanic effect, but that this effect is less than that of cement's. Through the project, it has been shown that if the content of the ash is too high this has a bad effect on the mortar specimens tested after seven days of hardening. We try to imitate the ash-particles of flyash, to get the same packing ability. This report concludes that the specimens with milled ash get a higher strength than all the other recipes and the density of these are also higher than the reference which indicates a higher degree of packing. Likewise the specimens with milled ash absorb less water than the references, when testing the specimens capillary suction properties, which is probably due to a minor

capillary structure. From our point of view dealing with development of strength and our calculation of savings, we find that the specimens with the dry and milled ash are most suitable to use in concrete.

## Indholdsfortegnelse

1	Introduktion.....	1
2	Teori.....	3
2.1	Karakteristik af aske.....	3
2.2	Beton - Sammensætning og egenskaber.....	5
2.3	Styrke.....	6
2.4	Flyveaske og mikrosilica.....	8
2.5	Slamasker i beton.....	8
2.6	Tidligere forskning.....	9
3	Beskrivelse af eksperimentelt arbejde.....	12
3.1	Karakteristik af asken.....	13
3.2	Mørtelstøbninger.....	14
3.3	Porøsitet og kapillarsugning.....	16
3.4	Trykstyrketest.....	16
3.5	Udvaskning af tungmetaller.....	17
4	Resultater og Diskussion.....	17
4.1	Laboratorieforsøg.....	18
4.2	Undersøgelse af saltindhold i asken.....	19
4.3	Askens indhold af tungmetaller.....	22
4.4	Grafisk overblik over tryktest og udvikling af nye recepter.....	26
4.5	SEM-billeder af almindelig aske.....	27
4.6	7-døgns trykstyrker på basisrecepter.....	27
4.7	Puzzolaneffekt.....	28
4.8	Brug af aske til at øge pakningsgraden af mørtlen.....	30
4.9	Tør aske i forhold til fugtig aske.....	35
4.10	Densitet.....	35
4.11	Porøsitet.....	36



4.12	Kapilarsugning .....	39
4.13	Vand/cement-forholdet .....	39
4.14	Fugtoptag.....	40
4.15	Asken som kommercielt tilsætningsstof eller erstatningsstof .....	41
4.16	Videre forskning .....	43
5	Konklusion .....	45
6	Referenceliste.....	46
7	Bilagsliste .....	48

## 1 Introduktion

Flere ulande, eller tidligere ulande, er i en rivende udvikling, hvilket tydeliggøres ved at landskabet i disse lande ændres. Infrastrukturer udbygges, nye kæmpe komplekser skyder op, og beton er et af de foretrukne byggematerialer. Alene i Danmark bruges der mere end 2 millioner m<sup>3</sup> beton.<sup>1</sup> Cementen, der er nødvendig for at blande disse store mængder beton, fremstilles ved meget høje temperaturer. Disse temperaturer opnås ved afbrænding af store mængder fossile brændsler, der resulterer i store mængder CO<sub>2</sub>. Udledningen er så stor, at den står for 5% af den samlede globale CO<sub>2</sub>-udledning<sup>2</sup>. Udledningen er alarmerende, så der bør gøres tiltag for at finde alternativer til cementen.

Der produceres hvert år mange ton slamaske, som skal deponeres, og der betales store summer for at få arbejdet gjort. Deponi koster 375 kr. pr ton<sup>3</sup>, penge der kan spares ved at anvende asken frem for at deponere den.

Tidligere har det vist sig muligt at anvende slamaske i beton. Blandt andet i bioaske til beton – en håndbog fra 2007 har spildevandscentret Avedøre I/s, Lynettefællesskabet I/s, betonproducenten Unicon A/s og betonafdelingen på Teknologisk Institut forsøgt dette. I dette projekt testes netop en aske fra Lynettefællesskabet I/s, som har ligget i depot i minimum 2 år. Desuden har de samme selskaber udarbejdet en lægmands rapport, der forsøger at fastslå de kemiske og fysiske egenskaber.

I dette projekt undersøges det, om en given slamaske har egenskaber, der kan være med at til forbedre en betonblanding - enten ved øget styrke, som erstatningsprodukt for f.eks. cement eller som bindemiddel, ligesom det tidligere er gjort med flyveaske og microsilica. Ved brugen af slamaske i beton, opnår der nu en økonomisk gevinst, da man nu står med et produkt, som kan sælges til betonproducenter i stedet for, at man skal betale for at få det deponeret. Derudover kan CO<sub>2</sub> udledningen mindskes, hvis slamasken viser sig anvendelig som erstatningsprodukt, da mængden af cement reduceres.

Der er tryktestet forskellige mørtelprøver, hvor blandingsrecepten varierer. Disse prøver holdes op imod reference prøver, og alle prøverne er støbt efter recepten fra DS/EN 196-1. Prøverne er testet efter forskellige tidspunkter i hærdeprocessen, sådan at styrkeforløbet over 42 døgn kan afbilledes. Der er støbt mørtelprøver med både ubehandlet aske, tørret aske og knust aske. De forskellige recepter er udviklet for at finde den optimale mængde aske, der skal tilsættes betonblandingen for at optimere denne. Fokusset har ikke udelukkende være på at bruge asken som erstatningsprodukt for cementen. Der er også lavet forsøg, hvor asken bruges som tilsætningsstof. Herudover foretages der forskellige forsøg for at fastslå

---

<sup>1</sup> Rapport fra cowi og avedøre.

<sup>2</sup> Klimaupdate

<sup>3</sup> Miljøstyrrelsen (spildevandsslam).

askens karakteristiske egenskaber og struktur. Nogle af forsøgene er foretaget for at kunne undersøge, om disse overholder danske standard og lovkrav.

Resultaterne fra disse forsøg er ikke dybdegående nok til definitivt at afgøre, om brugen af slammaske i beton er tilladelig eller ej. Denne rapport beskæftiger sig i højere grad med at finde anvendelsesområder af asken og fremlægger tendenser, der bør undersøges nærmere i fremtiden. Disse tendenser udspringer fra resultater, der stammer fra mørtelprøver med korte hærdetider. De fremtidige forsøg bør derfor foregå over en længere periode. Ligeledes bør askens kemiske egenskaber nærmere fastlægges og opholdes imod yderligere krav.

## 2 Teori

### 2.1 Karakteristik af aske

For at muliggøre kommercielt brug af asken skal den karakteriseres. Askens effekt på miljø og omgivelser samt egenskaber skal dokumenteres for at sikre, at asken ikke er skadelig. Derfor gennemgår asken en række laboratorieforsøg for at undersøge dette.

Asken kan undersøges for indhold af tungmetaller. Det kan gøres på to forskellige måder. Scanning Electron Microscope (SEM) kan give en god indikation af mængden af forskellige metaller og salte, samt hvordan de befinder sig på overfladen. Dette gøres med mapping. En mere præcis bestemmelse af mængden af tungmetaller kan laves med Ion Coupled Plasma (ICP) måling. En fast bestemmelse af mængderne af salte i asken kan laves med en ionchromatograf. Disse to metoder er ikke yderligere beskrevet.

Saltene er specielt interessante med henblik på korrosion af armeringen og alkalikiselreaktioner. Tungmetallerne er mere interessante for det miljø, den færdige konstruktion skal stå i, da tungmetaller kan være skadelige for dyr og mennesker.

Der er sat grænseværdier for både indhold af salte og tungmetaller. For salte er der grænser for hvor meget chlorid, der må være i forhold til cement.<sup>4</sup> Grænseværdierne for indhold af tungmetaller varierer afhængigt af, hvad materialet skal bruges til, og fastlægges af Miljøministeriet. Der findes ikke nogen bekendtgørelse, der direkte omhandler alternative brug af aske i beton. Der findes grænseværdier for anvendelsen af bioaske til brug i jord. Bioaske kan være en aske, der stammer fra forbrænding af slam.<sup>5</sup> En anden bekendtgørelse er bekendtgørelsen om anvendelse af affald til jordbrugsformål. (Slambekendtgørelsen).<sup>6</sup> Begge giver gode indikationer for grænseværdier for aske, der skal benyttes i et åbent miljø med stor risiko for udvaskning. Der kan også sammenlignes med bekendtgørelsen for restprodukter, der blandt andet omhandler aske og slagter fra affaldsforbrænding. Her er der ikke grænseværdier, der skal overholdes, for at brugen af asken er tilladt, men en kategorisering der angiver askens anvendelses muligheder. Bekendtgørelsen omfatter primært jord, men de samme retningslinjer vil være gældende for beton lavet med aske, der overholder samme kriterier. Udover krav fra miljøstyrelsen, bør brugen af slamaske i beton kontrolleres i henhold til en dansk standard. Desværre findes der ingen dansk standard, der på nuværende tidspunkt omhandler brugen af slamaske i beton. Men det kan antages, at slamaske kan karakteriseres som en flyveaske pga. den måde, hvorved slamasken fremstilles. Dermed kan en given slamaske opholdes imod DS/EN 450 -1, som er den danske standard for kulflyveaske. Kravene fra DS/EN 450 – 1 ses herunder.

<sup>4</sup> DS/EN 206-1, afsnit 5 tabel. 10

<sup>5</sup> Anvendelse af bioaske til jordbrugsformål - Link # 2

<sup>6</sup> Slamaskes bekendtgørelsen – Link #1

Kemiske krav	Metode		
Organisk materiale	EN 196-2	Kategori A <	5,00%
		Kategori B <	7,00%
		Kategori C <	9,00%
Chloridindhold	EN 196-2	<	0,10%
Sulfit (SO <sub>3</sub> ) indhold	EN 196-2	<	3,00%
Fri calciumoxid (CaO)	EN 451-1	<	1,50%
Reaktiv calciumoxid	EN 197-1	<	10,00%
Reaktiv siliciumdioxid	EN 197-1	>	25,00%
Siliciumdioxid (SiO <sub>2</sub> )	EN 196-2	Tilsammen	75,00%
Aluminiumoxid (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		>	
Jernoxid (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )			
Total indhold af alkalier	EN 196-2	<	5,00%
Magnesiumoxid	EN 196-2	<	4,00%
Fosfat	ISO 29581-2	<	5,00%

Tabel 1 – Oversigt over kemiske krav til kulflyveaske fra DS/EN 450 -1.

Fysiske krav	Metode			
Kornstørrelsen	EN 451-2 eller EN 933-10	Den mængde som ikke falder igennem en si med 0,045 mm maskestørrelse	Kategori N >	40,00%
			Kategori S >	12,00%
Soliditet	En 196-3	For en blanding med 30 % flyveaske og 70 % cement	<	10mm
Densitet	EN 1097-7	Denne må ikke afvige fra producentens oplysninger med mere end		200 kg/m <sup>3</sup>
Afbindingstid	EN 196-3	Afbindingstiden for en prøve af 25% flyveaske og 75% cement må ikke være den dobbelte tid af en reference prøve med 100% cement		

Tabel 2 – Oversigt over fysiske krav til en kulflyveaske fra DS/EN 450 -1.

En askes bufferkapacitet kan undersøges med henblik på askens evne til at modstå ændringer i pH. Undersøgelsen kan vise, hvorvidt asken kan bidrage til at fastholde det basiske miljø, der er optimal for betonen. Andre mindre forsøg, der kan hjælpe til at karakterisere asken, er glødetabsforsøg, der viser mængden af organisk ubrændt materiale, vandopløselighedsforsøg, pH, vandindhold og ledningsevne af asken.

Askens effekt på betonens kapilarsugningsevne og porøsitet kan også undersøges. Det kan være vigtigt, at kende til modstandsdygtigheden af den færdige beton overfor vandindtrængen, når der vurderes holdbarhed. Det er ofte vigtigt, at den færdige beton kan holde vand ude, så den er sikret mod korrosion. Korrosionen af armeringen forringer både styrke og holdbarheden af konstruktionen, og opstår ved at en saltindholdende væske trænger ind til jernet og derefter går i reaktion med jernet og oxygen. Denne korrosion kaldes for elektrokemisk korrosion.

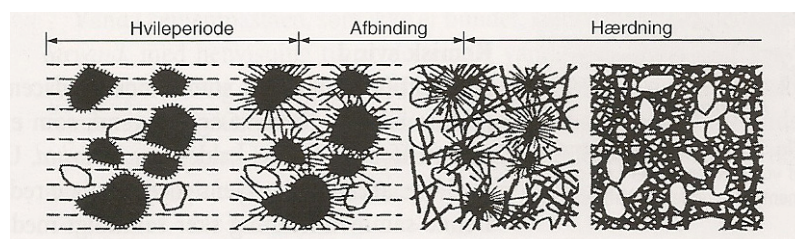
Foruden askens fysiske egenskaber kan SEM give et billede af askens struktur. Dette viser, hvor porøs overfladen er og derved, om partiklerne kan fastholde vand ved kapilarsugning. Dertil viser SEM-undersøgelsen partiklernes størrelse og dermed askens evne til at pakke/kitte tilslaget sammen.

## 2.2 Beton - Sammensætning og egenskaber

Beton er et godt byggemateriale, da det er forholdsvis nemt at håndtere, har en høj trykstyrke og består af cement, sand/grus, sten og vand. Man har i tidens løb fundet ud af, at man kan tilsættes puzzolaner som flyveaske og mikrosilica for at optimere betonen. Disse puzzolaner indgår i den kemiske forbindelse, der er med til at opbygge betons styrke. De har derudover også en anden god egenskab. De to puzzolaner gør betonblandingen tættere pga. deres partikelstørrelse som er ret lille, og derved kan man pakke materialet bedre.<sup>7</sup>

Derfor snakker man tit om betonens pakningsgrad eller egenpakningen. Pakningsgraden afhænger af, hvilket tilslag man benytter til sin betonblanding, og fortæller hvor meget luft denne blanding indeholder. Jo højere pakningsgraden i en blanding er, desto mindre luft er der til stede. Til beregning af pakningsgraden kan bl.a. edb-programmet "4C-Packing" bruges. Dette program tager hensyn til partiklernes kombinationer og deres størrelse, og er udviklet på Teknologisk Institut beton i Danmark.<sup>8</sup>

Cementen og puzzolanerne er begge hydrauliske bindemidler, det vil sige, at det mister sin evne til at forme sig (afbinde) og hærder, når der tilsættes vand. Forløbet ses herunder:

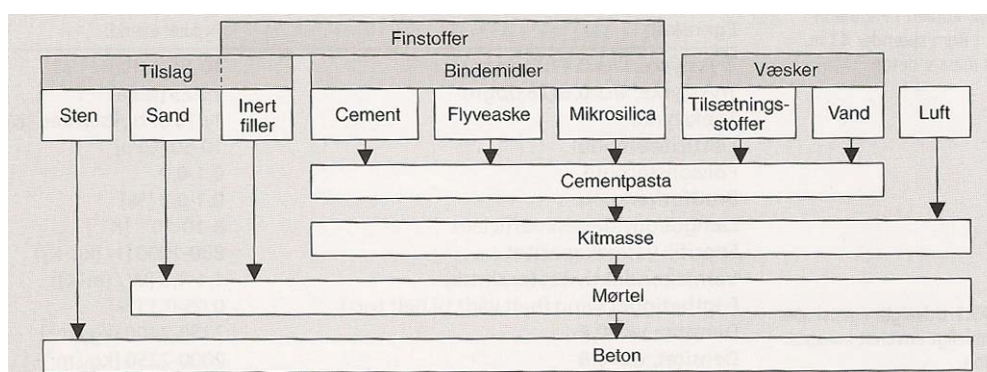


Figur 1 - cementpastaens strukturudvikling<sup>10</sup>

<sup>7</sup> Betonkonstruktioner Kap. 1.

<sup>8</sup> Pakningsanalyse og ideal partikelfordeling

Når denne proces sættes i gang bindes dele af vandet kemisk til henholdsvis cementen og puzzolanerne. Blanding af disse 3 stoffer kaldes for cementpasta. Det er denne masse, der sammen med  $v/c$  – forholdet og mulige tilsætningsstoffer bestemmer betonens bearbejdelighed. Denne bearbejdelighed måles som betonens sætmål. Er betonens sætmål lavt, er betonen også mindre bearbejdelig<sup>10</sup>. Iblandes der herefter organiske stoffer, som er såkaldte luftindblandingsstoffer, kaldes blandingen for kitmasse. Idéen med at iblande luft i beton er, at øge frostmodstanden i den afhærdede beton. Dette kan lade sig gøre, fordi luften danner små (5-200 $\mu$ m i diameter) bobler, hvor det frosne "frie" vand kan udvide sig<sup>10</sup>. Men der må ikke være for meget luft i blandingen. For at blandingen er frostsikker, skal luftindholdet mindst være 4,5 %<sup>9</sup>. Når man blander luft i beton, øges porøsiteten, og det medfører en lavere styrke, forudsat at  $v/c$  – forholdet er det samme. Når blanding herefter får tilsat sand, kaldes den mørtel, og herefter tilsættes sten for at få beton.<sup>10</sup>



Figur 2 - Her ses blandingstadiene for beton<sup>10</sup>

### 2.3 Styrke

Udover mængden af luft i betonen har  $v/c$  – forholdet som tidligere nævnt også en indvirkning på trykstyrken af betonen. Ved iblanding af puzzolaner som flyveaske og mikrosilica, ser man ikke bare på  $v/c$  – forholdet, men et samlet vand/pulver – forhold, da de har samme egenskaber som cementen. I denne rapport bliver vand/cement og aske – forholdet omtalt som et  $v/c$ -forhold, og de enkelte støbninger beskrives nærmere i afsnittet "Mørtelstøbninger". Dette forhold påvirker trykstyrken, da den mængde vand, som cementen og puzzolanerne ikke optager, vil fordampe og efterlade små hulrum i betonen. Dette skaber et større overflade areal, højere porøsitet samt nedsætter styrken. Med andre ord – jo større  $v/c$  – forhold, desto mindre styrke opnår betonen<sup>11</sup>. Dette afspejler sig også i Bolomeys formel, der beregner betonens trykstyrke.

<sup>9</sup> Aalborg Portland 2010.

<sup>10</sup> Bygningsingeniørernes materialer – uddrag af materialebogen Kap. 5.

<sup>11</sup> Betonkonstruktioner kap 1.

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

**Ligning 1 – Bolomeys formel til beregning af trykstyrke**

Hvor  $F_c$  er betonens trykstyrke,  $K$  er en konstant, som afhænger af cementtypen og hærdetiden,  $v/c$  er forholdet mellem massen vand og cement, og  $\alpha$  er en konstant, som også er afhængig af cementtypen og hærdetiden. Ud fra formlen ses det, at jo højere  $v/c$  – forhold, desto lavere styrke<sup>12</sup>. Som nævnt tidligere ser man på et samlet vand/pulver – forhold, når der iblandes f.eks. flyveakse. Dette medfører en omskrivelse af Bolomeys formel:

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

**Ligning 2 – Bolomeys formel til beregning af trykstyrke, hvor aktivitetsfaktoren på pulveret er kendt.**

Her er  $k$  det pågældende pulvers aktivitetsfaktor, der er pulverets virkningsgrad i forhold til cement, og  $P$  er pulverets masse.

Bolomeys formel kan benyttes ved antagelse af, at betonen har et naturligt luftindhold på 1%. Som tidligere nævnt skaber mere luft øget porøsitet og dermed lavere trykstyrke. Det kan antages, at for hver øget procentdel luftindhold reduceres trykstyrken med ca. 4-5%. Dette kan også indskrives i Bolomeys formel<sup>12</sup>:

$$F_c = K \cdot \left( \frac{1}{\frac{v}{c + k \cdot P}} - \alpha \right) \cdot (1 - 0,045 \cdot (a - a_0))$$

**Ligning 3 - Bolomeys formel til beregning af trykstyrke, hvor aktivitetsfaktoren på pulveret er kendt med luftindhold.**

Her er  $a$  det aktuelle luftindhold i betonen og  $a_0$  det naturlige luftindhold (ca. 1%).

Udover luftindholdet og  $v/c$  – forholdet, er trykstyrkens værdi også tidsafhængig. Det er denne styrke, som oftest anses for den væsentligste, da den bruges i bærende konstruktioner. En betons trykstyrke bestemmes ud fra regningsmetoder fra DS/EN 1992-1-1 på baggrund af målinger, foretaget på cylinderformede prøver med diameter på 150 mm og højde på 300 mm efter 28 modenhedsdøgn. Denne styrke kaldes også for den karakteristiske enaksede trykstyrke, og er bestemt som 5 % fraktilen ifølge DS/EN 1992-1-1, og symboliseres ved  $f_{ck}$ .

Trykstyrken øges hurtigt i starten af hærdeperioden. Allerede efter 7 døgn (afhængig af cementtypen) vil betonen have opnået ca. 70 % af sin designstyrke. Efter 28 modenhedsdøgn vil designstyrken være opnået.

<sup>12</sup> Aalborg Portland 2010.



Betonens trykstyrk vil derefter fortsat øges, men denne styrke anses ikke for acceptabel som anvendelse af betonstyrken. Dette er tydeliggjort i DS/EN 1992-1-1.<sup>13</sup>

Udover trykstyrken har beton også en trækstyrke. Denne er dog lavere end trykstyrken (omkring 5-10% lavere) og bruges næsten ikke i forbindelse med bæreevnen af konstruktioner. I denne rapport testes der kun for trykstyrken, og trækstyrken vil derfor ikke beskrives nærmere.

## 2.4 Flyveaske og mikrosilica

Som tidligere nævnt er både flyveaske og mikrosilica puzzolaner. De går i reaktion med calciumhydroxid, som befinder sig i det basiske miljø i betonen, der er opstået pga. tilsætningen af cement. Dette medfører øget tæthed og styrke. I det foregående er det blevet nævnt, at man i højere grad regner med et v/p – forhold end blot v/c – forhold. Her har flyveaske en aktivitetsfaktor på 0,5 og 2 for mikrosilica. Når man regner trykstyrken efter 28 modenhedsdøgn, vil aktivitetsfaktoren for flyveaske være den samme, men for mikrosilica vil den være ca. 3.<sup>14</sup>

I beton kan der opstå nedbrydende reaktioner, alt efter hvordan cement og tilslaget bliver kombineret. Sådanne reaktioner opstår, når sten eller grus (f.eks. flint) indeholder reaktivt kisel, og dette bliver blandet med alkaliioner såsom natrium og calcium. Dette kaldes en alkalikiselreaktion. Der dannes ved disse reaktioner alkalikisegel, og de kemiske forandringer medfører forøgelse i volumen, der kan medføre revner i betonen<sup>15</sup>. Opstår der revner i en betonkonstruktion, kan dette føre til blottelse af armeringen, og der kan trænge vand ind og starte korrosion. Puzzolanerne hjælper med at mindske disse reaktioner, da de vil reagere med alkaliionerne og binde disse, så de ikke kan indgå i reaktionen med f.eks. flinten. Dog kan flyveaske og mikrosilica ikke reagere uden tilstedeværelsen af cement.

I Danmark er det tilladt i beton, at benytte flyveaske som ved glødetab maksimalt har mistet 5% af sin vægt, i henhold til DS/EN 450-1. Derudover skal begge puzzolaner indeholde krav fra andre standarder bl.a. DS/EN 13263-1 og -2 samt øvrige krav fra DS/EN 450-1).

## 2.5 Slamasker i beton

Slamaske der kommer fra rensningsanlægge, som benytter en etageovn til deres forbrænding, anses for at have en puzzolansk effekt og har næsten samme densitet som konventionel flyveaske, og samme aktivitetsfaktor. Nogle af disse slamasker har ligeledes en partikelstørrelse, som ligner en konventionel flyveaske<sup>3</sup>. Tidligere er slamasker testet efter DS/EN 450, der kun henvender sig til aske fra kulfyrede værker, og derfor ikke direkte omfatter slamaske. Denne forskning har vist, at asken ikke overholder alle

<sup>13</sup> Betonkonstruktioner Kap 1.

<sup>14</sup> Aalborg Portland 2010, Kap. Beton.

<sup>15</sup> Bygningsmaterialer – Grundlæggende egenskaber, Kap. 8.

kravene fra DS/EN 450. Blandt andet har kloridindholdet i aske fra Lynettefællesskabet vist sig at være over det maksimalt tilladte i DS/EN 450 i henhold til tidligere forskning. Det, at slamaske ikke overholder kravene fra DS/EN 450, er dog ikke umiddelbart et problem, da asken ikke bliver defineret som en flyveaske ifølge standarden. Slamasken kan derfor anvendes i beton ifølge DS 2426 (EN 206-1)<sup>16</sup>.

## 2.6 Tidligere forskning

På baggrund af ovenstående afsnit, er der blevet forsket i, om slamasker kan anvendes i beton. Center for Grøn Beton på Teknologisk Institut har blandt andet forsøgt sig med flere forskellige prøvetyper, hvor man f.eks. har forsøgt sig med at erstatte flyveasken i en almindelig betonblanding med slamaske. Til disse forsøg startede man med slamaske fra Avedøre spildevandscenter, men fandt asken for vandkrævende. Derfor forsøgte man sig med slamaske fra rensningsanlægget Lynettefællesskabet. Denne slamaske har en mindre partikelstørrelse end asken fra Avedøre, og ligner derfor en konventionel flyveakse mere. Deres resultater er dog meget tværtidlige. Man fandt frem til, at nogle af blandingerne var bedre rent styrkemæssigt end referencen efter 28 døgn hærkning. Andre blandinger var dårligere og nogle tredje blev bedre efter 56 døgn. Dette kan tyde på, at der kan være en mulighed for anvendelsen af slamaske i beton.<sup>17</sup>

Udover Center for Grøn Beton er der bl.a. i 2007 udarbejdet en lægmands-rapport, hvor selskaberne Spildevandscenter Avedøre, Lynettefællesskabet I/S og betonfabrikanten Unicon A/S i samarbejde har undersøgt muligheden for brugen af slamaske i beton. De har bl.a. undersøgt håndteringen af aske, transport og opbevaring, de kemiske og fysiske egenskaber og styrkeudvikling m.m. I rapporten fastslås det f.eks., at asken ikke overholder DS/EN 450, men DS 2426 (EN 206-1) som omhandler regler for materialer til anvendes i beton. Desuden opnår de gode resultater indenfor lav styrkebeton (8-12 MPa).

Slamaske i lav styrkeklasse er blevet brugt kommercielt i byggebranchen. På billede 1 ses slamaskebeton brugt som renselag i Københavns Lufthavn Kastrup, hvor MT - Højgaard i 2005 stod for en række opgaver i forbindelse med udvidelsen af lufthavnen.

---

<sup>16</sup> Lægmands-rapport 2007.

<sup>17</sup> Beton med slamaske



*Billede 1 - Taget af Niels Thorsund der i 2005 arbejde for MT Højgaard.*

Udover dokumentation fra MT Højgaard vedrørende brugen af slamaske i beton, er Kim Rindel, afdelingsleder for miljø og udvikling hos Lynettefællesskabet I/s, blevet kontaktet via telefon og mail. Han forklarer, at der i år 2006 blev anvendt ca. 85 % slamaske til betonproduktion, sandblæsningsmiddel og isoleringsmateriale. Afsætningen til betonproduktionen var et EU finansieret forsøg, der efter en periode på 2-3 år blev stoppet, bl.a. fordi fosforindholdet var for højt og betonens indhold af jern gav en gennemtrængelig rødlig farve. Aftageren af asken til sandblæsningsmiddel er gået konkurs. Derfor er det i dag kun ca. 50 % af slamasken, som bliver afsat, og det er Rockwool, der benytter det. Mailkorrespondancen kan ses i bilag 10.

Men det er ikke kun i Danmark, at anvendelsen af slamaske i beton er blevet undersøgt. I udlandet bliver der også forsket i, hvilke muligheder brugen af slamaske i beton kan have. Der er bl.a. forsket i, hvorledes man udtrækker fosfor fra slamasken, om asken har puzzolanske egenskaber, om knusning af asken kan have nogen indvirkning, og om nogle af disse ting kan medføre øget trykstyrke. Dette er blot et lille udsnit af, hvad der forskes i. Nedenfor ses en tabel, der beskriver 4 artiklers formål, resultater og kilder. Artiklerne er blevet brugt til at indsamle baggrundsviden om tidligere forskning på området, og giver mulighed for at sammenligne rapporternes resultater med egne resultater.

Hvad er der blevet undersøgt	Resultatet	Reference
Man har forsøgt at erstatte flyveaske i en almindelig betonblanding med slamaske. Slamasken kommer to steder fra; Spildevandscenter Avedøre og Lynettefællesskabet.	Tværtidlige resultater. Nogle af deres prøver viste sig at være bedre end en referenceprøve rent styrkemæssigt efter 28 døgn, andre dårligere og nogle efter 56 døgn bedre.	Beton med slamaske. Center for Grøn Beton. December 2002, af Marianne Tange Hasholt og Dorthe Mathiesen – Teknologisk institut.
Kemiske og fysiske egenskaber af slamaske, opbevaring, håndtering samt styrkeudviklingen når asken blandes i beton.	Det fastslås, at asken ikke overholder DS/EN 450 (flyveaskestandard), men DS 2426(EN 206-1 regler for materiale til anvendelse i beton). Derudover viser blanding sig god til lavstyrke beton (8-12 MPa).	Anvendelse af aske fra forbrænding af spildevandsslam (bioaske) i betonproduktion. Lægmands-rapport, 2007. Spildevandscenter Avedøre, Unicon A/S og Lynettefællesskabet i/S.
Hvilken effekt knusning og syrevask har på den puzzolerende effekt af slamaske i beton.	Knusning af slamasken forbedrer den puzzolanske effekt, og medfører bedre styrke. Asken kan knuses til et brugbart erstatningsstof for cement. Syrevaskes asken medhenblik på genanvendelse af fosfor – fås en biprodukt med lille eller ingen puzzolansk effekt. Ligeledes forringer svovlsyre vask af asken den puzzolanske effekt.	Effect of milling and acid washing on the pozzolanic activity of incinerator sewage sludge ash. Cement & Concrete Composites, 32 (2010) 54-61. S. Donatello, A. Freeman-Pask, M. Tyrer & C.R. Cheeseman.
Hvilken effekt kan det have at mekanisk knuse slamaske og derefter anvende det i mørtelprøve, der bl.a. udsættes for tryk.	Det viser sig, at den øgede finhed af asken medfører højere puzzolansk effekt. Dette medfører ligeledes til højere trykstyrke for mørtelprøverne.	Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties. Cement and Concrete Research, 33 (2003) 1749-1754. Shih-Cheng Pan, Dyi-Hwa Tseng, Chih-Chiang Lee, Chau Lee.

Oversigt 1 – Oversigt der viser tidligere forskning.

### 3 Beskrivelse af eksperimentelt arbejde

I det følgende afsnit vil de forsøg, der er blevet udført i forbindelse med dette projekt, blive nærmere beskrevet. I det nedenstående skema ses en oversigt, der viser hvilke forsøg projektet har omhandlet, deres formål, samt i hvilket bilag man kan se fremgangsmåden af forsøget i.

Udførte forsøg		
Forsøg	Formålet er	Bilags nr.
Ledningsevne og PH-målinger	At få indsigt i asken kemiske egenskaber.	Bilag 1.1 & 1.2
Glødetab	At undersøge hvor stor en del af asken, der er organisk stof.	Bilag 1.3
Vandopløselighed og vandindhold	At bestemme massen af vandopløselige ion i asken og vandindholdet i denne.	Bilag 1.4 & 1.5
Bufferkapacitet	At undersøge askens evne til at fastholde sin PH-værdi.	Bilag 1.6
Oplukning af askeprøver	At bestemme hvilke syreopløselige metaller asken indeholder.	Bilag 1.7
Vandopløselige anioner	At undersøge hvilke ioner asken indeholder.	Bilag 1.8
SEM og Mapping	At undersøge strukturen af asken samt fordeling af metaller i asken og hvor disse befinder sig.	Bilag 1.12
Mørtelstøbning	At støbe mørtelprøver med forskellige indhold af cement, sand, aske og vand.	DS-196-1
Porøsitet og Kapillarsugning	At fastlægge porevolumen i de støbte mørtelprøver.	Bilag 1.10 & 1.11
Trykstyrketest	At undersøge om asken tilstedeværelse i mørtelblandingerne har nogen indvirkning på dens styrke.	DS-196-1
Udvaskning af tungmetaller	At påvise om eventuelle giftige tungmetaller kan blive udledt fra færdigt støbte mørtelprøver.	Bilag 1.9

Tabel 3 – viser hvilke forsøg, der er blevet udført i forbindelse med projektet

### 3.1 Karakteristik af asken

#### Ledningsevne og PH-målinger

Ud fra ledningsevnen i asken, kan man bestemme indholdet af ioner i væsken. Ledningsevnen fortæller, hvor godt en elektrisk strøm ledes igennem en væske, og denne er afhængig af antallet af ledende partikler i væsken (saltioner). PH-værdien af asken fortæller, om den befinder sig i et basisk eller et syre- miljø, når den opløses i vand. Cement er et basisk stof, så en lav PH-værdi i asken vil påvirke en betonblandings miljø i en negativ retning, da chancen for korrosion er større ved lave PH-værdier.

#### Glødetab

En askes indhold af organiske materiale svarer ca. til det glødetab, som opnås ved opvarmningen af prøve i en 550°C varm ovn.

#### Vandopløselighed og vandindholdet

Vandindholdet undersøges for at teste, hvor meget fugt der er bundet i asken. Det er interessant at fastlægge dette, da mængde af bundet vand i asken kan ændre en betonblandings v/c-forhold. Når vandopløseligheden testes, tester man, hvor meget asken taber ved gennemskylning/filtrering rent vægtmæssigt. Dette fortæller, hvor stor en ion-mængde der udvasket, især salte, og hvor homogent asken vil opføre sig, når det blandes i en beton. Lav vandopløselighed gør, at asken frigiver få stoffer/ioner, som kan reagere med resten af blandingen.

#### Bufferkapacitet

Aksens bufferkapacitet beskriver dens egenskab til at fastholde PH-værdien, og dermed hvor modstandsdygtigt denne vil være i et surt miljø.

#### Oplukning af askeprøver

Oplukningsmetoden af askeprøverne som benyttes i denne rapport, tager udgangspunkt i DS 259, der er den danske standard for bestemmelsen af syreopløselige metaller i en jordprøve. Denne standard giver en god indikation af metalkoncentrationen i den pågældende prøve. For at opnå en mere korrekt værdi, skal der foretages en destruktion asken.

## Vandopløselige anioner

Det er vigtigt at fastslå, hvor mange vandopløselige salte asken indeholder samt mængden af salte. Der er forskellige krav til indholdet af salte i beton, både armeret og uarmeret, og det er vigtigt, at asken ikke bidrager til et for højt niveau af f.eks. chlorid, da dette kan medføre højere risiko for korrosion i en armeret beton.

## SEM og mapping

Ved brugen af et SEM kan strukturen af asken fastlægges. Apparatet udsender en elektronstråle, der scanner hen over prøven, og derefter benytter apparatet informationen herfra til at danne et billede af prøvens struktur. Mapping kan vise grundstoffer på overfladen af asken, og giver et overblik over, hvad asken indeholder.

## 3.2 Mørtelstøbninger

I dette projekt er der lavet 8 mørtelblandingsrecepter, hvor nogle af dem er lavet ud fra forskellige metoder. Som udgangspunkt og reference laves der prøver, som indeholder 450 gram cement, 225 gram vand og 1350 gram sand. Referencen blandes og støbes i henhold til DS 196-1. Nedenstående tabel viser alle 8 mørtelrecepters betegnelse og deres beregnede indhold.

Prøvetype	Indhold
A – reference	450 g cement, 225 g vand og 1350 g sand
B – erstat 10 % cement med aske	405 g cement, 45 g aske, 225 g vand og 1350 g sand
C – erstat 20 % cement med aske	360 g cement, 90 g aske, 225 g vand og 1350 g sand
D – erstat 10 % sand med aske	450 g cement, 135 g aske, 225 g vand og 1215 g sand
E – erstat 20 % sand med aske	450 g cement, 270 g aske, 225 g vand og 1080 g sand
F – erstat 30 % sand med aske	450 g cement, 405 g aske, 225 g vand og 945 g sand
G – erstat 15 % sand med aske	450 g cement, 202,5 g aske, 225 g vand og 1147,5 g sand
H – erstat 5 % sand med aske	450 g cement, 67,5 g aske, 225 g vand og 1282,5 g sand

*Tabel 4 – viser blandingsrecepter for de forskellige mørtelblandinger.*

### Blanding B, C og D

Til støbninger der indeholder blandingsrecepten B, C eller D er fremgangsmåden for selve blandingen af de forskellige tilslag og støbningen den samme som for referencerne. Dog er konsistensen af mørtlen efter blanding vurderet, inden der vibreres. Er blandingen fundet for tør, er tilsat mere vand og omrørt i yderligere 1 minut.

## Blanding E og F

Til støbninger der indeholder blandingsrecepten E eller F, er fremgangsmåden for selve blandingen af de forskellige tilslag og støbningen den samme som for referencerne. Dog er konsistensen af mørtlen efter blanding vurderet, inden der vibreres. Er blandingen fundet for tør, er mere vand tilsat og omrørt i yderligere 1 minut. Der er i alt lavet to støbninger af begge prøvetyper. Den første var meget tør, selvom der blev blandet mere vand i end de 225 gram. Derfor blev endnu en støbning af prøvetyperne foretaget. Denne gang med meget mere vand, således at den færdige konsistens var lidt vådere i forhold til referencen.

## Blanding G

Til støbninger der indeholder blandingsrecepten G, er fremgangsmåden for selve blandingen af de forskellige tilslag og støbningen den samme som for referencerne. Dog er konsistensen af mørtlen efter blanding vurderet, inden der vibreres. Er blandingen fundet for tør, er mere vand tilsat og omrørt i yderligere 1 minut.



*Billede 2 - Mixer til mørtelblanding*



*Billede 3 - Støbeform.*

## Blanding H

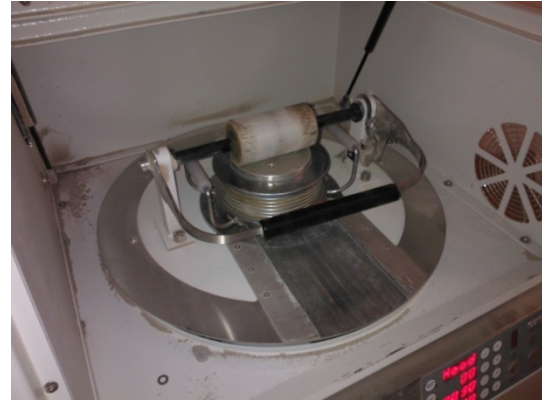
Til støbninger der indeholder blandingsrecepten H, er fremgangsmåden for selve blandingen af de forskellige tilslag den samme som for referencerne. Dog er konsistensen af mørtlen efter blanding vurderet, inden der vibreres. Er blandingen fundet for tør, er mere vand tilsat og omrørt i yderligere 1 minut. Efter den første støbning med denne blanderecept blev testet, blev andre metoder til behandlingen af asken inden denne iblandes, forsøgt. Der blev i alt forsøgt med 4 metoder.

1. Asken knuses, inden den blandes med cement.
2. Asken tørres helt ud, og derefter knuses den, inden den blandes med cementen.
3. Asken tørres helt ud, inden den blandes med cementen.
4. Asken blandes med vand og omrøres i 1 min., og dermed opfugtes, inden den blandes med cementen.





Billede 4 - opfyldning af aske i ringkuser



Billede 5 – ringkuseren.

### 3.3 Porøsitet og kapillarsugning

Porøsiteten fortæller om porevolumen i forhold til prøvens totalvolumen. Porevolumen har indflydelse på et materiales egenskaber som f.eks. styrken, frostbestandigheden og hvor gennemtrængeligt materialet er med hensyn til vand og luft. Jo højere porøsiteten er i et materiale, jo lavere er styrken. Som nævnt tidligere kan huller eller porer med vand give problemer for holdbarheden, når materialet udsættes for frost. Kapillarsugning fortæller om betonens evne til at opsuge vand, hvilket betyder, hvor modstandsdygtigt den pågældende beton er overfor vand. Jo mindre sugsevne, desto mindre vand kan der trænge ind i betonen, og dette mindsker risikoen for korrosion.

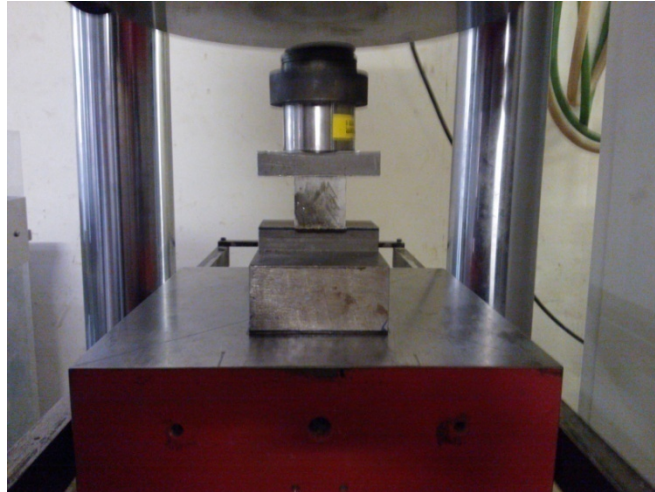
### 3.4 Trykstyrketest

For at finde trykstyrken af mørtelprøverne benyttes en tryktestmaskine, Toni 3000. Prøverne placeres på langs i maskinen, og der foretages to tryk - et i hver ende af prøven. Lasten som prøverne udsættes for øges jævnt med  $2,40 \text{ kN/s} \pm 0,2 \text{ kN/s}$ . Prøverne testes til brud, og lasten noteres. Trykstyrke kan derefter beregnes på følgende måde:

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

Ligning 4 – trykstyrken af et prøvelegeme på baggrund af trykkraft og areal.

Hvor  $R_c$  er trykstyrken i megapascal,  $F_c$  er max-lasten, som prøven udsættes for i newton, og  $A$  er det tværsnit areal, der trykkes over i kvadratmillimeter.



*Billede 6 - Viser forsøgsopstillingen til trykstyrketesten i Toni 3000*

Forud for tryktesten er samtlige mørtelprøver målt og vejet. Disse målinger bliver benyttet til at fastslå hver enkelt prøves densitet og til udregning af trykstyrken. Der blev ligeledes foretaget ultralydsmålinger i starten af projektet. Dette blev dog standset, da apparatet undervejs gik i stykker, og en erstatning blev aldrig fundet. Resultaterne fra ultralydsmålingerne skulle være blevet benyttet til at fastlægge luftindholdet i prøverne, men da det ikke har været muligt at foretage målinger af alle prøver, vil disse resultater ikke blive brugt i denne rapport. Dog kan ultralydsmålinger fra de første mørtelprøver ses i bilag 4.

### **3.5 Udvasning af tungmetaller**

Slamaske indeholder giftige stoffer i form af de tungmetaller, der måtte være i den pågældende aske. Derfor bliver slamaske kategoriseret som farligt affald, da tungmetallerne i asken er mobile. Det vil sige, at de kan udvaskes, når der opstår kontakt med vand, og dette kan være skadeligt for det omkringliggende miljø i form af forurening

## **4 Resultater og Diskussion**

I det følgende afsnit vil resultaterne fra samtlige af de forsøg, som projektet omhandler blive bearbejdet, fremlagt for læseren og diskuteret. Som tidligere nævnt omhandler denne rapport brugen af slamaske, der har ligget minimum 2 år i depot fra Lynettefællesskabet I/S. Der vil i det følgende afsnit også indgå resultater fra rapporten "*Slamaske i beton - effekt af knusning og syrevask af slamske*", skrevet af Morten Reiff og Morten G. Meldgaard, der har foretaget de samme forsøg til at fastslå askens karakteristik. Deres aske er også fra Lynettefællesskabet, men har ikke ligget i depot.

#### 4.1 Laboratorieforsøg

I den nedenstående tabeller vises resultaterne fra laboratorieforsøgenes vandindhold, ledningsevne, PH, glødetab og vandopløselighed, som alle er med til karakterisere asken. De nedenstående værdier er middelværdier beregnet ud fra alle prøver fra de forskellige forsøg. De individuelle forsøgsresultater af egne forsøg kan ses i bilag 2, og resultaterne fra asken der ikke har ligget i depot, er at finde i bilag 13.

Laboratorieforsøg	Depot aske		Ikke depot aske	
	Værdi	Enhed	Værdi	Enhed
Vandindhold	14,40	%	0,095	%
Ledningsevne	5,59	mS/cm	7,81	mS/cm
PH	8,29	PH	12,45	PH
Glødetab	0,16	%	0,25	%
vandopløselighed	0,83	%	5,12	%

**Tabel 5 – indeholder resultaterne fra laboratorieforsøg med begge asker. Samtlige resultater er at finde i bilag 1 og 13.**

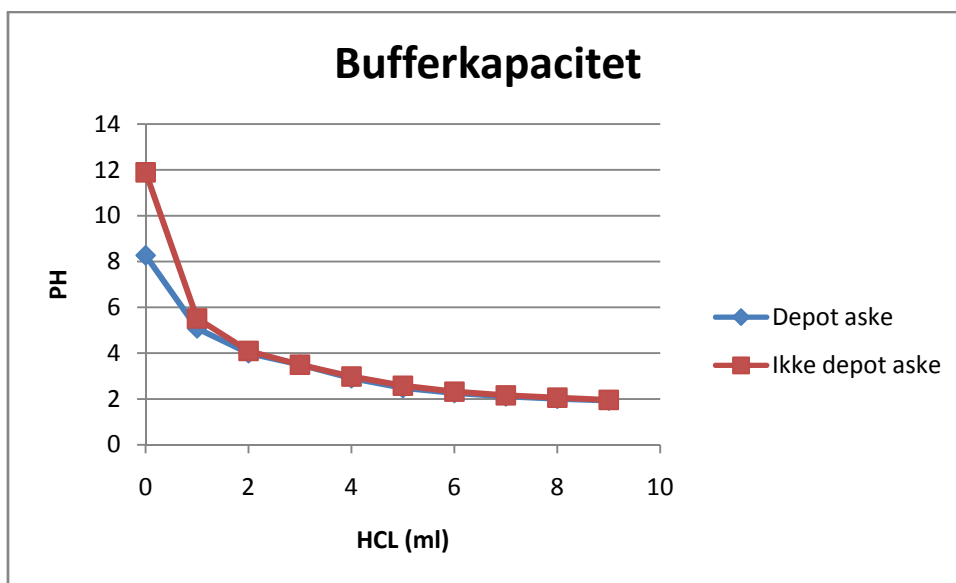
Som det ses ud fra tabel 5, indeholder asken, der har ligget i depot 14,40 %, vand. Dette skal der tages højde for, når man beregner det samlede v/c-forhold, da det ekstra bundne vand i asken kan give et højere v/c-forhold, og dette kan medføre lavere styrke. Ligeledes ses det, at Morten og Mortens aske indeholder markant mindre vand, hvilket stemme godt over ens, idet deres aske ikke har ligget i depot. Når asken ligger i depot, ligger den ude i det fri og tæt på havvand. Dermed kan den have optaget en del fugt.

I asken der ikke har ligget i depot, er målt en højere ledningsevne, end der er blevet målt i asken fra depotet. Dette tyder på, at asken fra depot indeholder flere saltioner, da ledningsevnen afspejler, hvorledes en elektrisk strøm ledes igennem en væske, og denne er afhængig af saltionerne. Antallet af saltioner fremgår senere i dette afsnit. Den forholdsvis store forskel i PH-værdien og vandopløseligheden kan ligeledes forklares ud fra opbevaringen af asken, der har ligget i depot. Denne bliver nemlig udsat for alt slags vejr og bliver ligeledes påvirket af de omgivelser, som den opbevares i. I den tid som asken har ligget i depot, kan den være blevet udsat for f.eks. regn, der kan være med til at nedbringe PH-værdien. Ligeledes kan regn være årsagen til, at vandopløseligheden er markant mindre i asken, der har ligget i depot i forhold til asken, der kommer lige fra ovnen. Regnen kan have udvasket nogle af de vandopløselige stoffer, som asken ellers ville indeholde.

Som det kan ses ud fra den nedenstående tabel og graf, skal der tilsættes lige meget koncentreret saltsyre (HCL) til begge asker, for at få nedbragt PH-værdien til under 2, selvom de to asker starter med to forskellige udgangspunkter. Ud fra hældningen på graferne ses det at asken, der har ligget i depot, har en mindre hældning, og springet i PH-værdien er også mindre fra måling 1 til 2 end for asken, der har ligget i depot. Dette har dog ikke nogen betydning, da de efter første tilsætning har samme forløb, og dermed samme modstand overfor ændringer pH.

Laboratorieforsøg			Depot aske	Ikke depot aske
Måling	tilsat	Tid	PH	PH
[nr]	[ml]	[min]	[pH]	[pH]
1	0	30	8,27	11,90
2	1	60	5,08	5,52
3	2	90	4	4,10
4	3	120	3,5	3,50
5	4	150	2,9	2,98
6	5	180	2,48	2,58
7	6	210	2,26	2,32
8	7	240	2,11	2,16
9	8	270	2,01	2,06
10	9	300	1,93	1,96

Tabel 6 – Viser måleresultater fra bufferkapacitetsforsøget af de to aske.



Graf 1 – En afbildning af forløbet for bufferkapaciteten af de to asker.

#### 4.2 Undersøgelse af saltindhold i asken

Antallet af salte og deres mængde blev fastslået ved hjælp af en ionchromograf. Her spiller mængden af chlorid end særlig rolle, da en for stor koncentration af denne kan forhøje risikoen for korrosion i f.eks. en armeret betonevæg. Resultaterne fra asken, der har ligget i depot og asken, som ikke har ligget i depot, ses herunder:

Ionchromotograf (Anioner)							
Asketype		Aske fra depot			Aske der ikke har ligget i depot		
Prøve	[nr]	1	2	3	1	2	3
afvejet	[g]	10,002	9,998	10,003	10,0000	10,0000	10,0000
tilsat	[mL]	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Chlorid							
Målt	mg/L Cl	273,77	264,13	261,33	19,48	17,21	21,21
	mg/kg Cl	1368,61	1320,95	1306,28	97,42	86,08	106,08
Nitrat							
Målt	mg/l NO3	19,47	19,66	19,91	0,85	0,63	0,7427
	mg/kg NO3	97,36	98,33	99,55	4,26	3,18	3,71
Sulfat							
Målt	mg/L SO4	2595,36	2597,03	2585,70	2069,42	2074,74	1995,24
	mg/kg SO4	12974,21	12987,76	12924,63	10347,10	10373,72	9976,23

Tabel 7 – Viser hvilke salte askerne indeholder og deres mængde. Målingerne er at finde i bilag 9.

Som det ses ud fra tabel 7, har den aske, som er blevet deponeret, et højere indhold af salte i forhold til den aske, som kommer lige fra ovnen. Dette virker umiddelbart lidt misvisende da asken, som tidligere nævnt, har været deponeret i det fri i minimum 2 år, og derved burde være blevet vasket igennem af regn. Men i samme forbindelse nævnes det, at asken har været deponeret tæt på havvand, og dette kan have haft en indflydelse på det forhøjede saltindhold. Den luft som befinder sig ved havet, og dermed også omkring asken, indeholder meget salt. Disse salte har så mulighed for at ligge sig på overfladen af den deponerede aske. Det vides ikke med sikkerhed, hvorledes asken fra depot blev udtaget til dette projekt, men det anses som værende højst sandsynligt, at asken er udtaget fra toppen af en bunke, og derved opnår man den højere mængde af saltioner.

I det følgende vil der kun blive omtalt resultater, som har med asken fra Lynettefælleskabet l/s at gøre. Altså den deponerede aske.

Da et højt indhold af salte i en betonblanding kan være skadeligt for armeringen, stiller dansk standard krav til hvor meget chlorid, der må befinde sig i en blanding i forhold til vægten af cement. Kravene er opstillet herunder:

Anvendelse	Chloridklasse	Maksimalt CL-indhold i forhold til cementvægten
Uden armering	CL 1,0	1,00%
Med armering	CL 0,20	0,20%
	CL 0,40	0,40%
Med spændarmering af stål	CL 0,10	0,10%
	CL 0,20	0,20%

Tabel 8 – Viser kravene til chloridindholdet i forhold til cementvægten. Kravene fra DS/EN 206-1.

For at kontrollere om asken overholder disse krav, er et gennemsnit af cementindhold, askeindhold og chlorid pr. kg aske beregnet for samtlige prøvestøbninger. Ud fra disse værdier regnes den gennemsnitlige vægt af chlorid i gram for hver prøvetype. Denne vægt opholdes imod vægten af cement, og det kontrolleres om kravene overholdes.

Prøve	Cement indhold	aske indhold	Chlorid pr. kg aske	Gram Chlorid i prøve	Andel af Chlorid i forhold til cement
[betegnelse]	[g]	[g]	[g/kg]	[g]	[%]
A	450,15	0	0	0	0
B	405,05	45,05	1,33	0,060	0,00015
C	360,12	89,96	1,33	0,120	0,00033
D	450,18	135,03	1,33	0,180	0,00040
E	450,08	270,28	1,33	0,360	0,00080
F	450,10	315,03	1,33	0,420	0,00093
G	450,03	202,50	1,33	0,270	0,00060
H	450,06	67,53	1,33	0,090	0,00020

Tabel 9 – Viser gennemsnitsmængderne for blanderecepter, samt chloridindholdet i %. Cement- og askeindhold for alle prøvetyper findes i bilag 4.

Prøve	Uarmeret	Armeret		Spænd-armering	
	CL 1,0	CL 0,20	CL 0,40	CL 0,10	CL 0,20
[betegnelse]					
A	OK	OK	OK	OK	OK
B	OK	OK	OK	OK	OK
C	OK	OK	OK	OK	OK
D	OK	OK	OK	OK	OK
E	OK	OK	OK	OK	OK
F	OK	OK	OK	OK	OK
G	OK	OK	OK	OK	OK
H	OK	OK	OK	OK	OK

Tabel 10 – Sammenholder chloridindholdet fra tabel 9 og grænseværdierne fra tabel 8.

Som det ses, overholder asken som har ligget i depot alle chloridkrav fra DS/EN 206-1 og kan dermed, på baggrund af saltindholdet, benyttes i en betonblanding med eller uden armering.

### 4.3 Askens indhold af tungmetaller

Som det kan ses ud fra tabel 3 i afsnittet "*Beskrivelse af eksperimentelt arbejde*", er der også blevet foretaget et oplukningsforsøg, der angiver, hvilke tungmetaller asken indeholder og mængden af disse. Der er ligeledes foretaget udvaskningsforsøg på hærdede mørtelstøbninger, der kan vise, hvilke og hvor stor en mængde af tungmetallerne, der bliver udvasket. Det er tidligere i afsnittet "*Karakteristik af aske*" blevet benævnt, at der i forskellige bekendtgørelser er grænseværdier for mængde af tungmetaller i et restprodukt. I de følgende tabeller vil der kun blive fremhævet grænseværdier for de tungmetaller, som asken indeholder.

I bekendtgørelsen om anvendelse af affald til jordbrugsformål, slambekendtgørelsen, er følgende grænseværdier for tungmetaller opgivet:

Tungmetal	Grænseværdi	Enhed
Cadmium	0,800	[mg/kg]
Chrom	100,00	[mg/kg]
Kobber	1000,000	[mg/kg]
Nikkel	30,000	[mg/kg]
Bly	120,000	[mg/kg]
Zink	4000,000	[mg/kg]

*Tabel 11 – Viser grænseværdier for tungmetaller i henhold til slambekendtgørelsen.*

Derudover er der i bekendtgørelsen om anvendelse af restprodukter og jord til bygge – og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret, uforurenede bygge- og anlægsaffald fundet grænseværdier for de samme typer tungmetaller. I stedet for at give en max tilladelig værdi inddeles mængden af et tungmetal i to kategorier efter et interval. Befinder mængde af et tungmetal i aske sig i kategori 1, kan dette bruges til alt bygge- og anlægsarbejde, imens det for aske der befinder sig i kategori 2 kun er begrænsede anvendelsesområder. Denne bekendtgørelse virker som den mest oplagte, at opholde vores prøvers indhold imod, da det i dette projekt netop undersøges, om asken kan bruges i byggeindustrien.

Kategoriserings tabel		
Tungmetal [navn]	Kategori 1 [mg/kg] (TS)	Kategori 2 [mg/kg] (TS)
Bly	0 - 40	> 40
Cadmium	0 - 0,5	> 0,5
Chrom	0 - 500	> 500
Kobber	0 - 500	> 500
Kviksølv	0 - 1	> 1
Nikkel	0 - 30	> 30
Zink	0 - 500	> 500

**Tabel 12 – Viser grænseindeks for tungmetaller i henhold til bekendtgørelsen om anvendelse af restprodukter og jord til bygge – og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret, uforurenet bygge – og anlægsaffald.**

Det skal dog nævnes, at der i denne bekendtgørelse også findes en kategori 3, men for de ovenstående tungmetaller er indekset det samme i kategori 2 og 3. Ligeledes skal det benævnes, at asken fra Lynetten også indeholder tungmetallerne aluminium, natrium og kalium, men det har ikke været muligt at finde nogen grænseværdier for disse, og de vil derfor ikke blive diskuteret mere i rapporten. Hernæst ses de målte værdier for tungmetallerne i asken ved oplukning og efter udvaskning. Værdierne i nedenstående tabel 13 er middelværdier af alle målte prøver med asken, hvor det i tabel 14 er max værdien ud af 5 støbte prøver. De enkelte målinger kan ses i bilag 8.

Oplukning af aske		
Tungmetal	Mængde	Enhed
Cadmium	2,163	[mg/kg]
Chrom	28,585	[mg/kg]
Kobber	694,422	[mg/kg]
Nikkel	35,390	[mg/kg]
Bly	99,466	[mg/kg]
Zink	2808,225	[mg/kg]

**Tabel 13 –Indeholder middelværdier for oplukningsforsøg. Målinger findes i bilag 8.**



Udvaskning af tungmetaller		
Tungmetal	Mængde	Enhed
Cadmium	0,001	[mg/kg]
Chrom	0,020	[mg/kg]
Kobber	0,029	[mg/kg]
Nikkel	0,000	[mg/kg]
Bly	0,033	[mg/kg]
Zink	0,013	[mg/kg]

**Tabel 14 – Indeholder maxværdier for udvaskningsforsøg. Målinger findes i bilag 8.**

Ud fra tabel 11 vedrørende slambekendtgørelse og tabel 13 kan ses at indholdet af cadmium og nikkel er for højt i forhold til grænseværdien. Det ses ligeledes, at de målte værdier for cadmium, kobber, nikkel, bly og zink under oplukningsforsøgene vil blive kategoriseret som kategori 2 i forhold til grænseværdierne fra tabel 12, der omhandler bekendtgørelsen om "anvendelse af restprodukter og jord til bygge – og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret, uforurenede bygge – og anlægsaffald". Det vil med andre ord sige, at asken i sig selv ikke umiddelbart ser ud til at være ideel som tilsætningsstof i en betonblanding. Men når man ser på forsøgsresultaterne fra udvaskningsforsøget, er alle tungmetallerne under grænseværdierne fra slambekendtgørelsen, og alle metaller kan nu efter bekendtgørelsen om "anvendelse af restprodukter og jord til bygge – og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret, uforurenede bygge – og anlægsaffald", kategoriseres som kategori 1. Dette tyder på, at store dele af tungmetallerne i mørtlen bindes, når asken bruges i en mørtelblanding. Det er godt, hvis den skal kunne benyttes til beton i bygge – og anlægsverdenen.

I dette projekt er der som vist i tabel 3, i afsnittet "Beskrivelse af eksperimentelt arbejde", både lavet forsøg der fortæller noget om askens karakteristik og dens indvirkning i en mørtelblanding med særligt henblik på styrken. Rapporten er primært udarbejdet med henblik på at undersøge, hvilken effekt slamasken ville have som tilsætningsstof til en mørtelblanding. Dette fokus er valgt, fordi det menes at være et væsentligt faktum, hvorvidt slamasken i det hele taget er gavnligt til videre brug i betonindustrien. Hvis asken viser sig at være gavnlig, men ikke overholder krav for anvendelse, er det muligt at behandle asken, så den overholder de gældende krav. Hvis det viser sig, at slamasken har en positiv effekt, kan man derefter gå i dybden med undersøgelser, der præcist fastslår karakteristikken af asken. Derfor er det svært at sammenligne resultaterne med DS/EN 450 – 1, for derefter at konkludere om asken er anvendelig eller ej, idet samtlige krav ikke er blevet undersøgt. I nedenstående tabel ses de fundne værdier, som kan sammenlignes med kravene fra DS/EN 450 – 1.

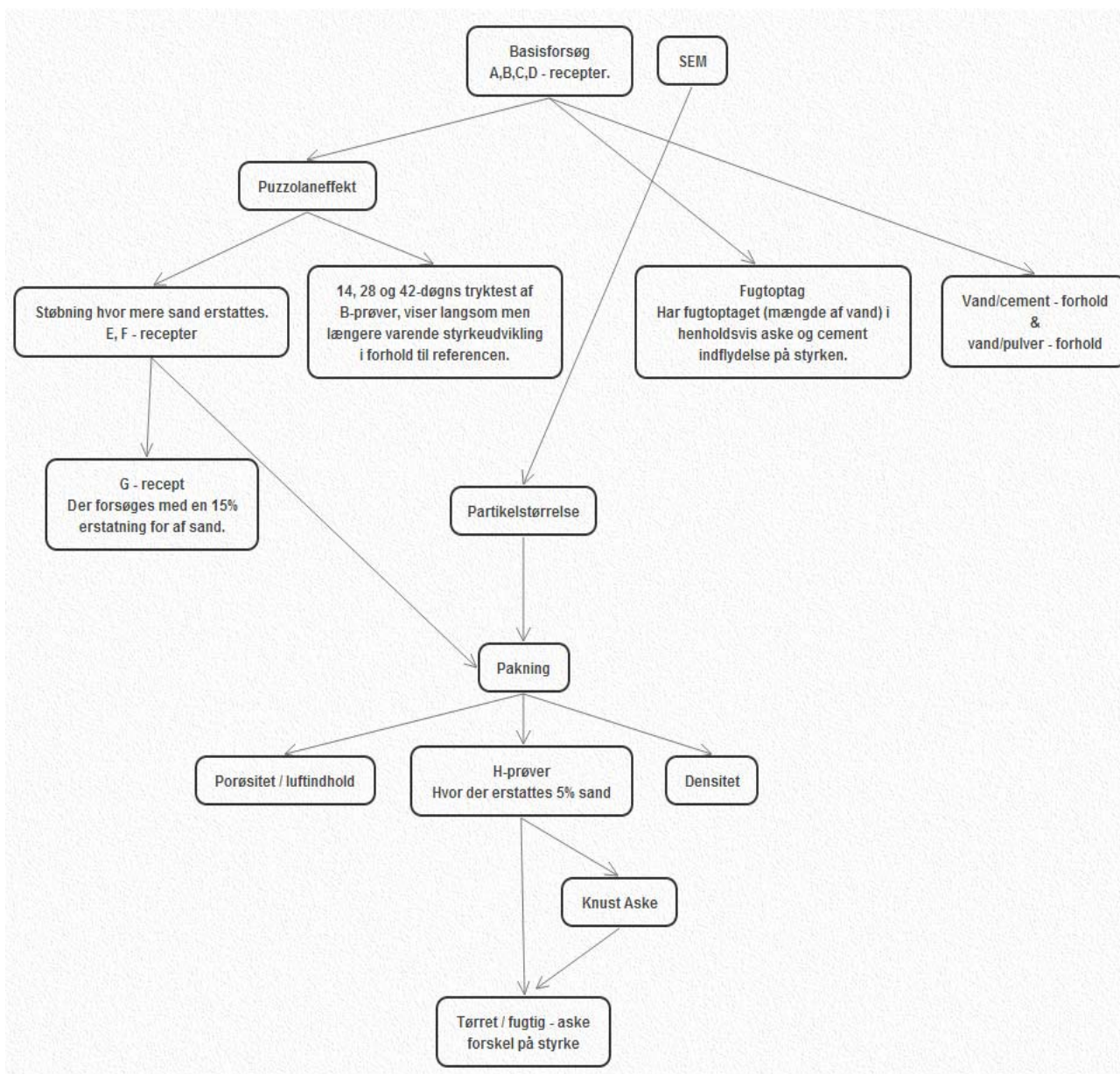
Kemiske krav	Metode			Fundet værdi i asken
Organisk materiale	EN 196-2	Kategori A <	5,00%	0,16%
		Kategori B <	7,00%	
		Kategori C <	9,00%	
Chloridindhold	EN 196-2	<	0,10%	OK

*Tabel 15 – Krav fra DS/EN 450 – 1 sammenholdt med fundne værdier fra laboratorieforsøg.*

Som det ses ud fra ovenstående tabel, opfylder den deponerede aske fra Lynettefælleskabet I/s kravet til mængden af organisk materiale som kategori A. Den ligger endda klart under det tilladelige værdi, hvilket er godt, da en høj mængde organisk stof bl.a. kan gøre det svært at kontrollere konsistens i en betonbladning. Det er tidligere i dette afsnit påvist, at chloridindholdet i asken overholder kravene fra DS/EN 206 – 1 til brug i uarmeret beton, som ikke må være over 0,1 %. Derfor er kravet fra DS/EN 450 -1 også overholdt.

#### 4.4 Grafisk overblik over tryktest og udvikling af nye recepter

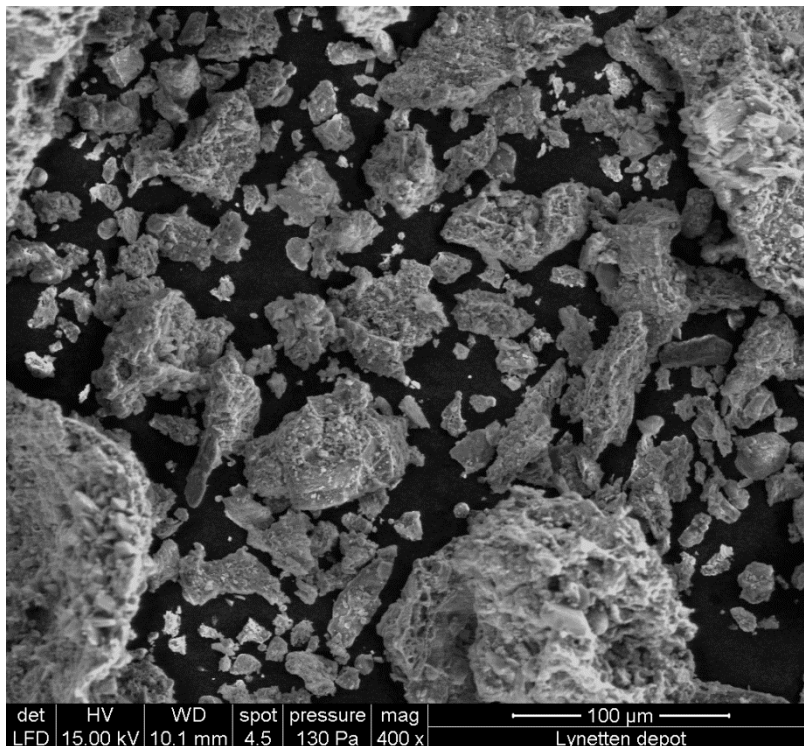
Diskussionen og behandling af resultater omkring tryktestforsøgene er lavet på baggrund af den kronologiske udvikling af støberecepten og forarbejdningen af asken. Interessante resultater er blevet undersøgt, og nye recepter er udviklet for at optimere brugen af asken. Figur 3 viser en grafiskoversigt over, hvordan forskellige muligheder for brugen af aske er blevet undersøgt.



Figur 3 - Grafisk oversigt der viser fremgangsmetoden og udvikling af recepter.

#### 4.5 SEM-billeder af almindelig aske

Som en del af karakteriseringen af asken gennemgik den en SEM-undersøgelse. På billede 7 ses et billede fra undersøgelsen. På billedet kan strukturen og størrelsen af partiklerne ses.



*Billede 7 - Billede af ubehandlet aske fra Lynetten (depot) ved 400 gange forstørrelse.*

Billedet viser, at der er mange forskellige partikelstørrelser, hvor en stor del af partiklerne har en mindre størrelse. De mindre partikler kan være medvirkende til at øge pakningsgraden, og gøre prøven stærkere. Mere om det i afsnittet "*Brug af aske til at øge pakningsgraden af mørtlen*".

Foruden indblik i partikelstørrelsen blev der udført mapping som en del af SEM-undersøgelsen. Her er der lavet billeder over, hvilke grundstoffer der befinder sig på overfladen. Disse billeder er vedlagt som bilag 12.

#### 4.6 7-døgns trykstyrker på basisrecepter

De første trykforsøg blev udført efter syv døgn. De viste en tendens til faldende styrke ved erstatning af cement med aske. Mere aske, lavere styrke, som det ses af nedenstående diagram 1. D-prøven viste det bedste resultat af de fire prøver diagrammet indeholder, og opnåede næsten samme trykstyrke som referencen. D-prøven indeholdte samme mængde cement som referenceprøven, og burde derfor have mindst samme styrke som referencen, hvis asken ikke havde nogen effekt. En mulighed er, at asken har en retarderende effekt på blandingen, og mørtlen langsommere vil udvikle styrke. Der blev derfor støbt prøver til 14, 28 og 42 døgn for type B og D for at kunne følge styrkeudviklingen.

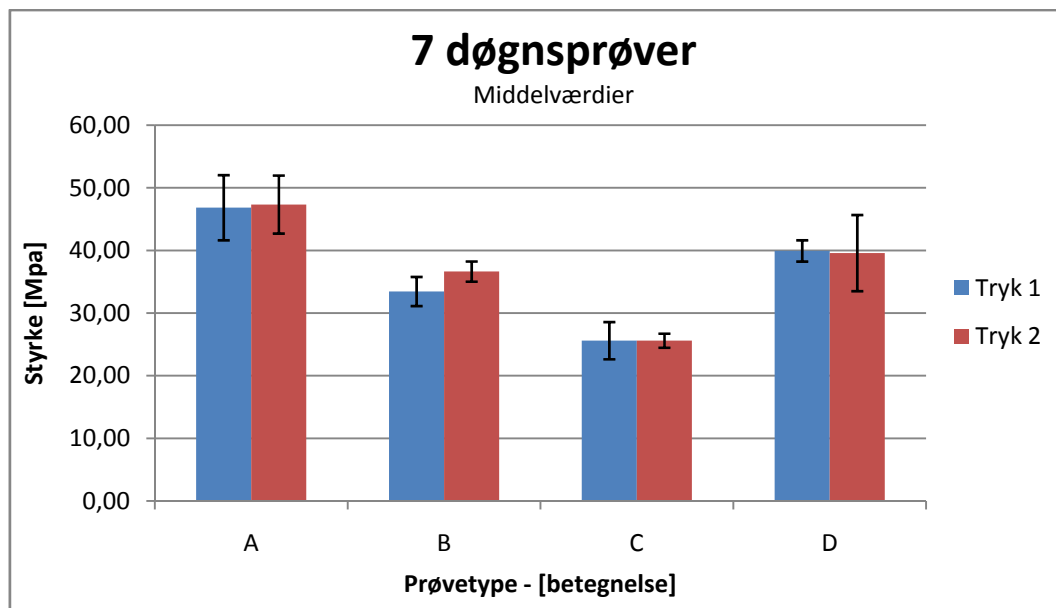


Diagram 1 - Gennemsnit af trykstyrke samt spredning på baggrund af 3 prøver af hver type. Diagrammet er lavet på baggrund af målinger fra bilag 6.

#### 4.7 Puzzolaneffekt

Den lavere styrke eller retardereffekt kunne skyldes, at asken har en puzzolaneffekt, der gør at blandingen hydratiserer langsommere. For yderligere at undersøge denne puzzolaneffekt, blev der støbt nye prøver efter nogle nye recepter, hvor mere sand blev erstattet med aske.

De nye prøver resulterede i, at blandingen blev langt mere tør og sværere at vibrere. Det var nødvendigt at tilsætte ekstra vand, men det blev forsøgt at holde dette på et minimum for at have et bedre sammenligningsgrundlag. Efter syv døgn blev prøve E og F trykprøvet. De viste en markant lavere styrke. Der blev støbt endnu en E- og F-prøve, hvor der blev tilsat en større mængde vand for at se, om der havde været mangel på vand, hvorved mindre hydratisering har fundet sted. Der blev ligeledes støbt en G-prøve for bedre at kunne vurdere den optimale erstatning af sand. Den anden støbning af E- og F-prøver viste samme resultater som første tryktest. Resultaterne vises sammen med de første trykresultater i diagram 2.

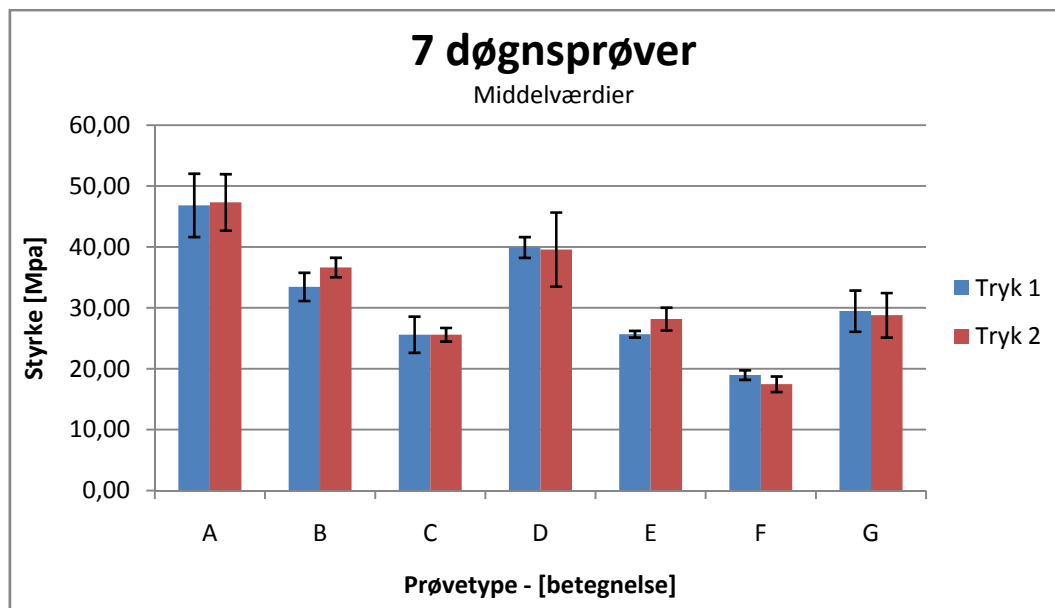
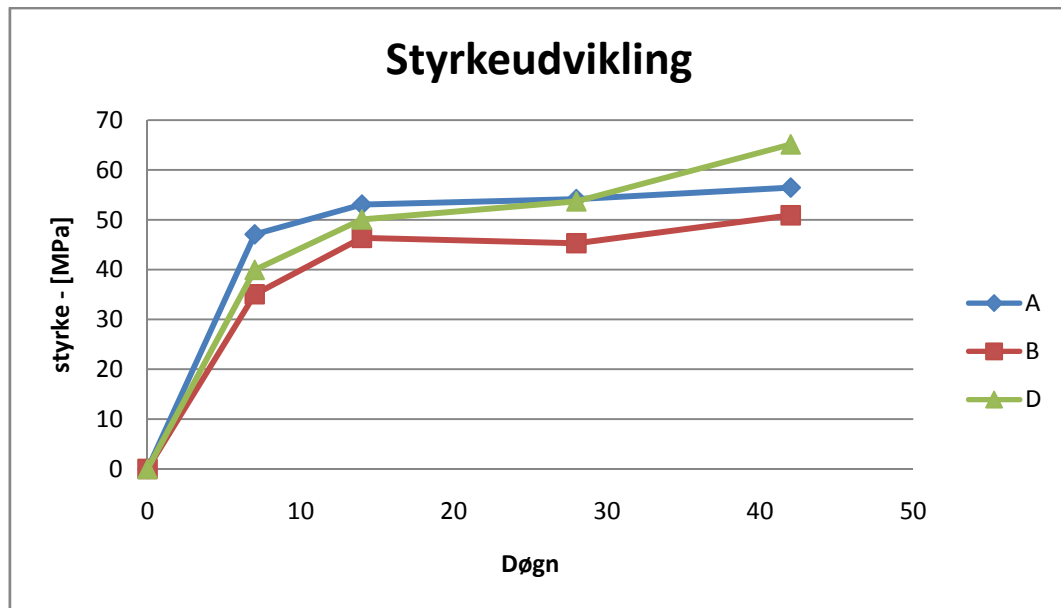


Diagram 2 - Gennemsnit af trykstyrke, samt spredning, på baggrund af 3 prøver af hver type. Diagrammet er lavet på baggrund af målinger fra bilag 6.

Den yderligere erstatning af sand har resulteret i en meget lavere styrke i forhold til, hvor meget aske der yderligere er blevet tilsat. For at bevise effekten af de langsomvirkende puzzolaner fortsættes der med recepterne for prøve B og D. Hvis senere tryktest af disse viser, at de opnår styrke over tid, kan det være interessant at foretage yderligere forsøg med C, E, F og G.

Hvis ikke asken har en puzzolanisk effekt. Kan den faldende styrke være et resultat af, at asken har et større overfladeareal pr. vægtenhed end sand. Derfor giver tilslaget (aske og sand), en langt større overflade som cementen skal binde sammen. Ved at øge overfladearealet, uden at tilsætte mere cement, vil styrken af den færdige prøve falde, da dele af tilslaget ikke er bundet sammen. Det kan være forklaringen på den faldende styrke, ved at mængden af aske der erstattes med sand, øges.

Ved tryktest af B- og D-prøver der er hærdet over længere tid, viser resultaterne, at asken har en langsomvirkende puzzolaneffekt. B-prøver opnår ikke samme styrke som referencen, men indeholder også mindre cement, altså må asken have indvirkning på styrken. Det ses også af nedenstående graf 2, for B-prøven, at prøven udvikler styrke efter de 28 døgn, hvor referencekurven udjævnes. Det samme er gældende for D-prøven, der ender med en højere styrke. Det kunne være interessant med en yderligere målinger efter længere tid, for at se hvor længe styrkeudviklingen fortsætter.



Graf 2- Styrkeudvikling taget som gennemsnit af flere målinger. Grafen er lavet på baggrund af målinger fra bilag 6.

Styrkemæssigt har det vist, at 10% erstatning af sand har været den bedste blanding. Denne recept resulterede i en højere styrke end referencen. Ved at se på trykstyrken af D, E og F ses det, at mindre erstatning af sand med aske giver mere styrke. 42 døgns test har vist, at D- og B-prøver udvikler langsommere styrke. Derfor kunne det være interessant at se, hvad en 5% erstatning af sand ville resultere i. Mængden af aske vil begynde at blive meget lille, så det vil med denne recept ikke være den puzzolaniske effekt, der er mest interessant. Recepten har til formål at belyse, hvorvidt asken kan bruges til at pakke blandingen bedre.

#### 4.8 Brug af aske til at øge pakningsgraden af mørtlen

På baggrund af resultaterne fra D-, E-, F-, og G-prøverne samt det tidligere viste SEM-billede, laves en H-recept for at undersøge askens evner til at pakke blandingen bedre. Herved mindskes mængden af luftporer, og mørtlen vil blive stærkere. Trods den lille mængde af aske vil den stadig besidde en puzzolaneffekt, der yderligere ville kunne bidrage til en højere styrke.

Ved fastlæggelsen af H-recepten fastholdes, ligesom tidligere, samme mængde cement, for bedre at kunne sammenligne med referencen. Er der nogen ændring i styrken, vil det være et resultat af den tilsatte aske.

Der blev støbt nogle 7-døgns prøver efter H-recepten, og tryktesten viste interessante resultater. H-prøverne havde opnået en bedre styrke end referencen, som ses af diagram 3.

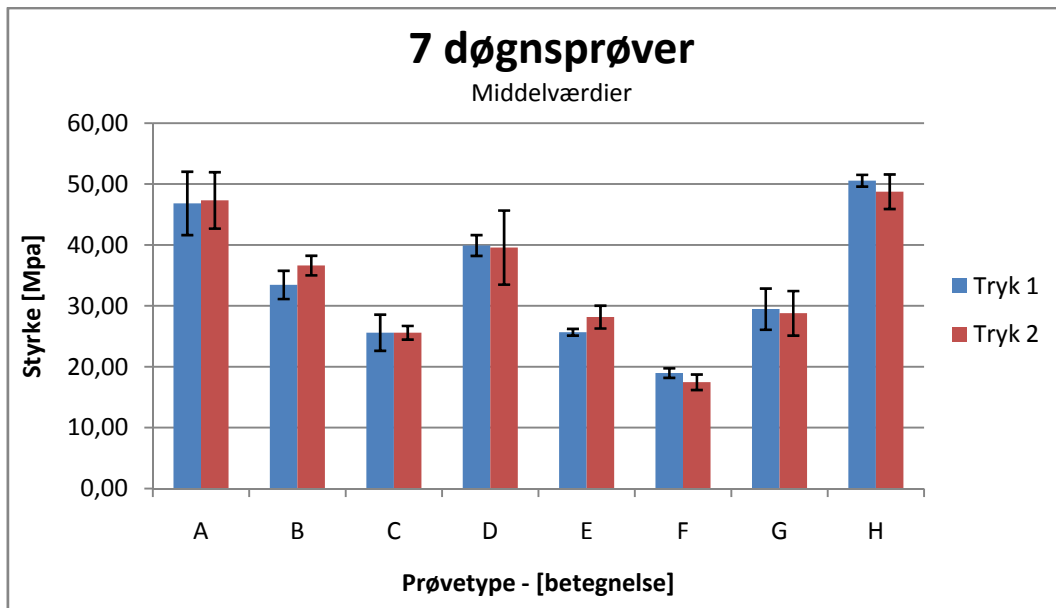
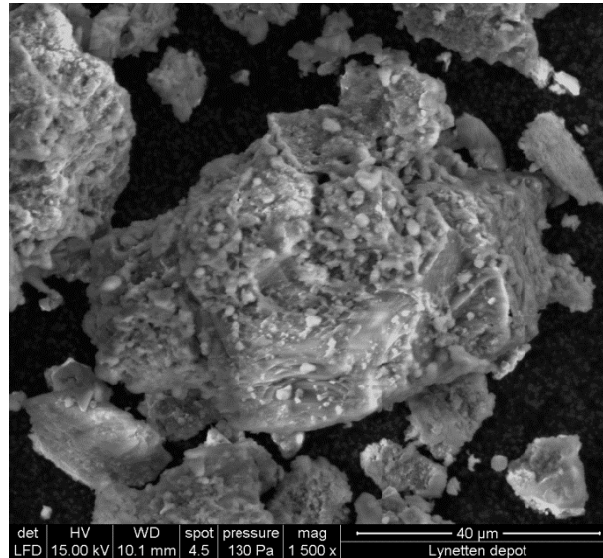


Diagram 3 - Gennemsnit af trykstyrke, samt spredning, på baggrund af 3 prøver af hver type. Diagrammet er lavet på baggrund af målinger fra bilag 6.

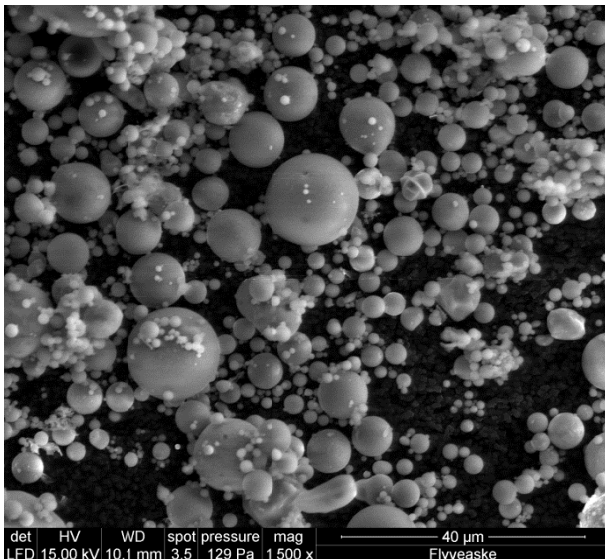
Resultaterne fra H-prøven er ikke markant højere, men tidligere forsøg har vist, at den puzzolaniske effekt først indtræder senere i hærdeforløbet. Den ekstra styrke kan derfor være et resultat af en bedre pakningsgrad. Inden der støbes H-recepter til at undersøge styrkeudviklingen, forsøges det at optimere askens evne til at pakke blandingen.

Flyveaske besidder en puzzolanisk effekt. Foruden denne er flyveaske som nævnt tidligere også velegnet til at øge pakningsgraden pga. partikelstørrelsen. Ved at lave en SEM-undersøgelse af flyveaske ses det, at partikelstørrelsen er mindre end asken fra Lynetten. Lynette-asken blev derfor knust i en ringknuser for at efterligne flyveasken.

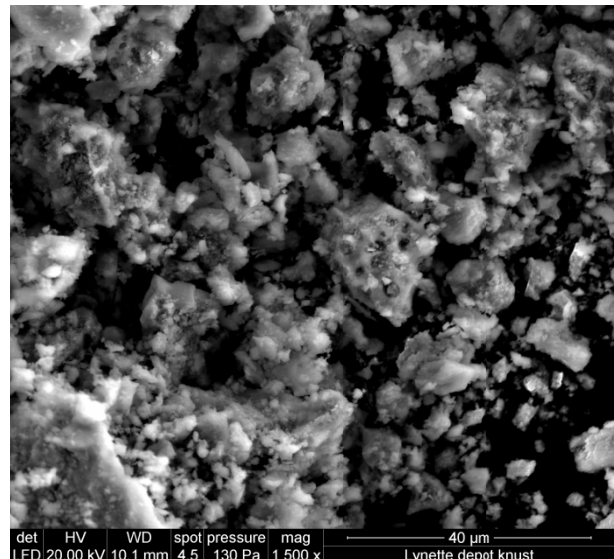




**Billede 8 - Ubehandlet aske fra Lynetten (1500 gange forstørrelse)**



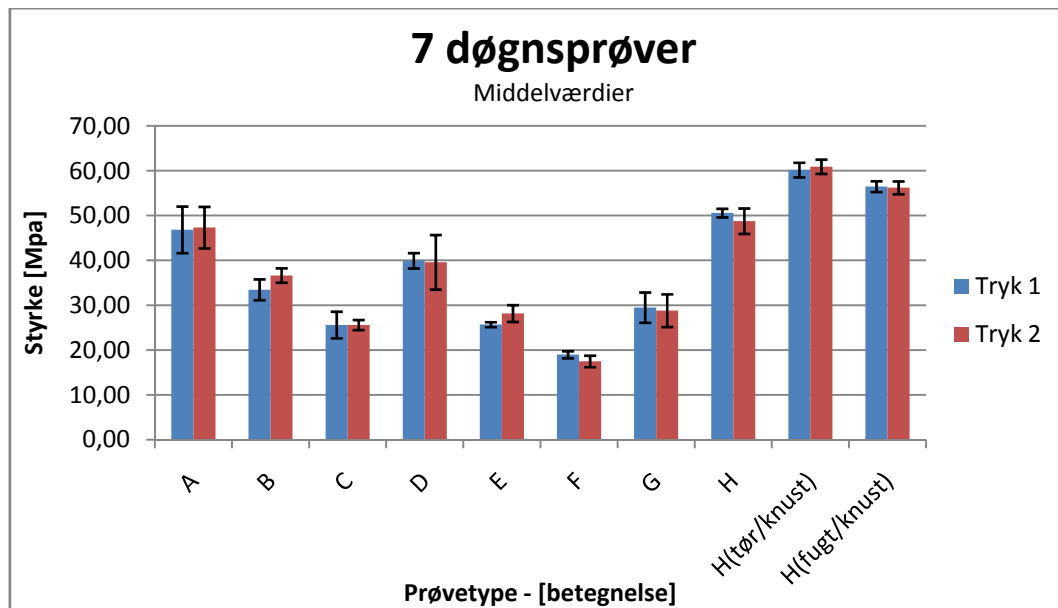
**Billede 9 - Flyveaske (1500 gange forstørrelse)**



**Billede 10 - Lynetten aske - knust (1500 gange forstørrelse)**

De 3 overstående billeder er alle taget ved samme forstørrelse for at kunne sammenligne partikelstørrelsen. Det ses, at den ubehandlede aske på billede 8 har en langt større partikel størrelse end flyveasken. Efter asken er blevet knust i ringknuseren, billede 10, har asken en langt større lighed med flyveasken på billede 9. Inden der igen blev støbt 7 døgn-prøver efter H-recepten, blev noget aske sat i varmeskab og herefter knust.

Der blev støbt 7 døgn-prøver efter H-recepten. Nogle prøver med tørret knust aske og andre prøver med fugtig knust aske. Resultaterne vises i diagram 4.

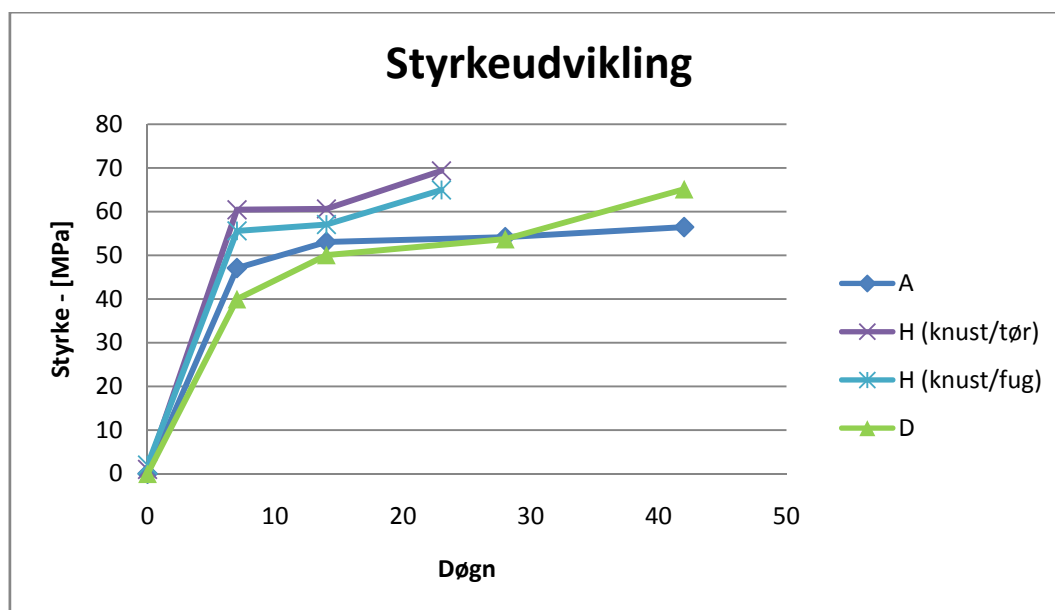


**Diagram 4 - Gennemsnit af trykstyrke, samt spredning, på baggrund af 3 prøver af hver type. Diagrammet er lavet på baggrund af målinger fra bilag 6.**

Diagram 4 viser, at den knuste aske har haft en positiv effekt på trykstyrken. Den eneste forskel fra den tidligere støbte H-prøve, der også er afbilledet i diagrammet, er, at asken er knust. Den øgede styrke stammer muligvis fra den øgede pakningsgrad, som den knuste aske har bidraget med.

Diagrammet viser ligeledes, at der ikke er nogen indikation på, at det første tryk svækker eller styrker prøven. Der er ikke noget mønster i, hvilket tryk der resulterer i den højeste styrke. Både første og andet tryk medregnes derfor i samtlige forsøg som værende uafhængige målinger.

Der bliver støbt yderligere prøver med knust aske på baggrund af H-recepten, for at følge styrkeudviklingen.



**Graf 3 - Viser styrkeudviklingen for H-recepter med knust aske i forhold til referencen. Grafen er lavet på baggrund af målinger fra bilag 6.**

Graf 3 viser, hvordan mørtlen med den knuste aske giver en meget hurtig styrke. Den knuste aske kan bidrage til den hurtige styrkeudvikling, idet den giver god mulighed for at starte hydratiseringen. Hydratiseringen kan sammenlignes med krystaldannelse. Det kræver en overflade at starte på, hvor krystallerne kan gro ud fra. De mange små askepartikler giver mørtlen et stort overfladeareal, hvor hydratiseringen kan starte. Ved at hydratiseringen starter på de mange overflader, kittes blandingen hurtigere sammen, og mørtlen afbinder hurtigere. Svarende til et glas vand, der fryser nedefra og op. Det ville fryse meget hurtigere, hvis det frøs fra alle overflader og ind mod midten.

Efter den hurtige styrke på de første syv dage er styrkevæksten meget svag frem til døgn 14 for H-recepten. Dette kunne være et tegn på hydratiseringen har fundet sted, og er fuldendt, eftersom trykstyrken efter det syvende døgn for den fugtige aske er sammenlignende med 42 døgns trykstyrken for referencen. Prøven med den tørrende aske har et lavere v/c-forhold, og ligger derfor højere.

På grafen er også indlagt styrkeudviklingen for D-prøven, der indeholder samme mængde cement som H- og referenceprøven. D-prøven har sammen med B-prøven vist tendenser til, at asken har en puzzolanisk effekt, der først indtræder omkring det 14. hærde-døgn. Dette ses af graf 2, hvor grafen for A- og D-prøven har samme form frem til det 14. hærde-døgn. Altså et tegn på at styrken kommer fra cementen, der hydratiserer. Efter 14 dage er det puzzolaneffekten fra asken, der giver styrke, da grafen for referencen herefter udjævnes. Hældningen på kurven er stejlere for H-prøven i forhold til D-prøven. Det kan være pga.

de finere askepartikler, at puzzolaneffekten opstår tidligere. Tidligere forskning har også vist, at knust aske forhøjer den puzzolaniske effekt<sup>18</sup>. Dette tyder også på at være tilfældet for H-prøven, sammenlignet med D-prøven for samme interval. Senere styrketests kunne have været interessante for at undersøge, hvorvidt denne styrkeudvikling fortsatte. For at kunne få svar på dette vil det være nødvendigt at lave forsøg til at kortlægge styrkeudviklingen over længere tid. Dette er ikke omhandlet af denne rapport.

#### 4.9 Tør aske i forhold til fugtig aske

Askens evne til at øge pakningsgraden er foretaget både med knust og tør aske for at undersøge, hvorvidt der er en væsentlig forskel. Forsøgene viser med tydelighed, at den tørre aske ved samtlige forsøg har medført højere trykstyrke i de tilfælde, hvor dette har været eneste forskel på de støbte prøver.

Det svar der ligger mest ligetil er, at den fugtige aske bidrager med en mængde vand, der har indvirkning på v/c-forholdet, som gør den svagere. En anden mulighed er, at den fugtige aske er lidt grovere, og derfor ikke kan pakke mørtlen helt så godt, som den tørrende kan. Den kan også skyldes, at den fugtige aske der er grovere, stadig er kittet sammen af noget bindemiddel, der er svagere end de bindinger, hydratiseringen skaber. Dette kunne resultere i en lavere trykstyrke.

Hvis ikke en enkelt årsag, kunne det være en blanding af dem alle tre. En ting er i hvert fald sikkert, den tørre vil give den højeste trykstyrke.

#### 4.10 Densitet

Resultater for tryktest af H-prøver, støbt med knust aske, viser, at der er en tendens til højere styrke. For at undersøge hvorvidt det er grundet en bedre pakning, vurderes densiteten. En højere densitet vil være et resultat af mindre luft, da der er benyttet samme type tilslag.

---

<sup>18</sup> Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties.

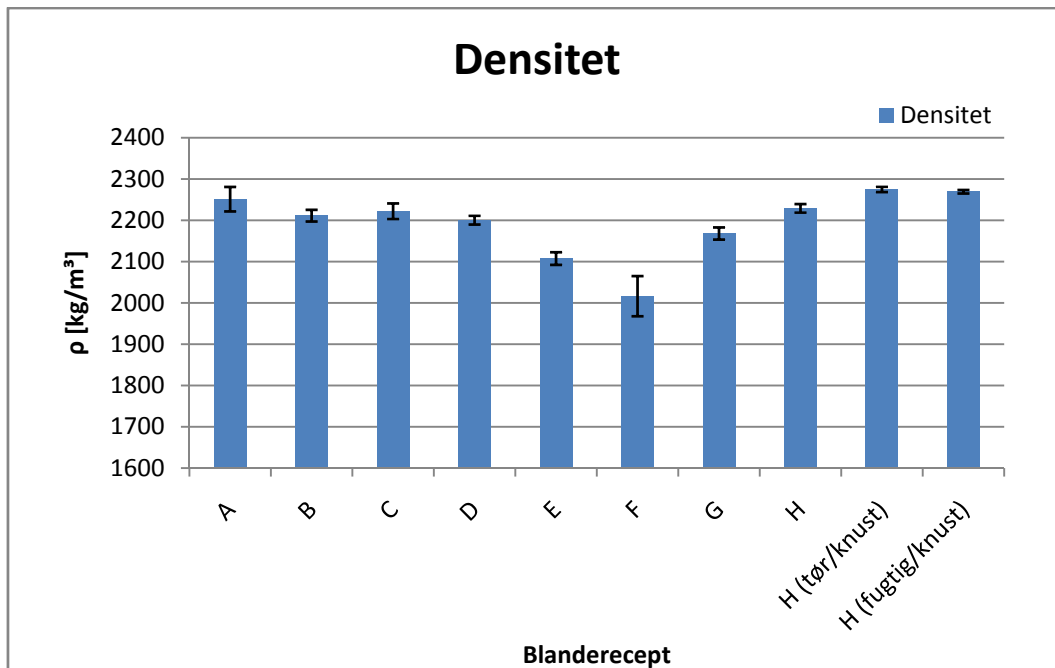


Diagram 5 - Densitet som gennemsnit af samtlige prøver, er afbilledet sammen med spredningen. Diagrammet er lavet på baggrund af målinger fra bilag 6.

Densiteten er som forventeligt faldende desto mere sand, der erstattes med aske pga. askens mindre rumvægt. Samtidig ses det, at densiteten stiger med den knuste H-recept. Stigningen er blot på  $20 \text{ kg/m}^3$  i forhold til referencen, svarende til ca. 1%, men det viser, at asken har fået pakket blandingen bedre. Forskellen kan tydeligst ses ved sammenligning af H-prøven støbt med almindelig aske. I forhold til den har prøven med knust aske en 2% større densitet. Knust aske har altså en bedre pakningsgrad end almindelig aske.

#### 4.11 Porøsitet

Som en del af beviset på at asken har en evne til at pakke blandingen bedre, foretages en række porøsitetsforsøg for at vise et mindre porevolumen i forhold til referencen og hermed en højere pakningsgrad.

Der blev løbende gemt stykker fra trykprøvningerne til forsøget for at have flere forskellige recepter at teste. Kun endestykker, der ikke umiddelbar har lidt skade fra trykprøvningen, blev gemt. Hovedformålet med porøsitetsforsøget var at bestemme porevolumen på prøvelegemerne. Alle prøvestykkerne har ligget i mere end 42 døgn, for at sikre at hydratiseringen er fuldendt. Disse er grafisk vist herunder.

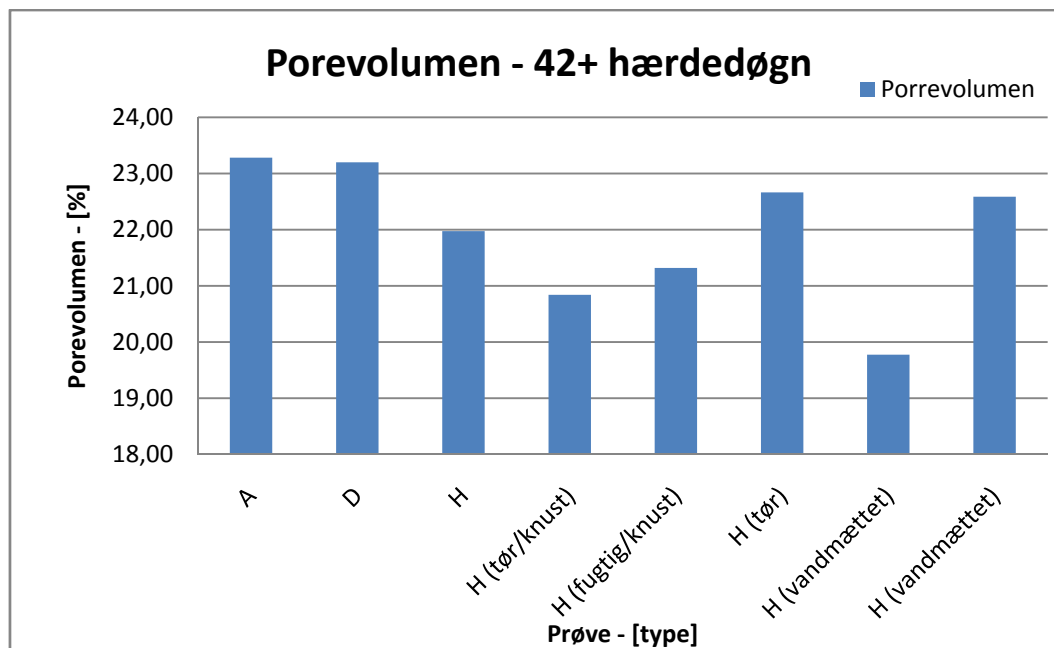


Diagram 6 - Porevolumen på prøvestumper fra tryktest. Diagrammet er lavet på baggrund af målinger fra bilag 3.

Nogle af stykkerne viste et langt højere porevolumen i forhold til de andre prøvelegemer. Disse er sandsynligvis ikke intakte, og er på den baggrund blevet kasseret. Som diagram 6 viser, er volumeprocenten på prøverne støbt efter H-recepter uden nogen behandling af asken i samme størrelsesorden som referencen. Den knuste aske viser et mindre porevolumen, hvilket er tegn på en bedre pakning af mørtlen.

Foruden tilslaget har vibrering og konsistensen en væsentlig indvirkning på pakningsgraden. En undervibreret mørtel/beton kan indeholde meget luft, der kan fjernes fra blandingen ved en længere vibrationstid. En tør blanding er meget lidt bearbejdelig, og kan være svær at vibrere luften ud af, da den ikke flyder så let. Alle blandinger er blevet forsøgt udsat for samme vibrationsstid for at mindske denne faktor. Den vandmættede var lidt tyndere i konsistensen end normalen for blandingerne. Dette kan være resultatet i det lavere porevolumen.

Resultaterne bidrager til beviset om, at den knuste aske øger pakningsgraden. Dog er stykkerne dele af en prøve, der har været udsat for tryk. Derfor blev der støbt nogle flere prøver som dobbelt bestemmelse.

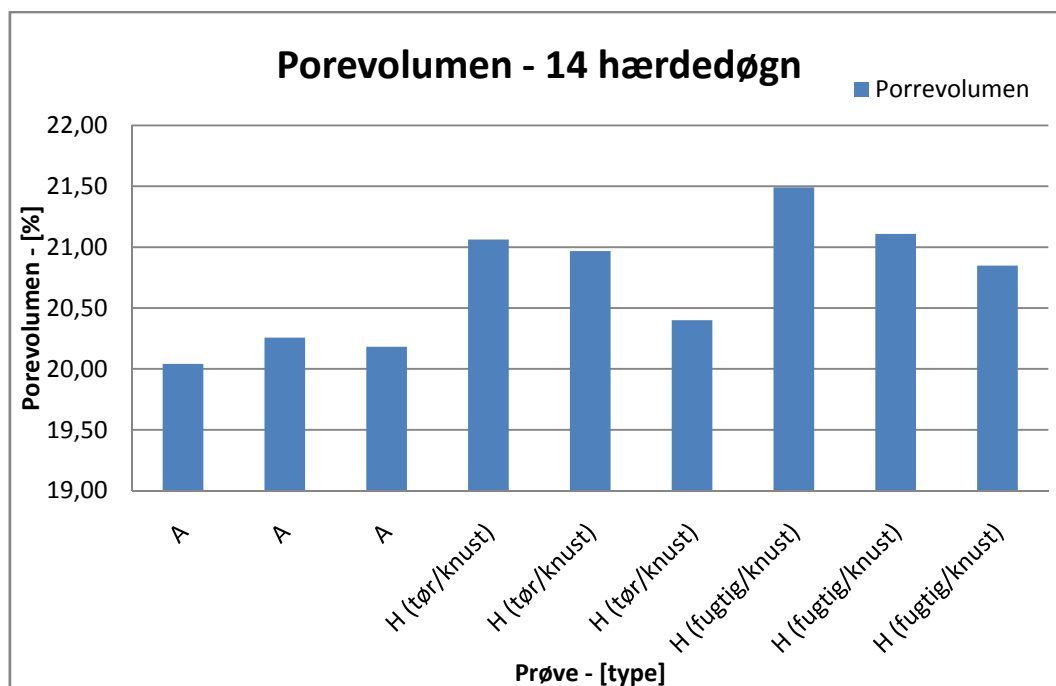


Diagram 7 - Porevolumen af prøver efter 14 hærdedøgn. Diagrammet er lavet på baggrund af målinger fra bilag 6.

Målingerne på diagram 7 er modstridende med de tidligere målinger. Her viser referencerne et mindre porevolumen. I kraft af at den anden måling er en tre dobbelt bestemmelse, med en lille afvigelse, tyder det på, at denne er mere korrekt. Referenceprøven fra diagram 6 var en stump fra en tryktest. Så det højere porevolumen kan skyldes, at stumpen ikke var intakt, men havde indre revner.

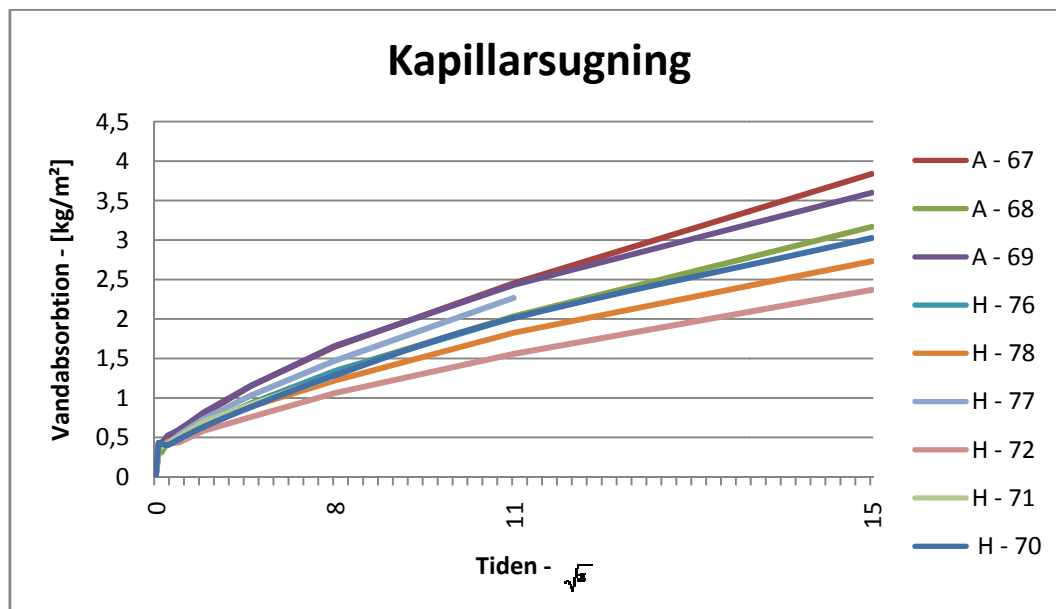
Den tredobbelte bestemmelse af prøverne stemmer godt overens med porevolumen fra første porøsitsforsøg, ved en betragtelse af gennemsnittet. Prøven med tørret knust aske har et lidt mindre porevolumen end den, hvor der er tilsat fugtig aske.

Det havde været forventet, at H-prøverne ved andet forsøg havde haft et større porevolumen end første forsøg. Ser man på graf 2 (styrkeudvikling), ses det, at referencen efter 14 dage endnu ikke har nået sin fulde styrke. Hydratiseringen er derfor ikke fuldendt. Det betyder, at der stadigvæk er væske i prøven, der vil reagere med cementen og blive til fast stof. Ved at prøverne sættes i varmeovn vil den resterende væske fordampe og efterlade et hulrum. Dette hulrum ville ikke opstå, hvis prøven havde hærdet i længere tid.

Diagram 7 viser altså ikke tegn på, at asken har en evne til at pakke mørtlen bedre. Dog er den tredobbelte bestemmelse lavet af samme blanding og vibreret samtidig. Sandet kunne være fra bunden af spanden og dermed være mere finkornet. En mulighed er også, at de var vibreret i længere tid, og dermed blevet pakket bedre.

## 4.12 Kapillarsugning

For at undersøge mørtlens modstandsdygtighed overfor fugtindtrængen blev der foretaget et kapillarsugningsforsøg. Til forsøget blev der støbt prøver efter H-recepten for at kunne vise en tættere struktur ved sammenligning med referenceprøven.



Graf 4 - Vandopsugningen af mørtelprøver over tid. Grafen er lavet på baggrund af målinger fra bilag 3.

Som graf 4 viser, ligger graferne for referenceprøve 67 og 68 som de højest placerede. Den sidste reference ligger lidt lavere, hvor H-77 ligger lige over. Foruden denne ligger samtlige H-recepter lavere end referencerne. Dette er tegn på en tættere struktur med mindre porevolumen, der mindsker muligheden for den fugttransport, der foregår i porestrukturen.

## 4.13 Vand/cement-forholdet

B- og D-recepten har vist, at asken har en puzzolanisk effekt, der udvikler styrke over længere tid. Dog har B-prøven vist, at puzzolaneffekten ikke er lige så stærk, som den cementen besidder. Dette er vist på baggrund af 42-døgs testen. Her opnåede B-prøven ikke samme styrke som referencen. Derved vil det være forkert i vandcementforholdet at regne asken for lige så kraftig som cementen. For at kunne foretage korrekte beregninger med Bolomeys-formel, skal der beregnes en aktivitetsfaktor for asken. Dette er ikke omhandlet af dette projekt. Optegnes v/c-forholdet i et diagram med den tilhørende styrke, kan det vurderes, hvorvidt der er en sammenhæng.



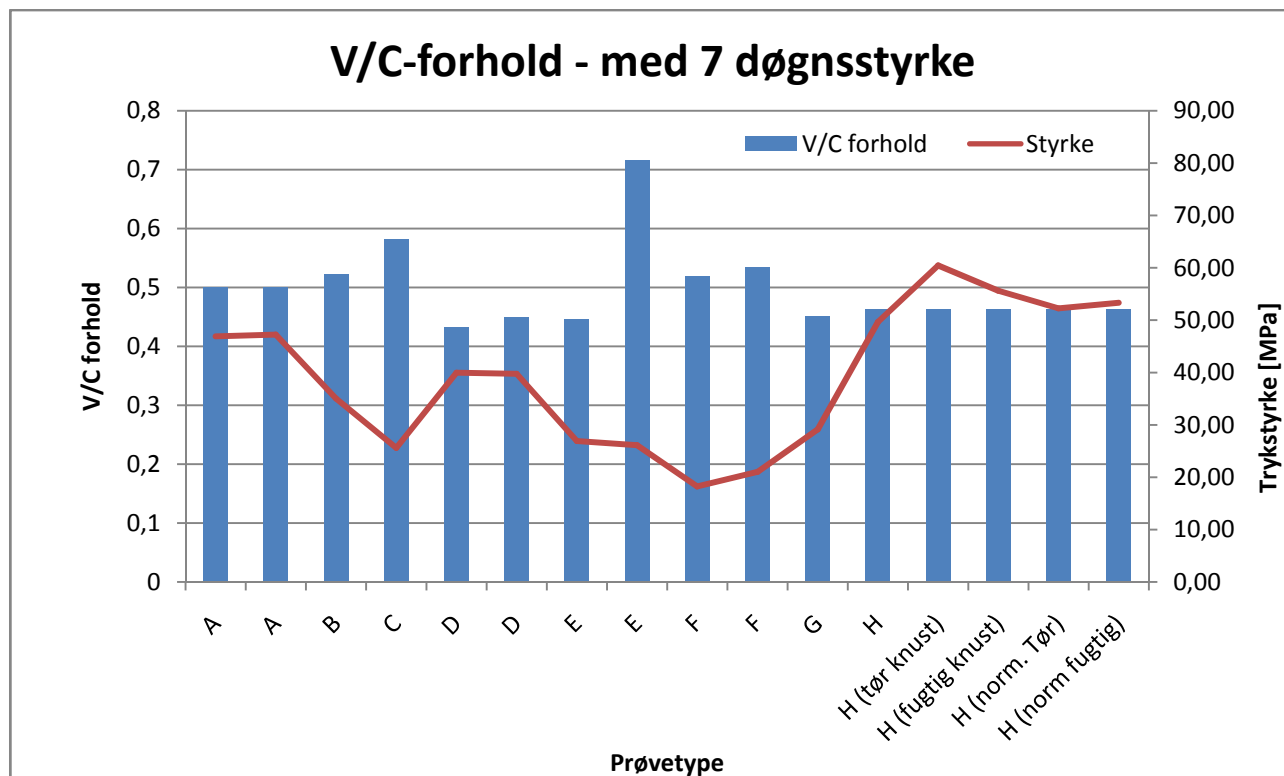


Diagram 8 - v/c-forhold og sammenhæng med trykstyrken efter 7 døgn. Diagrammet er lavet på baggrund af målinger fra bilag 5.

Diagram 8 viser hvordan v/c-forholdet for størstedelen af prøverne ligger mellem 0,4 og 0,5, hvor askens fulde vægt er medregnet som cement. Styrkegrafen er meget svingende, hvilket tydeligt viser, at styrken ikke kun er afhængig af v/c-forholdet.

#### 4.14 Fugtoptag

Forsøg har vist, at asken har et væsentligt vandhold. Dette skyldes, at asken har været deponeret under åben himmel. Vandprocenten tyder desuden på, at asken er kittet sammen af et porøst materiale, hvor vand kan ophobes og fastholdes via kapillarsugning. Denne egenskab kan være uheldig, fordi der er mindre vand til, at cementen kan hydratisere, ved at vandet fastholdes i asken. Det kan være problematisk, fordi mørtlen vil opnå styrke langsommere, pga. det manglende vand der er bundet i askens pore og som frigives langsomt.

I blandingsprocessen blandes aske og cement, hvorefter der tilsættes vand. Her vil cementen og asken være fælles om at reagere med vandet. Der blev derfor foretaget et forsøg for at undersøge, hvorvidt der er problemer med vandoptaget. Forsøget blev udført på baggrund af en H-recept, hvor v/c-forholdet blev fastholdt for at sikre en forskel i styrken var grundet fugtoptaget. Asken blev først tørret. Den samme mængde tørret aske, og vand blev afmålt til to blandinger. I det ene tilfælde blev aske tilsat vandet, hvor

asken under omrøring frit kunne optage så meget vand så muligt. Den anden fulgte den normale procedure beskrevet i DS-196-1.

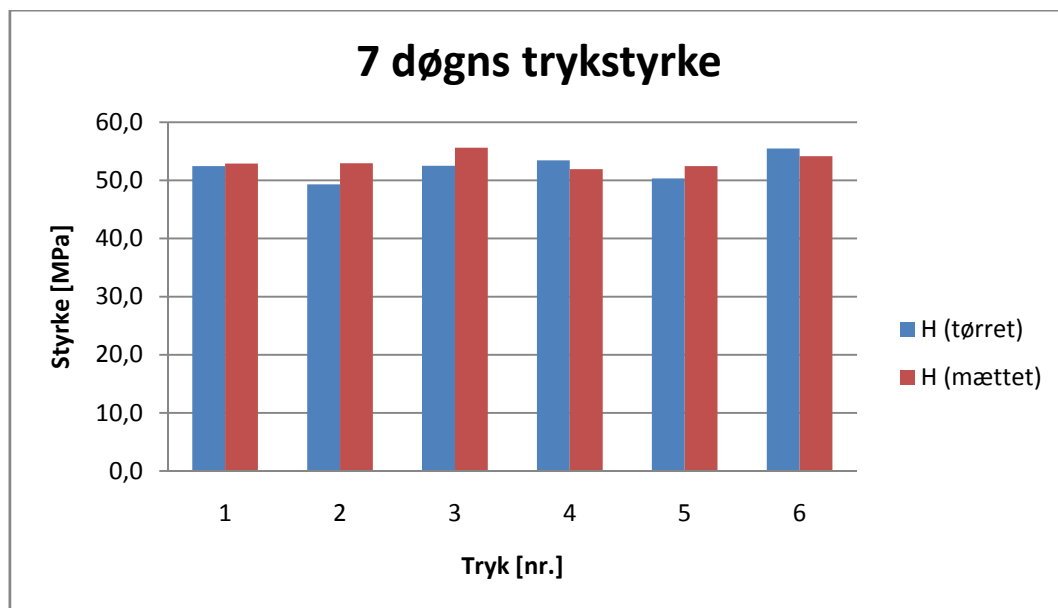


Diagram 9 - Viser styrken af 6 tryk efter 7 hærdedøgn. Diagrammet er lavet på baggrund af målinger fra bilag 6.

Diagram 9 viser ikke nogen tendens til, at den mættede blanding skulle være svagere, end hvor cement og aske er blandet med vand samtidig. Altså er der ikke nogen problemer med mangel på vand, til at cementen kan hydratisere med H-recepten. Det kunne være interessant ligeledes at udføre forsøget med B- og D-recepten, hvor askeprocenten er højere.

#### 4.15 Asken som kommercielt tilsætningsstof eller erstatningsstof

Resultaterne har vist, at asken har egenskaber, hvor den både kan bruges som tilsætningsstof for at forbedre en blanding og som erstatning. Samtlige recepter udspringer fra DS 196-1, hvor asken kun er blevet brugt som erstatningsstof for at følge proceduren. Ved H-recepten er erstatningen nede på 5%, og der er nærmere tale om et tilsætningsstof.

Hvilken anvendelse af asken vil være bedst til kommercielt brug? H-recepten giver en højere styrke, men B-recepten kræver mindre cement. For at give et billede på hvor meget cement der spares, benyttes Bolomeys formel.

Bolomeys formel er beregnet til udregning af betonstyrker med prøvelegemer af en hvis størrelse. Formlen kan derfor ikke benyttes direkte på vores mørtelprøver, da disse foruden det anderledes tilslag, er væsentligt mindre, end betonprøver normalt er. Størrelsen er væsentligt, da revner opstår, hvor prøvelegemet er svagest. Ved større prøver er der større chancer for, at der findes imperfektioner. Derfor beregnes først en styrkefaktor, for at tilpasse formelen til de støbte mørtelprøver.

Dette gøres ved at dele den faktiske gennemsnitsstyrke fra tryktesten, med den teoretiske beregnet med Bolomeys formel. Dette gøres både for 7 døgns, og 28 døgns styrker. For at verificere styrkefaktoren, blev en prøve med ekstra cement støbt og tryktestet. Testen viste en styrke, der lå  $\approx 0,8$  MPa fra det beregnede. Bolomeys formel med styrkefaktoren kan altså benyttes til at give omtrentlige beregninger på mørtelprøver. Ved at tage trykstyrkerne fra de forskellige recepter er det muligt, at beregne hvor meget cement, der burde være tilsat for at få den testede styrke. Ved at sammenligne med den faktiske mængde cement tilsat, er det muligt at give et billede af, hvor meget cement der kan spares ved tilsætning af aske. I tabel 16 ses besparelserne pr. 450 g cement samt den procentvise besparelse.

Blanderecept	Hærde døgn	Cement sparret pr. 450 g cement	Besparelse
[navn]	[døgn]	[g]	[%]
B	42	8,78	1,95
D	42	47,0	10,4
H (ubehandlet)	7	23,5	5,22
H(Fugtig & knust)	42	46,2	10,3
H (Tørret & knust)	42	72,0	16,0

*Tabel 16 - Cementbesparelse pr. 450 g. cement, efter beregning af modifikation af Bolomeys formel. Beregningen kan findes i bilag 11.*

Det er knap så interessant at se på besparelse af cement i B-prøven, da der her er tale om en erstatning. Det er dog et bevis for, at der er en puzzolanisk effekt, men at askens effekt er lavere end cementen.

Ved at kigge på D- og de forskellige H-recepter, viser det, at behandlingen af asken gør den mere effektiv. Det bør vurderes, hvorvidt den ekstra styrke er behandlingen værd. Rent praktisk og omkostningsmæssigt, vil det være nemmest blot at knuse asken, før den tilsættes. Det vil kræve et stort energiforbrug at tørre asken, så det der spares, vil muligvis blive forsvindende lidt. Asken kunne opbevares tørt, efter det kommer fra ovnen, hvorved det er muligt at opnå den største besparelse. Hvorvidt asken dermed har de samme egenskaber, må forsøg med denne type aske vise. Det er ikke gjort i denne rapport.

Et andet problem omkring brugen af slamaske er farven. Jernindholdet i asken giver den færdige beton et rødtligt skær, hvilket som tidligere nævnt gør det svært at afsætte betonen kommercielt. Her vil det være en fordel at bruge H-recepten, da denne resulter i en meget lille farveforskel. På billede 11 ses prøver efter 14 døgn. På billede 12 ses de samme prøver efter 30 døgn.



Billede 11 - Prøver støbt efter H-recept efter 14 hærdedøgn.



Billede 12 - Prøver støbt efter H-recept efter 30 hærdedøgn.



Billede 13 - Prøver efter mere end 60 hærdedøgn. Typen fremgår af billedet.

Billederne viser, at den røde farve aftager med tiden. På billede 13 ses prøver, der har ligget i mere end 60 døgn. Her er farveforskellen meget mindre, trods det er prøver med højt aske indhold. Hvis den røde tone stadigvæk er et problem rent synsmæssigt, er der stadig gode muligheder for at bruge aske i beton, så længe den ikke anvendes til synligt beton. Der er gode muligheder for renselag, fundamenter og betonelementer der skal skalmures eller males/tapetseres.

Ved at betonen pakkes bedre, kan det ske, at betonen ikke længere er frostsikker, og dermed kun kan anvendes i et passivt miljø, hvor temperaturen ikke kommer under frysepunktet.

#### 4.16 Videre forskning

Hvis der fremover skal arbejdes med asken fra Lynettefællesskabet I/s, der har ligget i depot, kunne følgende være interessant at undersøge:

### **Karakteristik af asken**

En mere dybdegående karakteristik bør udarbejdes for asken. Denne bør sammenholdes med krav bl.a. DS 450 -1 eller hvis der, på det givne tidspunkt hvor man ønsker asken undersøgt, er udarbejdet en standard, der omhandler slamaske.

### **Styrkeudvikling over længere tid**

Som det fremgår af "*Resultat & Diskussion*"-afsnittet, kunne det være interessant at støbe B, D, og H - prøver, der hærdet over længere tid, end det er blevet gjort i dette projekt. Den længere hærdetid skal give et bedre indblik i den langsomt virkende puzzolaneffekt og omfanget af denne.

### **Større datagrundlag**

Der bør ligeledes foretages flere forsøg med blanderecepterne udviklet i denne rapport. Et større datagrundlag vil være nødvendigt for at kunne fastslå askens effekt, hvor der i denne rapport kun er blevet påvist tendenser. Egenskaberne vil dermed med større sikkerhed kunne bestemmes.

## 5 Konklusion

Laboratorieundersøgelser er blevet udført for at karakterisere asken og finde eventuelle problematiske egenskaber. Asken indeholder en række tungmetaller, hvor enkelte overstiger givne grænseværdier. Dette anses ikke som problematisk, da udvaskningstest viser, at tungmetallerne bliver bundet i mørtlen ved støbning, og dermed ikke er til fare for det omkringværende miljø.

For at fastslå den optimale brug af asken er flere forskellige recepter og behandlinger af asken afprøvet. Ved en betragtning af v/c-forholdet for alle prøver, viser det sig, at asken har en indflydelse.

På baggrund af styrkeudviklingen af B- og D-prøverne er det ved sammenligning med referenceprøven muligt at konkludere, at asken besidder en puzzolaneffekt. B-prøven viser, at den puzzolaniske effekt ikke er lige så kraftig, som den cementen har, da erstatningen af cement med aske resulterer i en lavere styrke. D-prøven viser, at den puzzolaniske effekt først indtræder efter det 14. hærdedøgn, hvor referencegrafnen udjævnes.

Flere recepter er blevet afprøvet med henblik på at erstatte sandet i mørtlen med aske. På baggrund af 7 døgn-prøver er recepterne E, F og G blevet kasseret, fordi de rent styrkemæssigt er blevet fundet for svage.

Foruden asken som erstatningsstof er den også blevet forsøgt brugt som tilsætningsstof. Her er det ikke den puzzolaniske effekt, der ønskes påvist, men derimod om asken har en evne til at pakke blandingen bedre. På baggrund af SEM-undersøgelser er det forsøgt at efterligne partikelstørrelsen for flyveaske. H-recepter med knust aske har vist gode styrkeresultater, bl.a. grundet en bedre pakning. Densiteten er blevet målt for alle blandingerne, og her viser H-recepterne en højere densitet i forhold til referencen, hvilket er et tegn på en bedre pakning. Kapilarsugnings-forsøget støtter tesen om en højere pakningsgrad. Her suger prøverne støbt efter H-recepten mindre vand end referencen, hvilket er et tegn på en mindre porestruktur. Der er også udført et porøsitetsforsøg. Dette er en smule misvisende, og kan derfor ikke endegyldigt konkludere noget om pakningsgraden.

På baggrund af styrkeudviklingen fra H-recepterne med knust aske er der tilbøjeligheder til hurtigere styrkeudvikling. Dette kan være grundet den knuste aske, der bidrager med et stort overfladeareal, hvor hydratiseringen kan starte, hvilket giver en kortere hydratiseringsperiode.

Overslag på besparelsen af cement tyder på, at askens optimale brug, vil være som tilsætning i tørret knust tilstand.

## 6 Referenceliste

Cowi, Unicon, SpildevandscenterAvedøre. (2004). *Afsætningsmuligheder for slamske til beton*. Parallelvej 2, 2800 Kongens Lyngby: COWI.

Dorthe Mathiesen, T. I. (2001). Pakningsanalyser og ideal partikelfordeling - et værktøj til anvendelse ved betonproportionering. *Betong* (3), s. 25-26.

Jensen, B. C. (2008). *Betonkonstruktioner efter DS/EN 1992-1-1. 1. udgave*. Nyt Teknisk Forlag 2008.

Kim Vestergaard Pedersen, A. J.-J. (2005). Flyveaske til betonproduktion - påvirkning af luftindblanding. *Dansk Kemi*, 86 (9), s. 33-37.

Klimaupdate. (18. januar 2010). *Klimaupdate*. Hentede 04. januar 2012 fra <http://www.klimaupdate.dk/default.asp?newsid=789&opt=1>

Mathiesen, M. T. (2002). *Beton med slamaske*. Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut.

Miljøministeriet. (10. marts 2011). *Miljøstyrrelsen - fakta om spildevandsslam*. Hentede 04. januar 2011 fra [http://www.mst.dk/Virksomhed\\_og\\_myndighed/Affald/Affaldsfraktioner/spildevandsslam/](http://www.mst.dk/Virksomhed_og_myndighed/Affald/Affaldsfraktioner/spildevandsslam/)

Miljøstyrelsen. (23. December 2006). *Retsinformation*. Hentede November 2012 fra Slambekendtgørelsen: <https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=13056>

Miljøstyrelsen. (8. August 2008). *Retsinformation*. Hentede November 2012 fra Grænseværdier for bioaske: <https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=116609>

Miljøstyrelsen. (24. December 2010). *Retsinformation*. Hentede November 2012 fra Bekendtgørelse for restprodukter: <https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=134831>

Nielsen, F. R. (2010). *Bygningsmaterialer - Grundlæggende egenskaber. 1. udgave, 6. oplag*. Polyteknisk Forlag.

Nielsen, M. G. (2008). *Bygningsingeniørernes materialer - uddrag af Materialebogen. 1. udgave, 1. oplag*. Nyt Teknisk Forlag.

S. Donatello, C. f.-P. (2010). Effect of milling and acid washing on the pozzolanic activity of incinerator sewage sludge ash. *Cement & Concrete Composites* (32), s. 54-61.

Shih-Cheng Pan, D.-H. T.-C.-N. (2003). Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties. *Cement & Concrete Research*, 33, s. 1749-1754.

Spildevandcentret Avedøre I/s, Lynettefællesskabet I/s, Unicon A/s og Teknologisk Institut. (2007). *Bioaske til beton - en håndbog*.

Spildevandscentret Avedøre I/s, Lynettefællesskabet I/s & Unicon A/s. (2007). *Anvendelse af aske fra forbrænding af spildevandsslam (bioaske) i betonproduktion*. Lægmands rapport.

Svendsen, L. R. (2012). *Slamaskes anvendelighed i beton. Anvendelse af slamaske i beton efter fosfor indvinding*. Bachelorprojekt, DTU Civil Engineering, Kongens Lyngby.

Aalborg Portland. (2012). *Cement og Beton - en håndbog om cement, beton og mørtel*. 20. udgave.



## 7 Bilagsliste

### Bilag 1 - Forsøgsvejledninger

Vejledninger til de forsøg der er udført som en del af rapporten.

### Bilag 2 – Karakteristik af aske

Resultater fra forsøg til karakterisering af asken.

### Bilag 3 – Porøsitet og kapillarsugning

Resultater fra porøsitet- og kapillarsugningsforsøg.

### Bilag 4 – Støbeskemaer

Støbeskemaer for samtlige støbninger der er udført som en del af projektet.

### Bilag 5 – Vand/cement-forhold

Beregning af vand/cement-forholdet for samtlige 7 døgns prøver.

### Bilag 6 – Tryktest

Oversigt over alle trykforsøg, dimensioner og vægt.

### Bilag 7 – Spredning på trykforsøg

Spredningen på de enkelte tryk.

### Bilag 8 – Oplukning og udvaskningstest (ICP)

Måleresultater fra ICP-måling af både aske og udvaskning.

### Bilag 9 – Saltindhold

Målinger af saltindhold.

### Bilag 10 – Mailkorrespondance med Lynetten

Mailkorrespondance med Lynetten I/S, med uddybende spørgsmål omkring afsætning af aske.

### Bilag 11 – Udregning af cementbesparelse

Udregning af hvor meget cement der spares ved tilsætning af aske, på baggrund af Bolomey's formel.

### Bilag 12 – Mapping

### Bilag 13 - Målinger fra: "Slamaske i beton - effekt af knusning og syrevask af slamaske"

Målinger fra: "Slamaske i beton - effekt af knusning og syrevask af slamaske"

# **Bilag 1 - Forsøgsvejledninger**

Vejledninger til de forsøg der er udført som en del af rapporten.

# Laboratorieøvelser

### Bilag 1.1 Ledningsevne i aske

---

5 gram tør aske afvejes og anbringes i en plastiskflaske. Dernæst tilsættes der 12,5 mL destilleret vand vha. af fuld pipetten. Der laves i alt tre prøver, og efter vandet er tilsat, anbringes prøverne på rystebordet i 30 minutter. Prøverne tages herefter af bordet og asken bundfalder over 20 minutter, således at en væskefase har adskilt sig over aksens.

Hernæst kan selve målingen af ledningsevnen foretages. Ledningsevneelektroden skylles vha. destilleret vand, og anbringes i væsken hvor efter ledningsevnen måles.

### Bilag 1.2 PH i 1 M KCl opløsning. Askevæske i forhold 1:2,5

---

5 gram tør aske afvejes på en teknisk vægt og anbringes i en 20 mL plastiskflaske. Dernæst tilsætter man 12,5 mL 1 M KCl-opløsning vha. pipette. Der laves i alt 3 prøver og disse placeres i et rysteapparat i en time. Prøverne tages af apparatet og asken får lov til at bundfalde over 5-10 minutter, således at en væskefase har adskilt sig over aksens.

Hernæst benyttes en kombinationselektrode er der forbundet til et pH-meter, der måler med en nøjagtighed på 0,05 pH-enheder. Elektroden placeres i den øverste del af prøverne, hvor det skal undgås at elektroden rammer asken. Imellem hver måling skylles elektroden grundigt med destilleret vand, og tørres forsigtigt med papir.

### Bilag 1.3 Glødetab i aske

---

Der laves 3 prøver til dette forsøg. Først placeres 3 digler i muffelovnen i 30 minutter og herefter afkøles de i en eksikator i 20 minutter. Så afvejes der 2,5 gram tør aske til hver digel. Dernæst stilles de 3 prøver i den 550° C grader varme muffelovn. De varmes i 1 time og herefter placeres diglerne med den glødende aske i eksikatoren til afkøling og derefter vejes diglerne med aske igen.

Glødetabet beregnes således:

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

## Bilag 1 Laboratorieøvelser

### Bilag 1.4 Vandopløselighed

---

Der laves to prøver hvor 100 gram tør aske afvejes vha. den tekniske vægt og anbringes i en 1 liter plastikflaske hvor der tilsættes 500 mL destilleret vand for hver prøve. Prøverne omrystes og stilles til side indtil asken er bundfaldet. Imens asken bundfalder vejes filterpapiret og anbringes i en tragt der placeres i et måleglas. Dernæst hældes væsken ned i måleglasset og der tilsættes igen 500 mL destilleret vand til plastikflasken. Den omrystet og stilles til bundfældning. Dette gøres en gang til. Herefter hældes hele indholdet fra plastikflasken over i filtret indtil al væsken af dryppet fra. Når asken ser næsten tør ud anbringes aske og filter i en varmeovn ved 105 grader natten over. Til sidst vejes asken og filtret igen.

### Bilag 1.5 Vandindhold i aske

---

Der laves en tredobbelte bestemmelser for at fastslå asken vandindhold. 3 petriskåle afvejes vha. en teknisk vægt og der afvejes ca. 100 gram aske, som anbringes i hver sin petriskål. Herefter anbringes skålene i varmeskab og man lader prøverne stå ved 105°C natten over. Dagen efter afkøles prøverne og petriskålene samt asken afvejes igen vha. den tekniske vægt.

Vandindholdet i asken regnes som en procentdel ud fra følgende formel:

$$\text{vandindhold i \%} = \frac{m(\text{vådprøve}) - m(\text{tørprøve})}{m(\text{vådprøve})} \cdot 100$$

### Bilag 1.6 Bufferkapacitet

---

Der afvejes 20 gram aske, der anbringes i en 500 milliliterflaske og der iblandes 300 mL destilleret vand. Herefter anbringes flasken på et rystebord, og prøven rystes i 30 minutter. Efter omrystningen måles prøvens PH-værdi, og dernæst iblandes der 1 mL koncentreret HCl. Prøven placeres igen på rystebordet i 30 minutter. Dette fortsætter indtil prøvens PH-værdi ligger stabilt (PH 2-1).

## Bilag 1 Laboratorieøvelser

### Bilag 1.7 Oplukning af askeprøver

---

Først afvejes der 1 gram tørret aske vha. en teknisk vægt og dette anbringes i en autoklaveglas, hvortil der tilsættes 20,00 mL halvkoncentreret  $\text{HNO}_3$  med fuld pipetten. Dernæst placeres glasset i autoklaven med et tryk på 200 kPa ( $120^\circ\text{C}$ ) i en periode på 30 minutter. Herefter henstilles flasken til afkøling ved stuetemperatur. Når prøven er afkølet tilstrækkeligt, filtreres denne med sug gennem et  $0,45\ \mu\text{m}$  filter. Dette forgår i et stinkskab. Flasken med saltpetersyrer og aske, skylles 3 gange grundigt med destilleret vand, og filteret suges tørt mellem skylkene. Dernæst hældes filtratet over i målekolben på 100 mL, der iblandes destilleret vand op til 100 mL mærket på kobles og væskeerne blandes. Til sidst hældes prøven på en 20 mL plastflaske der skal bruges til målingen af metalkoncentrationen i et Ion Coupled Plasma apparat (ICP). Der laves i alt 3 prøver.

### Bilag 1.8 Vandopløselige anioner

---

Der laves i alt tre prøver, og dette sker ved først at afveje 10 gram tørret aske, pr. prøve, vha. en teknisk vægt. De 10 gram aske anbringes derefter i en 100 mL plastikflaske hvortil der tilsættes 50 mL destilleret vand. Herefter anbringes prøverne på et rystebord, hvor de står natten over. Dagen efter bruges sprøjtefiltre til at filtrere prøverne og disse bruges i ionchromotografen, IC.

### Bilag 1.9 Udvaskning af tungmetaller

---

Tidligere støbte prøver tørres vha. af et varmeskab ( $105^\circ\text{C}$ ) og knuses i en ringknuser. Derefter afvejes der, på en teknisk vægt, 40 gram og dette anbringes i en 250 mL plastikflaske, hvori det tilsættes 80 mL destilleret vand med fuld pipette. Der er i denne rapport i alt lavet 5 prøver, med ved to af prøverne blev der benyttet 500 mL flasker på grund af mangel på 250 mL flasker. Ligeledes er der fra prøven H 64 kun afmålt 20 gram aske, og kun tilsat 40 mL destilleret vand. Der laves kun en prøve pr. støbning. Herefter anbringes prøverne på rystebordet, hvor de skal ligge i 24 timer. Dernæst tages prøverne af rystebordet og bundfældes over 15 minutter. Der måles PH på alle prøverne (se PH vejledning).

Når prøverne er bundfaldet, filtreres de igennem et  $0,45\ \mu\text{m}$  filter, og væsken hældes over i en vial. Denne væskeprøve konserveres med 0,1 mL koncentreret saltpetersyrer  $\text{HNO}_3$ , og bruges til ICP måling.

## Bilag 1 Laboratorieøvelser

### Bilag 1.10 Porøsitet

---

Prøverne stilles forinden selve porøsitetsmålingerne i et varmeskab ved 105°C således at disse er helt udtørrede. Hernæst afvejes prøverne på en vægt med 0,1 % nøjagtighed og anbringes i en eksikator, hvorefter en vakuumpumpe tilsluttes. Prøverne skal i vakuum i 3 timer. Når de 3 timer er gået, tages pumpen fra og en gummislange monteres i stedet på eksikatoren med den anden ende i en spand med destilleret vand. Hanen på eksikatoren åbnes nu, og vandet vil pga. undertrykket strømme ind til prøverne. Disse dækkes således at der ca. er 5 cm vand over den øverste prøve. Når dette er opnået lukkes hanen igen, og prøverne lades nu stå i 15 minutter. Derefter åbnes hanen igen for at skabe atmosfærisktryk og prøverne står nu med dette i 24 timer. Herefter vejes prøverne under vand, så aftørres de med en opvredet klud og vejes over vand.

### Bilag 1.11 Kapillarsugning

---

Prøverne stilles forinden selve kapillarsugningsmålingerne i et varmeskab ved 105°C således at disse er helt udtørrede. Rent principielt skal prøverne være i ligevægt med klimaet de befinder sig i. Prøverne vejes og deres sugeflade samt højde noteres. Hernæst fyldes en fotobakke med destilleret vand, så vandet opnår en højde der er ca. 5 mm over nogle afstandsholdere der er placeret i fotobakken. Derefter placeres prøvernes sugeflade på afstandsholderne, og et stopur startes. Prøverne tages op at vandet efter henholdsvis 1, 2, 4, 8, 16, 32, 60, 120 og 240 minutter fra starttidspunktet. Her tørres de med en opvredet klud og vejes.

### Bilag 1.12 SEM og Mapping

---

Asken struktur analyseres ved hjælp fra et scannings elektronmikroskop (SEM). Dette gøres af en laborant, ved at en lille mængde aske placeres på et stykke karbontape, der herefter placeres i apparatet. Hernæst påbegyndes scanningen og askens struktur observeres. Samtidig foretages der en mapping af asken. Denne fastslår hvilke metaller asken indeholder, mængden af dem og hvor disse er placeret.

# **Bilag 2 – Karakteristik af aske**

Resultater fra forsøg til karakterisering af asken.

Bilag 2  
Forsøg til karakteristisk af aske fra depot

**Vandinhold**

Prøve [nr]	Før tørring		Efter tørring		Resultater	
	Glas [g]	Aske [g]	Aske + glas [g]	Aske [g]	Vand [g]	Vandinhold [%]
1	109,06	100,9	195,34	86,28	14,62	14,49
2	108,68	99,7	194,03	85,35	14,35	14,39
3	93,73	99,83	179,15	85,42	14,41	14,43
4	105,24	127,68	214,69	109,45	18,23	14,28

**Ledningsevne i aske**

Prøve [nr]	Aske [g]	Vand [mL]	ledningsevne [mS/cm]
1	5	12,5	5,63
2	5	12,5	5,67
3	5	12,5	5,47

**PH**

Prøvenr.	pH-værdi
1	8,3
2	8,26
3	8,31

**Glødetab**

prøvenr. []	Før varme		Efter varme	
	Digel [g]	Digel + aske [g]	Digel + aske [g]	Glødetab %
1	15,4529	17,9766	17,9477	0,161
2	15,5352	18,0202	17,9905	0,165
3	16,1231	18,6273	18,598	0,157

Prøvenr.	Før varme		Efter varme		
	Filter	Aske	Filter + aske	Flister + aske	tab i procent
1	4,32	208,9	213,22	211,56	0,78
2	4,4	202,18	206,58	204,74	0,89

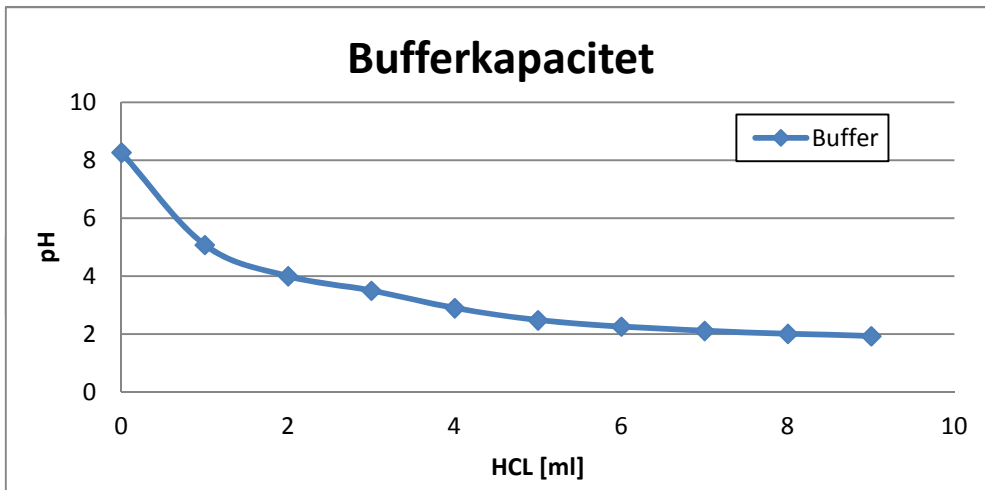


Bilag 2  
Forsøg til karakteristisk af aske fra depot

**Bufferkapacitet**

<b>Vægt af aske</b>	20,03	g
<b>Vand</b>	300	g
<b>HCl</b>	1	ml/30 min

Forsøg [nr]	PH [pH]	tilsat [ml]	Tid [min]
1	8,27	0	30
2	5,08	1	60
3	4	2	90
4	3,5	3	120
5	2,9	4	150
6	2,48	5	180
7	2,26	6	210
8	2,11	7	240
9	2,01	8	270
10	1,93	9	300



# **Bilag 3 – Porøsitet og kapillarsugning**

Resultater fra porøsitet- og kapillarsugningsforsøg.

Bilag 3  
Porøsitet og Kapilarsugning

**Porøsitet**

	Type	Prøve	Vægt tør	Mættet under vand	Mættet over vand	Volumen faststof	volumen af åbne porrer	Porrevolumen	Tørdensitet
	[ ]	[nr]	[g]	[g]	[g]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
+42 - Hærdedøgn	A	12	135,48	83,91	151,13	0,067	0,0157	23,28	2015,47
	D	24	134,75	83,57	150,21	0,067	0,0155	23,20	2022,06
	H	52	147,27	91,42	163	0,072	0,0157	21,98	2057,42
	H (tør/knust)	55	146,39	91,05	160,96	0,070	0,0146	20,84	2093,98
	H (fugtig/knust)	58	147,44	91,75	162,53	0,071	0,0151	21,32	2083,07
	H (tør)	62	144,9	90,17	160,94	0,071	0,0160	22,66	2047,48
	H (vandmættet)	65	118,06	72,54	129,28	0,057	0,0112	19,77	2080,72
	H (vandmættet)	66	131,59	88,61	144,13	0,056	0,0125	22,59	2370,14
14 - Hærdedøgn	A	67	257,71	160,08	282,18	0,122	0,0245	20,04	2110,65
	A	68	258,4	159,55	281,73	0,122	0,0233	19,09	2114,91
	A	69	257,47	160,74	283,67	0,123	0,0262	21,31	2094,44
	H (tør/knust)	70	263,58	161,42	285	0,124	0,0214	17,33	2132,87
	H (tør/knust)	71	259,64	162,93	287,5	0,125	0,0279	22,36	2084,29
	H (tør/knust)	72	261,99	164,44	289,83	0,125	0,0278	22,20	2089,40
	H (fugtig/knust)	76	259,56	163,4	289,64	0,126	0,0301	23,83	2056,08
	H (fugtig/knust)	77	263,17	164,73	291,36	0,127	0,0282	22,26	2078,26
	H (fugtig/knust)	78	265,26	163,57	289,14	0,126	0,0239	19,02	2112,45

$\rho(\text{vand})$       1000 g/cm<sup>3</sup>

$\rho(\text{luft})$         1,29 g/liter

Bilag 3  
Porøsitet og Kapilarsugning

**Kapilarsugning**

Prøvenr.		67	68	69	76	77	78	70	71	72
Prøve Type	enhed	A	A	A	H	H	H	H	H	H
Bredde	[mm]	40,10	39,50	40,80	39,90	39,90	40,00	39,50	40,00	40,00
længde	[mm]	39,95	39,80	39,70	40,00	40,00	40,00	40,00	39,50	39,80
Sugeflade	[mm <sup>2</sup> ]	1602,00	1572,10	1619,76	1596,00	1596,00	1600,00	1580,00	1580,00	1592,00
højde	[mm]	75,00	76,00	76,50	79,00	77,50	78,00	77,50	77,50	77,50
start vægt	[g]	257,71	256,98	258,86	262,51	264,63	262,96	258,97	261,38	264,25
vægt 1 min	[g]	258,40	257,47	259,56	263,17	265,26	263,58	259,64	261,99	264,89
vægt 2 min	[g]	- *	- *	- *	- *	- *	- *	- *	- *	- *
vægt 4 min	[g]	258,50	257,67	259,71	263,19	265,31	263,68	259,61	262,05	264,92
vægt 8 min	[g]	258,68	257,75	259,83	263,32	265,49	263,75	259,73	262,19	264,95
vægt 16 min	[g]	258,98	258,03	260,18	263,56	265,80	264,03	259,97	262,48	265,18
vægt 32 min	[g]	259,56	258,45	260,73	263,99	266,28	264,39	260,37	262,83	265,46
vægt 60 min	[g]	260,35	259,09	261,55	264,64	266,98	264,91	261,00	263,40	265,94
vægt 120 min	[g]	261,64	260,18	262,80	265,73	268,25	265,88	262,15	- **	266,73
vægt 240 min	[g]	263,86	261,96	264,69	- *	- **	267,33	263,75	- **	268,02

- \* Måling ikke nået inden for tidsgrænsen  
- \*\* Prøve væltet

# Bilag 4 – Støbeskemaer

Støbeskemaer for samtlige støbninger der er udført som en del af projektet.

Bilag 4  
Støbeskemaer

**Bladningsrecept A**

Støbning af referencer [A]											
døgn	Prøvenr.	Cement	Aske	Vand	SAND	Ekstra vand	Færdig støbt		Afformet		Kommentar
dage	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	dato	klokken	dato	klokken	
42	10,11,12	450,12	0	225,16	1350,21	0	19-09-2012	10:35	20-09-2012	09:15	
28	13,14,15	450,35	0	225,07	1350,11	0	19-09-2012	11:04	20-09-2012	09:15	
14	67,68,69	450,02	0	225,06	1350,03	0	28-11-2012	10:33	29-11-2012	10:43	bruges til kapilarsugning
1	-	450,11	0	225,04	1282,49	0	28-11-2012	11:49	29-11-2012	10:49	bruges til vica
7	82,83,84	540,01	0	225,02	1350,05	0	05-12-2012	14.49	06-12-2012	13.30	klumper i cement, ekstra cement

**Bladningsrecept B**

Støbning med aske [B]											
døgn	Prøvenr.	Cement	Aske	Vand	SAND	Ekstra vand	Færdig støbt		Afformet		Kommentar
dage	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	dato	klokken	dato	klokken	
42	16,17,18	405,05	45,07	225,27	1350,17	0	19-09-2012	11:20	20-09-2012	09:15	
28	19,20,21	405,18	45,11	225,27	1350,58	0	19-09-2012	11:39	20-09-2012	09:15	
14	34,35,36	405,03	45,08	225,18	1350,1	0	03-10-2012	08:40	04-10-2012	08:49	
7	1,2,3	404,95	44,95	225,15	1350,8	0	05-09-2012	08:42	06-09-2012	08:25	asken er fugtig, M2 bruger mere vand

Bilag 4  
Støbeskemaer

**Bladningsrecept C**

Støbning med aske [C]											
døgn	Prøvenr.	Cement	Aske	Vand	SAND	Ekstra vand	Færdig støbt		Afformet		Kommentar
dage	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	dato	klokken	dato	klokken	
7	4,5,6	360,12	89,96	225,15	1350,02	16,04	05-09-2012	09:02	06-09-2012	08:25	12-09-2012

**Bladningsrecept D**

Støbning med aske [D]											
døgn	Prøvenr.	Cement	Aske	Vand	SAND	Ekstra vand	startstøbning		afformning		Kommentar
dage	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	dato	klokken	dato	klokken	
42	22,23,24	450,6	135,05	225,29	1215,18	19,89	19-09-2012	11:55	20-09-2012	09:15	meget tør, eks. Rørning
28	25,26,27	450,09	135,01	225,06	1215,01	0	19-09-2012	12:12	20-09-2012	09:15	
14	37,38,39	450,12	135,13	225,05	1215,05	17,9	03-10-2012	09:00	04-10-2012	09:08	
7	46,47,48	450,09	135,01	225,13	1215,03	8,85	10-10-2012	09:35	11-10-2012	09:21	
7	7,8,9	450,02	134,97	225,01	1215,28	0	05-09-2012	09:26	06-09-2012	08:25	

**Bladningsrecept E**

Støbning med aske [E]											
døgn	Prøvenr.	Cement	Aske	Vand	SAND	Ekstra vand	startstøbning		Afformet		Kommentar
dage	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	dato	klokken	dato	klokken	
7	28,29,30	450,16	270,27	225,03	1080,19	38,97	19-09-2012	12:29	20-09-2012	09:15	meget tør, eks. Rørning
7	40,41,42	450	270,29	225,6	1080,27	93,8	03-10-2012	09:18	04-10-2012	09:34	lidt vådere end normal konsi

Bilag 4  
Støbeskemaer

**Bladningsrecept F**

Støbning med aske [F]											
døgn	Prøvenr.	Cement	Aske	Vand	SAND	Ekstra vand	startstøbning		Afformet		Kommentar
dage	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	dato	klokken	dato	klokken	
7	31,32,33	450,1	404,84	225,13	945,15	128,89	19-09-2012	13:21	20-09-2012	09:15	ekstrem tør, kørt med lav hastighed
7	43,44,45	450,1	405,08	225,05	945,15	141,33	03-10-2012	09:32	04-10-2012	09:45	tør, kørt med lav hastighed

**Bladningsrecept G**

Støbning med aske [G]											
døgn	Prøvenr.	Cement	Aske	Vand	SAND	Ekstra vand	startstøbning		Afformet		Kommentar
dage	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	dato	klokken	dato	klokken	
7	49,50,51	450,03	202,5	225,08	1147,58	26,98	10-10-2012	09:48	11-10-2012	09:32	



Bilag 4  
Støbeskemaer

Bladningsrecept H

Støbning med aske [H]											
døgn	Prøvenr.	Cement	Aske	Vand	SAND	Ekstra vand	startstøbning		Afformet		Kommentar
dage	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	dato	klokken	dato	klokken	
7	52,53,54	450,06	67,64	225,01	1282,47	0	23-10-2012	11:48	24-10-2012	11:44	
7	55,56,57	450,03	67,53	225,02	1282,57	0	06-11-2012	10:02	07-10-2012	11:00	tørret og knust aske
7	58,59,60	450,05	67,54	225,09	1283,53	0	06-11-2012	10:17	07-10-2012	11:00	fugtig og knust aske
7	61,62,63	450,02	67,53	225,16	1282,52	0	06-11-2012	10:23	07-10-2012	11:00	helt tør aske
7	64,65,66	450,15	67,51	225,01	1282,5	0	06-11-2012	10:44	07-10-2012	11:00	opfugtet aske
14	70,71,72	450,03	67,51	225,09	1282,5	0	28-11-2012	10:43	29-10-2012	10:50	tørret og knust aske, kapilar
14	73,74,75	450,16	67,52	225	1282,5	0	28-11-2012	11:03	29-10-2012	11:05	tørret og knust aske
14	76,77,78	450,01	67,51	225,05	1282,55	0	28-11-2012	11.22	29-10-2012	10:44	fugtig og knust aske, kapilar
14	79,80,81	450,02	67,5	225,04	1282,49	0	28-11-2012	11.37	29-10-2012	11:13	fugtig og knust aske

# Bilag 5 – Vand/cement-forhold

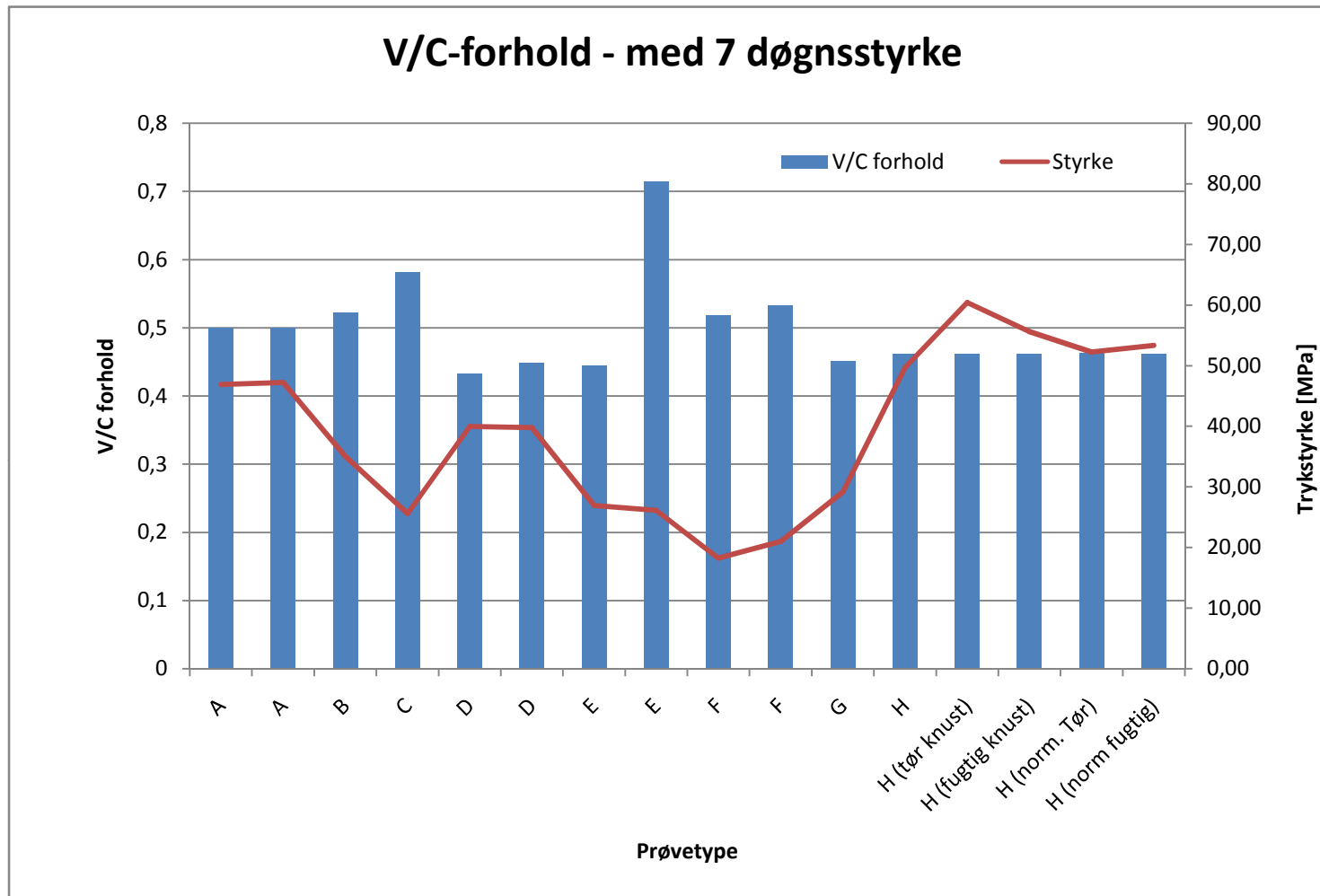
Beregning af vand/cement-forholdet for samtlige 7 døgns prøver.

## Bilag 5

Tabel over v/c-forhold for 7 døgnsprøver + styrke

Prøve type	Døgn	Prøvenr.	Cement	Aske	Vand	Vandbundet i aske	V/C forhold	Styrke
[betegnelse]	[døgn]	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[ ]	[MPa]
A	7	Reference	450	0	225	0	0,5	15,64
A	7	Reference	450	0	225	0	0,5	15,75
B	7	1,2,3	404,95	44,95	225,15	6,52	0,52	11,68
C	7	4,5,6	360,12	89,96	241,19	13,04	0,58	8,53
D	7	7,8,9	450,02	134,97	225,01	19,57	0,43	13,32
D	7	46,47,48	450,09	135,01	233,98	19,58	0,45	13,25
E	7	28,29,30	450,16	270,27	264	39,19	0,45	8,98
E	7	40,41,42	270,29	270,29	319,4	39,19	0,72	8,71
F	7	31,32,33	450,1	404,84	354,02	58,70	0,52	6,08
F	7	43,44,45	450,1	405,08	366,38	58,74	0,53	7,01
G	7	49,50,51	450,03	202,5	252,06	29,36	0,45	9,71
H	7	52,53,54	450,06	67,64	225,01	9,81	0,46	16,55
H (tør knust)	7	55,56,57	450,03	67,53	225,02	9,79	0,46	20,14
H (fugtig knust)	7	58,59,60	450,05	67,54	225,09	9,79	0,46	18,54
H (norm. Tør)	7	61,62,63	450,02	67,53	225,16	9,79	0,46	17,42
H (norm fugtig)	7	64,65,66	450,15	67,51	225,01	9,79	0,46	17,78

Tabel over v/c-forhold for 7 døgnsprøver + styrke



# Bilag 6 – Tryktest

Oversigt over alle trykforsøg, dimensioner og vægt.

Bilag 6  
Styrketest

Blandingsrecept A

Info			Geometri						Forsøgsresultater						kom - mentar	
prøve	Hærdetid	Prøve dag	bredde	snit	højden	snit	længden	snit	vægt	Densitet	Ultralyd	tryk 1	tryk 2	tryk 1		tryk 2
[nr]	[døgn]	[dato]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mS]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]	
13	28	17-10-2012	39,21	39,75	40,05	39,70	160,5	160,55	562,16	2218,8	39	112	99	56,4	49,9	
			39,86		39,06		160,6									
			40,17		40											
14	28	17-10-2012	40,13	40,67	39,86	39,91	160,1	160,10	567,16	2182,5	37,9	107	97	53,6	48,6	
			40,89		39,93		160,1									
			40,99		39,94											
15	28	17-10-2012	39,95	39,96	40,78	40,44	160	159,70	567,91	2200,8	37,8	81	88	40,1	43,5	
			40,03		40,58		159,4									
			39,89		39,96											
10	42	31-10-2012	40,19	40,24	39,22	39,55	162,9	162,75	568,85	2196,0	38,4	94	93	47,5	47,0	
			40,34		39,35		162,6									
			40,2		40,08											
11	42	31-10-2012	40,12	40,14	39,2	39,59	162,4	162,40	569,74	2207,6	37,7	115	117	58,1	59,1	
			40,17		39,65		162,4									
			40,12		39,93											
12	42	31-10-2012	40,06	40,08	40,51	40,13	162,6	162,50	575,84	2203,6	37,2	104	99	51,8	49,3	
			40,03		40,14		162,4									
			40,14		39,73											
82	7	12-12-2012	39,95	39,92	40,08	40,22	160,7	160,75	584,47	2264,3		126	125	62,7	62,2	ekstra cement
			39,94		40,22		160,8									
			39,88		40,36											
83	7	12-12-2012	39,94	39,94	40,01	40,20	160,4	160,50	584,23	2267,5		120	125	59,7	62,2	ekstra cement
			39,94		40,19		160,6									
			39,93		40,39											
84	7	12-12-2012	40,05	40,06	40	40,41	161	161,00	590,9	2266,8		130	129	64,3	63,8	ekstra cement
			40,1		40,46		161									
			40,04		40,78											

Bilag 6  
Styrketest

67	23	21-12-2012	40,01	40,01												et tryk, anden halvdel			
			40										125		62,5		0,0		
			-																
68	23	21-12-2012	40,02	40,02	40,03	39,96										et tryk, anden halvdel			
			40,01		39,89									129			64,5	0,0	
			-		-														
69	23	21-12-2012	40	40,00												et tryk, anden halvdel			
			39,99												123			61,5	0,0
			-		-														
	7			40,28		40,02		160,6	586	2263,5	37,4	96	77	48,0	38,5				
	7			39,9		40		160,8	588	2291,2	37	97	97	48,5	48,5				
	7			40,17		39,42		161	578	2267,2	37,1	99	97	49,5	48,5				
	7			39,9		40,9		160,0	589,0	2257,7	36,6	104	104	52,0	52,0				
	7			40,0		40,8		160,0	590,9	2263,1	37,6	92	94	46,0	47,0				
	7			39,9		40,6		160,1	584,2	2248,8	36,7	74	99	37,0	49,5				
	14			41,03		40,38		162	606	2257,8	37,9	113	116	56,5	58,0				
	14			40,5		40,24		162	591	2238,5	36,8	107	104	53,5	52,0				
	14			40,64		40,14		161,1	597	2271,7	37,4	110	115	55,0	57,5				
	14			39,9		40,8		159,8	589,1	2264,5	-	111	112	55,5	56,0				
	14			39,9		40,5		160,2	584,1	2256,3	-	106	115	53,0	57,5				
	14			40,0		40,7		160,7	589,8	2252,5	-	112	108	56,0	54,0				
	14									#####		101	81	50,5	40,5	Måledata fra Liv & Sabines rapport			
	14									#####		98	93	49,0	46,5				
	14									#####		103	105	51,5	52,5				
	28			40,19		40		161	591	2283,4	-	125	124	62,5	62,0				
	28			40,06		40,06		161,1	589	2278,2	-	123	126	61,5	63,0				
	28			40,2		39,98		161	591	2284,0	-	127	107	63,5	53,5				

Bilag 6  
Styrketest

28								#####		114	89	57,0	44,5	Måledata fra Liv & Sabines rapport	
28								#####		108	99	54,0	49,5		
28								#####		117	106	58,5	53,0		
42			40,61		40,15			161	597	2274,2	-	125	107	62,5	53,5
42			40,7		40,21			161,1	596	2260,6	-	122	119	61,0	59,5
42			40,1		40,15			161,5	589	2265,2	-	128	118	64,0	59,0
42										#####		117	113	58,5	56,5
42										#####		84	99	42,0	49,5
42										#####		117	106	58,5	53,0

Blandingsrecept B

Info			Geometri						Forsøgsresultater						kom- mentar
prøve	Hærdetid	Prøve dag	bredde	snit	højden	snit	længden	snit	vægt	Densitet	Ultralyd	tryk 1	tryk 2	tryk 1	
[nr]	[døgn]	[dato]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mS]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]
1	7	12-09-2012	39,95	39,97	39,58	39,64	160,05	160,06	566	2231,7	38,1	61	74	30,78	37,34
			40,04		39,63		160,06								
			39,93		39,71										
2	7	12-09-2012	40,10	40,10	40,16	40,23	160,08	160,09	577	2234,6	38,5	70	76	34,80	37,79
			40,11		40,28		160,09								
			40,08		40,24										
3	7	12-09-2012	39,86	39,90	40,27	40,23	160,1	160,10	575	2237,5	39,4	70	70	34,80	34,80
			39,86		40,23		160,09								
			39,98		40,19										
19	28	17-10-2012	39,93	40,08	40,11	40,01	160,5	160,45	566,39	2201,3	36,9	98	77	48,99	38,49
			40,15		39,99		160,4								
			40,16		39,93										
20	28	17-10-2012	40,31	40,35	39,95	39,96	160,3	160,40	564,89	2184,0	37,3	85	92	42,54	46,05
			40,33		39,99		160,5								
			40,42		39,94										



Bilag 6  
Styrketest

21	28	17-10-2012	39,81	40,11	39,87	39,94	160,5	160,50	567,79	2207,9	37,3	100	104	50,07	52,07	
			40,18		39,97		160,5									
			40,35		39,99											
34	14	17-10-2012	40,2	40,12	39,86	39,90	161,5	161,30	573,99	2223,2	38,4	74	93	37,10	46,62	
			40,02		39,92		161,1									
			40,14		39,91											
35	14	17-10-2012	39,16	39,17	40,02	40,14	161,3	161,40	564,55	2224,5	36,8	96	96	47,83	47,83	
			39,28		40,2		161,5									
			39,07		40,21											
36	14	17-10-2012	39,08	39,44	40,02	40,04	161	161,15	567,29	2229,0	38,5	94	91	46,95	45,45	
			39,8		40,08		161,3									
			39,45		40,02											
16	42	31-10-2012	39,87	39,91	39,79	40,14	161	160,95	568,33	2204,7	37	96	101	47,84	50,33	
			39,92		40,07		160,9									
			39,93		40,2											
17	42	31-10-2012	39,96	39,98	40,36	40,18	160,7	160,70	567,59	2198,3	36,8	96	106	47,78	52,76	
			39,98		40,25		160,7									
			40,01		39,94											
18	42	31-10-2012	40,1	40,03	39,92	40,29	160,6	160,55	569,89	2200,7	37,6	108	107	53,61	53,11	
			40,01		40,36		160,5									
			39,98		40,6											

Bilag 6  
Styrketest

Blandingsrecept C

Info			Geometri						Forsøgsresultater						kom- mentar
prøve	Hærdetid	Prøve dag	bredde	snit	højden	snit	længden	snit	vægt	Densitet	Ultralyd	tryk 1	tryk 2	tryk 1	
[nr]	[døgn]	[dato]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mS]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]
4	7	12-09-2012	39,99	40,03	39,83	39,74	160,06	160,06	571	2242,6	39,3	56	52	28,18	26,17
			40,03		39,63		160,05								
			40,07		39,76										
5	7	12-09-2012	40,05	40,02	40,33	40,32	160,04	160,03	573	2218,8	40	53	49	26,29	24,30
			40,00		40,32		160,02								
			40,01		40,32										
6	7	12-09-2012	39,85	39,91	39,95	40,27	160,00	159,99	567	2205,2	39,6	45	53	22,35	26,32
			39,90		40,46		159,97								
			39,99		40,39										

Blandingsrecept D

Info			Geometri						Forsøgsresultater						kom- mentar
prøve	Hærdetid	Prøve dag	bredde	snit	højden	snit	længden	snit	vægt	Densitet	Ultralyd	tryk 1	tryk 2	tryk 1	
[nr]	[døgn]	[dato]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mS]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]
7	7	12-09-2012	39,95	40,01	40,31	40,35	160,04	160,04	570	2206,0	38,5	90	90	44,61	44,61
			40,03		40,18		160,03								
			40,06		40,56										
8	7	12-09-2012	39,84	39,89	40,49	40,61	160,03	160,02	567	2187,3	38,4	74	61	36,44	30,04
			39,87		40,46		160,01								
			39,95		40,89										
9	7	12-09-2012	39,89	39,97	40,07	40,08	160,03	160,04	564	2199,7	38,6	85	86	42,41	42,91
			40,04		40,06		160,04								
			39,98		40,12										
46	7	17-10-2012	39,9	39,88	39,98	39,85	159,7	159,40	559,33	2208,2	39,2	82	72	41,15	36,14
			39,84		39,8		159,1								
			39,89		39,77										
47	7	17-10-2012	40,07	39,94	40,29	40,34	160,7	160,60	569,8	2202,1	41,3	82	94	40,66	46,61
			39,92		40,54		160,5								
			39,84		40,18										

Bilag 6  
Styrketest

48	7	17-10-2012	39,82	39,92	40,65	40,54	160,4	160,10	568,88	2195,6	39,5	77	73	37,98	36,01	
			39,9		40,51		159,8									
			40,03		40,47											
37	14	17-10-2012	39,5	40,21	40,05	40,08	161,4	161,35	573,07	2203,8	38,7	105	96	52,40	47,90	
			40,25		40,04		161,3									
			40,88		40,15											
38	14	17-10-2012	41,19	40,46	39,92	39,88	161,3	161,25	569,42	2188,5	38,9	88	104	44,13	52,16	
			40,68		39,91		161,2									
			39,51		39,81											
39	14	17-10-2012	41,67	40,97	39,86	40,06	161,4	161,25	581,49	2196,8	38,2	103	105	51,42	52,42	
			41,12		40,21		161,1									
			40,13		40,12											
25	28	17-10-2012	40,36	40,63	40,06	40,10	161,1	161,10	572,99	2183,0	38,3	102	108	50,87	53,87	
			40,65		40,09		161,1									
			40,88		40,15											
26	28	17-10-2012	40,87	40,90	40,11	40,03	160,8	160,75	577,64	2194,6	39,4	99	111	49,46	55,46	
			40,89		39,97		160,7									
			40,95		40,01											
27	28	17-10-2012	40,28	40,49	40,03	39,97	161,1	161,05	573,05	2198,3	37,4	107	118	53,54	59,04	
			40,57		39,96		161									
			40,63		39,93											
22	42	31-10-2012	39,86	39,89	40,38	40,82	160	159,85	578,92	2224,2	35,8	136	140	66,63	68,59	meget luft, målingen sagde 136 men brud stykke faldt af ved 131
			39,88		40,73		159,7									
			39,92		41,36											

Bilag 6  
Styrketest

23	42	31-10-2012	39,93	39,98	40,08	40,81	160,1	160,10	577,63	2211,3	36,3	137	134	67,14	65,67	meget luft
			40		41,11		160,1									
			40,01		41,24											
24	42	31-10-2012	39,94	40,04	41,3	40,85	160,4	160,35	579,36	2208,8	36,1	134	117	65,60	57,28	meget luft
			40,01		41,02		160,3									
			40,17		40,24											

Blandingsrecept E

Info			Geometri						Forsøgsresultater						kommentar	
prøve	Hærdetid	Prøve dag	bredde	snit	højden	snit	længden	snit	vægt	Densitet	Ultralyd	tryk 1	tryk 2	tryk 1		tryk 2
[nr]	[døgn]	[dato]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mS]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]	
28	7	26-09-2012	40,49	40,23	40,17	40,16	161,2	161,10	546	2097,6	43,1	51	55	25,40	27,39	porrøst
			40,03		40,19		161									
			40,18		40,12											
29	7	26-09-2012	40,03	40,01	40,39	40,26	161,1	161,05	545	2101,2	41,4	51	61	25,34	30,31	porrøst
			39,99		40,32		161									
			40		40,06											
30	7	26-09-2012	40,07	40,06	40,34	40,27	161	161,05	542	2086,2	42,5	53	54	26,32	26,82	porrøst
			40,12		40,41		161,1									
			39,98		40,07											
40	7		39,99	39,97	39,54	39,38	160,1	159,95	536	2127,6	42,6	49	49	24,89	24,89	meget fugtig
			39,96		39,25		159,8									
			39,95		39,35											
41	7		40,18	40,04	39,23	39,21	161	160,65	535	2119,8	42,7	51	54	26,01	27,54	meget fugtig
			40		39,16		160,3									
			39,93		39,24											
42	7		39,88	39,92	40,12	40,03	160,4	160,25	541	2113,0	42,3	57	50	28,48	24,98	meget fugtig
			39,89		39,95		160,1									
			39,99		40,02											

Bilag 6  
Styrketest

Blandingsrecept F

Info			Geometri						Forsøgsresultater						kom - mentar	
prøve	Hærdetid	Prøve dag	bredde	snit	højden	snit	længden	snit	vægt	Densitet	Ultralyd	tryk 1	tryk 2	tryk 1		tryk 2
[nr]	[døgn]	[dato]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mS]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]	
31	7	26-09-2012	40,09	40,07	40,27	40,15	163	163,00	520	1982,9	47,2	39	38	19,43	18,93	porrøst, mindre luft
			40,07		40,14		163									
			40,05		40,04											
32	7	26-09-2012	40,1	40,09	40,07	40,15	163	163,00	518	1974,5	47,2	39	34	19,43	16,94	porrøst, mindre luft
			40,05		40,23		163									
			40,11		40,15											
33	7	26-09-2012	40,06	40,05	39,83	39,85	163	163,00	510	1960,8	47,8	36	33	18,07	16,56	porrøst, mindre luft
			40,02		39,94		163									
			40,06		39,77											
43	7		39,96	39,91	38,25	38,76	160,3	160,30	510	2056,7	44,4	45	42	23,22	21,67	meget fugtig
			39,88		38,82		160,3									
			39,89		39,21											
44	7		40,03	39,95	39,34	39,63	160,2	160,15	523,4	2064,4	44,2	42	38	21,20	19,18	meget fugtig
			39,92		39,49		160,1									
			39,9		40,05											
45	7		40,01	40,08	40,52	40,15	160,1	160,10	530,8	2060,3	45,3	45	37	22,42	18,43	meget fugtig
			40,24		40,15		160,1									
			40		39,77											

Bilag 6  
Styrketest

Blandingsrecept G

Info			Geometri						Forsøgsresultater						kom - mentar
prøve	Hærdetid	Prøve dag	bredde	snit	højden	snit	længden	snit	vægt	Densitet	Ultralyd	tryk 1	tryk 2	tryk 1	
[nr]	[døgn]	[dato]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mS]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]
49	7	17-10-2012	39,81	39,89	38,84	38,92	160,5	160,50	541,45	2173,3	39,2	64	64	32,89	32,89
			39,91		38,76		160,5								
			39,94		39,15										
50	7	17-10-2012	39,91	39,91	39,26	39,45	160,4	160,45	543,52	2151,5	39,3	58	51	29,40	25,86
			39,90		39,38		160,5								
			39,92		39,71										
51	7	17-10-2012	39,95	39,92	39,93	39,79	160,4	160,40	555,47	2179,8	38,9	52	55	26,14	27,64
			39,98		39,91		160,4								
			39,84		39,54										

Blandingsrecept H

Info			Geometri						Forsøgsresultater						kom - mentar		
prøve	Hærdetid	Prøve dag	bredde	snit	højden	snit	længden	snit	vægt	Densitet	Ultralyd	tryk 1	tryk 2	tryk 1		tryk 2	
[nr]	[døgn]	[dato]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mS]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]		
52	7	30-10-2012	40,08	39,99	40,2	40,17	161,5	161,80	580,41	2233,4	37,01	103	100	51,29	49,79	skæv form	
			39,98		40,26		162,1										
			39,9		40,04												
53	7	30-10-2012	40,01	40,02	40,84	40,83	162,1	161,95	589,16	2226,5	36,06	101	93	49,47	45,55	skæv form	
			40,02		40,96		161,8										
			40,02		40,69												
54	7	30-10-2012	40,61	40,36	40,64	40,84	161,8	161,70	595,71	2235,4	36,1	104	104	50,93	50,93	skæv form	
			40,22		40,89		161,6										
			40,24		40,98												
55	7	13-11-2012	40,09	40,11	40,88	40,69	161,5	161,35	597,05	2267,6		119	127	58,50	62,43	tørret og knust	
			40,09		40,85		161,2										
			40,14		40,33												
56	7	13-11-2012	39,94	39,97	40,4	40,41	161,3	161,40	594,78	2281,7			125	122	61,87	60,39	tørret og knust
			40,02		40,46		161,5										
			39,95		40,36												

Bilag 6  
Styrketest

57	7	13-11-2012	40,07	40,05	40,68	40,53	161,6	161,50	598,36	2282,5		124	118	61,19	58,23	tørret og knust
			40,04		40,43		161,4									
			40,05		40,47											
58	7	13-11-2012	39,98	39,93	40,03	40,29	159,8	159,50	582,97	2271,9		112	113	55,60	56,10	fugtigt og knust
			39,9		40,43		159,2									
			39,92		40,4											
59	7	13-11-2012	39,83	39,90	40,13	39,84	159,6	159,65	574,92	2265,6		112	108	56,23	54,22	fugtigt og knust
			39,94		39,71		159,7									
			39,93		39,67											
60	7	13-11-2012	39,92	39,91	40,52	40,52	159,9	159,85	587,1	2271,0		114	112	56,26	55,28	fugtigt og knust
			39,92		40,42		159,8									
			39,89		40,63											
61	7	13-11-2012	39,93	39,89	40,63	40,41	161,2	161,25	578,35	2225,2		106	108	52,47	53,46	helt tør
			39,86		40,42		161,3									
			39,88		40,17											
62	7	13-11-2012	39,96	39,95	40,11	40,14	161,5	161,35	571,89	2210,1		99	101	49,33	50,32	helt tør
			40,01		40,16		161,2									
			39,89		40,15											
63	7	13-11-2012	39,94	40,03	40,21	40,38	161,7	161,70	582,77	2229,8		106	112	52,50	55,47	helt tør
			40,05		40,32		161,7									
			40,09		40,61											
64	7	13-11-2012	40,11	40,14	40,75	41,22	161,5	161,50	594,12	2223,8		109	107	52,89	51,92	opfugtet
			40,18		41,1		161,5									
			40,12		41,8											
65	7	13-11-2012	40,15	40,06	41,77	41,18	161,5	161,35	593,45	2229,7		109	108	52,94	52,46	opfugtet
			40,04		41,13		161,2									
			39,99		40,63											
66	7	13-11-2012	40,01	40,02	40,65	40,99	161,2	161,25	594,79	2249,0		114	111	55,63	54,16	opfugtet
			40,05		41,13		161,3									
			39,99		41,18											

Bilag 6  
Styrketest

73	14	12-12-2012	40,02	40,03	41,01	40,96	160,8	160,80	599,63	2274,3		125	125	61,04	61,04	tørret og knust
			40,17		41,14		160,8									
			39,9		40,73											
74	14	12-12-2012	40,02	40,00	40,51	40,57	161,3	161,25	595,36	2274,8		123	127	60,63	62,60	tørret og knust
			40,08		40,75		161,2									
			39,91		40,46											
75	14	12-12-2012	40,03	40,06	40,83	40,83	160,6	160,70	596,29	2268,8		118	124	57,80	60,74	tørret og knust, tryk 1 total knust se billede
			40,17		40,99		160,8									
			39,97		40,67											
79	14	12-12-2012	40,04	40,09	40,56	40,52	161	161,00	592,97	2267,4		118	117	58,24	57,75	fugtigt og knust
			40,07		40,43		161									
			40,15		40,57											
80	14	12-12-2012	40,01	40,04	40,55	40,75	161,3	161,30	596,02	2264,7		112	114	54,97	55,96	fugtigt og knust
			40,03		40,8		161,3									
			40,09		40,89											
81	14	12-12-2012	40,18	40,16	40,83	40,72	161,4	161,30	600,39	2275,9		117	118	57,47	57,96	fugtigt og knust
			40,17		40,84		161,2									
			40,14		40,49											
70	23	21-12-2012	39,98	39,99								136		68,03	0,00	tørret og knust, et tryk, anden halvdel brugt til kapillar
			39,99													



Bilag 6  
Styrketest

71	23	21-12-2012	40,01	40,00									140	70,01	0,00	tørret og knust, et tryk, anden halvdel brugt til kapillar
			39,98													
72	23	21-12-2012	39,98	39,99									140	70,03	0,00	tørret og knust, et tryk, anden halvdel brugt til kapillar
			39,99													
76	23	21-12-2012	40,01	40,02									130	64,98	0,00	fugtigt og knust, et tryk, anden halvdel brugt til kapillar
			40,02													
77	23	21-12-2012	40,01	40,02									129	64,48	0,00	fugtigt og knust, et tryk, anden halvdel brugt til kapillar
			40,02													

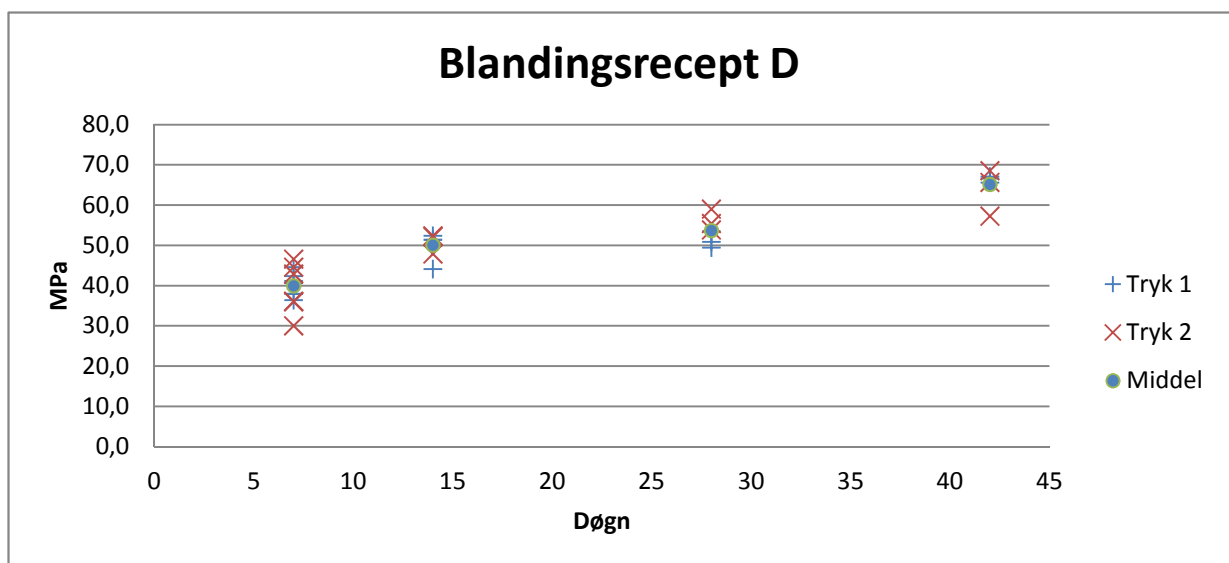
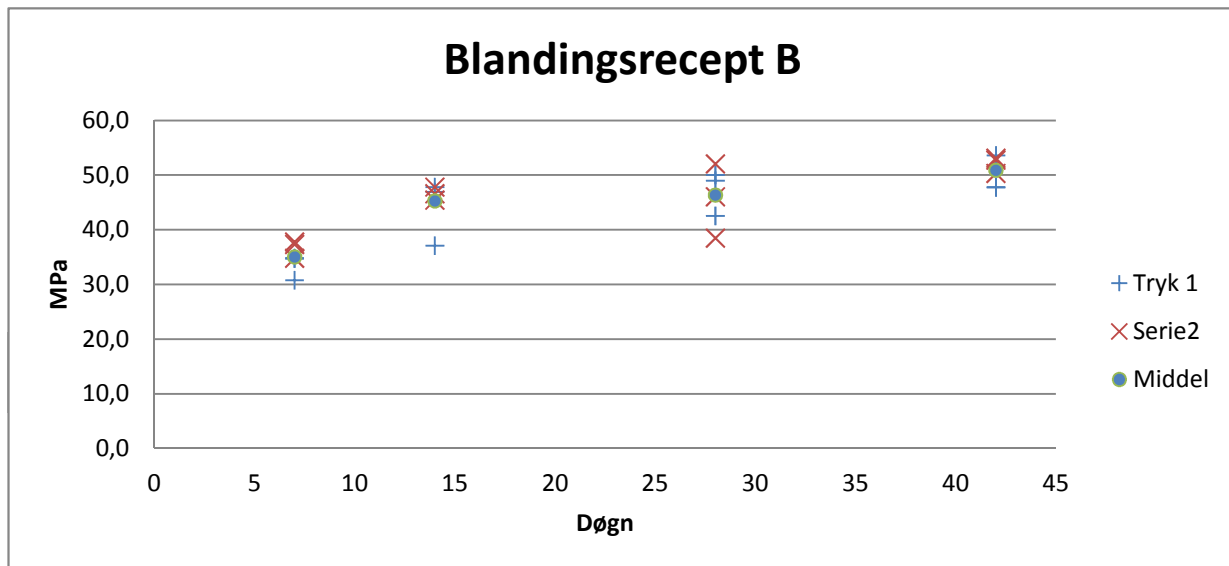
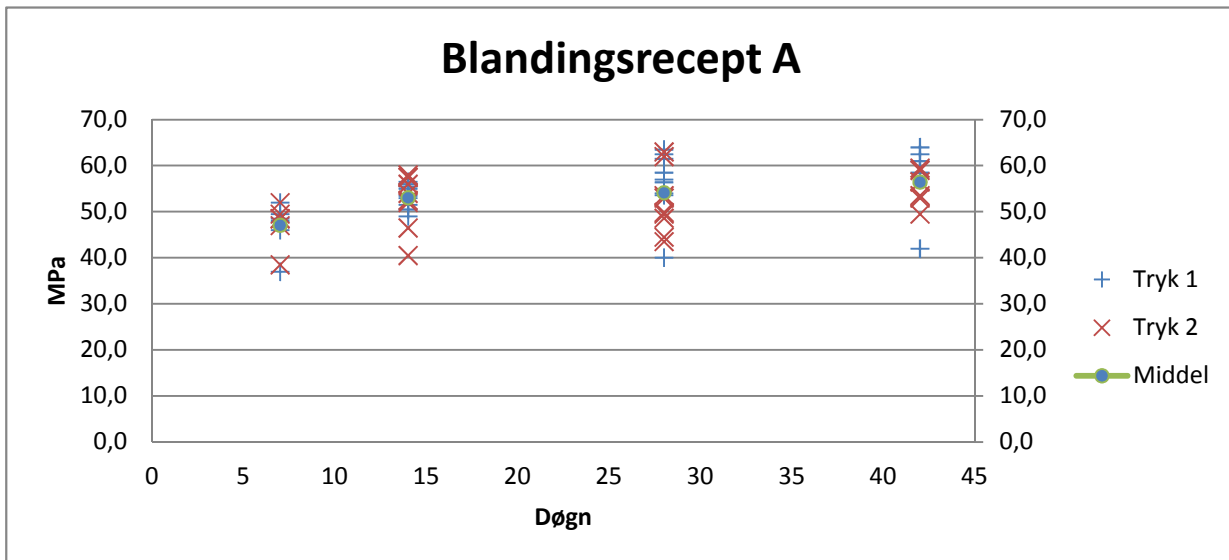
Bilag 6  
Styrketest

78	23	21-12-2012	40	40,01													fugtigt og knust, et tryk, anden halvdel brugt til kapillar
			40,01									131		65,49	0,00		

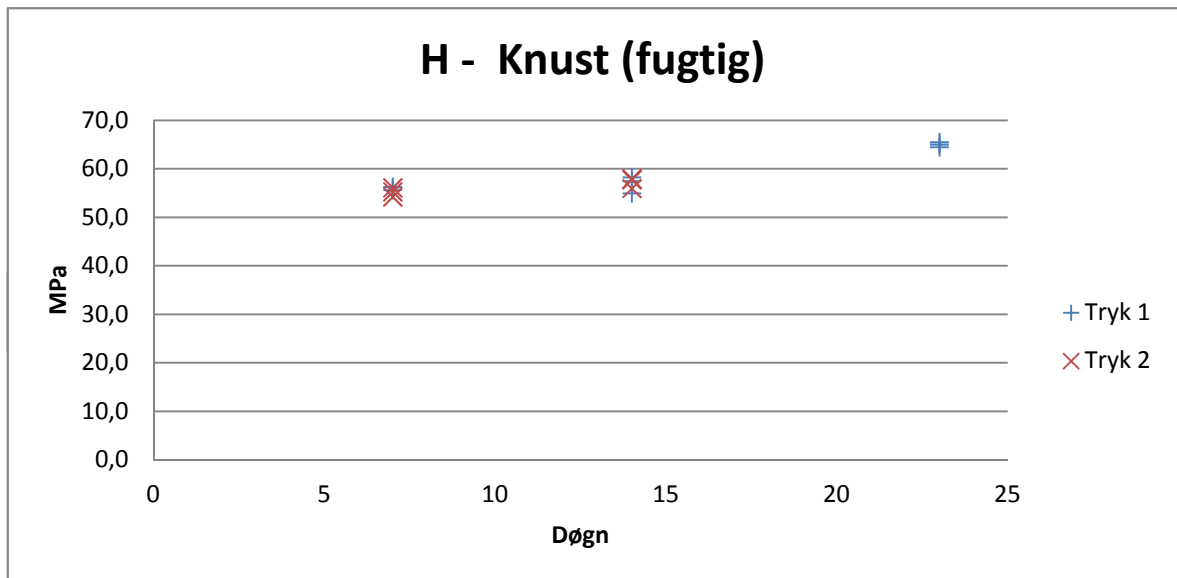
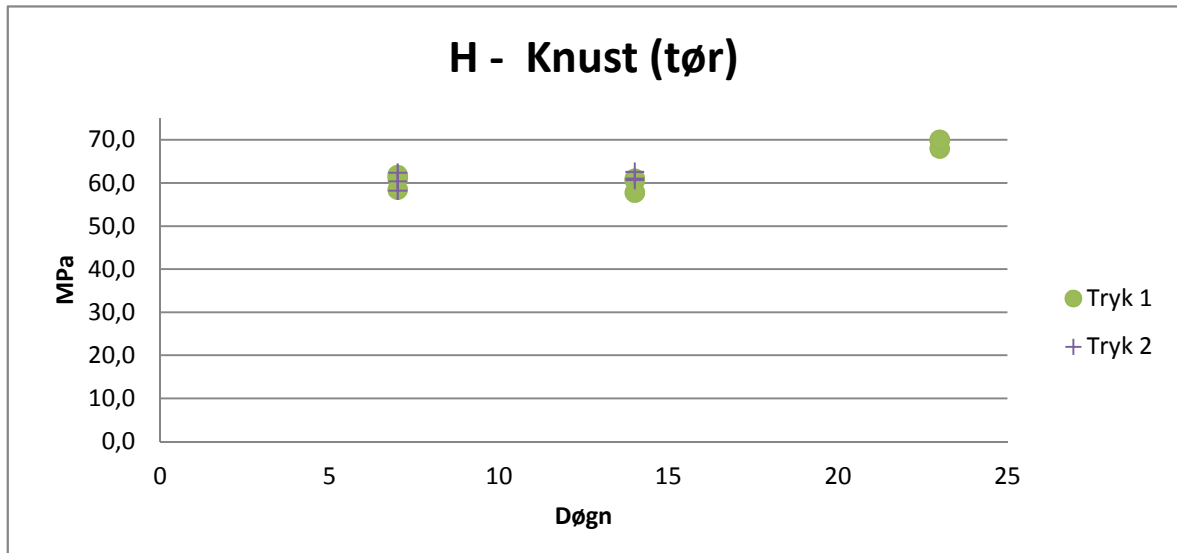
# **Bilag 7 – Spredning på trykforsøg**

Spredningen på de enkelte tryk.

Bilag 7  
Spredning på enkelte tryk



Bilag 7  
Spredning på enkelte tryk



# **Bilag 8 – Oplukning og udvaskningstest (ICP)**

Måleresultater fra ICP-måling af både aske og udvaskning.

**Bilag 8**  
**Oplukning og Udvaskning**

Grænseværdier i henhold til: Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål (Slambekendtgørelsen)

<b>Oplukninger</b>				<b>Udvaskningstest af støbte mørtelprøver</b>							
<b>Prøve</b>		<b>B17</b>	<b>D24</b>	<b>H52</b>	<b>H58</b>	<b>H64</b>	<b>Gr D</b>	<b>Gr D</b>			
<b>afmålt</b>											
afvejet [g]	1,00	1,00	1,00	40,00	40,00	40,00	40,00	20,00	10,00	40,00	
målekolbe [mL]	100,00	100,00	100,00	80,00	80,00	80,00	80,00	40,00	50,00	80,00	
<b>Aluminium</b>											
Målt	[mg/L]	188,54	200,39	195,71	0,47	0,17	0,21	0,26	0,23	0,30	1,02
	[mg/kg]	18779,28	19999,30	19610,42	0,94	0,34	0,42	0,53	0,46	1,48	2,05
Grænsevæ	[mg/kg]	-	-	-						-	-
<b>Cadmium</b>											
Målt	[mg/L]	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	[mg/kg]	2,22	2,06	2,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Grænsevæ	[mg/kg]	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
<b>Chrom</b>											
Målt	[mg/L]	0,29	0,28	0,29	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03
	[mg/kg]	28,75	27,91	29,10	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,08	0,05
Grænsevæ	[mg/kg]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<b>Kobber</b>											
Målt	[mg/L]	7,04	6,89	6,93	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	[mg/kg]	701,07	688,10	694,09	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03
Grænsevæ	[mg/kg]	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00
<b>Nikkel</b>											
Målt	[mg/L]	0,36	0,35	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	[mg/kg]	35,90	34,76	35,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Grænsevæ	[mg/kg]	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
<b>Bly</b>											
Målt	[mg/L]	1,01	0,99	0,99	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
	[mg/kg]	100,61	98,46	99,33	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	0,01
Grænsevæ	[mg/kg]	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
<b>Zink</b>											
Målt	[mg/L]	26,85	28,93	28,58	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
	[mg/kg]	2673,81	2887,57	2863,29	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08
Grænsevæ	[mg/kg]	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00

**Bilag 8**  
**Oplukning og Udvaskning**

<b>Natrium</b>											
Målt	[mg/L]	54,83	52,52	52,71	132,45	267,29	191,46	176,94	183,49	49,24	147,04
	[mg/kg]	5460,93	5241,97	5282,04	264,89	534,59	382,92	353,89	366,98	246,22	294,08
Grænsevæ	[mg/kg]	-	-	-						-	-
<b>Kalium</b>											
Målt	[mg/L]	134,26	141,34	139,21	209,54	486,55	316,85	300,38	323,71	75,56	360,41
	[mg/kg]	13372,61	14106,09	13949,30	419,08	973,10	633,69	600,77	647,41	377,78	720,83
Grænsevæ	[mg/kg]	-	-	-						-	-



**Bilag 8**  
**Oplukning og Udvaskning**

Grænseværdier i henhold til: Bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret, uforurenede bygge- og anlægsaffald

Oplukninger					Udvaskningstest af støbte mørtelprøver							
	Prøve	1	2	3	B17	D24	H52	H58	H64		Gr D	Gr D
<b>afmålt</b>												
	afvejet [g]	1,00	1,00	1,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00		10,00	10,00
	målekolbe [mL]	100,00	100,00	100,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00		50,00	50,00
<b>Aluminium</b>												
Målt	[mg/L]	188,54	200,39	195,71	0,468	0,168	0,209	0,264	0,228		0,296	1,025
	[mg/kg]	18779,28	19999,30	19610,42	0,937	0,335	0,417	0,528	0,455		1,480	5,123
Kategori	[mg/L]	-	-	-							-	-
<b>Cadmium</b>												
Målt	[mg/L]	0,02	0,02	0,02	0	0	0	0,000318	0		0	0
	[mg/kg]	2,22	2,06	2,20	0	0	0	0,000636	0		0	0
Kategori	[mg/L]	<b>Kategori 2</b>	<b>Kategori 2</b>	<b>Kategori 2</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>		<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>
<b>Chrom</b>												
Målt	[mg/L]	0,29	0,28	0,29	0,00716	0,005158	0,009176	0,009952	0,006805		0,015533	0,027479
	[mg/kg]	28,75	27,91	29,10	0,01432	0,010316	0,018352	0,019904	0,01361		0,077665	0,137395
Kategori	[mg/L]	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>		<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>
<b>Kobber</b>												
Målt	[mg/L]	7,04	6,89	6,93	0,010354	0,01287	0,013567	0,014371	0,013489		0,010482	0,012727
	[mg/kg]	701,07	688,10	694,09	0,020708	0,02574	0,027134	0,028742	0,026978		0,05241	0,063635
Kategori	[mg/L]	<b>Kategori 2</b>	<b>Kategori 2</b>	<b>Kategori 2</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>		<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>
<b>Nikkel</b>												
Målt	[mg/L]	0,36	0,35	0,35	0	0	0	0	0		0	0
	[mg/kg]	35,90	34,76	35,52	0	0	0	0	0		0	0
Kategori	[mg/L]	<b>Kategori 2</b>	<b>Kategori 2</b>	<b>Kategori 2</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>		<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>
<b>Bly</b>												
Målt	[mg/L]	1,01	0,99	0,99	0,011951	0,011565	0,011601	0,013019	0,016547		0,009703	0,006617
	[mg/kg]	100,61	98,46	99,33	0,023902	0,02313	0,023202	0,026038	0,033094		0,048515	0,033085
Kategori	[mg/L]	<b>Kategori 2</b>	<b>Kategori 2</b>	<b>Kategori 2</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>		<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>
<b>Zink</b>												
Målt	[mg/L]	26,85	28,93	28,58	0,00655	0,003955	0,002832	0,00372	0,002935		0,001464	0,039576
	[mg/kg]	2673,81	2887,57	2863,29	0,0131	0,00791	0,005664	0,00744	0,00587		0,00732	0,19788
Kategori	[mg/L]	<b>Kategori 2</b>	<b>Kategori 2</b>	<b>Kategori 2</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>		<b>Kategori 1</b>	<b>Kategori 1</b>

**Bilag 8**  
**Oplukning og Udvaskning**

<b>Natrium</b>												
Målt	[mg/L]	54,83	52,52	52,71	132,445	267,294	191,459	176,943	183,488		49,243	147,040
	[mg/kg]	5460,93	5241,97	5282,04	264,890	534,588	382,918	353,886	366,976		246,217	294,080
Kategori	[mg/L]	-	-	-							-	-
<b>Kalium</b>												
Målt	[mg/L]	134,26	141,34	139,21	209,541	486,549	316,847	300,384	323,706		75,557	360,414
	[mg/kg]	13372,61	14106,09	13949,30	419,082	973,098	633,694	600,768	647,412		377,783	720,828
Kategori	[mg/L]	-	-	-							-	-

# Bilag 9 – Saltindhold

Målinger af saltindhold.

**Bilag 9**  
**Anioner**

Målte værdier fra alle grupper

Ionchromotograf på...								
<b>Dato:</b>			<b>Udført af:</b>	Sabrina Madsen				
Prøve	afvejet	tilsat	mg/L Cl	mg/kg Cl	mg/l NO3	mg/kg NO3	mg/L SO4	mg/kg SO4
Aske grup	10,0000	50,00	356,6868	1783,4340	26,6905	133,4526	10300,9789	51504,8945
Aske grup	10,0000	50,00	342,7762	1713,8808	16,7788	83,8939	10376,5648	51882,8238
Aske grup	10,0000	50,00	341,1670	1705,8352	15,7587	78,7937	10417,0604	52085,3022
Aske grup	10,0000	50,00	273,7768	1368,8840	19,4774	97,3870	2595,3611	12976,8056
Aske grup	10,0000	50,00	264,1389	1320,6943	19,6639	98,3194	2597,0341	12985,1707
Aske grup	10,0000	50,00	261,3347	1306,6733	19,9166	99,5829	2585,7024	12928,5122
Aske grup	10,0000	50,00	3948,0810	19740,4052	2047,2083	10236,0417	1056,5319	5282,6593
Aske grup	10,0000	50,00	3996,2222	19981,1112	2088,3055	10441,5275	1050,5273	5252,6366
Aske grup	10,0000	50,00	4089,8787	20449,3936	2128,2811	10641,4056	1046,7060	5233,5302
Aske grup	10,0000	50,00	19,4846	97,4230	0,8537	4,2683	2069,4205	10347,1026
Aske grup	10,0000	50,00	17,2173	86,0864	0,6375	3,1873	2074,7441	10373,7205
Aske grup	10,0000	50,00	21,2167	106,0834	0,7427	3,7134	1995,2475	9976,2374
Aske grup	10,0000	50,00	62781,3350	313906,6748	5,7312	28,6561	4854,9613	24274,8066
Aske grup	10,0000	50,00	63663,6461	318318,2305	5,2360	26,1798	4829,9004	24149,5021
Aske grup	10,0000	50,00	66653,1608	333265,8039	22,2213	111,1065	4929,6731	24648,3655

# **Bilag 10 – Mailkorrespondance med Lynetten**

**Mailkorrespondance med Lynetten I/S, med uddybende spørgsmål omkring afsætning af aske.**

Bilag 9  
Mailkorrespondance  
Til Lynettefællesskabet

Hej Gutter

Så får I det på skrift. Se nedenfor.

Med venlig hilsen

Kim Rindel

Lynettefællesskabet I/S

Refshalevej 250,DK-1432 København K

Tlf. : +45 32 68 56 40

Fax : +45 32 54 31 22

E-mail: kr@lyn-is.dk

Fra: s093406@student.dtu.dk

Til: kr@lyn-is.dk

Dato: 14-12-2012 14:05

Emne: Anvendelse af slamaske

Hej Kim

Som aftalt sender vi dig her spørgsmål omhandlende anvendelse af slamaske. Vi har set programmet "Lort - fra ende til anden", sendt på DR 2 søndag d. 9/12-2012 kl 18,55. I dette program sagde John Rasmussen, Projektleder Lynetten, at halvdelen af jeres aske bliver lagt i depot og resten henter Rockwool til produktion af isoleringsmaterialer. Forholder det sig sådan?

Ja, der er korrekt.

Hvis Rockwool stadig anvender jeres slamaske, kan vi så få at vide hvem vi skal kontakte fra Rockwool for mere information?

David Whyment

Rockwool International A/S

Pencoed, Bridgend CF356NY, UK

david.whyment@rockwool.com

Bilag 9  
Mailkorrespondance  
Til Lynettefællesskabet

Vi har læst på jeres hjemmeside: <http://www.lyn-is.dk/Miljø/Slambehandling.aspx> At slamasken anvendes til betonproduktion, sandblæsningsmiddel og isoleringsmateriale. Er det stadig sådan?

Brug af aske i beton var et EU-finansieret forsøg.

Aftager af aske til sandblæsningsmiddel gik konkurs.

Hvem aftager slamasken? Kun Rockwool.

Der står også på hjemmesiden at der i 2006 blev genanvendt 85 % af slamasken.

Hvor meget er det nu? Som John Rasmussen siger ca. 50 %.

På forhånd tak

Mvh Morten Reiff og Morten Meldgaard

Fra: Søren Ravn Petersen <sravnp@hotmail.com>  
Til: <kr@lyn-is.dk>  
Dato: 30-12-2012 21:29  
Emne: Anvendelse af slamaske i beton

Hej Kim

Mit navn er Søren R. Peteresen, og jeg er i færd med at skrive bachelorprojekt på DTU.

Jeg ved du har været i kontakt med Morten Reiff og Morten Meldgaard - da de skriver projekt om det samme emne som mig.

Derfor har jeg også læst jeres mailkorrespondance og har i den forbindelse har jeg et tillægsspørgsmål, som jeg håber

du kan hjælpe mig med?

Du skriver i din mail, at den slamasken som blev afsat til betonproduktionen var et EU finansieret forsøg!

Mit spørgsmål er så;

Hvorfor og hvornår blev dette stoppet ?

Håber du vil svare på mit spørgsmål hurtigst muligt

På forhånd tak

Mvh Søren R. Petersen, DTU.

Bilag 9  
Mailkorrespondance  
Til Lynettefællesskabet

Hej Søren

Projektet var kun finansieret i en vis periode af EU (mener at det var 2-3 år). Du kan google "biocrete" for mere præcise oplysninger.

Der var to problemer med slammaske i beton;

Indholdet af jern farvede beton rødlig og fosfor indholdet i betonen var højt. Det gjorde at det var svært at afsætte betonen på kommercielle vilkår.

Med venlig hilsen

Kim Rindel  
Lynettefællesskabet I/S  
Refshalevej 250  
DK-1432 København K  
Tlf. : +45 32 68 56 40  
Fax : +45 32 54 31 22  
E-mail: kr@lyn-is.dk



# Bilag 11 – Udregning af cementbesparelse

Udregning af hvor meget cement der spares ved tilsætning af aske, på baggrund af Bolomey's formel.

Bilag 11  
Beregning af cementbesparelse på baggrund af Bolomey's formel

Recept ifølge DS 196-1

$$v := 225\text{g}$$

$$c_{\text{std}} := 450\text{g}$$

Parametre til Bolomey's formel med Allborg portland basis cement  
Efter 7 døgn

$$K_7 := 26\text{MPa} \quad K_{28} := 30\text{MPa}$$

$$\alpha_7 := 0.6 \quad \alpha_{28} := 0.5$$

Teoretisk styrke

$$F_{c,7} := K_7 \left( \frac{1}{\frac{v}{c_{\text{std}}}} - \alpha_7 \right) = 36.4\text{MPa}$$

$$F_{c,28} := K_{28} \left( \frac{1}{\frac{v}{c_{\text{std}}}} - \alpha_{28} \right) = 45\text{MPa}$$

Ved tryktest har det vist at styrken faktisk er 46.8 MPa (gennemsnit af 7 døgnns referenceprøver)  
Den øgede styrke er et resultat af at formlen er udviklet til beton, og ikke mørtel. Der regnes derfor et forøgelsesforhold.

$$\phi_{\text{styrke.7}} := \frac{46.8\text{MPa}}{36.4\text{MPa}} = 1.286$$

$$\phi_{\text{styrke.28}} := \frac{56.5\text{MPa}}{45\text{MPa}} = 1.256$$

$$\phi_{\text{styrke}} := \frac{\phi_{\text{styrke.7}} + \phi_{\text{styrke.28}}}{2} = 1.271$$

For at sikre forholdsregningen er korrekt, støbes der en kontrol prøve med 540g cement. Den forventede styrke burde så blive:

$$F_{c,\text{forventet}} := K_7 \left( \frac{1}{\frac{v}{540\text{g}}} - \alpha_7 \right) \cdot \phi_{\text{styrke}} = 59.466\text{MPa}$$

Trykforsøg af støbningen viste en gennemsnitsstyrke på 60,35 MPa.

### Aske sparret ved B-recept - 42døgnns prøver

$$F_{c,B,28} := 50.9\text{MPa}$$

$$F_{c,B,28} = K_{28} \left( \frac{1}{\frac{v}{c}} - \alpha_{28} \right) \cdot \phi_{\text{styrke}} \text{ solve, } c \rightarrow 412.9403497813866416\text{g}$$

$$c_{B,28,\text{sparret}} := 412.9\text{g} - 405\text{g} = 7.9\text{g}$$

$$c_{B,28,\text{sparret,per.450g.cement}} := \frac{450\text{g}}{405\text{g}} \cdot c_{B,28,\text{sparret}} = 8.778\text{g}$$

Bilag 11  
Beregning af cementbesparelse på baggrund af Bolomey's formel

**Aske sparret ved D-recept - 42døgns prøver**

$$F_{c,D.28} := 65.2\text{MPa}$$

$$F_{c,D.28} = K_{28} \left( \frac{1}{\frac{v}{c}} - \alpha_{28} \right) \cdot \phi_{\text{styrke solve , c}} \rightarrow 497.3469706433479181\text{g}$$

$$c_{D.28.sparret} := 497\text{g} - 450\text{g} = 47\text{g}$$

**Aske sparret ved H-recept (ubehandlet aske) - 7døgns prøver**

$$F_{c,H.7} := 49.7\text{MPa}$$

$$F_{c,H.7} = K_7 \left( \frac{1}{\frac{v}{c}} - \alpha_7 \right) \cdot \phi_{\text{styrke solve , c}} \rightarrow 473.4891654254552536\text{g}$$

$$c_{H.7.sparret} := 473.49\text{g} - 450\text{g} = 23.49\text{g}$$

**Aske sparret ved H-recept (Tørret & knust aske) 23døgns prøver**

$$F_{c,H.tør.knust.23} := 69.4\text{MPa}$$

$$F_{c,H.tør.knust.23} = K_{28} \left( \frac{1}{\frac{v}{c}} - \alpha_{28} \right) \cdot \phi_{\text{styrke solve , c}} \rightarrow 522.1377264209868944\text{g}$$

$$c_{H.tør.knust.23.sparret} := 522\text{g} - 450\text{g} = 72\text{g}$$

**Aske sparret ved H-recept (Fugtig & knust aske) 23døgns prøver**

$$F_{c,H.fugtig.knust.23} := 65\text{MPa}$$

$$F_{c,H.fugtig.knust.23} = K_{28} \left( \frac{1}{\frac{v}{c}} - \alpha_{28} \right) \cdot \phi_{\text{styrke solve , c}} \rightarrow 496.1664584634603478\text{g}$$

$$c_{H.fugtig.knust.23.sparret} := 496.166\text{g} - 450\text{g} = 46.166\text{g}$$

Bilag 11  
Beregning af cementbesparelse på baggrund af Bolomey's formel

**Aske sparret ved H-recept (Tørret & knust aske) 7døgns prøver**

$$F_{c.H.tør.knust.7} := 60.4\text{MPa}$$

$$F_{c.H.tør.knust.7} = K_7 \cdot \left( \frac{1}{\frac{v}{c}} - \alpha_7 \right) \cdot \phi_{\text{styrke solve, c}} \rightarrow 546.3630903762071895\text{g}$$

$$c_{H.tør.knust.7.sparret} := 546.36\text{g} - 450\text{g} = 96.36\text{g}$$

**Aske sparret ved H-recept (Fugtig & knust aske) 7døgns prøver**

$$F_{c.H.fugtig.knust.7} := 55.6\text{MPa}$$

$$F_{c.H.fugtig.knust.7} = K_7 \cdot \left( \frac{1}{\frac{v}{c}} - \alpha_7 \right) \cdot \phi_{\text{styrke solve, c}} \rightarrow 513.6719838562437042\text{g}$$

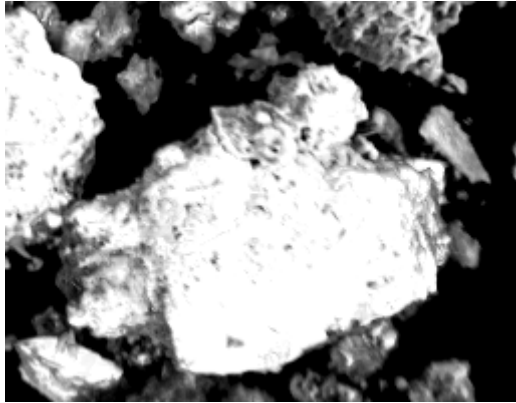
$$c_{H.fugtig.knust.7.sparret} := 513.67\text{g} - 450\text{g} = 63.67\text{g}$$

# Bilag 12 – Mapping

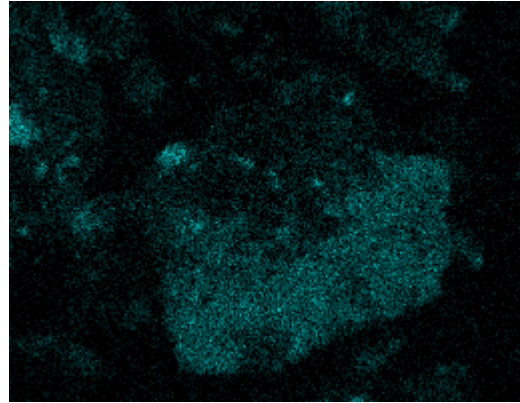
Billeder og måleresultater fra mapping udført som en via SEM.

## Bilag 12 – Mapping fra SEM

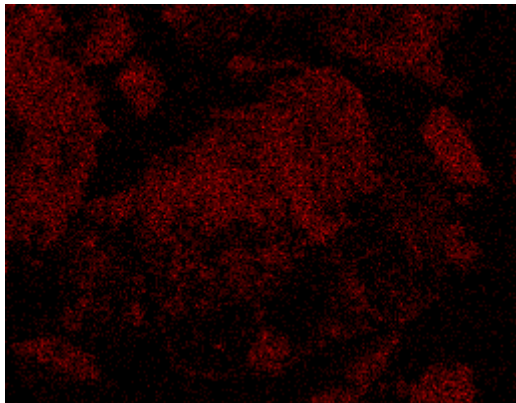
Mappingen blev udført som en del af SEM-undersøgelsen. Den viser hvilke grundstoffer der findes på overfladen, og kan give et indblik i hvad asken består af. Billederne og hvilket grundstof det viser kan ses herunder.



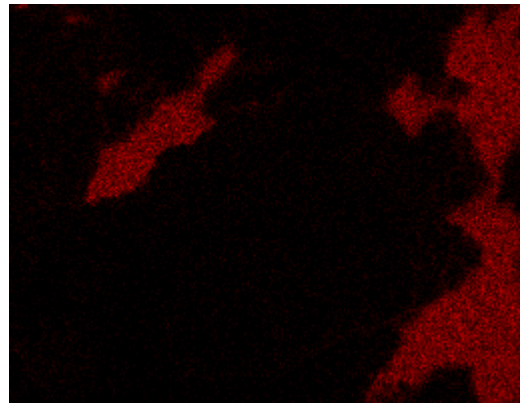
M



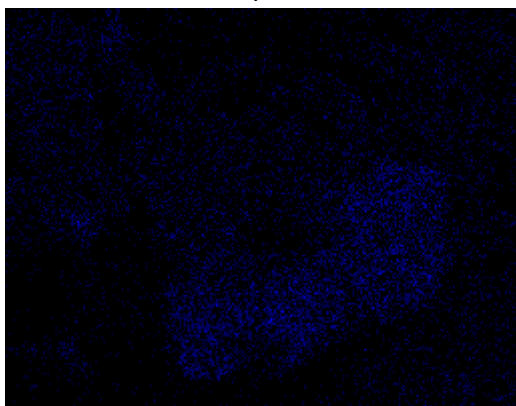
Si



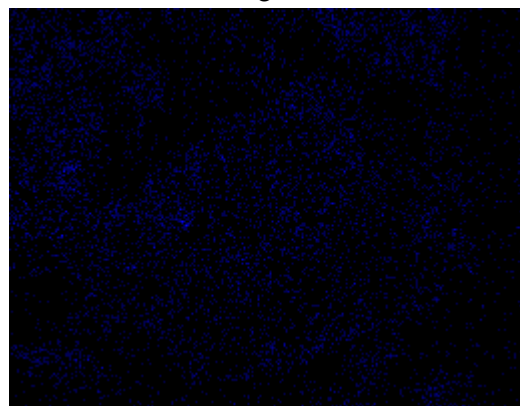
P



C

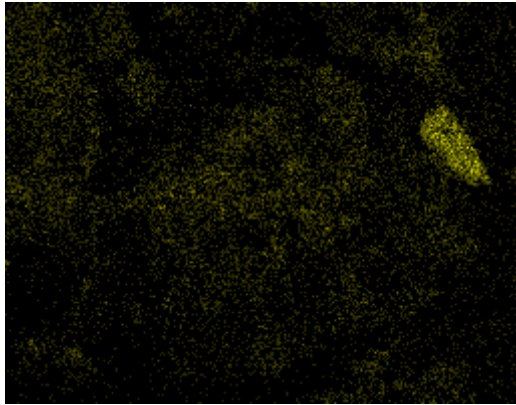


Na

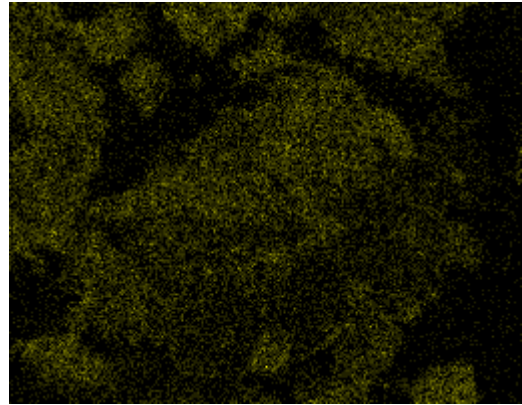


K

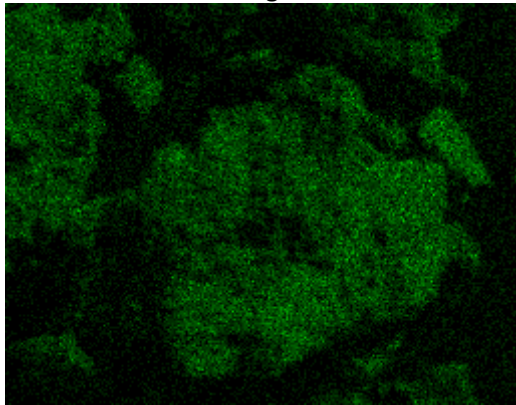
Bilag 12 – Mapping fra SEM



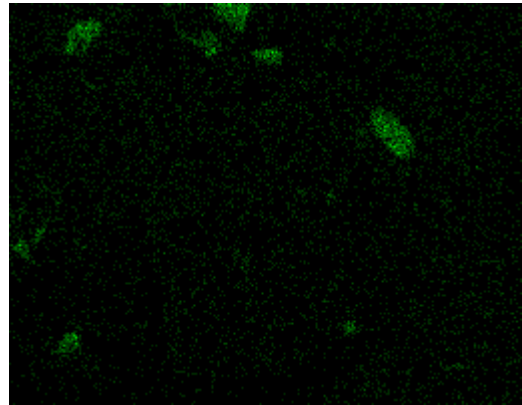
Mg



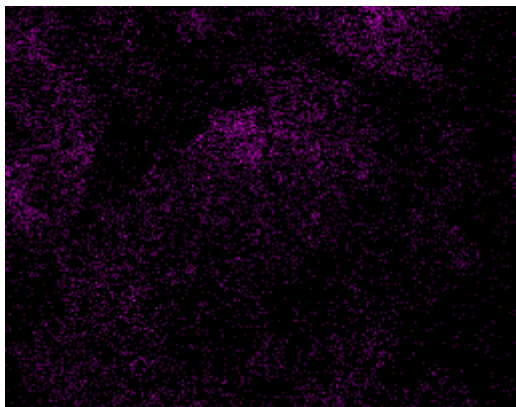
Ca



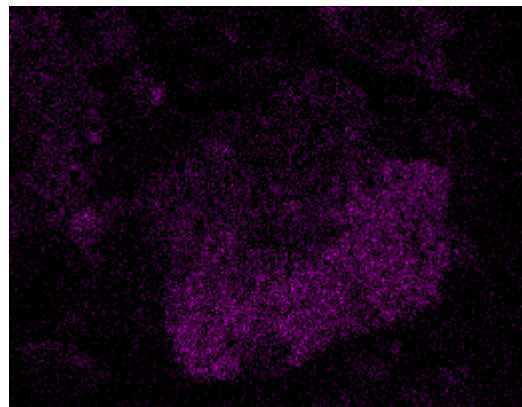
O



S

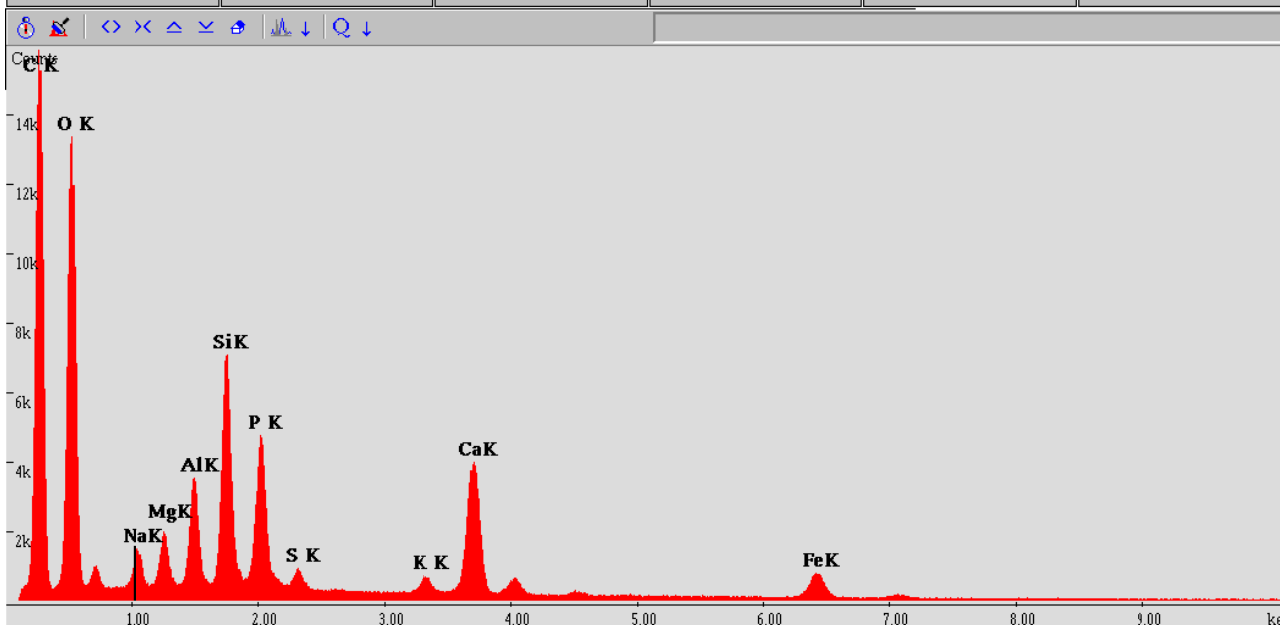
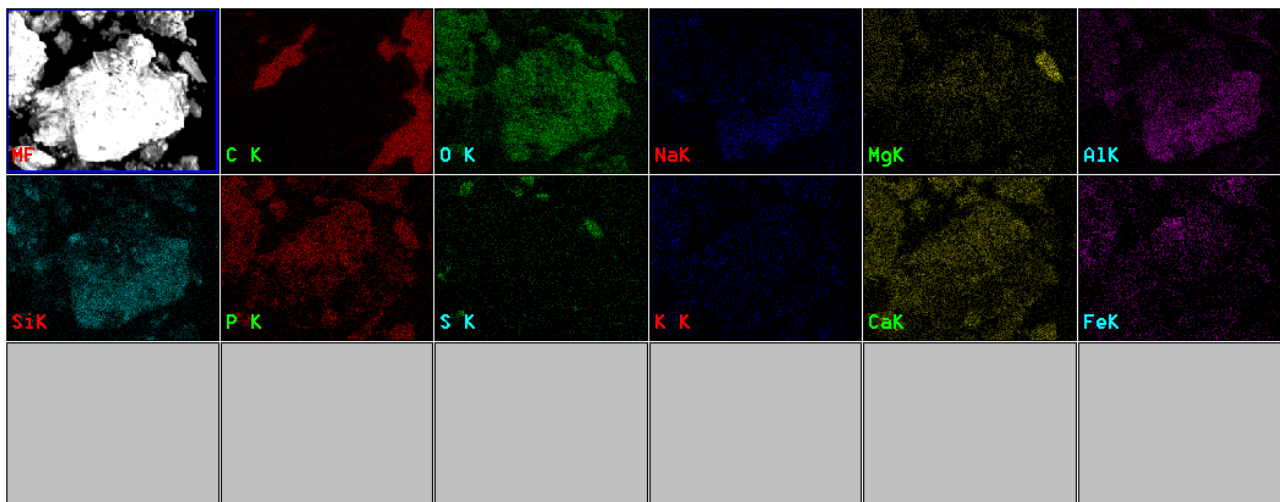


Al



Fe

# Bilag 12 – Mapping fra SEM





Bilag 12 – Mapping fra SEM

c:\edax32\genesis\genspc.spc

Label :

Acquisition Time : 09:21:48 Date:13-Sep-2012

kV : 14.99 Tilt: 0.40 Take-off:35.41 AmpT : 102.4

Detector Type:SUTW, Sapphire Resolution:131.48 Lsec:100

EDAX ZAF Quantification (Standardless)

Element Normalized

SEC Table : User c:\edax32\eds\genuser.sec

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	35.18	48.98	0.1055	1.0369	0.2891	1.0003
O K	34.75	36.31	0.0952	1.0173	0.2691	1.0003
NaK	0.98	0.71	0.0047	0.9494	0.5008	1.0014
MgK	1.42	0.98	0.0090	0.9724	0.6485	1.0025
AlK	2.24	1.39	0.0162	0.9411	0.7627	1.0039
SiK	6.05	3.60	0.0491	0.9634	0.8389	1.0034
P K	4.87	2.63	0.0393	0.9302	0.8654	1.0022
S K	0.35	0.18	0.0030	0.9541	0.8924	1.0035
K K	0.93	0.40	0.0084	0.9157	0.9789	1.0162
CaK	7.27	3.03	0.0674	0.9350	0.9884	1.0031
FeK	5.95	1.78	0.0503	0.8415	1.0031	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkqd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	103.27	2.04	1.00	50.62
O K	171.07	2.92	0.78	58.59
NaK	12.51	6.93	4.10	1.81
MgK	23.77	8.10	2.66	2.93
AlK	40.98	9.16	1.88	4.47
SiK	112.66	10.59	1.03	10.64
P K	79.56	10.68	1.26	7.45
S K	5.67	9.45	8.74	0.60
K K	11.63	6.62	4.29	1.76
CaK	81.71	5.19	1.17	15.74
FeK	21.77	2.55	2.38	8.54

# **Bilag 13 - Målinger fra: "Slamaske i beton - effekt af knusning og syrevask af slamaske"**

Målinger fra: "Slamaske i beton - effekt af knusning og syrevask af slamaske"

## Bilag 13

Målinger fra: "Slamaske i beton - effekt af knusning og syrevask af slamaske"

## Vandindhold

	07.09-2012			10.09-2012		vandindhold	
	glas	glas + våd aske	aske	glas + tør aske	[g]	[%]	
1	100,27	200,48	100,21	200,41	0,07	0,0699	
2	108,04	208,69	100,65	208,62	0,07	0,0695	
3	98,6	198,31	99,71	198,24	0,07	0,0702	

sat i varmeskab ved 105 grader, kl. 13:24

taget ud kl 10:35

Middel	0,07	0,0699
--------	------	--------

	23.10-2012			24.10-2012		vandindhold	
	glas	glas + våd aske	aske	glas + tør aske	[g]	[%]	
1	97,36	147,36	50	147,29	0,07	0,1400	
2	105,24	145,24	40	145,2	0,04	0,1000	

sat i varmeskab ved 105 grader, kl. 13:24

taget ud kl: 08:00

Middel	0,055	0,1200
--------	-------	--------

## Glødetab

Ovn: ind 11.42 ud 12.43

13.09.2012	inden ovn			efter ovn			
Prøve nr.	Digel	Digel + aske	kun aske	Digel + aske	kun aske	aske tabt	
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	%
1	15,5307	18,0763	2,5456	18,0711	2,5404	0,0052	0,20
2	15,4759	17,9933	2,5174	17,9873	2,5114	0,0060	0,24
3	15,6329	18,1170	2,4841	18,1096	2,4767	0,0074	0,30

Middel	0,0062	0,25
--------	--------	------

Bilag 13

Målinger fra: "Slamaske i beton - effekt af knusning og syrevask af slamaske"

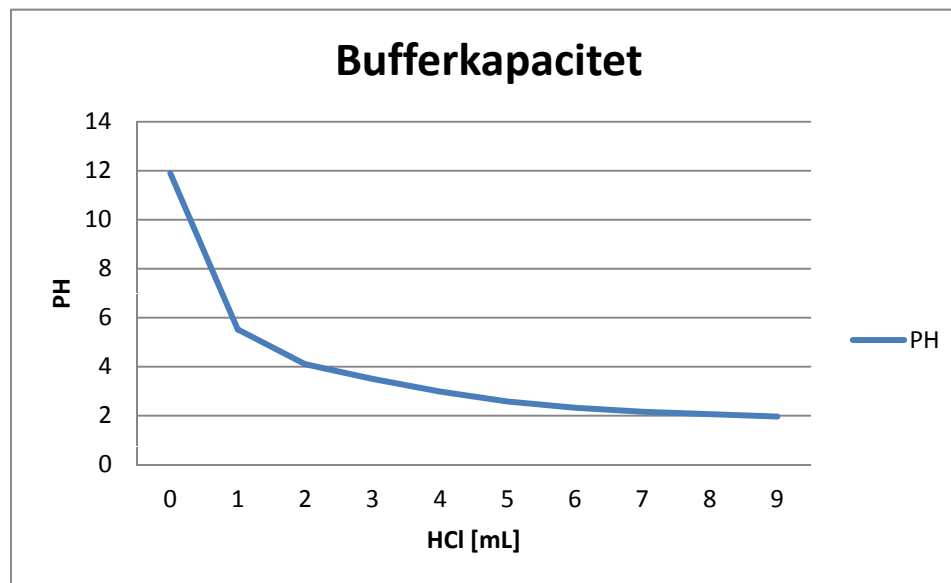
**Bufferkapacitet:**

**Aske**

**vejnet(lynetten):** 20 gram

**Destileret vand:** 300 mL

Tid [min]	pH	Tilsat HCl [ml]
30	11,90	0
60	5,52	1
90	4,10	2
120	3,50	3
150	2,98	4
180	2,58	5
210	2,32	6
240	2,16	7
270	2,06	8
300	1,96	9



**Vandopløselighed:**

Nr.	11.09.2012				12.09.2012	13.09.2012	
	Filter [g]	Petriskål [g]	Skål + aske incl filter [g]	Aske vægt [g]	Aske vægt [g]	Aske vægt [g]	Beregnet aske tab %
1	4,00	97,33	315,61	214,28	199,32	199,30	6,99
2	3,97	108,69	330,31	217,65	210,59	210,59	3,24

Middel	5,12
--------	------

**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](http://www.byg.dtu.dk)