

# Slamaske i beton

Effekt af knusning og syrevask af slamaske



Morten Reiff s090329  
Morten G. Meldgaard s093406

BEng

Department of Civil Engineering  
2013

DTU Civil Engineering  
Januar 2013

## Forord

Denne rapport er resultatet af et 20 ECTS points afgangprojekt fra diplomuddannelsen. Rapporten er skrevet for Institut for Byggeri og Anlæg ved Danmarks Tekniske Universitet. Rapporten og forsøgene herom er udarbejdet i perioden fra den 3. september 2012 til den 7. januar 2013.

I forbindelse med projektet har der været tilknyttet tre vejledere: Lisbeth M. Ottosen, Per Goltermann og Pernille E. Jensen, som alle har været særdeles behjælpelige med råd og vejledning. Derudover er megen nyttig information og vejledning fundet hos Kurt Kielsgaard Hansen, hvilket har været til stor hjælp gennem forløbet.

En særlig tak skal rettes mod laboranterne på DTU anført af Ebba C. Schnell, som har været tilknyttet dette projekt. Hjælpen viste sig især uundværlig ved laboratorieforsøg, men har gennem hele forløbet hjulpet med alt fra stort til småt.

Afslutningsvis takkes Dorte Meldgaard og Thor Hansen for kommentarer og idéer til projektet.

Rapporten er udført i samarbejde mellem Morten G. Meldgaard og Morten Reiff.

Danmarks Tekniske Universitet, Kongens Lyngby, januar 2013

---

Morten G. Meldgaard

---

Morten Reiff

## Sammenfatning

Af både økonomiske og miljømæssige grunde er anvendeligheden af aske fra forbrændt spildevandsslam, slamaske, interessant at undersøge. Hvis slamasken kan anvendes som et erstatningsprodukt for cement i fremstillingen af beton, kan både transporten til og taksten for at deponere slamasken i andre lande bespares. Desuden vil det mindskede behov for cement, som er en tung miljømæssig belastning, betyde en grønnere beton og være en besparelse betonproducenten.

Tidligere har betonproducenten Unicon og spildevandsværkerne Spildevandscenter Avedøre og Lynettefællesskabet I/S i fællesskab udarbejdet en rapport vedr. karakteristikkene af slamaske samt muligheden for iblanding af denne i beton. Over en periode på et fuldt produktionsår blev der udtaget prøver, som herefter blev analyseret for at fastslå, at slamasken var ensartet og repræsentativ for den samlede produktion. Dette blev gjort for aske både fra Lynetten og Avedøre, og som de væsentligste resultater og konklusioner nævnes: Slamasken har et lavt indhold af de primære oxider  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  og  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , som iflg. DS/EN 450-1 skal udgøre mindst 75 % af asken. Slamasken overholder grænsen for opløseligt fosfat, men overskrider grænsen for kloridindhold, desuden er glødetabet for asken bestemt som højt. Slamasken består hovedsageligt af amorfe materialer, og sammenlignet med kulflyveaske og cement er partiklerne i slamasken meget grovkornede, kantede og porøse.

Af laboratorieforsøg udført ifm. udarbejdelsen af denne rapport, Slamaske i beton – effekt af knusning og syrevask af slamaske, er det fundet, at slamasken har et vandindhold på 0,07 – 0,11 %, hvilket betyder, at det har været nødvendigt at tilsætte ekstra vand i mørtelstøbningerne for at opnå samme konsistens som en reference iflg. DS/EN 196-1. Af afvigelser fra førstnævnte, tidligere udarbejdede rapport kan nævnes, at kloridindholdet på 96,53 mg/kg tørstof langt fra overskrider kravet fra DS/EN 450-1 for den udleverede slamaske, som forsøgene samt mørtelstøbningerne er lavet på. Glødetabet er målt til 0,25 %, hvilket kategoriserer asken i kategori A, som er den laveste, hvor glødetabet maksimalt må være 5 % af massen.

Efter indledende støbninger og målinger af 7 døgns trykstyrker for: A – reference, B – 10 % cement erstattes med aske, C – 20 % cement erstattes med aske og D – 10 % tilslag erstattes med aske hvor prøverne B, C og D havde opnået en trykstyrke på hhv. 32,0 MPa, 25,2 MPa og 26,6 MPa ift. referencens 47,9 MPa, blev det besluttet, hvorledes det fremtidige arbejde med slamasken i beton skulle foregå. I dette projekt er det overordnede fokus lagt på at forbedre askens egenskaber til iblandingen i en beton- eller mørtelprøve fremfor at finde det optimale procentmæssige forhold for erstatningen af cement med slamaske. Derfor forsøges asken bearbejdet således, at denne forbedrer trykstyrken ift. en prøve støbt med samme mængde ubehandlet slamaske. Bearbejdningen af asken bestod af to forskellige forsøg (syrevask og knusning), og efterfølgende mørtelprøver med den bearbejdede aske blev støbt som B- og D-prøver, så prøverne var sammenlignelige.

### Syrevask

pH-værdien for den ubehandlede slamaske var stærk basisk i 1M KCl opslemning (12,5). Det blev derfor undersøgt, hvilken effekt en sænkning af pH-værdien havde på trykstyrken for mørtelprøverne. Slamasken blandes med cement, der også er basisk, inden vandet tilsættes, og derfor var det ikke klart, om denne ændring var til det bedre, eller om dette forværede eventuelle puzzolanske egenskaber for slamasken. Syrevasken bestod i, at 200 g aske blandet med 750 ml 0,75 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  blev rystet kort og herefter stod i 2 timer, hvor asken bundfældedes. Topvæsken blev filtreret fra to gange, hvorimellem plastflasken blev genopfyldt med destilleret vand. Dette var for at vaske syren ud af asken. Til slut filtreredes hele indholdet, hvor det efterfølgende blev tørret i et varmeskab ved 105°C. Efter syrevaskningen blev pH-værdien målt til 3,5, og den har nu skiftet fra basisk til sur. Gips ( $\text{CaSO}_4$ ) blev som forventeligt dannet ifm. syrevaskningen, og dette betød, at inden den syrevaskede slamaske kunne bruges til iblandingen i mørtelprøverne, var det nødvendigt at knuse denne forsigtigt i en morter. Knusningen havde ikke til formål at ændre kornstørrelse og

struktur ift. den ubehandlede aske, idet effekten for syrevaskningen alene skulle bestemmes. Syrevasket B (SB) havde efter 7 og 28 døgn hhv. 20 og 6 % højere styrke end B, men ved 14 døgn kun marginalt bedre. Trykstyrken for SB ift. referenceprøverne var 89, 88 og 97 % for hhv. 7, 14 og 28 døgn. Både syrevasket D (SD) og D opnår kun ca. halvdelen af referencestyrken efter 7 døgn, men ved 14 døgn er D 19 % stærkere end SD, hvorefter både SD og D opnår 83 % af referencestyrken efter 28 døgn. På baggrund af ovenstående kan det ud fra trykstyrkerne ikke konkluderes, om syrevaskningen af slamasken forbedrer egenskaberne for denne til iblanding i beton, men det kan heller ikke konkluderes, at dette forringer slamaskens egenskaber.

### **Knusning**

Slamasken, med sin grove og porøse struktur, blev knust i ringknuser, hvorefter slamasken var betydeligt mere ensartet og med en partikelstørrelse sammenlignelig med den for almindelig kulflyveaske. Allerede ved støbningen viste knusningen at have en betydelig effekt ift. den ubehandlede aske. Det teoretiske v/c forhold blev mindre for prøverne med knust aske (MB og MD). MB fik reduceret det totale tilsatte vand med 7 %, hvilket kunne have været større, da prøven var lidt ”våd” på trods af, at mængden af tilsat vand ikke var anderledes end for referencen. For MD er der tilsat mere vand end referencen, men ift. D er vandbehovet reduceret med 18 %. Trykstyrken for de støbte mørtelprøver viste, at knusningen af asken forøgede trykstyrken ift. den ubehandlede aske. MB var for 7, 14 og 28 døgn hhv. 35, 5 og 7 % stærkere end B, og med en trykstyrke på 102, 92 og 99 % af referencen viser det, at knusningen medfører trykstyrker helt på niveau med referencen. For MD ift. D var forbedringen af knusningen endnu mere tydelig. MD havde, ligeledes for 7, 14 og 28 døgn, trykstyrker på hele 117, 116 og 122 % ift. referencen, og knusningen havde medført en forbedring i trykstyrke på mellem 2 og 3 gange ift. D. På baggrund af ovenstående kan det konkluderes, at knusningen af slamasken forbedrer dennes egenskaber til brug i beton, både som erstatning for cement og tilslag, betydeligt.

### **Bolomeys formel – aktivitetsfaktor**

De opnåede styrker fra trykprøvningen sammenlignes med en, fra Bolomeys formel, beregnet trykstyrke baseret på v/c forholdet for disse. På baggrund af denne sammenligning beregnes en eventuel aktivitetsfaktor for henholdsvis ubehandlet, syrevasket og knust aske. Bolomeys formel, der er baseret på erfaringstal, beregner trykstyrken for en beton ud fra v/c forholdet samt K, en faktor for cementen, og  $\alpha$ , en faktor for terminen, og er opgivet for 7 og 28 døgn. Indledningsvis undersøges det, om K er ens for beton og mørtel og efter at have fastlagt, at dette ikke er tilfældet, beregnes en  $K_7$ ,  $K_{14}$  og  $K_{28}$ , styrkefaktor for cementen i mørtelstøbninger, baseret på v/c forholdet og den målte trykstyrke for referenceprøverne. Herefter plottes Bolomeys formel for henholdsvis 7, 14 og 28 døgn for den ubehandlede, syrevaskede og den knuste slamaske med et ækvivalent v/c forhold, således at mængden af puzzolan, slamaske, fremgår af x-aksen og den resterende funktion på y-aksen, således at hældningstallet for en tendenslinje mellem de plottede punkter angiver aktivitetsfaktoren for slamasken. På baggrund af hældningstallet samt observerede tendenser eller mangel på samme kan det derfor konkluderes ud fra Bolomeys formel, om slamasken kan anses for at have puzzolansk effekt. For den ubehandlede aske varierede aktivitetsfaktoren mellem både en negativ og en positiv værdi. Derfor kan det hverken fastslås, at den ubehandlede slamaske besidder puzzolanske egenskaber, eller at den ikke gør det. Plots for den syrevaskede aske viser rene negative tal for aktivitetsfaktoren, hvilket sammen med trykstyrkerne betyder, at denne kun besidder en meget lille puzzolansk effekt hvis overhovedet nogen. Af plots over den knuste aske, hvor 4 ud af 6 trykstyrker var højere end referencens, var aktivitetsfaktoren bestemt mellem 0,3 og 0,7. På baggrund af disse kun positive tal med relativt lille spredning kan det konkluderes, at den knuste aske opfører sig i mørtelblandingerne som et pulver med puzzolansk effekt.

## Summary

Of both economic and environmental reasons, the usability of ash from sewage sludge, sludge ash, is interesting to examine. If sludge ash can be used as a substitute for cement, in the manufacture of concrete, both the cost from transport and deposit of sludge ashes in other countries can be saved. Furthermore the reduced need for cement, which is a heavy environmental cost, means a cleaner concrete and can save the concrete manufacturer material costs.

Previously, Danish concrete manufacturer Unicon and sewage plants; Spildevandscenter Avedøre og Lynettefællesskabet I/S, have together prepared a report regarding the characteristics of sludge ash as well as the possibility of incorporation of this in concrete. Over a period of one full year samples were collected and analysed in order to establish that the sludge ash was uniform and representative of the total production. This was done both for the sludge ash from Lynetten and Avedøre, and main results include: Sludge ashes have a low content of the primary oxides  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , which according to DS/EN 450-1 must represent at least 75% of the ash. Sludge ashes meets the threshold for soluble phosphate, but exceeds the limit for the content of chloride. The loss on ignition is determined as high for the sludge ash. Sludge ash consists primarily of amorphous materials and compared with cement and regular fly ash from coal-fired power plants, the particles of the sludge ash is very rough-grained, square and porous.

From laboratory tests performed during the process of this report, Slamasse i beton – effekt af knusning og syrevask af slamasse, it is found that the sludge ashes have a moisture content of 0.07-0.11%, which meant that it has been necessary to add extra water in the mortar mixtures, to achieve the same consistency as a reference sample according to DS/EN 196-1. As deviations from the earlier mentioned report, the content of chloride 96.53 mg/kg of dry matter, the sludge ash far from exceeds the requirement from DS/EN 450-1. The loss on ignition is measured at 0.25% which categorizes the ashes in category A where the filament loss must be a maximum of 5% of the mass.

After the initial casts, and measurements of the 7 day compressive strength, for the samples; A – reference sample, B – 10% cement replaced with sludge ash, C – 20% cement replaced with sludge ash and D – where 10% aggregates are replaced with sludge ash, the samples B, C and D achieved a compressive strength of 32.0 MPa, 25.2 MPa and 26.6 MPa relative to the reference sample 47.9 MPa. Based on these initial results the future work with sludge ash in concrete was decided. In this project the primary focus is to improve the properties of the sludge ash for incorporation in a concrete or mortar mixture, rather than to find the optimal ratio for the replacement of cement with sludge ash. Therefore, the sludge ash is processed so that this improves the compressive strength of the mortar compared to a mortar cast with the same quantity of untreated ash. The processing of the ash, consisted of two different tests (acid washing and milling), and subsequent mortar samples with the prepared ash was cast as B and D samples so that these were comparable.

### Acid washing

The pH value of the untreated sludge ash was strong alkaline in 1 M KCl suspension (12.5). Therefore, it was examined what effect a lowering of the pH value would have on the compressive strength of the mortar samples. The sludge ash is mixed with cement, which is also alkaline, before the water is added and therefore it was not clear whether this change was for the better, or whether this deteriorated potential pozzolanic activity for the sludge ash. The acid washing consisted of 200 grams of sludge ash mixed with 750 mL of 0.75 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , shaken briefly and then stood for 2 hours where the ash precipitated. The top fluid is then filtered two times where in between the plastic bottle has been refilled with distilled water, to wash the acid out of the ash. Finally all the content is filtered and subsequently dried in an oven at 105 °C. After the acid washing, the pH value was measured at 3.5, and it has now switched from alkaline to acidic. Gypsum

(CaSO<sub>4</sub>) was as expected formed during the acid washing, and this meant that before the acid washed sludge ash could be used for incorporation in the mortar mixture, it was necessary to crush this gently in a mortar. The purpose of the crushing was not to change the grain size and structure of the particles, compared to the untreated ash, so that the effect of the acid washing alone could be determined. Acid washed B (SB) had after 7 and 28 days 20 and 6% higher strength than B, but was at 14 days only marginally better. The compressive strength for SB compared to the reference samples were 89, 88 and 97% for 7, 14 and 28 days. Both the acid washed D (SD) and the ordinary D achieved only about half of the force after 7 days of the reference, but at 14 days D is 19% stronger than SD, where after both SD and D achieving 83 per cent of the reference strength after 28 days. In light of the above, it can from the compressive forces, not be concluded that acid washing of the sludge ash improves the properties of this for incorporation into concrete, however it cannot be concluded that this reduces the sludge ash properties either.

### **Milling**

Sludge ash, with its coarse and porous structure, was milled and after the sludge ash was considerably more uniform, and with a particle size comparable with the regular coal fly ash. During the castings the milling sludge ash showed a significant effect compared to the untreated ash. The theoretical w/c ratio was smaller for the samples with milled sludge ash (MB and MD). The total amount of water added to MB was reduced with 7%, which could have been higher since the mixture was a bit "wet" in spite of the fact that the amount of added water was not different than for a reference mortar. In MD there is added more water than the reference sample but compared to D the water demand was reduced by 18%. Strength test of the cast mortar samples showed that milling the sludge ash increased the compressive strength compared to the untreated ash. MB was for 7, 14 and 28 days, 35, 5 and 7% stronger than B, and with a compressive force of 102, 92 and 99% of the reference sample, it gave an impression that milling leads to strengths quite on a level as the reference. However for MD compared to D the improvement was even more apparent. MD had, also for 7, 14 and 28 days, compressive forces on 117, 116 and 122% compared to the reference mortar, and milling led to an improvement in the compressive strength of between 2 and 3 times compared to D, cast with untreated sludge ash. In light of the above, it can be concluded that milling of sludge ash improves its properties for use in concrete, both as a replacement for cement and aggregates, considerably.

### **Bolomeys formula – activity factor**

The achieved compressive strengths from pressure testing's, compared with a, by Bolomeys formula, calculated strength based on the w/c ratio for these. In the light of this comparison, a potential activity factor is calculated for, respectively, untreated, acid washed and milled sludge ash. Bolomeys formula, which is based on empirical data, calculates the compressive strength of a concrete, from the w/c ratio, K, a factor for cement, and  $\alpha$ , a factor for the period, and is given for 7 and 28 days. First it is examined whether K is the same for concrete and mortar, and after having determined that this is not the case a  $K_7$ ,  $K_{14}$  and  $K_{28}$ , strength factor for cement in mortar castings is calculated, based on w/c ratio and the measured compressive strength of the reference mortar. Bolomeys formula for 7, 14 and 28 days respectively for the untreated, acid washed and milled sludge ash, is then plotted, with an equivalent w/c ratio, so that the amount of puzzolan, sludge ash, is shown on the x-axes and the remaining function on the y axis, so that the inclination for a trend line between the plotted points indicate the activity factor for the sludge ashes. Based on the inclination of the slope as well as observed trends, or lack of same, it can be concluded from the Bolomeys formula if sludge ash can be considered to have pozzolanic activity. For the untreated ash the activity factor varied between both a negative and a positive value. Therefore, it is not established, that the untreated sludge ash possesses pozzolanic activity, nor that it does not. Plots of the acid washed sludge ash, shows pure negative values for the activity factor, which, together with the compressive strengths, means this holds only a very small pozzolanic effect if any at all. Plots over the crushed ash, where 4 out of 6 compressive strengths were higher

than the reference mortar, the activity factor was determined between 0.3 and 0.7. In the light of these all positive values, with a relatively small spread, it can be concluded that the crushed ash is behaving in the mortar mixtures as a powder with pozzolanic activity.

## Indholdsfortegnelse

1	Indledning.....	1
2	Teori .....	2
2.1	Beton.....	2
2.1.1	Sammensætning.....	2
2.1.2	Afbinding/hærdning.....	2
2.1.2.1	Andre bindemidler.....	3
2.1.2.1.1	Kulflyveaske.....	3
2.1.2.1.2	Mikrosilica.....	3
2.1.3	Styrke.....	4
2.1.3.1	v/c-forhold.....	4
2.1.3.2	Bolomeys formel .....	4
2.1.4	Miljøklasser .....	5
2.2	Slamaske.....	6
2.2.1	Anvendelse af slamaske i beton.....	6
2.2.2	DS/EN 450-1 .....	7
2.2.3	DS/EN 206-1 .....	9
2.2.4	Tungmetaller.....	9
2.3	Forudgående forskning.....	9
2.3.1	Anvendelse af aske fra forbrænding af spildevandsslam (bioaske) i betonproduktion. ....	9
2.3.1.1	Kemiske egenskaber:.....	10
2.3.1.2	Fysiske egenskaber:.....	10
2.3.2	Effect of milling and acid washing on the pozzolanic activity of incinerator sewage sludge ash .....	10
3	Materialer og metoder .....	11
3.1	Anvendte asker .....	11
3.2	Metoder til karakteristik af slamaske.....	12
3.2.1	pH.....	13
3.2.2	Ledningsevne.....	13
3.2.3	Vandindhold .....	13
3.2.4	Glødetab .....	13
3.2.5	Bufferkapacitet .....	13
3.2.6	Vandopløselighed.....	13
3.2.7	Scanning Elektron Microscopy (SEM).....	13
3.2.8	Mapping (SEM).....	13



3.2.9	Syrevask .....	13
3.2.10	Knusning.....	14
3.2.11	Vandopløselige anioner .....	14
3.2.12	Oplukning .....	14
3.2.13	IC måling .....	14
3.2.14	ICP måling.....	14
3.2.15	Mørtelstøbning .....	14
3.2.16	Trykstyrke.....	15
3.2.17	Ultralyd.....	15
3.2.18	Udvaskning.....	15
3.2.19	Porøsitet, densitet og kapillarsugning.....	15
4	Resultater og diskussion .....	16
4.1	Karakteristik af asken .....	16
4.1.1	pH .....	16
4.1.2	Ledningsevne.....	16
4.1.3	Glødetab .....	16
4.1.4	Vandindhold .....	16
4.1.5	Bufferkapacitet .....	17
4.1.6	Vandopløselighed .....	17
4.1.7	Scanning Elektron Microscopy (SEM).....	18
4.1.8	Mapping.....	19
4.2	Bearbejdning af aske .....	19
4.2.1	Syrevask .....	19
4.2.1.1	Videre forskning.....	20
4.2.2	Knusning.....	20
4.2.2.1	Videre forskning.....	21
4.3	Karakteristik af mørtelprøver .....	21
4.3.1	Porøsitet.....	22
4.3.2	Densitet.....	22
4.3.3	Kapillarsugning .....	22
4.3.4	Salte .....	23
4.3.5	Tungmetaller.....	24
4.3.6	Fosfor.....	26
4.3.7	Videre forskning.....	26

4.4	Trykstyrke.....	27
4.4.1	Screening.....	27
4.4.2	Syrevask.....	28
4.4.2.1	B-prøver.....	29
4.4.2.2	D-prøver.....	29
4.4.2.3	Styrkeudvikling.....	30
4.4.2.4	Densitet.....	30
4.4.3	Knusning.....	31
4.4.3.1	Vandbehov.....	31
4.4.3.2	B-prøver.....	32
4.4.3.3	D-prøver.....	33
4.4.3.4	Styrkeudvikling.....	34
4.4.3.5	Densitet.....	34
4.4.3.6	Videre forskning.....	35
4.5	Bolomeys formel.....	36
4.5.1	Ubehandlet aske.....	38
4.5.2	Syrevasket aske.....	39
4.5.3	Knust aske.....	40
4.5.4	Videre forskning.....	41
4.6	Øvrig videre forskning.....	41
4.6.1	Betonstøbning.....	41
4.6.2	Psykologisk effekt af rød beton – anvendelsesområder.....	41
4.6.3	Slamasken ensartethed over tid.....	41
5	Konklusion.....	42
6	Videre forskning.....	43
7	Referencer.....	44
8	Bilag.....	45

## Bilagsoversigt

Bilag 1	Appendix interne forsøgsvejledninger
Bilag 1A	pH i 1 M KCl opslemning. Jord-væske forhold 1:2,5
Bilag 1B	Vandindhold i jord
Bilag 1C	Oplukning jordprøve efter DS 259
Bilag 1D	Glødetab i jord
Bilag 1E	Måling af ledningsevne i jord
Bilag 1F	Vandopløselighed
Bilag 1G	Vandopløselige anioner
Bilag 1H	Method of measuring Buffer Capacity of Soils and Sludge
Bilag 2	Porøsitet, densitet og kapillarsugning
Bilag 3	Leaching af tungmetaller fra aske
Bilag 4	Støbninger
Bilag 5	Tryk, densitet og ultralyd
Bilag 6	Dimensioner af mørtelprøver
Bilag 7	Densitet – middelværdier
Bilag 8	IC og ICP
Bilag 9	Karakteristik af LSA
Bilag 10	Karakteristik af LSA depot
Bilag 11	Mailkorrespondance med Lynettefællesskabet
Bilag 12	Mapping

## 1 Indledning

Denne rapport omhandler anvendeligheden af aske fra forbrændingen af spildevandsslam, kaldet slamaske eller bioaske, i beton. Sideløbende med denne rapport har fire andre grupper, ligeledes ved DTU, med hver deres individuelle aske, gennemgået samme proces og indledende karakteristiske forsøg for at øge den samlede viden inden for slamaske og den eventuelle brug til iblanding i beton.

Spildevandsslam forbrændes, efter denne er afvandet til et tørstofindhold på ca. 25 – 30 % og vil efter forbrændingen være reduceret med ca. 95 % af volumen (Donatello, Freeman-Pask, Tyrer, & Cheeseman, 2009). Der produceres årligt 650.000 tons spildevandsslam alene fra rensningen af kommunalt spildevand (Slamaske som brændsel, 2012). Størstedelen af asken fra forbrændingen af denne spildevandsslam eksporteres og deponeres i lande som Tyskland og Norge. Dette er foruden en stor økonomisk udskrivning heller ikke en særligt god miljømæssig løsning, da langtidskonsekvenserne af deponeringen af slamasken ikke kendes med sikkerhed. Derfor er en mere miljøvenlig afskaffelse af slamasken eftersøgt fra mange. I de senere år er netop brugen af slamaske i beton blevet undersøgt af forskellige institutter, men den samlede viden omkring dette må anses som langt fra fuldendt.

Enkelte rensningsanlæg afsætter dog noget af produktionen til anden side. Rensningsanlægget Lynetten på Amager afsætter ca. halvdelen af deres produktion af slamaske til Rockwool A/S, som senere bruger denne i fremstillingen af isolering. Den resterende del af slamasken lagres i en inddæmmede del af Øresund.

Forsøg, mørtelstøbninger og tilhørende trykprøvninger er i denne rapport kun lavet med friskproduceret slamaske fra netop Lynetten på Amager. Enkelte resultater m.m. fra forsøg og trykprøvninger er holdt op mod selvsamme forsøg lavet for slamaske ligeledes fra Lynetten, men lagret minimum 2 år i denne inddæmmede, ikke overdækkede, del af Øresund som tidligere beskrevet.

Indledningsvis startede alle fem grupper med at støbe 3 individuelle mørtelprøver baseret på den, for gruppen tildelte aske, samt en fælles referenceprøve. De indledende prøver, kaldet screeningsforsøgene, skulle derfor danne grundlag for det fremtidige arbejde, og hvorledes hver gruppe har valgt at gribe problemstillingen slamaske i beton an.

I denne rapport undersøges muligheden for at bearbejde asken, således at styrken potentielt kan øges ved iblandingen af den samme mængde ubehandlede eller behandlede slamaske fremfor at undersøge effekten af den procentvise erstatning af cement med ubehandlet slamaske. På baggrund af 7-døgnsstyrkerne blev det derfor valgt at arbejde videre med prøverne kaldet B og D, hvor henholdsvis 10 % cement og 10 % tilslag er erstattet med slamaske, og sammenholde disse med resultater med styrker fra mørtelprøver støbt med bearbejdet aske.

Bearbejdningen af slamasken bestod af to forskellige forsøg: I – Syrevasket aske: Slamasken, hvis pH-værdi blev fundet til 12+, vaskes igennem med svovlsyre for at nedsætte denne. pH-værdien for cement er ligeledes meget høj, og det er derfor usikkert, om sænkningen af pH-værdien nedsætter slamaskens virkning på mørtelprøverne. II – Knust aske: Tidligere har det vist sig, at f.eks. helt fint stenmel bidrager positivt i betonens struktur med pakningen af tilslagsmaterialerne og cementpastaen. Slamasken, som må beskrives som en grovkornet masse, forsøges derfor knust, således at størrelserne på partiklerne er sammenlignelige med dem for kulflyveaske.

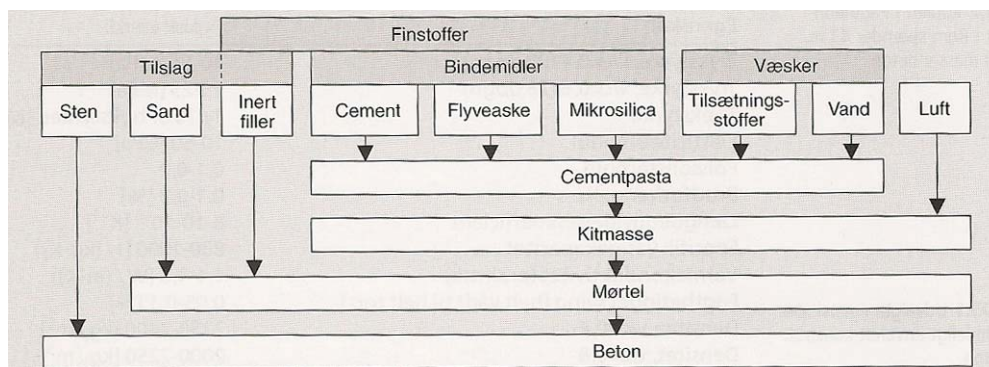
## 2 Teori

I det følgende afsnit gennemgås den for rapporten relevante teori på baggrund af bøger, artikler og rapporter.

### 2.1 Beton

#### 2.1.1 Sammensætning

Beton er det mest anvendte byggemateriale i verden. Beton er et relativt billigt materiale, der er nemt at forme. Betons hovedbestanddele er cement, vand, sand og sten. Sten og sand kittes sammen af vand og cement, der udgør cementpastaen. Herunder ses betons faser opdelt i niveauer (Bygningsingeniørernes materialer - uddrag af Materialebogen, 2008).

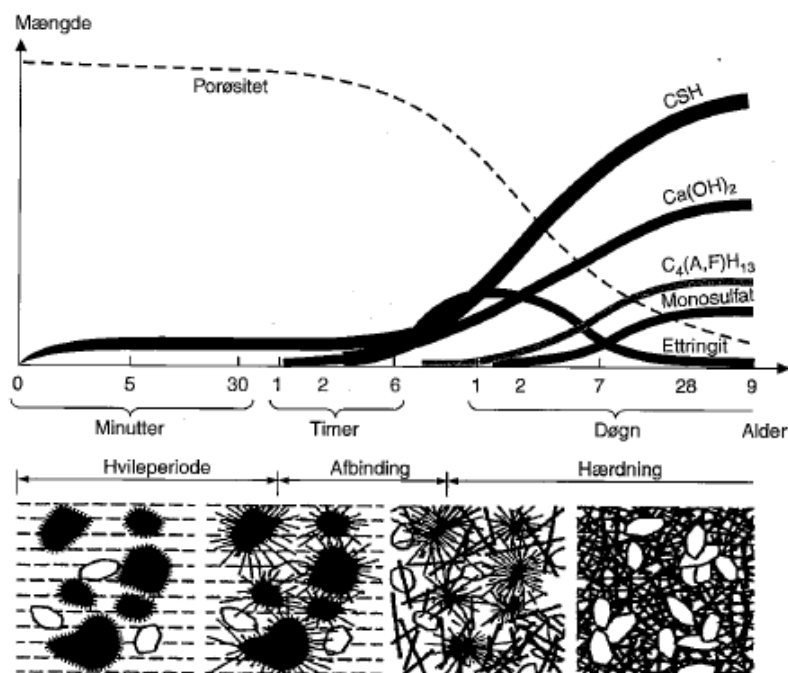


Figur 2:1 Betons sammensætning (Bygningsingeniørernes materialer - uddrag af Materialebogen, 2008)

Cement fungerer som et hydraulisk bindemiddel, dvs. at det hærder, når det blandes med vand. I nogle tilfælde erstattes dele af cementen med flyveaske og/eller mikrosilica, som har en puzzolansk effekt. Dette vil sige, at de reagerer med calciumhydroxid og danner forbindelser, der minder om de forbindelser, cementen danner ved hydratisering.

#### 2.1.2 Afbinding/hærdning

Hydratisering er, når cement og vand reagerer med hinanden og danner bindinger. Cementpastaen har væskeegenskaber i de første timer efter blandingen, hvorefter den antager fast form, idet den afbinder. Cementpastaens strukturudvikling er herunder, stærkt forenklet, skematisk afbildet.



Figur 2:2 Cements forenkede hærdning (Bygningsingeniørernes materialer - uddrag af Materialebogen, 2008).

### 2.1.2.1 Andre bindemidler

#### 2.1.2.1.1 Kulflyveaske

Kulflyveaske er en kunstig puzzolan, som er et restprodukt fra kulfyrede kraftværker. Ved iblanding af kulflyveaske forbedres betonens bearbejdelighed, og bidrager samtidig til betonens styrkeudvikling, specielt efter 28 døgn. Kulflyveasken indeholder en større eller mindre mængde uforbrændt kul. Dette kan foruden farvevariationer også gøre iblandingen af luft vanskelig. Den tilsatte mængde luftindblandingsstof må ofte være 2-4 gange normaldoseringen (Aalborg Portland, 2007).

#### 2.1.2.1.2 Mikrosilica

Mikrosilica er også en kunstig puzzolan og er et biprodukt fra fremstilling af legeringsmetallet Ferrosilicium. Ved tilsætning af mikrosilica skal der altid tilsættes et plastificeringsstof for at sikre en god, homogen fordeling af mikrosilicapartiklerne i betonen. Ved iblanding af mikrosilica påregnes en positiv virkning på betonens vandtæthed, trykstyrke og bestandighed imod alkalikiselreaktioner (Aalborg Portland, 2007).

Alkalikiselreaktioner opstår, når tilslaget indeholder alkaliopløseligt kisel, og betonen indeholder alkaliioner, som stammer fra cementen eller fra omgivelserne. Når kisel og alkaliioner reagerer, dannes alkalikiselgel. Alkalikiselgel har et større volumen end de to reagerende parter, hvilket skaber nedbrydelse af betonen (Gottfredsen & Nielsen, 2010).

### 2.1.3 Styrke

Betonens trykstyrke er den egenskab, der primært benyttes i bærende konstruktioner. Trykstyrken defineres ofte som den karakteristiske enaksede trykstyrke. Den enaksede trykstyrke, der anvendes til beregninger, kaldes cylinderstyrken. Denne findes på et cylinderformet prøvelegeme med en diameter på 150 mm og en højde på 300 mm. Trykstyrken måles, efter at prøvelegemet har hærdet i 28 modenhedsdøgn. Den karakteristiske trykstyrke betegnes  $f_{ck}$  og er 5 pct. fraktilen.

Trykstyrken vokser hurtigt i starten, og for en normal beton vil den efter 7 døgn have opnået ca. 70 % af den karakteristiske trykstyrke. Trykstyrken stiger stadig efter 28 døgn, da cementen stadig hydratiserer. F. eks. kan styrken efter 10 år være 1,5-2 gange større end den karakteristiske værdi (Jensen, 2008).

Betons trækstyrke er væsentligt lavere end dens trykstyrke. Ofte vil trækstyrken være ca. 1/10 af trykstyrken. Pga. den relativt lave trækstyrke anvendes ofte trækarmering for at optage trækkræfterne i en konstruktion.

#### 2.1.3.1 v/c-forhold

Betons styrke afhænger af forholdet mellem vand og cement, kendt som v/c-forholdet, og er det vægtmæssige forhold mellem vand og cement. Teoretisk er det optimale v/c-forhold ca. 0,4, og styrken falder med stigende v/c-forhold (Jensen, 2008).

Ved iblanding af andre typer bindemiddel end cement (flyveaske og mikrosilica) i beton, regnes nu et vand/pulver-forhold (v/p-forhold) i stedet for det normale v/c-forhold. Ved beregning af v/p-forholdet regnes både cement, flyveaske og mikrosilica med som pulver. Cement kan ikke erstattes 1 til 1 med flyveaske, men nærmere 1 til 3. Dette gælder for betonens styrke, og i forhold til betonens holdbarhed kan cementen erstattes 1 til 2 (Bygningsingeniørernes materialer - uddrag af Materialebogen, 2008).

#### 2.1.3.2 Bolomeys formel

Bolomeys formel er en empirisk formel baseret på erfaringstal og ses herunder. Formlen er gældende for beton, hvor v/c-forholdet er mellem 0,45 og 1,25, samt at luftindholdet i prøven er på 1,5 – 2 % (Bygningsingeniørernes materialer - uddrag af Materialebogen, 2008). Luftindholdet er normalt overholdt, såfremt der ikke er indblandet luftindblandingsmidler i betonen.

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

Konstanterne K og  $\alpha$  afhænger af typen samt producenten af cementen. Herunder ses, af Aalborg Portland opgivne, værdier for Basis Cement til brug i Bolomeys formel.

Tabel 2-1 Vejledende konstanter til Bolomeys formel (Aalborg Portland, 2007)

Cementtyper	Termin døgn	K	$\alpha$
BASIS CEMENT	1	17	0,9
	7	26	0,6
	28	30	0,5

Af tabel 2-1 ses det, at faktorerne bestemmes ud fra, hvor længe betonen har hærdet – termin døgn. K er en faktor for styrken og kvaliteten af cementen, og  $\alpha$  er en konstant, som afhænger af terminen.

For beton med puzzolaner kan trykstyrken ligeledes findes ved Bolomeys formel:

$$f_c = K \left( \frac{1}{\frac{v}{c+k \cdot p}} - 0,5 \right) \quad (2)$$

Hvor p er mængden af puzzolan, og k er aktivitetsfaktoren for netop puzzolanet. Ovenstående formel bruges ved tilsætningen af ét puzzolan. Regner man for en prøve med flere puzzolaner, regnes det ækvivalente v/c-forhold:

$$\text{ækv. } v/c = \frac{v}{c+k_1 \cdot p_1+k_2 \cdot p_2} \quad (3)$$

### 2.1.4 Miljøklasser

Der findes 18 forskellige eksponeringsklasser i DS/EN 206-1, men i Danmark er disse klasser under debat, og derfor bruges de 4 miljøklasser fra et tidligere normsystem: Passiv, moderat, aggressiv og ekstra aggressiv. For armeret beton er kravene for betonstyrken stillet i DS/EN 1992-1-1, se tabel 2-2 herunder.

Tabel 2-2 Min. trykstyrke for beton ud fra miljøklasser (Jensen, 2008)

Miljøklasse	Minimumsværdi af foreskrevne $f_{ck}$ [MPa]
Ekstra aggressiv	40
Aggressiv	35
Moderat	25
Passiv	12

Ved at indstøbe armeringen i beton beskyttes denne samtidig mod korrosion. Laget af beton uden på armeringen kaldes dæklaget og bestemmes ud fra, hvilken miljøklasse konstruktion befinder sig i. Minimum dæklag kan ses i tabel 2-3. Jo værre et miljø betonen befinder sig i, jo større et dæklag kræves der for at undgå, at f.eks. ioner trænger ind til armeringen, da disse kan være kilde til korrosion. Ionerne kan enten komme udefra via revner i betonen eller indefra som en del af betonen selv. Derfor er der krav til, hvor store mængder kloridioner, der må være i beton. Kravene ligger mellem 0,1 – 0,4 % kloridioner i forhold til vægten af cementen.

Tabel 2-3 Min. dæklag for miljøklasser (Jensen, 2008)

Miljøklasse	Minimum dæklag $C_{\min\text{-dur}}$ [mm]
Ekstra aggressiv	40
Aggressiv	30
Moderat	20
Passiv	10



## 2.2 Slammaske

Processen med rensningen af spildevand foregår i tre overordnede processer. Den mekaniske rensning, hvor først tørstoffet (papir m.m.) sorteres fra, og dernæst udskilles sand og fedt. Den biologiske rensning, hvor bakterier og mikroorganismer nedbryder det organiske stof, fjerner næringsstofferne. Endelig den kemiske rensning, hvor et fældningsmiddel bliver tilsat spildevandet. For renseanlægget Lynetten bliver jernklorid brugt som fældningsmiddel, men andre stoffer kan også bruges. Eksempelvis et aluminiumsbaseret materiale der ligesom jernkloriden har til opgave at nedfælde fosfor fra spildevandet. Denne udskillelse er andet skridt i processen for fjernelse af fosforen. Allerede i den biologiske rensningsproces bliver spildevandet ledt gennem tanke med såkaldte fosforakkumulerende bakterier. Disse bakterier optager fosforen og kan indeholde store mængder af stoffet og bliver efterfølgende fjernet fra spildevandet som biologisk slam (Renseprocessen, 2012).

Nedenstående tabel 2-4 viser de væsentligste forskelle på Fe- og Al-baserede slamasker og giver det første indtryk af slamasken fra Lynetten, der som beskrevet er den jernbaserede aske.

Tabel 2-4 Koncentrationer for jern og aluminiums baseret slammaske (Kjersgaard, et al.)

Analytical parameter			Bio ash	
Name	Unit	Method	Iron (Fe)	Aluminium (Al)
Colour			reddish	light brownish
Soluble phosphate	mg/kg*	Annex C*	75	30
Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> )	%	EN 196-2	23	35
Reactive silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> )	%	EN 197-1	12	15
Calcium oxide (CaO)	%	EN 196-2	20	16
Iron oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	EN 196-2	15	6,5
Aluminium oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	EN 196-2	6.5	13
Sum of SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> & Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	EN 196-2	45	54
Phosphorus as P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	WDXRF	27	22
Calcium as CaO	%	WDXRF	21	16
Silicon as SiO <sub>2</sub>	%	WDXRF	21	29
Amorphous	%	QXRD	55	63
Calcium phosphate	%	QXRD	19	14
Quartz (crystalline SiO <sub>2</sub> )	%	QXRD	10	15
Haematite (crystalline Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	QXRD	6	< 1
Particle density	kg/m <sup>3</sup>	EN 196-6	2820	2640

\* Annex C in EN-450-1:2005; the analysis expresses mg "available phosphorus pentoxide" (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) per kg ash

### 2.2.1 Anvendelse af slammaske i beton

Af miljømæssige årsager kunne det være en god ide at anvende slammaske i beton. Ifølge kommunekemi produceres årligt 650.000 tons spildevandsslam alene fra rensningen af kommunalt spildevand. På trods af at størstedelen af denne bruges i landbruget som gødning, er asken fra den resterende del af spildevandsslammet en miljømæssig belastning. Såfremt asken kan anvendes i beton, kunne dette mindskes eller helt undgås. Der kunne være en økonomisk fordel ved at genanvende asken, da rensningsanlæggene bruger mange penge på at transportere og deponere asken. Der er tidligere eksempler på, at kulflyveaske og mikrosilica, som før var affaldsstoffer, nu bliver anvendt i beton og derved har fået en værdi i stedet for at være en udgift.

Ud over at være en miljømæssig gevinst og muligvis forbedre betons egenskaber er der en økonomisk gevinst ved at kunne anvende slamasken i beton. Den økonomiske gevinst kan opdeles i to. Rensningsanlægget vil kunne spare penge på transport og deponering af asken. Asken vil muligvis kunne erstatte cementen eller andre dele af betonen, hvilket vil medføre en besparelse for betonproducenten. Viser det sig, at slamasken kan forbedre beton, som den er i dag, kan asken måske blive en indtægt i stedet for en udgift for rensningsanlæggene.

Lynettefællesskabet afsætter ca. halvdelen af deres slamaske til Rockwool A/S til isoleringsproduktion. Der har tidligere været et EU-støttet projekt, hvor det blev forsøgt at anvende slamaske til betonproduktion. Støtten varede i ca. 2-3 år, og brugen af slamaske stoppede, da der var et stort indhold af jern i asken, som farvede betonen rød. Ud over problemet med den røde farve var der et højt indhold af fosfor i asken, hvilket gjorde det svært at afsætte betonen på kommercielle vilkår (Rindel, 2012).

I 2006 blev ca. 85 % af slamasken fra Lynettefællesskabet genanvendt til bl.a. betonproduktion, sandblæsningsmateriale og isoleringsmateriale (Slambehandling, 2012). Sandblæseren, som aftog aske, gik konkurs, og da det EU-støttede projekt stoppede, er det nu kun Rockwool A/S, der aftager slamaske (Rindel, 2012).

### 2.2.2 DS/EN 450-1

Denne standard omhandler flyveaske til iblanding af beton. Der findes ingen standard for slamaske i beton, da dette i bund og grund stadig kun er på forsøgsbasis. Indtil nu er det normalvis kulflyveaske, restprodukt fra afbrænding af kul, der som flyveaske er blevet anvendt i beton. Dog kan slamaske per definition også karakteriseres som en flyveaske på baggrund af metoden for afbrændingen og fremstillingen af slamasken, hvorfor det indledningsvis kan vise sig relevant, at slamasken skal holdes op mod de krav, DS/EN 450-1 stiller for en flyveaske til beton. Nedenstående tabeller, 2-5 og 2-6, viser de kemiske og fysiske krav for flyveaske til iblanding af beton.

Tabel 2-5 Kemiske krav for flyveaske til beton if. DS/EN 450-1

Kemiske krav	Metode		
Organisk materiale	EN 196-2	Kategori A <	5,00%
		Kategori B <	7,00%
		Kategori C <	9,00%
Kloridindhold	EN 196-2	<	0,10%
Sulfat (SO <sub>3</sub> ) indhold	EN 196-2	<	3,00%
Fri calciumoxid	EN 451-1	<	1,50%
Indhold af reaktivt calciumoxid	EN 197-1	<	10,00%
Indhold af reaktivt 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> )			
Totale indhold af alkalier	EN 196-2	<	5,00%
Magnesiumoxid	EN 196-2	<	4,00%
Fosfat	ISO 29581-2	<	5,00%

Tabel 2-6 Fysiske krav for flyveaske til beton if. DS/EN 450-1

Fysiske krav	Metode			
Kornstørrelsen	EN 451-2 eller EN 933-10	Mængden der ikke går gennem en si med 0,045 mm maske størrelse	Kategori N >	40 %
			Kategori S >	12 %
Densitet	EN 1097-7	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 mere end dobbelt så lang som for en referenceprøve med 100 % cement		

### 2.2.3 DS/EN 206-1

Denne standard omhandler specifikationer, egenskaber, produktion og overensstemmelser vedr. beton. I denne standard er der f.eks. opstillet grænseværdier for det maksimale kloridindhold i armeret og ikke armeret beton. Disse grænseværdier er opstillet i tabel 2-7 herunder.

Tabel 2-7 Maksimale klorid indhold i beton

Anvendelse	Kloridklasse	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 %

### 2.2.4 Tungmetaller

Tungmetaller er metalliske grundstoffer, der vejer mere end 5 g/cm<sup>3</sup>. De værste tungmetaller for miljøet er cadmium (Cd), bly (Pb) og kviksølv (Hg). Det er derfor interessant at undersøge, hvilke tungmetaller der er i slamasken, og hvor stor koncentrationen er (Rosenmai & Svendsen, 2012).

Indeholder slamasken tungmetaller, bør det undersøges, hvor stor en del af tungmetallerne der udvaskes til miljøet af den færdigstøbte beton.

Der findes ikke direkte grænseværdier for mængden af tungmetaller i slamaske, men miljøstyrelsens bekendtgørelse (Bekendtgørelse, 2012) beskriver en kategorisering af restprodukter til anvendelse i bygge- og anlægsarbejder.

For at fjerne tungmetallerne fra slamasken, kan denne syrevaskes, hvorved tungmetallerne udskilles ved hjælp af syren og senere kan ekstraheres fra syren og deponeres eller genanvendes.

## 2.3 Forudgående forskning

Følgende afsnit beskriver rapporter og artikler, der er fundet relevante for udarbejdelsen af nærværende rapport.

### 2.3.1 Anvendelse af aske fra forbrænding af spildevandsslam (bioaske) i betonproduktion.

Rapporten, der er udarbejdet af et fællesskab mellem rensningsanlæggene Spildevandscenter Avedøre og Lynettefællesskabet I/S samt Unicon, producent af færdigblandet beton, har til opgave at påvise brugen af bioaske i beton set fra både det økonomiske, miljømæssige og teknologiske perspektiv. Det var et EU-finansieret forsøg og forløb over en periode på 2-3 år.

Projektet blev inddelt i to faser, der kan beskrives som en praktisk fase, hvor udfordringerne samt implementeringen af bioaske i betonproduktionen blev undersøgt, og en teoretisk fase, hvor laboratorieforsøg af asken samt betonen skulle dokumentere, at beton med bioaske ikke har nogen dårlig indflydelse på en endelig konstruktion.

For at sikre, at slamasken er nogenlunde ensartet og repræsentativ for den samlede produktion af slamaske, blev der udført adskillige laboratorieforsøg på prøver udtaget over et fuldt produktionsår for at sikre bioaskens fysiske og kemiske egenskaber.

Som de væsentligste konklusioner fra de udførte forsøg kan bl.a. nævnes:

- Beton støbt med og uden bioaske har ikke forskellige blandingsegenskaber mht. luftindblandingsmidlets evne til at danne luft i betonen.
- Beton støbt med bioaske kræver mere vand for at opnå samme konsistens som en beton støbt uden. Dette betyder, at for at opnå samme teoretiske styrke for beton, v/c-forhold, skal der tilsættes yderligere cement.

Grundet den høje kvalitet, omhyggeligheden og det faktum, at alle analyserne er udført i overensstemmelse med DS/EN 450-1, betegnes de følgende konklusioner og analyseresultater udarbejdet i denne rapport som teori.

Både de fysiske og de kemiske egenskaber for slamasken fra Lynetten og Avedøre er relativt konstante igennem perioden for produktionen og udarbejdelsen af rapporten.

#### 2.3.1.1 Kemiske egenskaber:

- Lavt indhold af oxiderne  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  og  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  i forhold til kulflyveaske.
- Højt glødetab, dvs. indhold af organiske materialer.
- Lavt indhold af reaktivt silicium.
- Opfylder grænsen for opløseligt fosfat iht. DS/EN 450-1.
- Overskrider grænsen for det maksimale indhold af klorid.
- Består hovedsageligt af amorfe materialer (50 – 70 %)

#### 2.3.1.2 Fysiske egenskaber:

- Sammenlignet med kulflyveaske og cement er partiklerne i bioasken meget grovkornede, uregelmæssige, kantede og porøse.
- Densiteten for bioasken ligger mellem 2700 og 2850  $\text{kg/m}^3$ .
- Afbindingstiden, der er målt for prøverne støbt med bioaske fra denne rapport, opfylder ikke kravet for DS/EN 450-1 om maksimalt 120 minutters forlængelse af afbindingstiden i forhold til ren cementmørtel.

Til slut konkluderes det i rapporten at, bioasken ikke forventes at have en negativ indflydelse på betons holdbarhed. Dog forventes bioasken kun at have en mindre puzzolansk effekt, hvis den anvendes som cementerstatning i beton.

### 2.3.2 Effect of milling and acid washing on the pozzolanic activity of incinerator sewage sludge ash

Denne artikel er udarbejdet af *Centre for Environmental Control and Waste Management and Department of Civil and Environmental Engineering* for Imperial College London. Artiklen omhandler primært genbrugen af slamaske i beton, indvindingen af fosfor fra netop slamasken, inden denne bruges i betonen, og effekten af disse tiltag på allerede anvendte materialer i betonfremstillingen: Kulflyveaske, metakaolin (ler-lignende materiale med gode puzzolanske egenskaber) og kvartssand. I alle mørtelprøver støbt i forbindelse med denne undersøgelse, kun med undtagelse af en referenceprøve, er 20 % af cementen erstattet med ovennævnte stoffer.

På baggrund af forsøg konkluderes det blandt andet i artiklen, at både kulflyveaske og slamaske fik forbedret deres puzzolanske egenskaber efter knusning af materialet. Dog viste testresultater, at såfremt materialerne vaskes med syre (svovlsyre), begrænses den puzzolanske effekt til meget lille, hvis den overhovedet er til stede. Desuden vil syrevasken af slamasken, der har til opgave at indvinde fosforen i asken, formentlig resultere i et uopløseligt materiale, der som beskrevet ikke viser de store puzzolanske egenskaber.

### 3 Materialer og metoder

Nedenstående afsnit omhandler materialer og forsøg lavet ifm. udarbejdelsen af denne rapport.

#### 3.1 Anvendte asker

I dette projekt er alle forsøg og mørtelstøbninger foretaget med en slamaske fra rensningsanlægget Lynetten på Amager, og vil herefter betegnes som LSA. Asken er udtaget fra Lynettens forbrændingsanlæg 14/6-2012 og har herefter været opbevaret lufttæt. Senere i rapporten sammenholdes resultater fra nedenstående forsøg, tabel 3-1, med en aske ligeledes fra Lynetten, men lagret i depot i minimum 2 år, i en inddæmmed ikke overdækket del af Øresund, nær Lynettefællesskabets rensningsanlæg. Denne vil fremover betegnes som LSA depot.

Som beskrevet i afsnit 2.2 er Lynetten et Fe-baseret rensningsanlæg, hvilket giver asken dens røde farve.

### 3.2 Metoder til karakteristik af slamaske

I dette afsnit gennemgås, hvilke forsøg der er anvendt til karakteristik af askens fysiske og kemiske egenskaber, samt om der har været nogle afvigelser fra fremgangsmåden, beskrevet i øvelsesvejledningerne. Forsøgene fremgår af tabel 3-1 nedenunder.

**Tabel 3-1 Forsøg til karakteriseringen af slamaskens egenskaber**

<b>Forsøg</b>	<b>Formål</b>	<b>Metode</b>
pH og ledningsevne	pH og ledningsevne bestemmes for at få større kendskab til askens kemiske egenskaber.	Bilag 1A Bilag 1E
Vandindhold	Vandindholdet bestemmes, da det er interessant ift. mørtelprøvens v/c-forhold og derved styrken.	Bilag 1B
Glødetab	Glødetabsforsøget er fortaget for at bestemme mængden af organisk stof i prøven.	Bilag 1D
Bufferkapacitet	Bufferkapaciteten undersøges for at finde askens evne til at fastholde pH.	Bilag 1H
Vandopløselighed	Det undersøges, hvor stor en del af asken der er vandopløselig for at få et overblik over mængden af vandopløselige stoffer i asken.	Bilag 1F
Scanning Elektron Microscopy (SEM)	SEM anvendes til at se askens struktur.	Afsnit 3.2.7
Mapping (SEM)	Mapping foretages for at få et overblik over, hvilke elementer/grundstoffer asken består af.	Afsnit 3.2.8
Syrevask	Asken syrevaskes for at sænke askens pH-værdi.	Afsnit 3.2.9
Knusning	Asken knuses for at gøre askens struktur finere.	Afsnit 3.2.10
Vandopløselige anioner	For at måle mængden af salte i asken, laves dette indledningsvis.	Bilag 1G
Oplukning	For at kunne lave en destruktiv opmåling af tungmetaller foretages en oplukning.	Bilag 1C
IC måling	Ionchromografen(IC) opmåler mængden af salte i asken.	Afsnit 3.2.13
ICP måling	Et Ion Coupled Plasma(ICP) apparat opmåler mængden af tungmetaller i asken.	Afsnit 3.2.14
Mørtelstøbning	Der støbes prøver med ubehandlet, syrevasket og knust aske. Ud over mørtelprøver med aske støbes der referenceprøver. Alle prøver er støbt efter DS/EN 196-1.	DS/EN 196-1
Trykstyrke	De støbte mørtelprøver trykprøves for at finde de forskellige bearbejdede typer af LSA's indvirkning på trykstyrken ift. den ubehandlede LSA samt referencen. Der er trykprøvet efter 7, 14, 28 og 42 døgn. Der trykprøves iht. DS/EN 196-1.	DS/EN 196-1
Ultralyd	Der foretages ultralydsmålinger for at undersøge prøvens tæthed.	Afsnit 3.2.17
Udvaskning	Der laves udvaskning på de støbte mørtelprøver for at undersøge, om salte og tungmetallerne i asken udvaskes.	Bilag 3
Porøsitet, densitet og kapillarsugning	Forsøget laves for at undersøge askens indvirkning på mørtelprøvernes struktur, luftindhold og evne til at suge vand.	Bilag 2

### 3.2.1 pH

Forsøget, pH i en 1M KCl-opløsning, er lavet som i forsøgsvejledningen beskrevet. Det er foretaget fem gange: To gange på den ubehandlede aske og tre gange i forbindelse med syrevaskning af asken.

### 3.2.2 Ledningsevne

Ledningsevne-forsøget er lavet som i forsøgsvejledningen beskrevet. Forsøget er lavet en gang på den ubehandlede aske.

### 3.2.3 Vandindhold

I forsøgsvejledningen er der opstillet to forskellige metoder til bestemmelse af vandindhold. I dette projekt er metoden ”Ved mindre præcis måling” anvendt. Forsøget er foretaget to gange: Første gang med tre prøver og anden gang med to. Begge gange er forsøget foretaget på den ubehandlede aske.

### 3.2.4 Glødetab

Forsøget glødetab er lavet som i forsøgsvejledningen beskrevet. Forsøget er lavet en gang på den ubehandlede aske.

### 3.2.5 Bufferkapacitet

Forsøget bufferkapacitet er lavet som i forsøgsvejledningen beskrevet. Forsøget er lavet en gang på den ubehandlede aske.

### 3.2.6 Vandopløselighed

Forsøget vandopløselighed er lavet som i forsøgsvejledningen beskrevet. Forsøget er lavet en gang med den ubehandlede aske.

### 3.2.7 Scanning Elektron Microscopy (SEM)

Ved dette forsøg bliver askens morfologi studeret ved brug af et SEM-apparat. Slamasken placeres på et lille stykke tape og sættes ind i maskinen, hvorefter strukturen af asken kan observeres i en forstørret udgave. Forsøget er lavet med den ubehandlede, syrevaskede og knuste aske.

### 3.2.8 Mapping (SEM)

Forsøget mapping foregår i forbindelse med SEM-forsøget. Asken bliver forstørret 1000 gange, og herefter sættes apparatet til at tælle de grundstoffer (elementer), det kan se på overfladen af de forstørrede askepartikler. Alt efter hvor præcist resultatet skal være, sættes apparatet til at tælle et vist antal frames, hvor det mest korrekte resultat opnås ved 64 frames, som svarer til ca. 12,5 min.

Der er lavet mapping på den ubehandlede og syrevaskede aske. Der er ikke lavet mapping på den knuste aske, da det må forventes, at den ikke er anderledes end den ubehandlede aske i forhold til antal grundstoffer. Mapping i dette projekt er lavet ved 64 frames.

### 3.2.9 Syrevask

Asken syrevaskes for at sænke pH-værdien. Syrevasken er foretaget med 0,75 M svovlsyre ( $H_2SO_4$ ). Der afvejedes 200 g slamaske til 1 liters plasticflasker. Til denne tilføjedes 750 ml syre og der blev rystet. Asken stod i syre i 2 timer, hvorefter den blev vasket efter med destilleret vand 2 gange. Dette blev gjort ved at filtrere syren, der ikke var en del af bundfaldet, fra og tilsætte destilleret vand, så den samlede mængde væske igen var 750 ml. Herefter blev hele prøven filtreret, og denne stod natten over og dryppede af. Dagen efter at syrevasken var foretaget, blev filteret med asken sat i en ovn ved  $105^{\circ}C$ , indtil al væske var tørret væk. I forbindelse med syrevasken blev der dannet gips pga. syren. Dette gjorde, at efter tørringen var asken



klumpet og skulle derfor knuses let i en morter. Dette gøres for, at den syrevaskede aske beholder samme struktur og kornstørrelse som den ubehandlede aske, og altså ikke bliver knust som i afsnit 3.2.10. Der er foretaget tre syrevaske i forbindelse med dette projekt. Der er målt pH-værdi efter alle tre.

### 3.2.10 Knusning

Asken knuses for at gøre kornstørrelsen mindre. Knusningen foregår i en ringknuser ved, at ca. 50 g aske fyldes i ringknuseren, og den knuses i 30 sek. ved 1100 omdrejninger, hvilket er maks. hastighed. Der er knust aske ad tre omgange og i alt ca. 600 g.

### 3.2.11 Vandopløselige anioner

Forsøget vandopløselige anioner er lavet som i forsøgsvejledningen beskrevet. Forsøget er udført en gang med den ubehandlede slamaske i forbindelse med IC måling.

### 3.2.12 Oplukning

Forsøget oplukning er lavet som i forsøgsvejledningen beskrevet. Forsøget er lavet en gang med den ubehandlede aske i forbindelse med ICP måling.

### 3.2.13 IC måling

IC målingerne er udført af en laborant. Der er lavet IC målinger på den ubehandlede aske samt på fem knuste mørtelprøver i forbindelse med leaching forsøget.

### 3.2.14 ICP måling

ICP målingerne er udført af en laborant. Der er lavet ICP målinger på den ubehandlede aske samt på fem knuste mørtelprøver i forbindelse med leaching forsøget.

### 3.2.15 Mørtelstøbning

Mørtelprøverne er støbt efter DS/EN 196-1, metoder til prøvning af cement, del 1: Styrkebestemmelse. På baggrund af opmåling af mørtelprøvernes dimensioner er det erfaret, at formene ikke er ens og inden for de opstillede krav fra DS/EN 196-1 (afsnit 4,5 forme). Prøvernes længde ligger mellem 159 og 163 mm, men dette vil ikke have indflydelse på trykstyrken. Højden på prøverne ligger mellem 39,8 og 41,2. mm, og da denne indgår i beregningen af trykarealet, har det en indflydelse på trykstyrken. Ved beregning af trykstyrken er den aktuelle højde brugt for hvert enkelt prøvelegeme. Det vil sige, at den varierende højde ikke får indflydelse på den beregnede trykstyrke. Mørtelprøvernes bredde ligger inden for det tilladelige interval.

I DS/EN 196-1 (afsnit 4,6) beskrives et bumpende apparat til komprimering af mørtelprøverne i forbindelse med støbningerne. I dette projekt er der anvendt et vibratorbord til komprimering. Formene fyldes halvt med mørtel og vibreres i ca. 30 sek. Herefter fyldes formene helt, og de vibreres igen i ca. 30 sek.

I projektet er der støbt med 4 forskellige versioner af blanderecepten fra DS/EN 196-1. Disse fremgår også af Bilag 4, hvor den nøjagtige mængde af tilsatte materialer fremgår.

A-prøven er en referenceprøve, der er som beskrevet i standarden.

B-prøven er, hvor 10 % af cementen er erstattet af slamasken.

C-prøven er, hvor 20 % af cementen er erstattet af slamasken.

D-prøven er, hvor 10 % af tilslaget er erstattet af slamasken.

Ved blanding B, C og D, hvor der iblandes slamaske, er asken blandet med cementen, inden disse blandes med vand og tilslag. I forbindelse med støbning af B-, C- og D-prøver har det været nødvendigt at tilsætte

ekstra vand for at opnå samme konsistens som ved referenceprøven. Det ekstra vand er tilsat, efter prøven er færdigblandet ifølge DS/EN 196-1. Vandet er tilført af en eller to omgange efter behov og blandet ind i prøven over 30 sekunder med høj blandehastighed. Det ekstra vand er tilsat efter øjemål for at ramme referenceprøvens konsistens.

**Tabel 3-2 Blanderecept for mørtelprøver**

Prøve	Vand [g]	Cement [g]	Sand [g]	Aske [g]	Ekstra vand [g]
A	225	450	1350	0	0
B	225	405	1350	45	Efter behov
C	225	360	1350	90	Efter behov
D	225	450	1215	135	Efter behov

Ud over de fire almindelige prøver er der støbt prøver med den knuste og syrevaskede aske. Dette er gjort efter B- og D-recepten for at kunne sammenligne resultaterne. Mørtelprøver med knust aske kaldes MB og MD, og prøver med syrevasket aske kaldes SB og SD.

### 3.2.16 Trykstyrke

Mørtelprøvernes trykstyrke findes efter DS/EN 196-1.

Det er angivet i standarden, at arealet, der skal trykkes over, er 40x40 mm. Ved trykprøvning er der i dette projekt anvendt klodser med en bredde på 50 mm, hvilket ændrer trykarealet. I beregningerne er der derfor regnet med et trykareal på 50 mm gange den aktuelt opmålte trykbredde (prøvens højde).

### 3.2.17 Ultralyd

Der er foretaget ultralydsmålinger på ca. 1/3 af de støbte mørtelprøver, men da ultralydsapparatet gik i stykker midt i projektperioden, er resultaterne for disse ikke behandlet i denne rapport. Dette skyldes at det vurderes at den lille datamængde ikke er brugbar i forhold til at give et godt billede af, hvor tætte mørtelprøverne er. Resultaterne fra ultralydsmålingerne kan ses i Bilag 5.

### 3.2.18 Udvaskning

Ved forsøget udvaskning er mængden af aske og destilleret vand ændret. Der er ved forsøget afmålt 10 g knust mørtelprøve og 50 ml destilleret vand. Ud over mængderne er fremgangsmåden fuldt. Forsøget er lavet en gang, hvor fem forskellige mørtelprøver er knust i en ringknuser og testet.

### 3.2.19 Porøsitet, densitet og kapillarsugning

For at bestemme porøsitet, densitet og kapillarsugning anvendes forsøgsvejledningen fra et 3 ugers kursus på DTU. Vejledningen er lavet specifikt til kurset og er derfor blevet justeret i forhold til dette projekt.

Pga. tidsnød i forbindelse med 3 ugers kurset skulle prøverne kun ligge under vand ved atmosfærisk tryk i eksikatoren i 15 min. Dette ville formentlig medføre, at mørtelprøvernes porer ikke fyldes helt med vand. Derfor har prøverne i dette projekt ligget under vand i eksikatoren i ca. et døgn, ved atmosfærisk tryk, for at porerne kunne nå at fyldes helt med vand.

Forsøget til bestemmelse af kapillarsugning er lavet ud fra forsøgsvejledningen.

Porøsitet-, densitet- og kapillarsugningsforsøgene er lavet på 2 mørtelprøver; en SB og en MB.

Udtørringen af de to prøvelegemer er foregået i tørreskab ved 105 °C på trods af, at tidligere forskning har vist, at højere hærdetemperaturer giver grovere porestruktur (Hansen, Villadsen, & Bager, 1989).

## 4 Resultater og diskussion

I dette afsnit behandles resultater fra forsøg opstillet i tabel 3-1 i afsnit 3.2 Metoder til karakteristik af slamaske.

### 4.1 Karakteristik af asken

I dette afsnit diskuteres resultaterne for slamasken LSA og sammenholdes med LSA depot. Begge disse asker er beskrevet i afsnit 3.1 Anvendte asker.

Tabel 4-1 Karakteristik af LSA og LSA depot

		LSA	LSA depot
pH		12,5 ± 0,05	8,29
Ledningsevne	[ms/cm]	7,81 ± 0,02	5,59
Glødetab	[%]	0,25 ± 0,05	0,16
Vandindhold	[%]	0,09 ± 0,04	14,40
Vandopløselighed	[%]	5,12 ± 2,65	0,83

#### 4.1.1 pH

Begge asker har en pH-værdi på over 7 (tabel 4-1), som viser, at de er basiske. LSA depot, har en væsentligt lavere pH-værdi i forhold til LSA. Dette kan skyldes, at asken har ligget og er blevet vasket igennem med regnvand, hvilket har fungeret som en syrevask, og derfor har sænket pH-værdien.

#### 4.1.2 Ledningsevne

De to askers ledningsevne, fremgår af tabel 4-1, og ligger på henholdsvis 7,81 ms/cm for LSA og 5,59 ms/cm for LSA depot. Dette tyder på, at LSA har et større antal let opløselige salte end LSA depot. Grunden til dette kan være, at nogle af de let opløselige salte er blevet vasket ud af depotasken.

#### 4.1.3 Glødetab

Begge asker har et meget lavt glødetab ift. kategoriseringen i DS/EN 450-1, hvilket betyder, at forbrændingen er god i Lynettens forbrændingsanlæg. Begge asker opfylder kravene til glødetab, kategori A, da grænseværdien for flyveaske er max 5 %, da askerne har et glødetab på hhv. 0,25 og 0,16 % (tabel 4-1). Forskellen i glødetab kan skyldes variationen af materiale, der er blevet forbrændt.

#### 4.1.4 Vandindhold

Vandindholdet i LSA er blevet bestemt to gange i forbindelse med dette projekt. Første gang blev den målt til 0,07 % og anden gang til 0,12 %, middelværdien af disse fremgår i tabel 4-1. Forskellen på disse to kan skyldes, at asken, der blev undersøgt anden gang, havde ligget i en tæt spand med luft, hvor den kan have suget en lille smule vand til sig fra luften. De to resultater er ret forskellige i forhold til hinanden, men det er meget lidt ekstra vand, asken har suget, så det betyder ingenting for askens egenskaber.

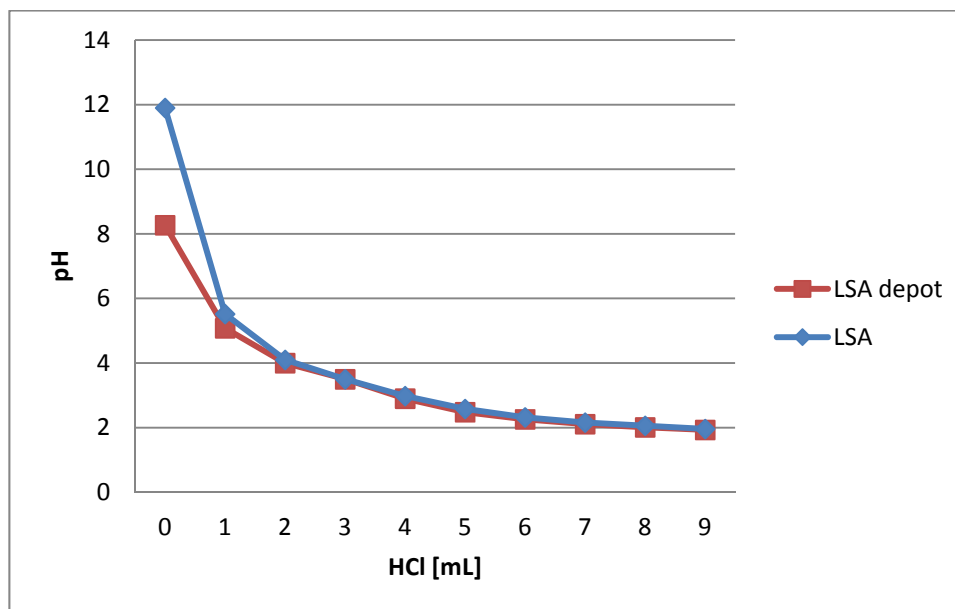
Der er stort set ingen vand i asken, så derfor undlades denne vandmængde ved beregning af v/c-forholdet i mørtelprøverne. Det vides ikke, om asken binder en del af det tilførte vand ved støbning af mørtelprøverne og derfor har indflydelse på v/c-forholdet.

LSA depot, har et vandindhold på 14,4 %, hvilket er meget højere end LSA.. Grunden til dette er, at LSA depot har ligget udenfor og har suget en masse vand fra omgivelserne. Der bør tages hensyn til det store

vandindhold, når v/c-forholdet regnes for mørtelprøverne støbt med LSA depot. Dette er ikke medtaget i nærværende projekt.

#### 4.1.5 Bufferkapacitet

Herunder i figur 4:1 fremgår bufferkapaciteten for LSA og LSA depot grafisk afbilledet.



Figur 4:1 Bufferkapacitet for LSA og LSA depot

Det ses, at LSA hurtigt falder i pH, og derefter lægger de to grafer sig stort set oven i hinanden. Asken er ikke særligt god til at fastholde en høj pH, hvilket gør, at askens pH-værdi falder, når denne ligger i depot, hvor den bliver vasket igennem med regnvand, som fungerer som en meget mild syrer.

#### 4.1.6 Vandopløselighed

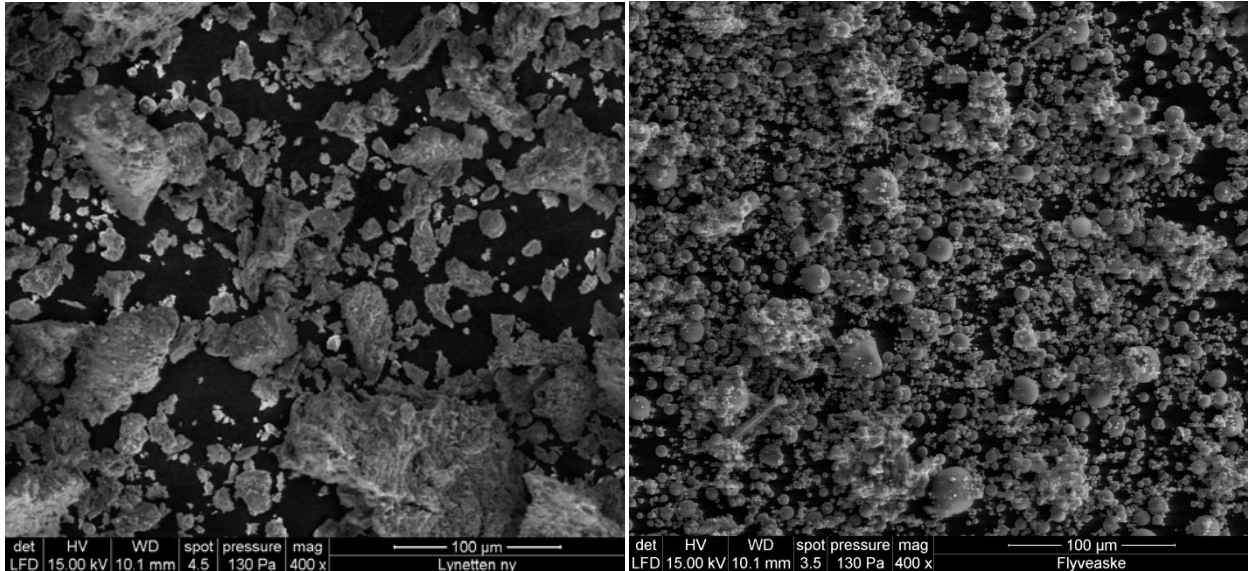
Mængden af vandopløselige stoffer i LSA er målt til 5,12 %, hvor LSA depot er målt til 0,83 % (tabel 4-1). De to målinger er ikke særligt præcise, da det er et lidt besværligt forsøg at udføre. Forsøget indebærer en del filtrering og rensning af filtre. Hvis ikke al asken er kommet tilbage i flasken, vil dette give et falsk resultat, der vil medføre en større mængde vandopløselige stoffer i asken, end der er i virkeligheden. Dog er forskellen på de to forsøg så stor, at der må være en forskel i askernes mængde af vandopløselige stoffer.

Grunden til den store forskel kan være, at LSA depot har ligget og er blevet vasket igennem i minimum 2 år, inden prøven er udtaget. Det er netop de vandopløselige stoffer, der vil blive skyllet ud.

Det vides ikke, hvilke vandopløselige stoffer der er i prøverne, men dette undersøges ved en IC måling, hvor mængden af salte opmåles. Disse resultater kan ses i afsnit 4.3.4 Salte.

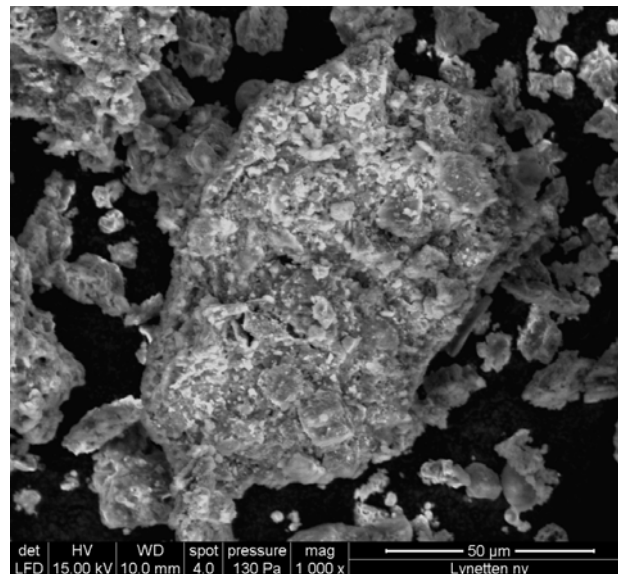
#### 4.1.7 Scanning Elektron Microscopy (SEM)

For at kunne studere askens struktur er den blevet undersøgt ved SEM. Herunder ses aske fra Lynetten, LSA, som er forstørret først 400 gange og derefter 1000 gange. Til sammenligning er der et billede af kulflyveaske x400.



Billede 4-1 LSA x400

Billede 4-2 Kulflyveaske x400



Billede 4-3 LSA x1000

Ved at forstørre LSA 400 gange, billede 4-1, ses det, at slamasken er en blanding af både mindre og større korn. Det kan ses, at slamasken er noget grovere end kulflyveasken, billede 4-2, og kornene er ikke kuglerunde som kulflyveaskens. Kulflyveaskens korn er ikke lige så forskellige i kornstørrelse som LSA og virker mere ensartede. Af billede 4-3 ses det, at slamaskens korn ser ud til at være porøse, da det ligner, at der er huller i dem. Disse iagttagelser stemmer overens med de fysiske egenskaber for slamaske, opstillet i afsnit 2.3.1.2. Da kornene kun ses udefra, kan der ikke siges, hvor porøse de er, da dette ikke er en måling, men en subjektiv vurdering ud fra billederne.

### 4.1.8 Mapping

Mappingen er en optælling af grundstofferne i overfladen af asken. Det giver et overblik over, hvilke grundstoffer asken indeholder, men ikke særligt præcist, da målingen udelukkende foregår på overfladen. Ved mapping optælles alle elementer, dvs. at der ikke tages hensyn til, om grundstofferne indgår i forbindelser med hinanden eller forekommer frit på overfladen. Resultaterne fra dette anvendes ikke i denne rapport, da der foretages en mere præcis ICP måling, hvor de aktuelle koncentrationer opmåles. Resultaterne er dog vedlagt som bilag 12.

## 4.2 Bearbejdning af aske

### 4.2.1 Syrevask

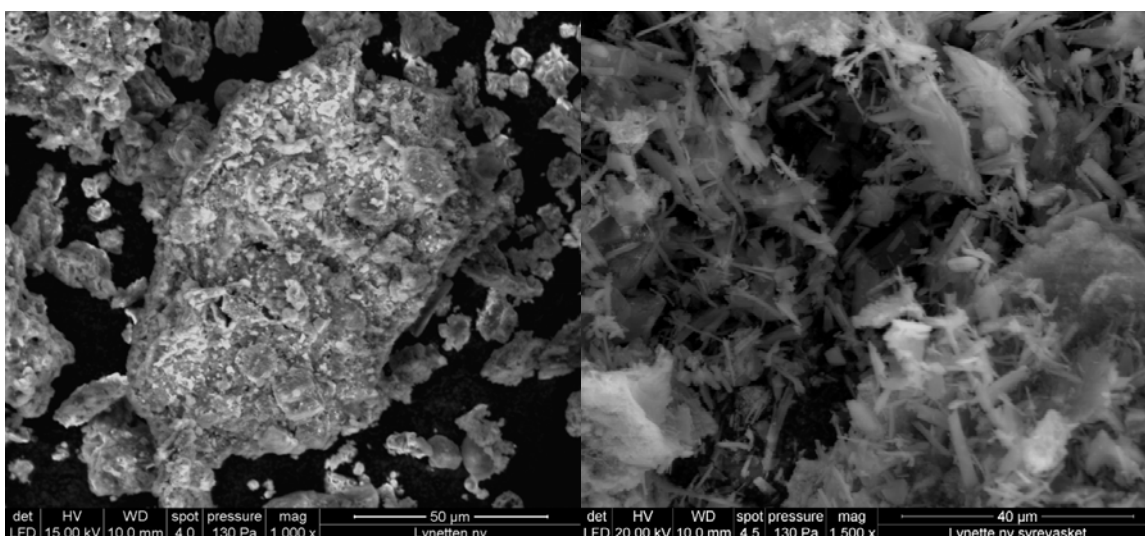
I forbindelse med dette projekt er pH-værdien for LSA målt til 12,5, hvilket er stærkt basisk, men på niveau med cement. For at undersøge, om pH-værdien havde en effekt på mørtelprøvernes trykstyrke, blev der derfor foretaget syrevask med 0,75 M svovlsyre ( $H_2SO_4$ ) for at sænke pH værdien. Der er i alt blevet foretaget tre gange syrevask. Efter hver syrevask er askens pH-værdi målt. En anden grund til syrevask er, at slamasken indeholder fosfor, en væsentlig resurse, som kan ekstraheres med svovlsyre (Kirkelund, Jensen, & Ottosen, 2012). I denne rapport undersøges det ikke, i hvilket omfang syrevasken sænker indholdet af fosfor i asken, men den styrkemæssige effekt af syrevaskningen.

Tabel 4-2 Middel pH-værdier for den syrevaskede aske

Syrevask	pH-værdi
12/11-2012	3,59
20/11-2012	3,55
06/12-2012	3,22

Effekten af at sænke askens pH-værdi kan ses i afsnit 4.4.2 Syrevask.

I forbindelse med syrevasken bliver der dannet gips. Da den kemiske formel for gips er  $CaSO_4$ , og asken indeholder Ca og syren  $SO_4$ , er det forventeligt, at der dannes gips, hvilket også kan ses af billede 4-5 herunder.



Billede 4-4 Ubehandlet aske

Billede 4-5 Syrevasket aske

Når cement hælder, dannes blandt andet  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , dette fremgår også af figur 2:2 i afsnittet vedr. cements afbinding. Ved tilstedeværelse af sulfater fra svovlsyren går disse i forbindelse med Ca fra asken og danner gips. For at bestemme, hvor meget af en cement der er hærdet, måles mængden af frie Ca ioner. Når mængden af frie Ca ioner falder, kunne det tyde på at de reagerer med OH ionerne, som når cement hælder, og derfor har puzzolanske egenskaber. Dette vil give et falsk resultat i forhold til askens egenskaber og vil kunne modbevise ved en Frattini test (Donatello, Freeman-Pask, Tyrer, & Cheeseman, 2009).

Af billederne herunder ses dannelsen af gips der gør slamasken klumpet, billede 4-6. Desuden ses også den tydelige farveændring syrevasken har medført, billede 4-7.



Billede 4-6 Gipsdannelse i syrevasket LSA

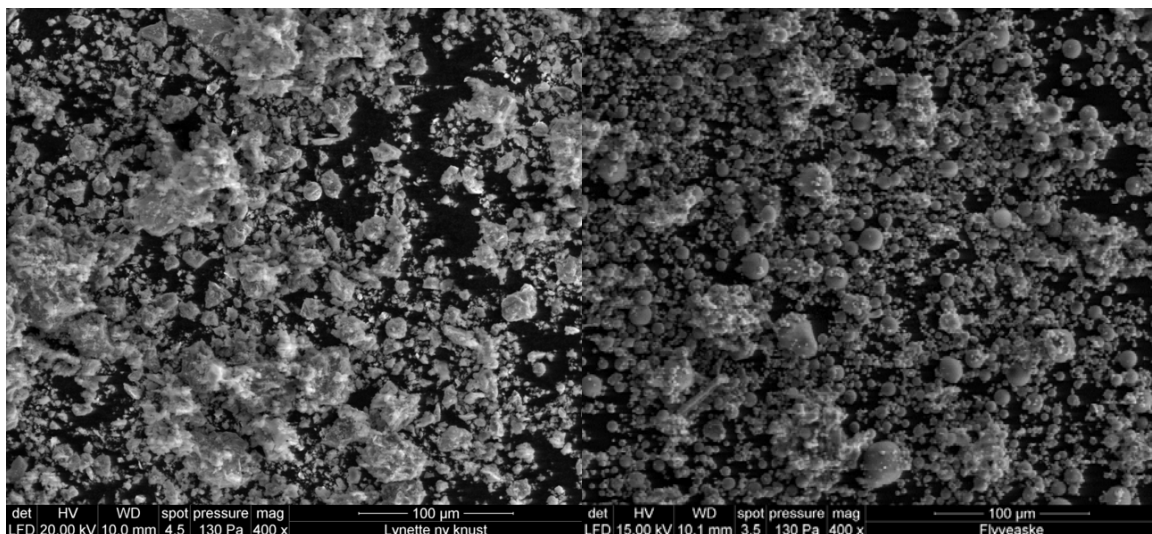
Billede 4-7 t.v. ubehandlet LSA og t.h. syrevasket LSA

#### 4.2.1.1 Videre forskning

I forbindelse med syrevaskning af asken kunne det være interessant at undersøge, hvilke stoffer der fjernes ved syrevask. Det bør samtidig undersøges, om andre syrer end 0,75 M svovlsyre er bedre egnede.

#### 4.2.2 Knusning

Slamasken fra Lynetten har meget forskellige kornstørrelse. Da kulflyveaske tidligere har vist sig at kunne bruges i betonproduktion, forsøges det at få slamasken til at ligne kulflyveasken ift. struktur og kornstørrelse. Dette gøres ved at knuse slamasken i en ringknuser. Efter knusningen af asken, er denne observeret i SEM apparatet. Herunder er billeder af den knuste aske og kulflyveasken opstillet til sammenligning.



Billede 4-8 Knust aske x400

Billede 4-9 Kulflyveaske x400

På billederne 4-8 og 4-9 ses det, at den knuste slamaske ligner kulflyveasken mere efter knusningen. Slamasken er blevet mere ensartet ift. kornstørrelse og kornene er ca. lige så store som kulflyveaskens. Det er derfor lykkedes at få slamasken til at ligne kulflyveasken. Sammenlignes billede 4-8 af den knuste aske med billede 4-1 fra afsnit 4.1.7, som viser den ubehandlede aske i samme skala, ses den tydelige effekt af knusningen. Der er herefter støbt mørtelprøver med den knuste slamaske, og resultaterne for disse er opstillet og diskuteret i afsnit 4.4.3.

#### 4.2.2.1 Videre forskning

I nærværende projekt er asken blevet knust i en ringknuser, men hvor grovkornet asken var før og efter knusningen er ikke blevet undersøgt. Det kunne være spændende at undersøge askens gradering, og om effekten af knusningen ændres, hvis asken knuses finere eller grovere.

### 4.3 Karakteristik af mørtelprøver

Der er i forbindelse med projektet foretaget forsøg for at undersøge de støbte mørtelprøvers porøsitet, densitet og kapillarsugning. Forsøget er foretaget på en mængde referenceprøver samt to B-prøver støbt med henholdsvis knust og syrevasket aske (MB og SB). Alle mørtelprøver har ligget i 28 døgn og er ikke blevet tryktestet, da dette kan have indflydelse på netop prøvernes porøsitet og struktur.

I tabel 4-3 herunder er resultaterne for porøsitet og densitet opstillet. Til sammenligning er densiteterne, målt i forbindelse med trykprøvning, opstillet i tabel 4-4. De to nedenstående tabeller er for prøver, der har hærdet i 28 døgn.

**Tabel 4-3 Porøsitet og densitet fra forsøg**

Prøve	Åben porøsitet	Mættet overfladetør densitet
	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
Reference	16,8	2308,16
MB	17,1	2297,60
SB	18,4	2277,25

**Tabel 4-4 Beregnet densitet ud fra vægt og volumen**

Prøve	Mættet overfladetør densitet
	[kg/m <sup>3</sup> ]
Reference	2255,29
MB	2267,28
SB	2244,20



### 4.3.1 Porøsitet

Det ses ved porøsitetsforsøget, at den knuste prøve har en åben porøsitet på 17,1 %, hvilket er 1,79 % højere ift. referenceprøvernes 16,8 %. Den syrevaskede har en porøsitet på 18,4 % og er derfor noget mere porøs i forhold til de to andre, da den er 9,52 % højere ift. referencerne.

Mørtelprøver med knust aske kan derfor siges at pakke sig bedre sammen, hvilket giver et mindre porevolumen end en mørtelprøve støbt med syrevasket aske. Da den syrevaskede aske ikke burde have ændret porestruktur ift. den ubehandlede aske, kan det antages, at det samme gør sig gældende for mørtelprøver støbt med den ubehandlede aske.

### 4.3.2 Densitet

I forbindelse med porøsitetsforsøget er den mættede overfladetørre densitet (ssd) for referenceprøverne fundet til 2308,16 kg/m<sup>3</sup>. Dette er 0,46 % og 1,34 % højere end henholdsvis den knuste og syrevaskede aske.

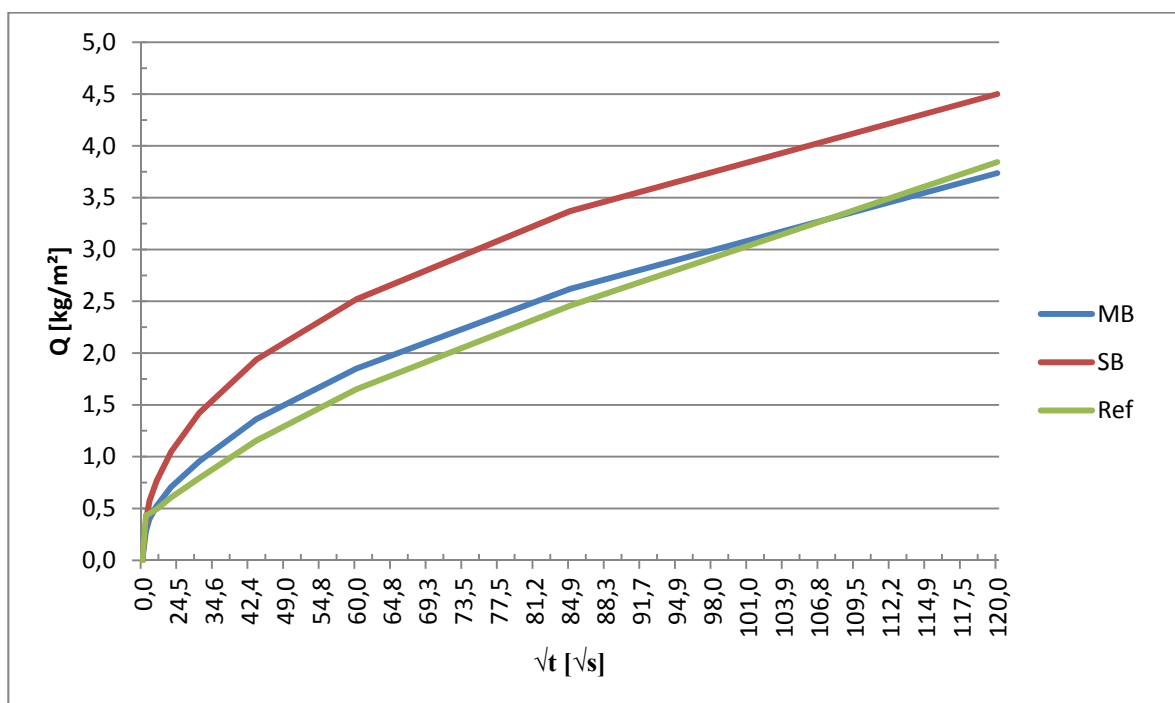
Ved alle trykprøvninger er ssd beregnet, og her er mørtelprøver med knust aske 0,53 % tungere end referencen, hvor prøver støbt med syrevasket aske er 0,49 % lavere end referenceprøverne.

Alle tre densiteter målt ved porøsitetsforsøgene er højere end densiteterne målt i forbindelse med trykprøvningerne. Dette kan skyldes, at mørtelprøverne, der har ligget og hærdet, ikke har været vakuummeret og derfor ikke har suget lige så meget vand, som prøverne fra porøsitetsforsøget.

Ved begge typer måling er densiteten højere for prøven med den knuste aske i forhold til prøven med syrevasket aske. Dette skyldes formentlig, at den knuste aske pakker sig bedre end den syrevaskede, hvilket porøsiteterne også indikerer.

### 4.3.3 Kapillarsugning

Herunder ses resultaterne fra kapillarsugningsforsøget opstillet. Der er målt over fire timer.



Figur 4:2 Resultater for kapillarsugning af mørtelprøver med knust og syrevasket LSA, samt for referencen

Det ses ud fra figur 4:2, at mørtelprøverne suger mest vand i starten, da hældningen på de tre linjer er størst i starten og herefter bliver mindre og mindre. For at kunne bestemme et kapillartal og et modstandstal skulle

graferne have endt med vandret asymptote. Forsøgsvejledningen er lavet til at måle en murstens(tegl) kapillarsugning, og det har vist sig, at mørtelprøver ikke suger vand lige så hurtigt som tegl. Det ses, at hvis forsøget havde varet længere end 4 timer, ville graferne formentlig have endt vandret, da prøverne ville nå et punkt, hvor de ikke ville suge mere vand.

På trods af at tidligere forskning har vist, at højere hærdetemperaturet giver grovere porestrukturer, kan disse resultater godt bruges til at sammenligne de tre prøvelegemer indbyrdes med hinanden. Dette skyldes, at de alle tre får grovere porestruktur, og det antages, at dette sker i samme skala for dem alle tre.

Alle tre linjer har samme retning, men det ses, at mørtelprøven med syrevasket aske suger mere vand i de første par minutter i forhold til de to andre. Det kan skyldes forskellen i porøsitet, hvor prøver støbt med syrevasket aske har en højere porøsitet. Mørtelprøven med knust aske ligger derimod meget tæt på referenceprøven. Fra starten af forsøget ligger den knuste lige over referencen, men til sidst knækker den ned under referencen.

#### 4.3.4 Salte

Ved IC forsøget er koncentrationerne af salte målt. Der er målt for klorid, nitrat og sulfat. I afsnittet herefter er disse opstillet og sammenlignet med koncentrationerne for LSA depot.

Tabel 4-5 Saltindhold for LSA og LSA depot

		LSA	LSA depot
Afvejet	[g]	10,00	10,00
Tilsat	[mL]	50,00	50,00
Klorid			
Målt	Cl [mg/L ]	19,30 ± 2,0	266,42 ± 6,5
	Cl [mg/kg ]	96,53 ± 10,0	1332,08 ± 32,6
Nitrat			
Målt	NO <sub>3</sub> [mg/L ]	0,74 ± 0,1	19,69 ± 0,2
	NO <sub>3</sub> [mg/kg ]	3,72 ± 0,5	98,43 ± 1,1
Sulfat			
Målt	SO <sub>4</sub> [mg/L ]	2046,47 ± 44,4	2592,70 ± 6,1
	SO <sub>4</sub> [mg/kg ]	10232,35 ± 222,2	12963,50 ± 30,6

Ud fra tabel 4-5 herover ses det, at LSA depot har et væsentligt højere indhold af klorid og nitrat i forhold til LSA, 14-26 gange større. Dette er ikke helt som forventet, da asken har ligget og er blevet skyllet igennem med regn, som kunne have vasket nogle af saltene med sig. Grunden til, at depotaskens koncentrationer er højere, kan være, at LSA depot har ligget i en inddæmmet del af Øresund. Her kan asken have været i kontakt med havvand, hvilket bl.a. indeholder store mængder kloridioner, som asken kan have optaget over de to år, asken har ligget der.

Mængden af klorid er vigtig i forhold til armerede betonkonstruktioner, da et højt kloridindhold øger risikoen for korrosion i armeringen. I DS/EN 206-1 er der opstillet krav for den maksimale mængde klorid i betonkonstruktioner med forskellige armeringstyper. Disse krav ses i tabel 2-7 i afsnit 2.2.3 DS/EN 206-1

For at undersøge om den ubehandlede aske overholder kravene opstillet i tabel 2-7, beregnes mængden af klorid i forhold til cement i blanding B, C og D ud fra kloridkoncentrationen, fundet ved IC, og mængden af aske i prøven. Resultaterne af dette ses herunder i tabel 4-6.

Tabel 4-6 Beregnet kloridindhold for B, C og D prøver

Prøve	Cement	Aske	Klorid pr. kg aske	Klorid i prøve	Cl-indhold i forhold til cementvægten
[betegnelse]	[g]	[g]	[mg/kg]	[g]	[%]
B	405	45	96,53	0,004	0,001
C	360	90	96,53	0,009	0,002
D	450	135	96,53	0,013	0,003

Det højeste kloridindhold er ved en D-prøve, hvor der er 0,003 % klorid i forhold til cementmængden. Da kravene opstillet i DS/EN 206-1 ligger på 0,1-1 %, er disse overholdt, hvilket vil sige, at asken ikke indeholder for store mængder klorid for anvendelse i beton.

I DS/EN 450-1 omhandlende brug af flyveaske i beton er der også opstillet krav for den maksimale tilladelige mængde klorid. Kravet er 0,1 % af asken, dette er opfyldt, da LSA indeholder 0,010 % klorid. Dette vil sige at LSA kan bruges til beton, iht. DS/EN 450-1, omhandlende kulflyveaske.

Miljøklasser fortæller noget om det miljø, betonen befinder sig i. Miljøklasser kan f.eks. bestemmes ud fra kloridkoncentrationen. Der regnes ikke med et internt kloridbidrag fra betonen, men når dele af tilslag, bindemidler og tilsætningsstoffer indeholder klorid, vil dette bidrag ændre den samlede koncentration og måske ændre den samlede miljøklasse, armeringen befinder sig i. Så selvom asken ikke overskrider grænseværdierne opstillet i standarderne, skal der stadig tages hensyn til kloridindholdet, da disse bidrager til det samlede kloridindhold, armeringen oplever.

#### 4.3.5 Tungmetaller

Ved ICP forsøget er der målt, hvilke tungmetaller der findes i asken og deres koncentrationer. Dette er gjort ved en oplukning. Ud over ICP forsøget er der foretaget en udvaskningstest af fem forskellige mørtelprøver for at måle, hvor store mængder tungmetaller der udvaskes, når betonen nedbrydes. Som beskrevet i afsnit 2.2.4 Tungmetaller findes der hos miljøstyrelsen *bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret, uforurenede bygge- og anlægsaffald*. Bekendtgørelsen opstiller ikke krav om den maksimale tilladelige mængde tungmetaller, men inddeler restprodukterne i kategorier. I tabel 4-7 herunder er kravene for kategori 1 og 2 opstillet. Som tidligere nævnt i afsnit 2.2.4 kan restprodukter kategoriseres. Kategori 1 anvendes til alt bygge- og anlægsarbejde, hvor restprodukter i kategori 2 kun har begrænsede anvendelsesområder.

Tabel 4-7 Kategoriseringstabel for indhold af tungmetaller i restprodukter til anvendelse i byggeri

Kategori	1	2
Enhed	[mg/kg]	[mg/kg]
Bly	0-40	>40
Cadmium	0-0,5	>0,5
Krom	0-500	>500
Kobber	0-500	>500

I tabel 4-8 herunder er middelkoncentrationerne for tungmetallerne, fra ICP opstillet. Samtlige resultater fra ICP kan ses i bilag 8. Ud over de opstillede tungmetaller indeholder asken aluminium, natrium og kalium, men da det ikke har været muligt at finde grænseværdier for disse, er disse ikke medtaget.

Tabel 4-8 Middelkoncentration af tungmetaller i LSA

Oplukning af aske		
Tungmetaller	Mængde	Enhed
Bly	102,292	[mg/kg]
Cadmium	2,209	[mg/kg]
Krom	29,650	[mg/kg]
Kobber	711,078	[mg/kg]
Nikkel	35,176	[mg/kg]
Zink	3057,560	[mg/kg]

Sammenholdes tabel 4-8 og tabel 4-7 viser de, at tungmetallerne bly, cadmium, kobber, nikkel og zink er i kategori 2 og det eneste tungmetal, der overholder kravene for kategori 1, er krom. Det vil sige, at asken samlet set må betegnes som kategori 2, og asken derfor har begrænsede anvendelsesmuligheder. Oplukningen er en destruktiv metode til bestemmelse af koncentrationer, hvilket vil sige, at der ikke tages hensyn til, hvordan tungmetallerne er bundet, og hvor løst de er bundet. Derfor foretages der en udvaskningstest for at undersøge, hvor store koncentrationer der frigives, når betonen nedbrydes.

I tabel 4-9 herunder er de maksimale koncentrationer fra udvaskningstesten oplistet. Der er lavet udvaskningstest på fem forskellige prøver: B, D, SB, MB samt en reference. Alle værdier for udvaskningstesten kan ses i bilag 8.

Tabel 4-9 Maksimale koncentrationer af tungmetaller fra udvaskningsforsøg

Udvaskning af tungmetaller		
Tungmetaller	Mængde	Enhed
Bly	0,0923	[mg/kg]
Cadmium	0,0041	[mg/kg]
Krom	0,0777	[mg/kg]
Kobber	0,0969	[mg/kg]
Nikkel	0,0000	[mg/kg]
Zink	0,0682	[mg/kg]

Sammenholdes maksimumværdierne fra tabel 4-9 med tabel 4-7, ses det, at de støbte mørtelprøver alle sammen ligger inden for grænseværdierne opstillet for kategori 1, der kan bruges til alt bygge- og anlægsarbejde. Dette vil sige, at mørtelprøver støbt med aske ikke udvasker for mange tungmetaller til, at mørtelen må bruges til byggeri.

Da oplukningen er lavet på den ubehandlede aske, vides det ikke, om tungmetallerne er bundet i asken, eller de først bliver bundet, når asken blandes i mørtelen.

#### 4.3.6 Fosfor

I forbindelse med ICP forsøget ved oplukning er koncentrationen af fosfor fundet til 161,1 g/kg tørstof, hvilket svarer til 16,11 %. Koncentrationen af fosfor ligger generelt højt for slamasker, 7,2-10,5 % (Rosenmai & Svendsen, 2012). Da forskellige rensningsanlæg har forskellige måder at rense og brænde slammet på, vil der være stor variation i restproduktets, slamaskens, fosforkoncentration. Mængden af fosfor reduceres, når asken syrevaskes, tidligere forsøg har vist, at 42-61 % af fosforen bliver vasket ud med syren (Rosenmai & Svendsen, 2012). Dette er en fordel, da fosfor er en begrænset resurse, der ville være ærgerlig at indstøbe i betonkonstruktioner eller, som det er nu, deponere. I nærværende rapport er det ikke undersøgt, hvor stor en del af fosforen, der bliver vasket ud, men hvilken effekt syrevaskningen har på mørtelprøvernes trykstyrke.

#### 4.3.7 Videre forskning

Som nævnt har tidligere forskning vist, at hærkning ved højere temperaturer giver grovere porestruktur. Derfor bør der foretages porøsitet- og kapillarforsøg, hvor prøvelegemerne tørres ved under 65 °C (Hansen, Villadsen, & Bager, 1989). Ud over at ændre tørretemperaturen bør der laves kapillarmålinger over længere tid for at opnå den vandrette asymptote, der viser, at prøven ikke suger mere vand.

Askens kloridindhold er i dette projekt bestemt og har vist sig at overholde gældende grænseværdier for anvendelse i armeret beton. Der bør laves forsøg, hvor slamaske iblandet beton anvendes ved forskellige armeringstyper.

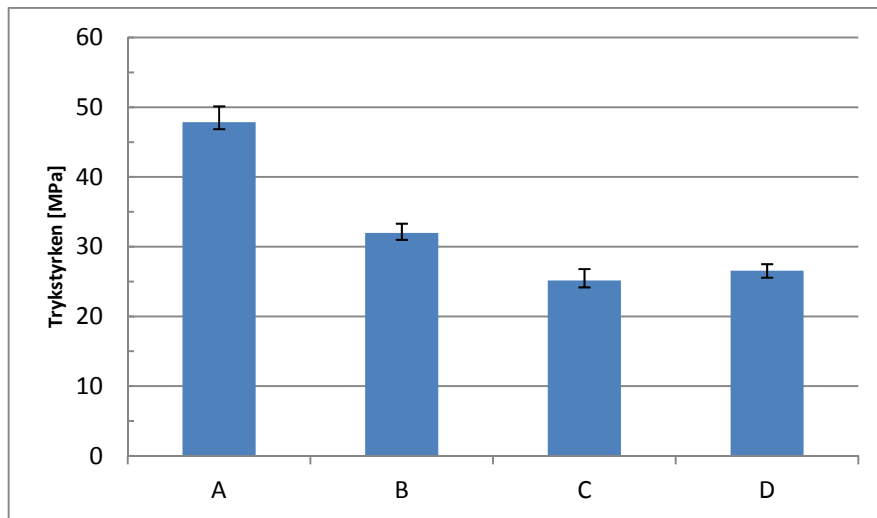
For at undersøge hvor stor en del af fosforen der vaskes ud ved syrevaskningen, bør der laves en ICP måling på den syrevaskede aske.

## 4.4 Trykstyrke

Alle trykstyrker for mørtelprøverne er fundet iht. DS/EN 196-1, dog med de afvigelser beskrevet i afsnit 3.2.16, og udregninger samt rådata herfra fremgår af bilag 5.

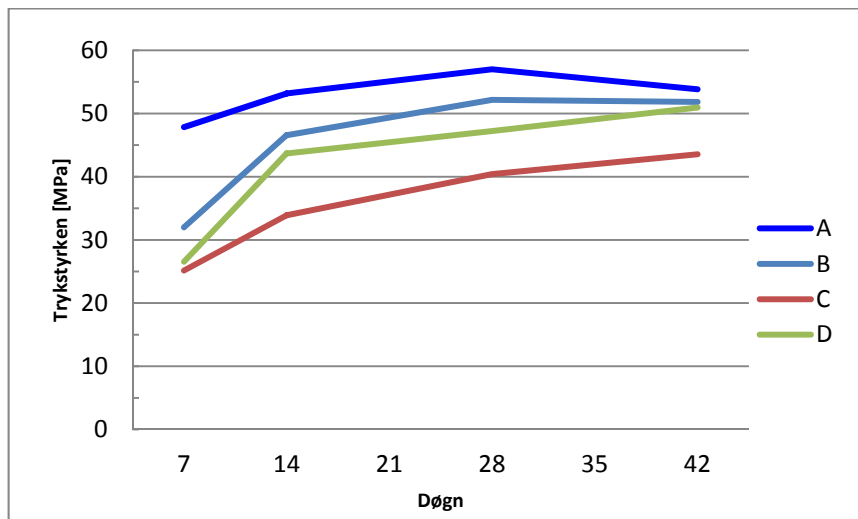
### 4.4.1 Screening

Oprindeligt startede alle fem grupper med at støbe 3 individuelle mørtelprøver baseret på den for gruppen tildelte aske samt en fælles referenceprøve. Se tabel 3-2 i afsnit 3.2.15. De indledende prøver, kaldet screeningsforsøgene, skulle derfor danne grundlag for det fremtidige arbejde, og hvorledes hver gruppe har villet gribe problemstillingen, slamaske i beton, an.



Figur 4:3 Trykstyrken samt spredningen for denne angivet for screeningsprøver efter 7 døgn.

Af ovenstående figur 4:3 fremgår det, at styrken for mørtelprøverne med aske ikke er i nærheden af styrken for referencen. C og D opnår kun en styrke på lige over 50 % af referencen, mens den for B prøven ligger på ca. 66 %. Dog fremgår det for styrken over 42 døgn, som ses på figuren herunder, at denne udvikles markant mellem 7 og 14 døgn for B og D, og på dette tidspunkt ligger på mellem 82 og 87 % af styrken for referencen. Overraskende er det, at B-prøven har en højere trykstyrke end D, på trods af at D indeholder samme mængde cement som referencen. Stigningen i styrken efter 14 døgn er for alle prøver næsten parallelle og udvikles derfor ens.



Figur 4:4 Styrkeudvikling over 42 døgn for screeningsprøverne.

Som det fremgår af figur 4:4 falder styrken for referenceprøven mellem 28 døgn og 42 døgn. Dette kan skyldes enten en høj værdi for 28 døgn eller en lav værdi for 42-døgns prøverne. Referenceprøverne bestod af i alt 13x3 mørtelprøver, hvoraf de 4x3 er støbt og trykket af (Rosenmai & Svendsen, 2012). Det skal desuden også oplyses, at trykprøvningen for de ovenstående prøver er foregået for 7, 14, 28 og 42 døgn. Grundet den begrænsede tid for denne rapport og forsøgene herom er de resterende prøver, mørtelprøver med syrevasket og knust LSA, støbt og trykprøvet for 7, 14 og 28 døgn.

På billede 4-10 herunder ses de støbte mørtelprøver med den ubehandlede slamaske samt referencen. Farveforskellen er svær at fange på billedet, men det kan svagt anes hvordan prøverne bliver mere rødlige med mængden af slamasken der er iblandet.



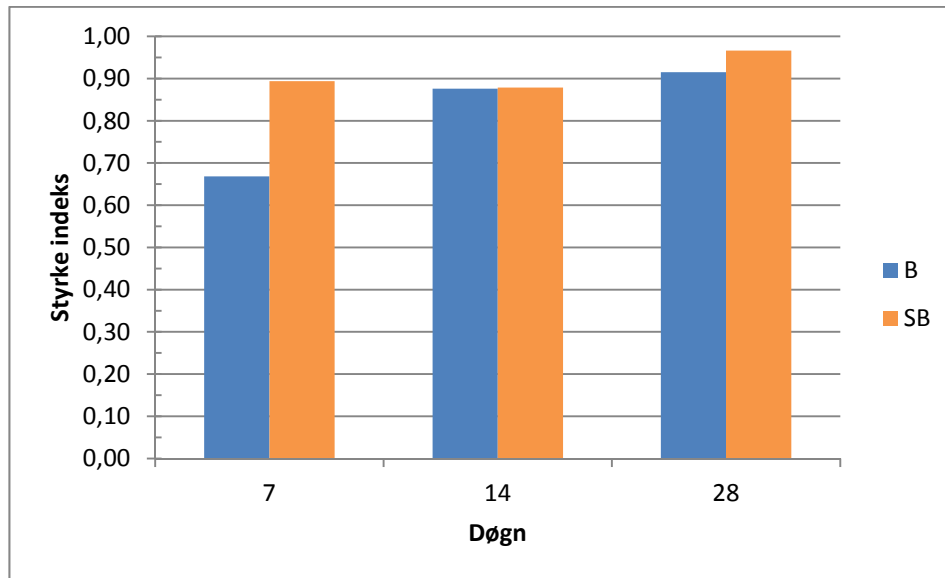
Billede 4-10 Mørtelprøverne støbt med ubehandlet aske samt reference

#### 4.4.2 Syrevask

Trykprøvningsresultaterne for mørtelprøverne støbt med syrevasket aske sammenlignes i de følgende figurer med samme type mørtelprøve støbt med ubehandlet aske samt referenceprøven. Referenceprøvens trykstyrke (styrke indeks = 1,00) var efter 7 døgn 47,85 MPa, efter 14 døgn 53,16 MPa og efter 28 døgn 57,00 MPa.

#### 4.4.2.1 B-prøver

B-prøver hvor 10 % cement er erstattet med LSA.

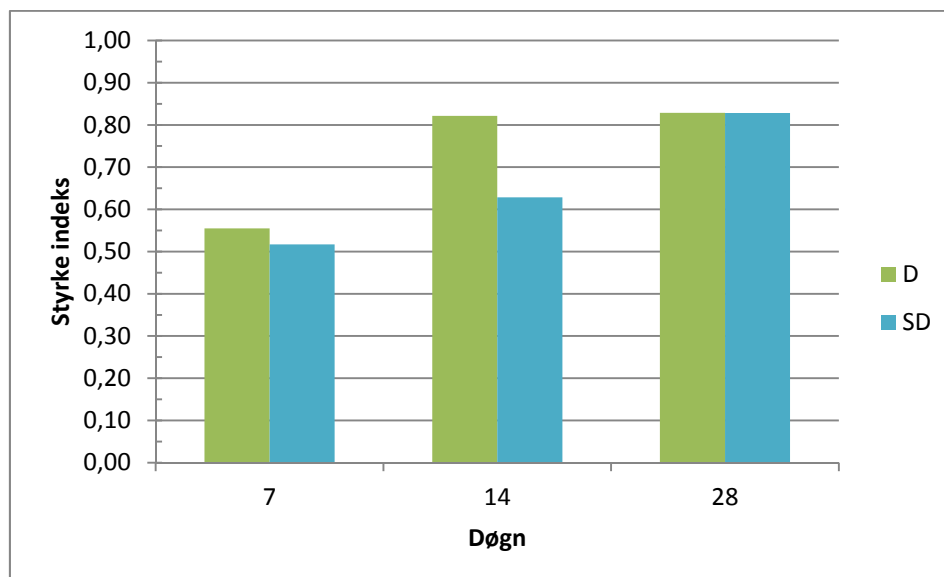


Figur 4:5 B-prøver støbt med ubehandlet (B) og syrevasket (SB) slamaske ift. reference

Af figur 4:5 fremgår det, at syrevaskningen har medvirket til en øget trykstyrke for den syrevaskede aske ift. den ubehandlede aske. Især efter 7 døgn er forskellen mellem B og SB markant med mere end 20 %, hvor den ved 28 døgn er faldet til 6 %, og ved 14 døgn er SB kun marginalt bedre. Efter 7 og 14 døgn opnåede SB en trykstyrke på henholdsvis 89 og 88 % af referencen, hvorefter den slutter på hele 97 % efter 28 døgn.

#### 4.4.2.2 D-prøver

D-prøver hvor 10 % af tilslagsmaterialet er erstattet med LSA.



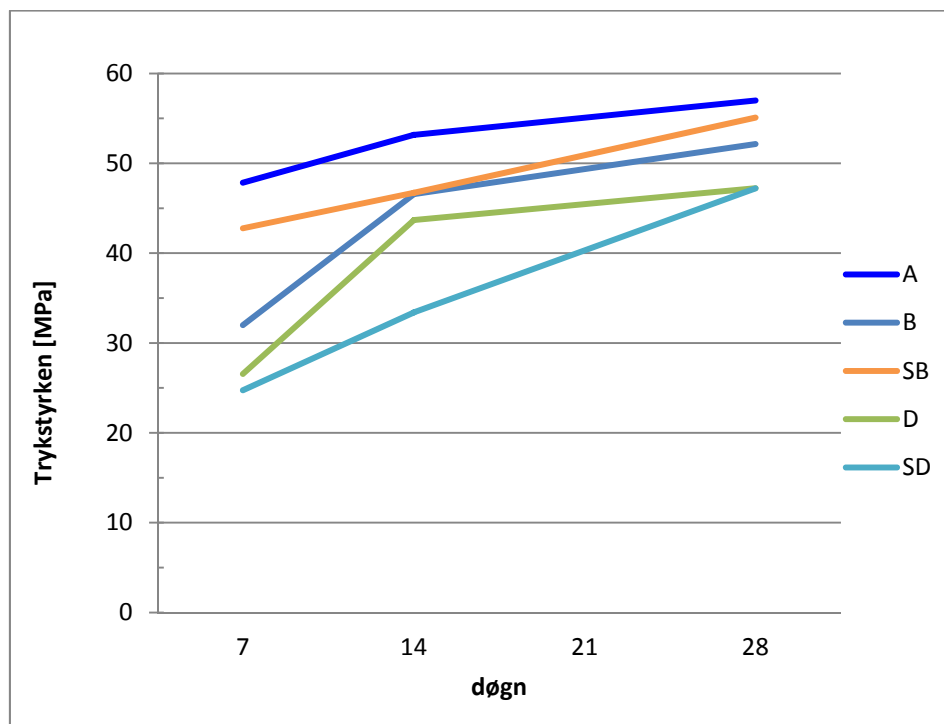
Figur 4:6 D-prøver støbt med ubehandlet (D) og syrevasket (SD) slamaske ift. reference

Af figur 4:6 ses det, at samlet set har syrevaskningen ikke haft samme effekt på D- og B-prøverne. Både D og SD har efter 28 døgn opnået 83 % af referencestykken, men for 7 og 14 døgn er SD svagere end den



ubehandlede aske. Både D og SD har kun cirka halvt så meget styrke som referencen efter 7 døgn, 55 og 52 %, hvorimod forskellen imellem D og SD ved 14 døgn er 19 % med fordel til den ubehandlede aske.

#### 4.4.2.3 Styrkeudvikling



Figur 4:7 Styrkeudvikling over 28 døgn for prøver støbt med ubehandlet slamaske (B & D), syrevasket slamaske (SB & SD) samt referencen (A)

Af figur 4:7, hvor styrkeudviklingen af både B, SB, D og SD samt referencen vises, fremgår, at for både SB og SD stiger styrken mellem 7 og 28 døgn næsten fuldkommen lineært. Sammenlignes dette med både referencen og begge prøver med ubehandlet aske, kunne det tyde på, at den syrevaskede aske har en mere jævn styrkeudvikling. Siden der ikke er foretaget trykprøvninger for SB og SD efter 42 døgn, vides det derfor ikke, hvornår denne udvikling i styrke aftager.

#### 4.4.2.4 Densitet

Tabel 4-10 Beregnede densiteter for syrevasket aske ift. referencen og samme prøve med ubehandlet aske

Prøve	Middel densitet	% i forhold til A	Prøve	Middel densitet	% i forhold til A
	[kg/m <sup>3</sup> ]			[kg/m <sup>3</sup> ]	
A	2241,01	100,00 %	A	2241,01	100,00 %
B	2223,48	99,22 %	D	2168,91	96,78 %
SB	2232,34	99,61 %	SD	2175,70	97,09 %

Tabel 4-10 viser, at både for SB og SD har syrevasken medført en marginalt højere densitet end for den samme prøve støbt med ubehandlet aske. Dette kan skyldes, at som beskrevet i afsnit 3.2.9 syrevask måtte den syrevaskede aske knuses med morter efter tørring grundet gipsdannelsen, og kornstørrelsen kan være

blevet reduceret. Det fremgår også af tabellen, at for D-prøverne, hvor 10 % tilslag erstattes med slamaske, er densiteten konsekvent lavere end for B-prøverne, hvor cement er erstattet med aske. Dette er formentlig pga. at slamaskens struktur stadig er grovkornet, uregelmæssig og porøs ift. kulflyveaske og cement (Spildevandscenter Avedøre, Unicon og Lynettefællesskabet I/S, 2007).

Af billede 4-11 herunder ses farveforskellen mellem prøverne med syrevasket aske og den for referencen. Prøverne med syrevasket aske fremstår mørkere end referencen og den rødlige farve i prøverne SB og SD fremstår nærmest tydeligere end dem støbt med ubehandlet aske, billede 4-10, på trods af at syrevaskningen har efterladt asken mindre rød, billede 4-7.



Billede 4-11 Mørtelprøver støbt med syrevasket aske samt referencen

### 4.4.3 Knusning

#### 4.4.3.1 Vandbehov

Allerede ved støbningerne viste knusningen at gøre en forskel fra den ubehandlede aske. Af nedenstående skema fremgår det gennemsnitlige tilsatte vand for udvalgte prøver samt referencen.

Tabel 4-11 Tilsat vand i mørtelprøver

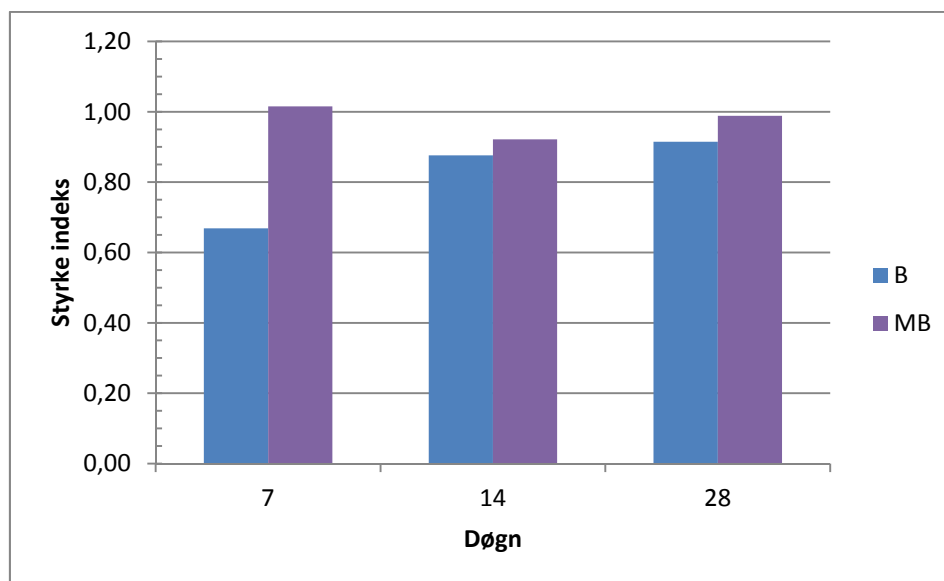
Prøve	Tilsat vand	Cement	v/c - forhold
	[g]	[g]	[g/g]
A	225,00	450,00	0,50
B	240,98	405,00	0,60
MB	225,00	405,00	0,56
D	290,34	450,00	0,65
MD	237,19	450,00	0,53

Tabel 4-11 viser foruden tilsat vand, v/c-forholdet, der har indvirkning på prøvernes trykstyrke. Her er det igen vigtigt at pointere, at ekstra vand er tilsat på øjemål for at opnå en ønsket konsistens som for referencen. Grundet det meget lille vandindhold i asken var behovet for ekstra vand relativt stort for prøverne støbt med

den ubehandlede aske. For B og MB ses det af tabellen, at for en MB prøve har det ikke været nødvendigt at tilsætte yderligere vand end det for referencen, da vandbehovet er sænket med ca. 7 % for MB ift. B. Denne reduktion kunne godt være større, da det blev bemærket, at MB støbningerne var lidt ”våde” på trods af, at kun vandet for en reference var iblandet. D-prøverne, som havde det største vandbehov for de ubehandlede prøver, fik reduceret det totale tilsatte vand med 18 %. For prøverne MB og MD ses også, at v/c-forholdet på baggrund af dette næsten er af samme størrelse som referenceprøven. Det skal nævnes, at der for de syrevaskede prøver SB og SD ikke var nogen væsentlig forskel på vandbehovet.

Trykstyrken for mørtelprøverne støbt med knust aske sammenlignes ligeledes, som for de syrevaskede, med samme type prøve B eller D og referencen = 1,00 på styrkeindekset.

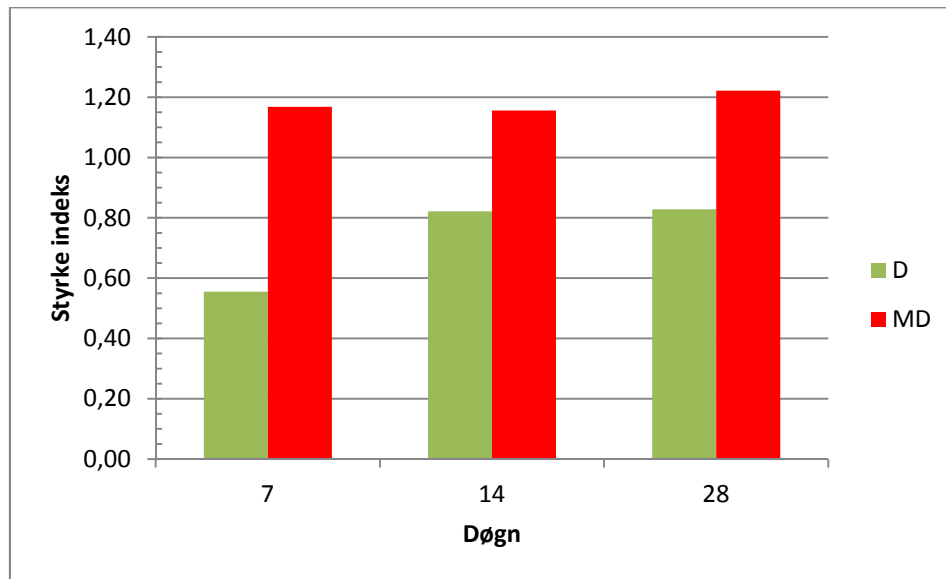
#### 4.4.3.2 B-prøver



Figur 4:8 B-prøver støbt med ubehandlet (B) og knust (MB) slammaske ift. reference

Figur 4:8 indikerer, at knusningen generelt har en positiv effekt på styrken af mørtelprøverne. Efter 7 døgn er B-prøven 35 % lavere i styrke end MB, der med 102 % af referencestykken giver første indikation på, at dette kan give trykstyrker, der er højere end referencen. Efter 14 og 28 døgn er styrken for MB faldet til henholdsvis 92 og 99 % af referencen.

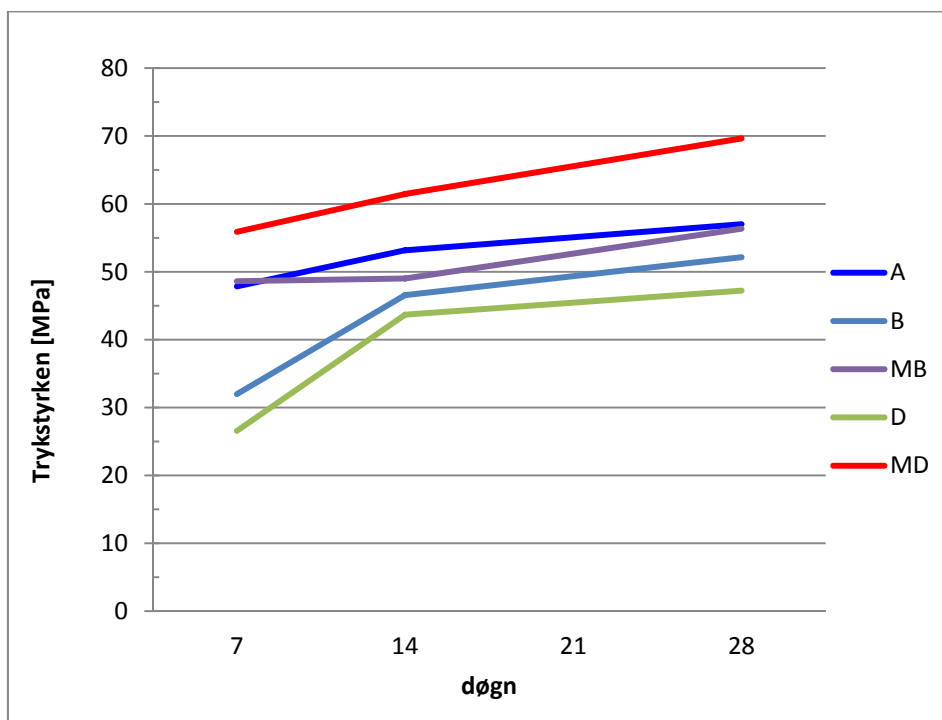
#### 4.4.3.3 D-prøver



Figur 4:9 D-prøver støbt med ubehandlet (D) og knust (MB) slamaske ift. reference

Af figur 4:9 fremgår det, at for mørtelprøverne forbedres styrken væsentligt, hvis en del af tilslaget erstattes med knust aske. Efter bare 7 døgn har MD mere end dobbelt så høj styrke som D. Denne forskel mindsker dog lidt, og efter 14 og 28 dage er forskellen henholdsvis 34 og 39 %. Af figuren ses det, at trykstyrkerne for MD efter 7, 14 og 28 døgn opnår hele 117, 116 og 122 % af referencestykken.

#### 4.4.3.4 Styrkeudvikling



Figur 4:10 Styrkeudvikling over 28 døg for prøver støbt med ubehandlet slamaske (B & D), knust slamaske (MB & MD) samt reference (A)

Af figur 4:10, hvor styrkeudviklingen af både B, MB, D og MD samt referencen vises, fremgår, at både MB og MD har en højere trykstyrke end referencen efter 7 døg. Herefter ”knækker” udviklingen for MB og er ved 14 døg en anelse svagere end referencen hvorefter den som tidligere nævnt opnår en styrke på 99 % af referencens. MD har som de syrevaskede prøver en næsten lineær udvikling i styrke mellem 7 og 28 døg, og giver derfor ingen indikation på at denne udvikling er ved at flade ud. Som beskrevet ved figur 4:4 er referencens styrke for 42 døg lavere end den for 28 døg. Dette kan derfor betyde at MD efter 42 døg, såfremt denne var støbt, havde vist højere forbedring ift. referencen ligeledes efter 42 døg.

#### 4.4.3.5 Densitet

Tabel 4-12 Beregnede densiteter for prøver støbt med ubehandlet slamaske (B & D), knust slamaske (MB & MD) ift. referencen

Prøve	Middel densitet	% i forhold til A	Prøve	Middel densitet	% i forhold til A
	[kg/m <sup>3</sup> ]			[kg/m <sup>3</sup> ]	
A	2241,01	100,00 %	A	2241,01	100,00 %
B	2223,48	99,22 %	D	2168,91	96,78 %
MB	2262,17	100,94 %	MD	2266,76	101,15 %

Tabel 4-12 viser, at knusningen medfører højere densitet end for samme prøve med ubehandlet aske. Knusningen af det porøse aske har altså efterladt dette så finkornet, hvilket kan ses i afsnit 4.2.2, at iblandingen medfører en tættere prøve, endda med en højere densitet end referencen. Bemærkelsesværdigt er

det, at MD-prøven har den højeste densitet, da både D og SD har været lavere end en almindelig B-prøve. Knusningen medfører, at asken har et væsentligt større overfladeareal, hvorfor mørtlen og prøverne er betydeligt mere røde. Dette kan for nogle anses som et problem, da man er bange for den psykologiske opfattelse af rød beton som værende svagere eller evt. fyldt med skadelige affaldsstoffer.

Af billede 4-12 herunder, ses det hvordan knusningen, og det større overfladeareal af slamasken, medfører en rødere mørtel end, foruden referencen, prøverne støbt med ubehandlet og syrevasket aske, billede 4-10 og 4-11.



Billede 4-12 Mørtelprøver støbt med knust aske samt referencen

#### 4.4.3.6 Videre forskning

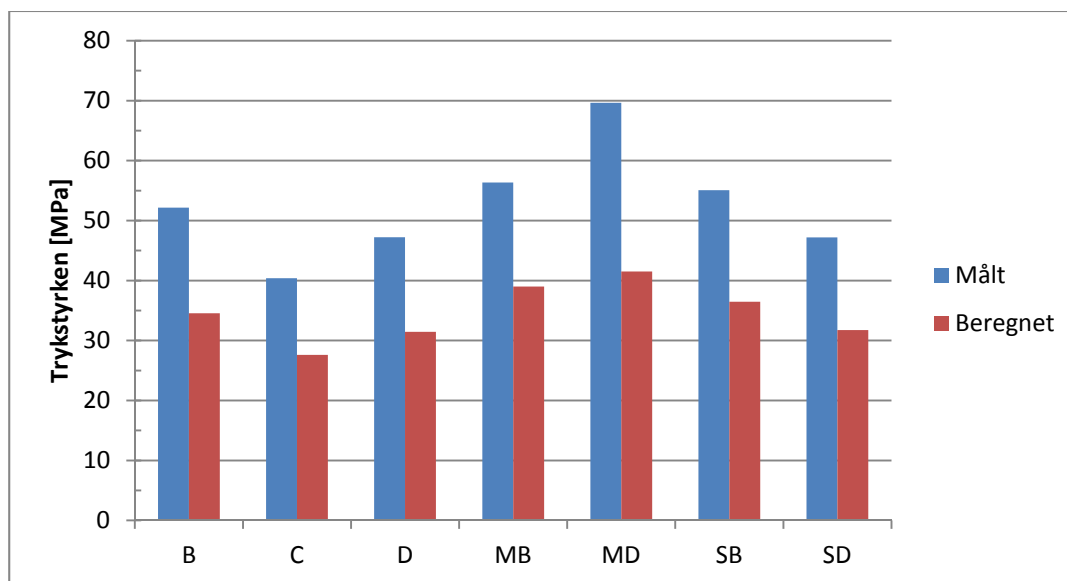
Det har vist sig, at den knuste slamaske sænker vandbehovet. Ved tilsætning af den knuste aske som erstatning for tilslaget viste det sig, at der ikke skulle tilføres ekstra vand i forhold til referencen. Den var tværtimod lidt ”våd”, og vandmængden kunne måske have været reduceret yderligere. Det kan derfor tyde på, at asken har egenskaber som et plastificerende stof. Dette bør undersøges nærmere.

Som tidligere nævnt har farvepåvirkningen af slamasken, været en af de væsentlige problemstillinger. I forbindelse med mørtelstøbningerne i nærværende rapport, er det også bemærket at den rødlige farve er meget markant inden afbindingen af mørtlen påbegyndes. Dog falmer denne rødlige farve markant over en periode på bare en måned, og anvendelsesmulighederne

#### 4.5 Bolomeys formel

Trykstyrken for prøverne med aske såvel som for referencen ønskes også bestemt ved beregning og efterfølgende sammenholdt med de fra forsøgene målte trykstyrker. Med dette vil det også være muligt at se askens indvirkning på styrken for betonen ud fra beregninger.

Først sammenlignes målte trykstyrker med trykstyrken beregnet for hver individuel prøve udelukkende på baggrund af v/c-forholdet og en faktor for cementen, som det er angivet af Bolomeys formel, afsnit 2.1.3.2. Nedenstående figur er baseret på målte trykstyrker for 28 døgns prøverne samt den ud fra Bolomeys formel beregnede styrke baseret på v/c-forholdet. Cementen brugt i mørtelstøbningen er Basis Cement, og konstanter til brug i Bolomeys formel fremgår af tabel 2-1 og også fra afsnit 2.1.3.2 Bolomeys formel.



Figur 4:11 Trykstyrken efter 28 døgn, målt og beregnet

Af ovenstående figur 4:11 ses det tydeligt, at den målte værdi for alle prøverne er højere end for den beregnede. Dette kan enten betyde, at slamasken har puzzolanske egenskaber og derfor bør medregnes i Bolomeys formel som et ækvivalent v/c-forhold, eller at den beregnede trykstyrke konsekvent bestemmes til en mindre trykstyrke, end den egentlige brudstyrke for hovedparten af prøverne. Sidstnævnte kendes også fra den almindelige karakteristiske betonstyrke, der bestemmes ud fra 5 % fraktilen. Dette kunne godt være tilfældet, da de beregnede trykstyrker følger størrelsen for de målte trykstyrker, bare en faktor lavere.

I det følgende undersøges det på baggrund af Bolomeys formel, om det kan konkluderes, at slamasken kan have puzzolanske egenskaber.

Beregninger med Bolomeys formel er angivet at gælde for beton med et luftindhold på 1,5-2 %, samt et v/c-forhold mellem 0,45 og 1,25. Trykprøvningen er som nævnt foretaget på mørtelprøver og ikke betonprøver. Dette menes dog ikke at have en væsentlig betydning for styrken, da en betonprøve ikke revner gennem stenene, men bliver brudt i bindingerne mellem den finere del af tilslagsmaterialet og bindemidlet – cementen. Alle mørtelprøver opfylder kravet for v/c-forhold, og luftindholdet skønnes overholdt.

Inden prøverne med slamaske kan beregnes, kigges først nærmere på faktorerne indeholdt i Bolomeys formel. Dette gøres ved at beregne styrken for en referencemørtel og dernæst sammenholde denne med den målte trykstyrke.

Beregnes trykstyrken for en referencemørtel – A efter 28 døgn, fås følgende:

$$f_{c,A28} = 30 \text{ MPa} \cdot \left( \frac{1}{\frac{225 \text{ g}}{450 \text{ g}}} - 0,5 \right) = 45 \text{ MPa}$$

Den beregnede trykstyrke er mere end 20 % lavere end den målte trykstyrke for en 28 døgns referenceprøve, 57 MPa – fremgår af bilag 5. Grundet denne store afvigelse og det faktum, at  $\alpha$  er en konstant, der afhænger af cementtypen og terminen – to faktorer der ikke kan ændres ved, beregnes en ny K faktor for cementen, der skal muliggøre mere præcise beregninger, og som er baseret på data for mørtelprøver og ikke betonprøver. K faktoren regnes hernæst for 7, 14 og 28 døgn og bestemmes ud fra de målte trykstyrker for referencen, v/c-forholdet og  $\alpha$ , der interpoleres for  $\alpha$  ved 14 døgn.

$$K_7 = \frac{47,85 \text{ MPa}}{\frac{1}{\frac{225 \text{ g}}{450 \text{ g}}} - \alpha_7} = 34,18 \text{ MPa} \quad \text{hvor} \quad \alpha_7 = 0,6$$

$$K_{14} = \frac{53,16 \text{ MPa}}{\frac{1}{\frac{225 \text{ g}}{450 \text{ g}}} - \alpha_{14}} = 37,10 \text{ MPa} \quad \text{hvor} \quad \alpha_{14} = 0,567$$

$$K_{28} = \frac{57,00 \text{ MPa}}{\frac{1}{\frac{225 \text{ g}}{450 \text{ g}}} - \alpha_{28}} = 38,00 \text{ MPa} \quad \text{hvor} \quad \alpha_{28} = 0,5$$

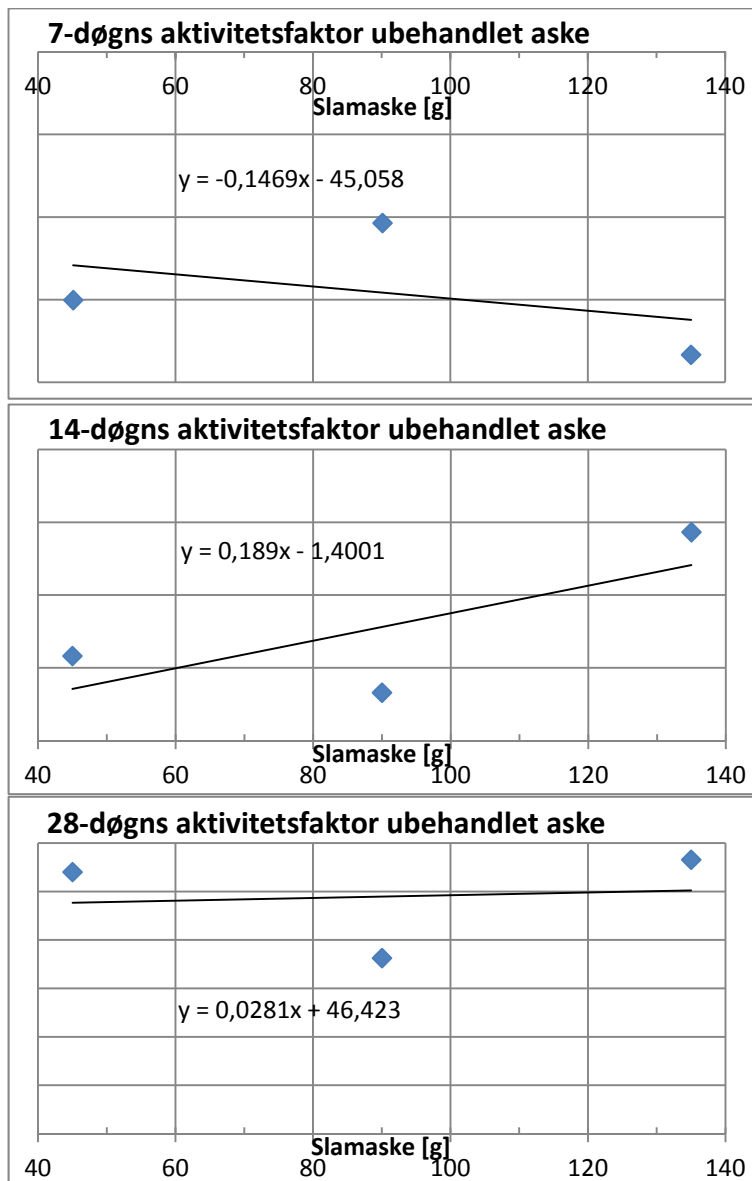
Ovenstående K-faktorer bruges herefter i de næste beregninger for henholdsvis 7, 14 og 28 dage. Forsøges aktivitetsfaktoren nu beregnet for hver enkelt prøve som en ligning med en ubekendt, fås alt fra en negativ værdi til, at slamaske skulle være tre gange bedre for styrken end cement. I stedet for dette forsøges ligningen plottet som punkter og som en funktion af mængden af slamaske. Herefter indsættes en tendenslinje, og hældningen for denne kan beskrives som aktivitetsfaktoren for asken. Nedenfor ses, hvorledes Bolomeys formel kan omskrives, og udtrykket på venstre side af lighedstegnet er y-værdien for plottet, hvor mængden af aske,  $p$ , er x-værdien, og hvor aktivitetsfaktoren,  $k$ , bliver hældningen på tendenslinjen.

$$\left( \frac{f_c}{K} + 0,5 \right) \cdot v - c = k \cdot p \quad (4)$$



### 4.5.1 Ubehandlet aske

Herunder ses plottet for den ubehandlede aske, prøverne B, C og D for 7, 14 og 28 døgn.



Figur 4:12 Plot af Bolomeys formel for den ubehandlede aske for 7, 14 og 28 døgn

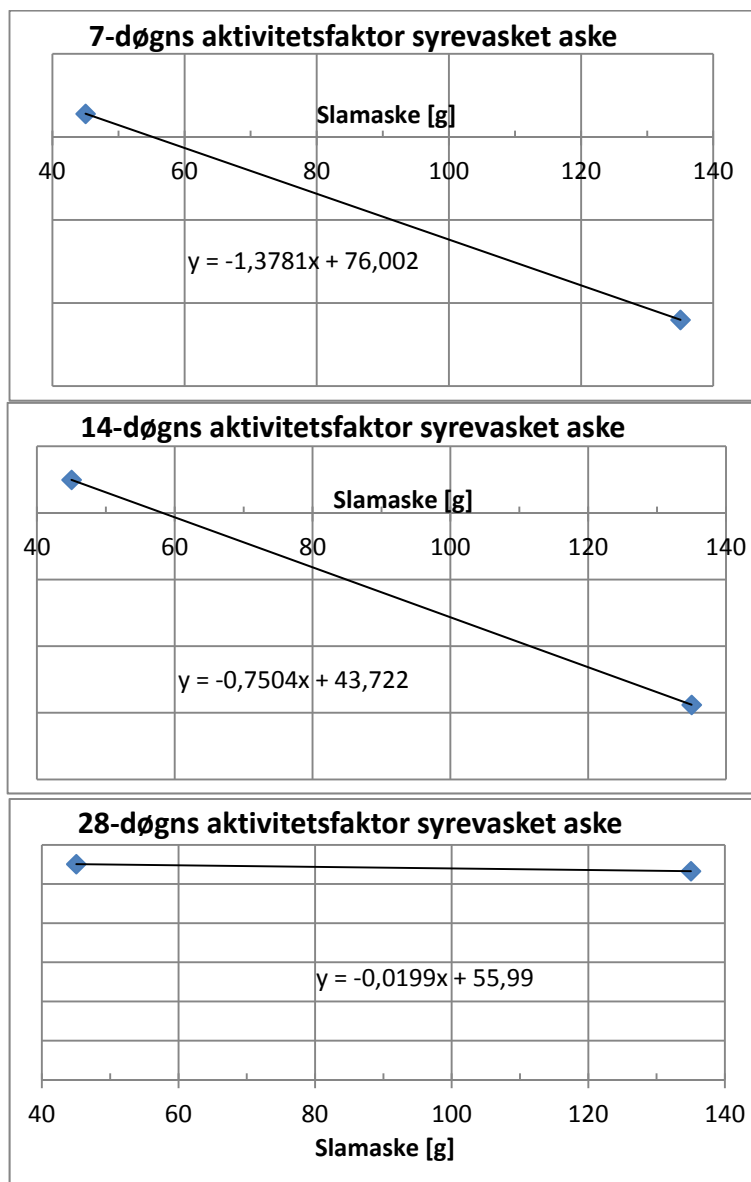
Af figur 4:12 fremgår det, at der ikke umiddelbart kan ses nogle tendenser for aktivitetsfaktoren for den ubehandlede aske. Hældningstallet for tendenslinjerne svinger fra ca. -0,15 for 7-døgns prøverne til +0,19 for 28-døgns prøverne, hvor værdien for 14-døgns prøverne ligger næsten præcis midt imellem. Grundet disse varierende resultater kan det ud fra Bolomeys formel ikke konkluderes, at den ubehandlede aske har puzzolanske egenskaber, dog kan det samtidig ikke bevises, at materialet på ingen måder kan vise en mindre puzzolansk effekt.

Da der kun er støbt to forskellige prøver med den syrevaskede og den knuste aske, vil det derfor ikke være svært at indtegne den rette linje mellem disse to punkter. Dette betyder, at man ud over hældningstallet for linjen ikke på samme måde kan holde øje med afvigelser, uregelmæssigheder eller tendenser, såsom f.eks. at for den ubehandlede prøve ligger punktet for C-prøverne (det midterste ved  $p = 90$ g) konsekvent tættest på x-

aksen og derfor også værdien 0. Dette kunne eventuelt betyde, at skal der støbes med slamaske, er grænsen for mængden af cement, der kan erstattes, overskredet ved de 20 %.

#### 4.5.2 Syrevasket aske

Ud fra prøverne SB og SD er nedenunder plottet for den syrevaskede aske ligeledes over 7, 14 og 28 døgn.



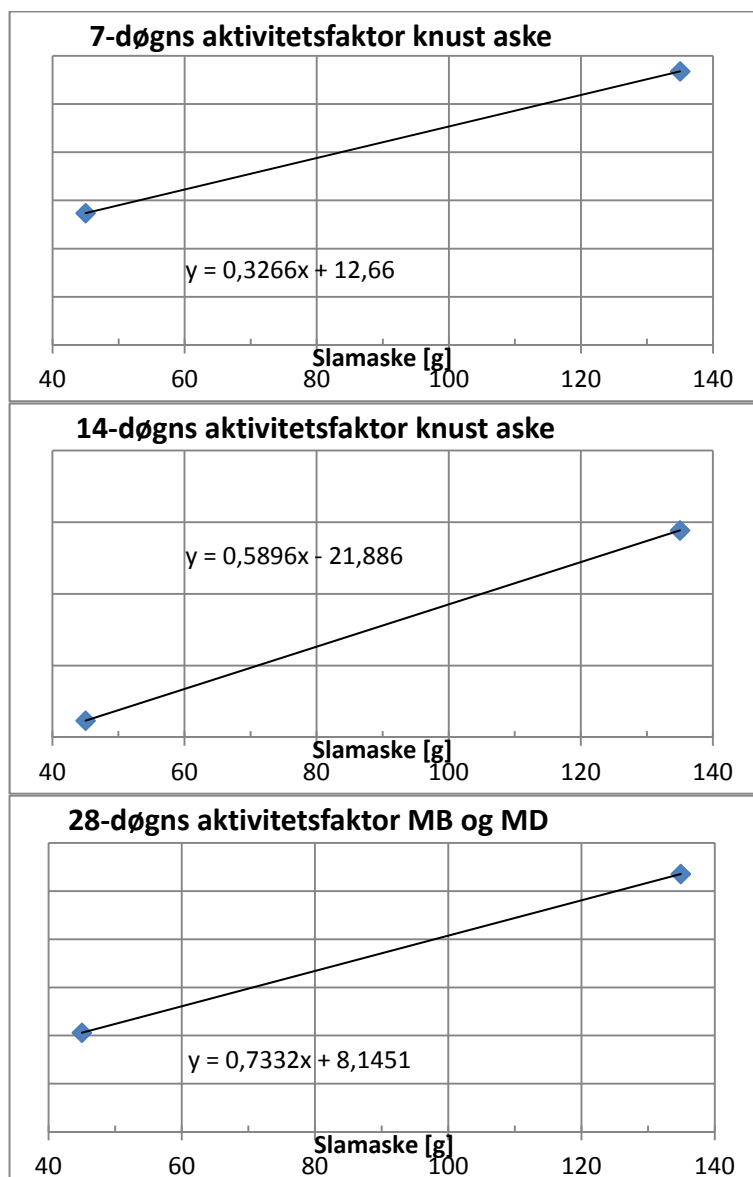
Figur 4:13 Plot af Bolomeys formel for den syrevaskede aske for 7, 14 og 28 døgn

Af figur 4:13 ses det, at hældningstallet og derfor også aktivitetsfaktoren for den syrevaskede aske er negativ for alle tre terminer, dog af varierende størrelser. Grunden til, at den for 7 døgn har den maksimale negative værdi, hvorefter denne går mod 0 for 14 og 28 døgn, skal findes ved, at forskellen mellem B og SB kontra D og SD er størst ved 7 døgn, hvorefter forskellen i trykstyrke for den ubehandlede og den syrevaskede bliver mindre. På baggrund af ovenstående og Bolomeys formel må det derfor konkluderes, at den syrevaskede aske har meget få, hvis overhovedet nogen puzzolanske egenskaber. Ses til gengæld tilbage på figur 4:7 i afsnit 4.4.2.3, der viser den jævne og konstante styrkeudvikling for den syrevaskede aske, kan det ikke afvises, at en eventuel 42-døgns prøve ville have afsløret en højere trykstyrke, for den syrevaskede end for

den ubehandlede aske. Det kan derfor tænkes, at den syrevaskede aske påvirker hastigheden for prøvernes styrkeudvikling.

### 4.5.3 Knust aske

Som for den ubehandlede og den syrevaskede plottes ligeledes for den knuste aske over 7, 14 og 28 døgn. Resultaterne er baseret på prøver MB og MD og ses herunder.



Figur 4:14 Plot af Bolomeys formel for den knuste aske for 7, 14 og 28 døgn

Den knuste aske viste for trykresultaterne, at denne er i stand til ikke bare at erstatte noget cement, men også bidrage positivt i betonblandingen. Af figur 4:14 ses, hvorledes alle grafer giver et tilfredsstillende resultat i form af gennemgående positive hældningstal med en begrænset variation. Aktivitetsfaktorerne ligger for 7, 14 og 28 døgn på henholdsvis 0,33, 0,59 og 0,73, hvilket ift. kulflyveaske og mikrosilica, hvis aktivitetsfaktorer ligger mellem 0,3 og 0,5 og 3 og 5, virker plausibelt. Her er det vigtigt at huske på, at for alle prøver er asken erstattet en til en ift. vægt. Skulle en ny prøve støbes, hvor f.eks. 10 % cement eller mere

erstattes med knust aske, skulle der tilsættes minimum tre gange så meget aske som cement, der erstattes med for at opnå minimum samme styrke som en reference.

#### 4.5.4 Videre forskning

Der er for den ubehandlede, syrevaskede og knuste slamaske undersøgt, om Bolomeys formel kan anvendes. Der er beregnet aktivitetsfaktorer og  $K_{\text{mørtel}}$  for de forskellige asketyper, og det kunne derfor være interessant at undersøge, om dette også gælder for betonstøbninger.

### 4.6 Øvrig videre forskning

#### 4.6.1 Betonstøbning

I nærværende projekt er der støbt mørtelprøver, og disse er blevet tryktestet. Det kunne være interessant at undersøge, hvorvidt de i denne rapport fundne resultater også gælder ved iblanding af slamaske i beton.

#### 4.6.2 Psykologisk effekt af rød beton – anvendelsesområder

Der er tidligere blevet støbt beton med slamaske, men dette blev stoppet, da det høje jernindhold farvede betonen rød. Det bør undersøges, til hvilke formål denne røde farve ikke har nogen betydning. Der bør være en del anvendelsesområder, hvor betons farve ikke har indflydelse som f. eks. renselag og beton til fundamenter.

#### 4.6.3 Slamasken ensartethed over tid

Af tidligere forskning beskrevet i afsnit 2.3.1 fremgår det at analyser på slamasken fra Lynetten er foretaget over et fuldt produktionsår, for at karakteriseringen af asken kan fastlås til at være konsistent. Dog er der fundet afvigelser i nærværende rapport ift. ovennævnte tidligere forskning, bl.a. kloridindholdet og glødetabet, og der bør derfor tages stilling til slamaskens ensartethed.

## 5 Konklusion

På trods af at tidligere forskning har vist, at indholdet af klorid for slamaske fra Lynetten er overskredet iht. DS/EN 450-1, har IC målingen ved oplukning vist, at for slamasken undersøgt i nærværende rapport, er dette ikke i overensstemmelse. Kloridindholdet for den undersøgte slamaske, også fra Lynetten, er ca. en tiendedel af maksimumgrænsen iht. netop DS/EN 450-1.

Ved ICP måling, ved oplukning, blev koncentrationen af tungmetaller bestemt. Ift. miljøstyrelsens bekendtgørelse omkring brug af restprodukter i bygge- og anlægsarbejder viste det sig, at den ubehandlede slamaske befinder sig i kategori 2, der betyder, at anvendelsen af slamasken er begrænset. Udvaskningstest af mørtelprøver støbt med slamaske viste dog, at koncentrationerne af tungmetaller var tilpas lave for at placere mørtelprøverne i kategori 1. Hvilket vil sige, at fra at være et farligt restprodukt med begrænsede anvendelsesmuligheder er asken nu en del af et ikke farligt, anvendeligt restprodukt.

pH-værdien for slamasken blev målt til 12,5 stærkt basisk, hvilket ledte til spekulationer om, at en sænkning af denne medførte højere trykstyrker for mørtelprøver. pH-værdien blev sænket ved at syrevaske slamasken med 0,75 M svovlsyre og blev efterfølgende bestemt til 3,5.

Askens struktur blev undersøgt ved SEM. Af billederne herfra blev det vurderet, at askens struktur er markant grovere og mere porøs end den for kulflyveaske. Kulflyveaskens struktur er samtidig mere ensartet i størrelse og form, hvilket forsøges efterlignet med knusning. Den knuste slamaske blev ligeledes undersøgt ved SEM, og det fremgik heraf, at de porøse partikler nu var knust til en kornstørrelse og ensartethed som minder om kulflyveaskens.

Indledende screeningsprøver støbt med ubehandlet aske viste, at B og D med henholdsvis 66 og 55 % af styrken for en reference var de mest interessante at arbejde videre med. Derfor blev prøver med syrevasket og knust aske støbt efter recepten for en B- og D-prøve.

SB viste for 7, 14 og 28 døgn, at syrevaskningen medførte en marginal forbedring ift. B. Efter 28 døgn sluttede trykstyrken på 97 % af referencen. For SD var den opnåede trykstyrke dog lavere end D for 7 og 14 døgn, men opnår efter 28 døgn samme styrke for D, 83 % af referencestyren. Syrevaskningen ændrer styrkeudviklingen fra at være aftagende til lineær, hvilket indikerer, at styrken for SB og SD forsætter med at udvikles efter 28 døgn.

Knusningen giver en markant forbedring af trykstyrken efter 7 døgn. MB er ift. B 35 % stærkere, og MD er hele 52 % stærkere end D. MB er ved 7 døgn 102 % og ved 14 og 28 døgn 92 og 99 % af referencen. MD viste en væsentlig forbedring med 117, 116 og 122 % af referencestyren for henholdsvis 7, 14 og 28 døgn. Knusningen af slamasken medførte desuden et reduceret vandbehov for mørtelprøverne, og det totale tilsatte vand var for MB og MD henholdsvis 7 og 18 % mindre end B og D.

På baggrund af plotning af Bolomeys formel kan det hverken konkluderes, om den ubehandlede aske har puzzolanske egenskaber eller ej. Såfremt den syrevaskede aske har puzzolanske egenskaber, vil disse være meget lave. Det kan dog konkluderes at den knuste aske, ud fra Bolomeys formel, har puzzolanske egenskaber med en aktivitetsfaktor mellem 0,3 og 0,7.

Inden mørtelprøverne med slamaske er afbundet, har disse et tydeligt rødligt skær, og for støbninger med knust aske kan de næsten beskrives som rødbrune. Farveforskellen mellem prøverne med slamaske og den for en reference ses dog tydeligt mindsket over tid, hvorfor det vurderes, at den negative psykologiske effekt ikke vil være betydelig efter en periode på blot et par måneder.

## 6 Videre forskning

Herunder er ideer til videre forskning fra nærværende rapport opsamlet og opstillet i punktform.

- ICP forsøg for at undersøge, hvilke stoffer der fjernes ved syrevask, bl.a. fosfor.
- En række forskellige syrevasker for at undersøge, hvilke syrer der er bedst egnet til syrevask.
- Porøsitets- og kapillarsugningsforsøg med en udtørringstemperatur der er maks. 65°C for at undgå grove porer.
- Kapillarsugningsforsøg med en længere måleperiode for at finde ud af, hvornår prøverne ikke suger mere vand (vandret asymptote).
- Undersøgelser af slammaske iblandet betons påvirkning på armering.
- Undersøgelse af den knuste slammaskes evne til at sænke vandbehovet (plastificering).
- Støbning af betonprøver med slammaske for at undersøge, hvordan disse reagerer i forhold til mørtelprøver. Bl.a. en undersøgelse af de beregnede aktivitetsfaktorer.
- Undersøgelse af de psykologiske begrænsninger, den røde farve giver. Hvor den røde slammaskebeton kan anvendes.
- Undersøgelse om slammaskens egenskaber er konsistente over en længere periode.

## 7 Referencer

- Bygningsingeniørernes materialer - uddrag af Materialebogen.* (2008). København: Nyt Teknisk Forlag.
- Bekendtgørelse.* (2012). Hentede Januar 2013 fra Retsinformation adm. af Miljøstyrelsen: [www.retsinformation.dk/forms/r0710.aspx?id=134831](http://www.retsinformation.dk/forms/r0710.aspx?id=134831)
- Renseprocessen.* (2012). Hentede December 2012 fra Lynettefællesskabet I/S: <http://www.lynis.dk/Bes%C3%B8gscenter/Renseprocessen.aspx>
- Slamaske som brændsel.* (2012). Hentede December 2012 fra Kommunekemi: <http://www.kommunekemi.dk/da-DK/innovation/Innovationsprojekter/Slam-som-br%C3%A6ndsel.aspx>
- Slambehandling.* (2012). Hentede 13. December 2012 fra Lynettefællesskabet I/S: [www.lynis.dk/milj%C3%B8/slambehandling](http://www.lynis.dk/milj%C3%B8/slambehandling)
- Donatello, S., Freeman-Pask, A., Tyrer, M., & Cheeseman, C. (2009). Effect of milling and acid washing on the pozzolanic activity of incinerator sewage sludge ash. *Cement & Concrete Composites*, 54-61.
- Gottfredsen, F. R., & Nielsen, A. (2010). *Bygningsmaterialer - Grundlæggende egenskaber.* Kongens Lyngby: Polyteknisk Forlag.
- Hansen, K. K., Villadsen, J., & Bager, D. (1989). *Vurdering af porestruktur i hærdnet cementpasta med lavtemperatur kalorimetri.* Kongens Lyngby: Laboratorie for Bygningsmaterialer, Danmarks Tekniske Højskole.
- Hasholt, M. T., & Mathiesen, D. (2002). *Center for Grøn Beton - Beton med slamaske.* Teknologisk Institut.
- Jensen, B. C. (2008). *Betonkonstruktioner.* København: Nyt Teknisk Forlag.
- Kirkelund, G. M., Jensen, P. E., & Ottosen, L. M. (2012). *Udvikling af ny teknik til fosfor-indvinding fra aske fra forbrænding af spildevandsslam.* Kongens Lyngby: Miljøstyrelsen.
- Kjersgaard, D., Jacobsen, B. N., Rindel, K., Andreasen, L., Larsen, F., Nyegaard, P., et al. (u.d.). *The Reuse of Bio ash for the production of concrete. A Danish case study.*
- Pedersen, V. K., Jensen, A., Dam-Johansen, K., Kemiteknik, I. f., DTU, Sander, B., et al. (nr. 9 2005). Flyveaske til betonproduktion - påvirkning af luftindblanding. *Dansk Kemi*, 86, s. 33-37.
- Rindel, K. (14. December 2012). Mailkorrespondance.
- Rosenmai, L., & Svendsen, S. (2012). *Slamaskes anvendelighed i beton - Anvendelse af slamaske i beton efter fosfor indvinding.* Lyngby: DTU Civil Engineering.
- Spildevandscenter Avedøre, Unicon og Lynettefællesskabet I/S. (2007). *Anvendelse af aske fra forbrænding af spildevandsslam (bioaske) i betonproduktion.* LIFE05 ENV/DK/000153.
- Aalborg Portland. (2007). *Cement og Beton, 18. udgave.* Aalborg: Aalborg Portland.

## **8 Bilag**



## **Appendix**

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

B: Vandindhold i jord

C: Oplukning af jordprøve efter DS 259

D: Glødetab i jord

E: Måling af ledningsevne i jord

F: Vandopløselighed

G: Vandopløselige anioner

H: Method for measuring Buffer Capacity of Soils and Sludge

## **pH i 1 M KCl opslemning. Jord-væske forhold 1:2,5**

### **A Princip**

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

### **B Specielt apparatur**

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

### **C Kemikalie sikkerhed**

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

**Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.**

### **D Reagenser**

#### **1) Kaliumchlorid 1 M KCl:**

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

#### **2) Bufferopløsning, pH 4,01:**

Radiometer pH 4.

#### **3) Bufferopløsning, pH 7,00:**

Radiometer pH 7.

**E**     **Analysens udførelse****1) Fremstilling af jordopslemningen**

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

**2) Målingens udførelse**

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

**F**     **Beregning af resultat**

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

**G**     **Affaldshåndtering**

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

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

## Vandindhold i jord

### A Princip

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

### B Specielt apparatur

Til analysen benyttes et varmeskab.

### C Analysens udførelse

#### ***Ved meget præcis måling:***

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

#### **Dette gøres vha. en tang, fingrene afsætter fugt.**

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

#### ***Ved mindre præcis måling (mest anvendt):***

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

**D** **Beregning af resultat**

Vandindholdet angives i procent af vægten af den fugtige jord.

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

**E** **Affaldshåndtering**

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald og bægerglassene rengøres.

## Oplukning af jordprøve efter DS 259

### **A** Princip

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

### **B** Specielt apparatur

Til målingen benyttes et atomabsorptionsspektrofotometer (AAS).

### **C** Kemikalie sikkerhed

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

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

**Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.**

### **D** Reagenser

#### **1) Salpetersyre halvkonc, (1:1) HNO<sub>3</sub>:**

500 mL koncentreret HNO<sub>3</sub> overføres med måleglas til en 1000,00 mL målekolbe som er 1/2 fyldt med destilleret vand. Der blandes godt og tilsættes vand til mærket. Efter blanding overføres opløsningen til en plastikflaske og mærkes.

**E**     **Analysens udførelse**

1,00 g tør, knust jord afvejes på teknisk vægt i et pyrex-glas med skruelåg (autoklaveglas) og der tilsættes 20,00 mL halvkonzentreret HNO<sub>3</sub> med fuld pipette (skal foregå i stinkskab).

Autoklavflaskerne lukkes helt til, da HNO<sub>3</sub> ellers vil fordampe. Flaskerne stilles i autoklaven ved 200 kPa (120°C) i 30 minutter. Flaskerne afkøles derefter til stuetemperatur.

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

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

**F**     **Bestemmelse af metaller**

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

**G**     **Beregning af resultat**

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

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

hvor

A = ekstraktens metal koncentration, mg/L = ppm

B = g jord afvejet

C = fortyndingsfaktor

**H Affaldshåndtering**

Salpetersyre hældes i affaldsdunke mærket X 4.18.

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Filterpapiret bortkastes i skraldespanden i stinkskabet.

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.



## Glødetab i jord

### A Princip

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

### B Specielt apparatur

Til analysen benyttes et muffelovn.

### C Analysens udførelse

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

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

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

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

### D Beregning af resultat

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

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

### E Affaldshåndtering

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

## Måling af ledningsevne i jord

### A Princip

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

### B Specielt apparatur

Til målingen benyttes ledningsevnemåler.

### C Analysens udførelse

10,00 g tør knust jord afvejes på teknisk vægt til en 50 mL plastikflaske. Der tilsættes 25,00 mL destilleret vand med fuld pipette. Plastikflaskerne stilles ca. ½ time på rysteapparat, hvorefter jorden bundfældes i ca. 20 minutter, indtil en væskefase har udskilt sig over jorden.

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

### D Beregning af resultat

På baggrund af ledningsevнемålingen beregnes jordens ionindhold i jordvæsken.

Det samlede ionindhold i jordvæsken:

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

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

$$S_{jord} = \frac{S_{væske} \cdot V_{vand\ tilsat}}{M_{jord}}$$

## **E** **Affaldshåndtering**

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

## Vandopløselighed

### Analyse:

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

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

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

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

Hele prøven hældes over i filteret og stilles til afdrypning.

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

Asken og filteret vejes og vægten noteres.

## Vandopløselige anioner

### **Analyse:**

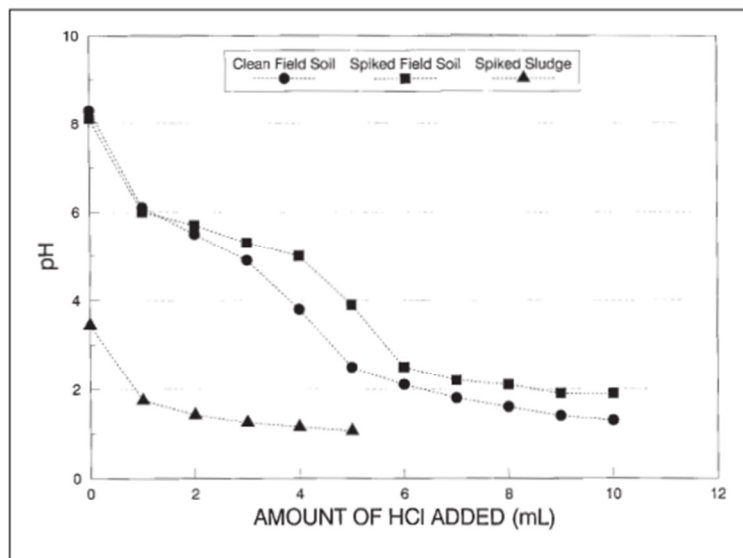
10g tørret aske afvejes på teknisk vægt til 100mL plastikflaske. Der tilsættes 50mL destilleret vand.

Prøven stilles på rystebord natten over.

Prøven filtreres med sprøjtefilter og prøven gemmes til ionchromotograf og AAS

**Method for measuring Buffer Capacity of Soils and Sludge<sup>1</sup>**

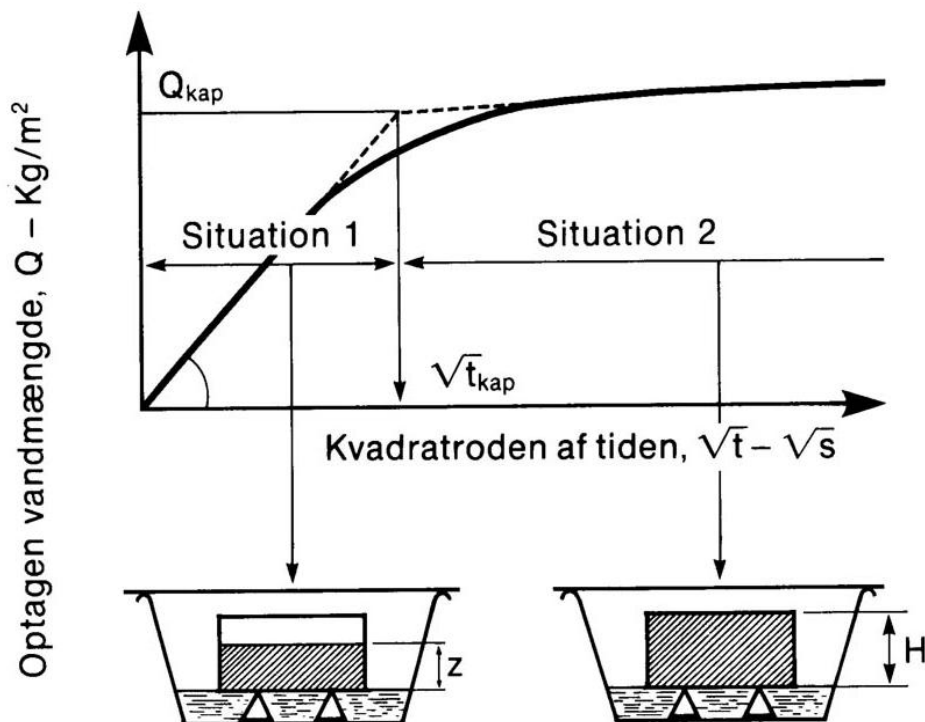
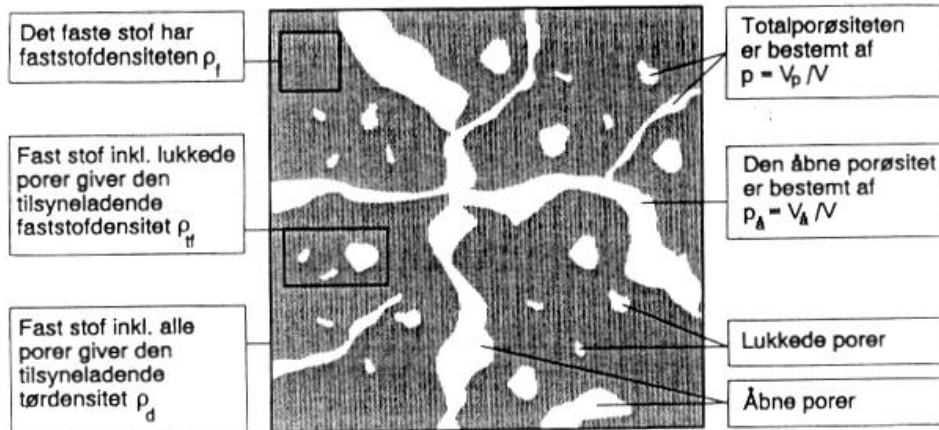
1. Mix 20 gram of dry soil/dry sludge in a container/glass beaker with 300 mL deionized water.
2. Stir for 30 minutes using a shake table/magnetic stirrer.
3. Measure pH.
4. Add 1 mL of concentrated HCl.
5. Mix additional 30 minutes.
6. Measure pH.
7. Repeat step 4-6 until pH evens out (pH 2-1)
8. Plot pH of solution vs. H<sup>+</sup> addition (ml conc. HCl)



**Figure 4.** Buffering capacity test results.

<sup>1</sup> Reddy, K.R., Donahue, M., Saichek, R. E., Sasoaka, R., 1999. Preliminary Assessment of Electrokinetic Remediation of Soil and Sludge Contaminated with Mixed Waste. Journal of the Air & Waste Management Association, 49:7, 823-830.

# PORØSITET, DENSITET OG KAPILLARSUGNING



# Indholdsfortegnelse

<b>1. FORMÅL .....</b>	<b>3</b>
<b>2. OMFANG .....</b>	<b>3</b>
<b>3. BAGGRUND .....</b>	<b>4</b>
3.1. GENERELT .....	4
3.2. PORØSITET OG DENSITET .....	4
3.3. KAPILLARSUGNING.....	5
<b>4. EKSPERIMENTER .....</b>	<b>8</b>
4.1. PORØSITET OG DENSITET .....	8
4.2. KAPILLARSUGNING I MURSTEN .....	8
<b>5. RAPPORTERING.....</b>	<b>9</b>
<b>6. LITTERATUR.....</b>	<b>9</b>
<b>BILAG 1: SKEMA 1 – PORØSITET OG DENSITET .....</b>	<b>10</b>
<b>BILAG 2: SKEMA 2 – KAPILLARSUGNING I .....</b>	<b>10</b>
<b>BILAG 3: SKEMA 3 – KAPILLARSUGNING II.....</b>	<b>11</b>

*Forside:*

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

*Nederst: Illustration af opsugningsforsøg.*



## 1. Formål

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

## 2. Omfang

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

*Gruppearbejde:* Herefter arbejder grupperne med hver deres prøvelegemer.

*Afslutning:* Øvelsen slttes med, at

**alle grupper indtaster måleresultater på Campusnet til brug ved rapporteringen.  
Manglende resultater fra en gruppe medfører nedsat karakter i den endelige bedømmelse!**

### 3. Baggrund

#### 3.1. Generelt

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

#### 3.2. Porøsitet og densitet

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

<i>faststoffdensitet</i>	$\rho_f$
<i>tilsyneladende faststoffdensitet</i>	$\rho_{ff}$
<i>tørdensitet</i>	$\rho_d$
<i>densitet i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand</i>	$\rho_{ssd}$

og de dermed sammenhørende parametre til karakterisering af porøsitetsforholdene

<i>total porøsitet</i>	$p$
<i>åben porøsitet</i>	$p_a$
<i>absorption</i>	$w_a$

Størrelserne  $\rho_f$  og  $\rho_{ff}$  anvendes dog temmelig sjældent. Fig. 1 illustrerer de tre rumfangsdefinitioner.

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

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

*Den tilsyneladende faststoffdensitet* defineres som materialets masse i tør tilstand divideret med det tilsyneladende faststoffrumfang. Det

tilsyneladende faststoffrumfang betegner rumfanget af det der set udefra fremtræder som faststof, dvs. faststof inklusiv lukkede porer.

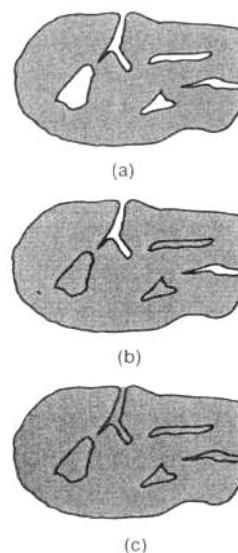


Fig. 1. Rumfangsdefinitioner. (a) absolut faststoffrumfang (faststof), (b) tilsyneladende faststoffrumfang (faststof + lukkede porer), (c) kornrumfang (faststof + lukkede porer + åbne porer).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.2.1. Bestemmelse af porøsitet og densitet

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

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

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

hvor

$V$  er prøvelegemets volumen [ $m^3$ ]

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

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

$\rho_w$  er vands densitet [ $kg/m^3$ ]

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

Voluminet af de åbne porer i prøvelegemet findes efter formlen:

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

hvor

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

$m_0$  er tørmassen af prøvelegemet [ $kg$ ]

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

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

hvor

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

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

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

hvor

$\rho_d$  er materialets tørdensitet [ $kg/m^3$ ]

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

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

hvor

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

### 3.3. Kapillarsugning

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

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

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

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

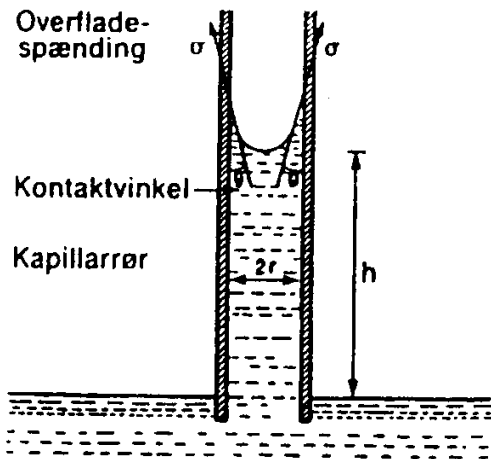


Fig. 2. Stighøjde i et kapillarrør.

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

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

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

hvor

- $p_h$  er det hydrostatiske undertryk [Pa]
- $\sigma$  er overfladespændingen [N/m]
- $\theta$  er kontakvinklen [°]
- $r$  er radius i menisken [m]

Som det fremgår af (8) bliver undertrykket stort når radius mindskes. I porer over en vis størrelse vil der ikke forekomme kapillartransport, idet det hydrostatiske undertryk ikke vil resultere i en tilstrækkelig stor kraft til at flytte

vandet. Derfor er det ikke alle åbne hulrum som kan fyldes ved kapillartransport af vand.

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

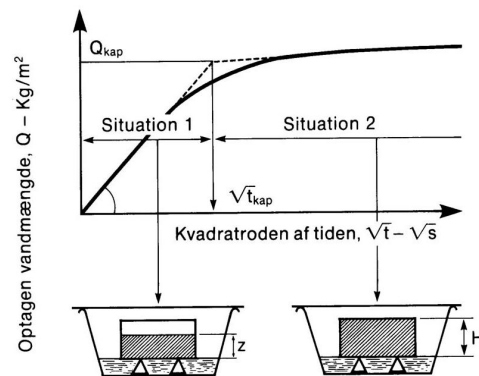


Fig. 3. Illustration af kapillarsugningsforsøg.

Den stiplede linje viser det ideelle forhold, hvor den optagne vandmængde pr. areal,  $Q$  som funktion af  $t^{1/2}$  afbilder en ret linje, indtil vandmængden svarende til  $Q_{kap}$  er opsuget jf. situation 1 i figur 3. Herefter optages ikke mere vand, og hældningen af kurven er derfor nul, jf. situation 2 i figur 3. I virkeligheden vil en kurve se ud som vist ved den fuldt optrukne linje, fordi alle porerne ikke fyldes lige hurtigt. Ligeledes vil der for nogle materialer være en svagt stigende tendens efter vandoverfladen har nået toppen af prøvelegemet; dette skyldes at fyldningen af de mindste porer i materialet tager lang tid.

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

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

Et stort kapillaritetstal betyder at opsigningen foregår hurtigt, mens et lavt omvendt angiver at opsigningen foregår langsomt. Dette har fx

betydning for hvor meget vand en mursten når at opsuge i regnvejr.

### 3.3.1. Bestemmelse af opsugningsparametre

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

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

hvor

$Q$  er den opsugede masse pr. opsugningsareal [ $kg/m^2$ ]

$m_t$  er massen af prøvelegemet til tiden  $t$  [ $kg$ ]

$m_0$  er tørmassen af prøvelegemet [ $kg$ ]

$A$  er opsugningsarealet [ $m^2$ ]

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

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

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

hvor

$M$  er modstandstallet [ $s/m^2$ ]

$h$  er højden på prøvelegemet [ $m$ ]

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

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

hvor

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

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

## 4. Eksperimenter

### 4.1. Porøsitet og densitet

#### 4.1.1. Apparatur og materialer

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

#### 4.1.2. Fremgangsmåde

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

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

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

### 4.2. Kapillarsugning i mursten

#### 4.2.1. Apparatur og materialer

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

#### 4.2.2. Fremgangsmåde

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

Ekssikkatoren er en lufttæt plast- eller glasbeholder. Silicagelen er et tørremiddel som sørger for, at der ikke er fugt i luften inde i ekssikkatoren. Der benyttes kontrollod til sikring af at vægten vejer korrekt både før og efter forsøget. Prøvelegemet vejes i modtagelsessituationen ( $m_0$ ), mens dets sugeflade og højdes opmåles.

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

Temperaturen i lokalet måles ( $T_{rum}$ ) og noteres, mens temperaturen af vandet i fotobakken skal være 20 °C ± 2 °C, hvilket måles ( $T_{vand}$ ). Ved forsøg over længere tid bør fotobakken overdækkes for at udgå fordampning. Med passende tidsintervaller regnet fra starttidspunktet tages prøvelegemet op, aftørres med en hårdt opvredet klud og vejes ( $m_t$ ). Stopuret stoppes når prøvelegemet ikke er i kontakt med vandet i fotobakken. Der foretages målinger efter 1, 2, 4, 8, 16, 32, 60, 120, evt. 240 minutter fra starttidspunktet. Til sidst kontrolles vægten ved en kontrolvejning og værdien noteres.

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

## 5. Rapportering

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

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

### Hvad skal artiklen indeholde af resultater?

Porøsitet og densitet

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

Kapillarsugning

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

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

## 6. Litteratur

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

## Bilag 1: Skema 1 – Porøsitet og densitet

Materiale						
<b>Målinger</b>						
Temperatur	$T_{rum} =$	°C	$T_{vand} = 21,0$	°C	$\rho_w =$	998 kg/m <sup>3</sup>
Kontrollod	$m_{før} =$ 99998,	g	$m_{efter} =$	g		
Prøvelegeme Masse	$m_0 =$	kg	$m_u =$	kg	$m_{ov} =$	kg
<b>Beregninger</b>						
Volumen og densitet	$V =$	m <sup>3</sup>	$V_{\bar{a}} =$	m <sup>3</sup>	$p_{\bar{a}} =$	
	$\rho_d =$	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{ssd} =$	kg/m <sup>3</sup>		
Bemærkninger						
Gruppenr. Dato						

## Bilag 2: Skema 2 – Kapillarsugning I

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



### Bilag 3: Skema 3 – Kapillarsugning II

Materiale							
Temperatur	$T_{rum} =$	°C	$T_{vand} =$	°C	$\rho_w =$	998 kg/m <sup>3</sup>	
Kontrollod	$m_{før} =$	g	$m_{efter} =$	g			
Prøvelegeme							
$t$ [min]	$t^{1/2}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$m_t$ [kg]	$Q$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$t$ [min]	$t^{1/2}$ [s <sup>1/2</sup> ]	$m_t$ [kg]	$Q$ [kg/m <sup>2</sup> ]
0				0			
1				1			
2				2			
4				4			
8				8			
16				16			
32				32			
60				60			
120				120			
240				240			
Bemærkninger: Dette Skema 3 kan anvendes til to prøvelegemer.							
						Gruppenr.	
						Dato	

## Leaching af tungmetaller fra aske

### **Princip:**

Lovgivningen inddeler farligt affald i kategorier efter hvor meget det indeholder af giftige stoffer og hvor mobile de giftige stoffer er. I aske fra affaldsforbrænding er tungmetaller nogle af de vigtigste giftige stoffer. Grunden til at asken betegnes som farligt affald er, at tungmetallerne er meget mobile, dvs. de vaskes ud når asken kommer i kontakt med vand, og vil derved forurene det omgivende miljø. Mobiliteten skal ifølge dansk lovgivning (restproduktbekendtgørelsen nr. 1480 af 12/12/2007) bestemmes ved hjælp af batchleachtest ved L/S 2. Det er denne test, der udføres her.

### **Apparater:**

- 250 mL syreskyllet plastflasker med låg
- Måleglas syreskyllet
- Teknisk vægt
- Rystebord
- Vacumpumpe
- Sugekolbe
- Magnetisk filter
- Filterpapir 0,45 $\mu$ m
- Vials

### **Reagenser:**

- Konc. HNO<sub>3</sub> suprapur
- Ionbyttet vand

### **Sikkerhed:**

Husk værnemidler, hvis der er tungmetaller i materialet der arbejdes med.

### **Fremgangsmåde:**

Afvej 40,0g aske (tørret ved 40 °C) på analysevægt til 250mL syreskyllede plastflaske. Der skal laves 3 dobbelt bestemmelse.

Der tilsæt forsigtigt 80,00mL ionbyttet vand med fuld pipette til plastflasken og sæt låg på. Prøverne sættes på rystebord i 24 timer.

Prøven tages af og sedimenteres i 15 min. Herefter der måles pH på alle prøverne inden filtrering (se vejledning til pH måling).

Prøverne filtreres igennem et 0,45µm filter. Væsken hældes over i 2 vials. Noter på prøven om den skal bruges til IC eller ICP.

### **Konservering:**

Prøver som skal bruges til måling på ICP skal konserveres. Husk handsker, briller og brug stinkskab.

Prøverne konserveres med 0,1mL konc. HNO<sub>3</sub> suprapur til 10mL prøve.

Prøverne gemmes til senere måling af tungmetaller på ICP/AAS

### **Beregning af resultater:**

Resultater fra IC/ICP er i mg/L. Der skal ikke foretages beregning af resultater da værdierne holdes op mod tabelværdier i mg/L fra Restproduktbekendgørelsen

BEK 1480 af 12.12.2007

### **Affaldshåndtering:**

- Prøver som indeholder tungmetaller skal smides i dunk mærket forurenede med tungmetaller.
- HNO<sub>3</sub> skal opsamles og hældes i dunk mærket syre.

<b>Ønskede / teoretiske forhold</b>				
Betontype	Cement	Aske	Vand	Tilslag
A,B,C eller D	[g]	[g]	[g]	[g]
A / reference	450	<del>450</del>	225	1350
B	405	45	225*	1350
C	360	90	225*	1350
D	450	135	225*	1215

\*Ekstra vand tilsættes således at konsistensen bliver som ved referanceprøven.

Eventuelt ekstra vand tilsættes over en eller to omgange, efter blandingen, ifølge DS/EN 196-1, er færdig blandet. For hver gang der er tilsat ekstra vand bliver blandingen ved højt tempo blandet i yderligere 30 sekunder.

<b>05.09.2012</b>		<b>Faktiske forhold</b>							
Betontype	Prøvenr.	Cement	Aske	Vand	Tilslag	Ekstra vand	Vand total	Færdig støbt	Kommentarer
A,B,C eller D	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	klokken	
B	B7	405,30	45,12	225,52	1350,01	14,91	240,43	08:42	2 x ekstra vand + *
C	C7	360,22	90,13	225,06	1350,02	32,81	257,87	09:12	2 x ekstra vand
D	D7	450,08	135,02	225,00	1215,09	70,05	295,05	09:39	2 x ekstra vand

\*Blander itu imellem første skifte fra lav til høj frekvens på blanderen. Minimum 2 minutters stilstand.

<b>25.09.2012</b>		<b>Faktiske forhold</b>							
Betontype	Prøvenr.	Cement	Aske	Vand	Tilslag	Ekstra vand	Vand total	Færdig støbt	Kommentarer
A,B,C eller D	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	klokken	
B	B28	405,01	45,03	225,14	1350,01	25,58	250,72	14:02	1 x ekstra vand + En anelse våd
D	D28	450,02	135,01	225,00	1215,04	65,65	290,65	14:16	1 x ekstra vand
B	B42	404,98	45,00	225,02	1350,03	10,09	235,11	14:32	1 x ekstra vand
D	D42	450,06	135,03	225,01	1214,99	67,64	292,65	14:55	2 x ekstra vand

<b>09.10.2012</b>		<b>Faktiske forhold</b>							<b>Kommentarer</b>
<b>Betontype</b>	<b>Prøvenr.</b>	<b>Cement</b>	<b>Aske</b>	<b>Vand</b>	<b>Tilslag</b>	<b>Ekstra vand</b>	<b>Vand total</b>	<b>Færdig støbt</b>	
A,B,C eller D	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	klokken	
B	B14	405,00	45,00	224,98	1350,00	12,36	237,34	09:02	1 x ekstra vand
D	D14	450,00	134,99	225,01	1215,00	60,32	285,33	09:29	1 x ekstra vand

<b>31.10.2012</b>		<b>Faktiske forhold</b>							<b>Kommentarer</b>
<b>Betontype</b>	<b>Prøvenr.</b>	<b>Cement</b>	<b>Aske</b>	<b>Vand</b>	<b>Tilslag</b>	<b>Ekstra vand</b>	<b>Vand total</b>	<b>Færdig støbt</b>	
A,B,C eller D	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	klokken	
C	C14	360,01	90,00	225,01	1350,00	34,31	259,32	13:37	1 x ekstra vand
C	C28	360,06	90,03	225,03	1350,00	28,51	253,54	14:01	1 x ekstra vand
C	C42	360,06	90,02	224,96	1350,02	35,62	260,58	14:24	1 x ekstra vand

<b>07.11.2012</b>		<b>Faktiske forhold</b>							<b>Kommentarer</b>
<b>Betontype</b>	<b>Prøvenr.</b>	<b>Cement</b>	<b>Aske</b>	<b>Vand</b>	<b>Tilslag</b>	<b>Ekstra vand</b>	<b>Vand total</b>	<b>Færdig støbt</b>	
A,B,C eller D	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	klokken	
Malet B	MB7	405,01	45,00	225,00	1350,04	0,00	225,00	12:55	
alm B	B28-II	405,03	45,01	225,01	1350,06	20,16	245,17	13:11	1 x ekstra vand
Syre B	SB7	405,00	45,02	225,02	1349,97	14,20	239,22	13:31	1 x ekstra vand - syrevasket aske ver. 1
ref 28	A28	450,05	0,00	225,01	1350,01	0,00	225,01	13:46	
Malet D	MD7	449,99	135,02	225,00	1214,99	12,32	237,32	14:07	1 x ekstra vand

<b>14.11.2012</b>		<b>Faktiske forhold</b>							<b>Kommentarer</b>
<b>Betontype</b>	<b>Prøvenr.</b>	<b>Cement</b>	<b>Aske</b>	<b>Vand</b>	<b>Tilslag</b>	<b>Ekstra vand</b>	<b>Vand total</b>	<b>Færdig støbt</b>	
A,B,C eller D	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	klokken	
Malet B	MB28	405,01	45,00	225,00	1350,01	0,00	225,00	13:00	Uden ekstra vand - dog en anelse våd
Malet D	MD28	450,02	134,91	225,00	1214,99	13,83	238,83	13:19	1 x ekstra vand

21.11.2012		Faktiske forhold							Kommentarer
Betontype	Prøvenr.	Cement	Aske	Vand	Tilslag	Ekstra vand	Vand total	Færdig støbt	
A,B,C eller D	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	klokken	
Syre B	SB28	405,04	45,02	225,01	1350,01	11,02	236,03	11:26	1 x ekstra vand - syrevasket aske ver. 2
Syre D	SD28	450,05	135,02	225,02	1215,02	63,87	288,89	11:04	1 x ekstra vand - syrevasket aske ver. 1

05.12.2012		Faktiske forhold							Kommentarer
Betontype	Prøvenr.	Cement	Aske	Vand	Tilslag	Ekstra vand	Vand total	Færdig støbt	
A,B,C eller D	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	klokken	
Syre B	SB14	405,04	45,01	225,00	1349,98	10,87	235,87	10:29	1 x ekstra vand - syrevasket aske ver. 3
Syre D	SD14	450,02	135,01	225,01	1214,99	55,17	280,18	10:54	1 x ekstra vand - syrevasket aske ver. 3
Syre D	SD7	450,02	135,04	225,01	1215,01	52,74	277,75	14:30	1 x ekstra vand - syrevasket aske ver. 2 og 3

Syrevasket aske ver. 2    129,86  
 Syrevasket aske ver. 3    5,18

06.12.2012		Faktiske forhold							Kommentarer
Betontype	Prøvenr.	Cement	Aske	Vand	Tilslag	Ekstra vand	Vand total	Færdig støbt	
A,B,C eller D	[nr]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	klokken	
Malet B	MB14	405,08	45,02	225,01	1350,04	0,00	225,01	13:49	Anelse våd - evt. dårlig cement (klumpet)
Malet D	MD14	450,03	135,01	224,99	1215,02	10,44	235,43	13:31	1 x ekstra vand - cement samme tilstand

Tryk og ultralydsprøvning				7-døgnstest			dato 12-09-2012				tryk-	tryk-	trykstyrke	1. Middel	1. Øvre	1. Nedre	2. Middel	2. Øvre	2. Nedre	TRYK-
prøve	Ultralyd	længde	bredde	højde	vægt	tryk 1	tryk 2	densitet	trykareal	styrke 1	styrke 2	snit	trykstyrke	grænse	grænse	trykstyrke	grænse	grænse	STYRKE	
[nr]	[μS]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kN]	[kN]	[kg/m^3]	[mm^2]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	110%	90%	[MPa]	110%	90%	[MPa]	
B7.1	38,3	161,65	40,08	40,76	588,00	69	64	2226,59	2038,17	33,85	31,40	32,63	33,1	36,39	29,77	32,0	35,18	28,78	<b>32,0</b>	
B7.2	39,2	161,70	40,14	41,00	585,00	62	66	2198,65	2049,83	30,25	32,20	31,22								
B7.3	39,2	161,40	40,03	40,97	588,00	66	79	2221,20	2048,67	32,22	38,56	35,39								
C7.1	40,5	160,50	40,01	40,73	574,00	48	46	2194,41	2036,50	23,57	22,59	23,08	25,4	27,98	22,89	25,2	27,68	22,65	<b>25,2</b>	
C7.2	41,2	160,65	40,15	40,68	571,00	51	50	2176,15	2033,83	25,08	24,58	24,83								
C7.3	40,3	160,65	40,04	40,85	571,00	60	56	2173,05	2042,50	29,38	27,42	28,40								
D7.1	41,5	160,70	40,02	40,84	569,00	55	56	2166,19	2042,00	26,93	27,42	27,18	25,8	28,38	23,22	26,6	29,21	23,90	<b>26,6</b>	
D7.2	41,3	160,75	40,15	40,81	567,00	51	55	2153,04	2040,33	25,00	26,96	25,98								
D7.3	42,0	160,50	39,94	40,82	570,00	45	54	2178,31	2041,17	22,05	26,46	24,25								
Tryk og ultralydsprøvning				7-døgnstest			dato 14-11-2012				Beregning af trykstyrke iht. DS/EN 196-1									
MB7.1	x	160,95	40,08	40,15	585,61	99	101	2261,02	2007,50	49,32	50,31	49,81	48,6	53,45	43,73					<b>48,6</b>
MB7.2	x	160,90	40,18	40,24	586,26	93	96	2253,73	2011,83	46,23	47,72	46,97								
MB7.3	x	160,80	40,03	40,42	585,87	95	103	2252,01	2021,00	47,01	50,96	48,99								
MD7.1	x	160,20	40,08	40,43	587,63	105	116	2263,84	2021,50	51,94	57,38	54,66	54,3	59,75	48,88	55,9	61,48	50,30	<b>55,9</b>	
MD7.2	x	160,20	40,10	40,49	588,95	113	94	2264,43	2024,33	55,82	46,44	51,13								
MD7.3	x	160,25	40,05	40,41	586,78	114	117	2262,30	2020,67	56,42	57,90	57,16								
SB7.1	x	159,45	39,93	40,51	575,03	86	88	2229,48	2025,50	42,46	43,45	42,95	42,8	47,05	38,50					<b>42,8</b>
SB7.2	x	159,20	39,97	40,23	571,18	84	88	2230,87	2011,67	41,76	43,74	42,75								
SB7.3	x	159,10	39,94	40,36	572,86	86	86	2234,04	2017,83	42,62	42,62	42,62								
Tryk og ultralydsprøvning				7-døgnstest			dato 12-12-2012				Beregning af trykstyrke iht. DS/EN 196-1									
SD7.1	x	160,80	39,91	40,61	563,54	51	49	2162,70	2030,33	25,12	24,13	24,63	24,7	27,21	22,26					<b>24,7</b>
SD7.2	x	160,40	40,13	40,47	568,38	50	48	2182,25	2023,33	24,71	23,72	24,22								
SD7.3	x	161,05	39,87	40,60	569,22	53	50	2183,47	2029,83	26,11	24,63	25,37								

Tryk og ultralydsprøvning				14-døgnstest			dato 23-10-2012			tryk-	tryk-	trykstyrke	1. Middel	1. Øvre	1. Nedre	2. Middel	2. Øvre	2. Nedre	TRYK-
prøve	Ultralyd	længde	bredde	højde	vægt	tryk 1	tryk 2	densitet	trykareal	styrke 1	styrke 2	snit	trykstyrke	grænse	grænse	trykstyrke	grænse	grænse	STYRKE
[nr]	[μS]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kN]	[kN]	[kg/m³]	[mm²]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	110%	90%	[MPa]	110%	90%	[MPa]
B14.1	37,3	162,10	40,35	39,73	578,12	95	98	2224,71	1986,33	47,83	49,34	48,58	46,6	51,23	41,91				46,6
B14.2	41,6	162,20	39,71	39,96	573,71	96	91	2228,85	1998,17	48,04	45,54	46,79							
B14.3	37,9	162,35	40,34	39,92	589,16	95	82	2253,30	1996,00	47,60	41,08	44,34							
D14.1	39,4	161,80	40,08	40,27	569,55	72	96	2181,12	2013,33	35,76	47,68	41,72	43,0	47,33	38,73	43,7	48,05	39,31	43,7
D14.2	38,9	162,00	40,00	40,62	572,05	87	95	2173,30	2031,00	42,84	46,77	44,81							
D14.3	39,2	161,80	40,12	40,42	570,18	88	84	2173,08	2020,83	43,55	41,57	42,56							
Tryk og ultralydsprøvning				14-døgnstest			dato 14-11-2012			Beregning af trykstyrke iht. DS/EN 196-1									
C14.1	x	160,55	40,00	39,94	557,16	65	48	2172,21	1996,83	32,55	24,04	28,29	32,3	35,48	29,03	33,9	37,28	30,50	33,9
C14.2	x	160,45	39,96	39,90	559,68	69	70	2187,40	1995,17	34,58	35,08	34,83							
C14.3	x	160,25	40,03	40,15	559,17	70	65	2171,26	2007,50	34,87	32,38	33,62							
Tryk og ultralydsprøvning				14-døgnstest			dato 19-12-2012			Beregning af trykstyrke iht. DS/EN 196-1									
SB14.1	x	159,25	39,83	40,09	565,69	96	72	2224,42	2004,50	47,89	35,92	41,91	44,9	49,41	40,43	46,7	51,39	42,05	46,7
SB14.2	x	159,40	39,99	40,23	568,00	93	90	2214,92	2011,33	46,24	44,75	45,49							
SB14.3	x	159,50	40,00	40,33	572,48	96	95	2224,72	2016,50	47,61	47,11	47,36							
SD14.1	x	161,05	40,06	40,41	566,81	67	68	2174,09	2020,67	33,16	33,65	33,40	33,4	36,75	30,07				33,4
SD14.2	x	161,30	40,15	40,41	565,29	66	69	2160,04	2020,50	32,67	34,15	33,41							
SD14.3	x	161,30	40,13	40,11	564,66	66	68	2174,68	2005,67	32,91	33,90	33,41							
Tryk og ultralydsprøvning				14-døgnstest			dato 20-12-2012			Beregning af trykstyrke iht. DS/EN 196-1									
MB14.1	x	160,70	40,11	40,24	585,68	104	76	2258,24	2011,83	51,69	37,78	44,74	47,7	52,49	42,94	49,0	53,90	44,10	49,0
MB14.2	x	160,95	40,17	40,07	584,57	95	93	2256,26	2003,67	47,41	46,41	46,91							
MB14.3	x	160,85	39,91	40,00	584,65	101	105	2276,46	2000,17	50,50	52,50	51,50							
MD14.1	x	159,15	39,96	40,34	581,78	128	121	2268,10	2016,83	63,47	60,00	61,73	61,5	67,60	55,31				61,5
MD14.2	x	159,45	39,92	40,21	576,52	127	124	2252,50	2010,50	63,17	61,68	62,42							
MD14.3	x	159,45	40,01	40,52	583,67	121	123	2258,09	2025,83	59,73	60,72	60,22							

\*Tryk på højden i stedet for bredden for at se om det giver indflydelse



Tryk og ultralydsprøvning				28-døgntest			dato 23-10-2012				tryk-	tryk-	trykstyrke	1. Middel	1. Øvre	1. Nedre	2. Middel	2. Øvre	2. Nedre	TRYK-
prøve	Ultralyd	længde	bredde	højde	vægt	tryk 1	tryk 2	densitet	trykareal	styrke 1	styrke 2	snit	trykstyrke	grænse	grænse	trykstyrke	grænse	grænse	STYRKE	
[nr]	[μS]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kN]	[kN]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	110%	90%	[MPa]	110%	90%	[MPa]	
B28.1	39,0	160,55	40,04	41,19	575,92	68	81	2175,04	2059,67	33,02	39,33	36,17	39,5	43,43	35,53	40,8	44,85	36,70	40,8	
B28.2	38,1	160,90	40,09	40,96	575,12	87	76	2176,38	2048,17	42,48	37,11	39,79								
B28.3	39,8	161,10	40,03	41,19	576,19	88	87	2169,17	2059,50	42,73	42,24	42,49								
D28.1	38,2	161,25	40,06	39,98	558,68	80	95	2163,26	1999,00	40,02	47,52	43,77	46,0	50,63	41,43	47,2	51,95	42,51	47,2	
D28.2	38,5	161,45	40,11	39,76	554,15	97	87	2152,24	1987,83	48,80	43,77	46,28								
D28.3	38,8	161,30	40,10	39,97	559,66	91	101	2164,59	1998,50	45,53	50,54	48,04								
Tryk og ultralydsprøvning				28-døgntest			dato 28-11-2012				Beregning af trykstyrke iht. DS/EN 196-1									
C28.1	x	159,80	40,00	40,24	563,37	79	84	2189,91	2012,17	39,26	41,75	40,50	40,4	44,44	36,36					40,4
C28.2	x	159,90	40,07	40,22	565,02	84	74	2192,57	2011,00	41,77	36,80	39,28								
C28.3	x	160,05	40,13	40,08	564,03	81	85	2190,85	2004,17	40,42	42,41	41,41								
Tryk og ultralydsprøvning				28-døgntest			dato 05-12-2012				Beregning af trykstyrke iht. DS/EN 196-1									
A28.1	x	160,15	39,97	40,50	587,93	119	127	2268,01	2024,83	58,77	62,72	60,75	63,0	69,28	56,69					63,0
A28.2	x	160,30	40,02	40,50	590,40	124	133	2272,00	2025,17	61,23	65,67	63,45								
A28.3	x	160,50	40,01	40,46	592,34	131	131	2279,82	2022,83	64,76	64,76	64,76								
B28-II.1	x	159,80	39,93	40,25	573,29	107	107	2232,01	2012,50	53,17	53,17	53,17	51,1	56,18	45,96	52,2	57,37	46,94	52,2	
B28-II.2	x	159,85	39,94	40,30	574,11	103	92	2230,99	2015,17	51,11	45,65	48,38								
B28-II.3	x	159,75	39,90	40,27	575,62	106	102	2242,73	2013,33	52,65	50,66	51,66								
Tryk og ultralydsprøvning				28-døgntest			dato 12-12-2012				Beregning af trykstyrke iht. DS/EN 196-1									
MB28.1	x	159,80	39,97	40,47	587,19	116	116	2271,80	2023,33	57,33	57,33	57,33	56,3	61,98	50,71					56,3
MB28.2	x	159,70	40,01	40,46	584,88	112	112	2262,76	2022,83	55,37	55,37	55,37								
MB28.3	Prøven er brugt til forsøg med porøsitet og densitet samt kapillarsugning																			
MD28.1	x	160,90	40,02	40,16	588,63	144	141	2276,23	2008,00	71,71	70,22	70,97	68,2	75,05	61,41	69,6	76,60	62,67	69,6	
MD28.2	x	160,80	40,12	40,21	590,84	137	123	2277,66	2010,50	68,14	61,18	64,66								
MD28.3	x	160,70	39,96	40,26	588,86	145	133	2277,70	2012,83	72,04	66,08	69,06								
Tryk og ultralydsprøvning				28-døgntest			dato 19-12-2012				Beregning af trykstyrke iht. DS/EN 196-1									
SB28.1	x	160,90	40,11	40,26	581,98	109	108	2240,07	2013,00	54,15	53,65	53,90	55,1	60,59	49,58					55,1
SB28.2	x	160,85	40,03	40,16	581,43	113	113	2248,34	2008,17	56,27	56,27	56,27								
SB28.3	Prøven er brugt til forsøg med porøsitet og densitet samt kapillarsugning																			
SD28.1	x	161,25	40,14	40,47	570,77	96	95	2179,15	2023,33	47,45	46,95	47,20	47,2	51,93	42,49					47,2
SD28.2	x	161,25	40,10	40,57	571,19	97	94	2177,73	2028,33	47,82	46,34	47,08								
SD28.3	x	161,25	39,98	40,13	565,80	95	95	2187,19	2006,33	47,35	47,35	47,35								

Tryk og ultralydsprøvning				42-døgnstest			dato 06-11-2012				tryk-	tryk-	trykstyrke	1. Middel	1. Øvre	1. Nedre	2. Middel	2. Øvre	2. Nedre	TRYK-
prøve	Ultralyd	længde	bredde	højde	vægt	tryk 1	tryk 2	densitet	trykareal	styrke 1	styrke 2	snit	trykstyrke	grænse	grænse	trykstyrke	grænse	grænse	STYRKE	
[nr]	[μS]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kN]	[kN]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	110%	90%	[MPa]	110%	90%	[MPa]	
B42.1	36,2	159,95	40,00	40,14	569,02	101	103	2215,49	2007,00	50,32	51,32	50,82	51,8	57,00	46,64		0,00	0,00	51,8	
B42.2	37,7	160,20	39,99	40,38	567,86	109	101	2195,14	2019,17	53,98	50,02	52,00								
B42.3	37,0	160,45	40,19	40,27	574,49	107	105	2212,11	2013,67	53,14	52,14	52,64								
D42.1	40,4	162,50	40,13	40,30	573,72	101	104	2183,09	2015,17	50,12	51,61	50,86	49,9	54,90	44,92	50,9	56,03	45,84	50,9	
D42.2	38,5	162,25	40,16	40,31	571,63	94	107	2176,33	2015,67	46,63	53,08	49,86								
D42.3*	x	162,25	40,36	40,20	569,25	107	90	2162,43	2009,83	53,24	44,78	49,01								
Tryk og ultralydsprøvning				42-døgnstest			dato 12-12-2012				Beregning af trykstyrke iht. DS/EN 196-1									
C42.1	x	160,90	40,04	40,17	578,15	90	91	2234,21	2008,33	44,81	45,31	45,06	43,6	47,92	39,20		0,00	0,00	43,6	
C42.2	x	160,75	39,98	40,35	573,03	81	87	2209,73	2017,50	40,15	43,12	41,64								
C42.3	x	160,30	39,98	40,24	571,26	89	88	2214,95	2012,17	44,23	43,73	43,98								

\*Prøven knækkede midt over under afforskallingen. Dette skyldes formentlig ikke at prøven var dårlig støbt, men forkert teknik ved afforskalling.

Nedenfor ses vægten i gram for hver af de halvdele prøven delte sig i, og farven indikerer brudstyrken for netop denne halvde

243,50	325,75
--------	--------

Dimensionsbestemmelser ved gennemsnitsmålinger af prøvemener.  
Alle mål er i mm

**7 døgns prøver**

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
B7.1	40,10	40,08	40,63	40,76	161,70	161,65
	40,02		40,61		161,60	
	40,11		41,05		<del>161,60</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
B7.2	40,12	40,14	41,10	41,00	161,70	161,70
	40,20		40,80		161,70	
	40,09		41,09		<del>161,70</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
B7.3	40,03	40,03	41,48	40,97	161,50	161,40
	39,99		40,81		161,30	
	40,07		40,63		<del>161,30</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
C7.1	39,95	40,01	40,51	40,73	160,80	160,50
	40,08		40,50		160,20	
	40,01		41,18		<del>160,20</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
C7.2	40,22	40,15	40,29	40,68	160,80	160,65
	40,08		40,62		160,50	
	40,16		41,12		<del>160,50</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
C7.3	40,09	40,04	41,22	40,85	160,80	160,60
	40,10		40,67		160,40	
	39,93		40,66		<del>160,40</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
D7.1	40,01	40,02	40,79	40,84	160,90	160,70
	40,02		41,01		160,50	
	40,04		40,72		<del>160,50</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
D7.2	40,22	40,15	40,95	40,81	161,00	160,75
	40,18		40,78		160,50	
	40,04		40,69		<del>160,50</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
D7.3	39,91	39,94	40,77	40,82	160,70	160,50
	39,97		41,01		160,30	
	39,93		40,69		<del>160,30</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MB7.1	40,08	40,08	40,23	40,15	160,90	160,95
	40,20		40,20		161,00	
	39,96		40,02		<del>160,90</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MB7.2	40,10	40,18	40,44	40,24	161,00	160,90
	40,07		40,25		160,80	
	40,37		40,02		<del>160,80</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MB7.3	40,05	40,03	40,43	40,42	160,80	160,80
	40,00		40,45		160,80	
	40,03		40,38		<del>160,80</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MD7.1	40,05	40,08	40,61	40,43	160,10	160,20
	40,13		40,37		160,30	
	40,05		40,31		<del>160,30</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MD7.2	40,02	40,10	40,59	40,49	160,00	160,20
	40,11		40,42		160,40	
	40,17		40,45		<del>160,40</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MD7.3	39,93	40,05	40,60	40,41	160,00	160,25
	40,09		40,33		160,50	
	40,13		40,31		<del>160,50</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SB7.1	39,88	39,93	40,61	40,51	159,10	159,45
	39,96		40,59		159,80	
	39,95		40,33		<del>159,80</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SB7.2	39,95	39,97	40,03	40,23	159,20	159,20
	40,00		40,21		159,20	
	39,97		40,46		<del>159,20</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SB7.3	39,94	39,94	40,19	40,36	159,00	159,10
	39,91		40,28		159,20	
	39,96		40,60		<del>159,20</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SD7.1	39,86	39,91	41,32	40,61	161,00	160,80
	39,88		40,48		160,60	
	39,98		40,02		<del>160,60</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SD7.2	40,16	40,13	40,70	40,47	160,50	160,40
	40,10		40,41		160,30	
	40,12		40,29		<del>160,30</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SD7.3	39,80	39,87	40,97	40,60	161,20	161,05
	39,85		40,64		160,90	
	39,97		40,18		<del>160,90</del>	

**14 døgns prøver**

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
B14.1	40,20	40,35	39,60	39,73	163,00	162,10
	40,44		39,72		161,20	
	40,42		39,86		<del>161,20</del>	

\*

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
B14.2	39,84	39,71	40,10	39,96	163,00	162,20
	39,86		40,07		161,40	
	39,43		39,72		<del>161,40</del>	

\*

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
B14.3	40,30	40,34	39,99	39,92	163,00	162,35
	40,15		39,82		161,70	
	40,58		39,95		<del>161,70</del>	

\*

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
D14.1	40,04	40,08	40,36	40,27	161,90	161,80
	40,08		40,19		161,70	
	40,12		40,25		<del>161,70</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
D14.2	40,00	40,00	40,46	40,62	162,00	162,00
	40,10		40,70		162,00	
	39,90		40,70		<del>162,00</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
D14.3	40,12	40,12	40,35	40,42	161,90	161,80
	40,09		40,55		161,70	
	40,16		40,35		<del>161,70</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
C14.1	40,02	40,00	39,85	39,94	160,70	160,55
	39,97		40,10		160,40	
	40,02		39,86		<del>160,40</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
C14.2	39,90	39,96	39,84	39,90	160,60	160,45
	40,02		39,95		160,30	
	39,97		39,92		<del>160,30</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
C14.3	40,08	40,03	40,32	40,15	160,50	160,25
	40,03		40,03		160,00	
	39,97		40,10		<del>160,00</del>	

\*skæv i den ene ende længde retning.

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SB14.1	39,82	39,83	40,04	40,09	159,50	159,25
	39,83		40,05		159,00	
	39,85		40,18		<del>159,00</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SB14.2	39,97	39,99	40,04	40,23	159,60	159,40
	40,00		40,21		159,20	
	40,01		40,43		<del>159,20</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SB14.3	40,02	40,00	40,60	40,33	159,60	159,50
	39,96		40,13		159,40	
	40,03		40,26		<del>159,40</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SD14.1	40,10	40,06	40,54	40,41	161,20	161,05
	40,04		40,50		160,90	
	40,03		40,20		<del>160,90</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SD14.2	40,18	40,15	40,52	40,41	161,60	161,30
	40,15		40,28		161,00	
	40,12		40,43		<del>161,00</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SD14.3	40,08	40,13	40,13	40,11	161,70	161,30
	40,13		40,12		160,90	
	40,18		40,09		<del>160,90</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MB14.1	40,07	40,11	39,94	40,24	160,90	160,70
	40,04		40,37		160,50	
	40,22		40,40		<del>160,50</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MB14.2	40,08	40,17	40,03	40,07	161,00	160,95
	40,29		39,92		160,90	
	40,14		40,27		<del>160,90</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MB14.3	39,91	39,91	40,03	40,00	160,90	160,85
	39,92		40,00		160,80	
	39,91		39,98		<del>160,80</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MD14.1	39,95	39,96	40,46	40,34	159,20	159,15
	39,94		40,40		159,10	
	39,98		40,15		<del>159,10</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MD14.2	39,91	39,92	40,27	40,21	159,40	159,45
	39,94		40,41		159,50	
	39,91		39,95		<del>159,50</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MD14.3	40,05	40,01	40,51	40,52	159,50	159,45
	39,97		40,57		159,40	
	40,01		40,47		<del>159,40</del>	



**28 døgns prøver**

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
B28.1	40,15	40,04	41,46	41,19	160,50	160,55
	39,98		41,11		160,60	
	39,98		41,01		<del>160,60</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
B28.2	40,05	40,09	41,34	40,96	160,80	160,90
	40,16		40,89		161,00	
	40,07		40,66		<del>161,00</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
B28.3	40,02	40,03	41,48	41,19	161,00	161,10
	40,05		41,15		161,20	
	40,02		40,94		<del>161,20</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
D28.1	40,05	40,06	39,99	39,98	161,40	161,25
	40,05		39,83		161,10	
	40,08		40,12		<del>161,10</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
D28.2	40,07	40,11	39,42	39,76	161,70	161,45
	40,06		39,88		161,20	
	40,21		39,97		<del>161,20</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
D28.3	40,09	40,10	39,79	39,97	161,50	161,30
	40,06		39,80		161,10	
	40,16		40,32		<del>161,10</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
C28.1	40,01	40,00	40,24	40,24	160,00	159,80
	40,05		40,09		159,60	
	39,95		40,40		<del>159,60</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
C28.2	40,16	40,07	40,27	40,22	160,10	159,90
	40,04		40,12		159,70	
	40,01		40,27		<del>159,70</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
C28.3	40,07	40,13	40,16	40,08	160,30	160,05
	40,29		40,08		159,80	
	40,03		40,01		<del>159,80</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
A28.1	39,93	39,97	40,38	40,50	160,10	160,15
	39,94		40,45		160,20	
	40,04		40,66		<del>160,20</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
A28.2	40,09	40,02	40,48	40,50	160,30	160,30
	40,04		40,45		160,30	
	39,94		40,58		<del>160,30</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
A28.3	40,10	40,01	40,55	40,46	160,50	160,50
	40,01		40,41		160,50	
	39,93		40,41		<del>160,50</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
B28-II.1	39,96	39,93	40,13	40,25	159,70	159,80
	39,99		40,05		159,90	
	39,85		40,57		<del>159,90</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
B28-II.2	39,93	39,94	40,13	40,30	159,70	159,85
	39,87		40,20		160,00	
	40,03		40,58		<del>160,00</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
B28-II.3	39,91	39,90	40,16	40,27	159,60	159,75
	39,88		40,33		159,90	
	39,91		40,31		<del>159,90</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MB28.1	40,03	39,97	40,76	40,47	159,90	159,80
	39,98		40,49		159,70	
	39,90		40,15		<del>159,70</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MB28.2	39,95	40,01	40,67	40,46	159,70	159,70
	40,15		40,42		159,70	
	39,92		40,28		<del>159,70</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MB28.3	Prøven er brugt til forsøg med porøsitet og densitet samt kapillarsugning					

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MD28.1	40,05	40,02	40,22	40,16	160,80	160,90
	39,96		40,13		161,00	
	40,05		40,13		<del>161,00</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MD28.2	40,17	40,12	40,37	40,21	160,80	160,80
	40,15		40,23		160,80	
	40,04		40,03		<del>160,80</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
MD28.3	40,03	39,96	40,36	40,26	160,80	160,70
	39,94		40,35		160,60	
	39,92		40,06		<del>160,60</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SB28.1	40,16	40,11	39,90	40,26	161,00	160,90
	40,03		40,22		160,80	
	40,13		40,66		<del>160,80</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SB28.2	40,07	40,03	39,91	40,16	161,10	160,85
	40,05		39,97		160,60	
	39,97		40,61		<del>160,60</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SB28.3	Prøven er brugt til forsøg med porøsitet og densitet samt kapillarsugning					

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SD28.1	40,12	40,14	40,51	40,47	161,20	161,25
	40,21		40,30		161,30	
	40,09		40,59		<del>161,30</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SD28.2	40,17	40,10	40,54	40,57	161,20	161,25
	39,98		40,52		161,30	
	40,14		40,64		<del>161,30</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
SD28.3	39,95	39,98	40,09	40,13	161,30	161,25
	39,93		40,19		161,20	
	40,06		40,10		<del>161,20</del>	

**42 døgns prøver**

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
B42.1	39,96	40,00	40,43	40,14	160,10	159,95
	40,07		40,18		159,80	
	39,98		39,81		<del>160,10</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
B42.2	39,81	39,99	40,59	40,38	160,30	160,20
	40,10		40,31		160,10	
	40,05		40,25		<del>160,30</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
B42.3	40,14	40,19	40,37	40,27	160,60	160,45
	40,22		40,24		160,30	
	40,21		40,21		<del>160,60</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
C42.1	40,04	40,04	40,07	40,17	161,10	160,90
	40,03		40,09		160,70	
	40,05		40,34		<del>161,10</del>	





Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
C42.2	40,01	39,98	40,40	40,35	160,60	160,75
	39,94		40,24		160,90	
	39,99		40,41		<del>160,60</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
C42.3	40,00	39,98	40,23	40,24	160,50	160,30
	39,95		40,22		160,10	
	39,99		40,28		<del>160,50</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
D42.1	40,06	40,13	40,39	40,30	162,50	162,50
	40,04		40,49		162,50	
	40,28		40,03		<del>162,50</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
D42.2	40,04	40,16	40,52	40,31	162,10	162,25
	40,17		40,19		162,40	
	40,26		40,23		<del>162,10</del>	

Emne	bredde	snit	højden	snit	længden	snit
D42.3	40,13	40,36	40,24	40,20	162,20	162,25
	40,36		40,25		162,30	
	40,60		40,10		<del>162,20</del>	

Prøve	Snit	Snit	Snit	Snit	Middel densitet
	7-døgn	14-døgn	28-døgn	42-døgn	
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
A	2256,12	2218,18	2255,29	2234,46	<b>2241,01</b>
B	2215,48	2235,62	2235,24	2207,58	<b>2223,48</b>
C	2181,20	2176,96	2191,11	2219,63	<b>2192,23</b>
D	2165,85	2175,83	2160,03	2173,95	<b>2168,91</b>
MB	2255,59	2263,65	2267,28		<b>2262,17</b>
MD	2263,52	2259,56	2277,20		<b>2266,76</b>
SB	2231,46	2221,35	2244,20		<b>2232,34</b>
SD	2176,14	2169,60	2181,36		<b>2175,70</b>

## Målinger for IC

### Vandopløselige anioner

Prøve	Afvejet [g]	Tilsat [mL]	Cl		NO3		SO4	
			[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]
D 1	10,00	50,00	19,4846	97,4230	0,8537	4,2683	2069,4205	10347,1026
D 2	10,00	50,00	17,2173	86,0864	0,6375	3,1873	2074,7441	10373,7205
D 3	10,00	50,00	21,2167	106,0834	0,7427	3,7134	1995,2475	9976,2374
<b>Middel</b>			<b>19,3062</b>	<b>96,5309</b>	<b>0,7446</b>	<b>3,7230</b>	<b>2046,4707</b>	<b>10232,3535</b>

### Udvaskning

Prøve	Afvejet [g]	Tilsat [mL]	Cl		NO3		SO4	
			[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]
D A28	10,00	50,00	10,0657	50,3286	4,6561	23,2806	3,7327	18,6637
D B28	10,00	50,00	10,7046	53,5231	3,3385	16,6924	3,4047	17,0236
D D14	10,00	50,00	12,3421	61,7104	1,2181	6,0904	3,4537	17,2685
D SB7	10,00	50,00	9,0254	45,1270	5,0103	25,0515	3,3054	16,5269
D MB7	10,00	50,00	8,9042	44,5209	4,3439	21,7193	3,6188	18,0939
<b>Maks</b>			<b>12,3421</b>	<b>61,7104</b>	<b>5,0103</b>	<b>25,0515</b>	<b>3,7327</b>	<b>18,6637</b>

## Målinger for ICP

### Oplukning

Prøve	Afvejet [g]	Tilsat [mL]	Al		Cd		Cr	
			[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]
D 1	1,00	100,00	199,8930	19989,3000	0,0216	2,1558	0,2922	29,2153
D 2	1,00	100,00	205,4970	20549,7000	0,0223	2,2313	0,2933	29,3286
D 3	1,00	100,00	229,1280	22912,8000	0,0224	2,2400	0,3041	30,4072
<b>Middel</b>			<b>211,5060</b>	<b>21150,6000</b>	<b>0,0221</b>	<b>2,2090</b>	<b>0,2965</b>	<b>29,6504</b>

Prøve	Afvejet [g]	Tilsat [mL]	Cu		Ni		Pb	
			[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]
D 1	1,00	100,00	7,0564	705,6400	0,3485	34,8469	0,9994	99,9364
D 2	1,00	100,00	7,1067	710,6700	0,3468	34,6764	1,0280	102,7970
D 3	1,00	100,00	7,1693	716,9250	0,3600	36,0040	1,0414	104,1430
<b>Middel</b>			<b>7,1108</b>	<b>711,0783</b>	<b>0,3518</b>	<b>35,1758</b>	<b>1,0229</b>	<b>102,2921</b>

Prøve	Afvejet [g]	Tilsat [mL]	Zn		Na		K	
			[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]
D 1	1,00	100,00	29,0071	2900,7100	45,0943	4509,4300	135,4230	13542,3000
D 2	1,00	100,00	29,6001	2960,0100	45,5487	4554,8700	137,8310	13783,1000
D 3	1,00	100,00	33,1196	3311,9600	46,0575	4605,7500	157,2290	15722,9000
<b>Middel</b>			<b>30,5756</b>	<b>3057,5600</b>	<b>45,5668</b>	<b>4556,6833</b>	<b>143,4943</b>	<b>14349,4333</b>

Prøve	Afvejet [g]	Tilsat [mL]	Fe		P	
			[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]
D1	1,00	100,00	412,4090	41240,9000	1524,4500	152445,0000
D2	1,00	100,00	424,9460	42494,6000	1560,7500	156075,0000
D3	1,00	100,00	483,6650	48366,5000	1748,3700	174837,0000
<b>Middel</b>			<b>440,3400</b>	<b>44034,0000</b>	<b>1611,1900</b>	<b>161119,0000</b>

## Målinger for ICP

### Udvaskning

Prøve	Afvejet [g]	Tilsat [mL]	Al		Ca		Cd	
			[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]
Gr D D1	10,00	50,00	0,5658	2,8292	688,2000	3441,0000	0,0000	0,0000
Gr D A28	10,00	50,00	0,2960	1,4799	839,2090	4196,0450	0,0000	0,0000
Gr D MB7	10,00	50,00	0,4416	2,2079	766,3400	3831,7000	0,0000	0,0000
Gr D SB7	10,00	50,00	0,4395	2,1975	793,7590	3968,7950	0,0008	0,0041
Gr D B2	10,00	50,00	0,5057	2,5283	731,3010	3656,5050	0,0000	0,0000
<b>Maks</b>			<b>0,5658</b>	<b>2,8292</b>	<b>839,2090</b>	<b>4196,0450</b>	<b>0,0008</b>	<b>0,0041</b>

Prøve	Afvejet [g]	Tilsat [mL]	Cr		Cu		Fe	
			[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]
Gr D D1	10,00	50,00	0,0052	0,0259	0,0194	0,0969	0,0440	0,2200
Gr D A28	10,00	50,00	0,0155	0,0777	0,0105	0,0524	0,0237	0,1186
Gr D MB7	10,00	50,00	0,0135	0,0676	0,0059	0,0293	0,0366	0,1828
Gr D SB7	10,00	50,00	0,0062	0,0312	0,0074	0,0371	0,0436	0,2179
Gr D B2	10,00	50,00	0,0094	0,0470	0,0060	0,0298	0,0318	0,1591
<b>Maks</b>			<b>0,0155</b>	<b>0,0777</b>	<b>0,0194</b>	<b>0,0969</b>	<b>0,0440</b>	<b>0,2200</b>

Prøve	Afvejet [g]	Tilsat [mL]	K		Mg		Ni	
			[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]
Gr D D1	10,00	50,00	105,7450	528,7250	0,0094	0,0470	0,0000	0,0000
Gr D A28	10,00	50,00	75,5565	377,7825	0,0097	0,0487	0,0000	0,0000
Gr D MB7	10,00	50,00	121,6470	608,2350	0,0186	0,0928	0,0000	0,0000
Gr D SB7	10,00	50,00	71,6176	358,0880	0,0134	0,0669	0,0000	0,0000
Gr D B2	10,00	50,00	80,6083	403,0415	0,0162	0,0811	0,0000	0,0000
<b>Maks</b>			<b>121,6470</b>	<b>608,2350</b>	<b>0,0186</b>	<b>0,0928</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>

Prøve	Afvejet [g]	Tilsat [mL]	Pb		Zn		Na	
			[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]	[mg/L]	[mg/kg]
Gr D D1	10,00	50,00	0,0148	0,0742	0,0136	0,0682	50,6422	253,2110
Gr D A28	10,00	50,00	0,0097	0,0485	0,0015	0,0073	49,2433	246,2165
Gr D MB7	10,00	50,00	0,0161	0,0807	0,0068	0,0338	63,2931	316,4655
Gr D SB7	10,00	50,00	0,0185	0,0923	0,0039	0,0197	41,1898	205,9490
Gr D B2	10,00	50,00	0,0088	0,0441	0,0042	0,0210	44,9402	224,7010
<b>Maks</b>			<b>0,0185</b>	<b>0,0923</b>	<b>0,0136</b>	<b>0,0682</b>	<b>63,2931</b>	<b>316,4655</b>



## Karakteristik af slamaske

### Vandindhold

	07.09-2012			10.09-12	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			24.10-12	vandindhold	
	glas	glas + våd aske	aske	glas + tør aske	[g]	[%]
1	97,36	147,36	50,00	147,29	0,07	0,1400
2	105,24	145,24	40,00	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
--------	--------	------

**Bufferkapacitet:**

Aske vejet LSA: 20 gram  
 Destileret vand: 300 mL

Tid		Tilsat HCl
[min]	pH	[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

Aske vejet LSA depot: 20 gram  
 Destileret vand: 300 mL

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

**Vandopløselighed:**

Nr.	11.09.2012				12.09.20	13.09.2012	
	Filter	Petriskål	Skål + aske incl filter	Aske vægt	Aske vægt	Aske vægt	Beregnet aske tab
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	%
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
--------	------

**Porøsitet og densitet:**

Type	Prøve	Tør vægt	Mættet under vand	Mættet over vand	Volume n faststof	volumen af åbne porrer	Porrevolumen	Tørdensitet	Mættet overflade-tør densitet
	[nr]	[g]	[g]	[g]	[L]	[L]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
A	69	258,86	160,74	283,67	0,1229	0,0248	16,8	2105,75	2307,57
A	68	256,98	159,55	281,73	0,1222	0,0248	16,8	2103,29	2305,86
A	67	257,71	160,08	282,18	0,1221	0,0245	16,7	2110,65	2311,06
MB28	2	259,02	160,76	284,65	0,1239	0,0256	17,1	2090,73	2297,60
SB28	2	262,17	163,22	291,01	0,1278	0,0288	18,4	2051,57	2277,25

**Kapillarsugning:**

Prøve Type	A	A	A	MB28	SB28
Bredde[mm]	40,1	39,50	40,8	39,81	39,96
længde[mm]	39,95	39,80	39,7	40,32	39,98
højde[mm]	75	76,00	76,5	78,33	79,01
start vægt[g]	257,71	256,98	258,86	262,85	256,76
vægt 1 min[g]	258,4	257,47	259,56	263,30	257,38
vægt 2 min[g]	-	-	-	263,49	257,68
vægt 4 min[g]	258,5	257,67	259,71	263,69	257,99
vægt 8 min[g]	258,68	257,75	259,83	263,98	258,43
vægt 16 min[g]	258,98	258,03	260,18	264,38	259,04
vægt 32 min[g]	259,56	258,45	260,73	265,03	259,86
vægt 60 min[g]	260,35	259,09	261,55	265,81	260,79
vægt 120 min[g]	261,64	260,18	262,8	267,04	262,15
vægt 240 min[g]	263,86	261,96	264,69	268,83	263,96

**PH værdi af ubehandlet aske**

11.09.2012

Prøve nr.	PH	°C
1	12,48	22,5
2	12,46	23,4
3	12,46	23,1
Middel	12,47	23,0

5 gram aske  
12,5 mL 1 M KCl

01.11.2012

Prøve nr.	PH	°C
1	12,45	22,30
2	12,43	22,00
3	12,34	22,10
Middel	12,41	23,0

5 gram aske  
12,5 mL 1 M KCl

**PH værdi af syrevasket aske**

12.11.2012

Prøve nr.	PH	°C
1	3,58	22,30
2	3,59	22,30
3	3,59	22,30
Middel	3,59	22,3

5 gram aske  
12,5 mL 1 M KCl

20.11.2012

Prøve nr.	PH	°C
1	3,58	21,80
2	3,55	21,80
3	3,51	21,80
Middel	3,55	21,8

5 gram aske  
12,5 mL 1 M KCl

06.12.2012

Prøve nr.	PH	°C
1	3,11	21,70
2	3,27	20,90
3	3,27	20,20
Middel	3,22	20,93

5 gram aske  
12,5 mL 1 M KCl

**Ledningsevne i Aske**

11.09.2012

Prøve nr.	mS/cm	°C
1	7,82	23,9
2	7,79	23,9
3	7,82	23,9
Middel	7,81	23,9

## Karakteristik af LSA depot - Udleveret af gr. B

### Vandindhold

Prøve [nr]	Før tørring		Efter tørring		Resultater	
	Glas [g]	Aske [g]	Aske + glas [g]	Aske [g]	Vand [g]	Vandindhold [%]
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	8,30
2	8,26
3	8,31

### Glødetab

prøvenr. []	Før varme		Efter varme		Glødetab %
	Digel [g]	Digel + aske [g]	Digel + aske [g]	Glødetab	
1	15,4529	17,9766	17,9477	0,1608	
2	15,5352	18,0202	17,9905	0,1648	
3	16,1231	18,6273	18,5980	0,1573	

### Vandopløselighed

Prøvenr.	Før varme		Efter varme		
	Filter	Aske	Filter + aske	Filter + aske	tab i procent
1	4,32	208,90	213,22	211,56	0,78
2	4,40	202,18	206,58	204,74	0,89

**Bufferkapacitet**

<b>Vægt af aske</b>		20,03	g
<b>Vand</b>		300	g
<b>HCl</b>		1	ml/30 min
Forsøg	PH	tilsat	Tid
[nr]	[pH]	[ml]	[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

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?

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

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?

Hvem aftager slamasken?

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

Hvor meget er det nu?

På forhånd tak

Mvh Morten Reiff og Morten Meldgaard

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**

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 slammaske 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 er 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.

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.

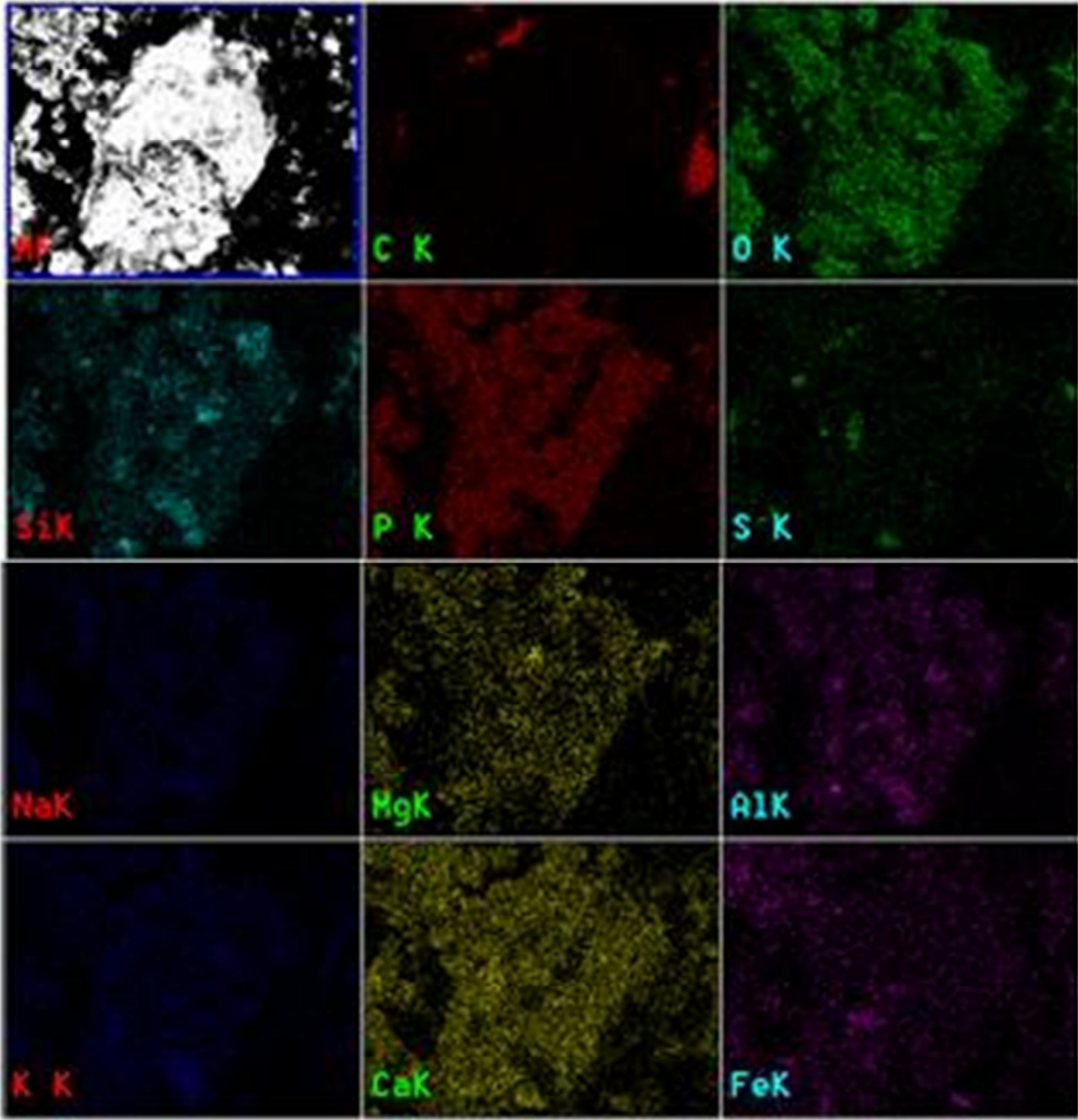
Der var to problemer med slammaske i beton;

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.

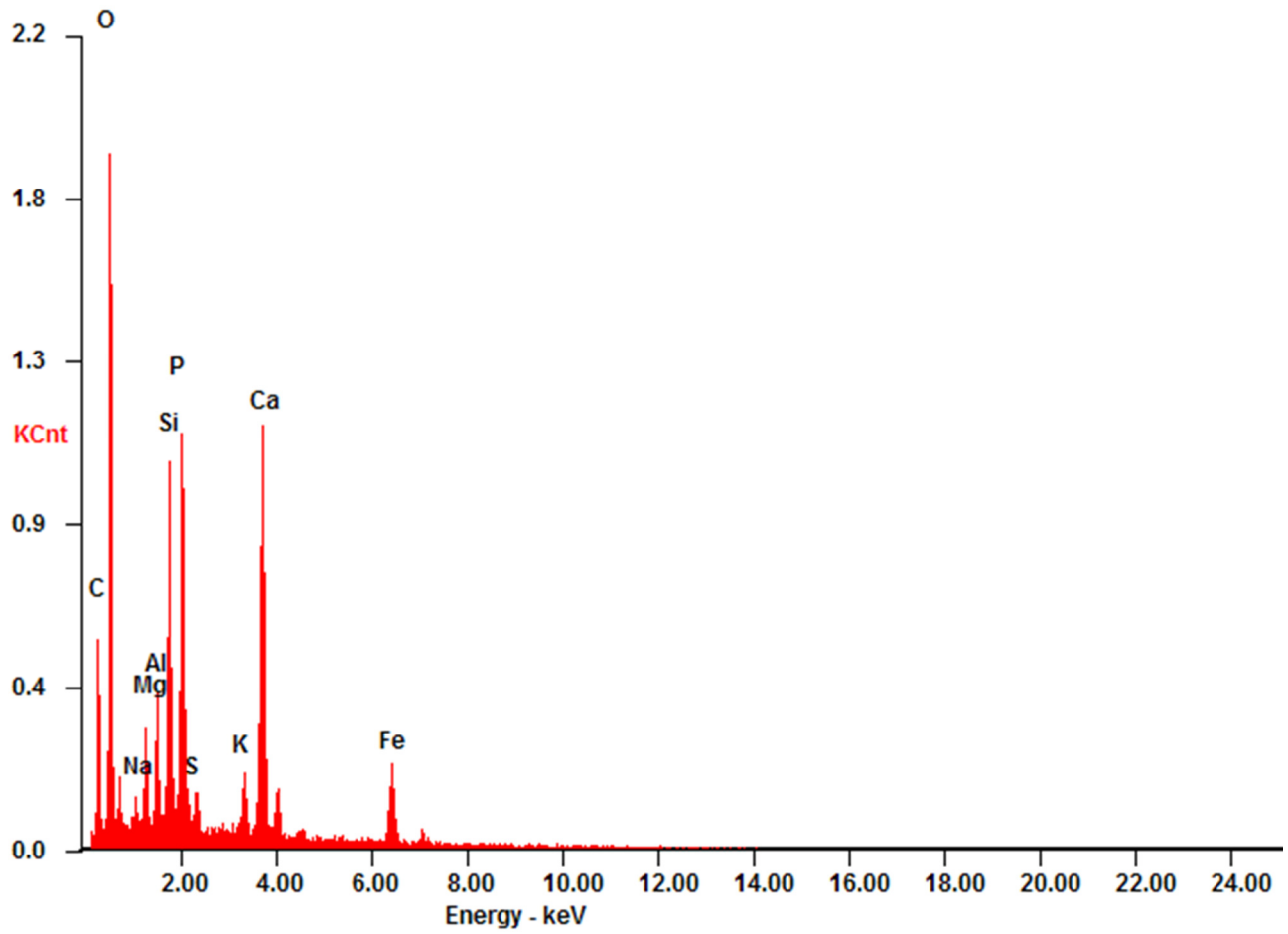
Med venlig hilsen

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

Mapping af LSA



C:\SharedData\Brug af asker i beton\Gr D\Lynetten ny x1000.spc 13-Sep-2012 10:26:28  
LSecs : 100



c:\edax32\genesis\genspc.spc

Label :

Acquisition Time : 10:21:57 Date:13-Sep-2012

kV : 14.99 Tilt: 0.40 Take-off:35.26 AmpT : 102.4

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

EDAX ZAF Quantification (Standardless)

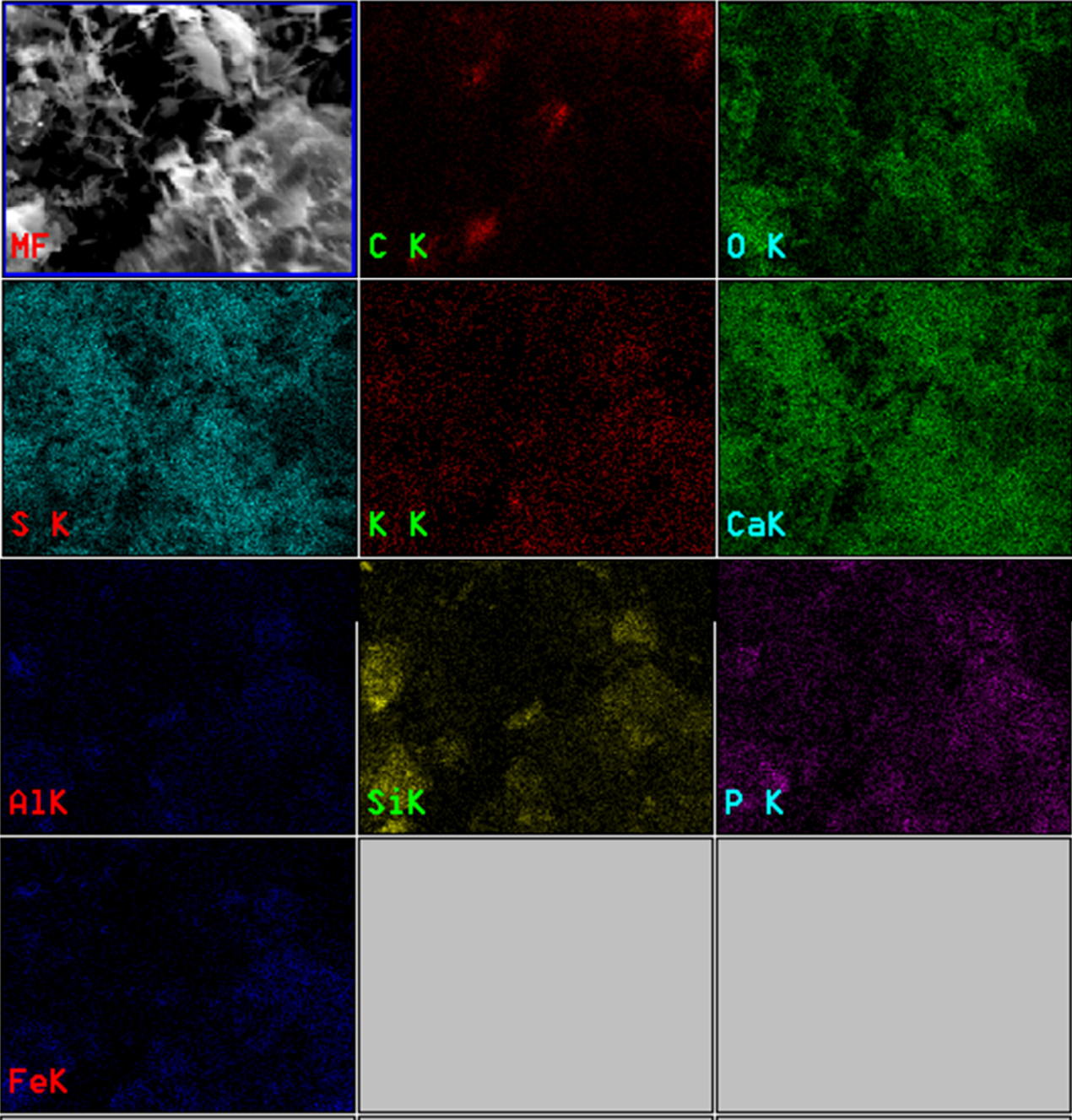
Element Normalized

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

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	17.95	29.42	0.0441	1.0550	0.2330	1.0004
O K	37.42	46.06	0.1017	1.0349	0.2624	1.0003
NaK	0.61	0.52	0.0027	0.9656	0.4535	1.0016
MgK	1.81	1.47	0.0108	0.9890	0.6038	1.0028
AlK	2.09	1.53	0.0145	0.9584	0.7214	1.0048
SiK	5.77	4.04	0.0460	0.9830	0.8076	1.0056
P K	8.67	5.51	0.0697	0.9486	0.8445	1.0036
S K	0.70	0.43	0.0059	0.9723	0.8578	1.0055
K K	1.90	0.96	0.0175	0.9326	0.9630	1.0246
CaK	13.84	6.80	0.1289	0.9525	0.9737	1.0036
FeK	9.24	3.26	0.0790	0.8583	0.9959	1.0000
Total	100.00	100.00				

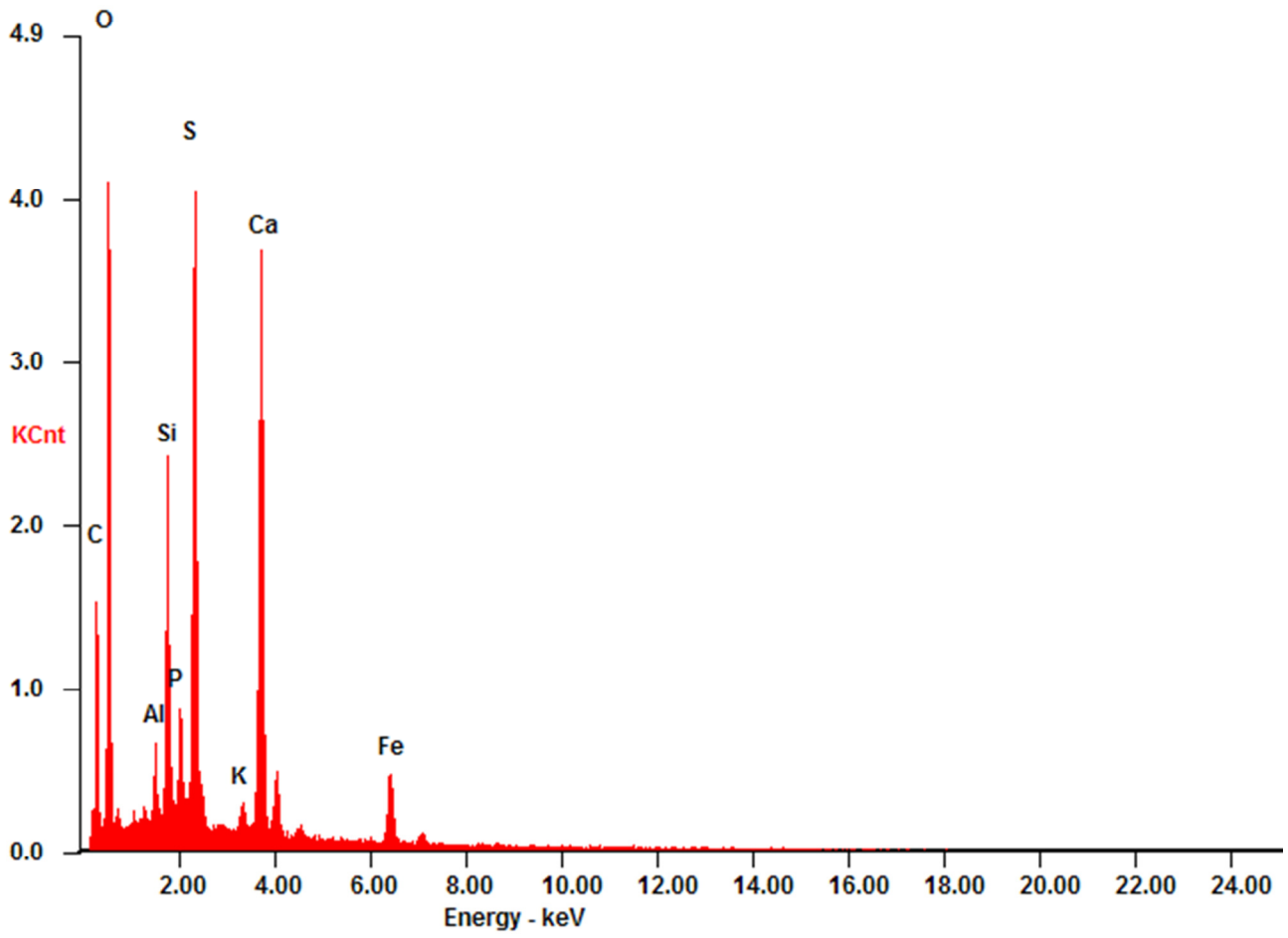
Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	28.59	1.38	1.96	20.72
O K	121.07	2.21	0.93	54.78
NaK	4.72	5.58	8.44	0.85
MgK	18.97	5.90	2.92	3.22
AlK	24.38	6.44	2.50	3.79
SiK	70.07	7.23	1.31	9.69
P K	93.61	6.80	1.11	13.77
S K	7.36	5.49	5.82	1.34
K K	15.98	4.41	3.12	3.62
CaK	103.67	3.93	1.02	26.38
FeK	22.70	2.55	2.32	8.90

Mapping af syrevasket LSA



asker i beton\Gr D\knust og syrevasket\lynette ny syrevasket.spc

Label : LSecs : 100



c:\edax32\genesis\genspc.spc

Label :

Acquisition Time : 10:46:15 Date:16-Nov-2012

kV : 19.98 Tilt: 0.40 Take-off:35.33 AmpT : 51.2

Detector Type:SUTW, Sapphire Resolution:131.41 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	25.37	37.27	0.0547	1.0340	0.2085	1.0004
O K	42.56	46.95	0.0862	1.0167	0.1991	1.0002
AlK	0.92	0.60	0.0057	0.9469	0.6481	1.0052
SiK	4.30	2.70	0.0322	0.9746	0.7638	1.0066
P K	1.61	0.92	0.0125	0.9380	0.8145	1.0100
S K	8.77	4.83	0.0739	0.9581	0.8745	1.0060
K K	0.56	0.25	0.0050	0.9236	0.9469	1.0245
CaK	11.62	5.12	0.1066	0.9455	0.9681	1.0025
FeK	4.28	1.35	0.0367	0.8586	0.9972	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	78.52	2.61	1.17	30.08
O K	267.27	4.66	0.62	57.35
AlK	30.63	17.15	2.63	1.79
SiK	162.69	19.75	0.87	8.24
P K	56.98	19.76	1.72	2.88
S K	323.41	17.18	0.58	18.82
K K	17.40	14.46	3.91	1.20
CaK	335.43	12.82	0.57	26.16
FeK	52.90	6.91	1.54	7.66

**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)