

Alternative Asker i Beton

Undersøgelse af slamaske fra Lundtofte Renseanlæg som
puzzolan i beton

Bachelor of Science

Mikkel Vangsgård s093409 & Nikolaj Haubroe s093427

07-01-2013



Forord

Denne rapport er udarbejdet i forbindelse med bachelorafslutning, udført i perioden 3. september 2012 til 7. januar 2013 ved DTU Byg, Institut for Byggeri og Anlæg, med vejledning fra Lisbeth M. Ottosen, Per Goltermann og Pernille Erland Jensen.

Projektet er udført med henblik på at undersøge mulighederne for, at benytte slamaske fra Lundtofte Renseanlæg som puzzolan i beton. Rapporten er tiltænkt studerende på DTU BYG og undervisere på DTU, og det forventes at læser har grundlæggende viden omkring emnet.

Der rettes en stor tak til Ebba Cederberg Schnell, Christina Winther Dufke og Sabrina Madsen for hjælp og vejledning under det eksperimentelle arbejde. Der skal også lyde en tak til sideløbende projektgrupper, for et godt samarbejde, og udveksling af tanker og resultater. Ydermere, rettes specielt stort tak til Lisbeth M. Ottosen for vejledning og sparring gennem forløbet, og for at tildele os dette spændende projekt.

Rapporten er udarbejdet af Mikkel Vangsgård og Nikolaj Haubroe. Projektet tæller for 20 ECTS.

DTU, Kongens Lyngby, 7. januar 2012.

Mikkel Vangsgård
s093409

Nikolaj Haubroe
s094327

Abstract

The purpose of this study is to prove that incinerator sewage sludge ash (ISSA) can be used as an additive in concrete, and thereby reduce the huge amount of ashes concealed every year. Furthermore, the overarching aim of ISSA studies is to reduce the use of cement, and the associated costs. The ISSA examined throughout this project is a by-product of the sewage water cleaning facility at Lundtofte Renseanlæg. Compressive strength was tested, and evaluated by using the strength activity index (SAI) from ASTM (American Society of Testing and Materials). The study showed that washed ISSA had an, up to 28 percent, increased strength compared to unwashed ISSA. The ISSA was analyzed in a laboratory to understand its chemical components, and the effects of washing it. Moreover, mortar with washed ISSA has shown to pass the SAI. Due to legislation, the mortar was pulverized and tested for leaching. The washed ISSA classified as a category 3 under the commandment by Miljøstyrelsen (Miljøstyrelsen, 2010).

Resumé

Formålet med dette projekt er, at bevise at slamaske kan bruges som tilsætning i beton, og dermed reducere deponeringen af dette. Ydermere, er det overordnede mål at erstatte en del af cementen, og nedbringe omkostningerne der følger med. Slamasken er slutproduktet af spildevandsrensningen fra Lundtofte Renseanlæg, og kaldes LSA (Lundtofte Slamaske). Trykstyrken er testet, og evalueres ved strength activity index (SAI) som er udarbejdet af ASTM. Undersøgelserne viste at vasket LSA, havde en forbedret effekt på op til 28 procent, i forhold til uvasket LSA. LSA er blevet undersøgt i laboratorium, for at forstå den kemiske sammensætning, samt effekten der opnås ved at vaske den. Den vaskede LSA har vist sig at bestå SAI. I henhold til lovkrav, blev mørtlen pulveriseret og testet for udvaskning af giftige stoffer. LSA klassificeres som kategori 3 ifølge Miljøstyrelsens bekendtgørelse (Miljøstyrelsen, 2010).

Indholdsfortegnelse

Forord	2
Abstract	3
Resumé	4
Indholdsfortegnelse.....	5
Figuroversigt.....	7
Tabeloversigt	7
Bilagsoversigt.....	8
1. Indledning.....	9
1.1 Projektet	10
2. Teori.....	11
2.1 Kort om betons historie.....	11
2.2 Betons sammensætning	12
2.2.1 Grundlæggende	12
2.2.2 Cement	12
2.2.3 Andre bindemidler.....	13
2.2.4 Tilslag	14
2.2.5 Armering	15
2.2.6 Andre additiver	15
2.2.7 Sulfatangreb og alkalikiselreaktioner	15
2.3 Styrke og struktur	16
2.3.1 Styrke.....	16
2.3.2 Porøsitet og densitet	16
2.3.3 Kapillarsugning	18
2.4 Leaching af tungmetaller.....	20
3. Beskrivelser og metoder.....	21
3.1 Blanding, støbning og håndtering af mørtelprøver	21
3.2 Analyser af mørtelprøver	22
3.2.1 Styrketest.....	22
3.2.2 Ultralydstest	23
3.2.3 Porøsitet og densitet	24
3.2.4 Kapillarsugning	24
3.2.5 Leaching af tungmetaller	25

3.3	Askeanalyser	25
3.3.1	Analyse af bufferværdi	25
3.3.2	Analyse af glødetab	26
3.3.3	Analyse af ledningsevne	26
3.3.4	Analyse af pH-værdi	26
3.3.5	Analyse af vandindhold	27
3.3.6	Analyse af vandopløselighed	27
3.3.7	Oplukning af Jordprøve	28
3.3.8	Forberedelse til IC.....	29
3.3.9	IC.....	29
3.3.10	ICP.....	29
3.3.11	SEM.....	30
4.	Resultater og diskussion.....	31
4.1	Styrke.....	31
4.1.1	Styrkeudvikling af mørtelprøver.....	31
4.1.2	Strength Activity Index	34
4.2	Analyser	36
4.2.1	Ion-indhold i LSA.....	36
4.2.2	Surhed af LSA.....	37
4.2.3	Indhold af vand og organiske stoffer.....	38
4.2.4	Indhold af grundstoffer	38
4.2.5	SEM.....	39
4.2.6	Leaching af tungmetaller.....	41
4.3	Mørtelprøvens andre egenskaber	42
4.3.1	Kapillarsugning	42
4.3.2	Porøsitet og densitet	43
4.3.3	Ultralydstest	43
5.	Konklusion	44
6.	Videre arbejde	45
7.	Litteraturliste.....	46
8.	Bilag	48

Figuroversigt

Figur 1 - (Mølleåværket, n.d, Renseanlæg Lundtofte, 2800 Kgs. Lyngby)	9
Figur 2 - (Colosseum, n.d.)	11
Figur 3 - (2012. Flyveaske struktur. SEM. DTU 118)	13
Figur 4 - Teoretisk grafisk afbildning af kapillarsugning (DTU BYG)	19
Figur 5 - (2012. Tværsnit af mørtelprøver efter styrketest. DTU 119)	22
Figur 6 - (2012. Opstilling af tryktest. DTU 119)	23
Figur 7 - (2012. forsøgsopstilling til vandopløselighed. DTU 118)	28
Figur 8 - Styrkeudvikling for uvasket LSA	31
Figur 9 - Styrkeudvikling for vasket LSA	32
Figur 10 - Styrkeudvikling for LSA	33
Figur 11 - IC for vasket og uvasket LSA	36
Figur 12 - Ion-indhold i forhold til cement	37
Figur 13 - Bufferkapacitet	37
Figur 14 - ICP for grundstoffer	38
Figur 15 - LSA vasket struktur. Tv. overblik & th. askekorn. (2012. LSA struktur. SEM. DTU 118)	39
Figur 16 - Flyveaskes struktur, (2012. Flyveaske struktur. SEM. DTU 118).	40
Figur 17 - Udviklingskurve for kapillarsugning	42

Tabeloversigt

Tabel 1 - Kapillaritet og modstandstal (Bygningsmaterialer, Gottfredsen og Nielsen, 2010, p.218)	19
Tabel 2 - Faststofindhold. (Miljøstyrelsen, 2010. Bilag 6 tabel 1, p.4-5)	20
Tabel 3 - Koncentration i eluat. (Miljøstyrelsen, 2010. Bilag 6 tabel 1, p.4-5)	20
Tabel 4 - Styrke i forhold til referenceprøven	33
Tabel 5 - Styrkeudvikling	34
Tabel 6 - Strengt Activity Index, SAI	34
Tabel 7 - Aktivitetsfaktor for 28 døgn	35
Tabel 8 - Faststofindhold	41
Tabel 9 - Koncentration i eluat	41
Tabel 10 - Porøsitet	43
Tabel 11 - Ultralydtest	43

Bilagsoversigt

- Bilag 1 - Bufferkapacitet
- Bilag 2 - pH-værdi
- Bilag 3 - Kapillarsugning
- Bilag 4 - Vandopløselighed
- Bilag 5 - Vandopløselige anioner
- Bilag 6 - Oplukning af jordprøve
- Bilag 7 - Leaching
- Bilag 8 - Glødetab
- Bilag 9 - Densitet og Porøsitet
- Bilag 10 - Styrkeprøvning og dimensioner af mørtelprøver
- Bilag 11 - Styrketest øvre og nedre grænser
- Bilag 12 - Støbeskemaer
- Bilag 13 - Bearbejdet data IC
- Bilag 14 - Bearbejdet data ICP
- Bilag 15 - SEM målinger
- Bilag 16 - Aktivitetsfaktor
- Bilag 17 - Bekendtgørelse om anvendelse af slagge og flyveaske, 2010, bilag 4
- Bilag 18 - Ledningsevne
- Bilag 19 - Vandindhold
- Bilag 20 - Appendixliste over forsøgsvejledninger
- Bilag 21 - Forsøgsvejledninger

1. Indledning

Vi lever i et moderne forbrugssamfund, og næsten uanset hvad vi foretager os som mennesker, er der affald involveret. Mad er pakket i plastik og glas, maskiner oser giftige stoffer, og vand og luft forurenes af industri og transport. Ses der på de sidste 15 år, er affald fra byggeri og anlæg steget med 104 %, affald fra service 209 % og husholdning 33 % (Miljøstyrelsen, 2011, p.22).

Når det kommer til menneskers egne naturlige efterladenskaber, tror de fleste at dette bare forsvinder i naturen. Faktum er at vores spildevand renses og afbrændes, men at der stadigvæk tilbagestår et restprodukt, der består af grundstoffer som ikke kan behandles yderligere. Dette restprodukt kaldes slamaske, og det deponeres blandt andet i svenske saltminer, hvor det hober sig op.

I en verden hvor affaldet ophober sig i jorden, i vandet og i luften, må vi kigge os omkring og undersøge hvad vi kan gøre for at bremse denne proces, inden planeten drukner i skidt. En del af løsningen er at genbruge så meget som muligt, hvilket der i de seneste år også har været stor fokus på indenfor industrien. Der bliver konstant opdaget nye metoder til at genanvende affaldet, men tal fra Miljøstyrelsen, viser at affaldsmængden forventes at stige til omkring år 2030, hvorefter den vil være konstant, jf. (Miljøstyrelsen, 2011, p.53). Selv med de sidste års fokus på genbrug, er der stadig meget der kan forbedres i denne sammenhæng.



Figur 1 - (Mølleåværket, n.d, Renseanlæg Lundtofte, 2800 Kgs. Lyngby)

Forbrændingsanlægget Mølleåværket ligger i Lundtofte, og er et yderst moderne renseanlæg, der behandler omkring 10 millioner m³ spildevand årligt, hvilket svarer til ca. 115.000 personer (Dansk kemi, 2004). Af den mængde slam der kommer ind, forsvinder ca. 91-93 %, og det tilbageværende er fuldstændigt frit for mikroorganismer, og er derfor ikke længere uhygiejnisk.

1.1 Projektet

Formålet med denne rapport er, at undersøge om hvorvidt slamaske fra Lundtofte Renseanlæg, kaldet LSA (Lundtofte slamaske), kan benyttes i beton. Skal dette være muligt, er det påkrævet at asken overholder en række lovkrav, vedrørende indhold og sammensætning. Skal det rent fysisk kunne lade sig gøre, kræver det at asken ikke modvirker processerne i beton, og dermed ødelægger egenskaberne.

Hvis det viser sig at asken kan bruges som puzzolan, altså være styrkegivende eller forbedre sammensætningen, kan der opstå en situation hvor byggeindustrien vil betale penge for at modtage slamaske, for at spare penge på cement. Et restprodukt som ellers ingen nytte gjorde, er dermed vendt til at være en værdifuld vare, hvilket udgør den økonomiske interesse i projektet.

For menneskeheden burde der være generelt interesse i, at kunne genanvende et af vores egne restprodukter, der i forvejen hober sig op.

Det er i artiklen af S. Donatello et al. (2009) bevist at knusning af slamaske giver en effekt, der er så god, at den kan bruges som puzzolan, ifølge ASTM International¹. Knusning er ikke en del af dette projekt, men der vil alligevel drages paralleller til dette emne.

Der er i projektet støbt mørtel med forskellig tilsætning af LSA, som er styrkeprøvet efter at have hærdet i op til 42 døgn. På baggrund af observationer ca. halvvejs i projektet, er der lavet mørtelprøver med LSA der forinden er blevet vasket. Mørtelprøverne er undersøgt for densitet, porøsitet og dens evne til at suge vand. Der testes for leaching, for at bestemme potentielt udledte stoffer.

Selve asken analyseres i laboratorium, for at give et billede af hvad denne består af, og hvilke egenskaber den har. Da vask af LSA har vist sig at være fordelagtig, er der lavet analyser før og efter, for at give et bud på hvad der sker med asken, og hvorfor den pludselig bliver bedre. Analyserne består blandt andet af IC og ICP, hvor saltindhold, og grundstofindhold undersøges, samt SEM hvorved der kan tages mikroskopiske billeder.

Det forventes af projektet, at nå frem til resultater der peger på at LSA kan benyttes i mørtel, til trods for evt. nedsat trykstyrke. Lovkrav der omhandler indhold af stoffer, skal være overholdt for at resultatet kan kaldes for en succes.

¹ American Society for Testing and Materials. Omtales ASTM fremover.

2. Teori

I dette afsnit præsenteres teorien for projektet, samt benyttede formler og værdier, brugt i resultater og diskussion. Afsnittet er inspireret af "Bygningsingeniørens materialer – uddrag af materialebogen" (Hansen, 2008).

2.1 Kort om betons historie

Beton som vi kender det i dag er ikke meget mere end 300 år gammelt, men selve metoden ved at bruge et hydraulisk bindemiddel til at skabe et hårdt og stærkt materiale, kan dateres tilbage til det gamle Rom. Man fandt ud af, at brændt kalk og vulkansk aske kunne reagere med vand, og binde sammen til ét materiale. Sammen med et tilslag af grus eller sand, blev dette materiale så hårdt og stærkt, at det var ideelt til at bygge med. Romerne havde især erfaret, at vulkansk aske fra byen Pozzuoli var særdeles velegnet, og denne har senere givet navn, til nogle af de bindemidler der bruges i dag.

Historiske bygningsværker såsom Pantheon og Colosseum, bygget i hhv. ca. 120 e. Kr. og 80 e. Kr., står i dag mere eller mindre som de gjorde den gang, ikke synderligt berørt af næsten 2000 år. Dog er den ene side af Colosseum styret sammen under jordskælv, men resterne er brugt til at lave kirker og andre bygninger, hvilket siger noget om materialets holdbarhed.

Under Roms fald gik viden om denne slags materiale midlertidigt tabt, og man mener ikke det er brugt før det blev genopdaget af forskere i det 18. århundrede. I 1824 blev der taget patent på Portland cement, som bygger på den cementteknologi vi kender fra nutidens byggerier.



Figur 2 - (Colosseum, n.d.)

2.2 Betons sammensætning

2.2.1 Grundlæggende

Grundlæggende består beton af et bindemiddel, der i reaktion med vand sammenholder sten og sand. Man kan sige at beton er en syntetisk sten, hvis egenskaber kan ændres alt efter ønske.

2.2.2 Cement

Det mest almindelige bindemiddel i beton er Portlandcement, der efterfølgende vil omtales som cement, og selve kemien omkring dette emne er meget avanceret. Emnet uddybes tilstrækkeligt til, at det kan diskuteres igennem opgaven.

Portlandcement består af en række kemiske forbindelser hvor nogle af de vigtigste er calciumoxid (CaO), siliciumoxid (SiO_2), aluminiumoxid (Al_2O_3) og jernoxid (Fe_2O_3). Ved brænding til sintring² dannes cementklinker, som blandt andet består af:

- Calciumsilikater
 - o C_3S , tricalciumsilikat også kaldet 'alite'. Kemisk sammensætning Ca_3SiO_5 .
 - o C_2S , dicalciumsilikat også kaldet 'belite'. Kemisk sammensætning Ca_2SiO_4 .

og

- C_3A , tricalciumaluminat, også kaldet 'celite'. Kemisk sammensætning $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$.
- C_4AF , tetracalcium-aluminatferrit, også kaldet 'ferrite'. Kemisk sammensætning $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$

(Hansen, 2008, p.51)

Forbindelsen C_3S har den bedste styrkeeffekt, udvikler sig hurtigt, og giver efter kort tid sammenhæng og styrke i betonen. C_2S har en langsom udvikling, og vil udvikle betonens styrke over længere tid. C_3A har en meget kraftig reaktion med vand, og for at undgå sprækker i strukturen tilsættes gips som regulator. Hverken C_3A eller C_4AF har den helt store styrkevirkning, men de er begge relativt store bestanddele af cementen, og er derfor væsentlige.

Ålborg-portland's basis-cement indeholder jf. Cementfremstilling (Ålborg Portland, 2012):

- C_3S ; 70 %
- C_2S ; 5 %
- C_3A ; 8 %
- C_4AF ; 12 %
- Andet ; 5 %

² Sintring er en proces hvor stoffer og mineraler ved delvis smeltning skaber en kemisk forbindelse.

2.2.3 Andre bindemidler

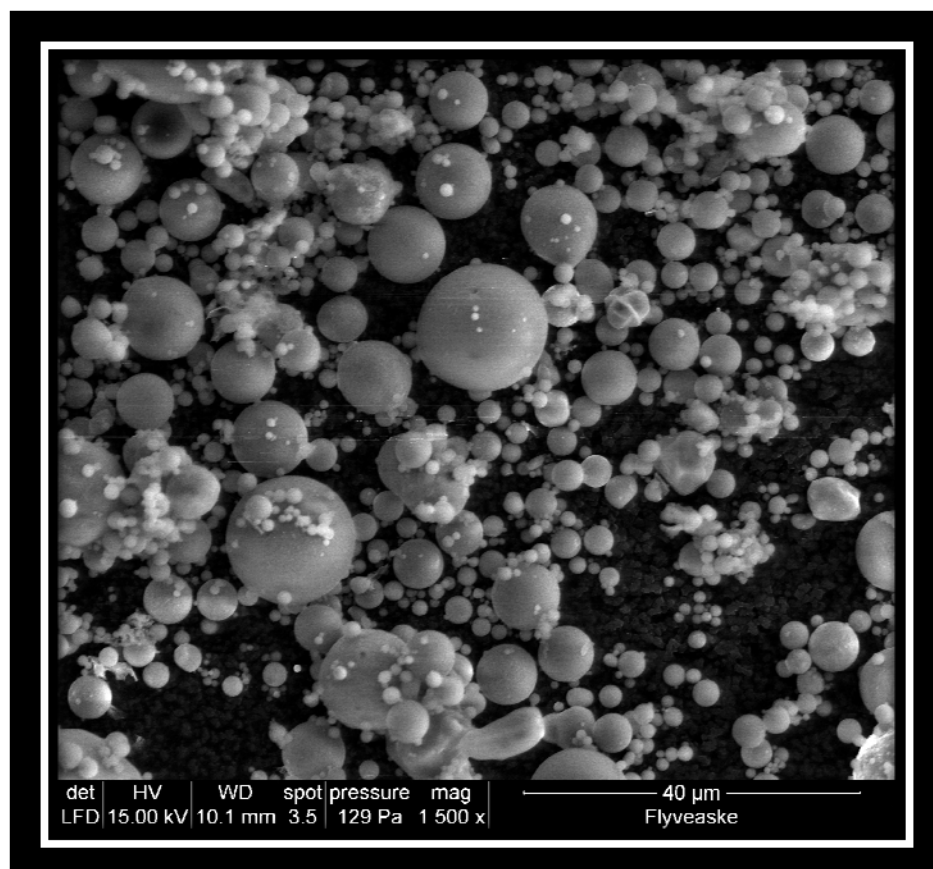
Cement er hovedingrediensen i beton, men den kan til dels erstattes af pulvermateriale såsom flyveaske og mikrosilica, også kaldet puzzolaner. At iblande puzzolaner har flere formål hvoraf den første er, at de faktisk kan medvirke til styrkeudviklingen.

Dernæst er flyveaske et affaldsprodukt der kommer af afbrænding, og er i de fleste tilfælde meget giftigt, da det indeholder tungmetaller. Når det indstøbes i beton pacificeres de giftige stoffer i materialet, og de udledes dermed ikke til naturen.

Hvis der kigges nærmere på kulflyveaskes kemiske sammensætning, ses det at den i høj grad indeholder nogle af de samme grundelementer som cement (Hansen, 2008, p.51):

- Siliciumoxid (SiO_2)
- Aluminiumoxid (Al_2O_3)
- Jernoxid (Fe_2O_3).

Flyveaske kan ikke alene reagere med vand, og danne stærke sammensætninger. Blandes det derimod med et calciumoxid-indeholdigt materiale som portlandcement, vil stofferne reagere som tidligere beskrevet.



Figur 3 - (2012. Flyveaske struktur. SEM. DTU 118)

Figur 3 viser flyveaske i forstørrelse (SEM). Kornene i flyveaske er som regel mindre end kornene i cement, hvilket giver en bedre pakning af materialet.

Flyveasken udfylder huller imellem cementkornene, og dermed kan der spares vand hvilket giver et bedre v/c-forhold. Flyveaskens runde form giver til og med smidighed i den nystøbte betonblanding.

Hvis det skal være muligt at erstatte cement med LSA, skal den indeholde nogle af de samme elementer som andre puzzolaner. Rent teoretisk ønskes det at opdage hovedparter af calciumoxid, siliciumoxid, aluminiumoxid eller jernoxid.

Ved Bolomeys formel (Hansen, 2008, p.63) udregnes puzzolanets aktivitetsfaktor k . Bolomeys formel for ikke luft-indblandede beton ser således ud:

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

Hvor,

$$f_c = \text{styrken [MPa]}$$

$$K = \text{cementfaktor (for basiscement = 32 [MPa] (Hansen, 2008, p. 63))}$$

$$v = \text{vandmængden [g]}$$

$$c = \text{cementmængden [g]}$$

$$k = \text{puzzolanets aktivitetsfaktor}$$

$$p = \text{puzzolanmængden [g]}$$

Da der kun er lavet indledende undersøgelser af LSA, kan det være vanskeligt at bestemme hvordan den opfører sig, og for at give et mere retvisende billede skal der laves mange undersøgelser. Dog vil det forsøges at regne LSA's aktivitetsfaktor. Alle variabler er kendt bortset fra k , og derfor løses for denne. Det nævnes at normale værdier for flyveaske er $k = 0,3 - 0,5$; og for mikrosilica $k = 3 - 5$, jf. (Hansen, 2008, p.64).

2.2.4 Tilslag

Tilslag er det der rent fysisk udgør størstedelen af beton, og som oftest består det af et stenmateriale i varierende størrelse. Der er en række vigtige faktorer der spiller ind, når der skal vælges tilslag til en beton, såsom:

- Mekaniske egenskaber
- Densitet og størrelse
- Porøsitet
- Tilstedeværelse af organiske stoffer
- Tolerance overfor temperaturpåvirkning

Hvis LSA skal kunne erstatte tilslag, skal den for det første være nogenlunde neutral i forhold til styrkeudvikling, og altså ikke have en ødelæggende effekt. Dernæst kan der kigges på indvirkning af densitet og porøsitet for mørtlen. Grænsen for indhold af organisk materiale som kan ødelægge strukturen ligger ifølge EN 450-1 (2005) på maksimalt 5 %.

Da der ved denne løsning ikke spares cement, vil det ikke have den store økonomiske gevinst, udover at besparelsen af deponeringen af LSA.

2.2.5 Armering

Den mest brugte armering i beton er stål. Stål har i modsætning til beton en høj trækstyrke, hvilket giver et sejt brud. Beton er et skørt materiale, hvilket vil sige at når brudgrænsen er nået bryder strukturen sammen, og betonen mister sin styrke øjeblikkeligt. Sammen giver stål og beton et materiale med høj trykstyrke og trækstyrke, som er ideelt til at bygge med.

Da stål er meget vigtigt for anvendeligheden af beton, skal der tages højde for svaghederne i dette materiale, nemlig korrosion. Betons basiske miljø har en passiverende effekt på stål, og vil normalt skabe et beskyttende lag, men er der tilstedeværelse af salte kan dette lag nedbrydes, og stålet dermed blive udsat.

Iht. DS 206-1 (2005) må chlorid-indholdet for almindeligt stålarmet beton, maksimum være 0,40 % i forhold til cementvægten. Dette svarer til chloridklasse Cl 0,40.

2.2.6 Andre additiver

I nogle betontyper provokeres en luftdannelse, for at skabe et materiale med lav densitet og høj isoleringsevne. Ved produktion af porebeton blandes et aluminiumspulver, der i reaktion med calciumoxid skaber forholdsvis store luftbobler i massen.

Plastificerende og superplastificerende stoffer forøger bevægeligheden i betonen, og medvirker derfor til et mindre vandforbrug, og dermed bedre v/c-forhold.

Hvis LSA skal kunne benyttes som additiv og ikke et direkte bindemiddel, skal det skabe en luftig masse uden at ødelægge strukturen, hjælpe til at give bevægelighed, eller have en anden gunstgivende egenskab.

2.2.7 Sulfatangreb og alkalikiselreaktioner

Ved IC-testen som identificerer salte, skal der holdes øje med en række skadelige indhold. Sulfat, som er et salt af svovlsyre kan skabe sulfatangreb, også kaldet thaumasitangreb. Kort fortalt går Sulfat (SO_4^{--}) i reaktion med tricalciumaluminat (C_3A), og ødelægger strukturen i betonen. Dette har en meget skidt indvirkning på styrke, og giver afskalning.

Alkalikiselreaktioner skabes ofte mellem eksterne salte, såsom tøsalte der bruges på veje og broer, og siliciumindholdigt tilslag, også kaldet flint eller kisel. Reaktionen mellem alkalisalte og kisel skaber revner, og åbner betonen for yderligere skader. Der er grænseværdier for hvor meget kisel tilslaget må indeholde, og ligeledes hvor mange alkalisalte der må være i den øvrige sammensætning. Derfor skal LSA overholde saltindholdet i denne sammenhæng, for ikke at give anledning til alkalikiselreaktioner.

2.3 Styrke og struktur

2.3.1 Styrke

Brudspænding for mørtelprøver regnes på følgende måde:

$$\text{Brudspændingen} = \frac{F}{A}$$

Hvor,

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

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

Resultatet for hver prøvetype (A-C) plottes, så styrkeudvikling kan følges fra 7 døgn til 42 døgn. Det interessante er hvordan prøver med LSA har udviklet sig i forhold til referenceprøven.

I artiklen af S. Donatello et al. (2009) evalueres styrken ved et indeks fra ASTM. Dette indeks kaldes strength activity index (SAI), og har til formål at beskrive styrken af et prøvelegeme med iblandet puzzolan, i forhold til et referencelegeme. SAI beskrives i ASTM C618.12 (2012), og med dette indeks kan resultater sammenlignes med internationale artikler.

Fremgangsmåde:

Prøve C, som er en 20 % erstatning af LSA med cement, skal testes for styrke efter 7 og 28 døgn. Denne skal have en styrke på minimum 75 % af referenceprøven, for at have en tilstrækkelig puzzolaneffekt.

2.3.2 Porøsitet og densitet

Densitet og porøsitet er afgørende for styrke og isoleringsevne. En høj densitet og tæthed i materialet, vil højst sandsynligt betyde høj styrke. Lav densitet og høj porøsitet vil betyde højt luftindhold, og dermed en høj isoleringsevne. Porøsitet og densitet skal vurderes med andre resultater, for at give et samlet retvisende billede.

Densitet bestemmes generelt set som massen over volumen $\rho = \frac{m}{v} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$.

Der arbejdes med to densitetsbegreber:

Tørdensitet ρ_d

Densitet i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand ρ_{ssd}

- Tørdensiteten er defineret som massen i tør tilstand delt med prøvens rumfang. I rumfang medtages alle porer, og betegnes dermed som det ydre rumfang.
- Densiteten i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand (saturated surface dry, s.s.d.), defineres som prøvens masse i mættet men overfladetør tilstand, delt med prøvelegemets ydre rumfang.

Følgende bestemmes ligeledes:

Total porøsitet p

Åben porøsitet p_a

Absorption W_a

- Totalporøsiteten er i de fleste tilfælde lig med den åbne porøsitet, eller i hvert fald tæt på. Der regnes med at beton gerne kan have 1-2 % indkapslet luft.

$$p = p_a = \frac{V_a}{V}$$

- Absorptionen beskrives som massen af det vand, der kan optages i de åbne porer ved kapillarsugning, delt med massen af det tørre materiale.

$$w_a = \frac{\rho_{ssd} - \rho_d}{\rho_d}$$

Af forsøget fås følgende data:

Prøvens tørmasse

m_0 [kg]

Prøvens masse i luft, når den er vacuummættet og overfladetør

m_{0v} [kg]

Prøvens masse i vand, når den er vacuummættet

m_u [kg]

Hermed kan beregninger udføres ved følgende formler:

Prøvens volumen V , hvor $\rho_w \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ er vands densitet

$$V = \frac{m_{0v} - m_u}{\rho_w}$$

Volumen af åbne porer, V_a

$$V_a = \frac{m_{0v} - m_0}{\rho_w}$$

Prøvens tørdensitet, ρ_d

$$\rho_d = \frac{m_0}{V}$$

Prøvens densitet i vacuummættet overfladetør tilstand, ρ_{ssd}

$$\rho_{ssd} = \frac{m_{0v}}{V}$$

2.3.3 Kapillarsugning

Kapillarsugning er et fysisk fænomen, der finder sted i materialer med små porer. Porer med vand vil have en vandoverflade der former en menisk, der i store porer ikke spiller nogen rolle, men i meget små danner et undertryk. Dette undertryk bliver større jo mindre poren er, og kan under de rette omstændigheder resultere i meget lang transport af vand. Den afgørende kraft er overfladespændingen på vandet, der bliver stor nok til at trodse både tyngdekraft og friktion mellem vand og materiale.

Med følgende formel kan kapillariteten bestemmes, hvilken beskriver materialets evne til at opsuge væske.

$$k = \frac{Q_{\text{kap}}}{\sqrt{t_{\text{kap}}}}$$

Hvor,

$$k = \text{kapillaritet} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}^{\frac{1}{2}}} \right]$$

$$Q_{\text{kap}} = \text{vandmængde optaget} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$$

$$t_{\text{kap}} = \text{tiden [s]}$$

Vandmængden Q, udregnes som følgende:

$$Q = \frac{m_t - m_0}{A}$$

Hvor,

$$Q = \text{vandmængde pr. areal} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$$

$$m_t = \text{masse af prøve til tiden t [kg]}$$

$$m_0 = \text{massen til den tørre prøve [kg]}$$

$$A = \text{opsugningsarealet på prøven [m}^2\text{]}$$

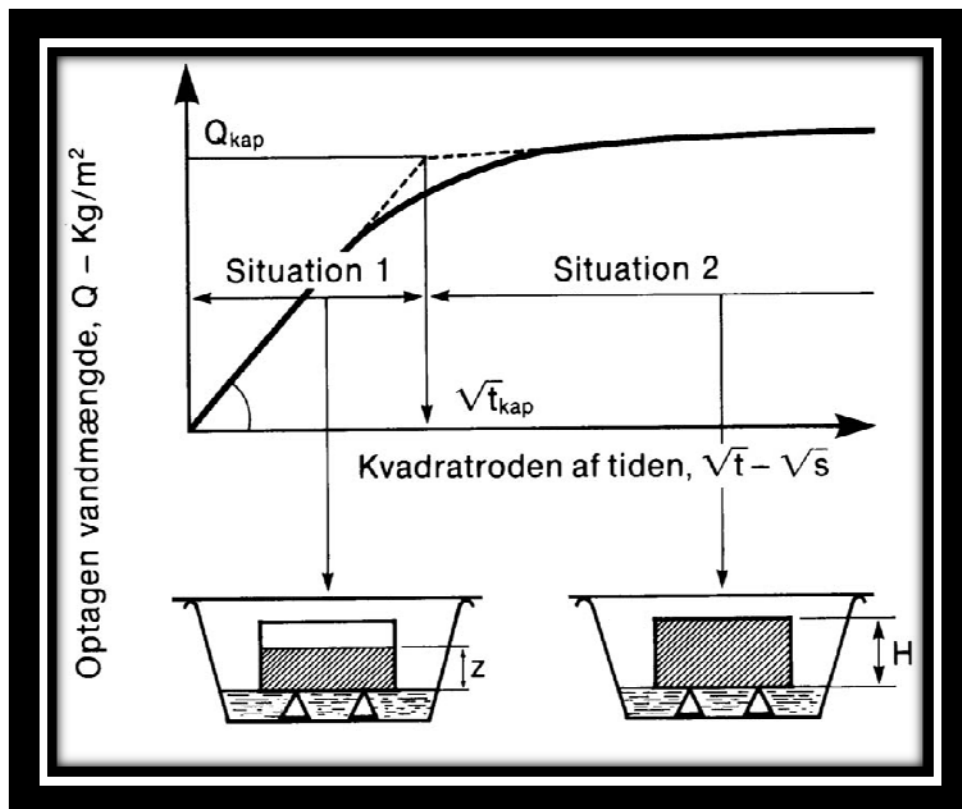
Modstandstal M , beskriver den indre modstand der er i strukturen, og udregnes som følgende:

$$M = \frac{t_{\text{kap}}}{h^2}$$

Hvor,

$$M = \text{modstandstallet} \left[\frac{\text{s}}{\text{m}^2} \right]$$

$$h = \text{højde på prøve [m]}$$



Figur 4 - Teoretisk grafisk afbildning af kapillarsugning (DTU BYG)

På Figur 4 ses en teoretisk afbildning af hvordan kapillarsugning forløber, udtrykt ved optaget vandmængde som funktion af kvadratroden af tiden. Når kurven flader ud, er det muligt at bestemme kapillaritetstallet og modstandstallet. Tabel 1 viser kapillaritets- og modstandstal for mørtel og beton.

Tabel 1 - Kapillaritet og modstandstal (Bygningsmaterialer, Gottfredsen og Nielsen, 2010, p.218).

Kapillaritet og modstandstal		
	Kapillaritetstal, k	Modstandstal, m
Cementmørtel	0,05-0,6	2.500.000-4.000.000
Beton	0,01-0,3	10.000.000-50.000.000

2.4 Leaching af tungmetaller

Indholdet af tungmetaller skal holdes under et vist niveau for, at LSA kan benyttes. Følgende bekendtgørelse bruges. Miljøstyrelsen, 2010. Bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret, uforurennet bygge- og anlægsaffald. Nr. 1662.

Bekendtgørelsen kategoriserer anvendelsen af restprodukter i byggearbejde efter Tabel 2 og Tabel 3. Der testes på B-prøve med vasket LSA.

Tabel 2 - Faststofindhold. (Miljøstyrelsen, 2010. Bilag 6 tabel 1, p.4-5).

Faststofindhold [mg/kg] TS			
	<i>Kategori 1</i>	<i>Kategori 2</i>	<i>Kategori 3</i>
Arsen	0-20	> 20	> 20
Bly	0-40	> 40	> 40
Cadmium	0-0,5	> 0,5	> 0,5
Chrom, total	0-500	> 500	> 500
Chrom (VI)	0-20	> 20	> 20
Kobber	0-500	> 500	> 500
Kviksølv	0-1	> 1	> 1
Nikkel	0-30	> 30	> 30
Zink	0-500	> 500	> 500

Tabel 3 - Koncentration i eluat. (Miljøstyrelsen, 2010. Bilag 6 tabel 1, p.4-5).

Koncentration i eluat [µg/l]			
	<i>Kategori 1</i>	<i>Kategori 2</i>	<i>Kategori 3</i>
Klorid	0 - 150.000	0 - 150.000	150.000 - 300.000
Sulfat	0 - 250.000	0 - 250.000	250.000 - 400.000
Natrium	0 - 100.000	0 - 100.000	100.000 - 1 500.000
Arsen	0 - 8	0 - 8	8 - 50
Barium	0 - 300	0 - 300	300 - 4.000
Bly	0 - 10	0 - 10	10 - 100
Cadmium	0 - 2	0 - 2	2 - 40
Chrom, total	0 - 10	0 - 10	10 - 500
Kobber	0 - 45	0 - 45	45 - 2.000
Kviksølv	0 - 0,1	0 - 0,1	0,1 - 1
Mangan	0 - 150	0 - 150	150 - 1.000
Nikkel	0 - 10	0 - 10	10 - 70
Selen	0 - 10	0 - 10	10 - 30
Zink	0 - 100	0 - 100	100 - 1.500

Faststofindholdet repræsenterer indholdet i prøven, og koncentrationen i eluat er det der udskilles til væsken. Begge disse skal være overholdt.

3. Beskrivelser og metoder

I dette afsnit præsenteres de forsøg og analyser der er foretaget, samt en beskrivelse af forsøgsgangen.

3.1 Blanding, støbning og håndtering af mørtelprøver

Følgende prøvetyper er lavet:

A. Referenceprøve

Prøve A er reference, og følger DS EN196-1 (2005).

- 225mL vand.
- 450g cement.
- 1350g grus.

B. Aske erstatter 10 % cement

Prøve B undersøger hvorvidt LSA kan erstatte 10 % af cementen, og dermed om den skulle have puzzolaneffekt.

C. Aske erstatter 20 % cement

Prøve C laves for at undersøge hvordan udvikling bliver hvis yderligere 10 % cement erstattes af LSA.

D. Aske erstatter 10 % grus

Prøve D laves for at undersøge hvad der sker hvis 10 % tilslag erstattes med LSA.

For bedst mulig resultat laves der 3 prøver af alle blandinger. Alle prøver testes efter 7-, 14-, 28- og 42-døgn, for at følge styrkeudviklingen.

LSA tilsættes cementen inden iblanding af vand og tilslag.

Der er tilsat ekstra vand for at skabe en støbelig konsistens, og mængden af vand noteres.

Som udgangspunkt har alle prøver stået 2 gange ca. 20 sekunder på rystebord, med intensitet 45, men i enkelte tilfælde krævede konsistensen af mørtlen lidt længere tid.

Øvrige punkter vedrørende støbning følger DS EN196-1 afsnit 6-8. Oversigt og indhold for alle støbte mørtelprøver findes i bilag 12.

Samme støbemetode bruges også af S. Donatello et al. (2009) og Rosenmai og Svendsen (2012)



Figur 5 - (2012. Tværsnit af mørtelprøver efter styrketest. DTU 119)

Figur 5 viser prøve B, C og D efter styrketest. Det ses hvordan farven i prøverne er forskellige. Askemængden er stigende fra venstre til højre, og prøverne med mest aske i føles fugtigere, til trods for samme hærdetid.

3.2 Analyser af mørtelprøver

3.2.1 Styrketest

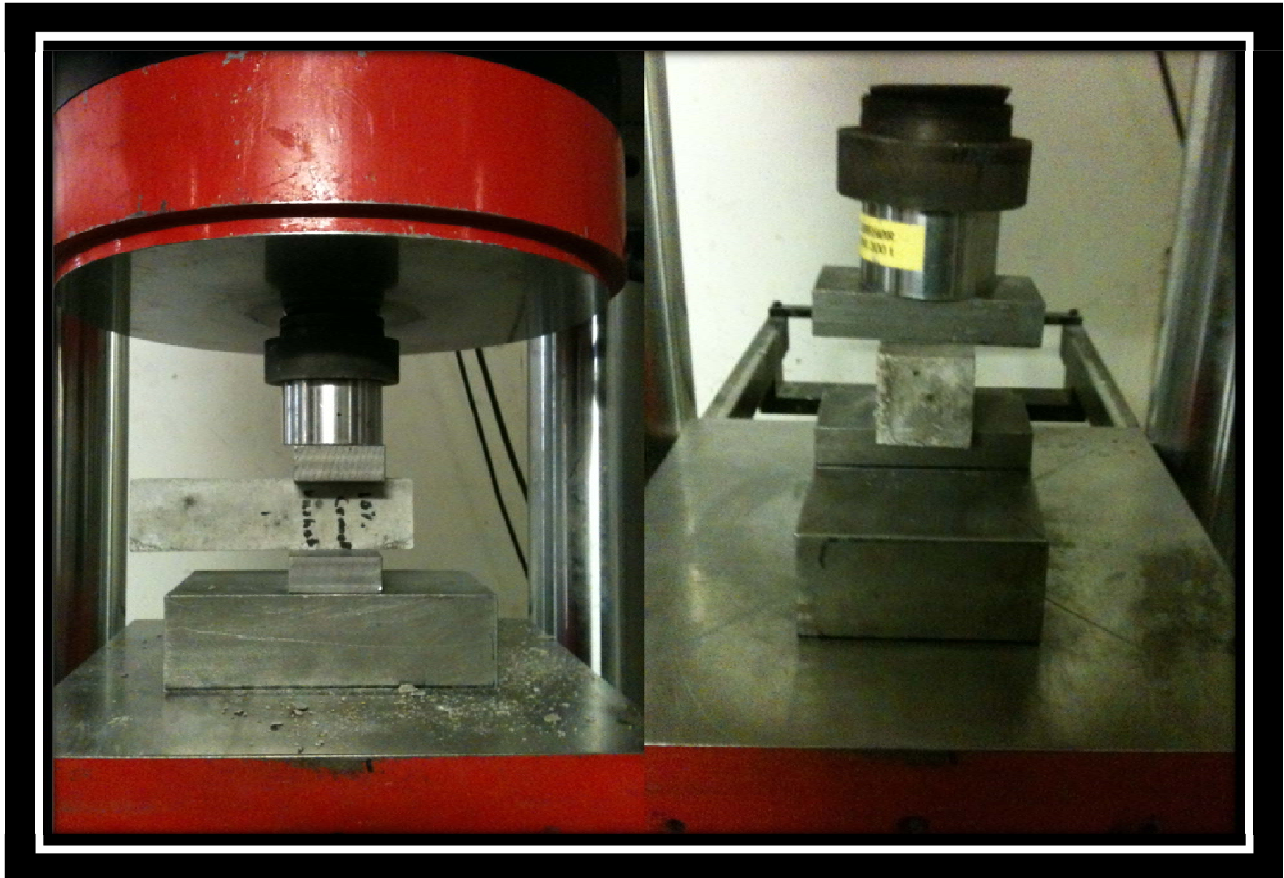
Beskrivelse

Denne test skal bestemme trykstyrken af de støbte mørtelprøver.

Alle prøver testes på tværs, hvilket giver plads til to tryk pr. mørtelprøve, hvilket ses på Figur 6. Resultater behandles og kontrolleres, og prøver der falder mere end 10 % ud fra middelværdien i dens kategori, forkastes i videre undersøgelser. Grænseværdierne kan ses i bilag 11. Alle data er beholdt, og kan ses i bilag 10. Spændingen udregnes som beskrevet i teoriafsnit 2.3.1.

Metode

Styrketesten følger anvisninger fra DS/EN 196-1 (2005). Brudlasten aflæses i displayet på maskinen.



Figur 6 - (2012. Opstilling af tryktest. DTU 119)

3.2.2 Ultralydstest

Beskrivelse

Ved ultralydsmåling indikeres det hvor meget luft der er i mørtelprøven. Luftindholdet har stor indvirkning på styrken, og isoleringsevnen. Denne test skal medvirke til at give en samlet vurdering af de forskellige prøver.

Metode

Målehovederne sættes i hver sin ende af mørtelprøven, og værdien aflæses på apparaturet. For at kalibrere apparatet laves kontrolmåling på et kontrollegeme.

3.2.3 Porøsitet og densitet

Beskrivelse

Porøsiteten beskriver strukturen inde i mørtelprøven, og denne kan betyde meget for styrke og isoleringsevne. Denne analyse sammenlignes med ultralydtesten, og vil give et godt billede af prøvens kvalitet.

Metode

En mørtelprøve udtørres i varmeskab i ca. 48 timer. Prøven vejes inden forsøget går i gang. Den evakueres i eksikator i tre timer, hvor den står i undertryk. Dette undertryk bruges nu til at indsuge destilleret vand til ca. 50 mm op over prøven, hvor den skal stå i 15 minutter, stadig med undertryk i eksikatorens. Der åbnes for trykket og prøven henstår i 24 timer, under vand og med atmosfærisk tryk.

Prøven tages ud af eksikatorens og vejes med en undervandsvægt. Derefter tørres den kort, så den er overfladetør, og vejes igen.

Værdier udregnes som beskrevet i teoriafsnit 2.3.2.

3.2.4 Kapillarsugning

Beskrivelse

Kapillarsugning beskriver prøvens evne til at suge vand. Det vil give et indtryk af porestrukturen, og kan sammen med densitet og porøsitet være med til helhedsvurderingen af prøven.

Metode

En mørtelprøve udtørres i varmeskab i ca. 48 timer, og nedkøles i eksikator. Mørtelprøven placeres i en fotobakke, og der fyldes destilleret vand i bakken, til prøven står væddet til ca. 5 mm over bunden. Der foretages vejninger efter 1, 2, 4, 8, 16, 32, 60, 120 og 240 minutter, og forøgelsen i vægt følges.

Resultater udregnes som beskrevet i teoriafsnit 2.3.3.

3.2.5 Leaching af tungmetaller

Beskrivelse

Formålet med denne analyse er at undersøge om en knust mørtelprøve i kontakt med vand, udleder nogle stoffer der ikke er hensigtsmæssige. Hvis en beton skal kunne anvendes, må den ikke forurene miljøet med tungmetaller eller andre giftige stoffer. Affaldsasse er kendt for at indeholde mange tungmetaller, og selvom det ikke er alle tungmetaller der er giftige, skal der undersøges for indholdet.

Teoriafsnit 2.4 beskriver grænseværdierne for tungmetaller, og disse skal være overholdt.

Metode

En mørtelprøve knuses til en fin kornstørrelse, der afvejes 40g i en 250mL plastflaske, og der tilsættes 80mL destilleret vand.

Prøverne stilles på rystebord i 24 timer, og til bundfældning i 15 minutter. Der tages en pH-værdi af alle prøverne, og herefter filtreres de igennem et 0,45 µm filter. Der laves 3 prøver.

Alle prøver deles i to, så der kan laves IC- og ICP-test.

3.3 Askeanalyser

3.3.1 Analyse af bufferværdi

Beskrivelse

Denne analyse skal fortælle hvor høj bufferværdien er, og dermed hvor stor en tendens LSA vil have til at svinge i pH-værdi. Med en høj bufferværdi vil asken være modtagelig overfor en stor mængde sure stoffer, før pH-værdien ændrer sig.

Metode

20g aske afvejes i plastflaske med 300mL destilleret vand, og stilles på rystebord i 30 minutter.

pH-værdien måles. Målingen udføres med et pH-meter, i forbindelse med en kombinationselektrode. Der afmåles indtil apparatet melder stabil måling, og resultatet noteres.

Der tilsættes nu 1mL koncentreret hydrogenchlorid (HCl), og prøven sættes tilbage på rystebord i 30 min. pH-værdien måles igen og noteres.

Denne metode gentages indtil der opnås en pH-værdi på under 2.

Værdierne plottes i et diagram.

3.3.2 Analyse af glødetab

Beskrivelse

Formålet med denne analyse er, at bestemme hvor meget organisk stof asken indeholder. Organiske stoffer vil svække materialet, da det med tiden vil forgå, og dermed efterlade lufthuller i strukturen. Ved at henstille aske i en 550°C varm muffeovn, afbrændes de organiske stoffer, og derved bestemmes hvor stor procentandel af asken der er organisk.

Metode

2,5g aske afvejes i en digle. Diglen har inden da stået 30 minutter i muffeovn opvarmet til 550°C, og er derefter afkølet i eksikator. Diglen er vejlet for senere at kunne trække dennes vægt fra.

Diglen med aske sættes nu i muffeovn ved 550°C i 60 minutter.

Diglerne afkøles i eksikator, og vejes ved analysevægt. Der laves 3 prøver.

3.3.3 Analyse af ledningsevne

Beskrivelse

En analyse af ledningsevnen vil give en idé om ion-styrken, og indholdet af letopløselige salt.

Metode

10g aske tilsættes 20mL destilleret vand i en 50mL plastflaske. Blandingen sættes på rystebord i 30 minutter, og til bundfældning i 20 minutter.

Selve analysen laves med en ledningsevнемåler med en elektrode. Elektroden føres ned i væsken og der noteres når apparatet melder stabil måling. Der laves 3 prøver.

Elektroden skylles med destilleret vand imellem målinger.

3.3.4 Analyse af pH-værdi

Beskrivelse

pH værdien analyseres men henblik på at bestemme surhedsgraden af asken.

Metode

5g aske afmåles i 20mL plastvials. Med pipette tilføjes nøjagtig 12,5mL af en 1 Mol khaliumchlorid-opløsning.

Prøverne stilles på rystebord i 60 minutter, og til bundfældning i 10 minutter.

Selve målingen udføres med et pH-meter, i forbindelse med en elektrode. Elektroden placeres midt i asken i plastvialen, dog ikke helt på bunden. Der noteres når apparatet melder stabil måling

Der laves 3 prøver.

3.3.5 Analyse af vandindhold

Beskrivelse

Vandindholdet i asken bestemmes for, at give et indblik i hvordan asken arbejder sammen med mørtelblandingen. En tør aske vil suge vand, og dermed gøre mørtlen meget tør.

Metode

5g LSA afvejes på analysevægt i et bægerglas. Inden da har bægerne stået i varmeskab ved 105°C, natten over, og er afkølet på eksikator. Bægerne bliver håndteret med tang.

Bægerne med aske sættes i varmeskab natten over. I dette tilfælde stod prøverne fra fredag til mandag. Der laves 3 prøver.

Prøverne afkøles i eksikator, vejes, og resultatet noteres.

3.3.6 Analyse af vandopløselighed

Beskrivelse

Ved denne analyse identificeres det hvor stor del af asken der består af letopløselige salte, og disse fraskilles.

Metode

100g LSA afvejes i en 1L plastflaske med skruelåg. Der tilsættes 500mL destilleret vand, prøven rystes i hånden og sættes til bundfældning.

Der opstilles en glastragt i et måleglas, og et fint filter lægges i tragten. Filteret vejes inden det bruges.

Når asken er bundfaldet, hældes væsken over i filteret, og plastflasken fyldes på ny med 500mL destilleret vand. Prøven skal igen rystes og bundfalde.

Dette gentages så der i alt hældes i filteret tre gange, og den tredje gang skal alt asken fra plastflasken med over i filteret. For at få det hele med, skylles plastflasken med en sprøjteflaske destilleret vand.

Selve filtreringen kan tage tid, og i dette projekt har prøverne stået natten over. Når filteret og asken er tilpas tør, lægges det i en petriskål, og stilles til tørring ved 105°C. Der laves 2 prøver.

Dagen efter vejes asken og filteret, og resultatet noteres.



Figur 7 - (2012. forsøgsopstilling til vandopløselighed. DTU 118)

3.3.7 Oplukning af Jordprøve

Beskrivelse

Oplukning af jordprøve følger DS 259 (2003), og har til formål at bestemme syreopløselige metaller i asken.

Metode

Der afvejes 1g tørret aske på en teknisk vægt, hvorefter der tilsættes 20mL halvkonzentrat HNO_3 . Prøven sættes i autoklave i 30 min, og filtreres igennem et 0,45 μm filter. Dette gøres i stinkskaab. Prøverne fortyndes med destilleret vand og hældes derefter på 20mL plast-vials, og gemmes til ICP. Der laves 3 prøver.

3.3.8 Forberedelse til IC

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

Prøven stilles på rystebord natten over. Dagen efter filtreres gennem et sprøjtefilter, og gemmes til ionchromatografi. Der laves 3 prøver.

3.3.9 IC

Dette er en kort beskrivelse af IC. Der er for projektgruppen ingen teori eller metode indblandet i selve denne analyse, da den foretages af laboranter.

IC er en forkortelse af Ionchromatografi. Denne analyse har til formål at identificere forskellige anioner i LSA, såsom Cl, SO₄ og NO₃.

Kort fortalt tilbageholder den stationære fase, askens ionholdige stoffer, med forskellig hastighed. Dermed kan computeren skille dem ad, og fortælle hvor stor koncentrationen er. For at denne proces kan ske, skal der tilsættes en eluent, som er af modsatrettede ioner end dem der skal identificeres (Center for Arktisk Teknologi, 2010a).

I dette forsøg søges efter anioner, og eluenten skal derfor indeholde kationer.

3.3.10 ICP

Dette er en kort beskrivelse af ICP. Der er for projektgruppen ingen teori eller metode indblandet i selve denne analyse, da den foretages af laboranter.

ICP er en forkortelse af 'Inductively Coupled Plasma' og selve analysens formål er at bestemme hvilke grundstoffer LSA består af.

Kort fortalt fungerer ICP på den måde at en prøvestørrelse optager energikvanter i plasmaet, og afgiver dem igen når det forlader plasmaet. Der udsendes et lys som er proportionalt med den mængde stof der rejser igennem, og computeren kan som en funktion af tiden bestemme koncentrationen af stoffet. ICP analysen giver pålidelige resultater ved koncentrationer ned til 1mg pr. L (Center for Arktisk Teknologi, 2010b).

Der er lavet ICP af LSA både før og efter vandopløselighedstesten, og denne vil give svar på hvilke stoffer der er forsvundet.

Der er ligeledes lavet ICP af resultatet fra udvaskningstesten, for at undersøge hvilke stoffer der ikke bindes, og dermed kan være skadelig for miljøet.

Denne analyse er grundlæggende for diskussionen om LSA kan benyttes.

3.3.11 SEM

Analysen laves for at give nogle billeder af strukturen i LSA, og i samarbejde med andre analyser en idé om hvad LSA indeholder.

SEM er et scanningselektronmikroskop der fremstiller billeder af en prøve ved at scanne det med en fokuseret stråle af elektroner. Elektronerne rammer elektroner i analytten, og der produceres forskellige signaler som indeholder oplysninger, om prøvens overflade topografi og sammensætning.

SEM kan opnå opløsning bedre end 1 nanometer (10^{-9} m), og prøver kan observeres i både højt og lavt vakuum.

Forstørrelse i et SEM kan styres over et område af op til 6 størrelsesordener fra omkring 10^{-5} til 500.000 gange. I modsætning til optiske- og transmission-elektron-mikroskoper, er forstørrelse i SEM ikke en funktion af kraften i objektivlinsen. Forudsat elektronkanonen kan frembringe en stråle med tilstrækkelig lille diameter, kan et SEM i princippet arbejde helt uden kondensator eller objektivlinser (Wikipedia, 2012).

4. Resultater og diskussion

I dette afsnit præsenteres og diskuteres fundne resultater.

Inden diskussionen begynder er det vigtigt at vide, at projektet tog en interessant drejning ca. halvvejs i forløbet. Analyser viste at LSA indeholdt salte, og der blev støbt B, C og D prøver med aske der først var vasket og filtreret, som i analysen af vandopløselighed fra afsnit 3.3.6. Det viste sig at, efter 7 døgn var disse mørtelprøver stærkere, end prøver med LSA der ikke var vasket.

Dette var et vendepunkt, og der blev støbt mørtelprøver med vasket LSA, så styrkeudviklingen kunne følges efter både 14 og 28 døgn.

De færreste rådata er givet, men vigtige resultater er hevet ud til diskussion. For samtlige data henvises til bilag 10.

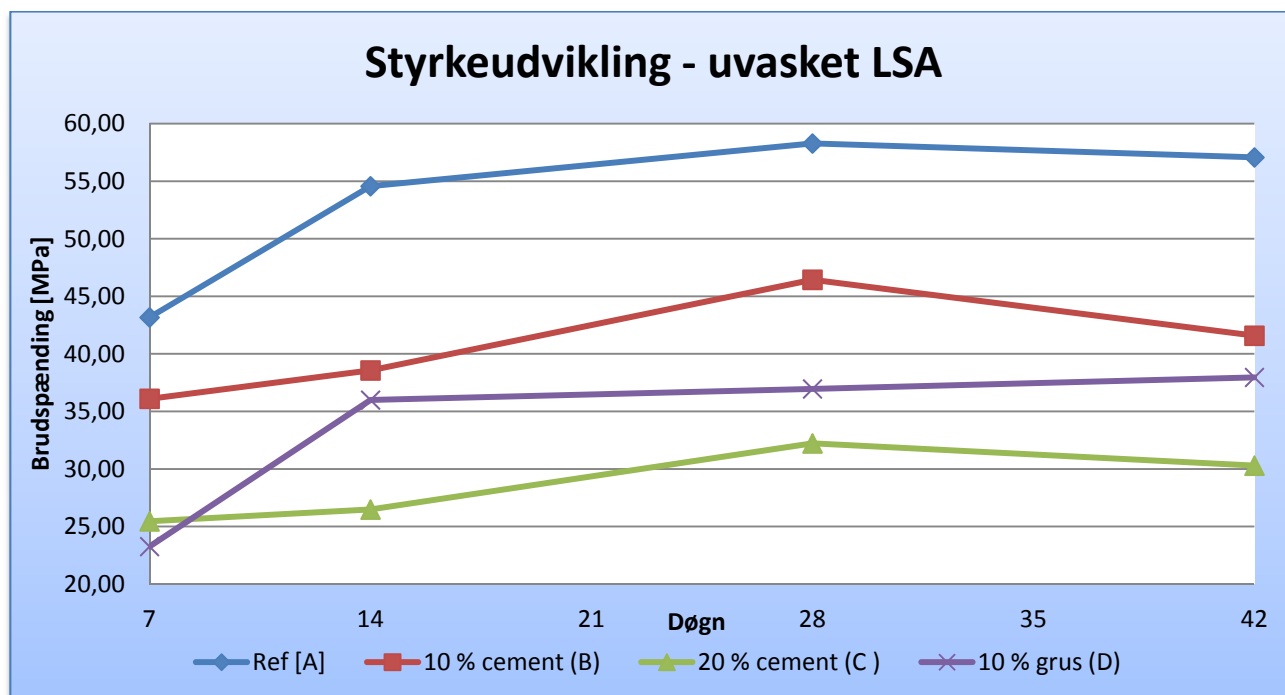
4.1 Styrke

4.1.1 Styrkeudvikling af mørtelprøver

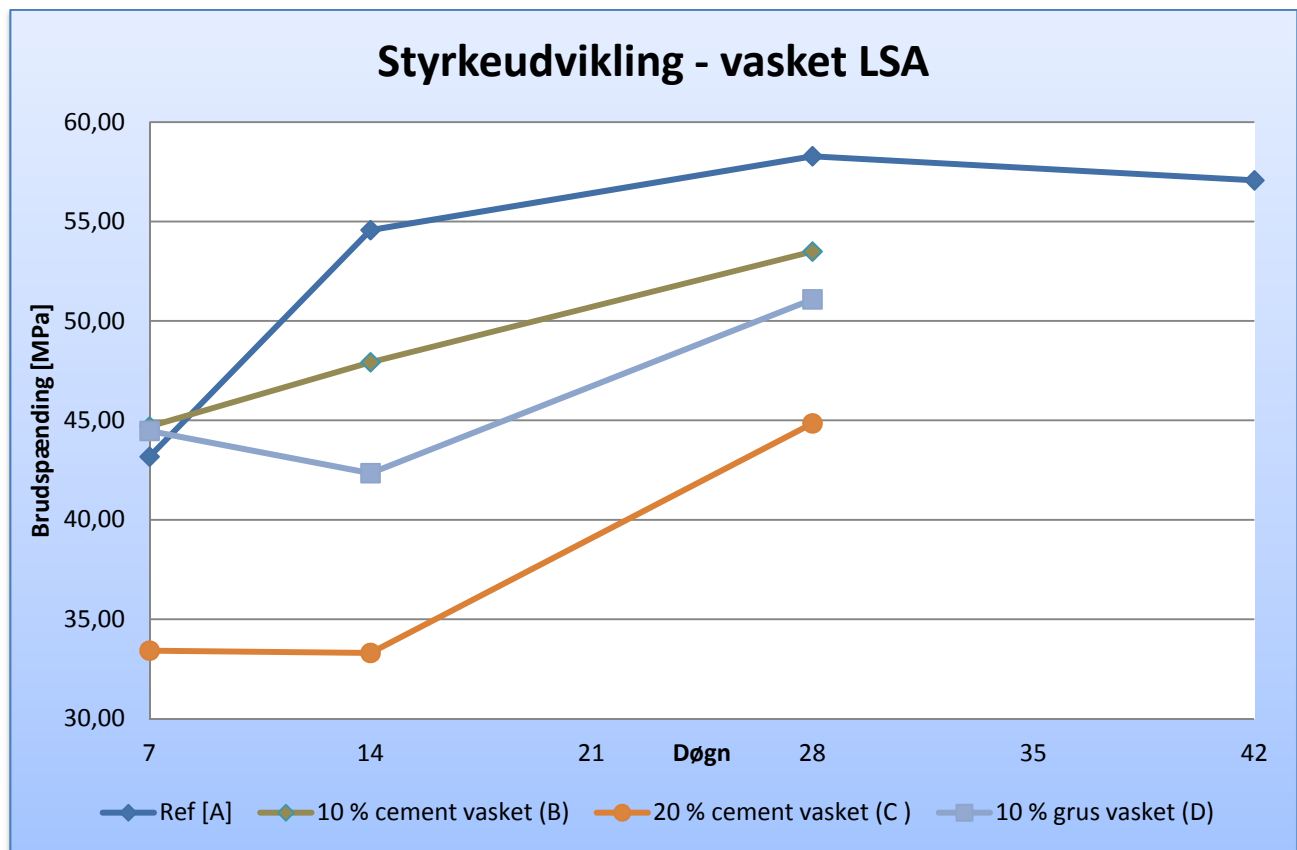
Der er støbt 3 referenceprøver, 36 prøver med uvasket LSA, og 27 prøver med vasket LSA, hvilket resulterer i 66 mørtelprøver. Hver prøve er tryktestet to gange, hvilket giver 132 tryk.

Figur 8 viser styrkeudviklingen for uvasket LSA, og det ses tydeligt at den er noget lavere end referenceprøverne. Det bedste forløb fås i B-prøven, hvor 10 % af cementen er erstattet med LSA. Dog ligger styrken stadig mellem 20-40 % under referencen.

Referencen er ifølge testresultater faldende i styrke fra 28-42 døgn og dette anses som støbe- eller måleafvigelse. Prøve B og D falder så meget, at det tyder på at asken kan have en ødelæggende effekt på længere sigt. Uanset hvad grunden til faldende styrke er, ses resultatet som skuffende.



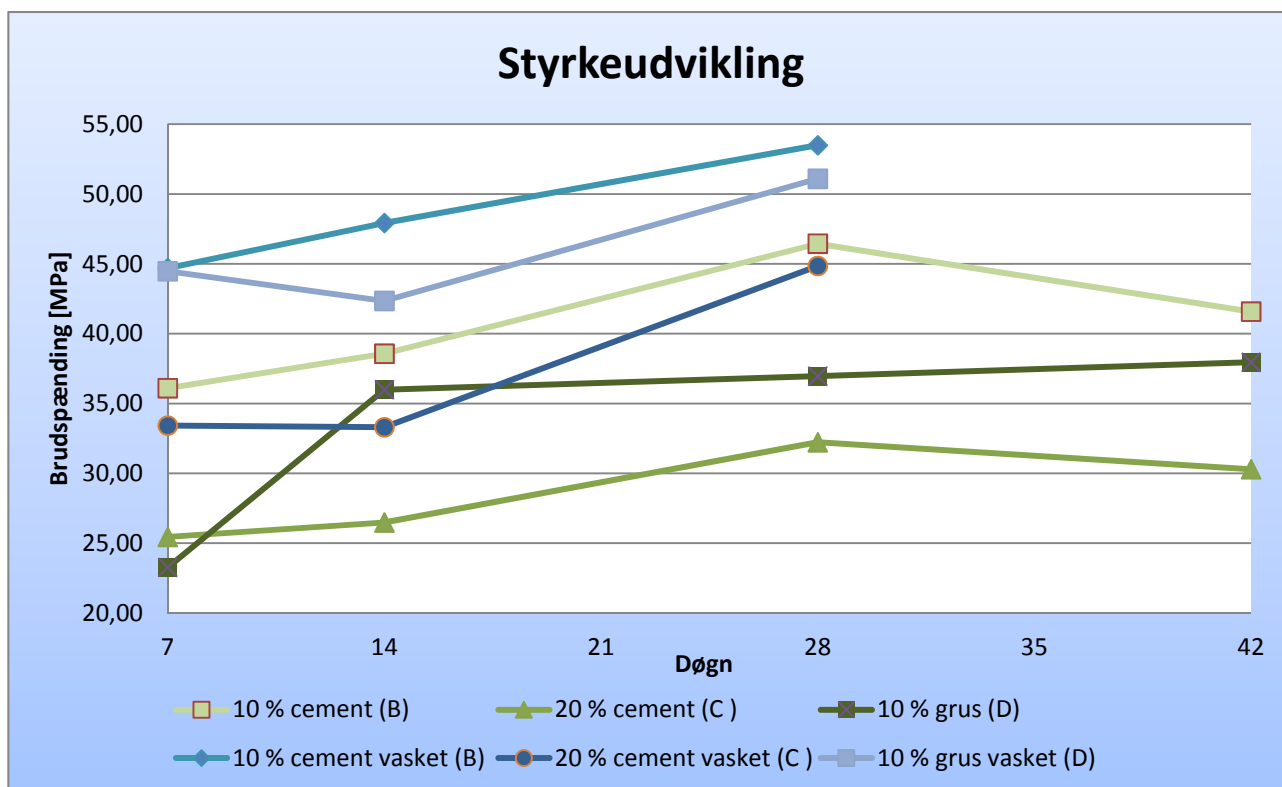
Figur 8 - Styrkeudvikling for uvasket LSA



Figur 9 - Styrkeudvikling for vasket LSA

Figur 9 viser styrkeudviklingen for vasket LSA. B-prøven ligger ikke langt under referencen, og har faktisk efter 7 døgn en højere styrke. Udviklingen herfra er dog ikke lige så hurtig som referencen, men der er god stigning, og alle kurver har retning mod referencens slutstyrke. Ved brud på prøven observeres det, at tværsnittet virker en smule fugtigt og usammenhængende, dette er aftagende jo længere tid prøven har hærdet. Dette tyder på, at LSA giver en længere hærdetid, hvilket styrkeresultaterne også giver udtryk for.

På Figur 10, ses udviklingen for prøver med hver sin udgave af LSA (vasket/uvasket) i forhold til hinanden. Kurverne for vasket aske ligger alle højere end deres respektive modpart.



Figur 10 - Styrkeudvikling for LSA

I Tabel 4 ses de forskellige prøvers styrkeudvikling i forhold til referencen. B-prøven med vasket LSA klarer sig bedst af alle, og har en forbedring fra uvasket til vasket på 17-28 %. Efter 28 døgn er B-prøven kun 9 % under referencen.

Resten af prøverne viser ligeledes markant forbedring efter at asken er vasket. Den største forskel ligger i D-prøven, der efter 7 døgn har en forskel mellem vasket og uvasket på 89 %.

Tabel 4 - Styrke i forhold til referenceprøven

Styrke i forhold til referenceprøven							
	B	C	D		B	C	D
Døgn	10 % cement	20 % cement	10 % grus		10 % cement vasket	20 % cement vasket	10 % grus vasket
7	-20 %	-70 %	-86 %		3 %	-29 %	3 %
14	-42 %	-106 %	-52 %		-14 %	-64 %	-29 %
28	-26 %	-81 %	-58 %		-9 %	-30 %	-14 %
42	-37 %	-88 %	-50 %		N/A	N/A	N/A

Der har i denne projektperiode desværre ikke været tid til at lave en 42-døgnsprøve med vasket LSA. Det havde været utroligt spændende, at se hvordan udviklingen ser ud fra 28 til 42 døgn, og om den kunne holde stigningen, eller om den som den uvaskede aske forbliver konstant, eller falder.

Tabel 5 viser den procentvise styrkeudvikling. Prøver med LSA har en stærk stigning fra 14 til 28 døgn, hvorimod referencen har klart bedst udvikling de første 14 dage. Det bekræfter den langsommere styrkeudvikling, og LSA lader igen til at have en forsinkende effekt på cementens hærdning.

Tabel 5 - Styrkeudvikling

Styrkeudvikling i procent							
Døgn	Ref.	B - 10 % cement	C - 20 % cement	D - 10 % grus	B - 10 % cement vasket	C - 20 % cement vasket	D - 10 % grus vasket
7	21 %	6 %	4 %	35 %	7 %	0 %	-5 %
14							
28	6 %	17 %	18 %	3 %	10 %	26 %	17 %
42	-2 %	-12 %	-6 %	3 %	N/A	N/A	N/A

4.1.2 Strength Activity Index

ASTM C6128-12 (2012) beskriver dette indeks, som afgør om hvorvidt et additiv kan beskrives som værende et puzzolan, i forhold til en reference.

Tabel 6 - Strengt Activity Index, SAI.

Strengt Activity Index (SAI)		
Døgn	C - 20 % cement	C - 20 % cement vasket
7	59 %	77 %
28	55 %	77 %

Testen er nærmere fremstillet i teorien under afsnittet om styrketest 2.3.1.

Kort gengivet, skal en C-prøve overholde mindst 75 % af styrken til referencen. Dette er ikke overholdt for prøven med den uvaskede aske, og asken kan altså i denne tilstand ikke benyttes som puzzolan. Den vaskede aske fortæller en anden historie, og selvom den ligger tæt på grænsen, er den dog tilladelig, og vasket LSA kan, med tanker på styrkeudvikling, ifølge ASTM C618-12 (2012) betegnes som et puzzolan.

I artiklen af S. Donatello et al. (2009) findes det, at knust slamaske har en forbedret effekt frem for ikke-knust slamaske. Umiddelbart får de ved knusning hævet styrken fra at dumpe, til at bestå SAI-testen. Det samme er fundet i dette projekt ved vask og filtrering.

Sammenlignes styrkerne har S. Donatello et al. (2009) fået et indeks op over 90 %, hvilket må siges at være et flot resultat. En fremtidig undersøgelse burde ligge i en kombination af disse metoder.

Ved hjælp af Bolomeys formel afsnit 2.2.3, regnes LSA's aktivitetsfaktor, som kan sige noget om hvilken effekt den har for en mørtelens styrke.

Tabel 7 - Aktivitetsfaktor for 28 døgn

Aktivitetsfaktor, k		
	LSA	LSA vasket
Min	-1,01	-0,68
Max	-0,66	-0,14

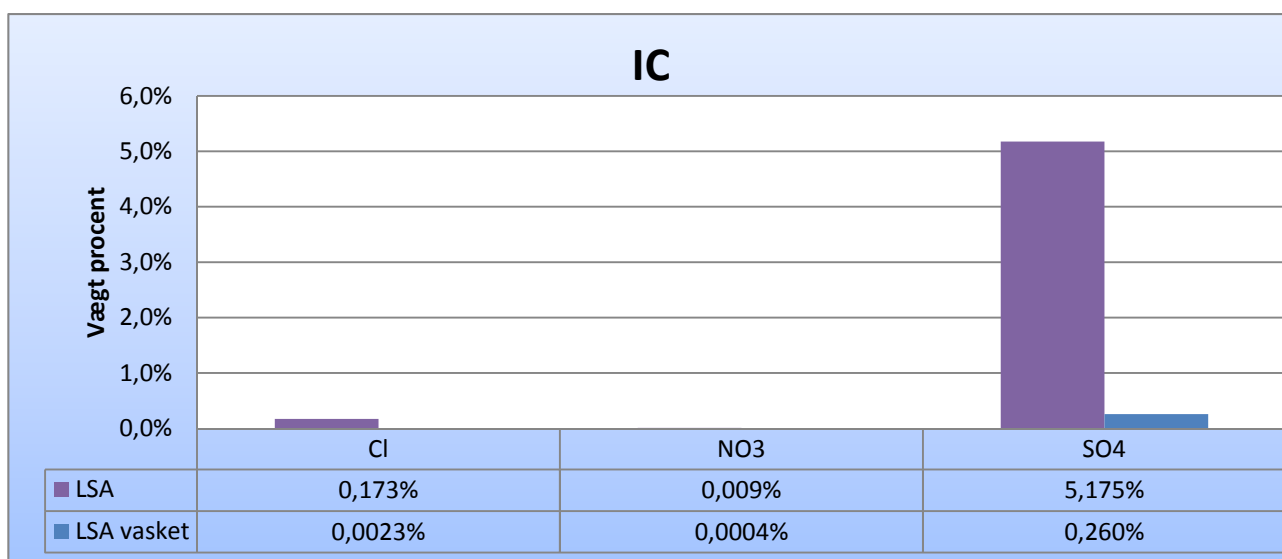
Tabel 7 viser aktivitetsfaktoren, som et interval af resultaterne udregnet på baggrund af teorien i afsnit 2.2.3. Aktivitetsfaktoren er baseret på styrke efter 28 døgn, men da LSA tilsyneladende har en forsinkende effekt, vil denne faktor også være reduceret. For at kunne lave en mere præcis bestemmelse af aktiviteten i asken, kræver det langt flere forsøg, og længere prøveperioder. Ud fra disse resultater må det fastslås at LSA har negativ effekt, indenfor den gældende periode, og med den brugte formel. Ikke desto mindre viser aktivitetsfaktoren en interessant ændring fra uvasket til vasket, da den kommer tæt på nul, og dermed ikke er langt fra at have positiv effekt.

4.2 Analyser

4.2.1 Ion-indhold i LSA

Ledningsevnen³ er fundet til at være omkring $27 \left[\frac{ms}{cm} \right]$ hvilket viser, at der er letopløselige salte tilstede i asken. Testresultaterne for vandopløselighed⁴ viser, at der forsvinder ca. 10 % ved vask og filtrering. Begge disse testresultater tyder på salte i asken, hvilke gav mistanke om svækkelse af mørtlen. Denne mistanke var grunden til, at der blev forsøgt at støbe med aske, der havde været igennem vandopløselighedsprocessen afsnit 3.3.6.

Nærmere bestemmelse af ioner der forsvinder efter vask bestemmes ved IC⁵, og ses i Figur 11.



Figur 11 - IC for vasket og uvasket LSA

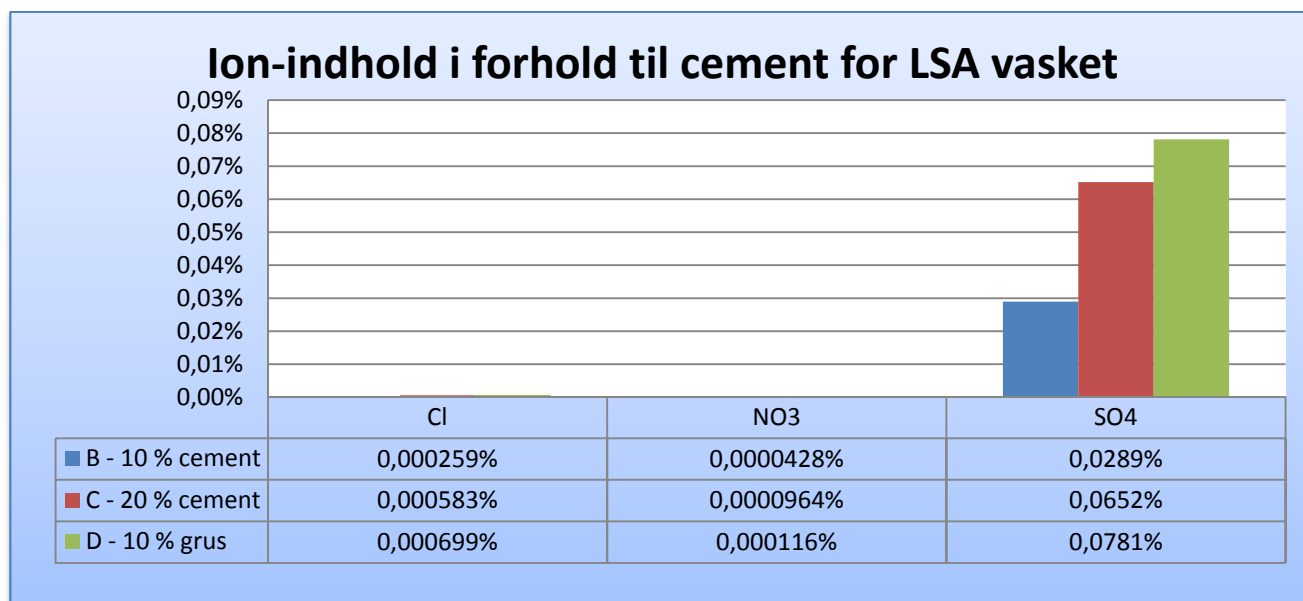
Ion-indholdet for uvasket LSA viser et mindre indhold af Cl, næsten ikke noget NO₃, men et relativt højt indhold af SO₄. Indholdet af SO₄ kan give mindre bekymring i forhold til om asken kan provokere et sulfatangreb i mørtelprøven, og dette kunne være kilden til hvorfor LSA er bedre når det er vasket.

IC for vasket LSA viser at saltene nu er i meget mindre koncentrationer. Som beskrevet i teorien afsnit 2.2.5, skal LSA mindst opfylde chloridindholdsclassen Cl 0,40, hvilket er en vægtprocent på max 0,4 % af cementindholdet. Dette ses på Figur 12.

³ Se bilag 18 for testresultater.

⁴ Se bilag 4 for testresultater.

⁵ Se bilag 13 for testresultater.



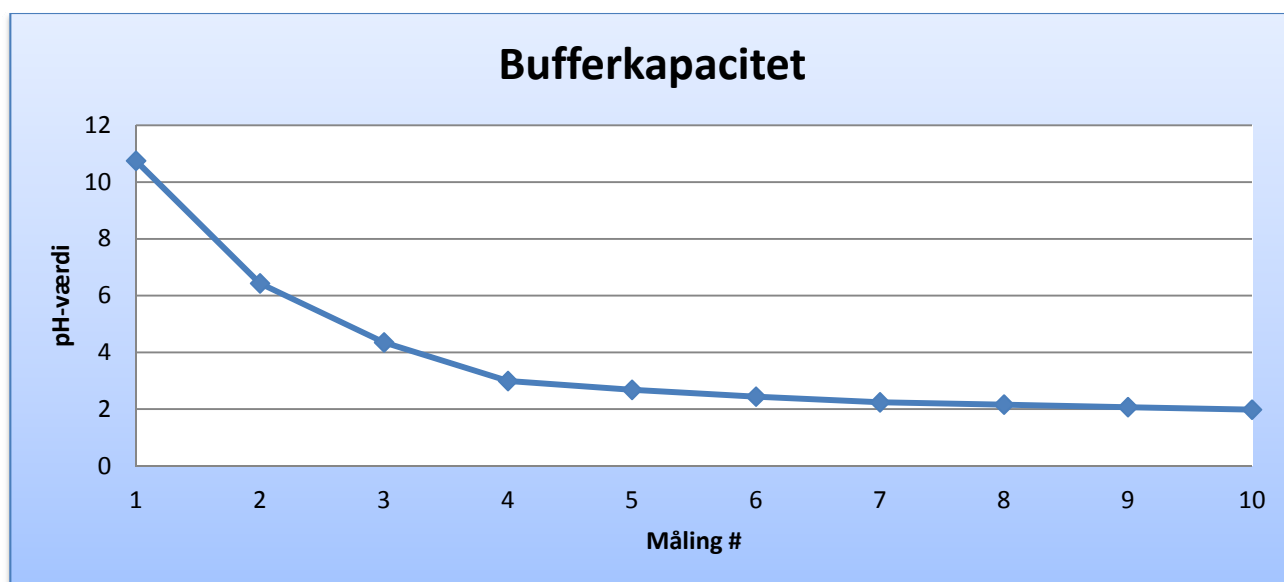
Figur 12 - Ion-indhold i forhold til cement

For alle prøver overholdes chloridindholdet.

4.2.2 Surhed af LSA

Surheden⁶ af LSA er fundet til pH 10,69, og derved burde den befinde sig godt i det basiske miljø som cementen skaber. Asken vil arbejde godt sammen med armeringsstål, hvorved stålet passiveres.

Bufferkapaciteten⁷, vist på Figur 13, beskriver LSA's modstandsdygtighed overfor sure påvirkninger.



Figur 13 - Bufferkapacitet

⁶ Se bilag 2 for testresultater.

⁷ Se bilag 1 for testresultater.

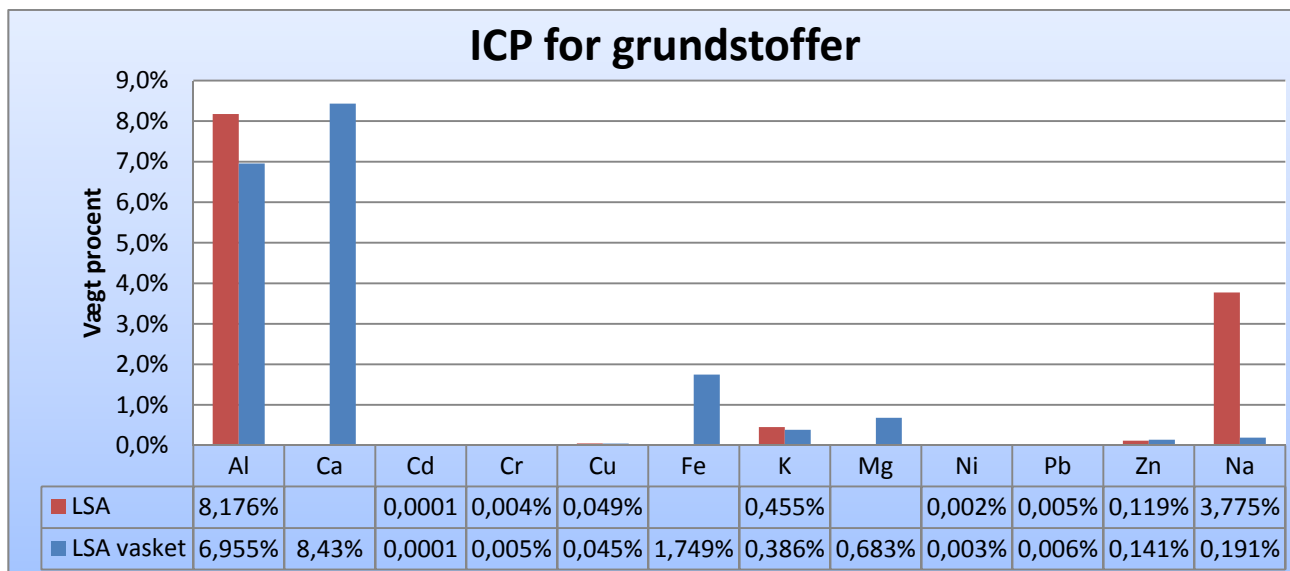
4.2.3 Indhold af vand og organiske stoffer

Glødetabsanalysen⁸ viser, at der er organisk stof i LSA, og middelværdien heraf ligger på omkring 1,8 %. Det antages at være et relativt lavt niveau, der ikke burde have nogen virkning på mørtelprøverne. Ifølge EN 450-1 (2005) må flyveaske have et glødetab op til 5 %.

Vandindholdet⁹ ligger på omkring 0,83 %, og beviser en rimeligt tør aske, hvilket også har været indtrykket under støbning. Ved tilsætning af LSA har der været brug for ekstra tilsætning af vand. For at ramme den helt nøjagtige ekstra vandmængde, burde der være lavet sætmålstest ved støbning. Dette har ikke været muligt, og der er i stedet forsøgt på, at ramme en konsistens der svarer til referenceprøvens.

4.2.4 Indhold af grundstoffer

LSA er ved ICP¹⁰ undersøgt for indhold af metaller. På Figur 14 ses indholdet af grundstoffer for både vasket og uvasket LSA.



Figur 14 - ICP for grundstoffer

Aluminium (Al): aluminiumoxid (Al_2O_3) udgør en stor del af indholdet i flyveaske, og anses derfor som et godt indhold.

Calcium (Ca): calciumoxid (CaO) findes i store mængder i cement og højovnsslagge, og i mindre mængder i flyveaske. Ca anses som et godt grundstof i LSA.

Cadmium (Cd), krom (Cr) og kobber (Cu) har som kendt ikke nogen styrkegivende effekt. Alle er stoffer som i forhold til udledning til naturen, skal holdes indenfor en grænse. Cadmium er et tungmetal, og er direkte farligt. Dette ses ikke som gunstgivende.

Jern (Fe): jernoxid (Fe_2O_3), findes i større mængder i flyveaske.

⁸ Se bilag 8 for testresultater.

⁹ Se bilag 19 for testresultater.

¹⁰ Se bilag 14 for testresultater.

Kalium (K) og magnesium (Mg) er begge alkalistoffer, og er begge en del af indholdet i flyveaske og mikrosilica.

Nikkel (Ni), bly (Pb) og zink (Zn) gør umiddelbart ikke den store forskel i struktur og styrke. Bly er giftigt til trods for at det findes overalt. Zink er et af de mest anvendte stoffer, og bruges f.eks. til mønter og batterier.

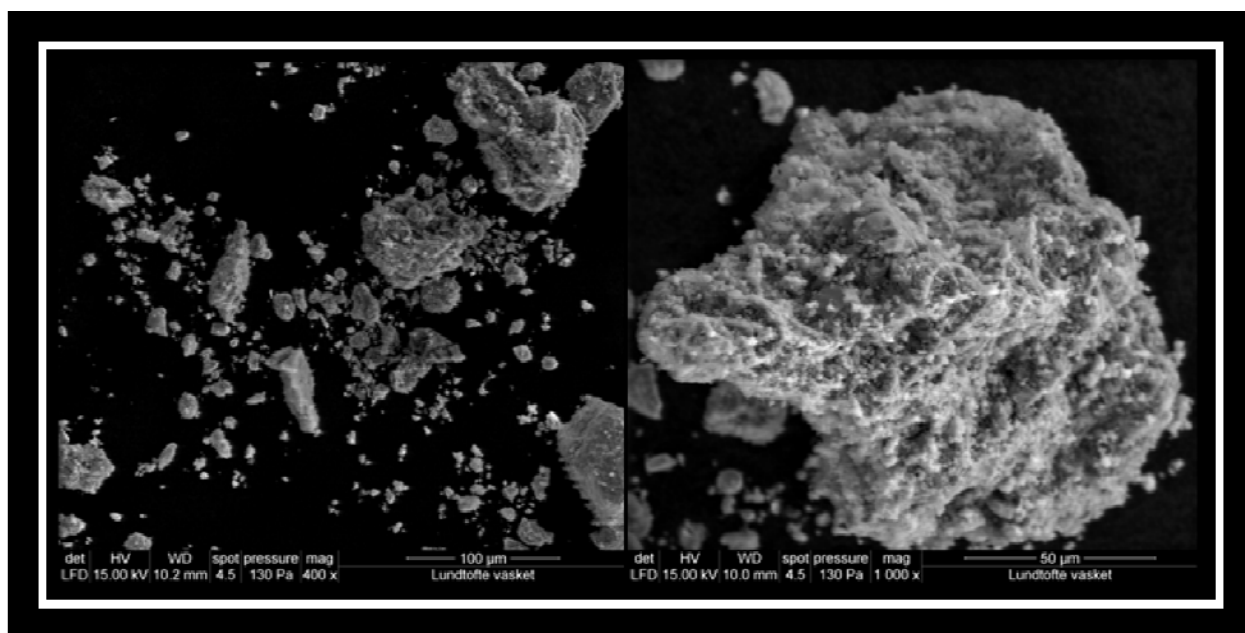
Natrium (Na) er også at finde i flyveaske og mikrosilica. Det noteres at ICP ligesom IC viser at der forsvinder store mængder salte, hvilket igen kan være svar på hvorfor LSA er bedre vasket ift. uvasket.

Der har desværre vist sig at være noget usikkerhed i den første ICP af den uvaskede LSA, og nogle data har ikke kunnet måles. Af denne grund kan det være svært at fastslå med sikkerhed hvad der er forsvundet ved vask, men det konkluderes ikke desto mindre, at der er ændret på det procentvise indhold af diverse grundstoffer.

Der kan ikke gives et endegyldigt svar på, hvad der præcis sker af kemiske processer ved brug af LSA, og hvordan asken arbejder med cementen, men det kan siges, at nogle af de rigtige stoffer er til stede. Det kan dog igen fastslås at salte er forsvundet fra LSA ved vask, og at dette formentlig er grunden til den forbedrede effekt.

4.2.5 SEM

Lad os nu tage fat i SEM-analysen¹¹, for at kigge nærmere på askekornene.

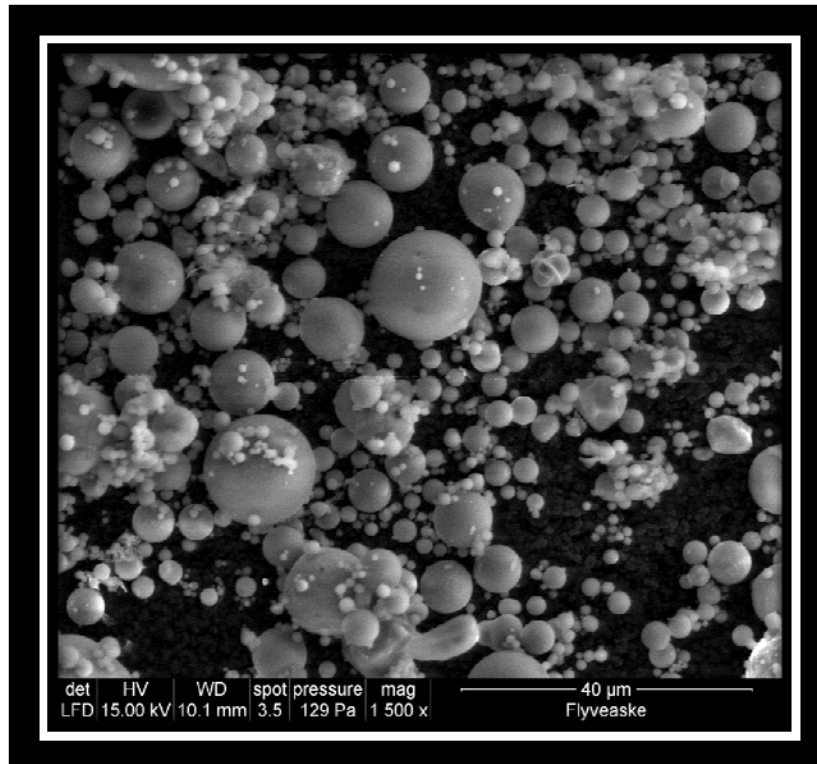


Figur 15 - LSA vasket struktur. Tv. overblik & th. askekorn. (2012. LSA struktur. SEM. DTU 118)

Højre del af Figur 15 viser et stort askekorn, og det ses hvordan kornet ser groft og kantet ud. På venstre del er der vist et overblik, hvor det ses hvor stor forskel der er på størrelserne af kornene. Det store korn på højre del af Figur 15 er ca. 100 μm bredt, og mange af de mindre korn er mindre end 10 μm brede.

¹¹ Se bilag 15 for testresultater.

Ses der på kulflyveaske, som på Figur 16 herunder, kan det fastslås at kornstørrelse og form, er meget mere stereotyp. Kornene i flyveasken er runde og fine, og vil give smidighed, og pga. størrelsen som ligger fra omkring $20\text{ }\mu\text{m}$ og nedefter, vil asken være med til at pakke mørtlen og dermed give et mindre vandforbrug.



Figur 16 - Flyveaskes struktur, (2012. Flyveaske struktur. SEM. DTU 118).

SEM-billederne bakker op om artiklen af S. Donatello et al. (2009). Når LSA er så grovkornet, og kantet som det fremgår på billederne, vil knusning betyde at de store korn forsvinder, og det har tydeligvis givet udslag i den omtalte undersøgelse. Desværre er det ifølge artiklen, ikke bekendt hvorfor knusningen af slamasken giver forbedret styrke, men dette er værd at prøve i fremtidigt arbejde.

Fra en SEM-analyse kan der laves en elementmapping, og en listevisning af hvilke stoffer der er på overfladen af askekornene. Elementmapping viser et indhold af silicium, hvilket er et af hovedstofferne i cement, flyveaske, mikrosilica og højovnsslagge, og altså må betegnes som et godt indhold. Da silicium ikke blev vist ved ICP, er det usikkert hvad værdien af indholdet af denne er, og SEM viser som sagt kun overfladeværdier.

SEM har givet et godt billede af hvordan kornene i LSA ser ud, og givet god sammenligning med flyveasken. Da overfladeværdier kan være meget misvisende, er de ikke brugt yderligere i diskussionen.

4.2.6 Leaching af tungmetaller

Stoffer der udskilles fra mørtelprøven, skal overholde bekendtgørelsens grænser (Miljøstyrelsen, 2010). I Tabel 8 og Tabel 9, ses den procentvise opfyldning af miljøstyrelsens krav¹².

Tabel 8 - Faststofindhold

Faststofindhold [mg/kg] TS			
	<i>Kategori 1</i>	<i>Kategori 2</i>	<i>Kategori 3</i>
Bly	0,47 %	0,47 %	0,47 %
Cadmium	0,25 %	0,25 %	0,25 %
Chrom, total	0,01 %	0,01 %	0,01 %
Kobber	0,06 %	0,06 %	0,06 %
Zink	0,01 %	0,01 %	0,01 %

Det findes at faststofindholdet i vasket LSA, ligger komfortabelt i kategori 1. På Tabel 9 ses koncentrationen i eluat, hvor hverken krav til kategori 1 eller 2 kan opfyldes, og derfor ligger den i kategori 3.

Tabel 9 - Koncentration i eluat

Koncentration i eluat [µg/L]			
	<i>Kategori 1</i>	<i>Kategori 2</i>	<i>Kategori 3</i>
Klorid	6 %	6 %	3 %
Sulfat	1 %	1 %	1 %
Natrium	140 %	140 %	9 %
Bly	957 %	957 %	96 %
Cadmium	31 %	31 %	2 %
Chrom, total	167 %	167 %	3 %
Kobber	353 %	353 %	16 %
Zink	25 %	25 %	2 %

Rosenmai og Svendsen (2012) fastslår i deres rapport om slamaskes anvendelighed i beton, at LSA befinder sig kategori 1. Denne aske er behandlet lidt anderledes i dette projekt, men det ser ud til at de ikke har undersøgt koncentrationen i eluat, hvilket i dette projekt var den afgørende faktor. Det ses at værdien for bly er tæt på at være udenfor kategori 3, men at både natrium, chrom og kobber er med til at placere LSA i denne kategori.

¹² Se bilag 13 og 14 for værdier af IC og ICP ved leaching.

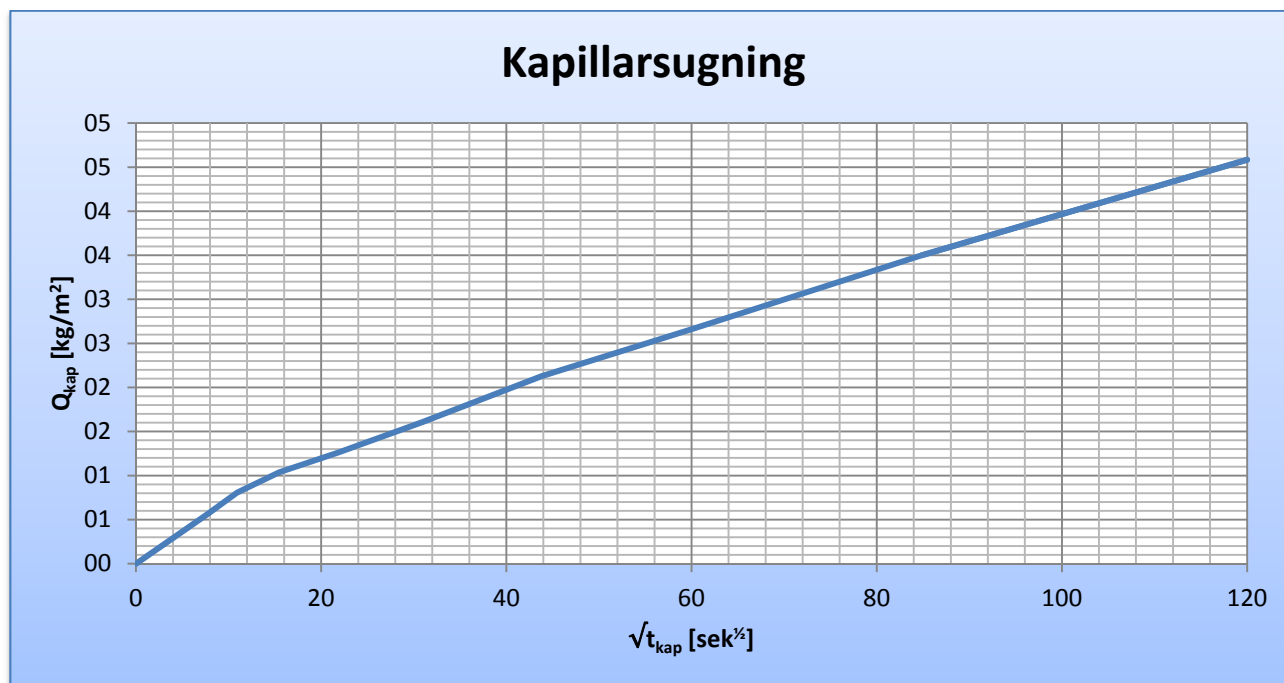
Da Rosenmai og Svendsen (2012) tilsyneladende har overholdt kategori 1, kan det til fremtidigt arbejde foreslås at den vaskede aske forsøges syrevasket. En kategori 3 aske, kan ifølge Miljøstyrelsen (2010) bilag 4¹³ kun bruges til følgende formål, uden tilladelse:

Veje	Tæt belægning og bortledning af overfladevand (h max 1 m).
Stier	Fast belægning (h max 0,3 m).
Ledningsgrave	Fast belægning
Fundamenter og gulve	Der må ikke være fare for indeklimaproblemer (h max 1 m under bygninger).

4.3 Mørtelprøvens andre egenskaber

4.3.1 Kapillarsugning

På Figur 17 ses den optagede vandmængde som funktion af kvadratroden af tiden, baseret på testresultater¹⁴. Sammenlignes med den teoretiske graf i afsnit 2.3.3, ses det at forsøget her ikke når at flade ud, hvilket betyder at det ikke er muligt at finde modstands- og kapillaritetstal. Dette kan skyldes at forsøget varet i for kort tid.



Figur 17 - Udviklingskurve for kapillarsugning

¹³ Dette eksterne bilag kan ses i bilag 17.

¹⁴ Se bilag 3 for testresultater.

4.3.2 Porøsitet og densitet

På Tabel 10 vises densitet og porøsitet¹⁵, samt værdier for andre materialer jf. Bygningsmaterialer, (Gottfredsen, 2010, p.214). Resultat for A-prøverne er en gennemsnitsværdi af 3 forsøg.

Tabel 10 - Porøsitet

Porøsitet og densitet		
	Tørdensitet, ρ_d	Porøsitet, p
B-prøve med vasket LSA	2052	22 %
A-prøver (ref)	2102	20 %
Cementmørtel	2100	20 %
Beton ($v/c = 0,4$)	2350-2450	5-10 %
Beton ($v/c = 0,6$)	2150-2350	10-20 %
Beton ($v/c = 0,8$)	1900-2250	15-30 %

B-prøven med vasket LSA ligger lige omkring cementmørtlen, eller en beton med $v/c = 0,8$. Da værdierne for A-prøver er fundet til at ligge meget tæt op ad cementmørtel, anses forsøget at være udført korrekt.

Det tyder altså på at LSA har en forholdsvis lille effekt på strukturen i prøven.

4.3.3 Ultralydtest

Lydhastigheden i de støbte mørtelprøver er målt¹⁶ og indsat i Tabel 11.

Tabel 11 - Ultralydtest

Ultralydtest		
	Lydhastighed, [m/s]	
	LSA	LSA vasket
B	4334	3989
C	4150	4087
D	3815	3975
A (ref)	4280	
Beton	3500-4500	

Alle støbte prøver ligger indenfor de normale værdier for beton. Desværre er der ved disse resultater en meget stor fejlkilde i selve måleapparatet. Ved afmåling varierer værdierne mellem 37-43 på alle målte prøver, og den endelige værdi afhænger af præcis hvornår, der trykkes på knappen der fryser værdien.

Dette er faktisk grunden til at, der senere er blevet lavet porøsitetstest, for netop at kunne sige noget mere om strukturen i mørtlen. Disse resultater kan ikke bruges til mere end at fastslå, at værdierne ligger indenfor betons normalværdier jf. Bygningsmaterialer, (Gottfredsen, 2010, p.224).

¹⁵ Se bilag 9 for testresultater.

¹⁶ Se bilag 10 for testresultater.

5. Konklusion

Projektet tog en drejning da 7-døgns styrketests for vasket LSA, viste sig at have højere styrke end referenceprøverne. Asken vaskes som ved vandopløselighedsanalysen, og har ved IC og ICP vist sig at have udvasket det meste af saltene, samt ændret på indholdet af grundstoffer. Netop udvaskningen af sulfat anses som en af grundene til, at asken ændrer adfærd og bliver bedre. ICP af LSA viser, at der umiddelbart ændres ved indholdet af grundstoffer, men det kan ikke fastslås præcis hvad LSA gør ved reaktionerne i cementen. Det konkluderes at LSA forlænger hærdetiden.

SEM viser at LSA i forhold til flyveaske, har en relativt stor kornstørrelse samt afvigende former, hvilket giver anledning til videre arbejde, hvor asken både vaskes og knuses. Dette menes på baggrund af artikler om tidligere undersøgelser af slamaske, der viser en højnet effekt ved knusning.

De 132 trykprøver viser blandede resultater imellem vasket og uvasket LSA. Den almindelige LSA har betydeligt ringere styrke end referencen, og består ikke SAI. Styrkeudviklingen er langsom, og ender med ingen eller negativ udvikling fra 28 til 42 døgn.

Resultaterne viser entydigt, at der sker noget positivt med LSA når den bliver vasket. Forløbet for B-prøven ligger mellem 17-28 % bedre end for den uvaskede aske, og der ses en maksimumforbedring på 89 % i D-prøven.

Vasket LSA består SAI med 77 % af referencestyrken, og kan derfor ifølge amerikanske standarder kategoriseres som puzzolan. Denne forbedring er ikke helt så god som der fås af S. Donatello et al. (2009), men kan opfattes som en succes i projektet.

Det kan ydermere konkluderes at LSA ifølge udførte forsøg, ikke har betydelig påvirkning af densitet og porøsitet i en mørtelprøve.

Vasket LSA overholder følgende lovkrav:

- Chloridklasser beskrevet i DS 206-1 er opfyldt
- Glødetab på max. 5 % overholdt
- Ved leaching overholdes miljøstyrelsens bekendtgørelse kategori 3

6. Videre arbejde

Da dette projektarbejde er et afgangsprøveprojekt for diplomingeniøruddannelsen og ikke et forskningsprojekt, har det ikke været muligt at undersøge alle emner. Der gives følgende forslag til hvad fremtidig arbejde med LSA burde indeholde.

- **Knusning**
Det ville være interessant at knuse den vaskede LSA i en ringknuser, og undersøge hvilken virkning dette ville have for mørtelprøverne. Dette er gjort i artiklerne af S. Donatello et al. (2009) og Rosenmai og Svendsen (2012), og har givet lovende resultater.
- **Trykstyrke efter 42 og 92 døgn**
Støbe mørtelprøver der testes efter 48 og 92 døgn for at følge den umiddelbare sene udvikling af styrke.
- **Syrevask**
Der burde forsøges med en syrevask, både før og efter vask af LSA, for at se om dette kunne give en effekt. Dertil skal det undersøges om blyindholdet, samt andre grundstoffer kan nedbringes i leaching for at gøre LSA mere anvendeligt.
- **Armering**
Det ville være interessant at lave beton / mørtelprøver med armeringsstål, for at se hvordan asken reagerer med stålet, og hvordan styrken bliver af dette i forhold til en armeret reference.
- **Anvendelses muligheder i letbeton**
Det ville være særligt interessant at fremstille en letbeton med iblandet LSA. Hvis leaching-kategori kan reduceres, og hvis støbningen ikke skal have mere styrke end til egenvægt, ville en masse LSA kunne afsættes.
- **Sætmål**
Der burde laves sætmålstest ved støbning for at styre vandtilsætningen.
- **Hærdetid**
Der burde laves analyse med Vicatronic for at undersøge den omtalte nedsatte hærdetid. Med en sådan undersøgelse ville LSA's virkning på hærdningen kunne undersøges nærmere.
- **Kapillarsugning**
Der burde udarbejdes et forsøg med kapillarsugning, hvor prøven får lov til at løbe over den fornødne tid, og evt. med andre prøvetyper.

7. Litteraturliste

Forfatter	Udgivelsesår	Titel	Udgiver	Type publikation
Aalborgportland	2011	Cementfremstilling. http://www.aalborgportland.dk/default.aspx?m=4&i=48&pi=21&pr=594	Aalborgportland Besøgsdato: 03-12-2012	Internetside
ASTM	2012	C618-12 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete	ASTM International	Standard
Center for Arktisk Teknologi	2010a	Ionchromatograf	Center for Arktisk Teknologi	Vejledning
Center for Arktisk Teknologi	2010b	ICP-OES og ICP-MS	Center for Arktisk Teknologi	Vejledning
Dansk Kemi	2004	Spildevandsrensning uden spild	Dansk kemi, 85, nr. 5, 2004, DanMiljø	Artikel
Dansk standard	2002	DS/EN 206-1 2. udgave. Beton - Del 1: Specifikation egenskaber, produktion og overensstemmelse.	Dansk standard	Standard
Dansk standard	2003	DS/EN 259:300 2. udgave. Vandundersøgelse - Bestemmelse af metaller i vand, jord, slam og sedimenter - Almene principper og retningslinjer for bestemmelse ved atomabsorptions-spektrofotometri i flamme.	Dansk standard	Standard
Dansk standard	2005	DS/EN 196-1 2. udgave. Metoder til cement prøvning af cement - Del 1: Styrkebestemmelse.	Dansk standard	Standard
Dansk standard	2012	DS/EN 450-1 3. udgave. Flyveaske til beton – Del 1: Definition, specifikationer og overensstemmelseskriterier.	Dansk standard	Standard
Digitalpoptosis.com	2012	Colosseum. http://www.digitalapoptosis.com/archives/italy/ColosseumHDR.jpg	Digitalpoptosis Besøgsdato: 03-12-2012	Billede
Donatello S., A. Freeman-Pask, M.Tyler, C.R. Cheeseman	2009	Effect of milling and acid washing on the pozzolanic activity of incinerator sewage sludge ash.	Cement & Concrete Composites 32, (2010) 54-61, Elsevier	Artikel
DTU BYG	-	Porøsitet, densitet og kapillarsugning.	DTU BYG	Forsøgs-vejledning

Ebba Cederberg Schnell	2012	Flyveaskes struktur.	-	Billede
Goltermann P.	2010	Betonens historie.	Per Goltermann	Power-Point
Gottfredsen Finn R., A. Nielsen (eds)	2010	Bygningsmaterialer: Grundlæggende egenskaber	Polyteknisk Forlag	Bog
Hansen K. Kielsgaard	2008	Bygningsingeniørernes materialer – uddrag af Materialebogen	Nyt Teknisk Forlag	Bog
Kwan A.K.H., J.J. Chen	2012	Adding fly ash microsphere to improve packing density, flowability and strength of cement paste	Powder Technology 234 (2013) 19-25, Elsevier,	Artikel
Miljøstyrelsen	2010	Bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret, uforurenet bygge- og anlægsaffald	Miljøstyrelsen	Bekendtgørelse
Miljøstyrelsen	2011	Orientering fra Miljøstyrelsen Nr. 4 Affaldsstatistik 2009 og Fremskrivning af affaldsmængder 2011-2050.	Miljøstyrelsen	Offentliggørelse
Petersen K.V., A. Jensen, K Dam-Johansen, B. Sander.	2005	Flyveaske til betonproduktion – påvirkning af luftindblanding	Dansk Kemi, 86, nr. 9, 2005, DanMiljø	Artikel
Ptable.com	2012	Periodiske system. http://www.ptable.com/?lang=da	Periodiske system Besøgsdato: 29-12-2012	Internetside
Rosenmai L. og Sabine Svendsen	2012	Slamaskes anvendelighed i beton - Anvendelse af slamaske i beton efter fosfor indvinding	DTU Byg - Institut for Byggeri og Anæg	Bachelorprojekt
Sarker Prabir K., Rashedul Haque, Karamchand V. Ramgolam	2012	Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete	Materials and Design 44 (2013) 580-586, Elsevier.	Artikel
Wikipedia	2012	Scanning electron microscope. http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope	Wikipedia Besøgsdato: 06-12-2012	Internetside

8. Bilag

Bilag 1 – Bufferkapacitet målinger

Bufferkapacitet										
Måling #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ph-værdi	10,75	6,43	4,35	2,99	2,68	2,44	2,24	2,16	2,07	1,98

Afmålt	
Aske [g]	Dest. Vand [mL]
20,1	300,0

Bilag 2 – pH-værdi målinger

pH-værdi			
Prøve #	1	2	3
pH	10,69	10,68	10,70

Tidstagning	
Prøver sat på rystebord	10:44
Taget af	11:45
Tid i alt [min]	61

Bilag 3 – Kapilarsugning målinger

Materiale: Mørtelprøve Ref					
Temperatur		$T_{\text{rum}} = 22\text{ °C}$	$T_{\text{vand}} = 20\text{ °C}$	$\rho_w = 998\text{ kg/m}^3$	
Målinger					
Prøvelegeme					
Dimensioner		$h = 0,075833333\text{ m}$	$A = 0,001597976\text{ m}^2$		
Masse		$m_0 = 0,25785\text{ kg}$	$m_{\text{slut}} = 0\text{ kg}$		
Beregninger					
Opsagnings-parametre		$Q_{\text{kap}} = \text{kg/m}^2$	$t_{\text{kap}} = \text{s}$	$k = \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$	
		$M = \text{s/m}^2$	$\rho_a =$		
Bemærkninger					
Gruppenr.: B Dato: 20.12.2012					

Målninger		Bearbejdet målinger	
Tid [min]	Vægt [g]	$v_{t_{kap}}$ [sek ^{1/2}]	Q_{kap} [kg/m ²]
0	0	0	0
1	258,48	7,746	0,392
2	-	10,954	-
4	258,63	15,492	0,486
8	258,75	21,909	0,565
16	259,06	30,984	0,759
32	259,58	43,818	1,083
60	260,33	60,000	1,552
120	261,54	84,853	2,309
240	263,50	120,000	3,538

Materiale: Mørtelprøve 10% aske i stedet for cement - LSA Vasket					
Temperatur	$T_{\text{rum}} =$	22 °C	$T_{\text{vand}} =$	20 °C	$\rho_w =$ 998 kg/m ³
Målinger					
Prøvelegeme					
Dimensioner	$h =$	0,078 m	$A =$	0,00156 m ²	
Masse	$m_0 =$	0,25357 kg	$m_{\text{slut}} =$	0 kg	
Beregninger					
Opsugnings-parametre	$Q_{\text{kap}} =$	kg/m ²	$t_{\text{kap}} =$	s	$k =$ kg/(m ² · s ^{1/2})
	$M =$	s/m ²	$p_{\text{å}} =$		
Bemærkninger					
Gruppenr.: A Dato: 20.12.2012					

Målninger		Bearbejdet målinger	
Tid [min]	Vægt [g]	$v_{t_{kap}} [\text{sek}^{\frac{1}{2}}]$	$Q_{kap} [\text{kg/m}^2]$
0	0	0	0
1	254,45	7,746	0,564
2	254,83	10,954	0,808
4	255,19	15,492	1,038
8	255,54	21,909	1,263
16	256,08	30,984	1,609
32	256,89	43,818	2,128
60	257,72	60,000	2,660
120	259,03	84,853	3,500
240	260,72	120,000	4,583

Bilag 4 – Vandopløselighed målinger

Vandopløselighed			
Prøve #	1	2	Bemærkninger:
Aske [g]	100,02	100,03	
Filter [g]	4,04	4,02	
Petriskål [g]	111,48	100,87	
Våd aske(+filter) m. petriskål [g]	271,24	262,96	Efter filtrering.
Tørret aske (+filter) m. petriskål [g]	205,34	194,42	Tør aske m. filter og petriskål.
Beregninger			
Askevægt efter filtrering [g]	155,72	158,07	
Askevægt efter tørring [g]	89,82	89,53	
Vandindhold inden tørring [g]	65,90	68,54	Vand fordampet i varmeovn.
Asketab [g]	10,20	10,50	Efter filtrering og tørring.
Vandindhold (inden tørring) [g]	42,32%	43,36%	
Vandopløselighed %	10,20%	10,50%	

Bilag 5 – Vandopløselige anioner målinger

Vandopløselige anioner			
Prøve #	1	2	3
LSA [g]	10,02	10,02	10,00
LSA vasket	10,00	10,01	10,01

Bilag 6 – Oplukning af Jordprøve målinger

Oplukning af jordprøve			
Prøve #	1 (59)	2 (54)	3 (40)
LSA [g]	1,0504	1,0446	1,0000
Salpetersyre HNO ₃ [mL]	20,00	20,00	20,00
Prøve #	1 (1)	2 (2)	3 (3)
LSA vasket [g]	1,0387	1,0660	1,0113
Salpetersyre HNO ₃ [mL]	20,00	20,00	20,00

Bilag 7 – Leaching målinger

Udvaskning			
Prøve #	1	2	3
Mørtel [g]	41,05	40,32	40,37
Ph-værdi	12,79	12,76	12,69
Tilsat destilleretvand [mL]	80,00	80,00	80,00

Bilag 8 – Glødetab

Glødetab				
Afmålte data				Noter:
Prøve #	1 (7)	2 (M)	3 (D)	
Digle [g]	16,318	16,270	18,927	
Aske [g]	2,506	2,502	2,502	
Aske tørret med digle [g]	18,781	18,727	21,381	
Aske tørret uden digle [g]	2,463	2,457	2,454	
Efterfølgende beregninger				
Glødetab	1,713%	1,799%	1,919%	

Bilag 9 – Densitet og Porøsitet

Mørtelprøve - Mørtelprøve 10% aske i stedet for cement (B)									
Type	Prøve	Vægt tør	Mættet under vand	Mættet over vand	ρ_w	Volumen faststof	volumen af åbne porrer	P _a	Tørdensitet
[]	#	[kg]	[kg]	[kg]	[kg/m³]	[m³]	[m³]	[%]	[kg/m³]
B	69	0,256	0,159	0,283	998,000	0,000125	0,000027	21,9%	2052,53
Gennemsnit		0,256	0,159	0,283	998,000	0,000125	0,000027	21,9%	2052,527

Mørtelprøve- Referenceprøve									
Type	Prøve	Vægt tør	Mættet under vand	Mættet over vand	ρ_w	Volumen faststof	volumen af åbne porrer	P _a	Tørdensitet
[]	#	[kg]	[kg]	[kg]	[kg/m³]	[m³]	[m³]	[%]	[kg/m³]
A	69	0,259	0,161	0,284	998,000	0,000123	0,000025	20,2%	2101,54
A	68	0,257	0,160	0,282	998,000	0,000122	0,000025	20,3%	2099,08
A	67	0,258	0,160	0,282	998,000	0,000122	0,000025	20,0%	2106,43
Gennemsnit		0,258	0,160	0,283	998,000	0,000123	0,000025	20,2%	2102,350

Bilag 10 – Styrkeprøvning og opmåling af mørtelprøver

Prøve: 7 døgn		Målt		Gennemsnit											
Blanding	#	Højde [mm]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Bredde [mm]	Dybde [mm]	Rumfang [mm ³]	Vægt [g]	Densitet [kg/m ³]	Frekvens [μs]	Trykareal [mm ²]	Belastning [kN/s]	Trykstyrke [kN]	Brudstyrke [MPa]	Bemærkning
Referenceprøve	1	39,10	40,00	38,98	40,01	161,00	251114,88	563,00	2242,0	37,80	1949,00	2,40	91,00	46,69	
		38,89	40,00										83,00	42,59	
		38,95	40,04												
Referenceprøve	2	38,96	39,95	39,02	39,95	163,00	254092,89	562,00	2211,8	37,10	1951,17	2,40	80,00	41,00	
		39,27	39,97										83,00	42,54	
		38,84	39,92												
Referenceprøve	3	38,74	40,08	38,74	40,06	162,00	251433,39	558,00	2219,3	37,60	1937,17	2,40	84,00	43,36	
		38,94	40,02										83,00	42,85	
		38,55	40,08												
10 % i stedet for cement	1	40,70	39,95	40,55	40,05	161,00	261446,93	579,00	2214,6	38,60	2027,33	2,40	76,00	37,49	
		40,56	40,10										71,00	35,02	
		40,38	40,10												
10 % i stedet for cement	2	40,49	39,96	40,27	39,99	161,50	260100,84	575,00	2210,7	38,40	2013,50	2,40	74,00	36,75	
		40,29	39,96										74,00	36,75	
		40,03	40,06												
10 % i stedet for cement	3	40,27	39,94	40,53	39,97	162,00	262393,96	576,00	2195,2	37,90	2026,33	2,40	73,00	36,03	
		40,37	40,00										70,00	34,55	
		40,94	39,96												
20 % i stedet for cement	1	39,79	39,83	39,87	39,90	162,00	257711,72	551,00	2138,0	39,50	1993,67	2,40	51,00	25,58	
		39,71	39,87										52,00	26,08	
		40,12	39,99												
20 % i stedet for cement	2	39,40	40,09	39,44	40,05	161,30	254806,17	549,00	2154,6	40,60	1972,00	2,40	52,00	26,37	
		39,35	39,93										49,00	24,85	
		39,57	40,14												
20 % i stedet for cement	3	39,54	40,10	39,73	40,05	161,40	256839,05	546,00	2125,8	40,40	1986,67	2,40	52,00	26,17	
		39,76	40,04										47,00	23,66	
		39,90	40,01												
10 % i stedet for grus	1	40,25	41,34	40,20	41,27	161,00	267107,69	568,00	2126,5	42,00	2010,00	2,40	49,00	24,38	
		40,15	41,20										47,00	23,38	
		40,20	41,27												
10 % i stedet for grus	2	41,07	40,22	41,07	40,07	162,00	266598,79	562,00	2108,0	42,70	2053,67	2,40	49,00	23,86	
		40,96	40,00										44,00	21,43	
		41,19	39,98												
10 % i stedet for grus	3	41,46	40,18	41,27	40,09	161,00	266398,95	569,00	2135,9	41,90	2063,50	2,40	56,00	27,14	
		40,81	40,09										59,00	28,59	
		41,54	40,01												

Prøve: 14 døgn		Målt		Gennemsnit											
Blanding	#	Højde [mm]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Bredde [mm]	Dybde [mm]	Rumfang [mm³]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Frekvens [μs]	Trykareal [mm²]	Belastning [kN/s]	Trykstyrke [kN]	Brudstyrke [MPa]	Bemærkning
Referenceprøve	1	N/A	N/A	40,6	40,5	160,9	264274,12	597,6	2261,1	37,9	2029,50	2,40	112,0	55,19	Referenceprøver gennemsnit
		N/A	N/A										114,0	56,17	
		N/A	N/A												
Referenceprøve	2	N/A	N/A	40,4	40,2	161,1	261445,00	587,6	2247,3	36,8	2018,50	2,40	106,5	52,48	Referenceprøver gennemsnit
		N/A	N/A										109,5	53,95	
		N/A	N/A												
Referenceprøve	3	N/A	N/A	40,4	40,3	160,9	262332,66	593,4	2262,0	37,4	2021,00	2,40	111,0	54,69	Referenceprøver gennemsnit
		N/A	N/A										111,5	54,94	
		N/A	N/A												
10 % i stedet for cement	1	40,00	40,03	40,36	39,94	164,00	264386,52	562,00	2125,7	38,30	2018,00	2,40	55,00	27,25	Smulerer i overfladen
		40,68	40,12										61,00	30,23	
		40,40	39,68												
10 % i stedet for cement	2	39,95	40,39	39,37	40,13	163,00	257483,46	556,00	2159,4	38,00	1968,33	2,40	76,00	38,61	Prøve 2 er bedre end prøve 1
		39,18	39,99										75,00	38,10	
		38,97	40,00												
10 % i stedet for cement	3	40,21	40,87	39,46	40,51	162,00	258929,02	556,00	2147,3	38,10	1973,00	2,40	76,00	38,52	Bedre overflade
		39,31	40,28										77,00	39,03	
		38,86	40,14												
20 % i stedet for cement	1	40,32	40,00	39,51	40,07	165,00	261200,61	538,00	2059,7	40,60	1975,50	2,40	55,00	27,84	
		39,13	40,13										48,00	24,30	
		39,08	40,07												
20 % i stedet for cement	2	39,64	40,17	39,42	40,07	165,00	260583,58	539,00	2068,4	40,90	1970,83	2,40	55,00	27,91	
		39,52	40,00										51,00	25,88	
		39,09	40,03												
20 % i stedet for cement	3	40,44	39,24	40,27	39,21	165,00	260576,52	538,00	2064,7	40,60	2013,67	2,40	37,00	18,37	
		40,16	39,45										43,00	21,35	
		40,22	38,95												
10 % i stedet for grus	1	40,23	39,99	40,13	40,03	164,00	263450,29	549,00	2083,9	39,80	2006,33	2,40	73,00	36,38	
		40,11	40,06										72,00	35,89	
		40,04	40,05												
10 % i stedet for grus	2	40,15	40,22	40,30	40,10	163,00	263456,58	557,00	2114,2	40,50	2015,17	2,40	74,00	36,72	
		40,22	40,00										72,00	35,73	
		40,54	40,09												
10 % i stedet for grus	3	40,19	40,09	39,87	40,11	160,00	255891,10	550,00	2149,4	40,30	1993,67	2,40	70,00	35,11	
		39,75	40,06										72,00	36,11	
		39,68	40,18												

Prøve: 28 døgn		Målt		Gennemsnit											
Blanding	#	Højde [mm]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Bredde [mm]	Dybde [mm]	Rumfang [mm³]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Frekvens [μs]	Trykareal [mm²]	Belastning [kN/s]	Trykstyrke [kN]	Brudstyrke [MPa]	Bemærkning
Referenceprøve	1	N/A	N/A	40,1	40,0	160,6	257134,70	580,4	2257,0	39,0	2003,33	2,40	118,7	59,23	Referenceprøver gennemsnit
		N/A	N/A										116,7	58,24	
		N/A	N/A												
Referenceprøve	2	N/A	N/A	40,2	40,3	160,5	259431,43	582,2	2244,1	37,9	2007,89	2,40	118,0	58,77	Referenceprøver gennemsnit
		N/A	N/A										118,7	59,10	
		N/A	N/A												
Referenceprøve	3	N/A	N/A	40,3	40,1	160,4	258881,13	583,8	2254,9	37,8	2014,61	2,40	113,0	56,09	Referenceprøver gennemsnit
		N/A	N/A										108,7	53,94	
		N/A	N/A												
10 % i stedet for cement	1	41,50	40,31	40,86	40,19	168,00	275928,84	578,18	2095,4	39,00	2043,17	2,40	91,00	44,54	
		40,36	40,16										99,00	48,45	
		40,73	40,11												
10 % i stedet for cement	2	40,46	40,55	40,57	40,39	164,00	268711,98	577,59	2149,5	38,90	2028,33	2,40	95,00	46,84	tryk 2 - smulrer i overflade / porøs, revenet ved første tryk
		40,62	40,48										81,00	39,93	
		40,62	40,14												
10 % i stedet for cement	3	40,26	40,30	40,48	40,30	166,00	270803,00	573,77	2118,8	37,60	2024,17	2,40	91,00	44,96	
		40,24	40,50										96,00	47,43	
		40,95	40,09												
20 % i stedet for cement	1	39,61	40,22	39,86	40,21	168,00	269287,98	547,70	2033,9	39,70	1993,17	2,40	66,00	33,11	Prøve tydeligvis mere våd end 10 % prøve. Prøverne smulrer ikke, er bedre sammenbundet
		39,86	40,23										58,00	29,10	
		40,12	40,18												
20 % i stedet for cement	2	39,35	40,47	39,61	40,31	167,00	266689,90	546,81	2050,4	39,80	1980,67	2,40	67,00	33,83	
		39,80	40,33										64,00	32,31	
		39,69	40,14												
20 % i stedet for cement	3	39,74	40,20	40,00	40,16	165,00	265034,00	546,84	2063,3	40,00	2000,00	2,40	65,00	32,50	
		40,12	40,05										65,00	32,50	
		40,14	40,22												
10 % i stedet for grus	1	40,32	40,01	39,99	40,04	161,00	257771,65	549,99	2133,6	39,60	1999,33	2,40	76,00	38,01	Fugtigere en 20 % og 10 % prøverne
		39,85	40,05										72,00	36,01	
		39,79	40,06												
10 % i stedet for grus	2	41,45	40,16	41,41	40,20	162,00	269656,78	572,66	2123,7	40,30	2070,33	2,40	74,00	35,74	
		41,37	40,20										73,00	35,26	
		41,40	40,24												
10 % i stedet for grus	3	40,49	40,16	40,67	40,08	160,00	260829,95	560,29	2148,1	39,70	2033,67	2,40	79,00	38,85	
		40,75	40,03										77,00	37,86	
		40,78	40,05												

Prøve: 42 døgn		Målt		Gennemsnit											
Blanding	#	Højde [mm]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Bredde [mm]	Dybde [mm]	Rumfang [mm³]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Frekvens [μs]	Trykareal [mm²]	Belastning [kN/s]	Trykstyrke [kN]	Brudstyrke [MPa]	Bemærkning
Referenceprøve	1	N/A	N/A	39,9	40,4	161,9	260781,06	582,9	2235,3	38,4	1992,50	2,40	109,5	54,96	Referenceprøver gennemsnit
		N/A	N/A										100,0	50,19	
		N/A	N/A												
Referenceprøve	2	N/A	N/A	39,9	40,4	161,8	260863,75	582,9	2234,4	37,7	1995,08	2,40	118,5	59,40	Referenceprøver gennemsnit
		N/A	N/A										118,0	59,15	
		N/A	N/A												
Referenceprøve	3	N/A	N/A	40,1	40,1	162,0	260670,78	582,4	2234,3	37,2	2006,92	2,40	116,0	57,80	Referenceprøver gennemsnit
		N/A	N/A										108,5	54,06	
		N/A	N/A												
10 % i stedet for cement	1	39,90	39,26	39,95	39,03	162,00	252640,91	562,68	2227,2	37,70	1997,67	2,40	90,00	45,05	Opstår hurtigt revner
		40,02	39,08										68,00	34,04	
		39,94	38,76												
10 % i stedet for cement	2	40,24	39,46	40,40	39,81	161,90	260430,94	567,92	2180,7	37,20	2020,17	2,40	72,00	35,64	Opstår hurtigt revner
		40,18	40,06										80,00	39,60	
		40,79	39,92												
10 % i stedet for cement	3	40,93	38,88	40,66	38,97	162,20	256966,12	564,10	2195,2	37,50	2032,83	2,40	80,00	39,35	Opstår hurtigt revner
		40,68	39,17										86,00	42,31	
		40,36	38,85												
20 % i stedet for cement	1	40,60	40,29	40,63	40,19	159,80	260940,33	564,41	2163,0	39,50	2031,67	2,40	51,00	25,10	Opstår hurtigt revner
		40,76	40,17										59,00	29,04	
		40,54	40,10												
20 % i stedet for cement	2	40,44	40,23	40,48	40,21	160,00	260432,27	562,82	2161,1	39,50	2023,83	2,40	64,00	31,62	Opstår hurtigt revner
		40,48	40,25										64,00	31,62	
		40,51	40,16												
20 % i stedet for cement	3	40,13	40,19	40,21	40,46	160,00	260282,01	556,23	2137,0	39,40	2010,50	2,40	64,00	31,83	Opstår hurtigt revner
		40,08	40,27										55,00	27,36	
		40,42	40,91												
10 % i stedet for grus	1	39,58	40,16	39,09	40,15	160,50	251898,89	536,92	2131,5	40,80	1954,50	2,40	76,00	38,88	
		39,25	40,09										75,00	38,37	
		38,44	40,20												
10 % i stedet for grus	2	40,16	39,93	39,66	39,96	160,40	254225,31	545,74	2146,7	40,50	1983,00	2,40	77,00	38,83	
		39,55	40,01										75,00	37,82	
		39,27	39,95												
10 % i stedet for grus	3	37,99	40,11	37,91	40,13	160,00	243454,15	511,60	2101,4	40,20	1895,67	2,40	68,00	35,87	
		38,30	40,18										60,00	31,65	
		37,45	40,11												

Prøve: 7 døgn (vasket)		Målt		Gennemsnit											
Blanding	#	Højde [mm]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Bredde [mm]	Dybde [mm]	Rumfang [mm³]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Frekvens [μs]	Trykareal [mm²]	Belastning [kN/s]	Trykstyrke [kN]	Brudstyrke [MPa]	Bemærkning
10 % i stedet for cement	1	40,96	40,21	40,53	40,16	160,40	261080,64	574,48	2200,4	39,80	2026,50	2,40	94,00	46,39	
		40,60	40,16										86,00	42,44	
		40,03	40,11												
10 % i stedet for cement	2	39,91	40,10	40,23	40,16	160,60	259471,23	579,24	2232,4	37,60	2011,67	2,40	96,00	47,72	
		40,11	40,30										61,00	30,32	
		40,68	40,07												
10 % i stedet for cement	3	39,85	40,04	40,73	40,38	161,00	264792,87	578,55	2184,9	40,80	2036,67	2,40	104,00	51,06	
		40,76	40,97										86,00	42,23	
		41,59	40,12												
20 % i stedet for cement	1	40,27	40,11	40,48	40,05	161,00	260995,34	570,93	2187,5	38,80	2024,00	2,40	84,00	41,50	
		40,53	40,15										68,00	33,60	
		40,64	39,88												
20 % i stedet for cement	2	40,20	40,30	40,33	40,08	162,00	261861,08	570,55	2178,8	39,60	2016,50	2,40	69,00	34,22	
		40,30	39,96										65,00	32,23	
		40,49	39,98												
20 % i stedet for cement	3	41,04	40,20	40,57	40,20	162,00	264207,87	570,76	2160,3	39,80	2028,67	2,40	69,00	34,01	
		40,45	40,28										67,00	33,03	
		40,23	40,11												
10 % i stedet for grus	1	40,80	40,31	40,80	40,28	165,00	271165,24	572,30	2110,5	41,50	2039,83	2,40	86,00	42,16	
		40,82	40,55										93,00	45,59	
		40,77	39,99												
10 % i stedet for grus	2	39,99	40,39	40,43	40,25	165,00	268483,60	568,24	2116,5	39,50	2021,33	2,40	86,00	42,55	
		40,83	40,19										93,00	46,01	
		40,46	40,17												
10 % i stedet for grus	3	41,58	40,15	41,32	40,23	165,00	274257,37	577,78	2106,7	40,30	2066,00	2,40	93,00	45,01	
		40,98	40,26										94,00	45,50	
		41,40	40,27												

Prøve: 14 døgn (vasket)		Målt		Gennemsnit											
Blanding	#	Højde [mm]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Bredde [mm]	Dybde [mm]	Rumfang [mm³]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Frekvens [μs]	Trykareal [mm²]	Belastning [kN/s]	Trykstyrke [kN]	Brudstyrke [MPa]	Bemærkning
10 % i stedet for cement	1	40,14	40,16	40,09	40,02	160,00	256747,02	569,06	2216,4	40,80	2004,67	2,40	77,00	38,41	
		40,06	39,80										95,00	47,39	
		40,08	40,11												
10 % i stedet for cement	2	40,03	40,02	40,05	40,14	160,00	257217,12	572,46	2225,6	39,60	2002,50	2,40	97,00	48,44	
		40,01	40,03										96,00	47,94	
		40,11	40,37												
10 % i stedet for cement	3	40,08	40,16	40,00	40,28	160,00	257792,00	571,60	2217,3	41,80	2000,00	2,40		0,00	
		39,96	39,96												
		39,96	40,72												
20 % i stedet for cement	1	39,96	40,05	40,01	40,06	161,00	258050,90	566,86	2196,7	38,90	2000,50	2,40	69,00	34,49	
		40,12	40,00										63,00	31,49	
		39,95	40,13												
20 % i stedet for cement	2	40,19	39,84	40,24	39,98	161,20	259316,16	566,47	2184,5	39,40	2012,00	2,40	73,00	36,28	Tryk 2 - prøv lå skævt
		40,14	39,86										55,00	27,34	
		40,39	40,23												
20 % i stedet for cement	3	40,30	40,06	40,17	40,01	161,10	258920,28	566,17	2186,7	39,70	2008,33	2,40	65,00	32,37	
		40,14	39,87										64,00	31,87	
		40,06	40,11												
10 % i stedet for grus	1	40,27	40,80	40,20	40,84	161,50	265145,19	573,94	2164,6	40,30	2009,83	2,40	80,00	39,80	
		40,19	40,72										78,00	38,81	
		40,13	41,01												
10 % i stedet for grus	2	40,26	41,40	40,17	41,08	161,40	266361,73	578,05	2170,2	40,10	2008,67	2,40	89,00	44,31	
		40,10	40,96										97,00	48,29	
		40,16	40,88												
10 % i stedet for grus	3	40,11	40,65	40,09	40,67	161,20	262851,74	574,68	2186,3	40,30	2004,50	2,40	93,00	46,40	
		40,12	40,53										85,00	42,40	
		40,04	40,84												

Prøve: 28 døgn (vasket)		Målt		Gennemsnit											
Blanding	#	Højde [mm]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Bredde [mm]	Dybde [mm]	Rumfang [mm ³]	Vægt [g]	Densitet [kg/m ³]	Frekvens [μs]	Trykareal [mm ²]	Belastning [kN/s]	Trykstyrke [kN]	Brudstyrke [MPa]	Bemærkning
10 % i stedet for cement	1	40,03	40,51	40,17	40,93	161,60	265695,95	588,54	2215,1	42,80	2008,50	2,40	87,00	43,32	
		40,28	40,90										98,00	48,79	
		40,20	41,38												
10 % i stedet for cement	2	40,06	40,23	40,14	40,74	160,50	262466,55	585,94	2232,4	38,30	2007,17	2,40	110,00	54,80	
		40,18	40,64										112,00	55,80	
		40,19	41,34												
10 % i stedet for cement	3	40,20	41,19	40,53	41,06	160,50	267141,62	587,67	2199,8	40,10	2026,67	2,40	110,00	54,28	
		40,40	41,71										109,00	53,78	
		41,00	40,29												
20 % i stedet for cement	1	40,08	40,16	39,78	40,19	161,00	257400,07	565,25	2196,0	38,70	1989,00	2,40	83,00	41,73	
		39,60	40,16										70,00	35,19	
		39,66	40,25												
20 % i stedet for cement	2	40,35	39,22	40,14	39,62	160,80	255728,04	564,29	2206,6	39,60	2006,83	2,40	91,00	45,35	Prøven smuler efter tryk 1
		40,11	39,61										72,00	35,88	
		39,95	40,04												
20 % i stedet for cement	3	40,10	40,16	40,03	40,40	161,30	260813,05	575,59	2206,9	39,90	2001,33	2,40	95,00	47,47	Prøven smuler efter tryk 1
		40,06	40,41										68,00	33,98	
		39,92	40,62												
10 % i stedet for grus	1	40,05	40,41	40,16	40,51	160,40	260962,64	563,13	2157,9	40,40	2008,08	2,40	103,00	51,29	
		40,15	40,97										98,00	48,80	
		40,29	40,15												
10 % i stedet for grus	2	39,87	40,46	39,93	40,03	160,00	255743,72	560,43	2191,4	40,20	1996,67	2,40	106,00	53,09	
		39,91	40,11										94,00	47,08	
		40,02	39,51												
10 % i stedet for grus	3	40,05	40,24	40,28	39,80	160,20	256802,42	558,46	2174,7	40,30	2013,83	2,40	107,00	53,13	
		40,73	39,76										107,00	53,13	
		40,05	39,40												

Bilag 11 – Styrketest øvre og nedre grænser

Brydstyrke i MPa							
Døgn	Ref [A]	10 % cement (B)	20 % cement (C)	10 % grus (D)	10 % cement vasket (B)	20 % cement vasket (C)	10 % grus vasket (D)
7	46,69	37,49	25,58	24,38	46,39		42,16
7	42,59	35,02	26,08	23,38	42,44	33,60	45,59
7	41,00	36,75	26,37	23,86	47,72	34,22	42,55
7	42,54	36,75	24,85	21,43		32,23	46,01
7	43,36	36,03	26,17			34,01	45,01
7	42,85	34,55	23,66		42,23	33,03	45,50
14	55,19		27,84	36,38		34,49	39,80
14	56,17		24,30	35,89	47,39	31,49	38,81
14	52,48	38,61	27,91	36,72	48,44	36,28	44,31
14	53,95	38,10	25,88	35,73	47,94		
14	54,69	38,52		35,11		32,37	46,40
14	54,94	39,03		36,11		31,87	42,40
28	59,23	44,54	33,11	38,01		41,73	51,29
28	58,24	48,45	29,10	36,01	48,79		48,80
28	58,77	46,84	33,83	35,74	54,80	45,35	53,09
28	59,10		32,31	35,26	55,80		47,08
28	56,09	44,96	32,50	38,85	54,28	47,47	53,13
28		47,43	32,50	37,86	53,78		53,13
42	54,96	45,05		38,88	N/A	N/A	N/A
42			29,04	38,37	N/A	N/A	N/A
42	59,40		31,62	38,83	N/A	N/A	N/A
42	59,15	39,60	31,62	37,82	N/A	N/A	N/A
42	57,80	39,35	31,83	35,87	N/A	N/A	N/A
42	54,06	42,31	27,36		N/A	N/A	N/A

Middel [MPa]							
Døgn	Ref [A]	10 % cement (B)	20 % cement (C)	10 % grus (D)	10 % cement vasket (B)	20 % cement vasket (C)	10 % grus vasket (D)
7	43,17	36,10	25,45	23,26	44,69	33,42	44,47
14	54,57	38,57	26,48	35,99	47,92	33,30	42,34
28	58,29	46,44	32,23	36,96	53,49	44,85	51,09
42	57,07	41,58	30,30	37,96	N/A	N/A	N/A

Nedregrænse [MPa]							
Døgn	Ref [A]	10 % cement (B)	20 % cement (C)	10 % grus (D)	10 % cement vasket (B)	20 % cement vasket (C)	10 % grus vasket (D)
7	38,85	32,49	22,91	20,94	40,22	30,08	40,02
14	49,11	34,71	23,83	32,39	43,13	29,97	38,11
28	52,46	41,80	29,00	33,26	48,14	40,36	45,98
42	51,36	37,42	27,27	34,16	N/A	N/A	N/A

Øvregrænse [MPa]							
Døgn	Ref [A]	10 % cement (B)	20 % cement (C)	10 % grus (D)	10 % cement vasket (B)	20 % cement vasket (C)	10 % grus vasket (D)
7	47,06	39,35	27,74	25,36	48,71	36,43	48,47
14	59,48	42,04	28,86	39,23	52,24	36,30	46,16
28	63,53	50,62	35,13	40,28	58,31	48,88	55,69
42	62,21	45,32	33,02	41,37	N/A	N/A	N/A

Bilag 12 – Støbeskemaer

Prøve: 7 døgn				
Blanding	Ref (A)	10 % ask / 90 % cement (B)	20 % ask / 80 % cement (C)	10 % ask / 90 % grus (D)
Cement [g]	450,48	404,91	360,12	450,37
Grus [g]	1350,02	1350,03	1350,13	1215,14
Vand [g]	225,46	225,33	225,34	225,38
Aske [g]	0	45,01	90	135,06
Vibrerings frekvens 1. gang		47	48	45
Vibrerings tid 1. gang [sek]	15	21,8	27,23	22,7
Vibrerings frekvens 2. gang		48	45	44
Vibrerings tid 2. gang [sek]	25	24,7	22,6	25,4
Vibrerings frekvens 3. gang			46	
Vibrerings tid 3. gang [sek]			61,3	
Ekstrer vand [g]	0	16,34	39,31	63,35
Zerotime [t:min] [dato]	09:42 [06.09.2012]	10:13 [06.09.2012]	10:38 [06.09.2012]	11:14 [06.09.2012]
Demolding time [t:min] [dato]	09:43 [07.09.2012]	09:48 [07.09.2012]	09:57 [07.09.2012]	09:40 [07.09.2012]
Bemærkning	Føles meget våd		Prøven var tør og derfor fyldes formen og rystes en ekstr gang	

Prøve: 14 døgns			
Blanding	10 % ask / 90 % cement (B)	20 % ask / 80 % cement (C)	10 % ask / 90 % grus (D)
Cement [g]	405,02	360,5	450,06
Grus [g]	1350,09	1350,22	1214,89
Vand [g]	224,99	224,89	224,95
Aske [g]	45,09	90,02	134,98
Vibrerings frekvens 1. gang	48	46	47
Vibrerings tid 1. gang [sek]	30	34	31
Vibrerings frekvens 2. gang	47	47	47
Vibrerings tid 2. gang [sek]	30	30	23
Vibrerings frekvens 3. gang			
Vibrerings tid 3. gang [sek]			
Ekstrer vand [g]	38	67,87	80,03
Zerotime [t:min] [dato]	12:46 [09.10.12]	13:08 [09.10.12]	13:30 [09.10.12]
Demolding time [t:min] [dato]	09:01 [10.10.12]	09:12 [10.10.12]	09:28 [10.10.12]
Bemærkning			

Prøve: 28 døgns			
Blanding	10 % ask / 90 % cement (B)	20 % ask / 80 % cement (C)	10 % ask / 90 % grus (D)
Cement [g]	405,16	359,52	450,42
Grus [g]	1350,19	1350,89	1215,32
Vand [g]	225,28	225,13	225,29
Aske [g]	45,09	89,86	135,33
Vibrerings frekvens 1. gang	46	46	49
Vibrerings tid 1. gang [sek]	27	27	37
Vibrerings frekvens 2. gang	48	48	45
Vibrerings tid 2. gang [sek]	26	16	27
Vibrerings frekvens 3. gang			
Vibrerings tid 3. gang [sek]			
Ekstrer vand [g]	18,12	52,16	91,02
Zerotime [t:min] [dato]	12:05 [02.10.12]	12:05 [02.10.12]	12:25 [02.10.12]
Demolding time [t:min] [dato]	08:20 [03.10.12]	08:24 [03.10.12]	09:28 [03.10.12]
Bemærkning			

Prøve: 42 døgns			
Blanding	10 % ask / 90 % cement (B)	20 % ask / 80 % cement (C)	10 % ask / 90 % grus (D)
Cement [g]	405,24	360,04	450,18
Grus [g]	1350,04	1350,45	1215,15
Vand [g]	225,03	225,05	225,08
Aske [g]	45,02	90,23	135,03
Vibrerings frekvens 1. gang	44	47	46
Vibrerings tid 1. gang [sek]	20,5	23,5	30
Vibrerings frekvens 2. gang	47	48	45
Vibrerings tid 2. gang [sek]	31,5	27	31,5
Vibrerings frekvens 3. gang			
Vibrerings tid 3. gang [sek]			
Ekstrer vand [g]	19,95	24,07	56,88
Zerotime [t:min] [dato]	10:47 [02.10.12]	11:09 [02.10.12]	11:34 [02.10.12]
Demolding time [t:min] [dato]	08:06 [03.10.12]	08:10 [03.10.12]	08:16 [03.10.12]
Bemærkning			

Prøve: 7 døgns (vasket)			
Blanding	10 % ask / 90 % cement (B)	20 % ask / 80 % cement (C)	10 % ask / 90 % grus (D)
Cement [g]	404,97	360,24	449,91
Grus [g]	1350,53	1349,65	1215,48
Vand [g]	225,37	225,2	225,21
Aske [g]	45,05	90,31	135,3
Vibrerings frekvens 1. gang	20	20	20
Vibrerings tid 1. gang [sek]	47	47	45
Vibrerings frekvens 2. gang	20	20	20
Vibrerings tid 2. gang [sek]	46	49	45
Vibrerings frekvens 3. gang			
Vibrerings tid 3. gang [sek]			
Ekstrer vand [g]	11,98	45,95	55,07
Zerotime [t:min] [dato]	10:15 [23.10.12]	10:38 [23.10.12]	11:04 [23.10.12]
Demolding time [t:min] [dato]	10:05 [24.10.12]	10:08 [24.10.12]	10:11 [24.10.12]
Bemærkning			

Prøve: 14 døgns (vasket)			
Blanding	10 % ask / 90 % cement (B)	20 % ask / 80 % cement (C)	10 % ask / 90 % grus (D)
Cement [g]	405,56	359,88	450,85
Grus [g]	1349,26	1352	1215,17
Vand [g]	225,05	224,99	225,9
Aske [g]	45,93	90,1	135,9
Vibrerings frekvens 1. gang	44	44	46
Vibrerings tid 1. gang [sek]	20	20	21,9
Vibrerings frekvens 2. gang	44	44	44
Vibrerings tid 2. gang [sek]	20	20	22,2
Vibrerings frekvens 3. gang			
Vibrerings tid 3. gang [sek]			
Ekstrer vand [g]	21,86	44,22	72,61
Zerotime [t:min] [dato]	10:13 [20.11.12]	10:13 [20.11.12]	10:30 [20.11.12]
Demolding time [t:min] [dato]	10:05 [21.11.12]	10:08 [21.11.12]	10:11 [21.11.12]
Bemærkning			

Prøve: 28 døgns (vasket)			
Blanding	10 % ask / 90 % cement	20 % ask / 80 % cement	10 % ask / 90 % grus
Cement [g]	405,11	359,5	450,78
Grus [g]	1350,29	1349,82	1215,44
Vand [g]	225,23	225,11	225,87
Aske [g]	45,17	90,28	135,64
Vibrerings frekvens 1. gang	21,6	20,3	20,6
Vibrerings tid 1. gang [sek]	48	45	43
Vibrerings frekvens 2. gang	20,6	20,6	20,9
Vibrerings tid 2. gang [sek]	46	46	44
Vibrerings frekvens 3. gang			
Vibrerings tid 3. gang [sek]			
Ekstrer vand [g]	29,11	39,83	54,71
Zerotime [t:min] [dato]	09:35 [06.11.12]	10:02 [06.11.12]	10:25 [06.11.12]
Demolding time [t:min] [dato]	10:05 [24.10.12]	10:08 [24.10.12]	10:11 [24.10.12]
Bemærkning			

Bilag 13 – Bearbejdet data IC

IC på LSA								
Prøve #	afvejet [g]	tilsat [mL]	mg/L Cl	mg/kg Cl	mg/l NO3	mg/kg NO3	mg/L SO4	mg/kg SO4
1	10,02	50,00	356,00	1.776,45	26,00	129,74	10.300,00	51.397,21
2	10,02	50,00	342,00	1.706,59	16,00	79,84	10.376,00	51.776,45
3	10,00	50,00	341,00	1.705,00	15,00	75,00	10.417,00	52.085,00
Middel [g/kg]				1,73		0,09		51,75
Procent af prøven				0,173%		0,009%		5,175%

IC på LSA vasket								
Prøve #	afvejet [g]	tilsat [mL]	mg/L Cl	mg/kg Cl	mg/l NO3	mg/kg NO3	mg/L SO4	mg/kg SO4
1	10,00	50,00	4,49	22,43	0,73	3,66	497,71	2.488,54
2	10,01	50,00	4,81	24,02	0,80	4,02	541,20	2.703,30
3	10,01	50,00	4,58	22,88	0,77	3,84	533,14	2.663,03
Middel [g/kg]				0,023		0,0038		2,62
Procent af prøven				0,0023%		0,00038%		0,262%

IC på Leaching - LSA vasket								
Prøve #	afvejet [g]	tilsat [mL]	mg/L Cl	mg/kg Cl	mg/l NO3	mg/kg NO3	mg/L SO4	mg/kg SO4
1	41,05	80,00	8,22	16,01	15,80	30,79	2,51	4,88
2	40,32	80,00	9,38	18,62	3,02	6,00	2,85	5,65
3	40,37	80,00	9,28	18,40	3,87	7,67	2,84	5,62
Middel [g/kg]				0,017675		0,014818		0,005384
Procent af prøven				0,00177%		0,00148%		0,00054%

Bilag 14 – Bearbejdet data ICP

ICP på LSA																				
Prøve #	afvejet [g]	tilsat [mL]	mg/L Al	mg/kg Al	mg/L Cd	mg/kg Cd	mg/L Cr	mg/kg Cr	mg/L Cu	mg/kg Cu	mg/L Ni	mg/kg Ni	mg/L Pb	mg/kg Pb	mg/L Zn	mg/kg Zn	mg/L Na	mg/kg Na	mg/L K	mg/kg K
1	1,0504	100	899,00	85.585,97	0,008	0,785	0,427	40,604	5,028	478,638	0,255	24,233	0,499	47,506	10,283	978,941	413,382	39.354,722	46,187	4.397,077
2	1,0446	100	857,41	82.080,13	0,008	0,790	0,431	41,289	5,072	485,505	0,253	24,193	0,489	46,797	10,436	999,081	396,000	37.909,248	46,848	4.484,731
3	1	100	776,27	77.626,80	0,013	1,321	0,436	43,623	5,177	517,733	0,256	25,646	0,652	65,174	15,964	1.596,360	359,770	35.977,000	47,703	4.770,270
Middel [g/kg]				81,764		0,001		0,042		0,494		0,025		0,053		1,191		37,747		4,551
Procent af prøven				8,176%		0,000%		0,004%		0,049%		0,002%		0,005%		0,119%		3,775%		0,455%

ICP på LSA vasket														
Prøve #	afvejet [g]	tilsat [mL]	mg/L Al	mg/kg Al	mg/L Ca	mg/kg Ca	mg/L Cd	mg/kg Cd	mg/L Cr	mg/kg Cr	mg/L Cu	mg/kg Cu	mg/L Fe	mg/kg Fe
1	1,0387	100,00	812,11	78.184,94	987,06	95.028,40	0,01	1,30	0,54	52,07	5,12	492,67	218,90	21.074,71
2	1,0660	100,00	832,59	78.103,75	1.014,75	95.192,31	0,01	1,30	0,56	52,71	5,33	499,78	223,75	20.989,68
3	1,0113	100,00	529,62	52.370,02	633,73	62.664,79	0,01	0,80	0,37	36,79	3,63	358,72	105,23	10.405,72
Middel [g/kg]				69,553		84,295		0,001		0,047		0,450		17,490
Procent af prøven				6,96%		8,43%		0,0001%		0,005%		0,05%		1,75%
Prøve #	afvejet [g]	tilsat [mL]	mg/L K	mg/kg K	mg/L Mg	mg/kg Mg	mg/L Ni	mg/kg Ni	mg/L Pb	mg/kg Pb	mg/L Zn	mg/kg Zn	mg/L Na	mg/kg Na
1	1,0387	100,00	46,12	4.440,38	77,56	7.467,12	0,35	33,55	0,71	68,67	17,78	1.711,31	22,98	2.212,51
2	1,0660	100,00	45,37	4.255,98	79,85	7.491,05	0,36	34,01	0,77	71,93	18,14	1.701,72	22,05	2.068,73
3	1,0113	100,00	29,11	2.878,35	55,97	5.534,40	0,24	23,54	0,52	51,46	8,23	813,62	14,79	1.462,44
Middel [g/kg]				3,858		6,831		0,030		0,064		1,409		1,915
Procent af prøven				0,39%		0,68%		0,00%		0,01%		0,14%		0,19%

ICP på Leaching - LSA vasket														
Prøve #	afvejet [g]	tilsat [mL]	mg/L Al	mg/kg Al	mg/L Ca	mg/kg Ca	mg/L Cd	mg/kg Cd	mg/L Cr	mg/kg Cr	mg/L Cu	mg/kg Cu	mg/L Fe	mg/kg Fe
1	41,05	80,00	0,47	0,92	766,73	1.494,24	0,0000	0,0000	0,0166	0,0323	0,1591	0,3100	0,1299	0,253
2	40,32	80,00	0,15	0,30	782,45	1.552,49	0,0006	0,0012	0,0154	0,0306	0,0124	0,0247	0,0443	0,088
3	40,37	80,00	0,12	0,25	796,37	1.578,14	0,0000	0,0000	0,0167	0,0331	0,0101	0,0201	0,0235	0,047
Middel [g/kg]				0,000489032		1,541625451		4,14683E-07		3,19781E-05		0,000118228		0,000129175
Procent af prøven				0,0000%		0,1542%		0,0000%		0,0000%		0,0000%		0,0000%
Prøve #	afvejet [g]	tilsat [mL]	mg/L K	mg/kg K	mg/L Mg	mg/kg Mg	mg/L Ni	mg/kg Ni	mg/L Pb	mg/kg Pb	mg/L Zn	mg/kg Zn	mg/L Na	mg/kg Na
1	41,05	80,00	178,78	348,40	0,0926	0,1804	0,0000	0,0000	0,0132	0,0258	0,0246	0,0480	139,65	272,16
2	40,32	80,00	172,99	343,23	0,0132	0,0262	0,0000	0,0000	0,0957	0,1899	0,0151	0,0299	136,26	270,35
3	40,37	80,00	177,17	351,09	0,0073	0,0144	0,0000	0,0000	0,0174	0,0345	0,0056	0,0111	140,09	277,60
Middel [g/kg]				0,347573003		7,36765E-05		0		8,33976E-05		2,96306E-05		0,273369747
Procent af prøven				0,0348%		0,0000%		0,0000%		0,0000%		0,0000%		0,0273%

Bilag 15 – SEM målinger

c:\edax32\genesis\genspc.spc

Label :

Acquisition Time : 00:00:00 Date:30-Oct-2012

kV : 14.99 Tilt: 0.40 Take-off:35.31 AmpT : 51.2

Detector Type:SUTW, Sapphire Resolution:131.41 Lsec:100

EDAX ZAF Quantification (Standardless)

Element Normalized

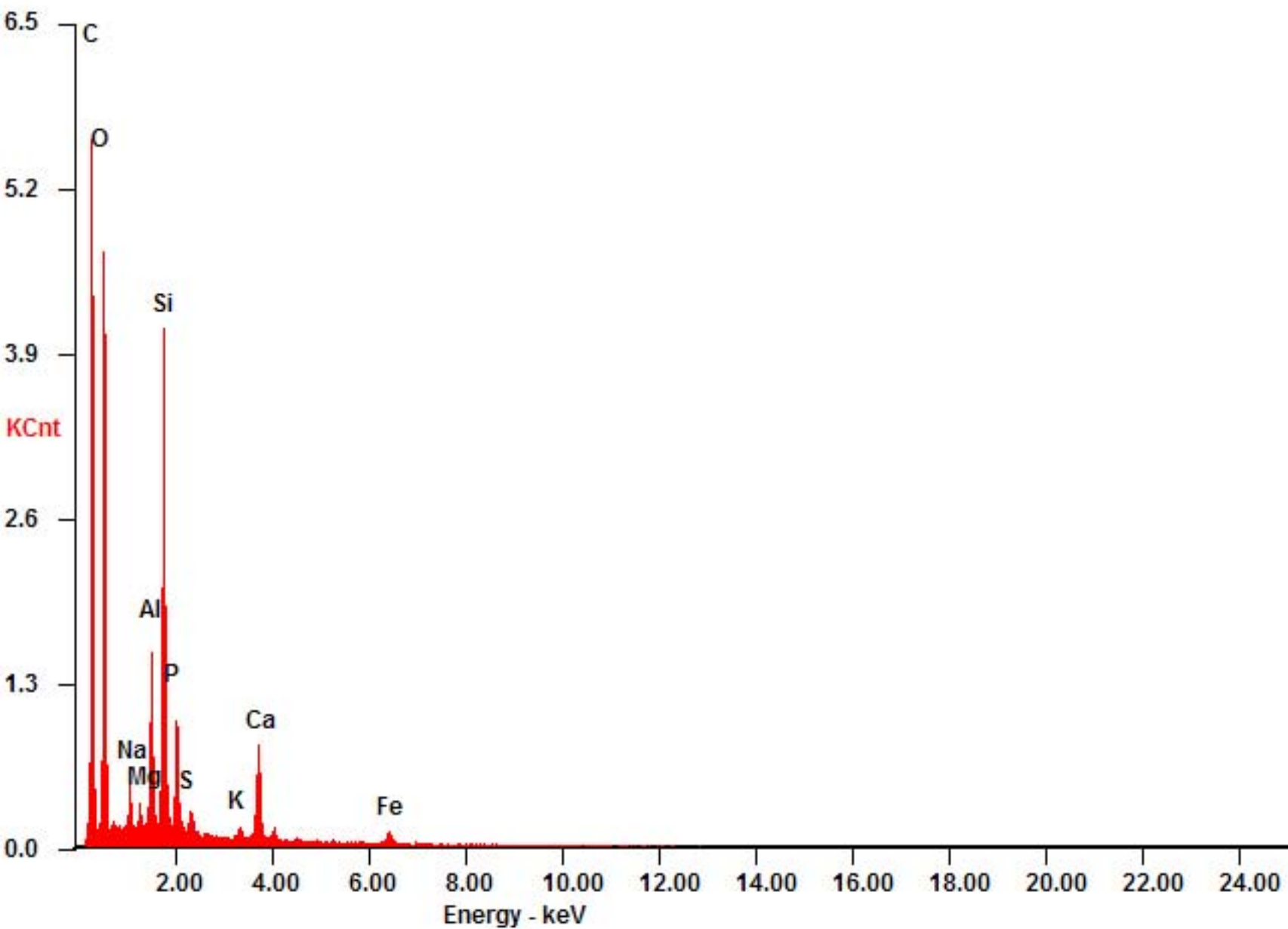
SEC Table : User c:\edax32\eds\genuser.sec

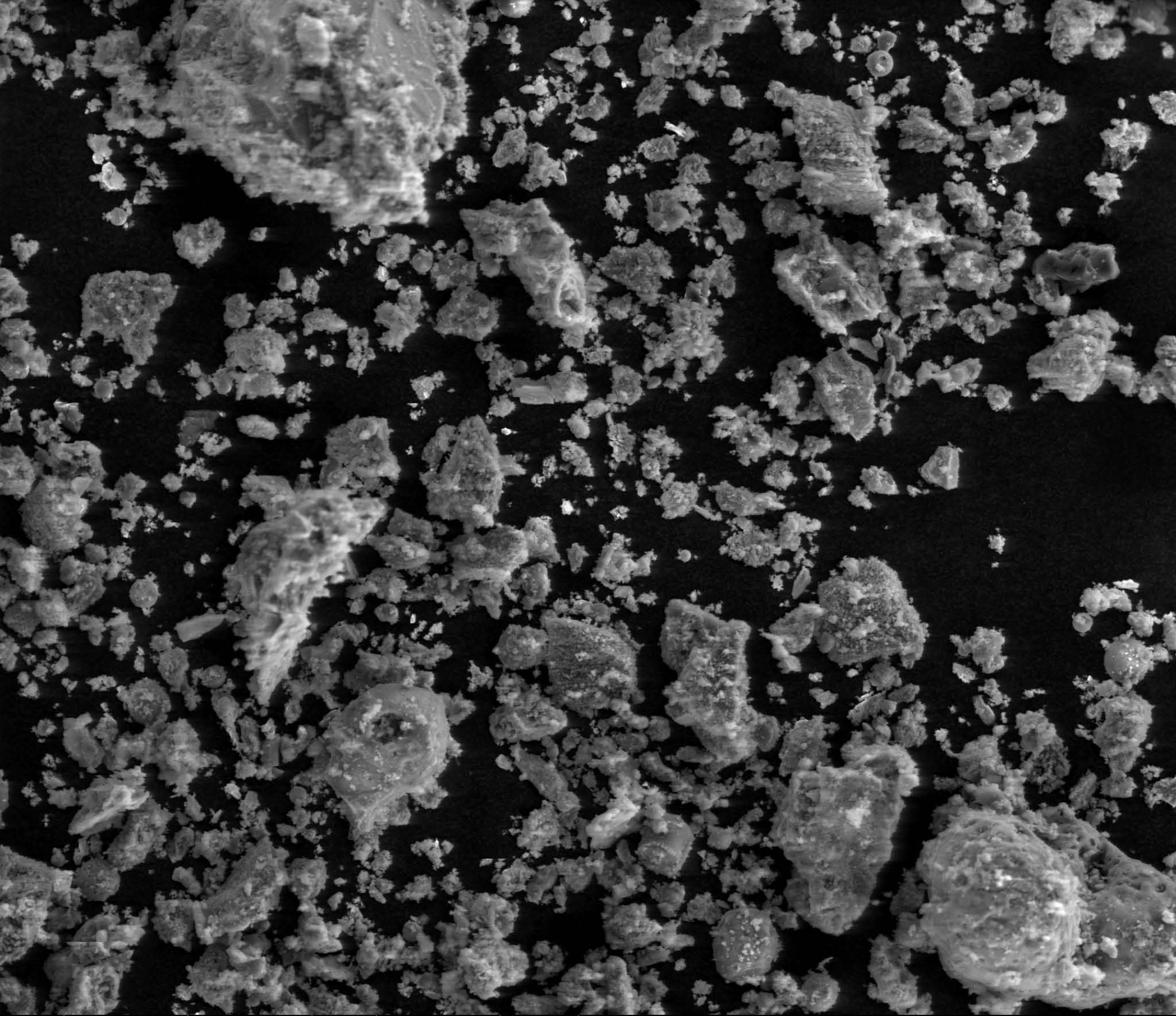
Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	46.29	58.30	0.1559	1.0235	0.3289	1.0003
O K	33.75	31.91	0.0907	1.0042	0.2676	1.0002
NaK	0.99	0.65	0.0051	0.9373	0.5497	1.0014
MgK	0.38	0.24	0.0025	0.9602	0.6954	1.0028
AlK	2.72	1.53	0.0206	0.9284	0.8112	1.0041
SiK	7.78	4.19	0.0645	0.9491	0.8721	1.0018
P K	2.27	1.11	0.0183	0.9166	0.8775	1.0013
S K	0.48	0.23	0.0041	0.9407	0.9150	1.0017
K K	0.39	0.15	0.0035	0.9032	0.9881	1.0083
CaK	3.37	1.27	0.0310	0.9221	0.9968	1.0011
FeK	1.58	0.43	0.0132	0.8290	1.0074	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	287.35	3.30	0.60	87.08
O K	307.28	5.67	0.58	54.19
NaK	25.78	12.36	2.76	2.09
MgK	12.67	13.31	4.95	0.95
AlK	98.38	14.75	1.15	6.67
SiK	279.31	18.09	0.64	15.44
P K	69.77	19.15	1.49	3.64
S K	14.74	13.81	4.42	1.07
K K	9.02	8.39	5.63	1.08
CaK	70.87	7.41	1.31	9.56
FeK	10.79	4.04	4.03	2.67

Label :

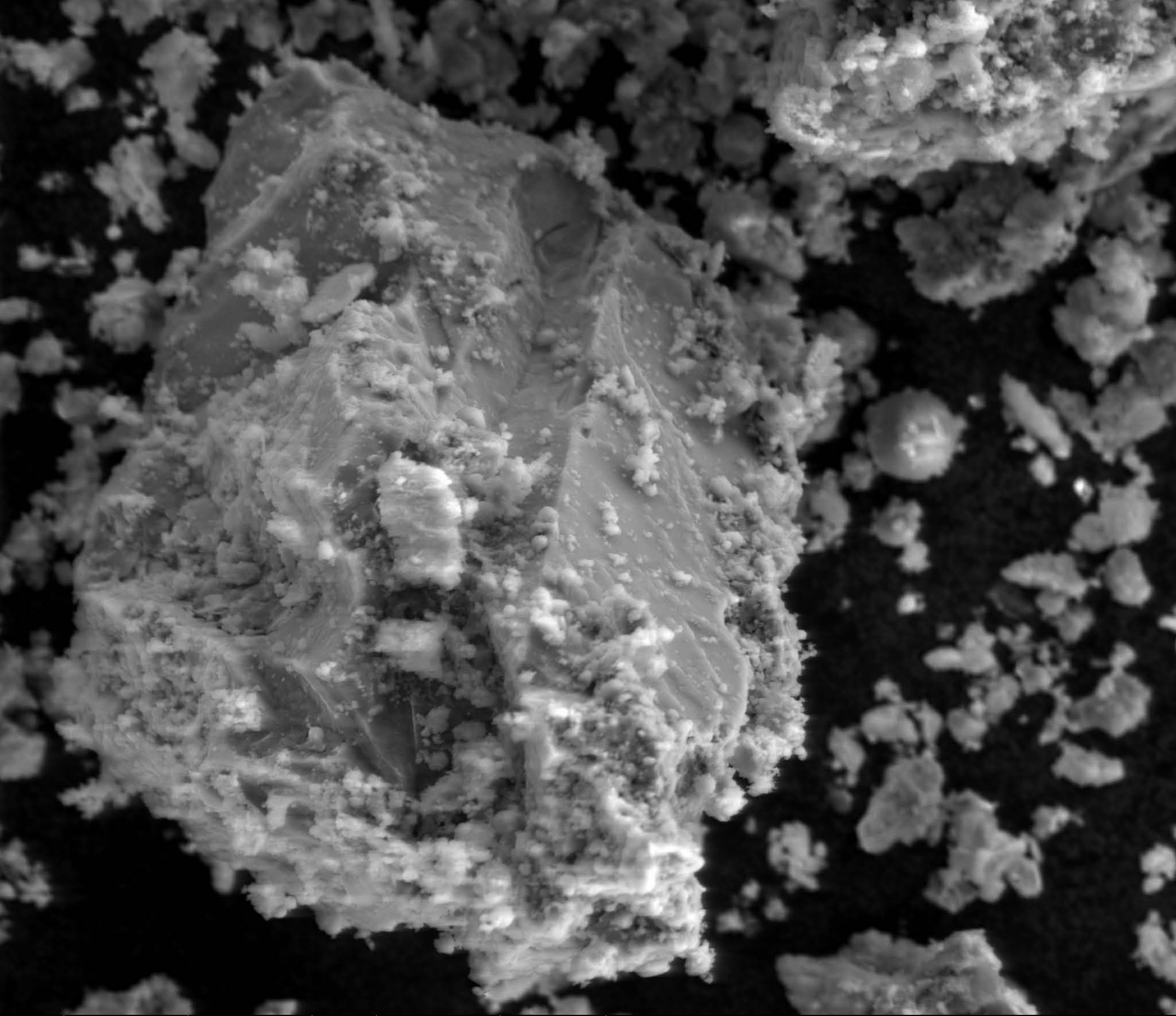
LSecs : 100





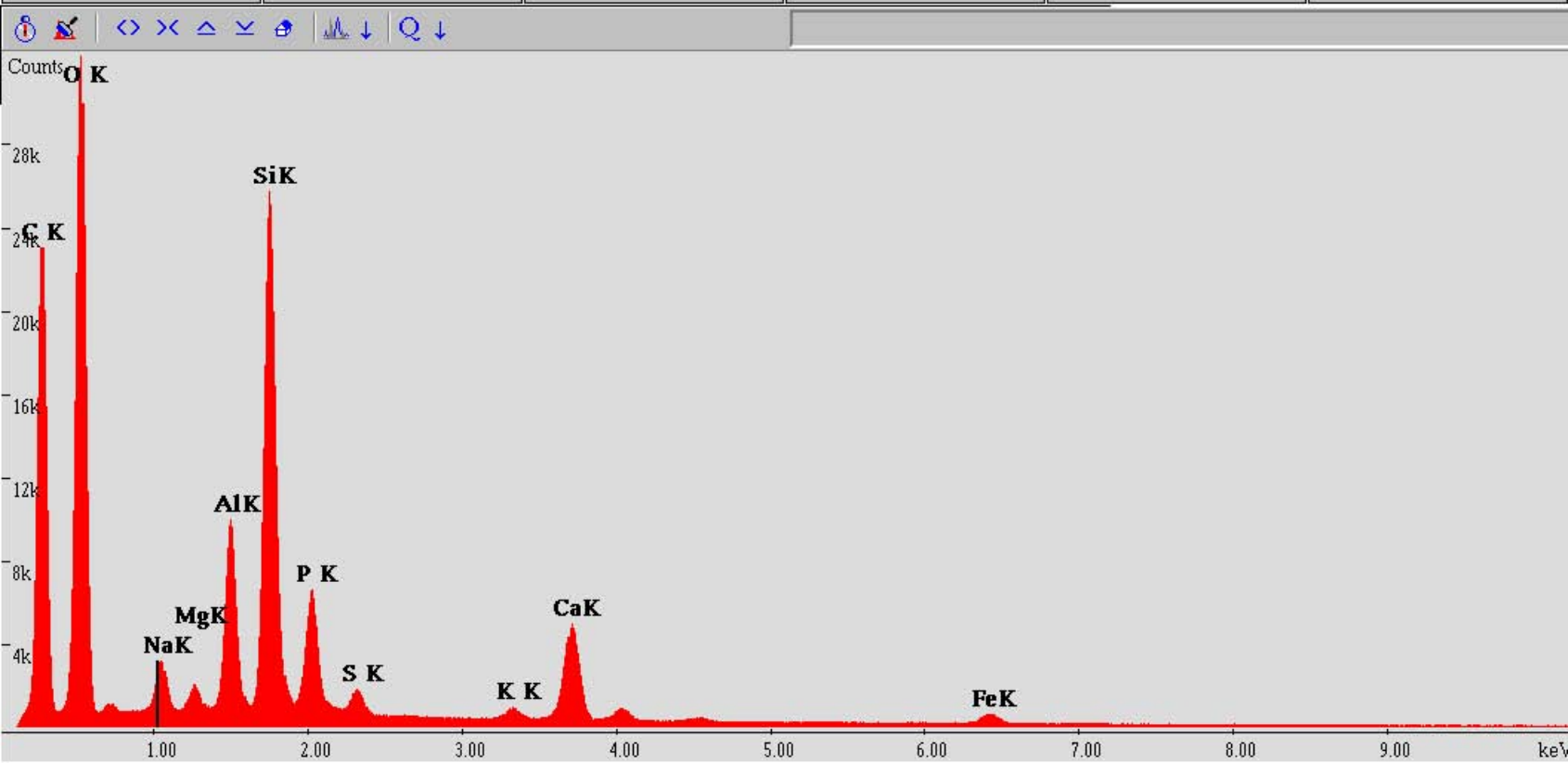
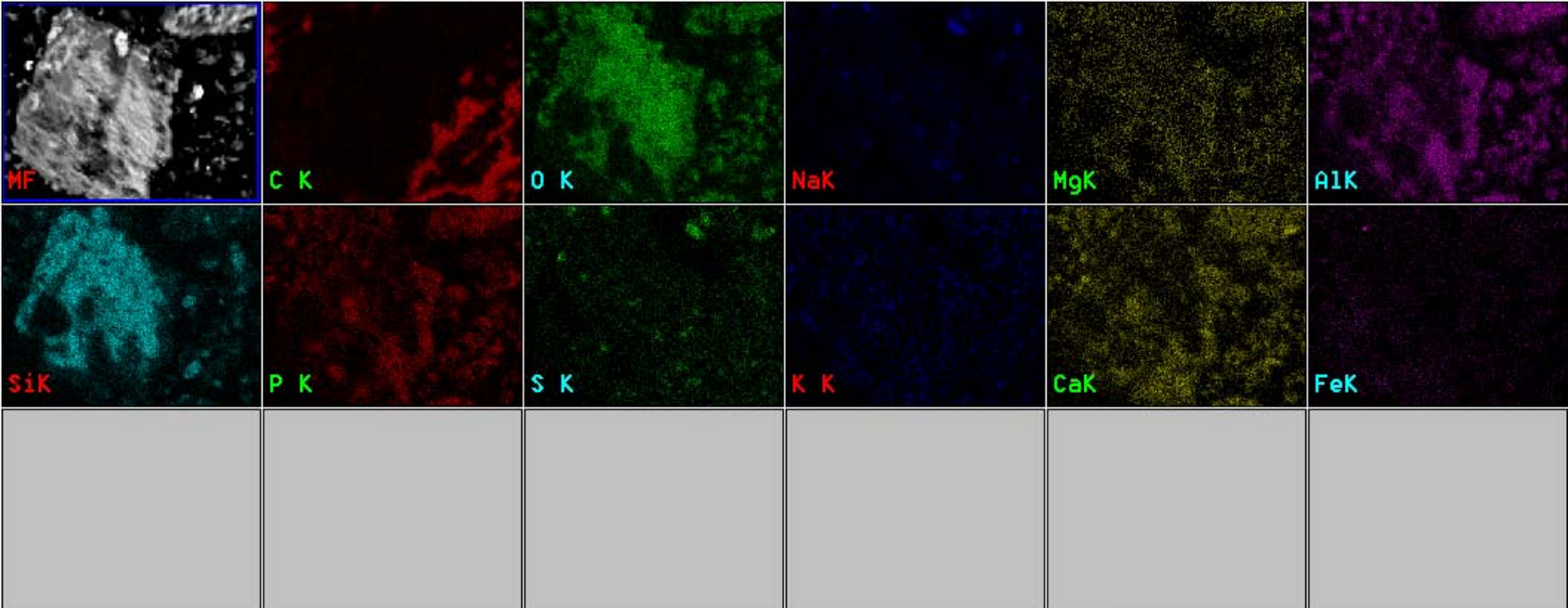
det	HV	WD	spot	pressure	mag
LFD	15.00 kV	10.1 mm	4.5	130 Pa	400 x

100 μm
Lundtofte



det	HV	WD	spot	pressure	mag
LFD	15.00 kV	10.0 mm	4.5	130 Pa	1 000 x

50 μ m
Lundtofte



c:\edax32\genesis\genspc.spc

Label :

Acquisition Time : 09:26:38 Date:30-Oct-2012

kV : 14.99 Tilt: 0.40 Take-off:35.31 AmpT : 51.2

Detector Type:SUTW, Sapphire Resolution:131.41 Lsec:100

EDAX ZAF Quantification (Standardless)

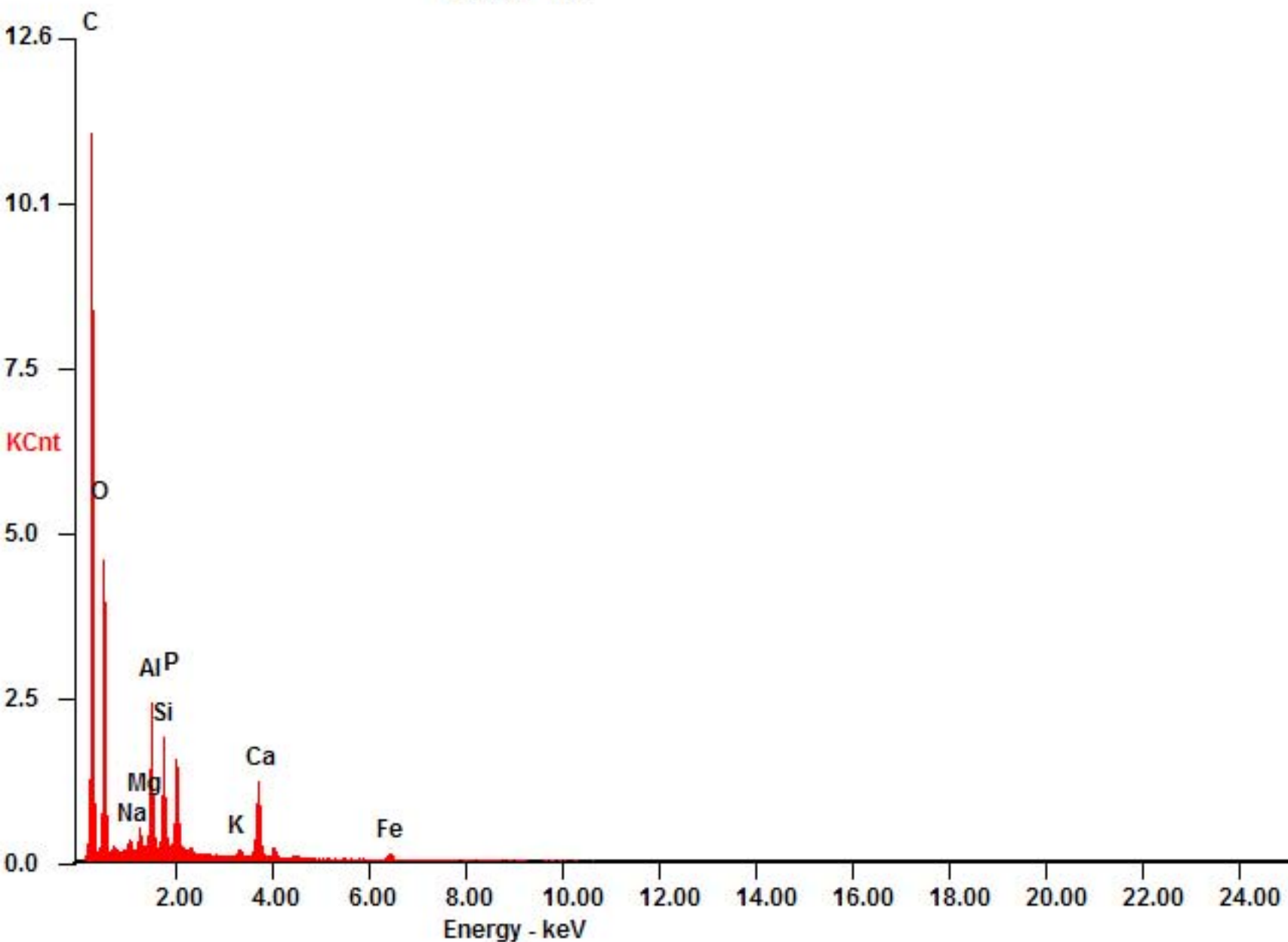
Element Normalized

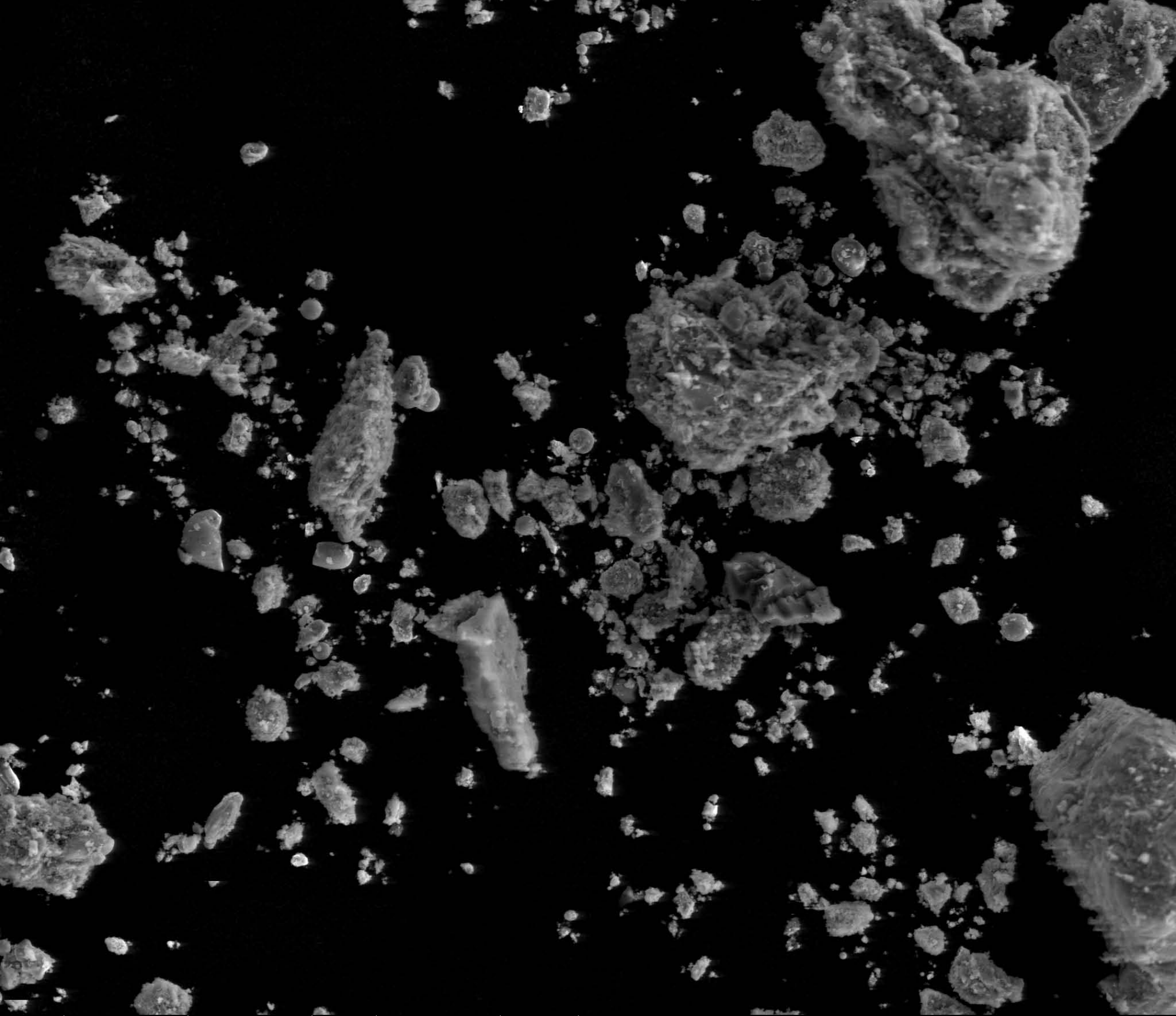
SEC Table : User c:\edax32\eds\genuser.sec

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	56.23	67.54	0.2386	1.0194	0.4161	1.0002
O K	28.26	25.48	0.0685	1.0003	0.2421	1.0001
NaK	0.40	0.25	0.0021	0.9337	0.5626	1.0010
MgK	0.59	0.35	0.0040	0.9565	0.7129	1.0020
AlK	3.30	1.77	0.0252	0.9245	0.8236	1.0023
SiK	2.60	1.33	0.0216	0.9448	0.8768	1.0023
P K	2.90	1.35	0.0243	0.9126	0.9158	1.0013
K K	0.35	0.13	0.0032	0.8994	0.9995	1.0117
CaK	4.06	1.46	0.0375	0.9183	1.0053	1.0010
FeK	1.30	0.34	0.0108	0.8253	1.0084	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	567.86	3.19	0.42	178.01
O K	299.36	5.74	0.59	52.15
NaK	13.86	13.68	4.63	1.01
MgK	25.87	14.52	2.86	1.78
AlK	155.36	16.19	0.88	9.60
SiK	120.41	20.34	1.05	5.92
P K	119.58	21.00	1.06	5.69
K K	10.77	9.53	5.07	1.13
CaK	110.90	8.23	1.02	13.48
FeK	11.42	4.26	3.91	2.68

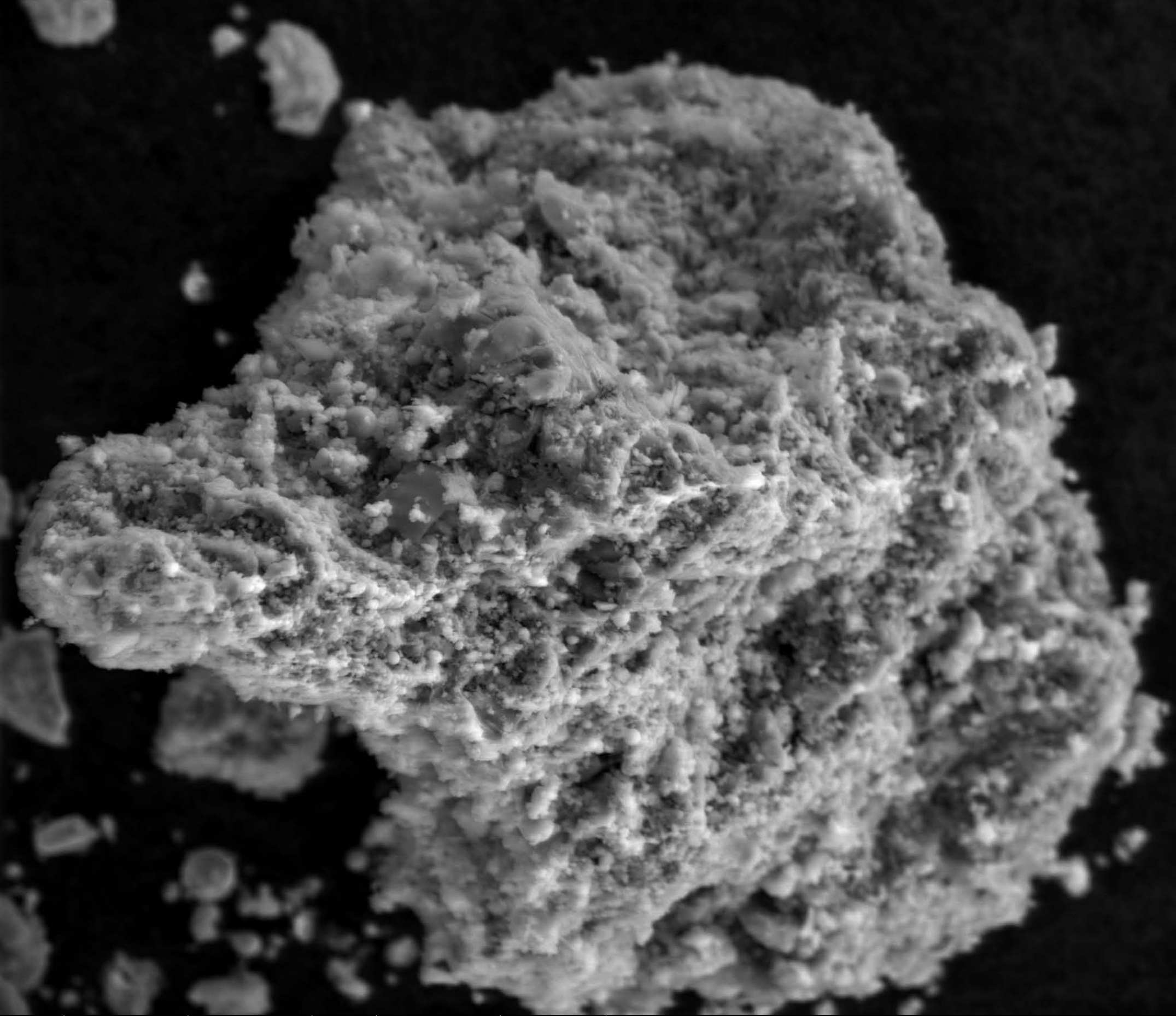
LSecs : 100





det	HV	WD	spot	pressure	mag
LFD	15.00 kV	10.2 mm	4.5	130 Pa	400 x

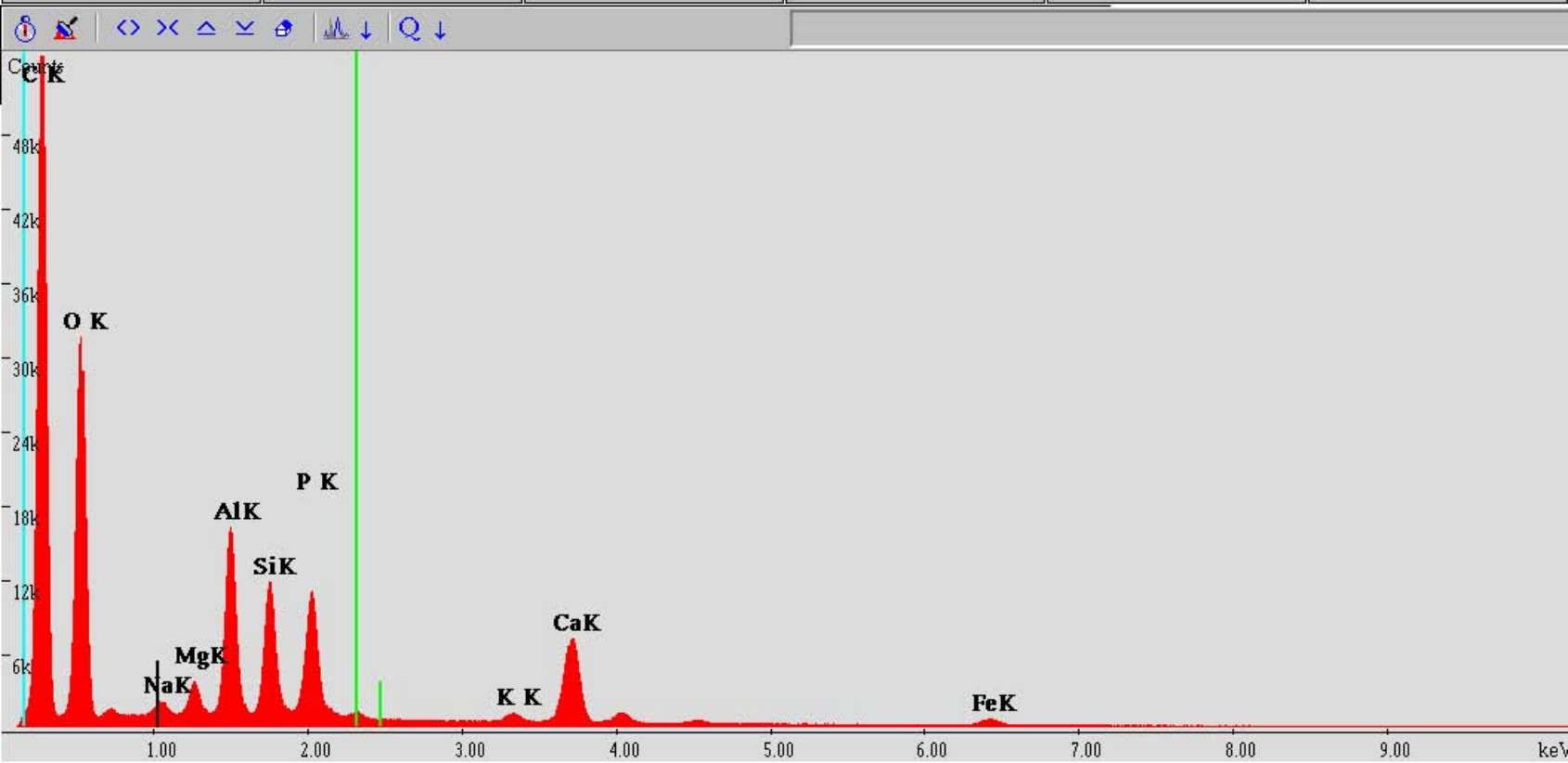
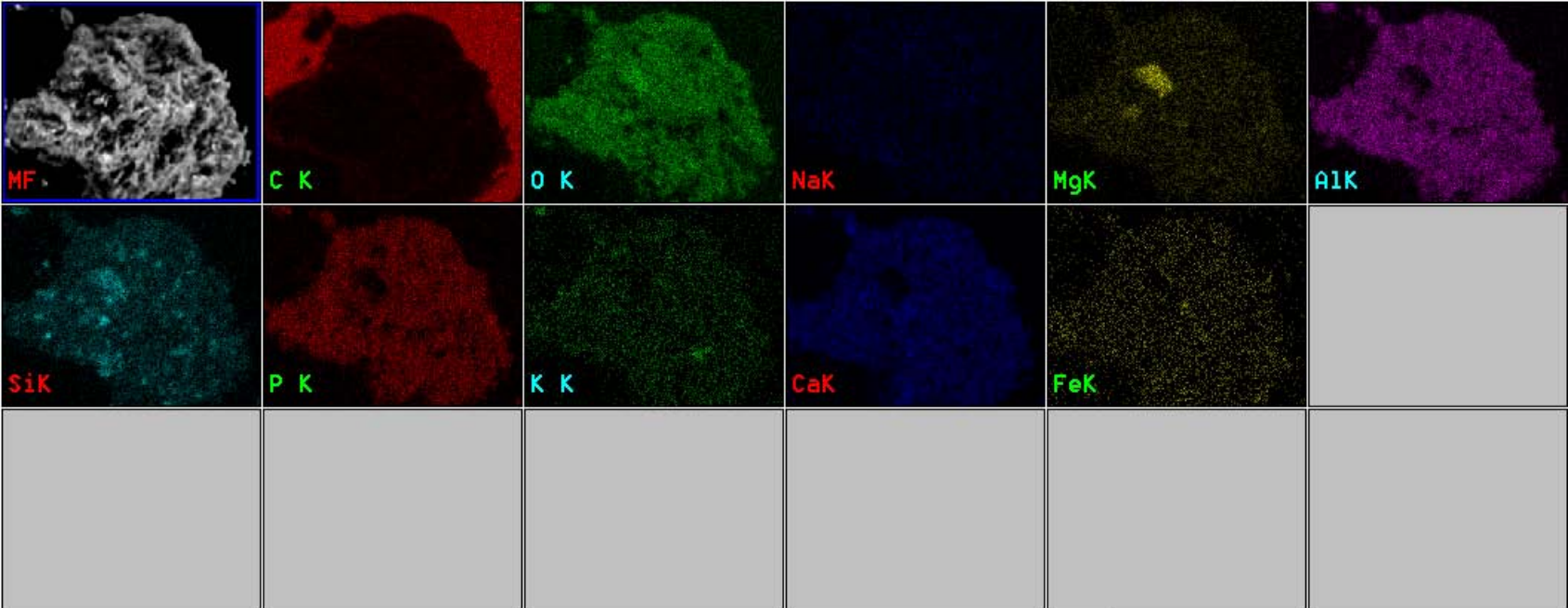
100 μm
Lundtofte vasket



det	HV	WD	spot	pressure	mag
LFD	15.00 kV	10.0 mm	4.5	130 Pa	1 000 x

50 µm

Lundtofte vasket



Bilag 16 – Aktivetsfaktor

Prøve: 28 døgns			
Blanding	10 % ask / 90 % cement (B)	20 % ask / 80 % cement (C)	10 % ask / 90 % grus (D)
Cement [g]	405,16	359,52	450,42
Grus [g]	1350,19	1350,89	1215,32
Vand [g]	225,28	225,13	225,29
Aske [g]	45,09	89,86	135,33
Ekstrer vand [g]	18,12	52,16	91,02
Prøve: 28 døgns (vasket)			
Blanding	10 % ask / 90 % cement (B)	20 % ask / 80 % cement (C)	10 % ask / 90 % grus (D)
Cement [g]	405,11	359,5	450,78
Grus [g]	1350,29	1349,82	1215,44
Vand [g]	225,23	225,11	225,87
Aske [g]	45,17	90,28	135,64
Ekstrer vand [g]	29,11	39,83	54,71

**Bilag 17 - Bekendtgørelse om anvendelse af slagger og flyveaske af 2010,
bilag 4**

Bilag 4**Bygge- og anlægsarbejder hvortil restprodukter og jord i kategori 3 kan anvendes uden tilladelse**

Bygge- og anlægsarbejde:	Krav ved anvendelse af kategori 3.
Veje	Tæt belægning og bortledning af overfladevand. h maks. 1 m.
Stier	Fast belægning. h maks. 0,3 m.
Ledningsgrave	Fast belægning.
Fundamenter og gulve	h maks. 1 m under bygninger. Jord må ikke kunne give anledning til indeklimaproblemer.

h er den samlede højde af kategori 3 materialer.

Tæt belægning: Ved tæt belægning forstås asfalt, beton m.m., der reducerer mængden af vand, der vil perkolere gennem belægningen. Bortledning af overfladevand medfører at højst 10 % af nedbøren vil komme i kontakt med restprodukt eller jord.

Fast belægning: Ved fast belægning forstås asfalt, beton, fliser, minimum 1 m kategori 1 jord m.m. der sikrer mod kontakt.

Bilag 18 – Ledningsevne

Ledningsevne			
Prøve #	1	2	3
Aske [g]	5,00	5,00	5,00
Destilleret vand [mL]	12,50	12,50	12,50
Ledningsevne [mS/cm]	28,02	27,55	26,93
pH	10,66	10,67	10,68

Sat på rystebord	10:34
Taget af	11:14
I alt	40 min
Bundfald	20 min

Bilag 19 - Vandindhold

Vandindhold			
Før tørring:			
Prøve #	1	2	3
Glas [g]	105,91	93,55	105,15
Aske [g]	100,04	100,02	100,08
Efter tørring:			
Glas + Aske [g]	205,12	192,76	204,39
Aske [g]	99,21	99,21	99,24
Vandindhold %	0,83%	0,81%	0,84%

Bilag 20 – Appendixliste overforsøgsvejledninger

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

Appendix B – Vandindhold i jord

Appendix C – Oplukning af jordprøve efter DS 259

Appendix D – Glødetab i jord

Appendix E – Måling af ledningsevne i jord

Appendix F – Vandopløselighed

Appendix G – Vandopløselige anioner

Appendix H – Method for measuring Buffer Capacity of Soils and Sludge

Bilag 21 – Forsøgsvejledninger

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

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.

Appendix B – Vandindhold i jord

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 stinksab ved afmåling.

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

Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.

D Reagenser

1) **Salpetersyre halvkonc, (1:1) HNO_3 :**

500 mL koncentreret HNO_3 overføres med måleglas til en 1000,00 mL målekolbe som er $\frac{1}{2}$ fyldt med destilleret vand. Der blandes godt og tilsættes vand til mærket. Efter blanding overføres opløsningen til en plastikflaske og mærkes.

E Analysens udførelse

1,00 g tør, knust jord afvejes på teknisk vægt i et pyrex-glas med skruelåg (autoklaveglas) og der tilsættes 20,00 mL halvkoncentreret HNO_3 med fuldpipette (skal foregå i stinkskaab).

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

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

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

F Bestemmelse af metaller

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

G Beregning af resultat

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

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

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.

Appendix C – Oplukning af jordprøve efter DS 259

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.

Appendix D – Glødetab i jord

Glødetab i jord

A Princip

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

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

Derefter afvejes 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 eksikator og vejes på analyse vægt.

D Beregning af resultat

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

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

E Affaldshåndtering

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

Appendix E – Måling af ledningsevne i jord

Måling af ledningsevne i jord

A Princip

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

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes ledningsevнемåler.

C Analysens udførelse

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

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

D Beregning af resultat

På baggrund af 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).

Appendix F – Vandopløselighed

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.

Appendix G – Vandopløselige anioner

Vandopløselige anioner

Analyse:

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

Prøven stilles på rystebord natten over.

Prøven filtreres med sprøjtefilter og prøven gemmes til ionchromotograf og AAS

Appendix H – Method for measuring Buffer Capacity of Soils and Sludge

Method for measuring Buffer Capacity of Soils and Sludge¹

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⁺ addition (ml conc. HCl)

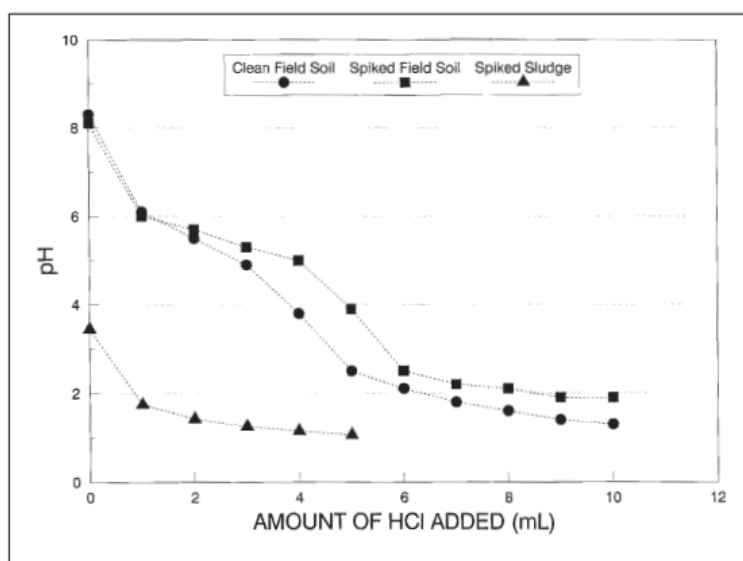


Figure 4. Buffering capacity test results.

¹ 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.