

Alternative asker i beton

Med fokus på Grønlandsk flyveaske



Bachelorprojekt
Institut for byggeri og anlæg

S092804 Randi Juel Olsen
S092833 Marlene Mia Westmose Hansen

Januar 2013

ALTERNATIVE ASKER I BETON

MED FOKUS PÅ GRØNLANDSK FLYVEASKE

Udarbejdet af:

RANDI JUEL OLSEN
STUD.POLYT. S092804

MARLENE MIA WESTMOSE HANSEN
STUD.POLYT. S092833

Udarbejdet på:

INSTITUT FOR BYGGERI OG ANLÆG
DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET

Vejlederteam:

LEKTOR MSK, LISBETH M. OTTOSEN
FORSKER, PERNILLE E. JENSEN
DOCENT, PER GOLTERMANN

Laborantteam:

LABORATORIEKOORDINATOR, EBBA CEDERBERG SCHNELL
LABORANT, SABRINA MADSEN

Projektperiode:

03.09.12 - 31.01.13

Kapitel 1

Forord

Denne rapport er sammen med et forsvar resultatet af det bachelorprojekt, der afslutter bacheloruddannelsen, byggeteknologi, ved Danmarks Tekniske Universitet. Projektet er vægtet med 20 ECTS point og er i perioden 3 september 2012 til 31 januar 2013 udarbejdet ved Institut for Byggeri og Anlæg. Rapporten er udarbejdet i et samarbejde mellem stud.polyt. Randi Juel Osen og stud.polyt. Marlene Mia Westmose Hansen.

Der rettes stor tak til vores vejleder, lektor MSK Lisbeth M. Ottosen, der under hele forløbet har stået til rådighed og været meget engageret i vores arbejde. Derudover skal der lyde tak til laboratoriekoordinator Ebba Cederberg Schnell for hjælp til forsøg i laboratorierne og for hendes altid smittende humør. Ydermere rettes der tak til forsker Pernille Erland Jensen samt laborant Sabrina Madsen, der har hjulpet med forsøg på Center for Artisk Teknologi.

Som vejledning til læseren oplyses det at litteraturhenvisninger er skrevet i formatet [forfatter, udgivesår, sidetal] og de fulde referencer findes i litteraturlisten.

Randi Juel Osen

Marlene Mia Westmose Hansen

Kapitel 2

Resumé

Affaldsforbrænding i Sisimiut på Grønland er stadig forholdsvist nyt. Den flyveaske, der produceres ved forbrændingen, bliver i dag sejlet til Norge, hvor det deponeres sikkert. Denne procedure koster det grønlandske samfund flere hundrede tusind kroner hvert år, og det vil derfor være en stor fordel, både økonomisk og miljømæssigt, hvis dele af flyveasken i stedet kunne bruges i betonproduktion. På denne måde ville det være muligt for det grønlandske samfund at spare penge på deponering.

I dette projekt undersøges der gennem en lang række forsøg, hvorvidt flyveasken fra Sisimiut kan bruges til betonproduktion. Der foretages først en gennemgående analyse af den oprindelige aske, hvor bl.a. indholdet af tungmetaller og salte bestemmes. Derefter vaskes en del af asken, som ligeledes analyseres. Der blandes 8 forskellige typer mørtelprøver, der hver har forskellige askemængder og asketyper, og til sammenligning blandes referenceprøver. Prøverne hærder mellem 7 og 42 døgn, hvorefter de trykprøves og trykstyrken sammenlignes. De færdigstøbte mørtelprøvers afbindingstid undersøges ved et Vicat forsøg, og det undersøges om, prøverne er miljøskadelige gennem udvaskningstest af knuste mørtelprøver.

Gennem forsøgene viser det sig, at Sisimiut-asken er brugbar i beton. Det ses, at hvis 5 % af cementen erstattes af aske, opnås der en højere trykstyrke efter 42 døgn end ved referencen. Dette resultat er statistisk signifikant. Når 10 % af cementen erstattes af aske, opnås en trykstyrke svarende til referencens. Det tyder på at, styrkeudviklingen for mørtelprøver med aske ikke er færdig ved 28 døgn, som er tilfældet ved referencen. Det bemærkes, at asken indeholder en utrolig høj mængde af salte i form af natriumchlorid og calciumchlorid, hvilket betyder, at der ikke kan bruges armering i betonen grundet oxidering af jern. Miljømæssigt viser asken sig ligeledes utrolig brugbar, da der kun udvaskes minimale mængder tungmetaller. Resultaterne ligger meget tæt på referencen. På grund af kulstofindholdet har både asken og mørtelprøverne forskellige sorte nuancer. Den sorte farve kan være uønsket i beton alt efter, hvad formålet er.

Kapitel 3

Abstract

Waste Incineration in Sisimiut in Greenland is still relatively new. The fly ash, which is produced by the waste incineration system, is today sailed to Norway where it is disposed safely. This procedure is a costly affair for the Greenlandic community. It will therefore be a great advantage if the fly ash, can be used in concrete production. That way it will be possible for the Greenlandic community to save money on the disposing of flyash.

In this project it is examined whether the fly ash from Sisimiut can be used in concrete production or not. This is done through a variety of experiments. At first an analysis of the fly ash has been made, where the content of heavy metals and salts are determined. Then part of the ash has been washed, and analysed. 8 different types of mortar samples are made, each with a different amount of ash, and reference samples are made for comparison. The samples harden between 7 and 42 days, and are then pressure tested so the compressive strength can be compared. Using a Vicat test the final setting times for the mortar samples are examined, and with a leaching test it is examined if the samples are of any damage to the environment.

The experiments indicate that fly ash from Sisimiut is useful in concrete. After 42 days it shows that when 5% of the cement is replaced by ash it obtains a higher compressive strength than the reference. This result is statistically significant. When 10 % of the cement is replaced by ash it obtains a compressive strength that corresponds to the reference. It is observed that the development of the strength for samples containing ash, is not finished by 28 days, as it is in case of the reference. However, it is noted that the ash contains a very high amount of salts, in form of sodium chloride and calcium chloride, which implies that the concrete can not be reinforced, because of the oxidation of iron. Environmentally the ash is also found to be very useful, since only very small amounts of heavy metals, are washed out. The results are close to those from the reference. Because of the contents of carbon, both the ash and the mortar samples have different levels of black. The blackish colour can be unwanted depending on the purpose of the concrete.

Indholdsfortegnelse

1	Forord	ii
2	Resumé	iii
3	Abstract	iv
4	Indledning	2
5	Teori	3
5.1	Beton	3
5.1.1	Egenskaber	3
5.1.2	Opbygning	4
5.1.3	Miljøklasser	4
5.1.4	Hærdeforløb	5
5.1.5	Densitet, porøsitet og kapillarsugning	5
5.1.6	Puzzolan	6
5.1.7	Mikrosilica	7
5.2	Flyveaske	7
5.2.1	Sisimiut flyveaske	8
6	Forsøg	10
6.1	Karakteristik af aske fra Sisimiut	10
6.1.1	Glødetab	10
6.1.2	Ledningsevne	10
6.1.3	pH	10
6.1.4	Vandindhold	10
6.1.5	Vandopløselighed	11
6.1.6	Vandopløselige anioner (IC)	11
6.1.7	Oplukning (ICP)	11
6.2	Mørtelblandinger	11
6.2.1	Vicatforsøg	13
6.3	Mørtelprøver	13
6.3.1	Trykprøvning	13
6.3.2	Porøsitet og densitet	14
6.3.3	Kapillarsugning	14
6.3.4	Udvaskningstest	14
6.4	Statistisk behandling af resultater	14

7	Resultater og Diskussion	16
7.1	Karakteristik af aske	16
7.1.1	Struktur af aske	16
7.1.2	Salte og metaller	18
7.1.3	XRF-scanning	20
7.2	Sort aske	20
7.3	Mørtelprøver	21
7.3.1	Referenceprøver	23
7.3.2	14 døgnsprøver	23
7.3.3	Vicat	27
7.3.4	42 døgnsprøver	29
7.3.5	Udvaskning af metaller	30
7.3.6	Aktivitetsfaktor	31
7.4	Fejlkilder	32
8	Perspektivering	33
9	Videre forskning	34
10	Konklusion	35
11	Litteratur	36
	Appendix	39
A	Forsøgsvejledninger	40
A.1	Glødetab i jord	40
A.2	Ledningsevne i jord	42
A.3	pH i KCl	43
A.4	Vandindhold	44
A.5	Vandopløselighed	45
A.6	Vandopløselige anioner (IC)	46
A.7	Oplukning (ICP)	47
A.8	Porøsitet og densitet	48
A.9	Kapillarsugning	49
B	Analyse af aske	50
B.1	Glødetab	50
B.2	Ledningsevne	50
B.3	pH	50
B.4	Vandindhold	50
B.5	Vandopløselighed	51
B.6	LECO	51
C	SEM output	52
C.1	Oprindelig aske	52
C.2	Vasket aske	53

D IC og ICP	54
D.1 IC oprindelig aske	54
D.2 IC vasket aske	54
D.3 ICP oprindelig aske	55
D.4 ICP vasket aske	56
D.5 Forhold mellem salte og metaller	56
E Densitet og porøsitet	57
F Kapillarsugning	58
F.1 B14 prøver	58
F.2 Ref14 prøver	58
G Mørtelprøver	59
G.1 Reference	59
G.1.1 Ref7	60
G.1.2 Ref14	61
G.1.3 Ref28	62
G.1.4 Ref42	63
G.2 A-prøver	64
G.2.1 A14	65
G.2.2 A7 A28 og A42	66
G.3 B-prøver	67
G.3.1 B14	68
G.3.2 B7 B28 og B42	69
G.4 C-prøver	70
G.5 D-prøver	72
G.6 T-test: top vs. side	74
G.7 T-test: 42-døgns prøver	74
G.8 T-test: Oprindelig vs. vasket	75
G.9 Resultatoversigt	75
H Vicatforsøg	76
H.1 Ref, A og AV	76
H.2 B og BV	77
H.3 C, CV, D og DV	78
I Udvaskning af knust mørtel	79
J Aktivitetsfaktor	80
J.1 Reference	80
J.2 A-prøver	81
J.3 B-prøver	82
K Affald på Sisimiut	83

4 Indledning

I de senere år er bevarelsen af et grønt miljø blevet et omdiskuteret emne i Grønland, herunder er affaldshåndteringen en vigtig faktor. Der er bygget forbrændingsanlæg rundt omkring, til at håndtere den stigende affaldsmængde. Dette nedbringer selvfølgelig mængden af affald, og samtidig kan anlæggene producere energi til indbyggerne i form af el og fjernvarme. Det er bare 13 år siden at den næststørste kommune, Sisimiut, fik deres første forbrændingsanlæg [www.Kanukuka.gl¹]. Det har nu kørt næsten upåklageligt siden da, men den overskydende flyveaske er et problem for kommunen, da det indeholder tungmetaller. Det er ikke muligt at deponere flyveasken sikkert nok i Grønland og derfor bliver asken sejlet til Norge. Der bliver hvert år produceret ca. 48 ton flyveaske i Sisimiut, og det koster mellem 2000 og 5000 kr pr ton, at få det deponeret i Norge. Det vil sige et sted mellem 96.000 og 240.000 kr om året. [www.kanukuka.gl²]

Tidligere forskning har vist at brugen af flyveaske i beton er en fordel. Fra 1950'erne og frem begyndte produktionen af beton så småt at indeholde flyveaske, hvor der før i tiden var brugt vulkanaske. Dette skete primært, fordi de miljømæssige perspektiver blev vigtige. I dag kommer ca. 5 procent af det totale CO₂ udslip i verden fra cementproduktion, og det vil derfor altid være et mål at producere mindre cement. [Johannesson, 2011, notes s.1-3]

I denne rapport ses der nærmere på fordele og ulemper ved brug af flyveasken fra Sisimiut i beton. Ved at kunne erstatte en vis procentdel af cementen med asken fra forbrændingsanlægget i Sisimiut, kan både kommunen og byggesektoren spare mange penge. For det første skal kommunen ikke betale for, at asken deponeres i Norge, og for det andet kan betonfabrikker nøjes med en mindre del cement, hvilket er den dyreste komponent i beton. I bedste fald vil kommunen ligefrem kunne sælge asken til betonfabrikker, der vil have interesse i at købe aske i stedet for cement, hvis de kan spare penge på det.

Asken analyseres ved hjælp af forsøg, der kan fortælle mere om selve askens opbygning og egenskaber. Derefter bruges asken i mørtelprøver, hvor den erstatter visse procentdele af cement og sand. Mørtelprøverne trykprøves og sammenlignes med referenceprøver, hvorefter det vurderes, om det kan lade sig gøre at bruge asken fra Sisimiut i beton. Prøverne hærder i hhv. 7, 14 28 og 42 døgn, så der kan findes en sammenhæng mellem hærningstid og styrke.

5 Teori

5.1 Beton

Beton anvendes i dag over hele verden til mange forskellige ting. Det er et byggemateriale, som bruges til alt fra husbyggeri, broer, tunneller til fliser og anden belægning. Betonen kan både bruges i sin rene form eller den kan forstærkes med armering. I dag handler betonproduktionen om prefabrikerede betonelementer eller beton støbt in-situ.

Beton består af sand, sten, cement og vand. Cement er et materiale som består af to tredjedele calcium og silica, mens resten er aluminium, jern og andre oxider. Kendskabet til calcium-baserede bindematerialer har eksisteret i mange tusind år. Men først i 1824 [Johannesson, 2011, notes s. 2] blev den moderne type cement, kendt som portland cement, opfundet af Josef Aspdin. Efter 1950 har udviklingen af cement og beton mest handlet om de miljømæssige problemer ved produktionen af cement, samt muligheden for at udskifte dele af cementen med affaldsmaterialer, som f.eks. flyveaske.

5.1.1 Egenskaber

Byggematerialet beton har mange egenskaber. Det er et billigt materiale som har en god holdbarhed. Derudover har det en høj trykstyrke, god formlighed, isolerer godt og er modstandsdygtig overfor brand, samt vind og vejr. I tabel 5.1.1 ses egenskaberne for en normal hærdet beton [Johannesson, 2011, slides s. 14-17].

Beton		
Egenskaber	Værdier	Enhed
Trykstyrke, $v/c=0,5$ (28 døgn)	35	MPa
Trækstyrke	3	MPa
Bøjligstyrke	6	MPa
Elastisk modul	28	GPa
Densitet	2300	kg/m ³
Trækspænding ved brud	0,001	-

Tabel 5.1.1: Oversigt over betons egenskaber

5.1.2 Opbygning

Som nævnt tidligere består beton af sand, sten, cement og vand. Derudover tilsættes beton ofte tilsætningsstoffer. Disse kan inddeles i to grupper, kemiske og mineralske tilsætningsstoffer. De kemiske stoffer kan f.eks. være et luftindblandingsmiddel eller et accelererende middel. Til gruppen mineralske stoffer hører f.eks. flyveaske og mikrosilica. I tabel 5.1.2 ses det hvordan beton kan være opbygget.

Beton	Mørtel	Cementpasta	Cement
			Vand
		Sand [0-4 mm]	
	Sten [4-64 mm]		
	Tilsætningsstoffer	Kemiske	
Mineralske			

Tabel 5.1.2: Opbygning af beton

En frisk betonblanding består af 20-30 % cementpasta og 70-80 % aggregater (sand og sten), derudover vil blandingen indeholde 1-2 % luft, som er med til at forhindre frostskaer. Hvis betonen er hårdt udsat for frost, kan det være nødvendigt, at indblende et luftindblandingsmiddel. [Johannesson, 2011, slides s. 34-35].

For at opnå den optimale betonblanding er vand-cement forholdet (v/c) en vigtig parameter. Et lavt v/c forhold vil betyde at betonen får en høj styrke, men en lav permeabilitet. Et højt v/c forhold vil derimod give en lav styrke og en høj permeabilitet. Til at beskrive forholdet mellem betons styrke og betonens v/c forhold kan Bolomeys formel bruges, se ligning 5.1.1 [Herholdt, 1985, s.137].

$$f_c = K \left(\frac{1}{v/c} - \alpha \right) \quad (5.1.1)$$

5.1.3 Miljøklasser

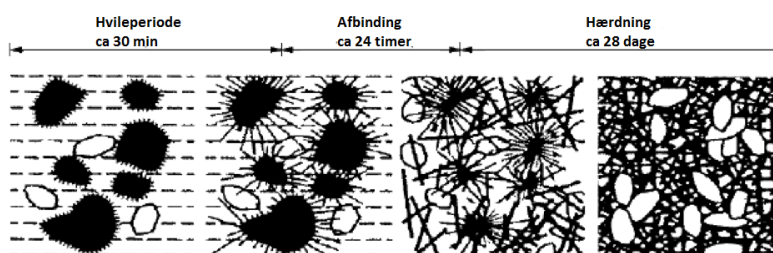
I følge DS 411 findes der fire forskellige miljøklasser, den passive, den moderate, den aggressive og den ekstra aggressive. Miljøklasser specificerer hvilke klima-/miljøpåvirkninger en konstruktionsdel skal kunne tåle at blive udsat for. I tabel 5.1.3 ses en oversigt over disse, og hvad de hver især kan forvente at blive udsat for.

Miljøklasse	Beskrivelse	v/c maks.	Anvendelsesområde
Passiv (P)	Tørt miljø, hvor der ikke forekommer korrosion		<ul style="list-style-type: none"> • Indendørs konstruktioner • Indvendige dæk
Moderat (M)	Fugtigt miljø, uden risiko for frostpåvirkning i kombination med vandmætning	0,55	<ul style="list-style-type: none"> • Fundament delvis over terræn • Udvendige facader og søjler • Installationskanaler
Aggressiv (A)	Fugtigt miljø, hvor der forekommer kraftig fugtbelastning med risiko for vandmætning i kombination med frostpåvirkning	0,45	<ul style="list-style-type: none"> • Udvendige dæk • Støttemure • Kanaler og gruber i grundvand • Altaner
Ekstra aggressiv (E)	Fugtigt miljø, hvor der enten tilføres eller ophobes store mængder alkalier og/eller klorider ved betonoverfladen	0,40	<ul style="list-style-type: none"> • Svømmebade • Brosøjler • Kantbjælker på broer • Marine konstruktioner

Tabel 5.1.3: Oversigt over miljøklasser

5.1.4 Hærdeforløb

På figur 5.1.1 ses en cementpastas sturkturudvikling. Den første periode kaldes for hvileperioden og varer normalt mellem 30-60 min, her har cementpastaen væskeegenskaber. Herefter antager cementpastaen fast form, dette kaldes for afbindingsperioden, og denne varer oftest mellem 6 og 24 timer. Efter 24 timer starter hærdeperioden, i hvilken styrketilvæksten foregår, denne periode kan vare helt op til 90 døgn, der er dog næsten ingen styrkeudvikling efter det 28. døgn. Afbindings- og hærdeperioden er et resultat af kemiske reaktioner mellem cement og vand. Denne proces kan henholdsvis accelereres eller bremses ved indblanding af kemiske tilsætningsstoffer. [Hansen, 2008, s. 57]



Figur 5.1.1: Cementpastas sturkturudvikling

5.1.5 Densitet, porøsitet og kapillarsugning

Densiteten af et materiale er afgørende for mange af dets egenskaber. En generel regel er at jo større en densitet jo stærkere er materialet [Hansen, 2010, note s. 4-7]. Tørdensiteten, som defineres i ligning 5.1.2, er et udtryk for massen af materialet hvor alle porer er udtørrede over prøvelegemets rumfang.

$$\rho_d = \frac{m_0}{V} \tag{5.1.2}$$

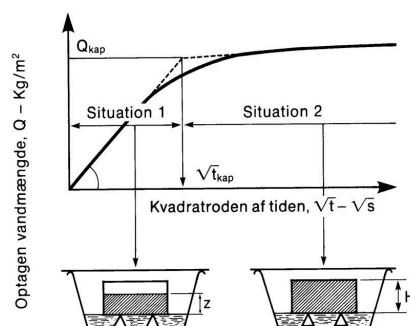
Densiteten af et materiale der er vacuumvandmættet og i overfladetør tilstand defineres i ligning 5.1.3, som massen af materialet, hvor alle porer er vandmættede, over prøvelegemets rumfang.

$$\rho_{ssd} = \frac{m_{ov}}{V} \quad (5.1.3)$$

Ved at holde ρ_d op imod ρ_{ssd} kan volumet af de åbne porer findes og derefter kan porøsiteten defineres som det ses i ligning 5.1.4, som volumet af de åbne porer over volumet af prøvelegemet.

$$p = p_a = \frac{\rho_f - \rho_d}{\rho_f} \quad (5.1.4)$$

Kapillarsugning er et udtryk for hvor hurtigt vand transporteres ind i porerne i et materiale. Jo mindre porernes diameter er jo større er modstanden og vandtransporten vil derfor foregå langsommere. Men selvom det foregår langsommere kan vandet transporteres meget længere op igennem et materiale med små porer end et med store porer. På figur 5.1.2 ses den optagne vandmængde over kvadratroden af tiden. Ud fra denne kan kapillaritetstallet, k findes.



Figur 5.1.2: Illustration af kapillarsugningsforsøg

5.1.6 Puzzolan

Puzzolan er et materiale som ikke i sig selv har nogen bindemiddelegenskaber, men i findeltform og ved normale temperaturer vil det reagere med calciumhydroxid og på den måde danne svært opløselige produkter med bindemiddelegenskaber. Puzzolan er et naturligt materiale, som f.eks. vulkansk aske, moler, pimpsten, flyveaske og mikrosilica. Nedenfor i tabel 5.1.4 ses den typiske kemiske sammensætning af pozzulan, mikrosilica og flyveaske. [Herholdt, 1985, s.295].

Bestanddel [%]	Puzzolan [%]	Mikrosilica [%]	Flyveaske [%]	Krav til flyveaske ² [%]
SiO ₂	50-65	94-98	35-55	- ¹
Al ₂ O ₃	10-20	-0	20-35	- ¹
Fe ₂ O ₃	4-6	0-0,5	3-30	- ¹
CaO	3-6	0-0,3	1-10	<10
MgO	1-2	0-1	1-4	<4
SO ₃	0-2	0-0,3	0-3	<3
Na ₂ O+K ₂ O	3-10	0-1	1-8	<5

Tabel 5.1.4: Oversigt over den kemisk sammensætning.

1: SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃>70%

2: Ifølge DS/EN 450

5.1.7 Mikrosilica

Mikrosilica er et biprodukt, som fremkommer ved produktionen af siliciummetal og ferrosilicium i elektriske smelteovne. I tør tilstand er mikrosilica et ekstremt finkornet produkt med en maksimal kornstørrelse på 1 μm . Når mikrosilica tilsættes til beton, dannes en såkaldt mikrofillereffekt, dvs. en tættestende virkning på cementpastaens struktur. Dette sker, fordi kornstørrelsen er så lille i forhold til cementens kornstørrelse. Ved tilsætning af 8-10% Mikrosilica i forhold til cementmængden, kan betonens trykstyrke forøges helt op til 40-50%. Derudover forøges vandtætheden, hvilket betyder, at betonen bliver mere modstandsdygtig overfor frost. [Herholdt, 1985, s.296-297]

5.2 Flyveaske

Flyveaske er den forbrændingsrest, som opstår ved fyring med pulveriseret kul på kraftværker. På forbrændingsanlæg i Danmark brændes affaldet ved 950 °C. Efter forbrændingen opstår der en røggas og et restprodukt som kaldes slagge. Slaggen består af jern, grus, glas, tungmetaller og andet ikke brændbart. Dette lægges efter forbrændingen til modning i 3-4 måneder på forbrændingsanlægget. Efter modning sorteres tungmetallerne fra til genanvendelse, mens den resterende slagge bruges som opfyldning ved bygge- og anlægsarbejde.

Røggassen føres derimod videre gennem anlægget, hvor den afgiver sin varme til kedlerne, som producerer damp der til sidst omdannes til elektricitet og fjernvarme. Efter varmeafgivelsen renses røggasserne hvilket sker ved, at den blandes med kalk, aktivt kul og vand i en reaktor. Kalken neutraliserer syreindholdet og binder tungmetallerne i røggassen og det aktive kul binder dioxin og kviksølv. Herefter filtreres blandingen fra reaktoren igennem næsten 1000 posefiltre, som opsamler flyveasken og tilsidst kan den rensede røg ledes ud gennem skorstenen. På et typisk danske forbrændingsanlæg bliver røgen rensat ca. 95 %. [www.amfor.dk]

Restproduktet flyveaske indeholder en stor mængde kvarts (SiO_2) og forskellige miljøskadelige tungmetaller, derfor skal produktet deponeres på en forsvarlig måde. I Danmark deponeres en del af flyveasken i Norge, mens en anden del bruges som tilsætningsmateriale i beton i stedet for cement. Karakteristisk for beton tilsat flyveaske er en bedre bearbejdelse af den friske beton og en langsommere styrke- og varmeudvikling, samt en langtidsstyrke, der ofte er højere end for beton med ren cement. Flyveaske består af finkornede partikler der har puzzolanegenskaber, da den reagerer med calciumhydroxid. [Herholdt, 1985, s. 294-295]

Ved hjælp af en udvidelse af Bolomeys formel kan trykstyrken for beton tilsat puzzolaner beregnes, se ligning 5.2.1.

$$f_c = K \left(\frac{1}{V/(C + k \cdot P)} - 0,5 \right) \quad (5.2.1)$$

Ovenfor er der tilføjet en aktivitetsfaktor k , som beskriver forholdet mellem en given mængde puzzolans styrkebidrag og samme cementmængdes styrkebidrag. Aktivitetsfaktoren afhænger af tiden og typen af puzzolan. Den ligger normalt mellem 0,3-0,5 for 28 døgns prøver tilføjet flyveaske, mens den ligger på 3-5 for 28 døgns prøver tilføjet mikrosilica. P er mængden af tilsat puzzolan. [Herholdt, 1985, s. 143-144]

Aktivitets indexet er, ifølge DS/EN 450-1, styrkeforholdet mellem en mørtelprøve med flyveaske og en referencemørtelprøve. Kravet er at en mørtelprøve hvor 25 % af cementen er erstattet af flyveaske skal have et aktivitets index på mindst 75 % ved 28 døgn og 85 % ved 90 døgn.

I tabel 5.2.1 ses kravet til glødetabet i flyveaske, der bruges i beton. Se tabel 5.1.4 for kravet til den kemiske sammensætning af flyveasken.

Krav til glødetab i flyveaske	
Kategori A	< 5 %
Kategori B	2 - 7 %
Kategori C	4 - 9 %

Tabel 5.2.1: Krav ifølge DS/EN450

5.2.1 Sisimiut flyveaske

Forbrændingsanlægget i Sisimiut blev taget i brug i år 2000. På forbrændingsanlægget brændes affaldet normalt ved 800 °C, men i vinterperioden kan temperaturen ligge lavere. Derudover er det svært at opretholde en jævn temperatur, da anlægget kun kører 5 dage om ugen. På Sisimiut er der ikke installeret nogle støttebrændere men i stedet en spildoliebrænder, som bruges til at opretholde en hensigtsmæssig ovntemperatur i de perioder, hvor der ikke brændes affald. Efter forbrændingen af affaldet, ledes røggasen videre og renses af elektrofilteranlæg, inden den slippes gennem skorstenen. Flyveasken fra elektrofiltrene opsamles i vandtætte Bigbags og opbevares på "dumpen" indtil de sejles til Norge, hvor det deponeres. [Pedersen, 2003, s. 20-22]

Billedet nedenfor på figur 5.2.1 viser hvordan affaldet på forbrændingsanlægget opbevares på "dumpen", udendørs i store bunker, direkte på jorden, i alt slags vejr. Dette betyder at affaldet ofte er meget vådt når det skal brændes, hvilket både giver en uregelmæssig forbrænding, og derudover ofte gør det nødvendigt, at tilføre spildolie for, at få affaldet til at brænde. Når spildolien brænder, dannes der sod fra de uforbrændte brændselsrester, denne sod består af kulstof med en uregelmæssig opbygning.



Figur 5.2.1: Billede af hvordan affaldet opbevares inden forbrænding på Sisimiut

EU's forbrændingsdirektiv foreskriver, at røggasserne på et affaldsforbrændingsanlæg har en opholdstid på minimum 2 sek. ved 850 °C, og at anlægget derudover er udstyret med støttebrændere, som kan opretholde temperaturen under alle forhold. Dette er dog ikke tilfældet på anlægget i Sisimiut, her har man valgt at lempe kravet til, at røggasserne har en opholdstid på minimum 1 sek ved 800 °C, hvilket

angiveligt er godkendt, fordi EU's krav ellers ville gøre anlægget urealistisk dyrt for den lille kommune.
[MOKH, 2003, s. 12-17]

6 Forsøg

Som baggrund for rapporten er der udført en række forsøg med flyveasken fra Sisimiut. Dette kapitel beskriver i korthed materialer og metoder ved disse forsøg, samt hvordan resultaterne vil blive behandlet. Overordnet set er asken først og fremmest blevet undersøgt både kemisk og fysisk og dernæst er den blandet i mørtelprøver for at give et indblik i askens indvirkning på beton. Til sidst er disse mørtelprøver undersøgt.

6.1 Karakteristik af aske fra Sisimiut

For bedst muligt at forstå askens indvirkning på mørtelprøverne er der foretaget en række forsøg for at analysere asken. Nedenfor er forsøgene oplistet og beskrevet kort. Forsøgsvejledningerne kan findes i bilag B.1 - B.5, samt bilag D

6.1.1 Glødetab

Askens indhold af organisk materiale svarer stort set til det opnåede glødetab ved 550 °C. Der sættes tre digler med 2,5 g. aske i en muffelovn i 60 min. Da de tages ud og vejes på ny, kan glødetabet og derved også indholdet af det organiske materiale bestemmes. Se forsøgsvejledning i bilag A.1

6.1.2 Ledningsevne

Ledningsevnen måles for at få et indtryk af saltindholdet i asken. Jo bedre elektrisk strøm kan ledes igennem væske, jo flere ledepartikler er der, så som salte. Forsøget kan dog ikke afsløre hvilke salte eller andre ledepartikler, der er tale om. Forsøget udføres ved at blande aske og destilleret vand i en beholder, der sættes på rystebord. Efter 30 min. på rystebord, bundfælder prøven i 20 min hvorefter ledningsevneelektroden sættes i bægeret, og ledningsevnen kan aflæses. Se forsøgsvejledning i bilag A.2

6.1.3 pH

pH-værdien for asken er målt ved to forskellige forsøg. Et hvor aske er blandet op med destilleret vand, og et hvor aske er blandet op med KCl. Der er brugt det samme pH-meter i begge forsøg. Se forsøgsvejledning i bilag A.3

6.1.4 Vandindhold

Et bægerglas med aske stilles i varmeskab ved 105 °C, natten over. Næste dag vejes prøverne, og den forsvundne mængde vand findes. Se forsøgsvejledning i bilag A.4

6.1.5 Vandopløselighed

Aske og destilleret vand blandes i en beholder, der omrystes og sættes til bundfældning. Lidt efter lidt hældes væsken gennem et filter, der samler de ikke opløste partikler fra asken. Dette gøres gentagende gange. Efterfølgende stilles filteret med den tilbageblivende aske i en varmeovn ved 105 °C, natten over. Til sidst vejes den tørre aske for at se hvor meget, der er forsvundet og derved er vandopløseligt. Figur 6.1.1 viser opstillingen under forsøget. Se forsøgsvejledning i bilag A.5



Figur 6.1.1: Aske der bliver vasket

6.1.6 Vandopløselige anioner (IC)

Aske og destilleret vand blandes og stilles på rystebord natten over. Derefter filtreres det gennem et sprøjtefilter. Den filtrerede prøve køres gennem IC (ionchromatograf) hvorved mængden af de vandopløselige ioner findes. Se forsøgsvejledning i bilag A.6

6.1.7 Oplukning (ICP)

Aske tilsættes halvkoncentreret HNO₃ og stilles i en autoklave. Når trykket når 20 bar, og temperaturen når 125 °C, stilles prøven til afkøling. Efter at den er kølet af, filtreres prøven med sug igennem et filter og kan derefter køres gennem ICP (Ion Coupled Plasma). Dette giver et overblik over, hvilke syreopløselige metaller der er i prøven, og hvor meget der er af dem. Se forsøgsvejledning i bilag A.7

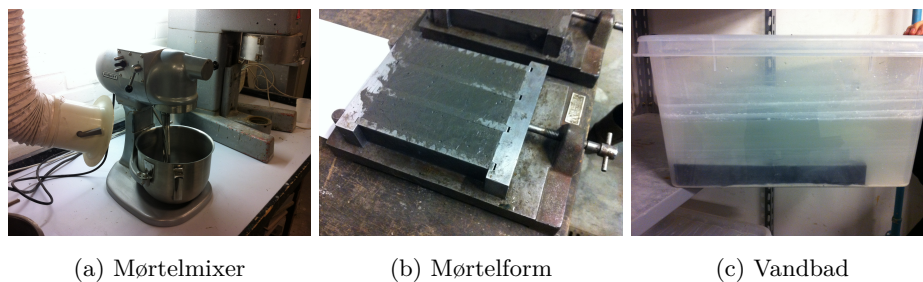
6.2 Mørtelblandinger

Der er lavet mange forskellige mørtelprøver for at opnå et overblik over flyveaskens indvirken på beton. Referenceprøverne, kaldet Ref, er blandet efter DS/EN 196-1, og de prøver der indeholder aske, med navne fra A til D, er blandet således, at asken erstatter forskellige vægtprocentdele af cement eller sand. I tabel 6.2.1 ses en oversigt over blandingsforholdet i de forskellige prøver, der er brugt i projektet.

Prøve	Aske indhold	Cement [g]	Aske [g]	Sand [g]	Vand [g]
Ref	-	450	0	1350	225
A	5 % af cement	427,5	22,5	1350	225
B	10 % af cement	405	45	1350	225
C	20 % af cement	360	90	1350	225
D	10 % af sand	450	135	1215	225

Tabel 6.2.1: Blandingsforholdet i de forskellige mørtelprøver

Selve blandingen er foretaget med en HOBART mixer efter DS/EN 196-1. En blanding er nok til at fylde 3 forme med dimensionerne ca. 40 x 40 x 160 mm. Efter at have været på rystebord skal prøverne afbinde i minimum 24 timer, hvorefter de lægges i vandbad det antal dage, de skal hærde. Nedenfor på figur 6.2.1 ses de tre step i støbeprocessen.



Figur 6.2.1: Støbeprocess

I tabel 6.2.2 ses en oversigt over mørtelprøverne Ref, A, B, C og D og hvor mange blandinger der er lavet af hver. Askeindholdet, afbindingstiden og tiden, de har hærdet, inden de er trykprøvet fremgår af tabellen. For at få et indblik i styrkeudviklingen af prøverne A og B, er der lavet 4 prøver af hver blanding, som har hærdet i hhv. 7, 14, 28 og 42 dage. Da prøverne C og D har meget lang afbindingstid, er disse kun lavet én gang hvor de hærkede i 14 dage. Den lange afbindingstid gav anledning til også at lave mørtelprøver med vasket aske, da dette kunne have en indvirkning herpå. Oversigt over prøverne med vasket aske ses i tabel 6.2.3.

Prøve	Aske Indhold	Afbindingstid	Hærdetid	Antal blandinger
Ref7		24 timer	7 dage	3
Ref14			14 dage	3
Ref28			28 dage	3
Ref42			42 dage	3
A7	5 % af cement	24 timer	7 dage	1
A14			14 dage	2
A28			28 dage	1
A42			42 dage	1
B7	10 % af cement	48 timer	7 dage	1
B14			14 dage	3
B28			28 dage	1
B42			42 dage	1
C14	20 % af cement	144 timer	14 dage	1
D14	10 % af sand	144 timer	14 dage	1

Tabel 6.2.2: Oversigt over mørtelprøver og deres navne

Prøve	Aske Indhold	Afbindingstid	Hærdetid	Antal blandinger
A14V	5 % af cement	24 timer		1
B14V	10 % af cement	48 timer	14 dage	1
C14V	20 % af cement	144 timer		1
D14V	10 % af sand	144 timer		1

Tabel 6.2.3: Oversigt over mørtelprøver med vasket aske

6.2.1 Vicatforsøg

For at få et overblik over afbindingstiden af referencen og de 9 forskellige blandinger er der foretaget et forsøg med et manuelt vicat apparat se figur 6.2.2, da den elektroniske vicat var ude af drift. Denne kunne ellers give et mere præcist resultat, da den kan køre i løbet af natten og hen over en weekend, og på den måde aflæse den præcise afbindingstid. Forsøget er foretaget i henhold til DS/EN 196-3, det skal dog bemærkes, at det i standarden er cementpasta der testes, i modsætning til mørtelblandinger. De 9 mørtelblandinger laves i samme forhold som beskrevet i tabel 6.2.1, men da formen er mindre er portionerne en tredjedel størrelse.



Figur 6.2.2: Manuelt vicat apparat

6.3 Mørtelprøver

6.3.1 Trykprøvning

For hver mørtelblandning er der nok til en form, der resulterer i 3 prøvelegemer. Når prøverne er hærdet, tages de op af vandbadet og måles og vejes. Prøverne udsættes for ultralydsmåling, og til sidst trykprøves de en gang i hver ende af prøven. Til trykprøvningen blev der brugt en TONI 2000-maskine, der målte brudstyrken i kN. Ultralydsmåleren var ikke intakt under hele forløbet, hvilket resulterede i at ledningsevnen ikke er målt for alle prøver.



(a) Trykprøvemaskinen

(b) Mørtelprøve trykket til brud

Figur 6.3.1: Trykprøvningsforsøg

6.3.2 Porøsitet og densitet

Til forsøget bruges 3 B14-prøver. Prøverne tørres i en ovn i minimum to døgn ved 105 °C, og vejes, hvorefter de stilles ved undertryk i ekssikkator i 3 timer. Derefter fyldes ekssikkatoren med vand således, at prøverne er dækket. De første 15 minutter skal hanen på ekssikkatoren være lukket, og derefter åbnes den. Efter 24 timer tages prøverne op og vejes både under vand og i luft, og dimensionerne findes. Se forsøgsvejledning i bilag A.8



(a) Vakuumsugning

(b) Ekssikkator med prøver i vand

(c) Prøver i fotobakke

Figur 6.3.2: Porøsitet- og densitetsforsøg, samt kapillarsugningsforsøg

6.3.3 Kapillarsugning

Der bruges 3 B14-prøver til forsøget. Prøverne tørres i en ovn i minimum to dage ved 105 °C, og vejes. Mørtelprøverne stilles i en bakke med vand, der når 5 mm op af prøverne, som ses på figur 6.3.2c. Herefter vejes prøverne efter hhv. 1, 2, 4, 8, 16, 32, 60, 120 og 240 minutter. Se forsøgsvejledning i bilag A.9

6.3.4 Udvaskningstest

Til forsøget bruges en A14-prøve og en B14-prøve. Prøverne knuses i en ringknuser, og pulveret derfra blandes med destilleret vand i en plastikflaske og sættes på rystebord i 20 timer. Derefter filtreres væsken og den sendes til ICP måling for at måle koncentrationen af de metaller, der bliver udvasket fra mørtelprøverne.

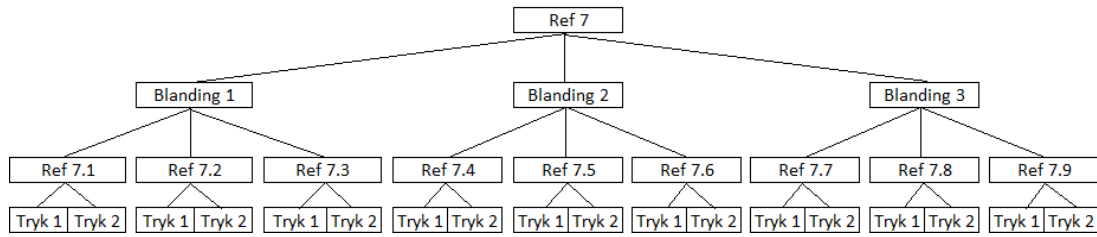
6.4 Statistisk behandling af resultater

I afsnit 3.1, vedrørende karakteristik af aske fra Sisimiut, er der 3 observationer for samtlige resultater. Der udregnes et gennemsnit, og ved brug af excel beregnes standard afvigelse af observationerne. Excel bruger følgende formel 6.4.1.

$$S_{obs} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.4.1)$$

Hvor S_{obs} er standardafvigelsen (spredningen), x_i er den enkelte observation, \bar{x} er gennemsnittet af observationerne, og n er antallet af observationer. [Miller, 2009, s.28]

I afsnit 3.2 og 3.3 har trykprøvernes resultater mellem to og tre variationskilder. Eksempelvis er der tre variationsniveauer for Ref7-prøverne. Niveau ét er de tre blandinger der er lavet af tre forskellige projektgrupper, niveau to er de tre prøver der kommer ud af én blanding, og niveau tre er de to trykresultater der kommer af en prøve. Se figur 6.4.1.



Figur 6.4.1: Oversigt over variationsniveauer for Ref 7

For at få det helt korrekte statistiske overblik burde spredningen af hver enkelt variationsniveau blive beregnet, men i denne rapport beregnes kun den samlede variation af gennemsnittet. Dette holdes op imod et statistisk signifikansniveau på 5 %

DS/EN 196-1 foreskriver at ved tryktest frasorteres de måleresultater der afviger med mere end 10 % fra gennemsnittet. Efter dette er gjort regnes spredningen af observationerne ved brug af formel 6.4.1. Derefter regnes spredningen på gennemsnittet ved brug af formel 6.4.2 [Miller, 2009, s.183]

$$S_{gns} = \frac{S_{obs}}{\sqrt{n}} \quad (6.4.2)$$

Med spredningen på gennemsnittet for de forskellige prøver, kan der foretages en signifikanstest. Her bruges en dobbeltsidet T-test. Til 42 døgnprøverne bruges en dobbeltsidet T-test [Miller, 2009, s. 251-257], hvorimod der til top/side prøverne og oprindelig/vaskede prøverne bruges en parret dobbeltsidet T-test [Miler, 2009, s. 259-261].

7 Resultater og Diskussion

7.1 Karakteristik af aske

I tabel 7.1.1 ses resultaterne fra forsøgene omtalt i kapitel 2.1. I samtlige forsøg er resultatet baseret på tre prøver, hvor der er taget et gennemsnit, samt udregnet standardafvigelsen. Tilhørende bilag ses i sidste kolonne.

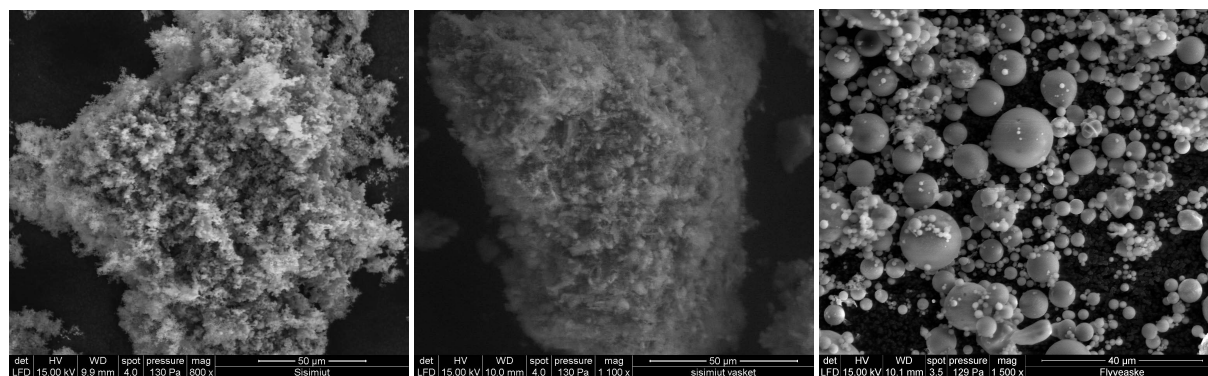
Forsøg	Resultat	Sammenligning med REFA	Bilag
Glødetab [%]	$5,88 \pm 0,10$		B.1
Ledningsevne [$\frac{mS}{cm}$]	$33,51 \pm 13,95$		B.2
pH med KCl	$11,18 \pm 0,01$	$12,2 \pm 0,1$	B.3
pH med dest. vand	$11,40 \pm 0,02$		
Vandindhold [%]	$0,71 \pm 0,07$	0,5	B.4
Vandopløselighed [%]	$53,12 \pm 0,90$	42	B.5

Tabel 7.1.1: Karakteristik af flyveaske fra Sisimiut

Det gennemsnitlige glødetab på 5,88 % ligger både inden for kategori B og C ifølge tabel 5.2.1 og er tæt på at ligge inden for kategori A. Det ville være det mest optimale, hvis glødetabet lå i kategori A, da det er det, betonindustrien bruger i flest tilfælde. Da glødetabet er et udtryk for det organiske materiale, der ikke er brændt væk under forbrændingen, ses det, at forbrændingsanlægget i Sisimiut bør være lidt mere effektivt, før asken skal bruges i beton. Den forholdsvis høje gennemsnitlige ledningsevne på $33,5 \frac{mS}{cm}$ skyldes et højt indhold af letopløselige salte. Det skal dog bemærkes, at en afvigelse på $13,95 \frac{mS}{cm}$ er meget, og dette skyldes formentlig en inhomogen aske, hvor saltene er ujævnt fordelt. PH-værdien, vandindholdet og vandopløseligheden er sammenlignet med værdier fra en flyveaske, der kommer fra det danske forbrændingsanlæg REFA [Jensen, 2010, s. 16]. De to pH-værdier på hhv. 11,18 og 11,40 ligger lidt lavere end flyveasken fra REFA, men er stadig meget basiske. Vandindholdet på 0,71 % er lavt, ligesom i flyveasken fra REFA. Indholdet af vandopløselige stoffer på 53,12 % er højt og består formentlig mest af letopløselige salte.

7.1.1 Struktur af aske

Ved brug af SEM (Scanning Electron Microscope) fås et billede af askeoverfladen, både for den oprindelige og den vaskede aske. Herunder holdes Sisimiut-asken op imod en standard kulflyveaske. I bilag C kan hele SEM output findes for begge asker.



(a) Oprindelig aske x 800

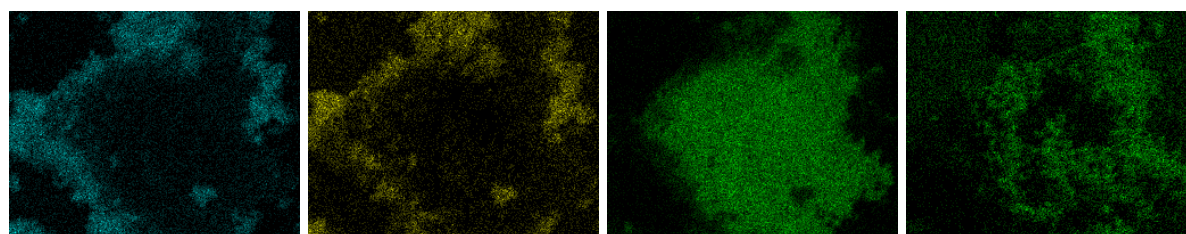
(b) Vasket aske x 1100

(c) Flyveaske x 1500

Figur 7.1.1: SEM billeder

Sammenlignes figur 7.1.1a og figur 7.1.1b ses det at den oprindelige aske er fyldt med små krystaller i forhold til den vaskede aske. Både den oprindelige og den vaskede aske har meget større partikler end standard flyveasken, som ses på figur 7.1.1c, og deres partikler er på ingen måde lige så runde.

På figur 7.1.2 ses mapping af den oprindelige aske. Det ses, at Na og Cl er koncentreret i det samme område, ligesom Ca og O også er det. Det tyder derfor på, at saltet, NaCl, i denne askeprøve ligger rundt om det brændte kalk, CaO. SEM billederne støtter derved formodningen om det høje indhold af letopløselige salte, som vandopløseligheden gav udtryk for. Sammenlignes figur 7.1.2 med 7.1.3 er det tydeligt, at der er meget mindre Cl og Ca i den vaskede aske. Ud fra billederne er det svært at bedømme, om mængden af Na og O har ændret sig, men ses der på de to tabeller i hhv. bilag C.1 og C.2 ses det, at mængden af Na på overfladen er blevet mindre, og at mængden af O er steget. Det konkluderes, at overfladen på figur 7.1.1a består af salt og brændt kalk, der kan vaskes væk med vand.



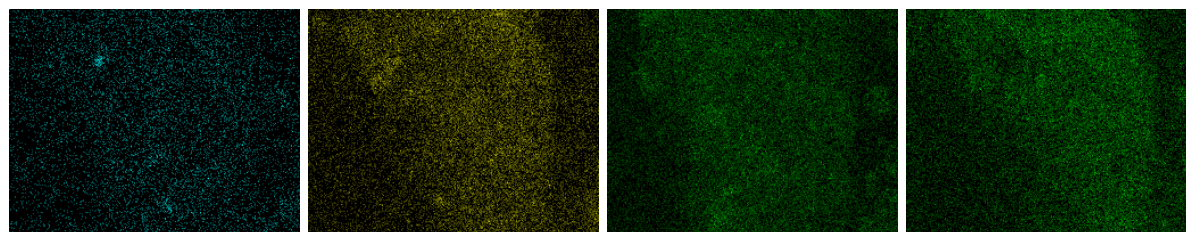
(a) Cl

(b) Na

(c) Ca

(d) O

Figur 7.1.2: SEM billeder af oprindelig aske



(a) Cl

(b) Na

(c) Ca

(d) O

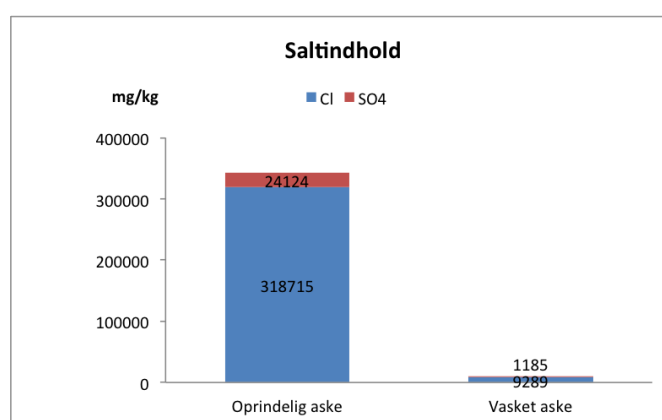
Figur 7.1.3: SEM billeder af vasket aske

7.1.2 Salte og metaller

Ved brug af ionchromotografen er mængden af vandopløselige salte fundet for både den oprindelige aske og den vaskede aske. Tallene i tabel 7.1.2 er et gennemsnit af tre prøver, se bilag D.1 og D.2 for udregning.

Vandopløselige anioner		Oprindelig aske	Vasket aske
Cl	$\left[\frac{mg}{kg}\right]$	318715 ± 8001	9289 ± 7492
SO ₄	$\left[\frac{mg}{kg}\right]$	24124 ± 130	1185 ± 1956
NO ₃	$\left[\frac{mg}{kg}\right]$	55 ± 47	3 ± 2
I alt	$\left[\frac{mg}{kg}\right]$	342893 ± 8122	10476 ± 9445

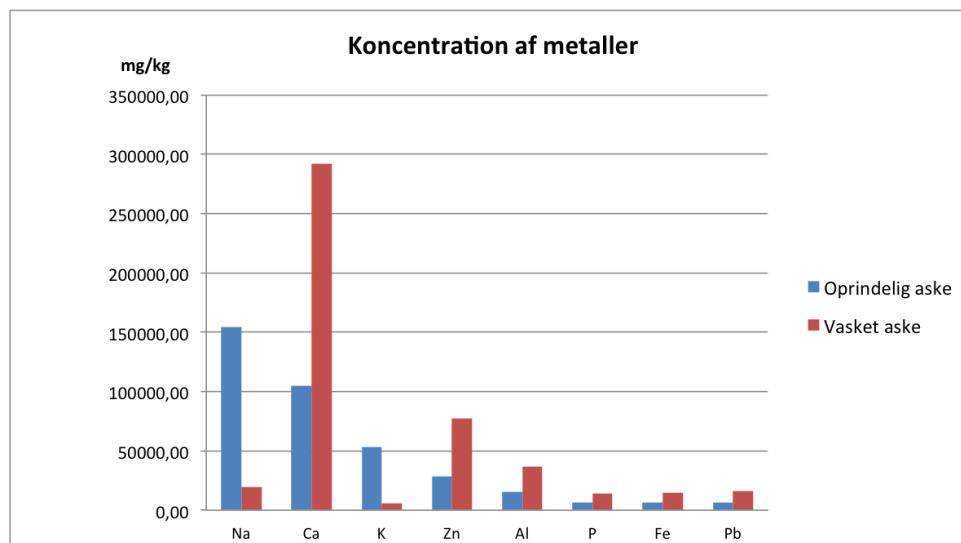
Tabel 7.1.2: Gennemsnitligt indhold af vandopløselige salte i askeprøver



Figur 7.1.4: Saltindhold målt ved brug af ionchromotograf

Det ses af tabel 7.1.2, at der som ventet, er et meget stort indhold af salte i den oprindelige aske. Mængden af Cl er klart størst og udgør 31,9 % af prøven, hvor SO₄ og NO₃ udgør hhv. 2,4 og 0,01 %. Når asken vaskes, ses det tydeligt, at saltene opløses. I alt har den oprindelige aske et saltindhold på 342.893 mg/kg, hvilket svarer til 34,3 % af prøven. Den vaskede aske har et saltindhold på 10476 mg/kg, hvilket svarer til 1,1 % af prøven. Chloridindholdet i den vaskede aske er 9289 mg/kg, hvilket svarer til 0,93 % af prøven. Ifølge DS/EN 450-1 må chloridindholdet i flyveaske, der skal bruges i beton, ikke overstige 0,10 %. Chloridindholdet er både for højt før og efter udvaskningsforsøget. Det skal dog bemærkes, at ved yderligere udvaskning kan chloridindholdet formentlig bringes ned på under 0,1 %. Ionchromotografen bekræfter derved SEM billederne. På figur 7.1.4 er det illustreret, hvor meget salt der fjernes ved vaskning. NO₃ er ikke medtaget på figuren, da mængderne er så små i forhold til de to andre salte.

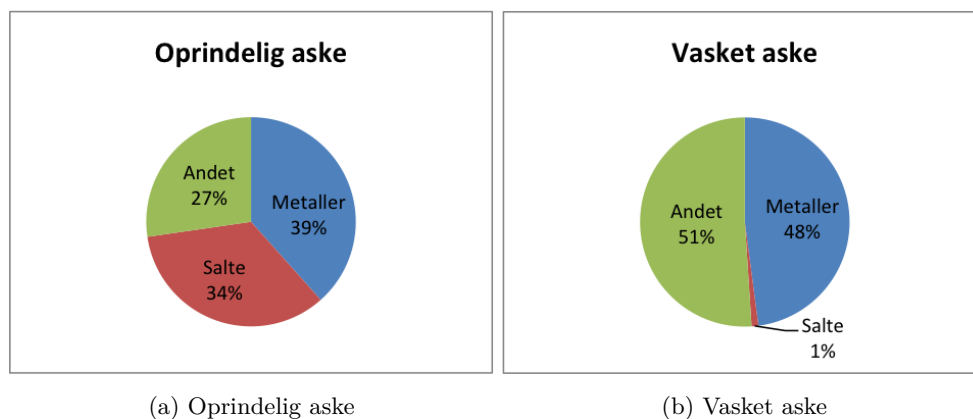
Ved oplukningsforsøget og ICP er mængden af udvalgte metaller i askeprøver fundet. Som det ses på figur 7.1.5 er mængden både fundet for den oprindelig aske og for den vasket aske. Søjlediagrammet er lavet ud fra gennemsnittet af tre prøver, hvor de eksakte værdier og udregninger kan ses i bilag D.3 og D.4.



Figur 7.1.5: ICP-forsøg, Koncentration af metaller i oprindelig og vasket aske

Det bemærkes, at det kun er to af de undersøgte metaller, der er vandopløselige, Natrium og Kalium. Dette bekræfter, hvad mappingen viste om Natrium. Resten af metallerne bliver ikke vasket væk og udgør derfor en større andel af prøven end før.

Herunder ses procentandelen af de undersøgte salte og metaller fra den oprindelige aske og den vaskede aske. Det skal bemærkes, at det ikke er muligt at genbruge askenprøven således, at den eksakt samme aske bruges til både IC og ICP, hvilket skaber en vis usikkerhed omkring procentandelene sammenligning. Tallene, der er brugt, kan ses i bilag D.5.



Figur 7.1.6: Andel af salte og metaller

På figur 7.1.6a ses det at salte og metaller udgør hhv. 34 og 39 %, hvor de sidste 27 % udgøres af grundstoffer, der hverken er undersøgt i IC eller ICP. Figur 7.1.6b viser, hvordan saltene er opløst og kun udgør 1 %, hvilket betyder, at metaller og andre grundstoffer udgør større andele på hhv. 48 og 51 %.

7.1.3 XRF-scanning

Det har ikke været muligt at få lavet en XRF-scanning af samme batch, som resten af projektet er baseret på, men i tabel 7.1.3 ses resultater fra en XRF-scanning af en tidligere batch fra Sisimiuts forbrændingsanlæg. [Kirkelund, 2013] Sammenlignet med kravene fra DS/EN 450-1 ses det, at denne batch kun overholder 2 ud af 5 punkter. Det kan ikke siges med sikkerhed, at dette også er tilfældet for den batch der er arbejdet med i dette projekt, men det er sandsynligt, at de to asker ligner hinanden.

Oxid		Sisimiut aske	Krav
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	[%]	9,4	>70
CaO	[%]	25,2	<10
MgO	[%]	0,6	<4
SO ₃	[%]	3,0	<3
Na ₂ O + K ₂ O	[%]	25,1	<5

Tabel 7.1.3: Oxider i Sisimiut aske sammenlignet med krav jf. DS/EN 450-1

7.2 Sort aske

Nedenfor på figur 7.2.1 ses et billede af forskellige typer flyveaske. Til venstre på billedet ses en standard kulflyveaske, i midten er det den oprindelige aske fra Sisimiut, og til højre ses den vaskede aske, som også er fra Sisimiut. Som billedet viser, er der stor farveforskel, asken fra Sisimiut er tydeligvis meget sort i forhold til den almindelige kulflyveaske. Derudover er den vaskede aske endnu mere sort end den oprindelige aske fra Sisimiut, men det er dog meget svært at se på billedet. Denne farveforskel skyldes sandsynligvis, at i den vaskede aske er der vasket en stor del af saltene væk.

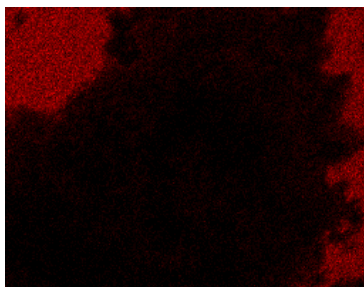


Figur 7.2.1: Tre typer flyveaske

Som beskrevet i afsnit 2.2.1 vedrørende Sisimiut flyveaske kører forbrændingsanlægget ved for lave temperaturer, og der tilføres ofte spildolie, for at affaldet kan brænde. Det forventes, at dette er skyld i et højt indhold af kulstof, hvilket giver den sorte farve.

Ved brug af SEM undersøges, det om asken indeholder den forventede høje mængde kulstof. Nedenfor på figur 7.2.2 ses et SEM billede, der viser mængden af kulstof. Ved sammenligning af figur 7.1.1a og

7.2.2 ses det tydeligt, at den store mængde af kulstof kun er til stede udenfor selve askepartiklen. Dette skyldes, at askeprøven placeres på en lille plade, som har en kulstofoverflade, og det er den overflade, der kommer til syne på billedet. Mappingen kan derved ikke bekræfte teorien om et højt askeindehold.



Figur 7.2.2: SEM billede af kulstofindhold

For at undersøge, om der ligger kulstof under overfladen, ses der på det tidligere glødetabsforsøg, der er omtalt i afsnit 4.1. For at få en mere præcis bestemmelse af mængden af kulindhold, blev en askeprøve og en knust mørtelprøve testet i en LECO ovn. Dette er en højfrekvens induktions ovn, som afbrænder prøven ved 8500 °C, hvorefter kulstofindholdet kan måles. Denne test viste, at askeprøven indeholdte 5,92 % kulstof, mens en knust mørtelprøve med aske indeholdte 1,51 %, se bilag B.6. På baggrund af disse resultater kan det konkluderes, at der ikke skal store mængder kulstof til, før at asken og derved også mørtelprøverne bliver sorte. Figur 7.2.3 viser farveforskellen mellem en mørtelprøve uden aske, tre mørtelprøver med henholdsvis 5, 10, 20 % cement erstattet med aske, og en mørtelprøve med 10 % sand ligeledes erstattet med aske.



Figur 7.2.3: Fra venstre: Ref, A, B, C og D

Det skal dog bemærkes, at ikke alle batches fra Sisimiut er sorte som den, der er arbejdet med i dette projekt. Dette skyldes højst sandsynligt de uregelmæssige temperature ved forbrænding, og om der benyttes spildolie eller ej ved forbrænding af affaldet.

7.3 Mørtelprøver

Styrken af mørtelprøver udvikles over tid, hvilket også gælder for beton. Det vides fra tidligere forsøg med mørtelprøver udført efter DS/EN 196-1, at efter en hærdetid på 28 døgn sker der ikke længere en stor

udvikling af styrken. Gennem dette afsnit er der beregnet en gennemsnitsværdi for hver mørtelblanding, og resultatet af dette kan ses i bilag G.

Porøsitet og densitet

Ved forsøget beskrevet i kapitel 2.3 er porøsiteten og densiteten for tre B14 prøver og tre referenceprøver fundet. Forsøget er ikke udført med A prøver, da det forventedes, at deres porøsitet og densitet måtte ligge et sted imellem B og Ref. I tabellen herunder er de gennemsnitlige værdier angivet med afvigelser.

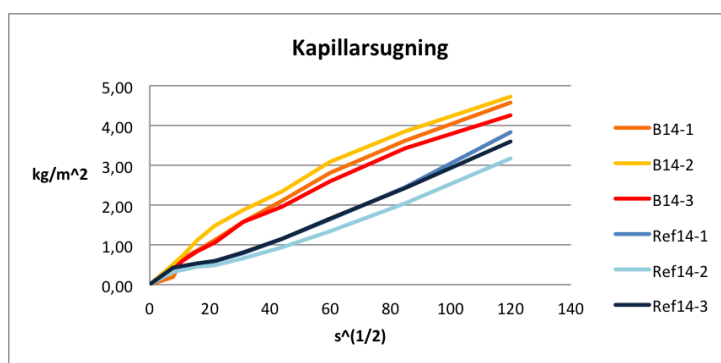
	ρ_{ssd} [$\frac{kg}{m^3}$]	ρ_d [$\frac{kg}{m^3}$]	p_a [-]
B14	2260,9 ± 1,1	2046,4 ± 5,0	0,215 ± 0,004
Ref	2303,5 ± 2,6	2102,3 ± 3,8	0,202 ± 0,001

Tabel 7.3.1: Porøsitet og densitet for B og Ref

I tabel 7.3.1 ses at tørdensiteten, ρ_d , for B-prøven er ca. $50 \frac{kg}{m^3}$ lavere end for referencen, hvilket svarer til ca. 2 %. Densiteten i vacuumvandmættet overfladetør tilstand, ρ_{ssd} , for B-prøven er ca. $40 \frac{kg}{m^3}$ lavere end for referenceprøven, hvilket svarer til ca. 3 %. I dette forsøg regnes den totale porøsitet, p , for at være lig den åbne porøsitet, p_a . Forsøget viser, at B-prøven har en porøsitet, der er 0,013 højere end referencen, hvilket svarer til ca. 6 %. Forskellene på densitet og porøsitet kan enten skyldes asken, eller at prøverne er to forskellige støbninger.

Kapillarsugning

Som beskrevet i afsnit 2.3 er der udført et kapillarsugningsforsøg for at undersøge mørtelprøvernes evne til at suge vand. Referenceprøverne er udført af en anden projektgruppe, men også efter DS/EN 196-1. På nedenstående graf ses den opsugede masse Q , som en funktion af \sqrt{t} . For at udregne kapillaritetstallet, k , bør forsøget fortsættes, indtil prøven ikke kan suge mere vand, og kurven flader ud, som det ses på figur 5.1.2, men da dette ville tage alt for lang tid, er forsøget stoppet inden. Forsøget kan stadig bruges til at sammenligne forløbet for B-prøverne med referenceprøverne. I bilag F.1 og F.2 ses forsøgsresultaterne.

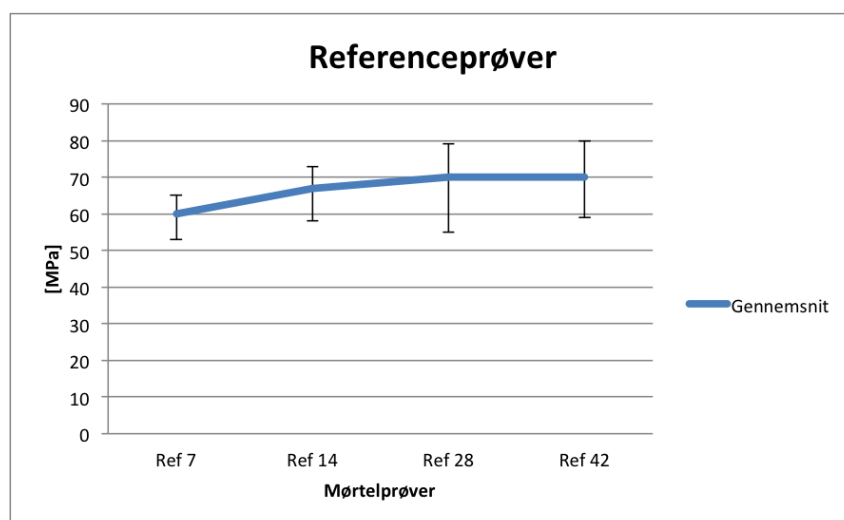


Figur 7.3.1: Kapillarsugning for B14-prøver og reference

På figur 7.3.1 ses det, at B-prøverne transporterer vand hurtigere end referencen. Dette må skyldes større porer. Med større porer må det forventes, at vandet kan suges længere op.

7.3.1 Referenceprøver

Der er testet 36 referenceprøver, som har hærdet henholdsvis 7, 14, 28 og 42 døgn. Nedenfor på figur 7.3.2 ses gennemsnittet af styrken for de fire hærdetider med angivet maksimum og minimum. Alle værdier kan ses i bilag G.1.1 til G.1.4.



Figur 7.3.2: Oversigt over trykstyrken for referenceprøverne

På figur 7.3.2 kan det ses, at mellem 7 og 14 døgn stiger gennemsnitsstyrken fra 60,0 til 67,2 MPa. Fra 14 til 28 døgn er styrkeudviklingen ikke så stor, den går fra 67,2 til 70,0 MPa. Mellem 28 og 42 døgn udvikler styrken sig næsten ikke, hvilket stemmer overens med teorien i afsnit 2.1.4 under hærdeforløb, som beskriver, at der stort set ingen styrkeudvikling er efter de 28 døgn.

I tabel 5.1.1 ses det, at trykstyrken for en gennemsnitlig beton efter 28 døgn ligger på 35 MPa, hvilket er væsentligt svagere end Ref 28. Dette skyldes, at mørtelprøverne er utroligt små i forhold til store betonelementer, og jo større et element, jo flere fejl og derved svagere områder i betonen, hvor brudet vil ske.

De store afvigelser ved specielt 28 og 42 døgn kan skyldes, at de 72 målinger er foretaget af tre forskellige projektgrupper.

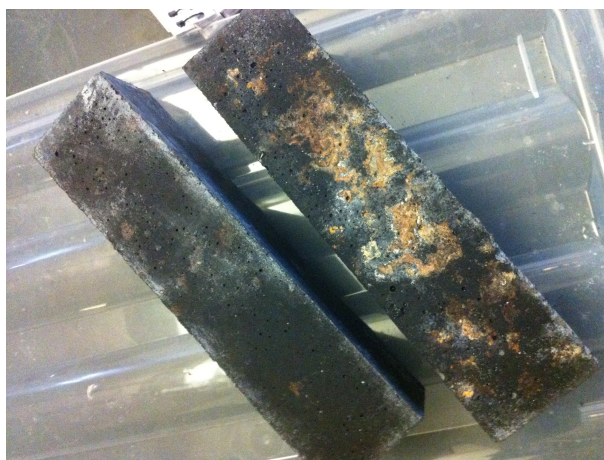
7.3.2 14 døgnsprøver

Der er støbt 14 døgnsprøver for alle 8 slags mørtelprøver samt referenceprøven. Nedenfor i tabel 7.3.2 ses det, hvor mange døgn hver af de 9 mørtelprøver har ligget i støbepormen. Som beskrevet i afsnit 2.1.4 under hærdeforløb varer afbindingsperioden for mørtel normalt ikke mere end 24 timer, men det ses tydeligt i tabellen, at dette kun er gældende for Ref, A og AV. For B, BV, C, CV, D og DV blev afbindingstiden forlænget til mellem 2 og 6 døgn, hvilket er beskrevet yderligere i afsnit 4.3.3. Dette skyldes dog ikke et højt vandindhold, hvilket man ellers kunne tro. Som det ses i afsnit 4.1 under analyse af aske, ligger det gennemsnitlige vandindhold for asken kun på 0,71 %.

Mørtelprøver	Ref	A	AV	B	BV	C	CV	D	DV
Antal Døgn	1	1	1	2	2	6	6	6	6

Tabel 7.3.2: Oversigt over antal døgn i støbeporm, for hver af de 9 mørtelprøver.

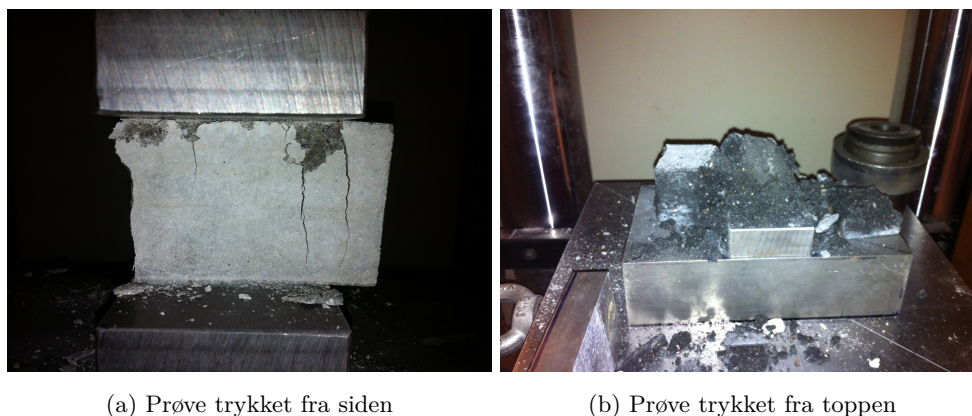
Den lange afbindingsperiode var skyld i, at disse mørtelprøver blev lagdelt. På figur 7.3.3 ses to forskellige 14 døgns prøver fra bunden. Den venstre er en B14-prøve, som har afbundet i 2 døgn, mens den højre er en D14-prøve, som har afbundet i 6 døgn. På begge prøver kan det ses, at der er rust i bunden, men det er dog tydeligt, at der er mest rust i bunden af D14-prøven. Når afbindingsperioden forlænges, betyder det en længere periode, hvor prøverne har væskeegenskaber. Dette betyder, at flyveasken, cementpastaen og sandet lagdeler sig. Da cementpartiklerne er meget små i forhold til sandpartiklerne, må det forventes, at sandet falder til bunds, mens cementen lægger sig øverst. Fra ICP-målingerne i afsnit 4.1.2 ses det, at flyveasken indeholder jern, og da jern oxiderer, når det er i forbindelse med vand, kunne det være forklaringen på rusten i bunden af prøverne. En anden forklaring kan være, at formene, som prøverne laves i, er lavet af støbejern. Jo længere tid prøverne er om at afbinde, jo længere tid er vandet fra prøverne i kontakt med formen, hvilket kan betyde, at jernen fra formen oxiderer i bunden af prøverne.



Figur 7.3.3: Billede af lagdelte prøver.

Tryktesten af disse 14 døgnsprøver bekræfter denne lagdeling. Prøverne A14 og B14 opførte sig som referenceprøverne under tryktesten, dog var den gennemsnitlige styrke for B14 med 61,3 MPa, 8,8 % lavere end for referencen, mens den gennemsnitlige styrke for A14 med 68,6 MPa var 2,1 % højere end referencen.

Ved tryktesten fra siden af C14 og D14 viste det sig, at brudet skete i den side, som havde ligget nedad under afbindingen, mens at den side, der havde ligget opad og svarede til oversiden af prøverne, var intakt. Dette stemmer godt overens med teorien om, at sandet er faldet til bunds under den lange afbindingstid, mens cementen ligger i toppen af prøverne. C14 og D14 blev med trykstyrker på 30,0 og 37,8 Mpa, væsentligt lavere end referencen, henholdsvis 55 % og 43 %. På grund af lagdelingen af prøverne, var det interessant at se, hvad der ville ske, hvis prøverne blev udsat for tryk mod oversiden i stedet for fra siden. Her kunne styrken slet ikke defineres, for når trykket nåede op omkring 13 kN begyndte C og D prøverne langsomt at smuldre under maskinen. Og da maskinen ingen modstand kunne mærke, fortsatte den trykket, indtil prøven var fuldstændig smuldret under maskinen. Dette var gældende ved både C14- og D14-prøverne. På figur 7.3.4a ses resultatet af tryk fra siden, sammenlignet med figur 7.3.4b en prøve trykket fra toppen.

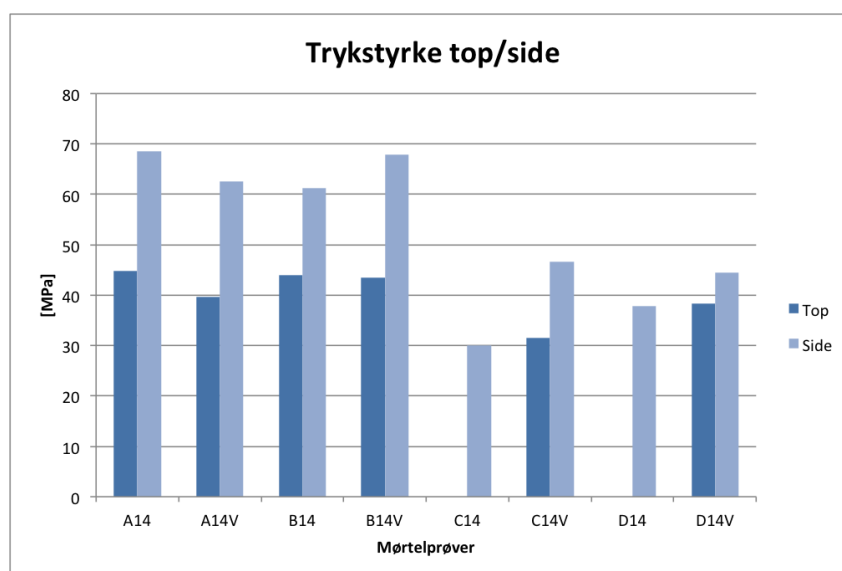


(a) Prøve trykket fra siden

(b) Prøve trykket fra toppen

Figur 7.3.4: Trykprøvning af mørtelprøver

Det kan altså på baggrund af disse forsøg konkluderes, at pga. den forlængede afbindingsperiode ved C- og D-prøverne bliver prøverne lagdelt, hvilket betyder svagere styrke og ved tryk fra toppen direkte ødelæggelse af prøverne.

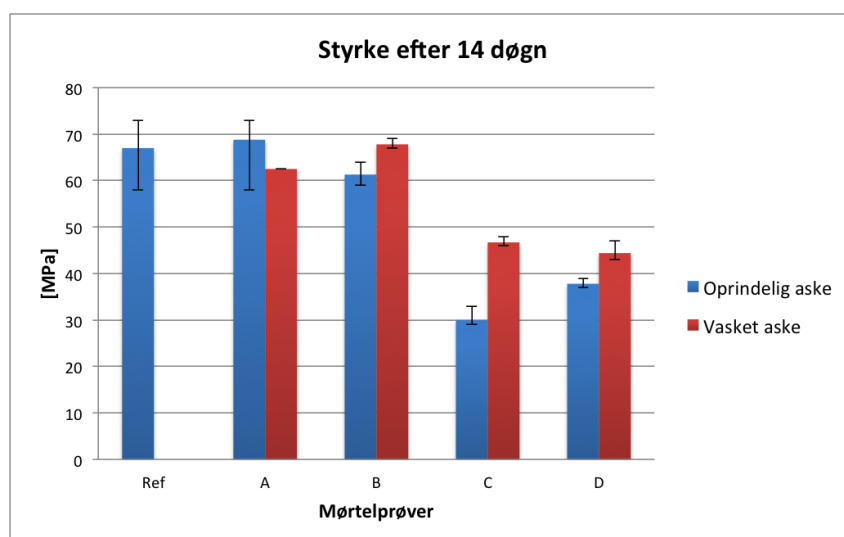


Figur 7.3.5: Trykstyrke for 14 døgns mørtelprøver ved tryk fra top/side.

På baggrund af resultaterne fra C14 og D14 forsøgene blev også A14 og B14 prøverne testet ved tryk fra toppen for at se, hvilke resultater dette gav. Her smuldrede ingen af prøverne, men styrken blev væsentligt lavere ved tryk på toppen, frem for på siden, hvilket ses tydeligt på figur 7.3.5. Ved at bruge en parret dobbeltsidet T-test, med hypotesen: *Der er ikke forskel på tryk fra side og top*, fås en p-værdi på 0,0014. Da p-værdien er meget mindre end det statistiske signifikantniveau på 5 %, kan hypotesen forkastes, og det konkluderes, at der *er* forskel på, om prøverne trykkes på siden eller toppen. Resultaterne for alle trykprøverne og T-testen kan ses i bilag G.6

På baggrund af den forlængede afbindingstid blev der lavet forsøg med mørtelprøver støbt med vasket aske for at undersøge, om dette ville forkorte afbindingstiden og forbedre prøvernes styrke. Asken blev vasket som beskrevet i afsnit 3.1.5, og herefter blev der lavet 4 mørtelblandinger, A14V, B14V, C14V og D14V, som alle hærkede i 14 døgn for at opnå det bedste sammenligningsgrundlag. Men som det ses i

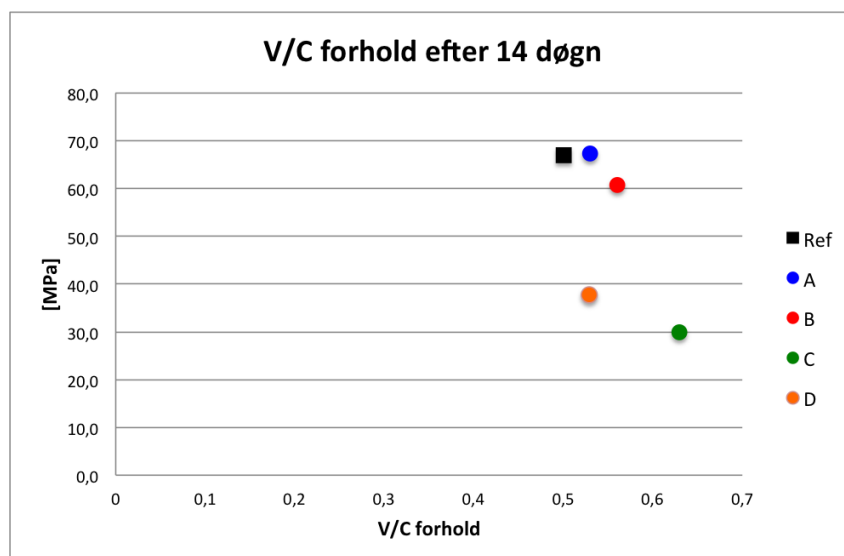
tabel 7.3.2, havde vaskningen af aske ikke umiddelbart nogen effekt på afbindingstiden, hvilket ligeledes betød, at prøverne fortsat var lagdelte, og at der var tegn på rust i bunden af prøverne. Det var derfor forventet, at mørtelprøverne under tryktesten ville opføre sig som de 4 prøver støbt med den oprindelige aske, men det var ikke tilfældet. På trods af at det stadig så ud, som om prøverne var blevet lagdelt, var der ingen af prøverne med vasket aske, som smulderede under tryktesten. Dog var der stadig stor forskel på, om prøven blev udsat for tryk fra toppen eller siden. Det var helt tydeligt, at trykket fra siden gav en generelt højere trykstyrke, hvilket kan ses på figur 7.3.5. På figur 7.3.6 ses trykstyrken for 14 døgnprøverne støbt med henholdsvis vasket og uvasket aske. Alle prøverne i figuren er testet fra siden. Det ses her, at prøverne med vasket aske gennemsnitligt har en større styrke bortset fra A14V-prøven. Det viser sig endda, at B14V-prøven med vasket aske har en lige så høj styrke som referenceprøven. Der er her udført en parret dobbeltsidet T-test med hypotesen: *Der er ikke forskel på mørtelprøver med vasket aske og mørtelprøver med oprindelig aske*. P-værdien blev 0,301 hvilket er meget højere end signifikansniveauet på 5 %, og det kan derfor på baggrund af de foretagne forsøg ikke konkluderes, at vasket aske giver en højere styrke end oprindelige aske. Se bilag G.8



Figur 7.3.6: Styrke af mørtelprøverne efter 14 døgn.

Forskellen i styrken fra de oprindelige prøver til de vaskede prøver kan bl.a. skyldes et lavere saltindhold i den vaskede aske.

På figur 7.3.7 nedenfor ses en graf, der viser forholdet mellem v/c forhold og styrken. Som beskrevet i afsnit 2.1.2, giver et højt v/c forhold en lav styrke, hvilket grafen ligeledes viser. Dog ses det, at punktet for D14-prøven skiller sig ud, og dette er et godt tegn på, at sammenhængen mellem v/c forholdet og styrken ikke altid er gældende, når der ændres på andre faktorer. I D14-prøverne er der hverken ændret på mængden af cement eller vand men derimod på en helt tredje faktor, nemlig sand. Derfor forbliver v/c forholdet uændret, selvom styrken er faldet betydeligt.



Figur 7.3.7: Graf over V/C forholdet for de forskellige mørtelprøver.

For A14-prøven var det derfor forventet, at styrken ville ligge lidt under referenceprøven, men som det ses på grafen, var dette ikke tilfældet.

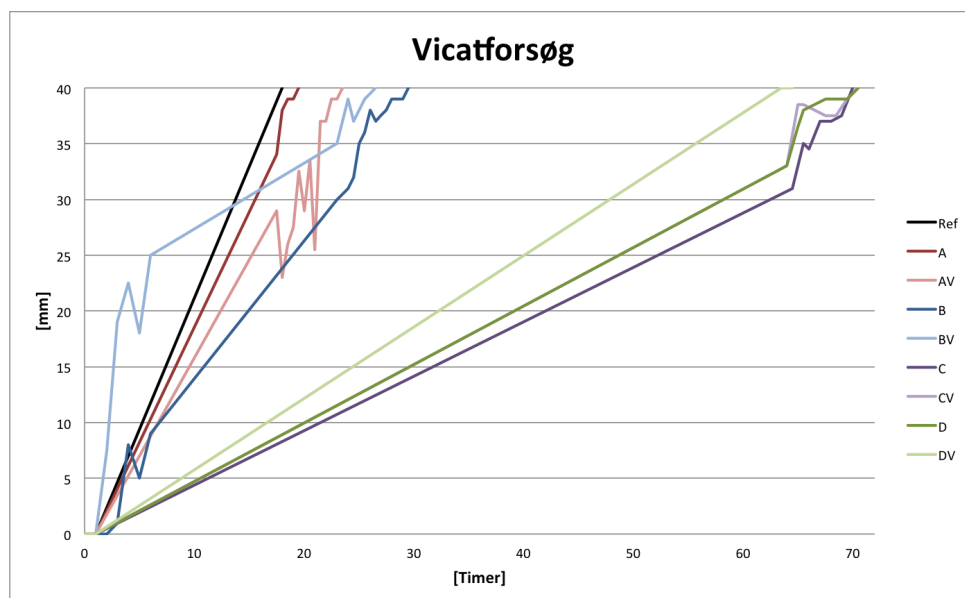
Efter forsøg med 14 døgnsprøver kan det konkluderes, at C14- og D14-prøvernes afbindingsperiode er meget længere end referencens. Dette vil i nogle tilfælde være en fordel, hvis det f.eks. blev brugt i en beton, der skulle transporteres over lange afstande, men da denne lange afbindingstid ligeledes medfører, at prøverne bliver lagdelte og derfor får en meget lavere styrke, er C14- og D14-prøverne ikke brugbare. Når der kigges på henholdsvis den oprindelige og den vaskede aske, ses det generelt at være den vaskede aske, der giver den højeste styrke. Derudover viser forsøgene, at A14- og B14-prøverne begge har en ret høj styrke, A14-prøverne er endda lidt bedre end referenceprøverne.

7.3.3 Vicat

I tabel 7.3.2 ses det, hvor længe de forskellige prøver har ligget i støbeformene. Men da alle C og D prøverne blev støbt tirsdag og endnu ikke var afbundet fredag eftermiddag, forblev de i formene over weekenden, dvs. i 6 døgn. Der var derfor en vis usikkerhed om præcis, hvor lang deres afbindingstid havde været, da det ikke var muligt at se til dem. Derfor blev afbindingsperioden testet mere præcist ved hjælp af et Vicat apparat, se afsnit 3.2.1.

Nedenfor på figur 7.3.8 ses udviklingen i afbindingstiden for hver mørteltype. Som det ses på grafen har både referencen og DV en lineær kurve. Dette skyldes, at begge prøverne har stået hen over natten, hvor der ikke er testet, se afsnit 3.2.1. Det kan derfor kun konkluderes, at referencen afbinder et sted inden den 18. time og DV afbinder et sted inden den 64. time. De resterende 7 mørteltypers afbindingstid kan aflæses mere præcist, fordi det her var muligt at foretage målinger op mod afslutningen af afbindingstiden. A afbinder efter 19 timer og 30 minutter, mens AV er lidt længere om det, 23 timer og 30 minutter. For B og BV var det lige omvendt, BV var først om at afbinde efter 26 timer og 30 minutter, mens B afbinder efter 29 timer og 30 minutter. C og CV ligger meget lig hinanden, C afbinder efter 70 timer, hvorefter CV afbinder 30 minutter senere. D afbinder som CV efter 70 timer og 30 minutter. Se bilag H

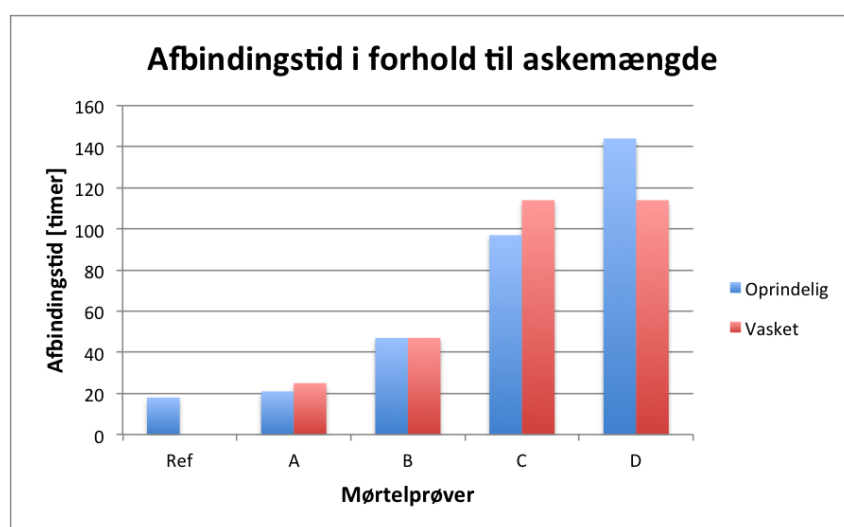
Det skal bemærkes, at de målte testresultater er forbundet af en ret linje der, hvor der ikke af aflæst målinger, hvilket kan give et forkert billede. Hvis forsøget var udført med en elektronisk vicat, ville alle prøverne have haft mange flere små udsving gennem hele afbindingsforløbet.



Figur 7.3.8: Graf over afbindingstiden på baggrund af Vicatforsøg

Der viser sig ikke noget mønster for, om afbindingstiden bliver forlænget eller forkortet, når asken er vasket. Det svinger lidt alt efter hvilken gruppe, der ses på, og det kan derfor ikke konkluderes, om vaskning af aske har nogen betydning for afbindingstiden. Til gengæld kan det tydeligt ses, at mængden af aske i mørtelprøverne, har en tydelig påvirkning på afbindingstiden. Jo mere aske, jo længere bliver afbindingstiden.

Selvom Vicatforsøget var færdiggjort, var det ikke hensigtsmæssigt at afforme de mørtelprøver med aske i, uden at de ville smuldre i kanterne og gå i stykker. Det blev derfor besluttet, at tilføje et ekstra forsøg, som bestod, i at der manuelt blev testet for, hvornår prøven havde så fast en konsistens, at det ikke længere var muligt med håndkraft, at presse en 1,13 mm tyk nål mere end 0,5 mm ned i prøven. På figur 7.3.9 ses det, hvornår de enkelte prøver ifølge dette forsøg kunne afformes.



Figur 7.3.9: Diagram over endelig afbindingstiden

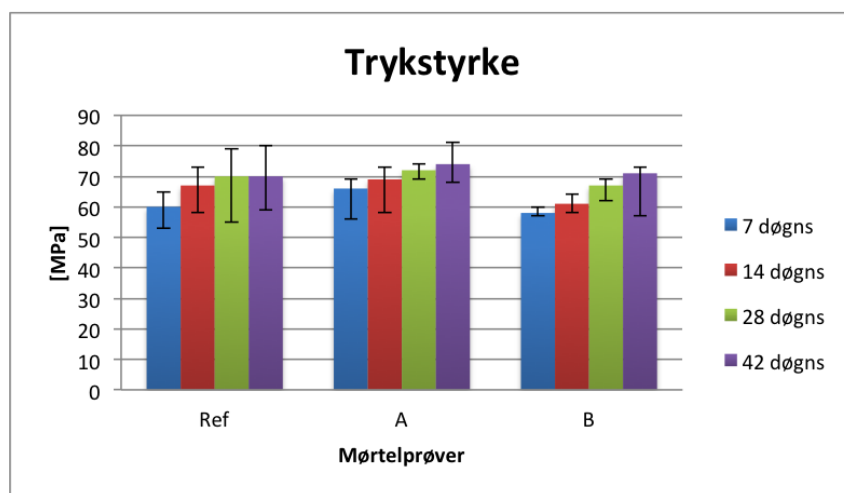
Det ses, at A, AV, B og BV ligger meget, som det var forventet. A-prøverne afbinder efter ca. 24 timer, og

B-prøverne afbinder efter ca. 48 timer. C, CV, D og DV har fortsat en forlænget afbindingstid, men den er dog ikke lige lang for alle prøverne. Alle C-og D-prøverne afbinder mellem 4 og 6 døgn efter støbning. Hvis der kun ses på prøverne støbt med den oprindelige aske, ses det, at afbindingstiden stiger støt, jo mere aske, der kommer i prøven.

7.3.4 42 døgnsprøver

Udover 14 døgnsprøverne, som er nævnt i det forrige afsnit, er der også lavet forsøg med 7, 28 og 42 døgns prøver. Dette er lavet med Ref, A og B støbninger, da det allerede ved 14 døgnsprøverne tydelig viste sig, at C og D var uegnede.

Nedenfor på figur 7.3.10 ses et søjlediagram over prøvernes trykstyrke efter henholdsvis 7, 14, 28 og 42 døgns hærkning. Søjlen angiver gennemsnittet, og udsvinglinjen viser højeste og laveste måling. Det ses, at prøverne ikke overraskende bliver stærkere jo længere tid, de hærdner. Udsvinglinjerne viser, at referenceprøvernes målinger har ligget meget spredt, hvilket skyldes, at der er mange flere observationer, og at det er tre forskellige blandinger udført af tre forskellige projektgrupper. Målingerne for A og B har ikke ligget helt så spredt som referencens.



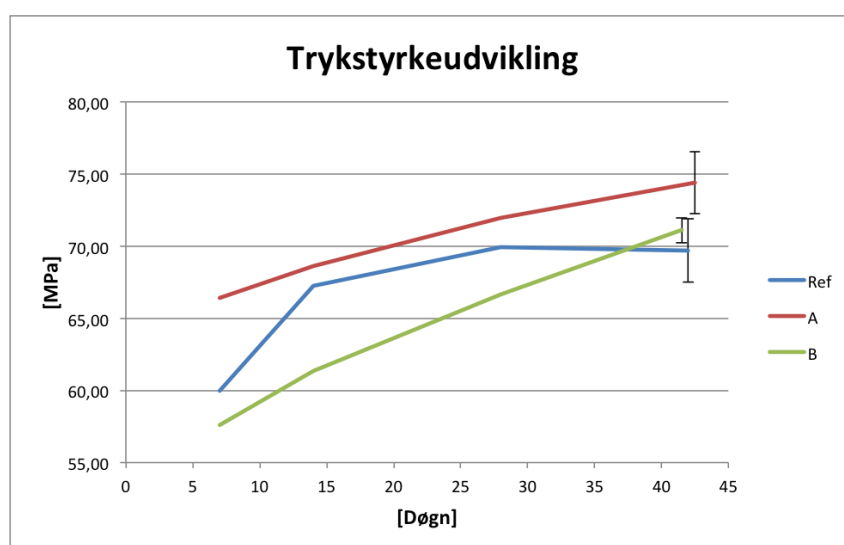
Figur 7.3.10: Diagram over de enkelte prøvers trykstyrke

Aktivitetsindexet for A28 og B28 er hhv. 102,9 % og 95,3 %. Sammenlignet med DS/EN 450-1, som er beskrevet i afsnit 2.2, er kravet om et aktivitetsindex på minimum 75 % overholdt. Dog skal det bemærkes, at kravet er lavet til en blanding, hvor flyveasken erstatter 25 % af cementen. Aktivitetsindex er beregnet for samtlige prøver i bilag G.9.

På figur 7.3.11 ses trykstyrkeudviklingen over tid baseret på de gennemsnitlige værdier, som ses i bilag G.1.1 - G.3.2. Fejllinjerne ved 42 døgn angiver spredningen af gennemsnittet. Grafen viser, at referencen som forventet tiltager i styrke indtil det 28. døgn, hvorefter den er færdighærdet. Ved 42 døgn er den gennemsnitlige værdi for referencen $69,7 \pm 2,2$ MPa. Det ses, at A-prøverne under hele forløbet har en højere trykstyrke end referencen. Ved 42 døgn er den gennemsnitlige styrke for A-prøven, baseret på seks målinger, $74,4 \pm 2,1$ MPa. Der lægges mærke til, at spredningen for A-prøven og spredningen for referenceprøven ikke krydser hinanden. Der er udført en dobbeltsidet T-test med hypotesen *Der er ikke forskel på referenceprøven og A-prøven*. Da $p < 0,001$ kan hypotesen forkastes og det konkluderes, at A-blandingen ved 42 døgn er stærkere end ved referencen. Se bilag G.7

B-prøverne er noget tid om at komme i gang med at hærde og ligger under referenceprøven indtil et sted imellem 28 og 42 døgn. Gennemsnittet ved de 42 døgn er $71,1 \pm 0,9$ MPa, det skal dog bemærkes, at grundet frasortering af målinger, der afvig med mere end 10 % fra gennemsnittet, er dette gennemsnit kun baseret på de fire højeste målinger, hvilket kan give et lidt optimistisk billede af B-prøven. Se bilag G.3.2. Gennemsnitligt er B-prøven 1,4 MPa stærkere end referencen, men det bemærkes, at de to spredninger ligger i samme felt. En dobbeltsidet T-test resulterer i en p-værdi på 0,721, hvilket er langt over det statistiske signifikansniveau på 5 %. Det kan derfor ikke konkluderes, at B-prøven er stærkere end referencen.

Det er interessant at se, at for både A og B-blandingen fortsatte styrken med at stige efter det 28. døgn. Fra 28 til 42 døgn har deres styrke udviklet sig med hhv. 3,2 % og 6,2%. Det er ikke muligt at afgøre om styrken er fuldt udviklet efter 42 døgn, da dette ville kræve bekræftende målinger på et senere tidspunkt.



Figur 7.3.11: Graf over styrkeudviklingen for Ref, A og B

7.3.5 Udvasning af metaller

Ovenfor er det konkluderet, at asken fra Sisimiut styrkemæssigt er egnet til brug i beton. Det undersøges, om asken ligeledes er egnet miljømæssigt til brug i beton. Dette gøres ved en udvasningstest af de færdigstøbte mørtelprøver for at se, hvor stor en mængde tungmetaller, der bliver udvasket. I tabel 7.3.3 ses hvilke metaller, der blev udvasket ved testen. Det ses, at for både calcium og kalium ligger værdierne tæt på referencen, hvorimod at der er meget mere natrium i både A og B sammenlignet med referencen. Hverken Ca, K eller Na er tungmetaller.

Tungmetaller			
Mørtelprøver	Ca [mg/kg]	K [mg/kg]	Na [mg/kg]
Ref	1376	719	293
A	1508	560	1071
B	1361	735	1799

Tabel 7.3.3: Oversigt over hvilke metaller der bliver udvasket

Udover de tre metaller, som er vist i tabel 7.3.3, er der ligeledes undersøgt for mængden af Al, Cd, Cr,

Cu, Fe, Pb, Ni og Zn. Der blev dog kun udvasket ubetydelige mængder af tungmetaller, hvilket kan ses i bilag I.

7.3.6 Aktivitetsfaktor

Som beskrevet i afsnit 2.2 under flyveaske, er aktivitetsfaktoren en faktor, der beskriver forholdet mellem en given mængde flyveaskes styrkebidrag og samme cementmængdes styrkebidrag. Aktivitetsfaktoren er derfor blevet beregnet for de mest relevante prøver, A og B.

I afsnit 2.1.2 i ligning 5.1.1 ses bolomeys formel for beton, hvor K og α er faktorer, der afhænger af cementtypen og terminen. I forsøgene er der brugt Basis cement fra Aalborg Portland, der for 7 døgn har en K -værdi på 26 MPa og en α værdi på 0,6 og for 28 døgn har en K -værdi på 30 MPa og en α værdi på 0,5. [Aalborg, 2007, s. 88]

I afsnit 2.2 i ligning 5.2.1 ses bolomeys udvidede formel for beton tilsat puzzolansk materiale, som i dette tilfælde er flyveaske. Her er α sat til en fast konstant 0,5, mens K fortsat er en faktor, som afhænger af cementtype og termin.

Da bolomeys formel er en erfaringsmæssig beskrivelse af betons styrke og ikke mørtels styrke, er det nødvendigt at foretage en justering af faktoren K , hvilket er gjort ved hjælp af de målte trykstyrker for referenceprøverne. Ved at indsætte disse som f_c , sammen med de angivne α værdier for cement i ligning 5.1.1, kan der findes en faktor K gældende for mørtelprøverne. Udregningerne for K ses i bilag J.1. Nedenfor i tabel 7.3.4 kan de beregnede K -værdier for mørtel ses i forhold til K -værdierne for beton.

Faktor K		
Terminen [døgn]	Beton [MPa]	Mørtel [MPa]
7	26	42.93
14	27.33	46.76
28	30	46.25

Tabel 7.3.4: Oversigt over K -værdien for henholdsvis beton og mørtel

Med de beregnede K -værdier er det nu muligt at beregne aktivitetsfaktoren k for A14 og B14 ved brug af ligning 5.2.1. De tidligere målte trykstyrker indsættes i denne ligning som f_c , sammen med den brugte aske, cement- og vandmængde. Udregningerne for aktivitetsfaktoren k ses i bilag J.2 - J.3. I tabel 7.3.5 ses de beregnede aktivitetsfaktorer.

Aktivitetsfaktor		
Terminen [døgn]	A	B
7	1.47	0.21
14	0.41	0.0013
28	1.57	0.7

Tabel 7.3.5: Aktivitetsfaktoren for mørtelprøverne A og B

Det ses, at aktivitetsfaktoren svinger mellem 0,70 og 1,57 for 28 døgnsprøverne, hvilket er et meget stort sving, når aktivitetsfaktoren for flyveaske normalt ligger mellem 0,3 og 0,5 for 28 døgnsprøver. Som beskrevet i afsnit 2.2 under flyveaske, er aktivitetsfaktoren afhængig af tiden og typen af puzzolan, hvilket betyder, at prøver med samme hærdetid burde have samme k -faktor, da både tid og type af

puzzolan er identiske. Dette er ikke tilfældet, hvilket kan skyldes, at formlen er baseret på beton og ikke mørtelprøver, samt at justeringen af faktoren K ikke er præcis nok. En anden begrundelse kan være, at formlen udelukkende er baseret på erfaringer.

7.4 Fejlkilder

Generelt er der altid en usikkerhed forbundet med forsøg foretaget af mennesker. I stort set alle forsøg, der er udført i dette projekt, er der brugt referencer. Nogle af referenceprøverne, er udført af andre projektgrupper, hvilket kan give en variation i udførelsen af forsøget. Det er klart en formindskelse af fejlkilder, når prøver og referencer, der skal sammenlignes, er udført af de samme mennesker og under helt samme forhold.

Forsøg med aske

Ledningsevnen har en afvigelse på næsten 42 %, og dette skyldes formentlig, at der er taget meget små prøver af en inhomogen aske, hvor saltene er ujævnt fordelt. Derfor bør der tages mange flere prøver end blot tre, eller også bør asken knuses først, så den bliver mere homogen. I SEM forsøgene er der kun brugt en måling, også her kunne der med fordel kigges mere på asken. Askens inhomogenitet vurderes til ikke at have den store indflydelse på mørtelprøverne, da der bruges meget større mængder til at blande mørtel.

Forsøg med mørtelprøver

Under blandingen af mørtelprøverne blev der i prøverne, A, AV, B og BV, brugt den samme mængde vand som i referenceprøverne, men i prøverne C, CV, D og DV blev der brugt ekstra vand. Mængden af det ekstra vand blev udelukkende vurderet på konsistensen af mørtelblandingerne.

I henhold til Dansk Standard 196-1 bør rystebordet give 2x60 ryk til en mørtelblanding, når den er lagt i formen. I dette forsøg blev der brugt to forskellige rysteborde, og på det ene bord var det ikke muligt at se hvor mange rystelser, der blev foretaget.

Vicatforsøget er i DS/EN 196-3 beregnet til cementblandinger og ikke til mørtelblandinger, som ellers er blevet brugt i dette projekt. Det har også været bemærket, at forsøget ikke var det mest optimale til bestemmelse af afbindingstiden, da sandet i mørtelen gjorde prøverne ujævne.

Det vandbad, som mørtelprøverne ligger i, mens de hærdes, skal ifølge DS/EN 196-1 være $20,0 \pm 1,0$ °C, men dette har ikke altid været tilfældet. Temperaturen er derimod blevet målt til 24-25 °C. Derudover har alle prøver ligget i samme vandbad, hvilket er blevet meget salt på grund af den oprindelige askes saltindhold. Det ville være optimalt, hvis hver mørtelstøbning havde sit eget vandbad, så de stoffer, der udvaskes af prøverne, ikke bliver blandet med andre prøver.

Formlen for aktivitetsfaktoren er kun standardiseret for beton og ikke mørtel. Omskrivningen af formlen, så den kan bruges til mørtel, er ikke bevist hverken eksperimentelt eller teoretisk.

8 Perspektivering

Efter forsøgene med mørtelprøverne ses det, at når 5 % cement erstattes med flyveaske fra Sisimiut, bliver styrken bedre. Erstattes 10 % af cementen med aske, bliver prøverne gennemsnitligt ligeså stærke som referencen. Dette betyder, at styrkemæssigt kan det være en fordel for Sisimiut kommune at bruge flyveasken fra deres forbrændingsanlæg i beton både for at få et grønnere miljø og for at spare penge.

Det er dog vigtigt at påpege, at askens store saltindhold betyder, at det er umuligt at bruge asken som tilsætning til armeret beton, da det givetvis vil forsage korrosion af jernet. Flyveasken kan bruges til beton uden armering som f.eks. forskellige former for belægning. Forsøgene med aske, hvor størstedelen af saltene er vasket ud med vand, har antydnet, at det giver en forøget styrke af mørtelen. Derudover er indholdet af chlorid i den vaskede aske reduceret så meget, at det næsten overholder kravene for flyveaske i beton. Det vil sige, at flyveasken fra Sisimiut godt kan bruges i armeret beton, hvis saltene vaskes væk først. Dette kan dog være en besværlig proces, hvis der skal vaskes aske i meget store mængder, og det kræver formentligt også nyt udstyr til kommunen. At vaske asken vil derfor både koste tid og penge, og derfor vil det måske ikke være en fordel for kommunen at vaske asken, hvis det i sidste ende betyder, at den ikke sparer noget ved det.

Da både A og B prøverne har et v/c forhold på under 0,55, opfylder de i følge tabel 5.1.3 miljøklasserne passiv og moderat. Da det på Grønland ville være optimalt med en beton, der opfylder miljøklasserne aggressiv og ekstra aggressiv, kunne det undersøges, om det er muligt at sænke v/c forholdet, uden at sænke styrken betydeligt.

Da den batch, som projektet er baseret på, er så sort, at den farver mørtelprøverne, er det selvfølgelig vigtigt at tage med i overvejelserne, om en grå/sort beton er ønsket. Hvis betonen skal bruges til fliser eller anden belægning, kan det godt tænkes, at farven ikke betyder så meget.

Hvis flyveaske sendes som miljø gods og ikke farligt gods, koster den billigste forsendelsesmetode og deponering tilsammen ca. 13.000 kr. Dette indebærer forsendelse af 20 big bags med i alt 6,3 ton flyveaske i en åben 20 fods container fra Sisimiut til Norge. Det er ca. 2000 kr. pr. ton aske [www.kanukoka.gl²]. Forbrændingsanlægget i Sisimiut producerer ca. 48 ton flyveaske om året, hvilket svarer til 1,7 % af den indfyrede mængde affald. I Danmark produceres der ca. 400.000 ton flyveaske som bruges i beton-, asfalt- og cementindustrien. Flyveasken leveres fra 6 kræftværker i Danmark. [Lundquist, 2013]. Hvis mængden af flyveaske regnes ud pr. indbygger svarer det til at der produceres 8,8 kg i Sisimiut, og 71,4 kg i Danmark. Det vil sige at der skal støbes i alt 1600 ton beton årligt hvis 10 % af cementen erstattes af aske for, at bruge de 48 ton aske fra Sisimiut. Da det ikke har været muligt at finde et tal for hvor meget beton der bliver produceret på Grønland, er det ikke muligt at konkludere om alt flyveasken kunne afsættes til betonproduktion. Men da der bliver produceret ca. en 8. del mindre flyveaske end i Danmark, virker det ikke urealistisk at størstedelen i løbet af nogle år kunne afsættes til betonindustrien. Se bilag K for udregningerne.

9 Videre forskning

Dette projekt bygger på 5 måneders arbejde, hvilket betyder, at der ikke har været tid til at undersøge alt omkring Sisimiut-asken. Der er derfor nedenfor opstillet en række forslag til, hvad videre forskning kunne bestå i.

Vasket aske

Da det viste sig, at alle prøverne med undtagelse af A14V fik en forøget trykstyrke ved brug af vasket aske, kunne det være spændende at arbejde videre med dette. Det kunne derfor undersøges, om mønstret ville fortsætte eller ændre sig ved test af flere støbninger indenfor hver blanding. Derudover har prøverne med vasket aske kun hærdet i 14 døgn, og det kunne derfor undersøges, om den forbedrede trykstyrke for B14V, C14V og D14V, ligeledes ville være gældende ved hærdning i 28 og 42 døgn.

Trykstyrke

I afsnittet 4.3.3 ses en graf, der viser trykstyrkeudviklingen for Ref, A og B. Her ses det, at hverken A eller B prøverne har opnået deres fulde trykstyrke efter 28 døgn, og der kunne derfor laves forsøg med A og B efter 90 døgn for at se, hvor længe styrkeudviklingen forsætter og hvor høj en styrke, der kunne opnås.

Afbindingstid

Vicat forsøget var det sidste forsøg, der blev udført i projektet, hvilket betød, at der ikke var meget tid at tage af. Men for at få et mere præcist resultat kunne det være interessant at følge hele DS/EN 196-3, hvor der først udføres en test for at finde standart konsistensen af cementpastaen, og herefter udføre testen, der bestemmer afbindingstiden. Dette ville give den helt rigtige vandmængde i cementpastaen og den præcise afbindingstid.

Forskellige Batch

Som nævnt i afsnit 4.2 er ikke alle batches fra forbrændingsanlægget i Sisimiut sorte, og der kunne derfor laves forsøg på en anden batch for at se, om det kun er farven, der ændrer sig, eller om det ligeledes har en betydning på flyveaskens egenskaber.

Beton

I denne rapport er der kun arbejdet med mørtelprøver, men da både A- og B-prøverne viste sig at havde bedre trykstyrke end referenceprøverne, kunne der laves videre forsøg med støbning af betonprøver iblandet flyveaske.

10 Konklusion

Dette projekt har taget udgangspunkt i en flyveaske fra et forbrændingsanlæg i den grønlandske kommune, Sisimiut. Formålet har været at undersøge anvendelsen af asken i mørtel med henblik på at bruge det som erstatning af cement i beton. Der er foretaget en karakteristik af asken samt støbt 51 mørtelprøver hvor en del af cementen eller sandet er erstattet med aske. Mørtelprøverne har hærdet i hhv. 7, 14, 28 og 42 døgn og er derefter trykprøvet 2 gange hver. Sammenligningsgrundlaget har været fakta om standard flyveaske samt 36 reference-mørtelprøver.

Det blev observeret, at jo mere aske, der var i prøverne, jo længere var afbindingstiden. Den længste afbindingstid var helt oppe på seks døgn, hvilket er 5 døgn mere end referencen. For at nedbringe afbindingstiden blev asken vasket med destilleret vand inden mørtelstøbningen, og det resulterede i en nedbringelse af mængden af salte, men ændrede ikke afbindingstiden synderligt meget. Saltindholdet gik fra ca. 34 % til 1 %.

Den lange afbindingstid resulterede i en lagdeling af mørtelprøverne der gjorde dem anisotrope, dette blev bekræftet af et forsøg hvor mørtelprøverne blev belastet hhv. på toppen og på siden. Her kunne det konkluderes, at prøverne i alle tilfælde var stærkere, når de blev trykket på siden. Dette var statistisk signifikant.

Styrkemålinger for 14 dages prøver med vasket aske er sammenlignet med 14 dages prøver med oprindelig aske, og det ses, at i tre ud af fire tilfælde er mørtelprøverne med den vaskede aske stærkest. Dette er dog ikke statistisk signifikant.

Efter at have foretaget en række forsøg med forskellige mængder aske i mørtelprøverne, konkluderedes det, at ved at erstatte 5 % af cement med flyveaske, blev prøverne gennemsnitligt 4,7 MPa stærkere end referencen. Dette var statistisk signifikant. Ved at erstatte 10 % af cement med aske kunne styrken ikke forbedres, men det viste sig at være lige så stærkt som referenceprøverne. Hvis der blev erstattet mere end 10 % af cement med aske, blev prøverne meget porøse, og styrken faldt drastisk i forhold til referenceprøverne.

En udvaskningstest af knuste mørtelprøver viste, at mængden af tungmetaller, der kunne udvaskes, var ubetydelig.

På baggrund af de foretagne forsøg kan det konkluderes, at flyveasken fra Sisimiut kan bruges i beton hvor 5 til 10 % af cementen udskiftes. Uvasket aske kan kun bruges i beton uden armering, da saltindholdet er meget højt. Hvis saltene udvaskes, vil det være muligt at bruge asken i armeret beton.

11 Litteratur

- [Aalborg, 2007] Aalborg Portland (2007),
Cement og Beton - Håndbogen om cement, beton og mørtel,
18. udgave, Aalborg Portland.
- [Hansen, 2008] Geiker M., Nielsen A., Hansen K.K. (2008),
Bygningsingeniørernes materialer-uddrag af materialebogen, D4 Beton,
1. udgave, Nyt teknisk forlag.
- [Hansen, 2010, notes] Hansen K.K. (2011),
Porøsitet, Densitet og Kapillarsugning,
Kursus 11735 Materialelære.
- [Herholdt, 1985] Herholdt A., Justensen C., Nepper-Christensen P., Nielsen A. (1985),
Beton-Bogen,
2. udgave,
Aalborg Portland, cementfribrikkernes tekniske oplysningskontor.
- [Jensen, 2010] Jensen P.E., Kirkelund G.M., Ottosen L.M.,
Christensen I.V., Pedersen A.J. (2010),
Opgradering af farligt røggasaffald,
Danske Kemi Nr. 4, d. 10 april,
Institut for Byggeri og Anlæg, Institut for Kemiteknologi.
- [Johannesson, 2011, notes] Johannesson B. (2011),
History of cement and concrete,
Kursus 11563 Concrete technology.
- [Johannesson, 2011, slides] Johannesson B. (2011),
Lecture 1: Introduction and repetition,
Kursus 11563 Concrete technology.
- [Kirkelund, 2013] Kirkelund G.M. (2013),
Mailkorrespondance,
Forsker ved DTU Byggeri og Anlæg.
- [Lundquist, 2013] Lundquist P. (2013),
Telefonsamtale,
Emineral.
- [Miller, 2009] Miller I., Johnson R.A., Freund J.E. (2009),
Probability and Statistics for Engineers,
8. udgave, Pearson Education.
- [MOKH, 2003] MOKH/SAD/TOH (2003),
Etablering af nye forbrændingsanlæg under anvendelse af BAT,
Udført af Rambøll.
- [Pedersen, 2003] Pedersen M.H., Winther P.L., Jørgensen R.T. (2003),
Mulige løsninger for håndtering af flyveaske og slagge i Grønland,
Udført af Carl Bro.

- [www.amfor.dk] Teknikken om røgrensningsanlæg
http://www.amfor.dk/Energi/Bag_om_tekniken/Roegrensningsanlaeg.aspx,
15.11.12.
- [www.kanukoka.gl¹] Driftjournal,
<http://www.kanukoka.gl/da-dk/media/2494/forbrændingsanlæg%20og%20modtagestation.pdf>,
17.11.12.
- [www.kanukoka.gl²] Piloterings regnskab,
http://www.kanukoka.gl/da/kommunale_sagsomraader/teknik_og_miljoe/miljoe/affald/forbraending_flyveaske_og_slagge/flyveaske/pilotforsendelse_af_flyveaske_gennemfoert/regnskaber__pilotforsendelse__af_flyveaske/samlet_opstilling__endeligt_regnskab_og_modelr
23.01.13.

Appendix

A Forsøgsvejledninger

A.1 Glødetab i jord

A Princip

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

B Specielt apparatur

Til analysen benyttes et muffelovn.

C Analysens udførelse

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

A.2 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. Ledningsevneeletroden 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.

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

E Affaldshåndtering

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

A.3 pH i KCl

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.

A.4 Vandindhold

A **Princip**

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

B **Specielt apparatur**

Til analysen benyttes et varmeskab.

C **Analysens udførelse**

Ved meget præcis måling:

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

Dette gøres vha. en tang, fingrene afsætter fugt.

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

Ved mindre præcis måling (mest anvendt):

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

D **Beregning af resultat**

Vandindholdet angives i procent af vægten af den fugtige jord.

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

E **Affaldshåndtering**

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald og bægerglassene rengøres.

A.5 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.

A.6 Vandopløselige anioner (IC)

Analyse:

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

Prøven stilles på rystebord natten over.

Prøven filtreres med sprøjtefilter og prøven gemmes til ionchromotograf og AAS

A.7 Oplukning (ICP)

A Princip

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

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes et atomabsorptionsspektrofotometer (AAS).

C Kemikalie sikkerhed

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

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

Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.

D Reagenser

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

500 mL koncentreret HNO₃ overføres med måleglas til en 1000,00 mL målekolbe som er ½ fyldt med destilleret vand. Der blandes godt og tilsættes vand til mærket. Efter blanding overføres opløsningen til en plastikflaske og mærkes.

E Analysens udførelse

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

Autoklavflaskerne lukkes helt til, da HNO₃ 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.

A.8 Porøsitet og densitet

Apparatur og materialer

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

Fremgangsmåde

Først foretages en kontrolvejning vha. et kontrollod, og den målte masse noteres. Prøvelegemerne skal i udgangssituationen være udtørret i en ovn ved 105 °C. Det udtørrede prøvelegeme evakueres tørt i ekssikator i mindst 3 timer.

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

Prøvelegemerne med vand henstår i 15 min. med undertryk i ekssikatoren. Hanen på ekssikatoren åbnes, og der ledes luft ind i ekssikatoren. Prøverne henstår i vandet ved atmosfæretryk i 24 timer. De vakuumvandmættede prøver vejes (m_u) under vandet, og værdien noteres. Prøvelegemerne aftørres med en hårdt opvredet klud, og vejes (m_{ov}) i luft. Til sidst foretages en kontrolvejning med kontrollod på vægten.

A.9 Kapillarsugning

Apparatur og materialer

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

Fremgangsmåde

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

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

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

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

B Analyse af aske

B.1 Glødetab

	Før [g]	Efter [g]	Forsvundet aske [g]	Glødetab [%]
Prøve 1	2.5080	2.3610	0.1470	5.8612
Prøve 2	2.5075	2.3574	0.1501	5.9860
Prøve 3	2.5040	2.3589	0.1451	5.7947
Gennemsnit				5.8807 ± 0.0971

B.2 Ledningsevne

	Ledningsevne [$\frac{mS}{cm}$]
Prøve 1	24,73
Prøve 2	49,60
Prøve 3	26,20
Gennemsnit	33,51 ± 13,95

B.3 pH

	pH med kaliumchlorid	pH med destilleret vand
Prøve	11,19	11,42
Prøve	11,17	11,39
Prøve	11,19	11,40
Gennemsnit	11,18 ± 0,01	11,40 ± 0,02

B.4 Vandindhold

	Masse af glasset [g]	Før [g]	Efter [g]	Vandindhold [%]
Prøve 1	103,2	80,0	79,4	0,75
Prøve 2	110,7	80,0	79,5	0,63
Prøve 3	106,9	80,1	79,5	0,75
Gennemsnit				0,71 ± 0,07

B.5 Vandopløselighed

	Aske før [g]	Efter afdrypning [g]	Efter ovn [g]	Opløst aske [g]	Opløst aske [%]
Prøve 1	100,01	172,41	46,38	53,63	53,62
Prøve 2	99,90	152,02	47,87	52,03	52,08
Prøve 3	99,99	160,10	46,33	53,66	53,67
Gennemsnit				53,11 ± 0,93	53,12 ± 0,90

B.6 LECO

	Afvejet [g]	C [%]	S [%]
Aske	0,4996	5,92	0,434
Støbt mørtelprøve	0,5029	1,51	0,512

C SEM output

C.1 Oprindelig aske

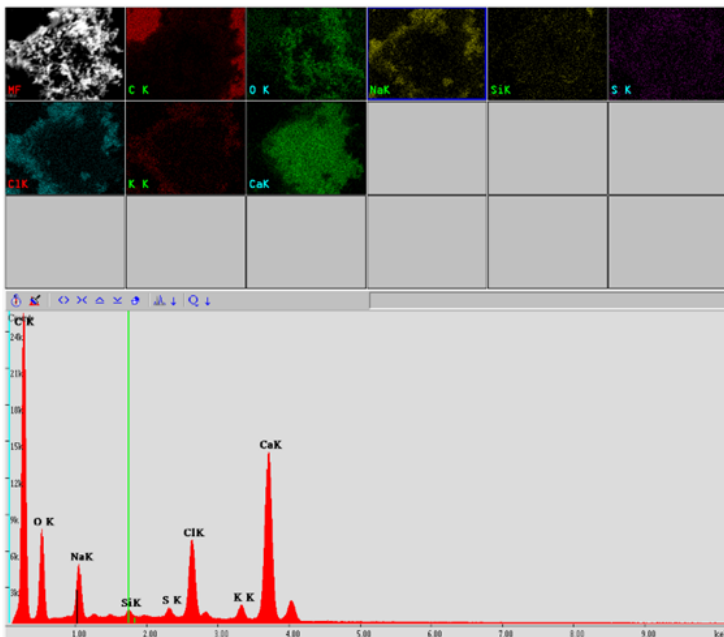
```
c:\edax32\genesis\genspc.spc
Label :
Acquisition Time : 00:00:00      Date:28-Sep-2012

kV : 14.99  Tilt: 0.40  Take-off:35.19  AmpT : 102.4
Detector Type:SUTW, Sapphire  Resolution:131.48  Lsec:100

EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized
SEC Table : User  c:\edax32\eds\genuser.sec
```

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	59.89	74.44	0.2326	1.0254	0.3786	1.0002
O K	16.54	15.43	0.0313	1.0060	0.1881	1.0001
NaK	3.49	2.26	0.0187	0.9390	0.5724	1.0005
SiK	0.31	0.17	0.0027	0.9513	0.8951	1.0044
S K	0.62	0.29	0.0058	0.9427	0.9783	1.0148
ClK	5.50	2.31	0.0500	0.9022	0.9946	1.0135
K K	1.36	0.52	0.0126	0.9050	0.9962	1.0304
CaK	12.30	4.58	0.1136	0.9240	0.9997	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	318.29	3.26	0.57	97.63
O K	78.80	4.69	1.19	16.80
NaK	70.31	8.67	1.33	8.11
SiK	8.60	9.30	6.06	0.92
S K	15.31	8.58	3.72	1.78
ClK	120.43	7.55	0.97	15.95
K K	24.36	6.62	2.52	3.68
CaK	193.25	5.47	0.74	35.33



C.2 Vasket aske

```

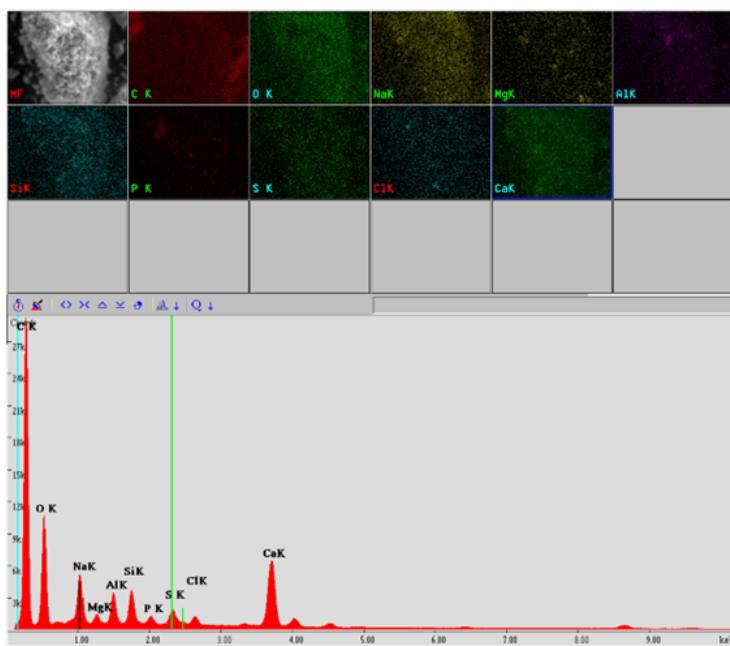
c:\edax32\genesis\genspc.spc
Label :
Acquisition Time : 13:21:37      Date:11-Oct-2012

kV : 14.99  Tilt: 0.40  Take-off:35.28  AmpT : 102.4
Detector Type:SUTW, Sapphire  Resolution:131.48  Lsec:100

EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized
SEC Table : User c:\edax32\eds\genuser.sec
    
```

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	57.73	69.60	0.2627	1.0195	0.4462	1.0002
O K	24.68	22.34	0.0544	1.0004	0.2201	1.0001
NaK	3.14	1.98	0.0168	0.9338	0.5724	1.0007
MgK	0.43	0.26	0.0029	0.9566	0.6967	1.0013
AlK	1.56	0.84	0.0117	0.9247	0.8119	1.0019
SiK	1.93	1.00	0.0161	0.9450	0.8819	1.0023
P K	0.50	0.23	0.0042	0.9128	0.9243	1.0038
S K	1.10	0.50	0.0099	0.9369	0.9598	1.0054
ClK	0.67	0.27	0.0059	0.8967	0.9788	1.0083
CaK	8.27	2.99	0.0766	0.9184	1.0085	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkqd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	302.52	2.94	0.58	102.90
O K	115.05	4.69	0.97	24.53
NaK	52.93	10.29	1.62	5.14
MgK	8.98	10.36	6.07	0.87
AlK	35.00	9.32	2.09	3.76
SiK	43.65	9.66	1.82	4.52
P K	10.12	10.64	5.54	0.95
S K	22.04	9.44	2.90	2.33
ClK	11.95	8.12	4.44	1.47
CaK	109.47	6.69	1.01	16.36



D IC og ICP

D.1 IC oprindelig aske

		Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3	Gennemsnit	Standard afvigelse	Andel af prøve [%]
	afvejet [g]	10,050	10,070	10,170			
	vand [mL]	50,00	50,00	50,00			
Cl	mg/L	62781,335	63663,646	66653,161	64366,047		
	mg/kg	312344,950	316105,492	327694,989	318715,144	8000,85	31,87
NO3	mg/L	5,731	5,236	22,221	11,063		
	mg/kg	28,514	25,998	109,249	54,587	47,36	0,01
SO4	mg/L	4854,961	4829,900	4929,673	4871,512		
	mg/kg	24154,036	23981,631	24236,348	24124,005	129,99	2,41
I alt	mg/L	67642,028	68498,782	71605,055	69248,622		
	mg/kg	336527,500	340113,121	352040,586	342893,736	8121,75	34,29

D.2 IC vasket aske

		Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3	Gennemsnit	Standard afvigelse	Andel af prøve [%]
	afvejet [g]	10,0	10,0	10,0			
	vand [mL]	50,00	50,00	50,00			
Cl	mg/L	3587,804	1002,644	982,849	1857,766		
	mg/kg	17939,020	5013,221	4914,246	9288,829	7491,45	0,93
NO3	mg/L	0,173	0,495	0,956	0,541		
	mg/kg	0,863	2,473	4,778	2,705	1,97	0,00
SO4	mg/L	688,555	10,900	11,345	236,934		
	mg/kg	3442,774	54,502	56,726	1184,668	1955,58	0,12
I alt	mg/L	4276,531	1014,039	995,150	2095,240		
	mg/kg	21382,657	5070,196	4975,750	10476,201	9445,39	1,05

D.3 ICP oprindelig aske

		Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3	Gennemsnit	Standard afvigelse	Andel af prøve [%]
	Aske [g]	1,0264	1,0006	1,0149			
	Væske [mL]	100,00	100,00	100,00			
Al	mg/L	159,867	158,609	146,661	155,046		
	mg/kg	15575,507	15452,942	14288,874	15105,774	710,11	1,51
Ca	mg/L	1105,890	1099,140	1022,180	1075,737		
	mg/kg	107744,544	107086,906	99588,854	104806,768	4530,79	10,48
Cd	mg/L	1,319	1,315	1,346	1,327		
	mg/kg	128,493	128,081	131,157	129,244	1,67	0,01
Cr	mg/L	1,060	1,054	1,067	1,060		
	mg/kg	103,231	102,674	103,909	103,271	0,62	0,01
Cu	mg/L	16,253	16,326	15,271	15,950		
	mg/kg	1583,525	1590,608	1487,831	1553,988	57,40	0,16
Fe	mg/L	68,848	71,718	64,880	68,482		
	mg/kg	6707,697	6987,373	6321,132	6672,067	334,55	0,67
K	mg/L	562,175	557,739	529,969	549,961		
	mg/kg	54771,532	54339,341	51633,769	53581,547	1700,61	5,36
Mg	mg/L	66,631	66,774	62,170	65,192		
	mg/kg	6491,670	6505,661	6057,083	6351,471	255,04	0,64
Na	mg/L	1596,920	1635,560	1513,410	1581,963		
	mg/kg	155584,567	159349,182	147448,363	154127,371	6082,76	15,41
Ni	mg/L	0,250	0,241	0,245	0,245		
	mg/kg	24,320	23,484	23,835	23,879	0,42	0,00
P	mg/L	71,559	71,561	65,373	69,498		
	mg/kg	6971,882	6972,028	6369,174	6771,028	348,02	0,68
Pb	mg/L	65,954	67,106	62,556	65,205		
	mg/kg	6425,750	6538,026	6094,680	6352,819	230,50	0,64
Zn	mg/L	297,871	300,833	281,070	293,258		
	mg/kg	29020,947	29309,528	27384,061	28571,512	1038,44	2,86
I alt	mg/L	4014,596	4047,976	3766,197	3942,923		
	mg/kg	391133,664	394385,835	366932,722	384150,740	14999,64	38,42

D.4 ICP vasket aske

		Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3	Gennemsnit	Standard afvigelse	Andel af prøve [%]
	Aske [g]	1,0051	1,0076	1,0029			
	Væske [mL]	100,00	100,00	100,00			
Al	mg/L	377,807	359,846	363,716	367,123		
	mg/kg	37588,996	35713,180	36266,427	36522,868	963,84	3,65
Ca	mg/L	3052,800	2926,330	2822,450	2933,860		
	mg/kg	303730,972	290425,764	281428,856	291861,864	11220,20	29,19
Cd	mg/L	3,118	3,055	3,039	3,071		
	mg/kg	310,206	303,204	303,022	305,477	4,10	0,03
Cr	mg/L	2,080	2,033	2,055	2,056		
	mg/kg	206,942	201,729	204,865	204,512	2,62	0,02
Cu	mg/L	35,468	33,811	33,689	34,323		
	mg/kg	3528,833	3355,568	3359,188	3414,530	99,01	0,34
Fe	mg/L	151,764	144,733	141,333	145,943		
	mg/kg	15099,393	14364,133	14092,432	14518,653	520,96	1,45
K	mg/L	59,336	57,286	59,001	58,541		
	mg/kg	5903,482	5685,351	5882,989	5823,941	120,46	0,58
Na	mg/L	201,675	188,399	195,647	195,240		
	mg/kg	20065,168	18697,797	19508,126	19423,697	687,58	1,94
Ni	mg/L	0,600	0,584	0,585	0,590		
	mg/kg	59,679	57,992	58,285	58,652	0,90	0,01
P	mg/L	142,043	138,233	135,967	138,748		
	mg/kg	14132,226	13719,035	13557,384	13802,882	296,45	1,38
Pb	mg/L	169,790	163,521	157,438	163,583		
	mg/kg	16892,846	16228,761	15698,275	16273,294	598,53	1,63
Zn	mg/L	808,701	772,218	741,351	774,090		
	mg/kg	80459,755	76639,341	73920,730	77006,609	3284,95	7,70
I alt	mg/L	5005,182	4790,048	4656,270	4817,167		
	mg/kg	497978,498	475391,854	464280,580	479216,977	17171,52	47,92

D.5 Forhold mellem salte og metaller

		mg/L	% af prøven
Oprindelig aske	Metaller	3942,92	38,42
	Salte	69248,62	34,29
	Andet	926808,46	27,30
Vasket aske	Metaller	4817,17	47,92
	Salte	2095,24	1,05
	Andet	993087,59	51,03

E Densitet og porøsitet

	m_0 [kg]	m_u [kg]	m_{ov} [kg]	ρ_w [$\frac{kg}{m^3}$]	V [m^3]	ρ_{ssd} [$\frac{kg}{m^3}$]	ρ_d [$\frac{kg}{m^3}$]	$V_{\bar{a}}$ [m^3]	$p_{\bar{a}}$ [-]
B14-1	0,53459	0,32942	0,58948	998	2,61E-04	2262,174	2051,530	5,500E-05	0,2111
B14-2	0,51663	0,31944	0,57199	998	2,53E-04	2260,329	2041,563	5,547E-05	0,2192
B14-3	0,53097	0,32754	0,58654	998	2,60E-04	2260,104	2045,977	5,568E-05	0,2146
Gennemsnit						2260,869	2046,357	5,538E-05	0,2149
Afvigelse						1,136	4,994	3,49E-07	0,0041
Ref-1	0,25886	0,16074	0,28367	998	1,23E-04	2302,958	2101,540	2,486E-05	0,2018
Ref-2	0,25698	0,15955	0,28173	998	1,22E-04	2301,248	2099,084	2,480E-05	0,2026
Ref-3	0,25771	0,16008	0,28218	998	1,22E-04	2306,434	2106,426	2,452E-05	0,2004
Gennemsnit						2303,547	2102,350	2,473E-05	0,2016
Afvigelse						2,643	3,737	1,818E-07	0,0011

F Kapillarsugning

F.1 B14 prøver

		1. B14-1		2. B14-2		3. B14-2			
		A [m^2]		0,00162806		0,00162408		0,00165222	
tid	\sqrt{tid}	masse	Q	masse	Q	masse	Q		
[min]	[\sqrt{sek}]	[kg]	[$\frac{kg}{m^2}$]	[kg]	[$\frac{kg}{m^2}$]	[kg]	[$\frac{kg}{m^2}$]		
0	0	0,52931	0,00	0,53037	0,00	0,53205	0,00		
1	8	0,53008	0,18	0,53122	0,52	0,53270	0,39		
2	11	0,53038	0,66	0,53154	0,72	0,53304	0,60		
4	15	0,53070	0,85	0,53216	1,10	0,53341	0,82		
8	22	0,53115	1,13	0,53280	1,50	0,53381	1,07		
16	31	0,53187	1,57	0,53343	1,88	0,53466	1,58		
32	44	0,53275	2,11	0,53419	2,35	0,53530	1,97		
60	60	0,53387	2,80	0,53539	3,09	0,53635	2,60		
120	85	0,53521	3,62	0,53663	3,85	0,53771	3,43		
240	120	0,53677	4,58	0,53803	4,72	0,53909	4,26		

F.2 Ref14 prøver

		1. Ref14-1		2. Ref14-2		3. Ref14-2			
		A [m^2]		0,00162806		0,00162408		0,00165222	
tid	\sqrt{tid}	masse	Q	masse	Q	masse	Q		
[min]	[\sqrt{sek}]	[kg]	[$\frac{kg}{m^2}$]	[kg]	[$\frac{kg}{m^2}$]	[kg]	[$\frac{kg}{m^2}$]		
0	0	0,25771	0,00	0,25698	0,00	0,25886	0,00		
1	8	0,25840	0,43	0,25747	0,31	0,25956	0,43		
4	15	0,25850	0,49	0,25767	0,44	0,25971	0,52		
8	22	0,25868	0,61	0,25775	0,49	0,25983	0,60		
16	31	0,25898	0,79	0,25803	0,67	0,26018	0,81		
32	44	0,25956	1,15	0,25845	0,94	0,26073	1,15		
60	60	0,26035	1,65	0,25909	1,34	0,26155	1,66		
120	85	0,26164	2,45	0,26018	2,04	0,26280	2,43		
240	120	0,26386	3,84	0,26196	3,17	0,26469	3,60		

G Mørtelprøver

Trykresultater i kN er omregnet til MPa ved følgende formel

$$X[MPa] = \frac{X[kN] * 1000}{1600mm^2} \quad (G.0.1)$$

G.1 Reference

Oversigt over hvilke projektgrupper der har udført de forskellige referencer.

	Studerende	Projektperiode	Prøver
Gruppe B	Asger B. Carlsen Søren R. Petersen	2012 September - Januar	Ref 28.1-3; Ref 48.1-3
Gruppe C	Katarina Lyngholm	2012 September - Januar	Ref 7.4-6 Ref 14.4-6 Ref 28.4-6 Ref 48.4-6
Gruppe E	Marlene W. Hansen Randi J. Olsen	2012 September - Januar	Ref 7.1-3; Ref 14.1-3
Gruppe F	Sabine Svendsen Liv Rosenmai	2012 Februar - Juli	Ref 7.7-9 Ref 14.7-9 Ref 28.7-9 Ref 42.7-9

Blandingsforhold			
Navn	Cement [g]	Sand [g]	Vand [g]
Ref7.1			
Ref7.2	450,77	1350,1	225,05
Ref7.3			
Ref14.1			
Ref14.2	450,01	1349,9	225,01
Ref14.3			

G.1.1 Ref7

Prøve	Dimensioner						Egenskaber					
	Vægt [g]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Længde [mm]	Rumfang [cm ³]	Densitet [$\frac{kg}{m^3}$]	Tryktest [kN]	Tryktest [MPa]	Gns. [MPa]	Afv. [%]	Nyt Gns. [MPa]	Ny Afv. [%]
Ref 7.1	589,0	39,9	40,9	160,0	261	2256	104	65		-10,0		-5,5
							104	65		-10,0		-5,5
Ref 7.2	590,9	40,0	40,8	160,0	261	2263	92	58	59,1	2,7	61,6	6,7
							94	59		0,6		4,7
Ref 7.3	584,2	39,9	40,6	160,1	259	2253	74	46		21,7		-
							99	62		-4,7		-0,4
Ref 7.4	586	40,3	40	160,6	259	2264	96	60		-2,4		1,2
							77	48		17,9		-
Ref 7.5	588	39,9	40	160,8	257	2291	97	61	58,6	-3,5	60,8	0,2
							97	61		-3,5		0,2
Ref 7.6	578	40,2	39,4	161	255	2267	99	62		-5,6		-1,9
							97	61		-3,5		0,2
Ref 7.7	581	40	40	161	258	2255	92	58		0,7		
							98	61		-5,8		
Ref 7.8	578	40	40	162	259	2230	92	58	57,9	0,7		
							96	60		-3,6		
Ref 7.9	574	40	40	161	258	2228	85	53		8,2		
							93	58		-0,4		

G.1.2 Ref14

Prøve	Dimensioner						Egenskaber					
	Vægt [g]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Længde [mm]	Rumfang [cm ³]	Densitet [$\frac{kg}{m^3}$]	Tryktest [kN]	Tryktest [MPa]	Gns. [MPa]	Afv. [%]	Nyt Gns. [MPa]	Ny Afv. [%]
Ref 14.1	589,1	39,9	40,8	159,8	260	2265	111 112	69 70		-0,3 -1,2		
Ref 14.2	584,1	39,9	40,5	160,2	259	2256	106 115	66 72	69,2	4,3 -3,9		
Ref 14.3	589,8	40,0	40,7	160,7	262	2254	112 108	70 68		-1,2 2,5		
Ref 14.4	606	41,03	40,38	162	268	2258	113 116	71 73		-1,9 -4,6		
Ref 14.5	591	40,5	40,24	162	264	2239	107 104	67 65	69,3	3,5 6,2		
Ref 14.6	597	40,64	40,14	161,1	263	2272	110 115	69 72		0,8 -3,7		
Ref 14.7	540	40	40	160	256	2109	101 81	63 51		-4,3 16,3		-1 -
Ref 14.8	527	40	40	161	258	2046	98 93	61 58	60,5	-1,2 3,9	62,5	2 7
Ref 14.9	584	40	40	161	258	2267	103 105	64 66		-6,4 -8,5		-3 -5

G.1.3 Ref28

Prøve	Dimensioner						Egenskaber					
	Vægt [g]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Længde [mm]	Rumfang [cm ³]	Densitet [$\frac{kg}{m^3}$]	Tryktest [kN]	Gns. [MPa]	Afv. [%]	Nyt Gns. [MPa]	Ny Afv. [%]	
Ref 28.1	562,2	39,8	39,7	160,6	253	2219	112 99	70 62	-15,1 -1,8		- -1,3	
Ref 28.2	567,2	40,7	39,9	160,1	260	2183	107 97	67 61	-10,0 0,3	61,1	-9,5 0,8	
Ref 28.3	567,9	40,0	40,4	159,7	258	2201	81 88	51 55	16,7 9,5		- 9,97	
Ref 28.4	591	40,19	40	161	259	2283	125 124	78 78	-2,4 -1,6		0 0,8	
Ref 28.5	589	40,06	40,06	161,1	259	2278	123 126	77 79	-0,8 -3,2	78,1	1,6 -0,8	
Ref 28.6	591	40,2	39,98	161	259	2284	127 107	79 67	-4,0 12,4		-1,6 -	
Ref 28.7	582	40	40	161	258	2259	114 89	71 56	-6,8 16,6		-3,4 -	
Ref 28.8	584	40	40	161	258	2267	108 112	68 70	-1,2 -4,9	68,9	2,0 -1,6	
Ref 28.9	581	40	40	160	256	2270	111 106	69 66	-4,0 0,7		-0,7 3,8	

G.1.4 Ref42

Prøve	Dimensioner						Egenskaber					
	Vægt [g]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Længde [mm]	Rumfang [cm ³]	Densitet [$\frac{kg}{m^3}$]	Tryktest [kN]	Tryktest [MPa]	Gns. [MPa]	Afv. [%]	Nyt Gns. [MPa]	Ny Afv. [%]
Ref 42.1	568,9	40,2	39,6	162,8	259	2195	94	59		9,3		5,1
							93	58		10,3		-
Ref 42.2	569,7	40,1	39,6	162,4	258	2209	115	72	64,8	-10,9	61,9	-
							117	73		-12,8		-
Ref 42.3	575,8	40,1	40,1	162,5	261	2204	104	65		-0,3		-5,0
							99	62		4,5		0,0
Ref 42.4	597	40,61	40,15	161	263	2274	125	78		-4,3		-2,1
							107	67		10,7		-
Ref 42.5	596	40,7	40,21	161,1	264	2261	122	76		-1,8	76,5	0,3
							119	74	74,9	0,7		2,8
Ref 42.6	589	40,1	40,15	161,5	260	2265	128	80		-6,8		-4,6
							118	74		1,5		3,6
Ref 42.7	584	40,5	40	162	262	2225	117	73		-10,4		-
							113	71		-6,6		-6,6
Ref 42.8	578	41	40	160	262	2203	84	53		20,8	66,3	-
							99	62	66,3	6,6		6,6
Ref 42.9	586	40	40	161	258	2275	117	73		-10,4		-
							106	66		0,0		0,0

G.2 A-prøver

Blandingsforhold				
Navn	Aske [g]	Cement [g]	Sand [g]	Vand [g]
A7.1	22,5	427,6	1350,3	225,1
A7.2				
A7.3				
A14.1	22,5	427,5	1350,5	225,2
A14.2				
A14.3				
A14.4	22,6	427,8	1350,1	225,1
A14.5				
A14.6				
A14V.1	22,8	427,6	1350,5	225,5
A14V.2				
A14V.3				
A28.1	22,5	427,9	1350,1	225,2
A28.2				
A28.3				
A42.1	22,6	428,0	1350,4	225,1
A42.2				
A42.3				

G.2.1 A14

* Trykket fra toppen

Navn	Dimensioner							Egenskaber			
	Vægt [g]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Længde [mm]	Rumfang [cm ³]	Densitet [$\frac{kg}{m^3}$]	Ultralød [10 ⁶ sek]	Tryktest [kN]	Tryktest [MPa]	Gennemsnit [MPa]	Afvigelse [%]
A14.1	587,2	40,0	40,7	160,4	261	2249	-	112	70		-0,3
A14.2	583,2	40,1	40,2	160,9	259	2249	-	114	71	69,8	-2,1
A14.3	588,6	40,0	40,6	160,6	261	2257	-	115	72		-3,0
A14.4	596,7	40,1	40,9	162,0	266	2246	38	113	71		-1,2
A14.5	593,2	40,1	40,7	162,0	264	2244	43,3	111	69		0,6
A14.6	594,8	40,2	40,8	162,0	266	2239	42,7	105	66		6,0
A14V.1	590,4	40,1	41,0	161,4	265	2225	-	82	51		-14,4
A14V.2	577,6	40,2	40,4	161,7	263	2200	-	57	36	44,8	20,5
A14V.3	569,8	40,2	39,4	161,4	256	2229	-	88	55		-22,8
								60	38		16,3
								116	73	65,0	-11,5
								92	58		11,5
								62	39		2,4
								58	36	39,7	8,7
								67	42		-5,5
								67	42		-5,5
								100	62,5	62,5	0
								100	62,5		0

* * * * * * * *

G.2.2 A7 A28 og A42

"OBS" Afgivelse er større end 10 %. Der er regnet nyt gennemsnit på næste side

Navn	Dimensioner						Egenskaber					
	Vægt [g]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Længde [mm]	Rumfang [cm ³]	Densitet [$\frac{kg}{m^3}$]	Ultral lyd [10 ⁻⁶ sek]	Tryktest [kN]	Tryktest [Mpa]	Gns. [Mpa]	Afv. [%]	
A7.1	586,7	40,0	40,7	160,9	262	2240	37,1	106	66		-4,8	
A7.2	589,4	40,1	40,8	160,7	263	2242	37,3	100	63	63,2	1,1	
A7.3	589,2	40,1	40,7	160,8	262	2245	36,7	110	69		-8,8	
A28.1	590,1	40,1	40,9	160,4	263	2243	-	109	68		-7,8	
A28.2	595,0	40,2	41,3	160,3	266	2236	-	93	58		8,0	
A28.3	582,3	40,1	40,3	160,3	259	2248	-	89	56		12,0	
A42.1	589,5	40,1	40,6	160,2	261	2262	-	114	71		1,0	
A42.2	583,9	40,1	40,4	160,6	260	2242	-	119	74		-3,3	
A42.3	584,3	40,2	40,5	160,3	261	2242	-	111	69	72,0	3,6	
								116	73		-0,7	
								115	72		0,2	
								116	73		-0,7	
								130	81		-9,2	
								111	69	74,4	6,8	
								109	68		8,4	
								116	73		2,6	
								126	79		-5,8	
								122	76		-2,5	

OBS

Navn	Tryk [MPa]	1. Gns. [MPa]	1. Afv [%]	2. Gns. [MPa]	2. Afv. [%]	3. Gns. [MPa]	3. Afv. [%]
A7.1	66 63	63,23	-4,8 1,1	64,75	-2,3 3,5	66,41	0,2 5,9
A7.2	69 68		-8,8 -7,8		-6,2 -5,2		-3,5 -2,6
A7.3	58 56		8,0 12,0		10,2 -		- -

G.3 B-prøver

Blandingsforhold								
Navn	Aske [g]	Cement [g]	Sand [g]	Vand [g]				
B7.1 B7.2 B7.3	45,07	405,25	1350,68	225,02				
B14.1 B14.2 B14.3					45,35	405,08	1350,16	225,01
B14.4 B14.5 B14.6								
B14.7 B14.8 B14.9	45,3	405,6	1350	225,9				
B14V.1 B14V.2 B14V.3					45	405,2	1350,5	225
B28.1 B28.2 B28.3								
B42.1 B42.2 B42.3	45,3	404,98	1350,2	225,2				

G.3.1 B14

* Trykket fra toppen

Navn	Dimensioner							Egenskaber				Afvigelse [%]
	Vægt [g]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Længde [mm]	Rumfang [cm ³]	Densitet [$\frac{kg}{m^3}$]	Ultralød [10 ⁶ sek]	Tryktest [kN]	Tryktest [MPa]	Gennemsnit [MPa]		
B14.1	589,04	40,1	41	160,9	265	2227	-	95	59	61,9	4,1	
B14.2	589,65	40,1	41,1	161	265	2222	-	95	59		4,1	
B14.3	591,82	40,2	41,2	160,8	266	2222	-	101	63	61,9	-2,0	
B14.4	603	40,6	40,6	163,9	270	2232	42	98	61		1,1	
B14.5	597,1	40	41	163,3	268	2230	41,2	102	64	43,2	-3,0	
B14.6	595,4	39,9	40,9	163,2	266	2236	45,3	103	64		-4,0	
B14.7	581,2	40,1	40,8	160	262	2220	37,9	71	44	43,2	-2,7	
B14.8	584,02	40,2	40,6	160,7	262	2227	38,2	71	44		-2,7	
B14.9	581,27	40,1	40,7	160,5	262	2219	39,9	67	42	45,2	3,1	
B14V.1	580,52	39,9	40,7	160,1	260	2233	41,1	67	42		3,1	
B14V.2	580,06	40	40,8	160,1	261	2220	43	74	46	45,2	-7,1	
B14V.3	582,87	40	40,8	160,5	262	2225	46,9	65	41		6,0	
								78	49	45,2	-7,9	
								64	40		11,5	
								73	46	59,7	-0,9	
								74	46		-2,3	
								94	59	43,4	1,6	
								97	61		-1,5	
								72	45	43,4	-3,7	
								75	47		-8,0	
								76	48	67,8	-9,4	
								55	34		20,8	
								107	67	67,8	1,4	
								110	69		-1,4	

G.3.2 B7 B28 og B42

"OBS" Afgivelse er større end 10 %. Der er regnet nyt gennemsnit på næste side

Navn	Dimensioner						Egenskaber				Afgivelse [%]
	Vægt [g]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Længde [mm]	Rumfang [cm ³]	Densitet [$\frac{kg}{m^3}$]	Ultralyd [10 ⁶ sek]	Tryktest [kN]	Tryktest [MPa]	Gennemsnit [MPa]	
B7.1	581,8	40,0	40,8	160,4	262	2223	38,2	93	58		-0,7
B7.2	581,5	39,9	40,4	160,7	259	2245	39,1	91	57	57,6	1,4
								91	57		1,4
B7.3	584,0	40,0	40,6	160,1	260	2246	38,4	96	60		-4,0
								91	57		1,4
B28.1	585,24	40	40,9	160,5	263	2229	-	110	69		-3,1
								110	69		-3,1
B28.2	574,45	40	40,2	160,4	258	2227	-	99	62	66,7	7,2
								106	66		0,7
B28.3	586,09	40,1	40,8	160,9	263	2226	-	105	66		1,6
								110	69		-3,1
B42.1	587,74	40,02	40,86	160,8	263	2235	-	117	73		-9,1
								115	72		-7,3
B42.2	587,48	40,09	40,85	160,2	262	2239	-	112	70	67,0	-4,5
								111	69		-3,5
B42.3	584,3	40,02	40,96	160,4	263	2222	-	97	61		9,5
								91	57		15,1

OBS

Navn	Tryk [MPa]	1. Gns. [MPa]	1. Afv [%]	2. Gns. [MPa]	2. Afv. [%]	3. Gns. [MPa]	3. Afv. [%]
B42.1	73	67,0	-9,1	69,0	-6,0	71,1	-2,8
	72		-7,3		-4,2		-1,1
B42.2	70		-4,5		-1,4		1,5
	69		-3,5		-0,5		2,4
B42.3	61		9,5		12,1		-
	57		15,1		-		-

G.4 C-prøver

Blandingsforhold				
Navn	Aske [g]	Cement [g]	Sand [g]	Vand [g]
C14.1	90,1	360,8	1350,4	225,5
C14.2				
C14.3				
C14V.1	90	360,1	1350,2	252,4
C14V.2				
C14V.3				

* Trykket fra toppen

Ujævn mørtelende fordi den prøven smuldrede ved afformning

– Prøve smuldret under trykprøvning

Navn	Dimensioner						Egenskaber				
	Vægt [g]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Længde [mm]	Rumfang [cm ³]	Densitet [$\frac{kg}{m^3}$]	Ultralød [10 ⁶ sek]	Tryktest [kN]	Tryktest [MPa]	Gennemsnit [MPa]	Afvigelse [%]
C14.1	583,5	40,0	42,8	161,0	276	2117	41,5	46	29	30,0	4,2
C14.2	583,1	40,0	42,9	160,9	276	2112	48,5	-	-		-
C14.3	579,2	39,9	42,7	160,8	274	2114	44,5	46	29		4,2
C14V.1	561,9	40,2	40,8	160,8	264	2130	50,7 #	75	47	46,7	-0,4
C14V.2	563,9	40,0	40,9	160,5	263	2148	49,8 #	73	46		2,3
C14V.3	564,5	40,1	40,9	160,5	263	2144	46,5 #	47	29	31,5	-1,7
								55	34		6,7
								49	31		-9,1
											2,8

* * *

* * *

G.5 D-prøver

Blandingsforhold				
Navn	Aske [g]	Cement [g]	Sand [g]	Vand [g]
D14.1	135,1	450,3	1215,5	237,8
D14.2				
D14.3				
D14V.1	132,4	450,8	1216,6	295,4
D14V.2				
D14V.3				

* Trykket fra toppen

– Prøve smuldret under trykprøvning

Navn	Dimensioner					Egenskaber					
	Vægt [g]	Bredde [mm]	Højde [mm]	Længde [mm]	Rumfang [cm ³]	Densitet [$\frac{kg}{m^3}$]	Ultralyd [10 ⁶ sek]	Tryktest [kN]	Tryktest [MPa]	Gennemsnit [MPa]	Afvigelse [%]
D14.1	563,1	40,0	41,5	160,0	266	2120	47,0	-	-		-
								-	-		-
D14.2	579,5	39,9	42,3	160,1	270	2144	50,0	59	37	37,8	2,4
								61	38		-0,9
D14.3	577,4	40,1	41,8	160,1	268	2151	47,9	62	39		-2,5
								60	38		0,8
D14V.1	576,5	40,0	42,0	159,8	268	2147	47,3	51	32	38,4	17,0
								72	45		-17,2
D14V.2	570,4	40,1	41,7	159,9	267	2133	45,2	69	43		2,9
								Fejl	Fejl	44,4	Fejl
D14V.3	569,8	39,7	41,7	159,9	265	2153	47,6	69	43		2,9
								75	47		-5,6

* *

* *

G.6 T-test: top vs. side

Trykstyrke		
	Top	Side
	MPa	MPa
A14	44,8	68,8
A14V	39,7	62,5
B14	44,0	61,3
B14V	43,4	67,8
C14	-	30,0
C14V	31,5	46,7
D14	-	37,8
D14V	38,4	44,4

Dobbeltsidet parret T-test

P =	0,00147
-----	---------

G.7 T-test: 42-døgns prøver

Trykstyrke		
Ref	A	B
MPa	MPa	MPa
59	37	73
65	41	72
62	39	70
78	49	69
76	48	
74	46	
80		
74		
71		
62		
66		

Dobbeltsidet T-test

Ref vs. A	P =	1,09E-06
Ref vs. B	P =	0,721

G.8 T-test: Oprindelig vs. vasket

Trykstyrke

	Oprindelig MPa	Vasket MPa
A	69	63
B	61	68
C	30	47
D	38	44

Dobbeltsidet paret T-test

P=	0,301
----	-------

G.9 Resultatoversigt

	Gennemsnit MPa	Spredning MPa	Aktivitetstal %
Ref7	59,96	0,74	
Ref14	67,24	0,97	
Ref28	69,96	2,02	
Ref42	69,72	2,21	
A7	66,41	1,41	110,7
A14	68,59	1,75	102,0
A28	71,98	0,67	102,9
A42	74,38	2,14	106,7
A14V	62,50	0,00	92,9
B7	57,60	0,52	96,1
B14	61,33	0,77	91,2
B28	66,67	1,11	95,3
B42	71,09	0,86	102,0
B14V	67,81	0,94	100,8
C14	30,00	1,25	44,6
C14V	46,67	0,55	69,4
D14	37,81	0,40	56,2
D14V	44,38	1,08	66,0

H Vicatforsøg

H.1 Ref, A og AV

		Ref	A	AV
	Cement	150,1	142,5	142,5
	Aske	-	7,5	7,6
	Sand	450,1	450,2	450,0
	Vand	75,1	75,1	75,0
Dato	Ekstra vand	-	-	-
10-01-2013	Zero time	14:39	14:53	15:06
	15:40	0	0	0
	16:40	0	0	0
11-01-2013	08:25	AFFORMES	34	31
	09:34		38	36
	09:44		38	25
	10:14		39	28
	10:44		39	29,5
	11:14		40	34,5
	11:44			31
	12:44		AFFORMES	35,5
	13:44			37,5
	14:14			39
	14:44			39
	15:14			41
	15:44			41
	16:14			42
	17:14			
	18:14			AFFORMES

H.2 B og BV

		B	BV
Dato	Cement	135	135
	Aske	15	15
	Sand	450	450
	Vand	75	75
16-01-2013	Zero time	08:44	08:57
17-01-2013	10:00	0	0
	11:00	0	7,5
	12:00	1	19
	13:00	8	22,5
	14:00	5	18
	15:00	9	25
	08:00	30	35
	09:00	31	39
	09:30	32	37
	10:00	35	38
	10:30	36	39
	11:00	38	39,5
	11:30	37	40
	12:00	37,5	
	12:30	38	
	13:00	39	
	13:30	39	
14:00	39		
14:30	40		
18-01-2013	08:00	Afformes	Afformes

H.3 C, CV, D og DV

		C	CV	D	DV
	Cement	120	120	150	150
	Aske	30	30	45	45
	Sand	450	450	405	405
	Vand	75	75	79	75
Dato	Ekstra vand		10		18
11-01-2013	Zero time	16:07	16:23	16:36	16:51
14-01-2013	08:25	31	33	33	40
	09:25	35	38,5	36,5	40
	09:55	34,5	38,5	38	
	10:55	37	38	38,5	
	11:55	37	37,5	39	
	12:55	37,5	37,5	39	
	13:55	40	39	39	
	14:55		40	40	
15-01-2013	17:00	Afformes			
16-01-2013	10:30		Afformes		Afformes
17-01-2013	17:00			Afformes	

I Udvaskning af knust mørtel

ICP knust mørtel				
		Reference	A14	B14
	afvejet [g]	20,05	20,01	20,02
	mL målekolbe	40	40	40
Al	mg/L	1,025	0,209	0,186
	mg/kg	2,044	0,418	0,371
Ca	mg/L	689,741	754,471	681,097
	mg/kg	1376,042	1508,188	1360,833
Cd	mg/L	0,000	0,000	0,000
	mg/kg	0,000	0,000	0,000
Cr	mg/L	0,027	0,032	0,029
	mg/kg	0,055	0,064	0,057
Cu	mg/L	0,013	0,009	0,012
	mg/kg	0,025	0,018	0,024
Fe	mg/L	0,081	0,079	0,085
	mg/kg	0,161	0,157	0,170
K	mg/L	360,414	280,389	368,002
	mg/kg	719,030	560,498	735,269
Mg	mg/L	0,374	0,055	0,029
	mg/kg	0,746	0,110	0,057
Na	mg/L	147,040	535,838	900,412
	mg/kg	293,347	1071,140	1799,025
Ni	mg/L	0,000	0,000	0,000
	mg/kg	0,000	0,000	0,000
Pb	mg/L	0,007	0,036	0,080
	mg/kg	0,013	0,073	0,160
Zn	mg/L	0,040	0,020	0,021
	mg/kg	0,079	0,040	0,043
I alt	mg/L	1198,761	1571,138	1949,953
	mg/kg	2391,543	3140,706	3896,010

J Aktivitetsfaktor

J.1 Reference

Udregning af K-værdierne for henholdsvis 7, 14 og 28 døgns mørtelprøver.

```
Ref 7 dogn:
> restart;with(LinearAlgebra):
> f:=60.1;
f:= 60.1 (1)
> alpha:=0.6;
α := 0.6 (2)
> V:=225;
V:= 225 (3)
> C:=450;
C:= 450 (4)
> K:=f/(1/(V/C)-alpha);
K := 42.92857143 (5)

Ref 14 dogn:
> restart;with(LinearAlgebra):
> f:=67;
f:= 67 (6)
> alpha:=0.567;
α := 0.567 (7)
> V:=225;
V:= 225 (8)
> C:=450;
C:= 450 (9)
> K:=f/(1/(V/C)-alpha);
K := 46.75505932 (10)

Ref 28 dogn:
> restart;with(LinearAlgebra):
> f:=69.367;
f:= 69.367 (11)
> alpha:=0.5;
α := 0.5 (12)
> V:=225;
V:= 225 (13)
> C:=450;
C:= 450 (14)
> K:=f/(1/(V/C)-alpha);
K := 46.24466667 (15)
```

J.2 A-prøver

Udregning af Aktivitetsfaktoren for A-prøverne ved hjælp af K-værdierne for mørtel.

```

A7 døgn:
> restart;with(LinearAlgebra):
> K:=42.93;
K := 42.93 (1)
> alpha:=0.5;
α := 0.5 (2)
> V:=225;
V := 225 (3)
> C:=427.5;
C := 427.5 (4)
> p:=22.5;
p := 22.5 (5)
> f:=66.4;
f := 66.4 (6)
> k:=((alpha*K+f)*V-C*K)/(K*p);
k := 1.467039366 (7)

A14 døgn:
> restart;with(LinearAlgebra):
> K:=46.76;
K := 46.76 (8)
> alpha:=0.5;
α := 0.5 (9)
> V:=225;
V := 225 (10)
> C:=427.5;
C := 427.5 (11)
> p:=22.5;
p := 22.5 (12)
> f:=67.4;
f := 67.4 (13)
> k:=((alpha*K+f)*V-C*K)/(K*p);
k := 0.4140290847 (14)

A28 døgn:
> restart;with(LinearAlgebra):
> K:=46.25;
K := 46.25 (15)
> alpha:=0.5;
α := 0.5 (16)
> V:=225;
V := 225 (17)
> C:=427.5;
C := 427.5 (18)

```

J.3 B-prøver

Udregning af Aktivitetsfaktoren for B-prøverne ved hjælp af K-værdierne for mørtel.

```

B7 døgn:
> restart;with(LinearAlgebra):
> K:=42.93;
K := 42.93 (1)
> alpha:=0.5;
α := 0.5 (2)
> V:=225;
V := 225 (3)
> C:=405;
C := 405 (4)
> p:=45;
p := 45 (5)
> f:=57.6;
f := 57.6 (6)
> k:= (alpha*K+f)*V-C*K / (K*p);
k := 0.2085953878 (7)

B14 døgn:
> restart;with(LinearAlgebra):
> K:=46.76;
K := 46.76 (8)
> alpha:=0.5;
α := 0.5 (9)
> V:=225;
V := 225 (10)
> C:=405;
C := 405 (11)
> p:=45;
p := 45 (12)
> f:=60.8;
f := 60.8 (13)
> k:= (alpha*K+f)*V-C*K / (K*p);
k := 0.001283147990 (14)

B28 døgn:
> restart;with(LinearAlgebra):
> K:=46.25;
K := 46.25 (15)
> alpha:=0.5;
α := 0.5 (16)
> V:=225;
V := 225 (17)
> C:=405;
C := 405 (18)

```

K Affald på Sisimiut

Flyveaske

Sisimiut: 5460 mennesker		År	Måned	Dag
Affald, by	[kg]	2823529	235294	7843
Affald, pr. person	[kg]	517	43	1,4
Flyveaske, by	[kg]	48000	4000	133
Flyveaske, pr. person	[kg]	8,8	0,73	0,02

Flyveaske

Danmark: 5,6 mio. mennesker		År	Måned	Dag
Flyveaske, DK	[kg]	400000000	33333333	1095890
Flyveaske, pr. person	[kg]	71,43	5,95	0,20

Beton

Sisimiut		År	Måned	Dag
Flyveaske	[kg]	48000	4000	133
Cement pasta	[kg]	432000	36000	1200
Sand og sten	[kg]	1120000	93333	3111
Beton	[kg]	1600000	133333	4444