

Brug af aske i beton - nye problemer og nye muligheder

Anvendelse af bundaske fra halm og træ i beton



Anders Grøndahl Knudsen, s102947

Troels Stoklund Larsen, s102925

BEng

Department of Civil Engineering 2013

DTU Civil Engineering

Juni 2013

Brug af aske i beton - Nye Problemer og nye muligheder.

Anvendelse af bundaske fra halm og træ i beton

Troels Stoklund Larsen - s102925

Anders Grøndahl Knudsen - s102947

Indhold

1	Indledning	1
2	Teori	3
2.1	Betons egenskaber	3
2.2	Porøsitet	6
2.3	Hydratisering	6
2.4	Blaine	9
2.5	Afbindingstid	10
2.6	Varmeudvikling	10
3	Bearbejdning og forsøg	13
3.1	Forsøgsfremgang	13
3.2	Bearbejdning af komponenter	14
3.2.1	Vaskning af aske	14
3.2.2	Håndformaling af aske	14
3.2.3	Formaling af aske og cement ved ringk nusning	15
3.3	Forsøg med komponenter	15
3.3.1	Blaineværdi	15
3.3.2	Askeforsøg	15
3.3.3	Afbindingstid	16
3.4	Forsøg med mørtelrpvøer	16
3.4.1	Trykprøvning	16
3.4.2	Ultralyd	17
3.4.3	Porøsitet	17
3.4.4	Varmeudvikling	18
3.4.5	Afbindingstid	18
4	Resultater og diskussion	19
4.1	Aske	19
4.2	Mørtel	22
4.2.1	Test af mørtelprismer	22
4.2.2	Bolomey	32
4.2.3	Varmeudvikling og Afbindingstid	36
5	Konklusion	39
6	Fremtidig arbejde	41

7 Litteratur	43
Bilag	46
A Hård askeprøve	46
B Forsøgsplan	47
C Cement Chemist Notation (CCN)	48
D Resultater fra askeforsøg	49
E Ionindhold i asken	51
F Rådata af målinger for mørtelprøvninger	52
F.1 Screening	52
F.1.1 7-døgns prøver	52
F.2 Langtidsprøver	72
F.2.1 7-,14-,21-,28-,35-,42-døgns prøver	72
G Blaine-tal	85
G.1 Ubehandlet aske	85
G.2 Vasket og håndformalet aske	86
G.3 Formalet aske	87
G.4 Ubehandlet basiscement	88
G.5 Formalet basiscement	89
H Sammenhænge for ultralyd	90
H.1 35 døgns prøver	90
H.2 42 døgns prøver	92
I Styrketab og standardafvigelse for langtidsprøver	94
J Bolomey	95
K Varmedvikling og afbindingstid	96
L Måleresultater fra [Madsen og Fjelstrup, 2013]	99
M Forsøgsvejledninger	100
M.1 Metode 4, pH i 1 M KCl opslæmning	100
M.2 Metode 9, Vandindhold i Jord	101

M.3 Metode 11A, Oplukning af jordprøve efter [DS259, 2003]	102
M.4 Metode 16, Glødetab i jord	103
M.5 Vandopløselighed	104
M.6 Vandopløselige anioner	105

Forord

Denne rapport er udarbejdet som et bachelorprojekt i forårssemesteret 2013, under Institut for Byggeri og Anlæg, DTU. Projektet er vurderet til 30 ECTS-points.

Projektet forsøger at belyse muligheden for anvendelse af en bundaske fra afbrænding af halm- og træpiller, til produktion af beton. Bundasken anses pt. for at være et affaldsprodukt og deponeres derfor.

Rapporten er skrevet i perioden 4. februar 2013 til 14. juni samme år. Lektor MSK Lisbeth M. Ottosen har virket som hovedvejleder. Docent Per Goltermann og Fosker Pernille Erland Jensen har medvirket som supplerende vejledere.

Der skal ligeledes lyde en tak til hele Institut for Anlæg og Byggeri, da flere har været behjælpelige i mere eller mindre grad under projektets udførelse.

En tak går også til Lynettefællesskabet I/S for at vise gruppens dets nye forbrændingsanlæg og dermed processen fra materiale til aske. Sidst men ikke mindst, skal der også gå en tak ud til Vattenfall Amagerværket, som har indvilliget i at gøre dette projekt muligt.

Troels Stoklund Larsen, s102925
Anders Grøndahl Knudsen, s102947

Kongens Lyngby
Juni 2013

Sammenfatning

I dette projekt undersøges brugen af en bundaske i mørtelblandinger, med henblik på at fastlægge dennes kemiske egenskaber og indflydelse på betonens egenskaber. Asken er en bioaske fra Vattenfall Amagerværket, som kommer af afbrænding af halm- og træpiller.

Ved forsøg er puzzolanske egenskaber for asken fra Vattenfall Amagerværket søgt påvist, ligeledes er askens kemiske egenskaber undersøgt i form af indhold af tungmetaller, vandindhold og glødetab, pH-værdi og vandopløselighed.

Ved vaskning af den ubehandlede aske forsvinder ca. 25 % af massen i form af salte og tungmetaller. Det viser sig, at indholdet af cadmium er langt over kravene til anvendelseskategori 1 [Retsinformation.dk, 2011]. Bly og zink overskrider tilsvarende kravene til anvendelseskategori 1, blot i langt mindre grad end cadmium. Indholdet af chrom, kobber og nikkel ligger alle indenfor kravene af anvendelseskategori 1. Glødetabet i asken er målt til ca. 6 %, hvorved den lige overskrider grænsen til kategori A jf. [DS/EN450-1, 2012], hvor glødetabet maksimalt må være 5 % af massen. Askens pH er målt til ca. 12,5, hvor Aalborg Portlands cementpasta, til sammenligning, har en pH på ca. 13. Vandindholdet af asken er målt til 0,3 %, hvilket ikke ændrer betydeligt på v/c-forholdet. Efter den indledende screening af mørtelprøverne viser det sig, at der kan opnås en styrkeforøgelse på op til godt 25 % ved bearbejdning af asken. Styrken af prøverne reduceres med mængden af aske i blandingen. Ved den ubehandlede aske er trykstyrkerne for prøve A (5 % cement erstattet af aske), prøve B (10 % cement erstattet af aske) og prøve C (20 % cement erstattet af aske) hhv. ca. 42 MPa, ca. 43 MPa og ca. 32 MPa, der skal sammenholdes med styrken af reference prøven på ca. 46 MPa. Efter asken blev vasket øges styrken af blandingerne til ca. 48 MPa, ca. 34 MPa og ca. 30 MPa ift. reference prøvens 46 MPa. Efter yderligere af samformale af aske og cement ved, med en ringknuser, ses en markant stigning af styrken for askeprøverne, til hhv. 48 MPa, 43 MPa og 40 MPa ift. referenceprøvens (formålet cement) nye styrke på 49 MPa. På baggrund af ovennævnte screeningsresultater er de resterende undersøgelser gennemført på vasket aske og samformalet med cement i en ringknuser. Forsøgene er også afgrænset til prøve A, da dennes styrketab ift. referenceprøven lå indenfor usikkerheden.

Der er undersøgt 7-, 14-, 21-, 28-, 35-, og 42-døgns prøver for porøsitet (ved ultralyd) og styrke, hvor porøsiteten af 42- og 35-døgns prøverne yderligere er blevet målt ved hjælp af metoden beskrevet i afsnit 3.4.3. Resultaterne viser at den største styrkeforskel prøverne imellem ligger ved 7-døgn, og at styrker ved senere terminer praktisk talt er ens. Herved er det antaget at, 5 % af den samlede mængde cement, kan udskiftes med aske uden tab af styrke. En sammenhæng mellem porøsitet og styrke er fundet, men der er ingen sammenhæng var mellem styrke og ultralydsmåling. Askens puzzolanske egenskaber er yderligere undersøgt ved anvendelse af Bolomeys styrkeformel. Her er det vist, at asken har ingen eller meget svage puzzolanske egenskaber. Derimod antydes en filler effekt efter samformalingen med cement, hvilket formodes at være årsag til den tidlige styrke.

Varmeudviklingen af cementpastaen er undersøgt sammen med dennes afbindingstid. Det er vist at asken har en marginal (negativ) effekt på varmeudviklingen ift. den formalede referenceprøve. Yderligere viser det sig,

at den udviklede varme falder drastisk med mængden af aske i cementpasten. Askens indflydelse ser ud til at reducere afbindingstiden. Den er, ved anvendelse af manuelt vicat-apparat målt til at være 5t 40min for prøve A og 7t 32min for prøve C ift. reference prøvens 5t 30min. Afbindingstiden bestemt via varmeudviklingen antyder samme tendens.

Abstract

In this project, the use of ash in mortar mixes is examined in order to determine the chemical properties of the ash along with the ashes influence on the properties of concrete. The ash is the leftovers laying on the bottom floor of the incinerator at Vattenfall Amagerværk, where straw and wood pellets are used as fuel.

In this project the pozzolan properties of the ash, along with its chemical properties in form of heavy metal content, water content, loss on ignition, pH value and the solubility of the ash is determined.

By washing the untreated ash approximately 25 % of the mass is lost, due to salts and heavy metals being washed out. The amount of cadmium exceeds the requirements of application category 1 by far, as does lead and zinc [Retsinformation.dk, 2011]. This is however by a far smaller amount. The amount of chrome, copper and nickel all fulfils the requirements of application category 1. The loss of ignition of the ash is measured to be 6 %, where it just exceeds the requirements of category A which is 5 % according to [DS/EN450-1, 2012]. The pH-value of the ash is measured to approximately 12,5 where the pH of cement paste is 13. The amount of water in the ash is measured to be 0,3 % which does not have any crucial impact on the w/c-ratio.

The initial screening of the mortar-samples shows it is possible to achieve an increase in strength of up to 25 % by processing the ash and cement, while the strength decreases with increasing amounts of ash in the mix. The strength of the samples with unprocessed ash is 42 MPa, 43 MPa and 32 MPa respectively sample A, sample B and sample C relative to 46 MPa which is the strength of the reference sample. By washing the ash the strength changes and is now 48 MPa, 34 MPa and 30 MPa respectively sample A, sample B and sample C relative to the same reference sample. By further processing the ash through grinding it with the cement, an increase of strength is measured and it is hereby 48 MPa, 43 MPa and 40 MPa relative to the reference sample strength of 49 MPa. Hereby it is decided that further tests of the mortar-mix is to be done with washed and grinded ash. Only sample A is taken into further consideration as the potency of this sample relative to the reference sample are within the uncertainty.

Hereby 7-, 14-, 21-, 28-, 35 and 42-days sample are examined with ultrasound and strength-tests, where the porosity of the 35- and 42-days samples are measured by the method described in afsnit 3.4.3. The largest difference in sample-strength occurs at the 7-days samples, whereas later sample-strengths are practically the same. Therefore it is assumed that 5 % of cement could be replaced with ash without a loss of strength. A connection between the porosity and strength is found, but it is not possible to find a connection between strength and ultrasound. The pozzolan properties of the ash is examined with use of Bolomeys formula for strength. Here it is shown that the ash had none or very little pozzolan properties. It did however, appear to have a filler effect after grinding the ash and cement together, which is assumed to contribute to early strength.

The heat development of the cement paste is examined along with its setting time. The ash has a marginal (negative) effect on the rate of which heat is developed relative to the grinded reference sample (basis cement). Furthermore the evolved heat decreases drastically with the amount of ash in the cement paste. The influence of the ash shows retarding effects on the setting time as well. This is shown with a vicat-apparatus where the setting time is measured manually. The setting time is measured to be 5h 40min for sample A and 7h 32min

for sample C relative to the reference samples setting time of 5h 30min. The setting time determined from heat development shows the same tendencies.

1 Indledning

Mængden af ubrugelige restprodukter som deponeres er et af vor tids stigende problemer. Dette medfører et øget behov for funktionelle anvendelser af disse produkter. I dag betaler virksomheder penge for at deponere disse restprodukter, hvorom de kunne tjene penge ved at finde en funktion for dem. I dette projekt undersøges en bundaske fra Vattenfall Amagerværket, hvilket er fremstillet ved forbrænding af en blanding af halm og træ. Askens egenskaber forsøges klarlagt, med henblik på brug i betonindustrien. Til belysning af askens filler- og puzzolan-egenskaber er der valgt at se på følgende beton/cement egenskaber:

- Trykstyrke
- Finhed af cement (blaine)
- Afbindingstid og varmeudvikling
- Samformaling af aske og cement
- Vasket aske forsøgt sammenlignet med uvasket aske.

Forsøgene for de ovenstående egenskaber er forsøgt overskueliggjort i forsøgsplanen, tabel 1:

Tabel 1: Forsøgsplan - oversigt over planlagte forsøg. • for 7-døgns screening, * for +28-døgns trykstyrke, ◇ for blaine, ◊ for varmeudvikling og afbindingstid. (Det er kun asken der er vasket og tørret. Cementen er som leveret fra producent og indgår i formalingen).

	Uvasket	Vasket og håndformalet	Vasket og samformalet
Aske	◇	◇	◇ ◊
Aske 5 %	•	•	• * ◇ ◊
Aske 10 %	•	•	•
Aske 20 %	•	•	• ◊
Basis cement	• ◇ ◊		• * ◇ ◊
Rapid cement			• * ◊

For at overskueliggøre rapporten, er den nødvendige teori for beregningerne, samt forståelsen herom, gennemgået i afsnit 2. Efterfølgende er forsøg, samt bearbejdning af komponenter, gennemgået i afsnit 3, hvorunder der er henvist til standardiserede forsøg. I forsøget er cementen substitueret med aske i et masse-mæssigt forhold. De relevante resultater fra disse forsøg er efterfølgende gennemgået og diskuteret i afsnit 4. Der bliver i dette afsnit også argumenteret for udviklingen af forsøgene. Herunder bliver der bl.a. set på askens karakteristika, askens indflydelse på mørtelens styrke, dennes ledningsevne af ultralyd, samt varmeudvikling og afbindingstid af mørtelblandingerne.

Endeligt afrundes selve projektet med en konklusion ud fra, de i afsnit 4, gennemgåede resultater, samt deres tilhørende diskussioner. Herefter stilles der forslag til fremtidigt arbejde med denne aske, som der iflg. projektgruppen er relevant.

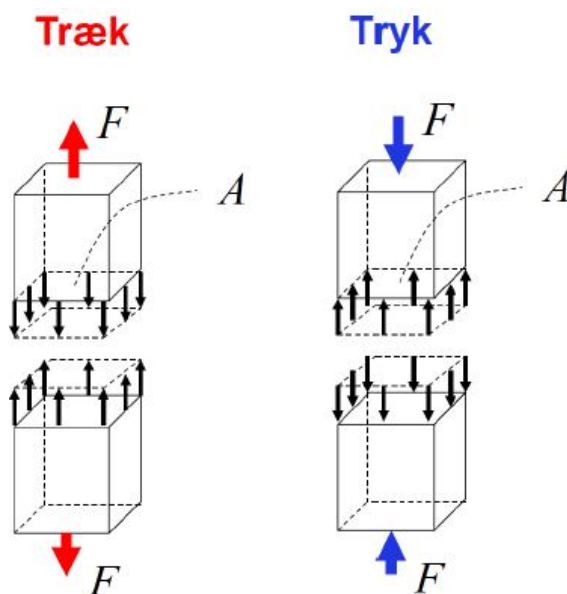
En del af forsøgene er udført uden at følge Dansk standard, da de her opgivne apparater ikke var til rådighed. Dette betyder, at resultaterne i dette projekt ikke direkte kan sammenlignes med andres resultater, medmindre andet er angivet.

2 Teori

I dette afsnit vil teorien, som ligger til grund for beregningerne, blive gennemgået.

2.1 Betons egenskaber

Betons formål i en konstruktion er at optage de trykspændinger der opstår. Beton er, som tommelfingerregel, 10 gange så stærk i tryk, ift. træk. I jernbeton er det derfor armeringen, der er den bærende kræft ved træk. Af denne grund, vil uarmeret beton altid blive testet i tryk.



Figur 1: Træk- og trykkræfters retning *kilde: [Geiker, 2010, slide 8]*

Når en trykprøvning udføres, vil materialet blive testet til brud, hvorefter en endelig værdi for normalkraften kan aflæses. For at målingen kan sammenlignes med andre former og størrelser, omregnes kraften til en normalspænding, i Pascal (Pa), ved formlen:

$$\frac{F}{A} = \sigma \quad (1)$$

Hvor F er betonens trykstyrke, A er arealet der trykkes over og σ er spændingen.

Betonen er kun så stærk som det svageste af de komponenter der indgår i blandingen, dvs. enten cementpastaen eller tilslag [Portland, 2007]. De fleste tilslag i dag er stærkere end cementpastaen, hvorfor styrken afhænger af sidstnævnte. Cementpastaens styrke afhænger af v/c -forholdet. Denne sammenhæng mellem, styrke og v/c -forhold, kan beskrives ved Bolomeys styrkeformel, for v/c forhold mellem 0,45 og 1,25 hvor mængden af den indkapslede luft ikke overstiger 1,5-2 vol-% [Herholdt et al., 1985]:

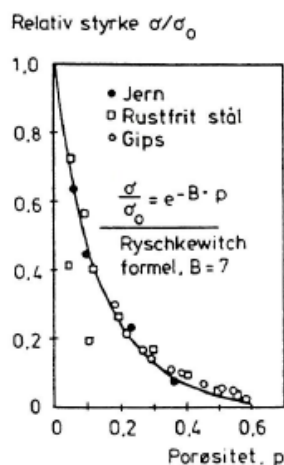
$$F_c = K \cdot \left(\frac{1}{v/c} - \alpha \right) \quad (2)$$

Hvor K er en konstant afhængig af cementtype og termin, og α er en konstant afhængig af termin. En oversigt over K og α fra Aalborg Portland kan ses herunder:

Tabel 2: Vejledende konstanter til Bolomeys formel. Kilde: [Portland, 2007].

Cementtype	Termin, døgn	K	α
BASIS cement	1	17	0,9
	7	26	0,6
	28	30	0,5
RAPID cement	1	13	0,9
	7	24	0,6
	28	30	0,5

Da v/c er proportionalt med porøsiteten, giver et lavere v/c -forhold en højere styrke [Portland, 2007], dvs. disse er omvendt proportionelle hvilket ses ved en kurve opstillet efter Ryschkewitch formel:



Figur 2: Oversigt over sammenhængen mellem relativ styrke og porøsitet. Kilde: [Gottfredsen og Nielsen, 2006].

Her er Ryschkewitch's formel givet ved [Gottfredsen og Nielsen, 2006]:

$$\sigma(p) = \sigma_0 \cdot e^{-B \cdot p} \quad (3)$$

Hvor σ_0 er styrken af den kompakte beton, B er en materialeparameter som normalt er sat til 7 og p er porøsiteten af betonen givet i rene tal. Porøsiteten bestemmes ved sammenhængen mellem porevolumen, V_p , og totalvolumen, V :

$$p = V_p/V \quad (4)$$

Ved at tilsætte forskellige puzzolaner kan betonens egenskaber ændres. Et eksempel på en kunstig puzzolan, er flyveaske fra diverse kulforbrændingsværker. Flyveasken bidrager til betonens styrkeudvikling og benyttes ved at erstatte en del af cementen i blandingen med aske [Portland, 2006]. En anden kendt kunstig puzzolan er mikrosilica. Mikrosilica medfører en øget trykstyrke af betonen og dannes som et restprodukt ved fremstilling af legeringsmaterialet ferrosilicum [Portland, 2006]. Da det ikke længere kun er cementen, og dennes forhold med vand, der har indflydelse på styrken korrigeres dette ved et ækvivalent v/c-forhold [Hasholt et al., 2002]:

$$v/c_{eq} = \frac{v}{c + k \cdot p} \quad (5)$$

Hvor c er mængden af cement, p er mængden af det givne puzzolan og k er k-værdien eller aktivitetsfaktoren for det givne puzzolan. Herved ændres Bolomeys styrkeformel en smule og ser derfor ud som følgende:

$$F_c = K \cdot \left(\frac{1}{v/(c + p \cdot k)} - \alpha \right) \quad (6)$$

Jf. [DS2426, 2009] er aktivitetsfaktorerne 0,5 for flyveaske og 2 for mikrosilica for så vidt angår styrken, hvilket betyder at et kg cement kan erstattes af to kg flyveaske eller et halvt kg mikrosilica - disse forhold er anderledes hvis der ses på eksempelvis tæthed eller holdbarhed af betonen. Aktivitetsfaktorerne er dynamiske i den forstand, at de ændres med forholdet mellem cement og puzzolan [Hasholt et al., 2002]. Som eksempel herpå må indholdet af flyveaske, jf. [DS2426, 2009], ikke overstige vægtforholdet: $flyveaske/cement \leq 0,67$.

Af alternative metoder til at beregne styrken som funktion af v/c-forholdet, er der bl.a. Neppers formel og Férets formel. Neppers formel tager ydermere hensyn til hærdningsgraden:

$$f_c(M_{20}) = exp \left[\frac{A_1}{\sqrt{M_{20}}} + \left(A_2 + \frac{A_3}{\sqrt{M_{20}}} \right) \cdot \frac{v}{c} + A_4 \right] \quad (7)$$

Hvor A_1 , A_2 , A_3 og A_4 alle er konstanter afhængige af cementtype og tilslagstype [Herholdt et al., 1985].

Férets formel fra 1896 griber v/c-forholdet an på en lidt anden måde, ved også at inddrage luftindholdet i dette [Dam et al., 2008]:

$$f_c = k \left(\frac{C}{V + L + C} \right)^2 \quad (8)$$

Hvor C , V og L er volumenet af hhv. cement, vand og luft og k er en konstant. For danske cementer ligger k mellem 260 – 330 MPa [Dam et al., 2008].

2.2 Porøsitet

Som nævnt i afsnit 2.1 er et materiales styrke omvendt proportionalt med porøsiteten, hvorfor denne egenskab er interessant at undersøge. Porøsiteten kan findes ved en række forskellige metoder, en af dem værende at finde volumen af porerne ved absorption af vand.

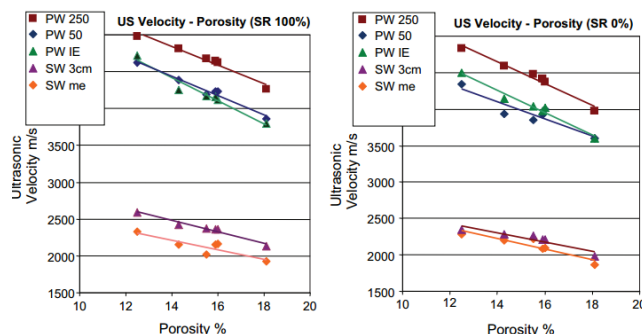
En anden metode der beskriver porøsiteten er ultralydsmåling. En ultralydsmåling på et legeme, laves ved at sende ultralyd igennem legemet og se på forløbstiden.

Dette sker ved, at lydbølgerne bevæger sig igennem legemets molekyler, ved at afgive lydbølgens vibrationer fra det ene molekyle til det næste, når de kommer i kontakt. Herved har molekyletætheden og hastigheden molekyletætheden bevæger sig med, indflydelse på hvor hurtigt lyden kan passere.

Tætheden vil være bestemt ud fra trykket og fasen molekylet befinder sig i, mens hastigheden af molekylet, på flydende og gas form, er bestemt af temperaturen. Dertil er selve molekyle-strukturen afgørende i samtlige faser.

Når der er tale om en gas, er molekylet mindre tæt pakket end ved en fast og flydende form. Dermed vil dette være den form hvor lydbølgerne bevæger sig langsomst igennem. På flydende form er molekylet tættere pakket. Dette betyder at de oftere vil støde ind i andre molekylet og dermed hurtigere kunne videregive lydbølgerne. På fast form har lyden optimale forhold, da molekylet sidder så tæt som de kan.

Dermed vil en ultralydsmåling kunne vise om et materiale er mere porøst end andre sammenlignelige materialer, som vist på figur 3:



Figur 3: Ultralydens hastighed igennem beton med forskellige porøsiteter [Garnier et al., 2011, s. 608, fig. 10]

2.3 Hydratisering

Cement

Portland cement produceres hovedsagligt, ved at brænde kalksten, ler og sand i en cementovn. I denne process, dannes de vigtigste mineraler fra cementklinker, kaldet: dicalcium silicate, tricalcium silicate, tricalcium aluminate og tetracalcium aluminoferrite [Johannesson, 2012, s. 78]. I industrien kaldes de dog ved deres "Cement Chemist Notation" (CNN), hvilket er vist i bilag C. Deres kemiske formel [Johannesson, 2013, slide 14] er

Tricalcium silicate (C_3S) :	$3CaO \cdot SiO_2$
Dicalcium silicate (C_2S) :	$2CaO \cdot SiO_2$
Tricalcium aluminate (C_3A) :	$3CaO \cdot Al_2O_3$
Tetracalcium aluminoferrite (C_4AF) :	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$

Ved hydratisering af disse mineraler dannes der C-S-H (Calcium silicate hydrates), CH (Portlandite), ettringite og monosulfat. Disse produkter er den hovedsaglige del af det faste materiale der dannes [Johannesson, 2012, s. 78].

Den kemiske formel for C-S-H skrives ofte som $C_3S_2H_4$. Dog skal det bemærkes at dette er en approksimation, da formelen for C-S-H er støkiometrisk [Johannesson, 2012, s. 85].

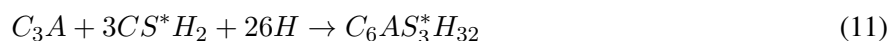
C_3S , også kaldet alite, reagerer igennem forskellige stadier, som beskrevet i [Johannesson, 2012]. Dette medfører at reaktionen for alite varierer. Endvidere fører dette til en forsimplet reaktionsligning, som beskriver den gennemsnitslige reaktion, jf. [Johannesson, 2012, s. 85]:



Reaktionen for C_2S , også kaldet belite, sker senere i processen end den for alite. Til sammenligning med alite danner den også betydeligt mindre mol CH (ca. 1/3 pr mol belite ift. alite). Denne reaktion vil, jf [Johannesson, 2012, lign. 5.8], være defineret ved:



Ved Portland cement, er der som ofte tilføjet gips. Dette har indflydelse på reaktionen for celite (C_3A), da gipsen retarderer denne, ellers hurtige hydratiseringsprocess. Under denne hydratiseringsprocess, dannes der ettringite, som reagerer videre og danner monosulfat. Den overordnet hydratiseringsprocess, for dannelsen af ettringite, er beskrevet ved [Johannesson, 2012, lign. 5.24]:



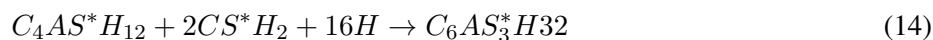
Ettringiten der dannes ved denne reaktion er ustabil og reagerer videre til monosulfat [Johannesson, 2012, lign. 5.25]:



Disse kan kombineres, til at beskrive den overordnede process for dannelsen af monosulfat, ved hydratisering af gips og celite [Johannesson, 2012, lign. 5.26]:



Dette kan reagere videre og, igen, blive til ettringite (denne gang stabilt), ved reaktionen beskrevet i [Johannesson, 2012, lign. 5.27]:



Denne reaktion er afhængig af mængden af sulfat ioner, som kan komme fra gips, eller ved fx at komme i kontakt med hav- eller spildevand.

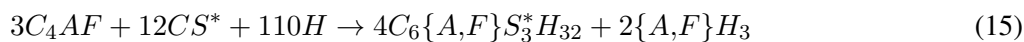
Andre reaktioner, samt deres mol forhold for gips og celite, kan ses på tabel 3:

Tabel 3: Forskellige produkter fra hydratisering af C_3A ved forskellige forhold af gips.

Kilde: [Johannesson, 2012, tabel 5.1]

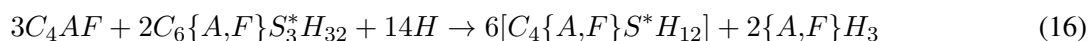
CS [*] H ₂ /C ₃ A (molar ratio)	Stable hydration products formed	
3.0	C ₆ AS ₃ [*] H ₃₂	(ettringite)
3.0 - 1.0	C ₆ AS ₃ [*] H ₃₂ + C ₄ AS ₃ [*] H ₁₂	(ettringite + monosulfate)
1.0	C ₄ AS ₃ [*] H ₁₂	(monosulfate)
<1.0	C ₄ AS ₃ [*] H ₁₂ - C ₄ AH ₁₃	(mixtures of solid solution)
0	C ₃ AH ₆	(hydrogarnet)

C₄AF's, ferrites, reaktion med gips og vand, ligner meget den for celite. Ferrite kan, af mangel på calcium, ikke danne ettringite i samme form som celite [Johannesson, 2012, s. 99]. Dog vil der blive dannet ettringite, hvis der under reaktionen dannes jern- eller aluminiumoxid, skrevet som {A,F}H₃. Dette vil, jf. [Johannesson, 2012, lign. 5.31], give reaktionen:



Her dannes der ettringite*, samt jern- eller aluminiumoxid. Ettringite*, indikerer at dette stof delvist består af jern og delvist af aluminium.

Ettringite* vil, af mangel på sulfat, nu reagere videre og danne monosulfat, samt jern- eller aluminiumoxid [Johannesson, 2012, s. 99]. Dette gøres ved reaktionen:

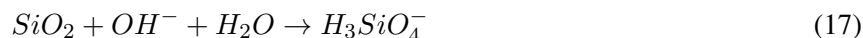


Flyveaske

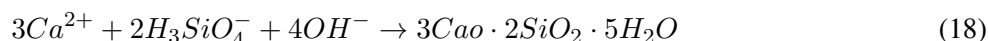
En kendt aske, som bruges i cement, er flyveaske fra kulkraftværker. Flyveasken, har udover sin effekt som filler i cementpastaen, en effekt som reaktant i cementens hydratiseringsproces - en puzzolan-effekt [Benscheidt et al., 2010].

Flyveasken, som består af silica og alumina, bliver opløst i den stærk alkaliske cementpasta, hvor silica og alumina reagerer med C-S-H og C-A-H faserne for at danne de samme produkter der opnås i hydratiseringen af cement [Benscheidt et al., 2010].

Opløsningen af flyveaskens overflade danner en af ingredienserne i produktionen af C-S-H, hvilket ses herunder:



Hvorefter $H_3SiO_4^-$ reagerer videre med calcium ioner og hydroxid ioner for at danne C-S-H:



Denne reaktion medfører en tættere blanding og finere pore, hvilket medfører en øget styrke af betonen [Benscheidt et al., 2010].

2.4 Blaine

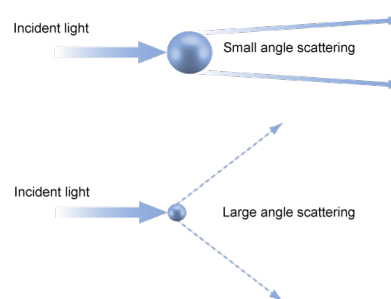
Ved arbejde med cement er det essentielt at kende til dennes reaktionshastighed med vand, da dette har indflydelse på hydratiseringshastigheden af cementen. Høj reaktionshastighed giver hermed tidligere styrke til betonen, men ikke nødvendigvis højere styrke i sidste ende.

En højere reaktionshastighed kan opnås ved at øge overfladearealet af cementen, dvs. øge blaine-tallet. Blaine-tallet er udtrykt ved m^2/kg , hvilket betyder at en lavere kornstørrelse giver en højere værdi.

Blaine-tallet kan måles ved en række forskellige metoder, bl.a. Blaine-metoden, gas sorption eller laser diffraction - hvor Blaine-metoden er beskrevet i [DS/EN196-6, 2010].

I dette projekt er laser diffraction benyttet til at måle blaine-tallet. Denne metode benytter lysets spredning omkring en partikel til at bestemme volumen af partiklen. Dvs. større partikler giver en mindre vinkel i spredningen end mindre partikler gør [MalvernIndustries, 2013] - se figur 4.

Ved gas sorption måles antallet af gas-partikler der kan sidde på overfladen af en partikel i fast form, i dette tilfælde en cement-partikel. Denne metode kan medføre værdier der er 2-3 gange større en ved Blaine-metoden, da cement-partikler har en ujævn overflade med revner og sprækker hvor gas-partiklerne kan sætte sig [Jennings&Thomas, 2008].



Figur 4: Princippet bag laser diffraction.

Kilde:[MalvernIndustries, 2013].

2.5 Afbindingstid

Afbindingstiden beskriver en cements egenskab til at sætte sig, dvs. fase-skiftet fra flydende til fast form [Neville, 1973], ikke at forveksle med hærningen som beskriver styrkeudviklingen af cementen. Afbindingstiden og hærningen er altså to uafhængige faktorer [Portland, 2007].

Fase-skiftet fra flydende til fast form sker ved hydration af C_3A og C_3S [Neville, 1973], hvorved der, grundet den endoterme reaktion, udvikles varme. Indledende afbindingstid svarer til kraftig stigning i temperatur og den endelige afbindingstid svarer til reaktionens højeste temperatur - herved kan afbindingstiden bestemmes via temperaturmåling.

Ved temperaturmåling findes afbindingstiden ved at opstille et diagram med logaritmisk tidsskala, hvor skæringspunktet mellem tangenten til temperaturkurven og en vandret linje fra begyndelsestemperaturen giver et estimat af afbindingstiden [Dansk-Betoninstitut-A/S, 1995]. Ydermere kan afbindingstiden bestemmes med et vicat-apparat.

Når afbindingstiden måles vha. et vicat-apparat fås en indledende afbindingstid og en endelig afbindingstid. Den indledende afbindingstid kan forventes forekomme efter 120-180 min jf. [Portland, 2013] og den endelige afbindingstid kan forventes at forekomme efter 300 min jf. ligning 2.5. En sammenhæng mellem indledende og endelig afbindingstid kan jf. [Neville, 1973] estimeres ud fra følgende formel:

$$\text{endelig afbindingstid (min)} = 90 + 1,2 \cdot \text{indledende afbindingstid (min)} \quad (19)$$

2.6 Varmeudvikling

Varmeudviklingen i betonens hærningsproces finder sted ved hydratiseringen af cementen. Den optimale måling af dette gøres under adiabatisk forhold, dvs. uden varmeudveksling med omgivelserne er. Herved kan varmeudviklingen måles som temperaturstigningen i prøven [Hansen, 1995]. Varmeudviklingen består hovedsagligt af den kemiske reaktion ved hydratisering af cementen, men også af adsorption af vand på overfladen af gelen der opstår ved hydratiseringsprocessen [Neville, 1973].

Varmeudviklingen, og hastigheden af denne, kan påvirkes af en række faktorer, værende blainetallet af cementen afsnit 2.4 eller temperaturen reaktionen starter ved [Neville, 1973]. Et eksempel på varmeudvikling ved forskellige temperaturer kan ses i tabel 4 herunder:

Tabel 4: Varmeudvikling for 3 cement typer ved forskellige temperaturer. Kilde: [Neville, 1973].

Cement type	Varmeudvikling ved:			
	4°C	24°C	32°C	41°C
I	154	285	309	335
III	221	348	357	390
IV	108	195	192	214

Under hydratiseringen af cementen kan reaktionen udvikle op til 500 joule per gram cement [Neville, 1973]. Ved støbning i frostgrader kan dette være en fordel, da den høje varmeudvikling forhindrer vandet i at fryse til. Anderledes kan det være en hindring ved store byggerier, hvor varmemforskellen på kernen af byggeriet og kanten af byggeriet, kan føre til revner og sprækning af betonen [Neville, 1973].

Den totale varmeudvikling er ikke altid den afgørende faktor ved støbning. Hastigheden af denne er også at tage i betragtning i visse tilfælde. Den samme totale varmeproduktion kan blive bedre udnyttet hvis denne bliver produceret over en længere periode [Neville, 1973].

Tabel 5: Varmeudviklingen for hver af komponenternes reaktion med vand (og gypsum).

Kilde:[Johannesson, 2012]

Komponent	Varmeudvikling, ΔH
C_3S	-114 KJ/mol
C_2S	-43 KJ/mol
C_3A	-240 KJ/mol (-362 KJ/mol)

Som det ses i tabel 5 sker den største varmeudvikling ved dannelsen af C_3A og C_3S , hvorfor der tilsættes gips til nogen Aalborg Portland cement-blandinger for at retardere C_3A 's hydratiserings-proces som beskrevet. Denne ændring i reaktionen frigiver sammenlagt mere energi end den foruden C_3A . Grundet C_3A og C_3S hurtige reaktioner bidrager disse hovedsagligt til den tidlige styrke, hvor C_2S hovedsagligt bidrager til den sene styrke. Helt præcist bidrager C_3A til de første tre dage, hvor C_3S bidrager til styrken de første fire uger og C_2S herefter [Neville, 1973].

3 Bearbejdning og forsøg

I dette afsnit gennemgås hvordan komponenterne blev bearbejdet, samt hvordan projektets forsøg blev udført.

3.1 Forsøgsfremgang

For at overskueliggøre projektet, er en forsøgsplan opstillet. Undervejs i forløbet er bl.a. *samformalet aske 5 % · 1,5* og *samformalet aske 5 % · 2* blevet tilføjet. Der blev lagt ud med en screening af 7-døgns prøver for at finde askens overordnede indflydelse på mørtelprøverne. Efter denne screening blev det besluttet at det var nødvendigt at bearbejde asken, hvorfor den i første omgang kun blev vasket og senere hen både vasket og samformalet. Asken blev vasket for at udvaske evt. tungmetaller og salte, og den samme blev formalet for at øge finheden af cement/aske-blandingen. Efterfølgende blev det vurderet, at det bedst kunne betale sig at arbejde videre med cementpastaen med 5 % aske (prøve A), da denne viste tendenser til at have de mindste udsving i trykstyrke. Udelukkende at fokusere på denne prøve virkede dog som for lidt, hvorfor der også blev arbejdet videre med cementblandinger hvor 5 % af cementen blev erstattet af 1,5 (E) og 2 (F) gange så meget aske. For at undersøge om asken kunne bruges i den virkelige verden, blev varmeudvikling og afbindingstid undersøgt til slut. Undervejs blev asken i sig selv undersøgt ved bl.a. SEM-mapping og forsøg hvor askens bestanddele blev fastsat. For et bedre overblik over hvilke forsøg der er foretaget, se bilag B.

3.2 Bearbejdning af komponenter

3.2.1 Vaskning af aske

For at optimere askens egenskaber, blev askens salte udvasket med destilleret vand.

Der blev, til dette, afvejet ca. 300 g aske i portioner af 100 g. Disse portioner blev hældt i 1 L flasker med låg til. Herefter blev der tilføjet 500 ml destileret vand og flaskerne blev rystet. Dette henstod så til der var bundfald, hvorefter det som ikke var bundfaldet, blev hældt op i en tragt med filter i. Dette blev gentaget to gange, hvor flasken blev tømt i tragten på tredje gang.



Figur 5: Vasket aske i gang med at blive filtreret.

Asken blev herefter antaget at være gennemvasket og kunne dermed sættes til tørring. For at undgå vand i ovnen, blev asken stående i sit filter natten over. Dagen efter kunne det så overføres til en ovn som var opvarmet til 55° C, hvor det stod natten over.

Hvis der var andre fugtige materialer i ovnen, kunne det risikeres at asken ikke var tør og dermed måtte blive stående en ekstra dag.

3.2.2 Håndformaling af aske

Efter asken var blevet tørret, var den at finde i klumper der var for store til at bruge i støbningen. Derfor blev disse klumper formalet ved håndkraft i et stinkskaab med en mortar og støder. Finheden af asken blev bedømt ved øjemål og var afhængig af hvad asken skulle bruges til. Skulle asken bruges direkte til støbning, blev den gjort finere end hvis den skulle formales i ringknuser.

Efter asken var knust, blev den lagt i lufttætte poser, så den ikke optog fugt fra luften.

3.2.3 Formaling af aske og cement ved ringknusning

En ringknuser kan være med til at øge overfladearealet af et materiale ved at formale det. Som beskrevet i afsnit 2.4, vil dette medføre en øget reaktionshastighed af cement og det blev antaget tilsvarende for asken.

Ringknuseren indeholdte en cirkulær beholder med en ring og en cylinder (se figur 6) som bruges til at knuse materialet når beholderen roterer.

Beholderen blev fyldt op med 200g af den ønskede sammensætning af cement og aske.



Figur 6: Beholderen med de to indre ringe.

Hvis der skulle udføres forsøg med aske sammen med cement, blev disse blandet inden de kom i beholderen. Dette skete for at sikre den mest homogene sammensætning af aske og cement.

Ringknuseren blev indstillet til at køre i 30 sekunder af gangen, med en rotationshastighed på.

Når et nyt forhold mellem aske og cement skulle knuses, blev beholderen, samt ringene, rensed for så vidt muligt at sikre det ønskede blandingsforhold.

3.3 Forsøg med komponenter

3.3.1 Blaineværdi

Til at måle blaine-tallet, blev maskinen ”Mastersizer 2000” brugt. Her blev prøven som skulle måles indført i maskinen. Maskinen udnyttede derefter laser diffraction (beskrevet i afsnit 2.4) til at bestemme overfladearealet.

3.3.2 Askeforsøg

Til at bestemme askens indhold og egenskaber, blev der udført en del askeforsøg. Disse blev gjort i overensstemmelse med standard laboratorieprocedurer ved Sektionen for Byggematerialer. Der blev udført test for pH-værdi, vandindhold, vandopløselighed, glødetab, ledningsevne, samt test til bestemmelse af syreopløselige metaller. For gennemgang af forsøgsvejledning, henvises der til bilag M.

Dog skal det nævnes at der blev brugt ICP, i stedet for AAS, til at teste prøverne, hvor AAS er nævnt i forsøgsvejledningerne.

3.3.3 Afbindingstid

Afbindingstiden blev målt iht. [DS/EN196-3+A1, 2009].

3.4 Forsøg med mørtelrøpøer

3.4.1 Trykprøvning

Som udgangspunkt, blev blandingsrecepten fra tabel 6 brugt, hvor flyveasken var erstattet med bundasken.

Tabel 6: Fordelingen af komponenter for test af flyveaske i mørtel. *Kilde: [DS/EN196-1, 2005].*

Materials	Control Mortar	Test Mortar
Test cement	(450 ± 1) g	(135 ± 1) g
Fly ash	Nil	(135 ± 1) g
CEN Standard Sand	(1350 ± 5) g	(1350 ± 5) g
Water	(225 ± 1) g	Mass M to give a float value of ± 10 mm of that the control mortar

Dette førte i første omgang til blandingsrecepterne for reference, Rapid, A, B og C i tabel 7. Efterfølgende førte dette videre til E og F, på baggrund af diskussionen i afsnit 4.2.

Tabel 7: Fordelingen af komponenterne i mørtelprøverne. Her indikerer procenten hvor meget cement (vægt mæssigt) der er udbyttet med aske. 5 % · 2 betyder at cement byttes ud i forholdet 1:2 ift. vægt.

Prøve	Cement	aske	Sand	Vand
Referenceprøve	450 g	0 g	1350 g	225 g
A, 5 % aske	427,5 g	22,5 g	1350 g	225 g
B, 10 % aske	405 g	45 g	1350 g	225 g
C, 20 % aske	360 g	90 g	1350 g	225 g
E, 5 % aske · 1½	427,5 g	33,75 g	1350 g	225 g
F, 5 % aske · 2	427,5 g	45 g	1350 g	225 g
Rapid	450 g	0 g	1350 g	225 g

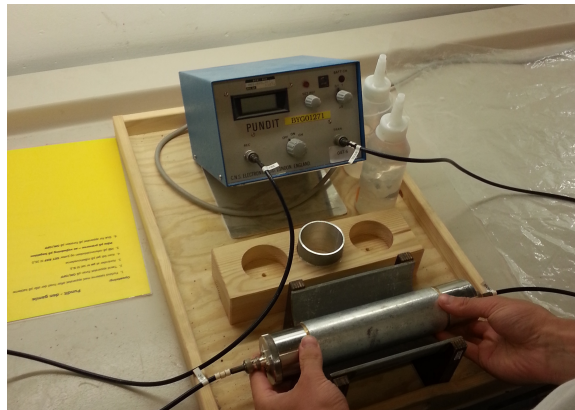
Ikke alle prøver blev udført i samme tidsintervaller. Reference-prøven, prøve A, prøve E og prøve F blev lavet i hhv. 7-, 14-, 21-, 28-, 35- og 42-døgn. Mht. til trykprøvning blev prøve B og prøve C kun udført under screeningsfasen, hvilket kun var 7-døgnsprøver. Rapidcementen blev derimod testet ved 7-, 14- og 28-døgns prøver.

Disse blev alle fremstillet og trykprøvet i henhold til [DS/EN196-1, 2005]. Dog blev der ikke testet bøjningsstyrken. Dertil var tryklegemet 50 mm bredt i de første prøver og 40 mm i de sidste prøver - 50 mm trykpladerne blev undervejs i forløbet fjernet fra deres plads ved Tony 300-trykmaskinen.

Det bør også nævnes at for at optimere ultralydsmålingerne, blev de målbare overflader (til ultralyd) gjort plane ved brug af spatler.

3.4.2 Ultralyd

Ultralydsmålingerne blev udført på mørtelprøverne ved brug af maskine som vist på figur 7. Først blev maskinen kalibreret ved at bruge et standard metallegeme, som vist på figur 7. Her blev den kalibreret til at have en gennemløbstid på $26,5 \mu s$. Efter dette var udført, blev metallegemet byttet ud med mørtelprøverne. Hver gang en ny måling skulle laves, blev der påført gel på både modtager- og afsender af ultralydssonden. Dette blev udført for at få fuld kontakt mellem prøverne og ultralydsapparatet.



Figur 7: Kalibrering af apparatur til ultralydsmålinger.

3.4.3 Porøsitet

Porøsiteten blev bestemt vha. ligning 4 i afsnit 2.1. Volumen af porerne blev bestemt ved først at veje en given prøve i våd tilstand, for derefter at veje samme prøve i helt tør tilstand - for at sikre at prøverne var helt tørre, lå de til tørring i stinkskaab natten over. Herved findes mængden af vand i prøven, hvorfra volumen af porerne kan findes vha. vands densitet og mængden af vand i prøven:

$$V_p = \frac{w_w}{\rho_w} \quad (20)$$

Hvor w_w er vægten af det fordampede vand og ρ_w er vands densitet. Porøsiteten kan til slut bestemmes ved porevolumen og den totale volumen:

$$p = \frac{V_p}{V_{tot}} \quad (21)$$

3.4.4 Varmedvikling

Varmedviklingen blev målt i isolerede tønder. Der fandtes intet materiale som beskrev disse tønder, men en vurdering af sektionsleder og professor Ole Mejlhede Jensen, lød at disse var adiabatisk kalorimetre fra BKI. Dette kunne ikke bekræftes.

Prøverne blev blandet efter samme blandingsforhold som tidligere brugt. Disse prøver var alle på ca. 5 L, på nær en for ren aske. Af prøver blev der lavet: Basiscement, formalet basiscement, rapidcement, prøve A og C formalet med cement, samt en mindre prøve hvor 100 % af cementen var byttet ud med aske. Selve blandingsprocessen var tre gange så lang for alle delene, ift. mørtelprøverne i [DS/EN196-1, 2005], for at tage hensyn til den øgede mængde. Efter prøverne var blandet blev de placeret i cylindre af ca. 5 L og sat på rystebord i fem minutter. Disse cylindre blev placeret i tønderne, hvor temperaturen af mørtelen blev logget over de efterfølgende 68 timer.



Figur 8: Tønde brugt til måling af varmedviklingen.

3.4.5 Afbindingstid

Afbindingstiden blev målt iht. [DS/EN196-3+A1, 2009]. Denne blev målt med samme blandingsforhold som tidligere. Dette blev gjort med formalet- og ikke formalet basiscement, samt prøve A og C formalet med basiscement.

4 Resultater og diskussion

I dette afsnit bliver de relevante resultater fra afsnit 3, samt diskussionen af disse, indraget.

4.1 Aske

For at bestemme askens karakteristika, blev forsøgene som nævnt i afsnit 3.3.2 udført. Med disse forsøg blev der set på indholdet af organiske materialer ved måling af glødetabet (afsnit M.4). Der blev dertil set på indholdet af tungmetaller i hhv. det udvaskede materiale og den oprindelige aske. Dette skete ved oplukning og vandopløslige anioner - se bilag M. De relevante resultater fra disse forsøg diskuteres i dette afsnit, mens de resterende resultater er at finde i bilag D.

Tabel 8: Forsøgsresultater for glødetab, måling af pH-værdi, vandindhold og vandopløselighed.

Fulde tabeller: bilag D.

Forsøg	Værdi	Enhed
Vandindhold	0,3	%
pH	12,5	pH
Glødetab	5,7	%
Vandopløselighed	25,3	%

Som det fremgår af tabel 8, er pH-værdien for asken 12,5. Til sammenligning, oplyser Aalborg Portland selv, at deres cement, blandet med vand, har en pH-værdi på ca. 13 [Portland, 2007, s. 149]. Dvs. askens pH-værdi er tilnærmelsesvis ens med pH-værdien der findes i beton. Da en høj pH-værdi ønskes for at beskytte armeringen (som gennemgået i afsnit 2.1), er dette resultat positivt for askens brug i beton. Dertil bemærkes det også at vandindholdet befinder sig på ca. 0,3 %, hvilket ikke burde øge v/c-forholdet nok til at kunne have indflydelse på styrken af mørtelen. At vandopløseligheden befinder sig på ca. 25 %, vidner om at behovet for udvaskning af asken er tilstede.

Tabel 9: Oversigt over forskellige anvendelseskategorier, af affaldsprodukter, baseret på indholdet af tungmetaller. Kategori 2 og Kategori 3 adskiller sig ved andre krav som testes ved udvaskning iht. [DS/EN12457-1, 2002]. Kilde: [Retsinformation.dk, 2011, Bilag 6].

Kemiske forkortelse	Kategori 1 [mg/kg] (TS)	Kategori 2 [mg/kg] (TS)	Kategori 3 [mg/kg] (TS)	Fulde navn
Pb	0 - 40	>40	>40	Bly
Ca	0 - 0,5	>0,5	>0,5	Cadmium
Cr	0 - 500	>500	>500	Chrom
Cu	0 - 500	>500	>500	Kobber
Hg	0 - 1	>1	>1	Kviksølv
Ni	0 - 30	>30	>30	Nikkel
Zn	0 - 500	>500	>500	Zink

For at asken kan benyttes, er der, af miljømæssige årsager, opstillet en række krav som vist i tabel 9. Disse krav medfører færre anvendelsesmuligheder hvis asken befinder sig i en højere kategori.

Tabel 10: maksimale værdi af tungmetaller i ubehandlet aske, målt ved oplukning (afsnit M.3).

Fulde tabel: bilag D.

Kemiske forkortelse	Stofmængde [mg/kg]	Fulde navn
Pb	66	Bly
Ca	12398	Cadmium
Cr	86	Chrom
Cu	110	Kobber
Hg	-	Kviksølv
Ni	23	Nikkel
Zn	902	Zink

Ved en sammenligning mellem tabel 9 og tabel 10 bemærkes det, at bly, cadmium og zink overstiger grænserne for kategori 1, mens chrom, kobber og nikkel overholder grænserne. Kviksølv vides det ikke hvordan forholder sig, da der ikke blev testet for dette. Bly overstiger sin grænse for kategori 1 med 32 %, hvorom det må antages at være et af de mindre problemer for asken i forhold til disse bestemmelser. For zink ses der derimod en overstigning på 80 %, hvilket gør dette til et problem der bør forsøges mindsket hvis asken skal bruges til produktion af beton. Problemet med zink virker dog ubetydeligt, sammenlignet med det for cadmium, hvor kategori 1 grænsen ligger på 0,5 mg/kg. For asken ses det at denne grænse er væsentligt lavere end værdien asken befinder sig på. Dermed må det forventes, at der skal gøres en stor indsats for at sænke denne værdi,

før asken kan tages i brug. Dette er på trods af der ikke er nogen øvre værdi for kategori 2 og 3, hvor der blot stilles krav til hvor tæt det må være på drikkevand [Retsinformation.dk, 2011]. Det kan også undersøges om cadmium bindes til betonen, således at der ikke er risiko for at inhalere det, hvilket er sundhedsskadeligt [Godt et al., 2005].

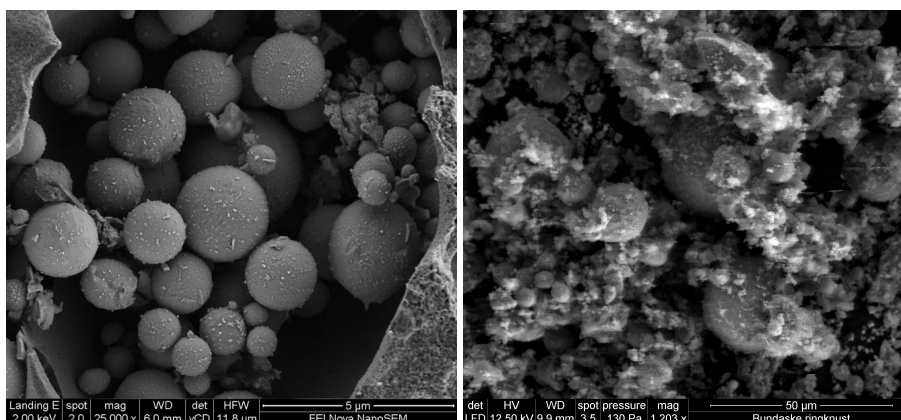
Tabel 11: Testede krav for brug af flyveaske, samt de tilhørende fundne værdier af bundasken.

Kilde:[DS/EN450-1, 2012].

	Metode	Kategori	Krav	Fundne værdi	
Organisk materiale	EN 196-2	A	<5,00 %	5,65 %	
		B	<7,00 %		
		C	<9,00 %		
Klorid	EN 196-2	-	<0,10 %	Før vask	Efter vask
				0,39 %	0,07 %

Det ses af tabel 11, at asken befinder sig i kategori B, da glødetabet ligger på 5,65 % (tabel 8). Hvad dette medfører af restriktioner fremgår dog ikke af standarden. Det skal tilgængæld nævnes at glødetabet har indflydelse på i blanding af luft i beton. Luften bisættes for at øge frostbestandigheden. For at beskytte eventuel armering i betonen, skal kloridindholdet i asken befinde sig under 0,10 % af den samlede vægt for asken. Det ses ud fra tabel 11, at den dette krav er overholdt efter vaskning af asken. Dette bekræfter endnu engang behovet for udvaskning af saltene i asken. Det målte ionindhold af NO_3 og SO_4 er også at finde i bilag E.

Asken blev undersøgt nærmere ved SEM-mapping hvor der bl.a. blev taget billeder af denne. Et SEM-billede af flyveaske viser at den består af små glaskugle-lignende partikler [Benscheidt et al., 2010], hvorfor dette udseende er at foretrække for bundasken, da det herved kunne tyde på puzzolanske egenskaber for denne.



Figur 9: Til venstre ses et SEM-billede af en flyveaske [FEI, 2013] og til højre ses et SEM-billede af ringformalet og vasket bundaske fra Vattenfall Amagerværket. (Bemærk at størrelsesforholdet er forskelligt på de to SEM-billeder)

Som det ses på figur 9 er bundasken en hel del mere "fluffy" end flyveasken, hvilket skyldes at der stadig er en del salte og andre stoffer som adskiller sig fra de kugle-formede partikler der forsøges at opnå. Når dette er sagt, kan der under de "fluffy" dele ses en tendens til at bundasken ligner flyveasken, hvorfor det forventes at den har lignende egenskaber, omend i mindre grad.

Da de fundne værdier, i dette afsnit, holdes op i mod værdier som bl.a. er fastsat for andre typer af aske, kan sammenligningen ikke være endegyldig, men blot retvisende. Det ses at asken iflg. tabel 9 og tabel 10 kan benyttes i anvendelseskategori 2 og 3. Dog skal det også understreges at anvendelseskategori 1 er den eneste som indeholder et maksimumskrav for de målte tungmetaller. De resterende kategorier har kun et minimum, hvilket gør at asken ikke kunne være placeret dårligere. Et lavt vandindhold blev dertil fremvist, samt en pH-værdi på 12,5. At glødetabet befinder sig på 5,7 % medfører at asken befinder sig i kategori B (ift. standarden for flyveaske). Asken overholder også kravet om kloridindhold efter udvaskning af saltene, hvilket gør denne brugbar i armeret beton. Til slut bemærkes det at asken til dels ligner flyveaske ved SEM-billeder, hvorfor puzzolanske egenskaber kan forventes.

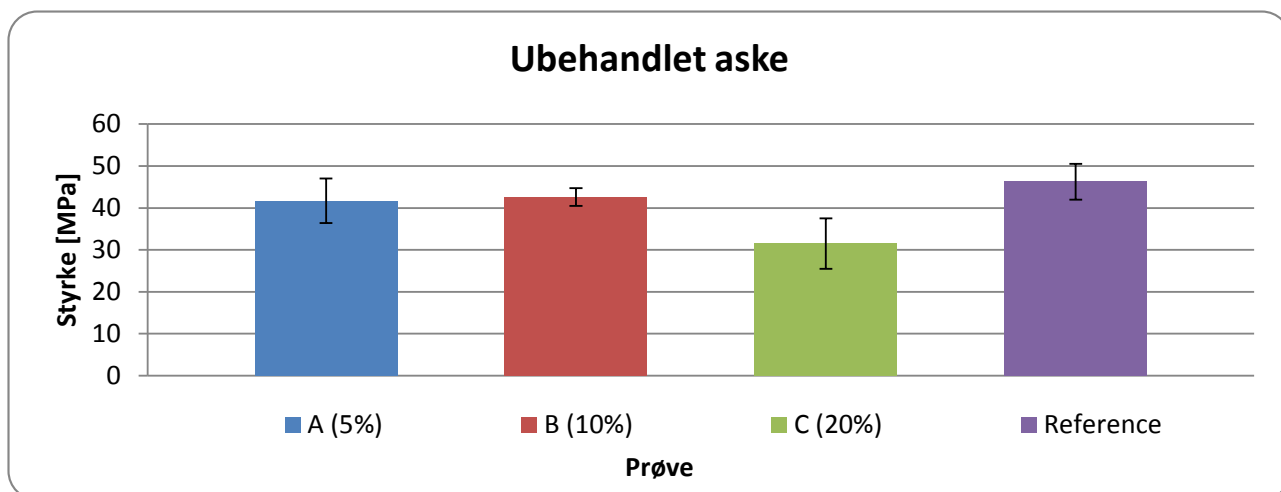
4.2 Mørtel

4.2.1 Test af mørtelprismer

For at asken kan benyttes, skal det sikres, at den ikke svækker betonens styrke betydeligt. I dette projekt bliver der set på referenceprøver og primært på mørtelens styrkeegenskaber. Dette skyldes at, mørtelen er det nemmeste at optimere rent forsøgmæssigt og sammenlignet med beton. Ydermere mindskes askens indflydelse på betonen, når flere komponenter tilsættes. På baggrund af dette blev blandingsrecepterne, som vist i tabel 7, anvendt. I første omgang blev der udført en screening af 7-døgns prøver, der førte til et videre arbejde med de resterende prøver der hærdede i hhv. 7-, 14-, 21-, 28-, 35- og 42-døgn.

Resultaterne, og den videre udvikling af forsøgene, disse medførte, vil blive diskuteret i dette afsnit.

I screeningen blev der først set på blandinger af typerne: Reference, prøve A, B og C fra tabel 7.



Figur 10: Søjlediagram over trykstyrken for 7-døgns prøverne med ubehandlet aske. I prøverne er cementen erstattet med hhv. 5, 10 og 20 % aske. til sammenligning er angivet reference (0 % aske)

Ud fra figur 10, ses det at erstatning af cement med aske, ikke er gunstig når der anvendes ubehandlet aske. Det skal bemærkes, at prøve B tilsyneladende har en højere styrke end prøve A. Dog ligger denne afvigelse indenfor usikkerheden i dette forsøg. Under forsøget begyndte dele af samtlige prøver dertil at smuldre, som vist på figur 11.



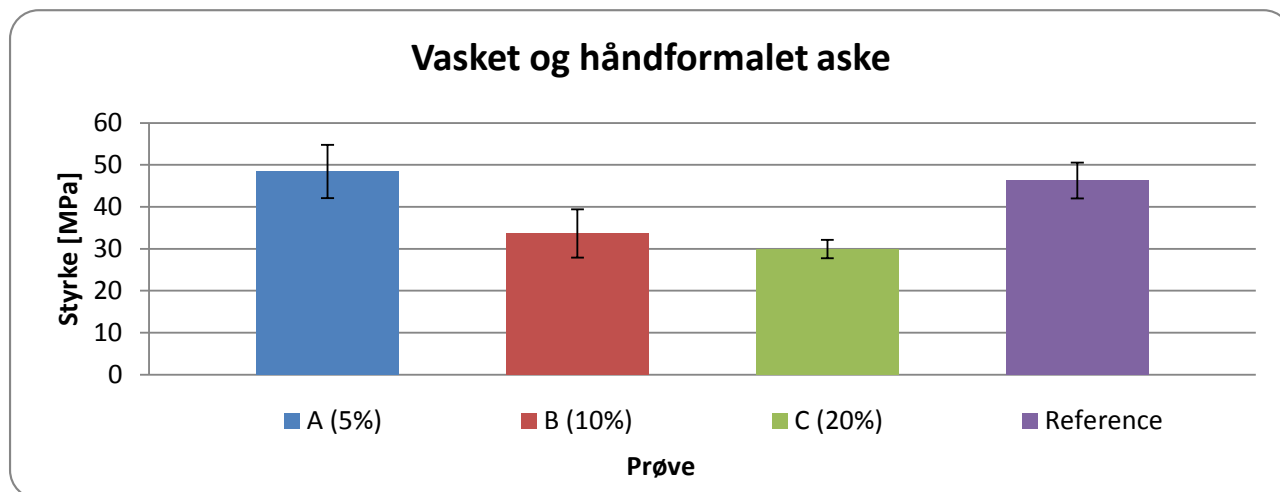
Figur 11: Prøve der smuldrede under styrkeprøvningen.

De prøver der smuldrede, havde væsentligt lavere styrke end andre med samme aske procent. Prøvernes tendens til at smuldre resulterede derfor i en større spredning i resultaterne, hvilket fremgår af tabel 12:

Tabel 12: Standardafvigelser for de uvaskede 7-døgns prøver og sammenligning af disse på baggrund af trykstyrkerne, hvor den relative standardafvigelse beskriver forholdet mellem standardafvigelsen og trykstyrken.

Prøve	Gennemsnitslige trykstyrke [MPa]	Standardafvigelse [MPa]	Relativ standardafvigelse [-]
A (5 %)	41,7	5,8	14 %
B (10 %)	42,6	2,3	5 %
C (20 %)	31,5	6,6	21 %
Ref	46,25	4,3	9 %

Af tabel 12 fremgår det, at afvigelse i specielt prøve A og C, medfører en vis usikkerhed omkring disse resultater. Det blev her antaget at afvigelsen kunne nedbringes ved at nedbringe mængden af smuldrende prøver. Hvad der skyldtes de smuldrende prøver er uvist, men det vurderes, at det skyldes inhomogenitet i prøverne. Denne inhomogenitet blev yderligere bekræftet af, at flere prøver viste vidt forskellige måleresultater i forskellige ender af samme mørtelprøve. Denne inhomogenitet formodes at stamme fra saltene i asken, som ved blandingen bliver opløst i vandet og dermed øger porøsiteten eller fra fejl i blandingproceduren. For at undgå saltene, er asken derfor vasket, som beskrevet i afsnit 3.2.1 og efterfølgende tørret og håndformalet.



Figur 12: Søjlediagram over trykstyrken for 7-døgns prøverne med vasket og håndformalet aske.

Det ses på figur 12, at den vaskede og håndformalede aske skaber en bedre mørtel når 5 % af cementen er uskiftet med vasket og håndformalet aske, ift. den uvaskede aske. Til sammenligning med referencen, ses det at prøve A er bedre. Dog ikke med mere end at det ligger indenfor usikkerheden. Prøverne for B og C viste derimod tegn på at være blevet svagere. Referencen er den samme som tidligere.

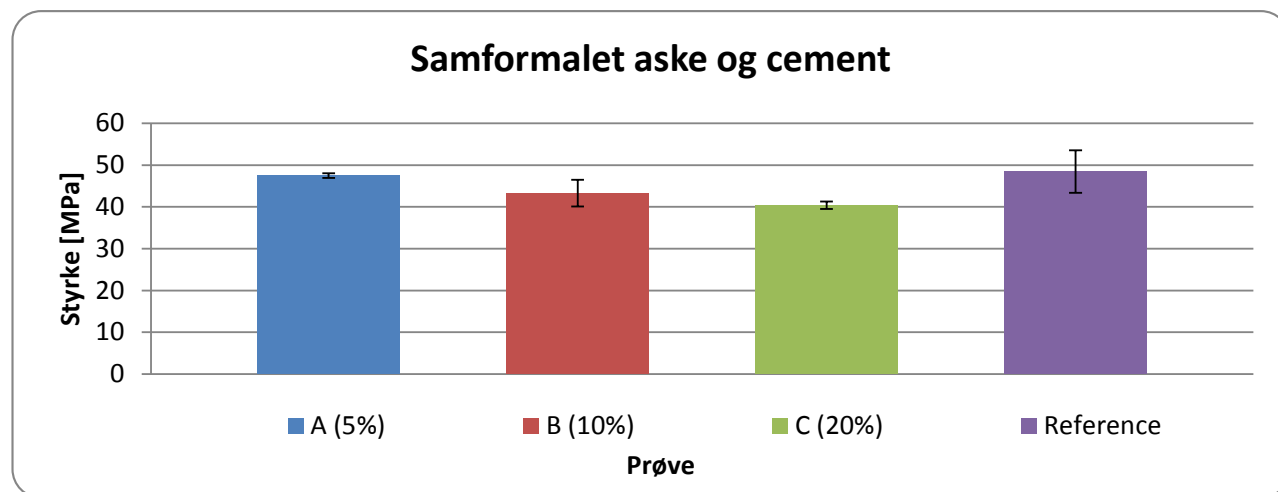
For at vurdere styrkernes troværdighed, ses der igen på standardafvigelsen og denne i forhold den gennemsnits-

lige trykstyrke.

Tabel 13: Standardafvigelser for de vaskede 7-døgns prøver og sammenligning af disse på baggrund af trykstyrkerne. Den relative standardafvigelse beskriver forholdet mellem standardafvigelsen og trykstyrken.

Prøve	Gennemsnitslige trykstyrke [MPa]	Standardafvigelse [MPa]	Relativ standardafvigelse [-]
A	48,4	6,33	13 %
B	33,7	5,76	17 %
C	30,0	2,19	7 %
Ref	46,3	4,26	9 %

Det bemærkes at den relative standardafvigelse for prøve A og C er faldet, mens prøve B er steget. Dette vidner om en usikkerhed i resultaterne for prøve B, mens det prøve A og C's trykstyrker må antages at være mere standardiseret end dem for tabel 12. For prøve A, B og C, er den akkumulerede relative standardafvigelse nedbragt med 3 % i forhold til dem med ubehandlet aske. Dette tyder på, at ændringen i askens behandling, har medført et mindre interval hvor styrken af disse prøver befinder sig indenfor. Der blev stadig observeret prøver som smuldrede på niveau med det i figur 11 viste. Dette vurderes at være årsagen til det øgede udsving i prøve B. På baggrund af dette, blev der sigtet efter at nedbringe inhomogeniteten yderligere. Dette skete ved at tilføje ringknusning, til bearbejdningen (beskrevet i afsnit 3.2.3), hvor asken blev samformalet med cementen. Dertil blev cement til referenceprøven også formalet for at give et retvisende sammenligningsgrundlag.



Figur 13: Søjlediagram over trykstyrken for 7-døgns prøverne med vasket aske, hvor asken og cement blev samformalet i ringknuser.

Det ses på figur 13, at der er sket en markant ændring i prøve B og C's trykstyrke, i forhold til de tidligere værdier. Under disse forsøg blev antallet af prøver der smuldrede også nedbragt. Dette talte for at det videre

arbejde skulle baseres på denne fremgangsmåde, hvilket er yderligere bekræftet af tabel 14 og tabel 15.

Tabel 14: Standardafvigelser for de samformalet 7-døgns prøver og sammenligning af disse på baggrund af trykstyrkerne. Den relative standardafvigelse beskriver forholdet mellem standardafvigelsen og trykstyrken.

Prøve	Gennemsnitslige trykstyrke [MPa]	Standardafvigelse [MPa]	Relativ standardafvigelse [-]
A	47,5	0,56	1 %
B	43,3	3,17	7 %
C	40,4	0,90	2 %
Ref	48,5	5,07	10 %

Ovenfor ses det at de relative standardafvigelser for prøve A, B og C er de lavest observerede. Ved at formale cementen, steg dens relative standardafvigelse med 1 %. Dette skete dog samtidig med at dens gennemsnitslige styrke steg med ca. 2 MPa. ift. den reference med den ubehandlet cement. Principelt sker der en marginal ændring af cementens egenskaber ved formaling. Holdes styrkeparametrene i tabel 14 op mod dem i figur 10, ses det dertil også at behandlingen af asken har øget korttidsstyrken af samtlige prøver. På baggrund af dette og tabel 15, blev det videre arbejde foretaget med denne bearbejdningsmetode. Alt tyder på en samformaling resulterer i en mere homogen cement plus aske og derved et bedre blandbart mørtelprodukt.

Tabel 15: Sammenligning af alle resultater for screeningen af 7-døgns prøverne.

Prøve	Gennemsnitslige trykstyrker [MPa]		
	Ubehandlet aske	Vasket og håndformalet aske	vasket samt samformalet aske og cement
A	41,7	48,4	47,5
B	42,6	33,7	43,3
C	31,5	30,0	40,4
Akumuleret relative standardafvigelser	40 %	37 %	10 %

Ud fra tabel 15 ses det, at alt, på nær prøve A, taler for at formale materialet mekanisk sammen med cementen. Dog er den akkumulerede relative standardafvigelse væsentligt højere for både ”ubehandlet” og ”vasket og formalet” ift. den samformalede version. Den relative standardafvigelse for prøve A, blev også nedbragt med 13 % fra ”vasket og formalet” til den samformalede. Den mekaniske bearbejdning af aske sammen med cementen resulterede altså i et mere homogent bindemateriale.

Tabel 16: Sammenligning af mængden af aske og 7-døgnsstyrken ift. referenceprøven.

Prøve	Aske	Styrketab ift. ref
A	5 %	2 %
B	10 %	11 %
C	20 %	17 %

Det ses at prøve A, udnytter asken bedst muligt. Her bliver 5 % aske til et tab på 2 % af styrken. Dette fald på 2 %, falder indenfor usikkerheden. På baggrund af denne screening, kunne det tyde på at asken virker som en filler i det tidlige stadie, frem for at indgå i nogle kemiske processer for styrketilvæksten. Da prøve A viste lovende resultater, blev denne mængde af aske, omdrejningspunktet for de videre undersøgelser.

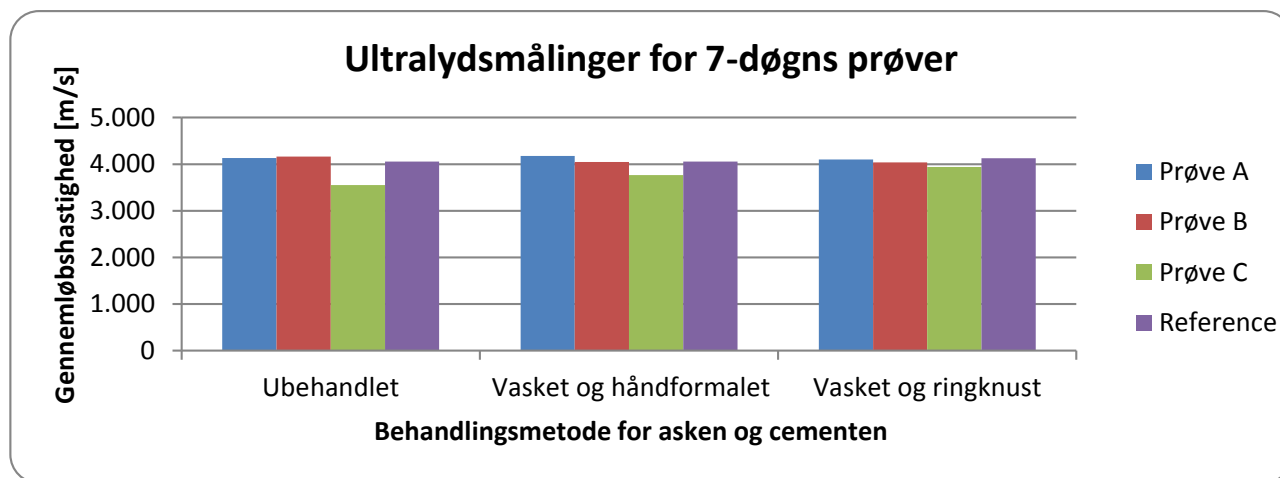
Ringknuserens funktion er at gøre partiklerne finere og dermed skabe et større overfladeareal, hvilket burde øge reaktionshastigheden, som beskrevet i afsnit 2.4. Derfor blev overfladearealet undersøgt for de brugte komponenter, som vist i tabel 17.

Tabel 17: Det målte overfladeareal ved laserdiffraction.

Prøve	Overfladeareal [m^2/g]
Ubehandlet aske	0,754
Vasket og håndformalet aske	0,775
Vasket og formalet aske	0,872
Ubehandlet cement	1,08
Formalet cement	1,25
Samformalet cement med 5 % behandlet aske	1,28

Det kan ses, at askens overfladeareal stiger når det bliver formalet. At formale cementen giver også positive resultater, da dette i sig selv øger overfladearealet. Derudover øges overfladearealet yderligere når asken og cementen samformales. Dette er dog kun med $0,03 \text{ m}^2/\text{g}$, hvilket derfor kan skyldes tilfældigheder. Det blev på den baggrund valgt, at samformale i de videre forsøg.

For prøverne blev der også set på hvordan ultralyd bevægede sig igennem prøverne. Dette blev udført, for at se om der var en ændring i forhold til metoden hvorpå komponenterne blev behandlet. Dertil blev der også set på, hvorvidt der skete en ændring når mængden af aske blev øget.



Figur 14: Sammenligning af ultralydsmålinger for forskellige mængder af aske og forskellige behandlingsmetoder.

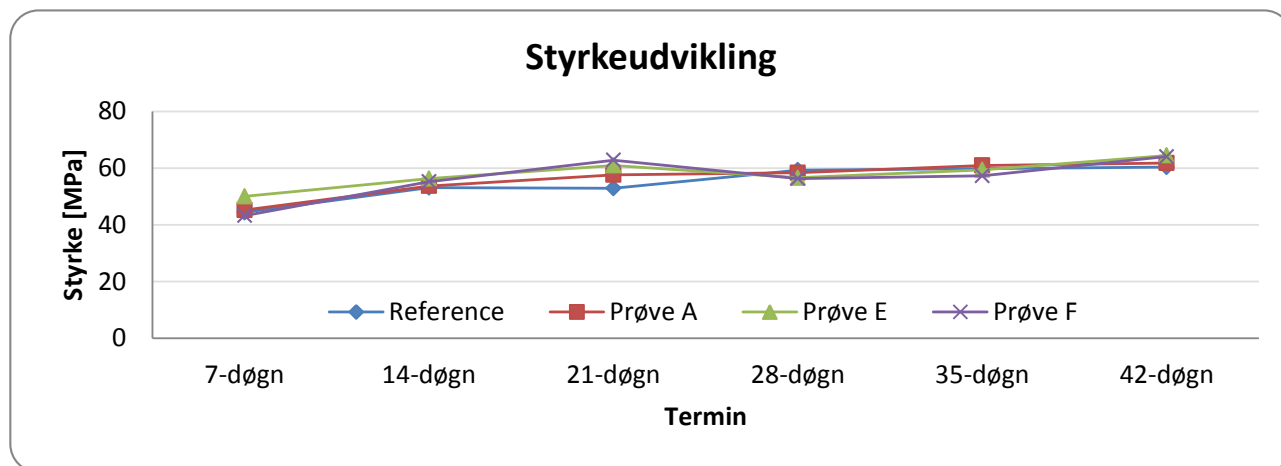
Ultralydsmålingerne viser umiddelbart at behandlingen, samt mængden, af aske spiller en faktor i gennemløbshastigheden. Dette kan skyldes en øget mængde faststof i prøverne ift. porevolumen. På baggrund af dette, blev der arbejdet videre med ultralyden og set på porøsiteten i udvalgte støbninger. Det bør nævnes, at ultralydsmålingerne blev udført som beskrevet i afsnit 3.4.2. Med denne metode opstod der visse problemer, da mængden af gel der blev tilført og hvorledes afsenderen, samt modtageren, af ultralyden præcist blev placeret, har indflydelse på resultaterne. Mere specifikt kunne en ikke plan overflade skabe et lille luftrum mellem denne og modtager/afsender, som så skulle fyldes ud af gel. Som beskrevet i afsnit 2.2, bevæger lyden sig langsommere igennem flydende materialer end faste materialer. Dermed øgede dette gennemløbstiden. Ydermere skal målingen også foregå inden gelen begynder at trænge ind i mørtelprøven. Alt i alt, medførte dette en betydelig usikkerhed omkring validiteten af resultaterne.

Det næste skridt var herefter at have nogle prøver til at hærde over længere tid og evt. ændre i sammensætningen af komponenterne. Som tidligere nævnt viste prøve A de mest lovende resultater og disse blev der derfor arbejdet videre med. Dertil fandt projektgruppen det interessant at se hvorvidt askens egenskaber tildels kunne erstatte cementens i andre forhold end 1:1. Derfor bestod de nye prøver af reference, rapidcement, A, E og F, hvor E og F havde fået fjernet 5 % cement og fået tilføjet den samme mængde aske med en faktor på hhv. 1,5 og 2. Dette blev bl.a. begrundet ud fra tabel 16, hvor 5 % aske kun svækkede mørtelens styrke med 2 % ift. referencen.

Der blev for disse prøver udført de samme afprøvninger som i screeningen (tryk og ultralyd). Dertil blev der også set på porøsiteten for 35- og 42-døgnsprøverne.

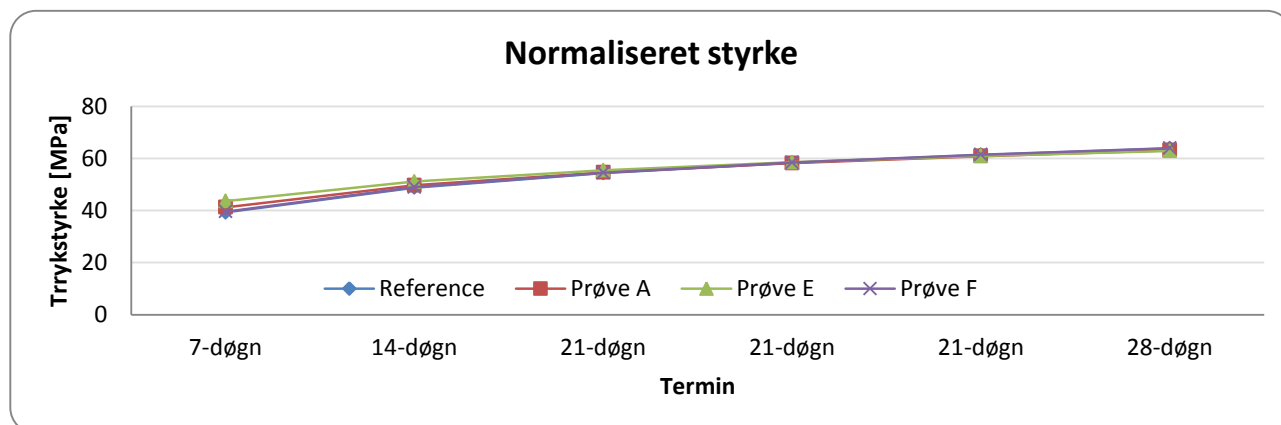
I de følgende resultater, er der set bort fra prøver som smuldrede (figur 11). De smuldrede resultater er stadig vist i bilagene, men farvet røde og dermed ikke brugt til videre beregninger og vurderinger.

Cements hæringsproces er som bekendt afhængig af mængden af tid den har hærnet. Dermed afhænger styrken også af tidsforløbet som forsøgt beskrevet ved figur 15.



Figur 15: Styrke for langtidsprøverne.

Ud fra figur 15 er det umuligt at vurdere forskellene på de fire prøver, da de skifter position frem og tilbage flere gange under forløbet. Det ses dog at prøve A holder en nogenlunde fin og forventelig stigning i styrke - altså samme som referencen. Derfor ses der på mørtlernes styrkeudvikling ift. tiden, som fremvises ved at normalisere styrkerne. Ved normalisering af styrkerne, er gennemsnitsværdierne for målingerne bestemt ved at opstille tendenslinjer for de forskellige prøver.



Figur 16: Styrkeudviklingen normaliseret ud fra målingerne i bilag F.

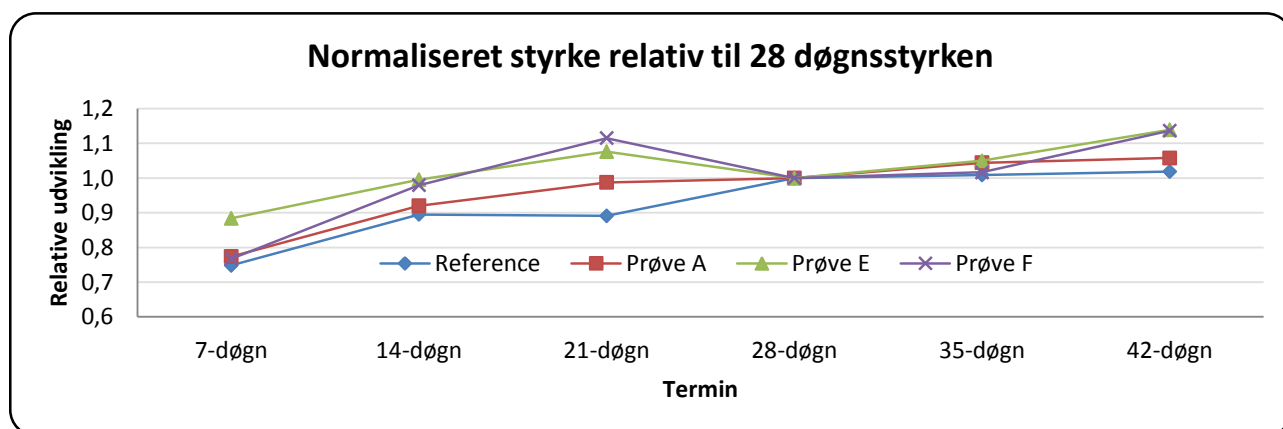
Det ses ud fra tendenslinjerne på figur 16, at den største forskel er efter 7 døgn, mens deres styrke efter 42 døgn ser ud til at være identiske. Ved 7 døgn befinder de normaliserede spændinger sig i intervaller $[39,2;43,7]$, mens at det efter 42 døgn befinder sig i intervallet $[62,9;64,0]$. Dette tyder altså på, at asken har en positiv indflydelse på produktet. Dette baseres på antagelsen om at fjernelsen af cement vil sænke styrken. Denne antagelse underbygges af resultater fra [Madsen og Fjelstrup, 2013] (vedlagt som bilag L), hvor prøverne for

samme referencerecept som i dette projekt, blev testet ved at fjerne 5 % af cementen. Dette medførte et fald i styrke på 5,6 %, sammenlignet med resultaterne fra bilag F, hvor der var tale om 44,4 MPa i forhold til de 41,9 MPa i [Madsen og Fjelstrup, 2013]. Resultaterne fra figur 16 tyder på at asken øger den tidlige styrke, mens den efter 42 døgn ender på samme styrke.

Tabel 18: Funktionsudtryk og R-kvadrater for tendenslinjerne i figur 16.

Prøve	Funktionsudtryk	R-kvadrat
A	$12,2\ln(x)+17,5$	0,72
E	$10,8\ln(x)+22,7$	0,71
F	$13,6\ln(x)+13,1$	0,67
Reference	$13,7\ln(x)+12,6$	0,74

Det ses ud fra tabel 18, at R-kvadratet er under 0,75 for samtlige prøver. Dertil er R-kvadratet højest for referencen. Altså er referencen den mest præcise af disse forskrifter. Et øget R-kvadrat betyder at resultaterne afviger mindre fra tendenslinjen end for et lavt R-kvadrat. Det lave R-kvadrat betyder til gengæld ikke at resultaterne ikke er sammenlignelige. Dette skyldes at de allesammen befinder sig indenfor et interval på 0,07 (0,03 hvis der ses bort fra prøve F). Dette betyder at de stadig kan sammenlignes med hinanden, men at der skal tages forbehold for det lave R-kvadrat ved sammenligning med andre prøver. Der henvises til bilag I, hvor de relative standardafvigelser, samt ændringen i styrken ift. referencen kan ses.

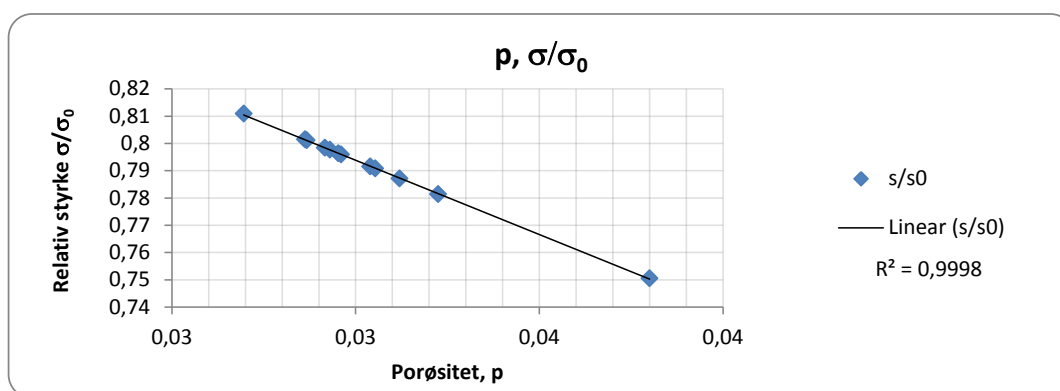


Figur 17: Normalisering af prøvernes styrke, ud fra deres 28-døgns styrke.

For at vurdere udviklingen af styrken, over tiden, i forhold deres tilhørende 28-døgns styrke, er figur 17 oprettet. Her er 28-døgns styrken sat til at være 100 % og de resterendes prøver er deraf beregnet. Det første der bør bemærkes ved denne opstilling, er at 21-døgns prøven for E og F er større end de tilhørende for 28-døgnsprøverne. Med mindre der er blevet nedbrudt noget materiale i denne periode (og deraf faldet i styrken), må det begrundes med afvigelsen som ses i alle resultaterne. Den eneste af disse prøver som giver en brugbar linje, er prøve A,

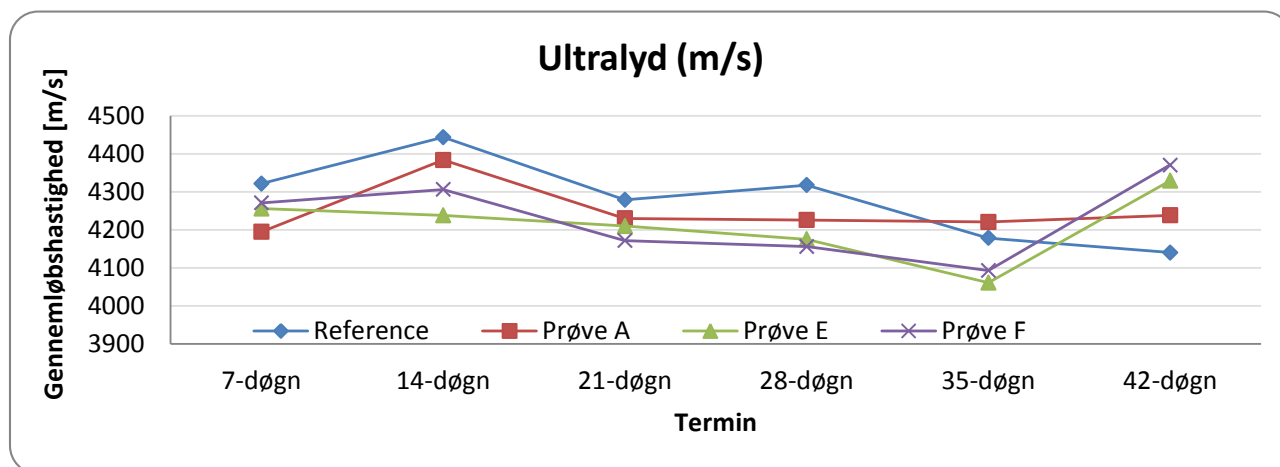
hvor det ses at styrken konstant stiger men flader ud. Hvis der ses bort fra referenceprøvens 21-døgns måling, udvikler denne sig også som forventelig. Sammenlignes disse, udvikler A hurtigere end referencen, i forhold til sin 28-døgns styrke, både før de 28 døgn og efter.

Da styrken er omvendt proportional med porøsiteten som nævnt i afsnit 2.1, er denne også blevet undersøgt. Porøsiteten blev målt både ved ultralyd og ved at måle hvor meget vand prøverne kunne indeholde. Når porøsiteten først er fundet kan denne sammenlignes med den relative styrke via Ryschkewitchs formel, som vist i ligning 3, hvorved en graf kan opstilles. Porøsiteten som blev målt ved at måle vægten af de frisk-våde prøver og vægten af samme prøver efter en nat i stinkskaab, blev kun målt på 35- og 42-døgns prøverne da det blev antaget at det ville have for stor indflydelse på tidligere prøvers hærdningsproces. I figur 18 ses sammenhængen mellem porøsiteten og den relative styrke via Ryschkewitchs formel:



Figur 18: Sammenhængen mellem den relative styrke og porøsiteten.

Det ses her at der er en fuldstændig lineær sammenhæng mellem de to, som følge af det lave interval på x-aksen, hvilket også var forventet jf. teorien bag. Det skal dog bemærkes, at i nuværende forsøgsrække ses på et yders begrænset spænd på porøsiteten (0,03-0,04) Det blev ydermere forsøgt at finde en sammenhæng mellem porøsiteten og ultralydsmålinger, og herved også mellem ultralyd og styrke. Nedenfor ses en oversigt over ultralydsmålinger for 7-42 døgn:



Figur 19: Gennemløbshastighed af mørtelprøver ift. tiden de har hærdet.

Ud fra figur 19 er der ingen tegn på en sammenhæng mellem hærdningsforløbet og ultralydsmålingerne. Det ses at ultralyden nogle steder stiger med tiden, mens den andre steder falder. Det forventlige var at den ville falde når der dannes faststof. Dog dannes porerne også her, hvilket gør det svært at vurdere forløbet. Dertil er der også forskellige reaktioner der spiller ind på forskellige tidspunkter (som beskrevet i afsnit 2.6). Dette skaber endnu en parameter i sammenhængen mellem ultralydsmålingerne og mørtelens egenskaber. Det bør nævnes at andre sammenhænge også blev søgt, hvilket kan ses ud fra bilag H.

Igennem dette afsnit blev usikkerhederne omkring forsøgsresultaterne for mørtelen klargjort. Dette ses bl.a. ud fra de relative standardafvigelser, styrkeudviklingens ændring over tiden, samt ultralydsmålingerne. Det blev dog vist at bearbejdningen af asken havde en positiv indflydelse på styrken efter 7 døgn. Styrken af den formalede cement steg med ca. 5 % i forhold til uformålet, herimod forekom en stigning i styrken på 17 - 28 % for blandinger med aske. Asken havde på trods af dette en negativ indflydelse på styrken med en stigende mængde aske i prøverne. Dertil blev det set ved de normaliserede spændinger, at styrkeudviklingen, jf. de normaliserede spændinger, var bedre med asken i de tidligere stadier. Det blev også klargjort at en sammenhæng mellem ultralydsmålingerne og mørtelprøvernes egenskaber ikke kunne begrundes ud fra disse resultater.

4.2.2 Bolomey

Som nævnt i afsnit 2.1 kan betonens trykstyrke for et givent v/c -forhold regnes ud vha. Bolomeys formel - ligning 2.

Bolomeys styrkeformel afhænger af to konstanter, K og α , som igen er afhængige af blandingen og cementtypen. Derfor var det nødvendigt at korrigere disse to, eftersom cementen var blevet formålet og derved blevet finere. For at korrigere disse to blev de plottet hver for sig og en tendenslinje blev opstillet med tilhørende ligning - se figur 35 og figur 36 i bilag J.

Efter korrektionen blev en aktivitetsfaktor fundet for asken ved både blanding A, F og E, via Bolomeys formel:

$$k = \frac{\left(\frac{F_c}{K} + \alpha\right) \cdot v - c}{p} \quad (22)$$

Eftersom aktivitetsfaktoren er afhængig af den målte trykstyrke, er det forventeligt at denne har en del udsving som følge af udsving i trykstyrke-resultaterne. Disse udsving ses bl.a. i tabel 19 herunder, hvor aktivitetsfaktorerne er opstillet for hhv. A, E og F for 7-42 døgn:

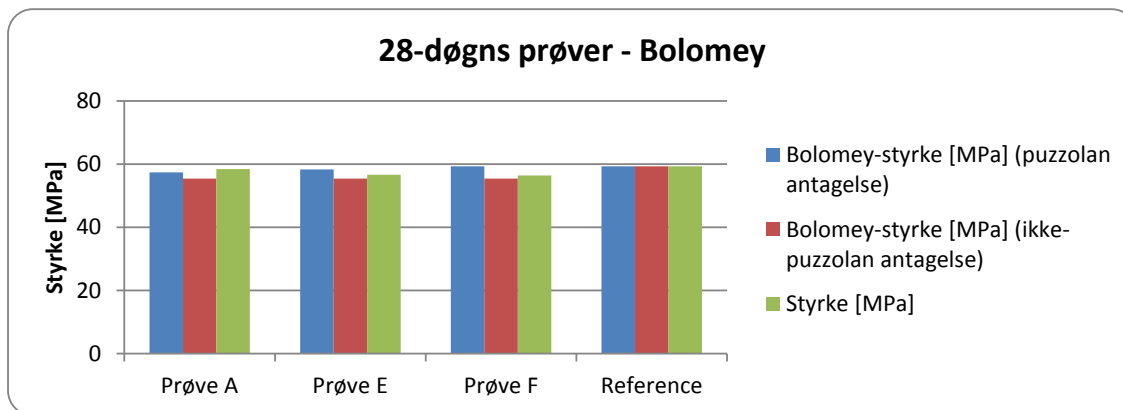
Tabel 19: Aktivitetsfaktoren udregnet for Prøve A, E og F for 7- og 28-døgn.

Blanding	7-døgn	14-døgn	21-døgn	28-døgn	35-døgn	42-døgn
A	1,56	1,17	2,35	0,77	1,30	1,97
E	2,09	1,26	2,18	0,21	0,60	1,38
F	0,47	0,79	1,91	0,13	0,17	0,98

Det ses at aktivitetsfaktoren har en tendens til at falde, med mængden af aske i blandingen, bortset fra blandingen for prøve E's 7- og 14-døgn. En grund til at disse falder ud, kan bl.a. være udsving i trykprøvningerne. Hvis der ses bort fra prøve E for 7- og 14-døgn, tyder det på at asken har en, ikke så meget puzzolansk effekt, men mere en form for filler effekt, hvilken er en knap så afgørende effekt for senere styrker - jf. afsnit 4.2. Det er svært at se en sammenhæng i udviklingen af aktivitetsfaktoren fra 7 til 42 døgn, da denne svinger i takt med styrkeprøvernes udvikling.

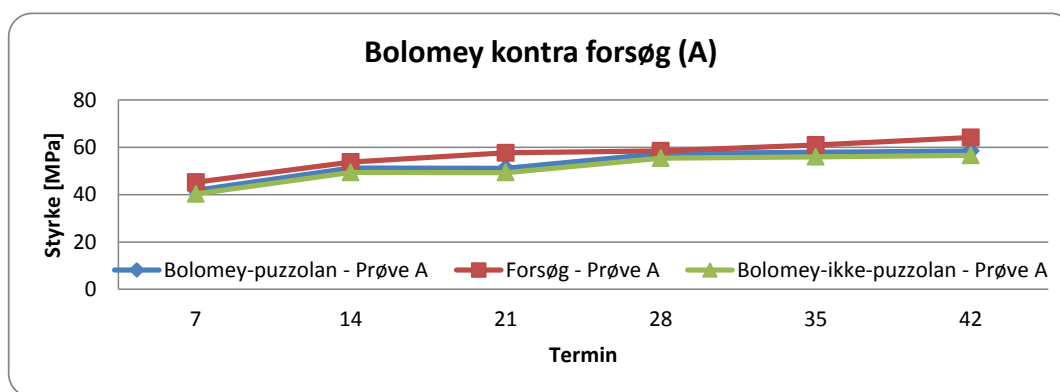
Bolomeys styrkeformel er empirisk. For at opstille de følgende grafer, er følgende derfor antaget: Ved puzzolansk effekt, antages aktivitetsfaktoren for asken at være $k = 0,5$, som for flyveaske. Ved ikke-puzzolansk effekt antages aktivitetsfaktoren at være $k = 0$, da den her ikke har nogen kemisk indflydelse. Herved kan to teoretiske kurver opstilles og sammenlignes med forsøgets resultater.

Ses der på 28-døgns styrkerne sammenlignet med Bolomey, ses det at E og F's styrker ligger tættere på den ikke-puzzolanske tendens, hvorimod A's styrke ligger tættest på den teoretiske puzzolanske styrke. Dette kunne tyde på en form for puzzolansk effekt ved små mængder aske, hvor den med stigende mængde mister sin indflydelse og blot fungerer som filler. Her skal der igen tages højde for udsving i trykprøverne.



Figur 20: 28-døgns trykstyrker sammenlignet med tilhørende teoretiske værdier.

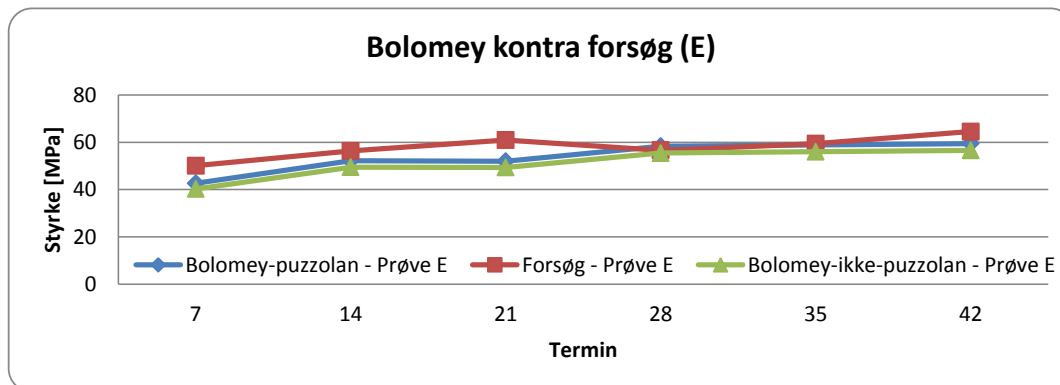
Det ses, ikke overraskende, at referencen er ens med både puzzolan-styrken og ikke-puzzolan-styrken, hvilket skyldes at bolomey's konstanter er korrigeret efter denne. Eftersom prøve A er den eneste der viser puzzolanske tendenser ses der først nærmere på denne:



Figur 21: Prøve A's styrker fra 7- til 42 døgn, sammenlignet med tilhørende teoretiske værdier.

Det ses her at styrken over hele linjen ligger over den teoretiske puzzolan-effekt, og derfor også over den teoretiske ikke-puzzolan-effekt. Dette styrker teorien om at asken har en puzzolansk effekt ved mindre mængder. Forskellen på de teoretiske ikke-puzzolanske og puzzolanske værdier er forholdsvis lav, så en afvigelse i trykprøvningerne kunne være afgørende her, hvorved det ikke er muligt at konkludere noget ud fra tallene. At prøve A's styrke ligger øverst over hele linjen tyder tværtimod på, at dette ikke er tilfældet, og at der derfor er en puzzolansk effekt.

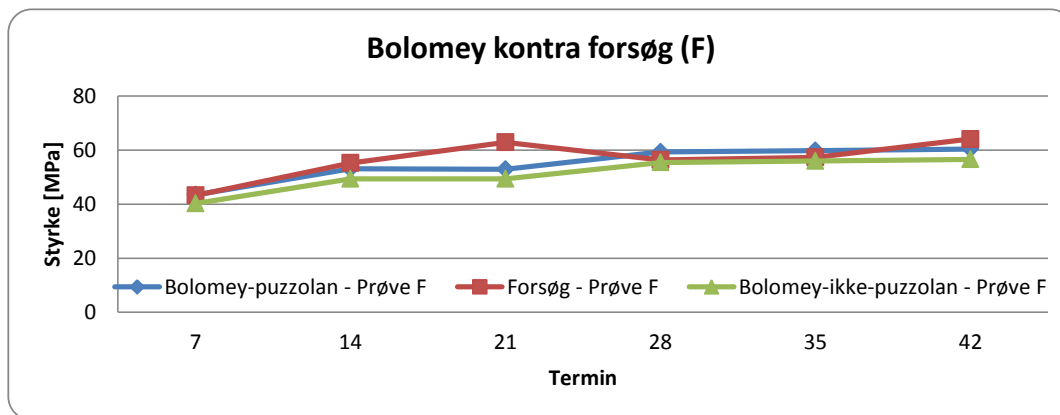
Ses der nærmere på styrkerne for prøve E, ses den samme sammenhæng som for prøve A, med den lille undtagelse at prøvestyrken ligger under puzzolan-styrken for 28- og 35-døgns prøverne:



Figur 22: Prøve E's styrker fra 7- til 42 døgn, sammenlignet med tilhørende teoretiske værdier.

Hvis der ses bort fra 28- og 35-døgns styrkerne, tyder det igen på at asken har en puzzolansk effekt, da den ligger over kurven for puzzolan-effekten. Det bemærkes ydermere at specielt 21-døgns styrken ligger over puzzolan-effekten, hvilket den også gør for prøve A, blot mere udtalt her.

Ved prøve F ses der den samme tendens som ved prøve E, hvor 21-døgn prøven ligger betydeligt over de teoretiske og hvor 28 samt 35 døgn prøverne ligger tættere på den ikke-puzzolanske kurve.



Figur 23: prøven F's styrker fra 7- til 42 døgn, sammenlignet med tilhørende teoretiske værdier.

Udsvingene i styrken af prøve F er generelt større end for prøve A og prøve E, hvilket tyder på en del usikkerhed i forsøgsresultaterne. Det ses, at styrken for 14- og 42 døgn er de eneste der ligger op ad puzzolan-kurven, hvor styrken for 7 døgn ligger under og styrken for 21 døgn ligger betydeligt over. Dette understøtter blot at der er forekommet en del udsving i trykprøvningerne af prøve F.

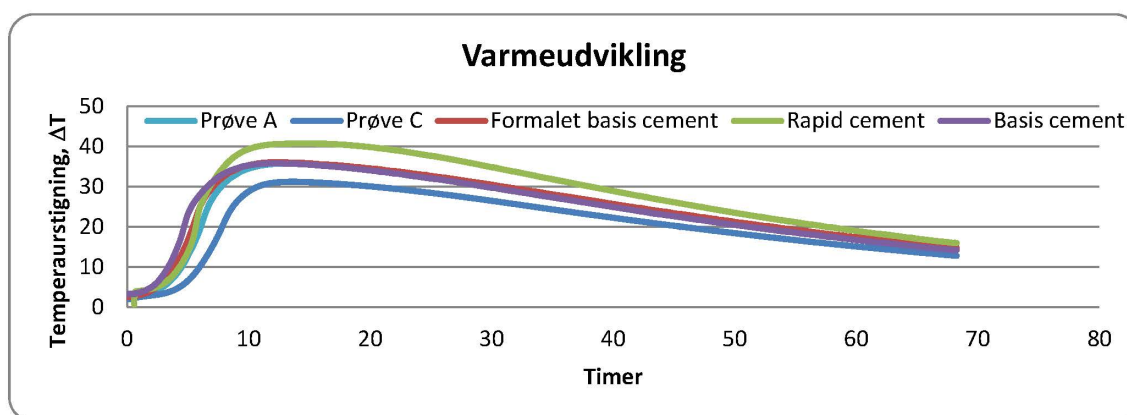
Igennem dette afsnit er det undersøgt om asken har puzzolanske egenskaber eller ej vha. bolomeys styrkefor-

mel. Ved at kigge nærmere på graferne for styrkeprøverne, ses der en delvis sammenhæng mellem kurven for den puzzolanske styrke og prøvestyrkerne, hvilket tyder på at asken har puzzolanske egenskaber. Ses der derimod kun på aktivitetsfaktoren, k , kan der ikke konkluderes andet end at aktivitetsfaktoren falder med mængden af aske i blandingen, hvilket modsat de andre resultater ikke tyder på en puzzolansk effekt. Disse taget i betragtning, og at de tre kurver ligger inden for hinandens usikkerhed, er det umiddelbart svært at konkludere at asken har puzzolanske tendenser, men at ændringen i styrke skyldes en form for filler effekt.

4.2.3 Varmeudvikling og Afbindingstid

Som nævnt i afsnit 2.5 er det en fordel at kende betonens og hermed cementpastaens varmeudvikling. Varmeudviklingen kommer af en række kemiske processer i cementpastaen, og kan derfor, i teorien, fremskyndes ved et højere overfladeareal af cementen - dette er gennemgået nærmere i afsnit 2.

For at teorien skal passe må den formalede cement derfor have en hurtigere varmeudvikling end den ikke formalede basis-cement. Hvis man kigger på figur 24 er dette også tilfældet, dog starter udviklingen for den formalede cement senere end for udgangs cementen:



Figur 24: Varmeudviklingen i forhold til start-temperaturen (ca. 22 °C), målt ved nær adiabatisk forhold.

På figur 24 ses det at den tidligste varmeudvikling forekommer hos basis cementen, og at den seneste forekommer hos C-prøven. Dette tyder på at asken i C-prøven ikke har medvirket til varmeudviklingen. Den hurtigste varmeudvikling forekommer hos rapid cementen, hvilket kunne forventes da dette er formålet med denne cement-type. Det ses at både prøve A, formålet cement og basis cement topper nogenlunde samtidigt, hvilket må betyde at formalingen af cement, samt samformaling cement med aske ikke har medført højere maksimal varmeudvikling, men en hurtigere varmeudvikling. Det ses på figur 24 at prøve A's varmeudvikling starter senere end basis cementen og den formalede basis cement. Eftersom at alle tre når den maksimale varmeudvikling nogenlunde samtidigt, må prøve A have den stejleste kurve for varmeudviklingen.

Afbindingstiden kan som nævnt i afsnit 2.5 findes på flere forskellige måder, en af dem værende, som her, ved varmeudvikling. Ved varmeudviklingen er afbindingstiden afhængig af hvor tidligt varmeudviklingen starter og til dels hastigheden af denne. Afbindingstiden for prøverne ved varmeudvikling er fundet ved skæringspunktet mellem tangenten for temperaturstigningen, udspecificeret i bilag K, og en vandret linje for begyndelsestemperaturen. Her 0, da det er ΔT der er afbilledet.

Som det ses herunder i tabel 20 har basis cementen den laveste afbindingstid, som følge af den tidlige reaktion:

Tabel 20: Afbindingstiden beregnet ud fra varmeudviklingen.

Blanding	Afbindingstid
A	3t 5min
C	4t 11min
Formalet basis cement	2t 42min
Basis cement	2t 20min
Rapid cement	3t 28min

Afbindingstiden for den formalede cement og prøve A ligger lige efter basis cementen, mens prøve C har den længste afbindingstid. Sammenlignes afbindingstiden for basis cement og rapid cement med de værdier der er opgivet fra Aalborg Portland, ses det at basis cementen i forsøget er målt til en lavere afbindingstid ($2t20min < 2t45min$) og at rapid cementen er målt til højere afbindingstid ($3t28min > 2t15min$). Dette tyder på en vis usikkerhed i forsøget, da det antages at deres resultater er mere troværdige. Dette forventes at være en følge af usikkerheder i blande proceduren og usikkerhed omkring tøndens adiabatisk egenskaber. Det ses dog at asken ikke reducerer afbindingstiden, da prøve A er højere end formalet basis cement (referencen) og prøve C har den højeste af de fem.

Ses der derimod på afbindingstiden målt manuelt med et vicat apparat, opstår der et lidt andet billede af askens indflydelse på afbindingstiden. Det ses igen at prøve C har klart den længste afbindingstid, men at den formalede cement har den korteste afbindingstid efterfulgt af prøve A og derefter basis cement. Dette kunne tyde på at asken i de rette mængder har indfyldelse på afbindingstiden og cementpastaens egenskaber, hvilket også er nævnt i afsnit 4.2.2.

Tabel 21: Afbindingstiden målt manuelt med vicat-apparat.

Blanding	Afbindingstid
A	5t 40min
C	7t 32min
Formalet basis cement	5t 30min
Basis cement	5t 50min

I dette afsnit er afbindingstid samt varmeudviklingen for aske- og reference-prøver gennemgået. Det ses at de ringmalede prøver viser tendenser til en stejlere temperaturstigning end basis cementen, hvilket tyder på at et højere blaine-tal giver hurtigere varmeudvikling. Det ses ydermere at asken viser tendenser på at forlænge afbindingstiden, da både prøve A og prøve C har længere afbindingstider end den formalede cement, målt ved begge metoder.

5 Konklusion

I dette projekt er en bundaske fra Vattenfall Amagerværket undersøgt i forbindelse med anvendelse i beton. Asken er blevet undersøgt ved en række mørtelforsøg hvor det er klargjort at indholdet af tungmetaller ikke overholder anvendelseskategori 1, men overholder anvendelseskategori 2 og 3. Her overstiger specielt cadmium grænsen for anvendelseskategori 1, hvorfor der skal gøres en indsats for at sænke denne. Askens pH-værdi ligger på ca. 12,5, hvilket stemmer overens med almindelig cementpastas pH på ca. 13.

Askens egenskaber er klarlagt ved en indledende 7-døgns screening af mørtelprøver med et askeindhold på 5 % til 20 %. Her er det vist, at mørtelprøvernes styrke stiger med forarbejdningen af asken, men at styrken reduceres med mængden af aske i mørtelprøverne. Det skal bemærkes at faldet i styrke fra reference-prøven til prøve A, med den samformalede cement/aske-blanding, ligger indenfor usikkerheden, hvorfor det antages at 5 % af cementen kan erstattes med aske uden tab af styrke. Fra helt ubehandlet aske til vasket og samformalede cement/aske-blanding ses en stigning i styrken på 15-25 %. Der er også observeret en øgning af den tidlige styrke for de samformalede blandinger ift. referenceprøven. En sammenhæng mellem styrken og porøsiteten blev vist vha. Ryschkewitch, mens det ikke viste sig muligt at fastlægge en sammenhæng mellem styrken og ultralydsmålinger.

Askens puzzolanske egenskaber er forsøgt fastlagt vha. Bolomeys styrkeformel. Der er opstillet en række kurver over den givne askeblandings styrke, holdt over for de teoretiske værdier for styrken af puzzolanske egenskaber og ikke-puzzolanske egenskaber. Asken viser svag tendens til at have puzzolanske egenskaber, men menes hovedsagligt at have en filler effekt. Aktivitetsfaktoren blev bestemt til at falde med mængden af aske i blandingen, hvilket understøtter de manglende puzzolanske egenskaber.

Cement/aske-blandingernes afbindingstid er bestemt ved antagelsen om adiabatisk varmeudvikling og manuelt med vicat-apparater. Den maksimale udviklede varme for basis cement, prøve A og formålet basis cement viser sig at være ens. Hvor basis cementen udvikler varmen over en længere periode, efterfulgt af den formalede basis cement og til slut prøve A med den hurtigste varmeudvikling af de tre. Afbindingstiden viser sig, ved vicat-forsøget, at stige med mængden af aske i blandingen, hvor samformalingen af cement og aske sænker denne. Afbindingstiden målt ved varmeudviklingen giver et uklart billede af sammenhængen mellem afbindingstid og formaling. Det bemærkes dog at afbindingstiden stiger med mængden af aske i blandingen.

Asken viser sig altså at have indflydelse på en række af betonens egenskaber:

- Styrke :
 - Styrken opretholdes med et 5% askeindhold af cementen.
 - Styrken reduceres med øget mængde askeindhold i cementen.
 - Styrkens spredning reduceres som følge af vask og formaling.
- Afbindingstid :
 - Afbindingstiden reduceres som følge af formaling.
 - Afbindingstiden øges med mængden af aske.
- Varmeudvikling :
 - Den maksimale varmeudvikling sænkes med mængden af aske.
 - Samformaling af aske og cement øger hastigheden varmen udvikles med.

6 Fremtidig arbejde

For at kunne bruge denne aske i industrien, bør resultaterne være standardiseret. For varmeudviklingen, kan dette gøres som i [Berrig og Hasholt, 2002], hvor den frigivet energi pr. kg bliver beregnet. Ultralydsmålingerne bør også optimeres, hvilket projektgruppen vurderer bør gøres ved brug af andet udstyr. Udstyret bør være således at personen der udfører eksperimentet i mindre grad kan have indflydelse på målingerne. På baggrund af sådanne målinger kan der igen ses på om der er en sammenhæng mellem gennemløbshastigheden og porøsiteten. Dette kan gøres igennem mere præcis viden omkring hvorledes de tre fasers (fast, flydende og gas) volumen udvikler sig ift. hinanden. En måling af bufferkapaciteten bør også laves i den videre undersøgelse af askens karakteristika. Den endelige afbindingstid bør også bestemmes, således at det vides hvornår cementen er hærdet nok til at klare den defineret mængde last.

Der bør også ses på hvorledes mængden af tungmetallet cadmium (Ca) kan sænkes, for at gøre asken mindre sundhedsskadelig. I dette kan der bl.a. uderrses vandet som mørtelen hærdet i, da der var bundfald at finde i dette.

Endeligt kunne det være interessant at se på styrkeparametrene for materialet, der er beskrevet i bilag A, samt dens eventuelle kemiske reaktioner.

7 Litteratur

- [Benscheidt et al., 2010] Benscheidt, N., vom Berg, W., Feuerborn, H. J., Heinz, D., Hohberg, I., Hugot, A., Lutze, D., Mengede, M., Pierkes, R., Schneider, E. og Wiens, U. (2010). *Handbook on fly ash in concrete - Principles of production and use*. Bau + Technik.
- [Berrig og Hasholt, 2002] Berrig, A. og Hasholt, M. T. (2002). Center for grøn beton - udførelse, varmeudvikling og plastisk svind. Rapport, Teknologisk Institution, Beton. URL http://www.gronbeton.dk/images/138484_Udforelse%20Varmeudvikling.pdf.
- [Dam et al., 2008] Dam, H., Gerward, L., Leistiko, O., Lindemark, T., Nielsen, A. og Sørensen, O. T. (2008). *Materialebogen*. Nyt.
- [Dansk-Betoninstitut-A/S, 1995] Dansk-Betoninstitut-A/S (1995). Anvisning i brug af højkvalitetsbeton.
- [DS2426, 2009] DS2426 (2009). Ds 2426:2009, beton - materialer - regler for anvendelse af en 206-1 i Danmark. Elektronisk. URL http://sd.ds.dk.globalproxy.cvt.dk/extranet/viewer3.py?project_nr=M237858&status=99.60.
- [DS259, 2003] DS259 (2003). Ds 259:2003. Elektronisk. URL http://sd.ds.dk.globalproxy.cvt.dk/extranet/viewer3.py?project_nr=52829&status=60.61.
- [DS/EN12457-1, 2002] DS/EN12457-1 (2002). Ds/en 12457-1. Elektronisk. URL http://sd.ds.dk.globalproxy.cvt.dk/extranet/viewer3.py?project_nr=42577&status=60.61.
- [DS/EN196-1, 2005] DS/EN196-1 (2005). Ds/en 196-1. Elektronisk. URL http://sd.ds.dk.globalproxy.cvt.dk/extranet/viewer3.py?project_nr=50753&status=60.60.
- [DS/EN196-3+A1, 2009] DS/EN196-3+A1 (2009). Ds/en 196-3 + a1:2009. Elektronisk. URL http://sd.ds.dk.globalproxy.cvt.dk/extranet/viewer3.py?project_nr=M236109&status=60.60.
- [DS/EN196-6, 2010] DS/EN196-6 (2010). Ds/en 196-6:2010. Elektronisk. URL http://sd.ds.dk.globalproxy.cvt.dk/extranet/viewer3.py?project_nr=M229209&status=60.60.
- [DS/EN450-1, 2012] DS/EN450-1 (2012). Ds/en 450-1:2012. Elektronisk. URL http://sd.ds.dk.globalproxy.cvt.dk/extranet/viewer3.py?project_nr=M245922&status=60.60.
- [FEI, 2013] FEI (2013). Uncoated fly ash sem. internet. Besøgt 10.06.2013. URL <http://www.fei.com/resources/image-gallery/fly-ash-7881.aspx>.
- [Garnier et al., 2011] Garnier, V., Piwakowski, B., Abraham, O., Villain, G., Payan, C. og Chaix, J. F. (2011). Concrete and building materials. *Elsevier*, 1:598-613. URL <http://dtu-ftc.cvt>.

dk/cgi-bin/fulltext/elsevier?pi=/0950/0618/0043000c/13001062.pdf&key=385635678&rfr_id=info:sid/dlib.dtu.dk:DTUDigitalLibrary.

- [Geiker, 2010] Geiker, M. (2010). Betonprøvning 2010. Undervisningsmateriale.
- [Godt et al., 2005] Godt, J., Scheidig, F., Grosse-Siestrup, C., Esche, V., Brandenburg, P., Reich, A. og Gronenberg, D. A. (2005). The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health. Elektronisk. URL <http://www.occup-med.com/content/1/1/22>.
- [Gottfredsen og Nielsen, 2006] Gottfredsen, F. R. og Nielsen, A. (2006). *Bygningsmaterialer - Grundlæggende egenskaber*. Polyteknisk forlag.
- [Hansen, 1995] Hansen, P. F. (1995). *Materialefysik for bygningsingeniører*. Statens byggeforskningsinstitut.
- [Hasholt et al., 2002] Hasholt, M. T., Berring, A. og Mathiesen, D. (2002). Center for grøn beton - anvisning i grøn beton. Rapport, Teknologisk Institution, Beton.
- [Herholdt et al., 1985] Herholdt, A. D., Justesen, C. F. P., Nepper-Christensen, P. og Nielsen, A. (1985). *Betonbogen*. Aal.
- [Jennings&Thomas, 2008] Jennings&Thomas (2008). The fineness and particle size distribution of portland cement. web. Hamlin Jennings & Jeff Thomas. Besøgt 24-05-2013. URL http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph3_7.html.
- [Johannesson, 2012] Johannesson, B. (2012). *Introduction to concrete technology - lecture notes (11563)*, bind 3. DTU Civil Engineering.
- [Johannesson, 2013] Johannesson, B. (2013). Ct03 raw materials. Elektronisk.
- [Madsen og Fjelstrup, 2013] Madsen, A. og Fjelstrup, T. (2013). Forsøgsdata.
- [MalvernIndustries, 2013] MalvernIndustries (2013). Laser diffraction. Elektronisk. besøgt 17-05-2013. URL http://www.malvern.com/labeng/technology/laser_diffraction/laser_diffraction.htm.
- [Neville, 1973] Neville, A. M. (1973). *Properties of Concrete*. Pitman Publishing.
- [Portland, 2006] Portland, A. (2006). Mineralske tilsætninger. Elektronisk. Læst d. 23-05-2013. URL <http://www.aalborgportland.dk/default.aspx?m=4&i=109&pi=22&pr=5>.
- [Portland, 2007] Portland, A. (2007). *Cement og Beton*. Aalborg Portland, 18. udgave udgave.
- [Portland, 2013] Portland, A. (2013). Rapid og basis afbindingstid. internet. URL <http://www.aalborgportland.dk/default.aspx?m=2&i=92> and <http://www.aalborgportland.dk/default.aspx?m=2&i=93>.

[Retsinformation.dk, 2011] Retsinformation.dk (2011). Bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret, uforurenet bygge- og anlægsaffald. Elektronisk. URL <https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=134831>.

Bilag

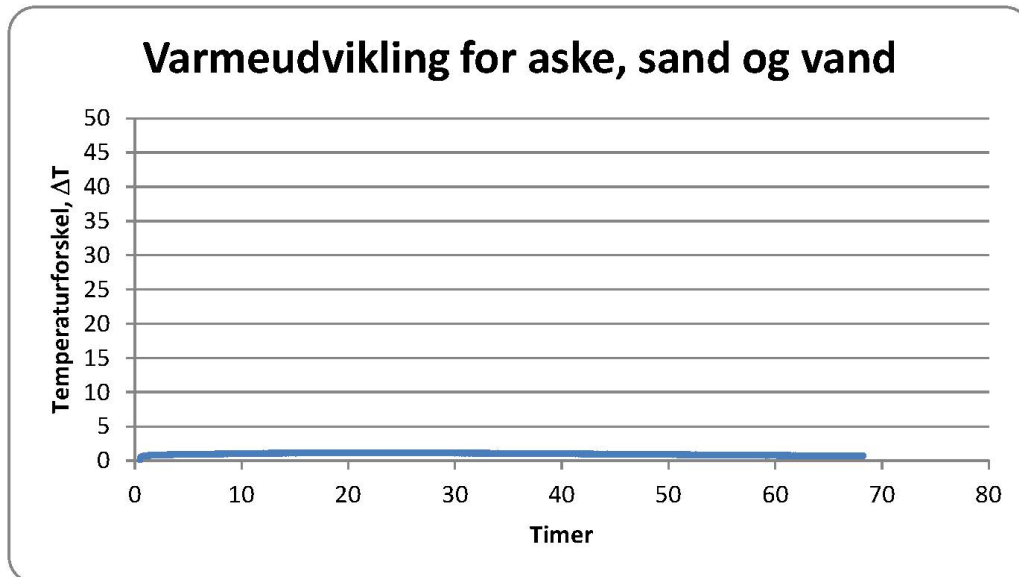
A Hård askeprøve

Under forsøget med varmedvikling (afsnit 3.4.4), blev der også lavet en prøve hvor alt cementen var udskiftet med aske. Dette blev gjort i en mindre størrelse end de andre varmedviklingsforsøg og viste ingen målbar varmedvikling - se figur 26. Dog blev der ved dette forsøg skabt et solidt produkt. Det var førhen observeret at hårde klumper blev dannet efter tørring af asken, dog ikke i så store mængder. I dette tilfælde var det hele samlet til en blok - se figur 25.



Figur 25: Billeder af den hårde askeprøve.

Den solide askes styrke blev ikke testet og lignende prøver blev ikke lavet.



Figur 26: Varmedviklingen for askeprøven.

B Forsøgsplan

Tabel 22: Forsøgsplan - oversigt over planlagte forsøg.

Forsøgsplan	Trykstyrke	7-døgns styrke	Blainetal	Afbindingstid	Varmeudvikling
Ubehandlet aske			x		
Vasket aske			x		
Ringkust aske			x		x
Ubehandlet cement		x	x	x	x
Ringkust cement	x	x	x	x	x
Rapid cement	x	x	x	x	x
Ubehandlet aske 5 %		x			
Ubehandlet aske 10 %		x			
Ubehandlet aske 20 %		x			
Vasket aske 5 %		x			
Vasket aske 10 %		x			
Vasket aske 20 %		x			
Ringkust aske 5 (A) %	x	x	x	x	x
Ringkust aske 10 %		x			
Ringkust aske 20 %		x	x	x	x
Ringkust aske 5 % · 1,5 (E)	x	x	x		
Ringkust aske 5 % · 2 (F)	x	x	x		

C Cement Chemist Notation (CCN)

Kemisk navn	Kemiske formel	CNN	Navn
Oxider			
Dihydrogen oxid	H ₂ O	H	Water
Calcium oxid	CaO	C	Lime
Silicon dioxid	SiO ₂	S	Silica
Aluminium oxid	Al ₂ O ₃	A	alumina
Iron oxid	Fe ₂ O ₃	F	Rust
Sulfur trioxide	SO ₃	S*	
Vigtige mineraler fra klinker			
Tricalcium silicate	3CaO · SiO ₂	C ₃ S	Alite
Dicalcium silicate	2CaO · SiO ₂	C ₂ S	Belite
Tricalcium Aluminate	3CaO · Al ₂	C ₃ A	Celite
Tetracalcium aluminoferrite	4CaO · Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	Ferrite

D Resultater fra askeforsøg

Tabel 23: Målinger for pH-værdien af asken ud fra afsnit M.1

pH i 1M KCl jord-væske 1:25		
Prøve nr.	Masse	pH
1	5	12,75
2	5,04	12,41
3	5,03	12,32
gennemsnit	5,02	12,49

Tabel 24: Målinger af vandindhold i asken ud fra afsnit M.2

Vandindhold i aske				
Prøve	Glas	Tørring		Vandindhold (%)
		Før	Efter	
T1	106,88	207,59	207,32	0,268%
T2	108,04	206,37	206,1	0,275%
T3	109,05	206,67	206,36	0,318%
Gennemsnit	107,99	206,88	206,59	0,287 %

Tabel 25: Måling af tungmetaller i asken ud fra afsnit M.3

Oplukning af jord							
Prøve	mg/kg Al	mg/kg Cd	mg/kg Cr	mg/kg Cu	mg/kg Ni	mg/kg Pb	mg/kg Zn
1	0,4840	0,0065	31,6576	0,0263	0,0000	0,0512	0,8670
2	0,4584	0,0058	30,5930	0,0272	0,0000	0,0601	0,9083
3	0,5124	0,0037	37,9350	0,0337	0,0000	0,1319	1,1801
Gennemsnit	0,4849	0,0053	33,3952	0,0291	0,0000	0,0811	0,9851
Prøve	mg/kg Na	mg/kg Fe	mg/kg K	mg/kg Ca	mg/kg P	mg/kg Mg	
1	2616,7315	0,0295	305730,5389	3819,8503	0,0000	0,0827	
2	2764,8805	0,0099	293918,8247	4090,3287	0,1212	0,0477	
3	2745,1090	0,0000	289471,7542	4029,1824	0,1408	0,0000	
Gennemsnit	2708,9070	0,0131	296373,7059	3979,7871	0,0873	0,0435	

E Ionindhold i asken

Prøve	mg/kg Cl	mg/kg NO3	mg/kg SO4
Glas 1 - Vasket og ringknust aske	712,625	103,154	753,952
Glas 2 - Ubehandlet aske	3832,702	129,314	3706,585
Glas 3 - Ubehandlet aske	3944,743	131,701	3817,322

F Rådata af målinger for mørtelprøvninger

F.1 Screening

F.1.1 7-døgns prøver

F.1.1.1 Prøve A - ubehandlet

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			
1	39,61	40,11	160,70	575,14	39,80	kN	Test 1	78,00
	39,14	40,11					Test 2	96,00
	39,69	40,03						
	39,48	40,08						
							Avg.	87,00
							Spænding	43,41
							Densitet	2.261,60
	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			
2	40,29	40,12	160,30	579,83	40,30	kN	Test 1	78,00
	39,65	40,19					Test 2	62,00
	40,00	40,25						
	39,98	40,19						
							Avg.	70,00
							Spænding	34,84
							Densitet	2.251,35
	Bredde (mm)	Tykkelse	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			
3	39,98	40,08	160,50	583,92	40,30	kN	Test 1	92,00
	40,00	40,09					Test 2	96,00
	40,46	40,18						
	40,15	40,12						
							Avg.	94,00
							Spænding	46,86
							Densitet	2.258,94

F RÅDATA AF MÅLINGER FOR MØRTELPRØVNINGER

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
1	39,40	40,13	159,70	559,54	38,20	Test 1	99,00
	39,56	39,93				Test 2	97,00
	39,15	40,09					
	39,37	40,05	159,70	559,54	38,20	Avg.	98,00
						Spænding	48,94
						Densitet	2.222,07
	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
2	39,92	39,98	160,30	572,59	36,70	Test 1	84,00
	39,77	39,96				Test 2	60,00
	39,65	39,87					
	39,78	39,94	160,30	572,59	36,70	Avg.	72,00
						Spænding	36,06
						Densitet	2.248,40
	Bredde (mm)	Tykkelse	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
3	39,45	39,08	159,30	562,37	37,30	Test 1	88,00
	39,39	39,96				Test 2	91,00
	39,09	39,99					
	39,31	39,68	159,30	562,37	37,30	Avg.	89,50
						Spænding	45,11
						Densitet	2.263,44

F.1.1.2 Prøve B - ubehandlet

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			kN
1	39,74	40,13	160,30	577,42	41,80	Test 1		80,00
	39,57	40,26				Test 2		93,00
	39,87	40,15						
	39,73	40,18	160,30	577,42	41,80	Avg.		86,50
						Spænding		43,06
						Densitet		2.256,66

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			kN
2	40,17	39,48	160,00	573,31	41,20	Test 1		75,00
	40,19	39,47				Test 2		78,00
	40,29	39,39						
	40,22	39,45	160,00	573,31	41,20	Avg.		76,50
						Spænding		38,79
						Densitet		2.258,67

	Bredde (mm)	Tykkelse	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			kN
3	39,41	40,03	160,00	573,42	41,00	Test 1		91,00
	39,65	40,12				Test 2		93,00
	39,65	40,17						
	39,57	40,11	160,00	573,42	41,00	Avg.		92,00
						Spænding		45,88
						Densitet		2.258,24

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			kN
1	39,71	40,07	160,00	562,79	38,00	Test 1		89,00
	39,56	39,90				Test 2		76,00
	39,21	39,93						
	39,49	39,97	160,00	562,79	38,00	Avg.		82,50
						Spænding		41,28
						Densitet		2.228,46

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			kN
2	39,91	40,06	160,00	560,85	38,30	Test 1		80,00
	39,29	40,16				Test 2		88,00
	39,31	40,23						
	39,50	40,15	160,00	560,85	38,30	Avg.		84,00
						Spænding		41,84
						Densitet		2.210,08

	Bredde (mm)	Tykkelse	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			kN
3	39,73	40,16	160,00	560,89	38,20	Test 1		77,00
	39,35	39,95				Test 2		91,00
	39,26	40,23						
	39,45	40,11	160,00	560,89	38,20	Avg.		84,00
						Spænding		41,88
						Densitet		2.215,43

F.1.1.3 Prøve C - ubehandlet

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			
1	40,83	40,08	160,00	571,52	45,10	Test 1	kN	61,00
	40,70	40,11				Test 2		61,00
	40,90	40,15						
	40,81	40,11	160,00	571,52	45,10	Avg.		61,00
						Spænding		30,41
						Densitet		2.182,01
2	41,14	40,30	160,10	578,31	44,00	Test 1	kN	64,00
	40,93	40,20				Test 2		68,00
	40,89	40,18						
	40,99	40,23	160,10	578,31	44,00	Avg.		66,00
						Spænding		32,81
						Densitet		2.190,85
3	40,46	40,03	159,80	567,35	45,90	Test 1	kN	62,00
	40,45	40,00				Test 2		63,00
	40,50	40,19						
	40,47	40,07	159,80	567,35	45,90	Avg.		62,50
						Spænding		31,19
						Densitet		2.189,20
1	40,35	40,24	161,10	552,18	45,60	Test 1	kN	37,00
	39,25	40,16				Test 2		44,00
	39,21	40,10						
	39,60	40,17	161,10	552,18	45,60	Avg.		40,50
						Spænding		20,17
						Densitet		2.154,70
2	39,39	40,12	160,90	554,86	45,40	Test 1	kN	39,00
	40,05	40,31				Test 2		33,00
	39,71	39,96						
	39,72	40,13	160,90	554,86	45,40	Avg.		36,00
						Spænding		17,94
						Densitet		2.163,64
3	40,60	40,02	160,70	558,68	45,10	Test 1	kN	42,00
	39,94	39,96				Test 2		41,00
	40,00	39,95						
	40,18	39,98	160,70	558,68	45,10	Avg.		41,50
						Spænding		20,76
						Densitet		2.164,37

F.1.1.4 Reference - uformalet

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			
1	40,40	40,18	161,00	578,49	40,00	Test 1	kN	90,00
	40,13	39,98				Test 2		93,00
	40,20	39,91						
	40,24	40,02	161,00	578,49	40,00	Avg.		91,50
						Spænding		45,72
						Densitet		2.230,81
2	40,26	40,68	162,00	587,02	38,90	Test 1	kN	98,00
	40,02	40,38				Test 2		81,00
	40,21	40,08						
	40,16	40,38	162,00	587,02	38,90	Avg.		89,50
						Spænding		44,33
						Densitet		2.234,30
3	40,23	40,68	161,00	584,60	40,50	Test 1	kN	97,00
	40,52	40,03				Test 2		99,00
	40,21	40,00						
	40,32	40,24	161,00	584,60	40,50	Avg.		98,00
						Spænding		48,71
						Densitet		2.238,16
1	40,15	40,85	162,00	571,02	40,00	Test 1	kN	90,00
	40,15	40,75				Test 2		68,00
	40,40	40,85						
	40,23	40,82	162,00	571,02	40,00	Avg.		79,00
						Spænding		38,71
						Densitet		2.146,41
2	40,15	40,75	161,90	585,80	40,10	Test 1	kN	90,00
	40,40	40,50				Test 2		94,00
	40,35	41,30						
	40,30	40,85	161,90	585,80	40,10	Avg.		92,00
						Spænding		45,04
						Densitet		2.197,89
3	40,40	40,75	162,00	575,95	39,70	Test 1	kN	88,00
	40,55	40,50				Test 2		66,00
	40,50	41,00						
	40,48	40,75	162,00	575,95	39,70	Avg.		77,00
						Spænding		37,79
						Densitet		2.155,09

F.1.1.5 Prøve A - vasket

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
1	40,22	39,93	160,00	584,62	38,60	Test 1	90,00
	40,40	40,08				Test 2	91,00
	40,81	40,18					
	40,48	40,06	160,00	584,62	38,60	Avg.	90,50
						Spænding	45,18
						Densitet	2.253,21
	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
2	39,55	40,23	160,00	581,12	39,00	Test 1	99,00
	40,30	40,10				Test 2	108,00
	40,03	40,04					
	39,96	40,12	160,00	581,12	39,00	Avg.	103,50
						Spænding	51,59
						Densitet	2.265,29
	Bredde (mm)	Tykkelse	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
3	40,84	40,42	159,80	594,36	39,10	Test 1	105,00
	41,67	40,38				Test 2	91,00
	40,47	40,40					
	40,99	40,40	159,80	594,36	39,10	Avg.	98,00
						Spænding	48,51
						Densitet	2.245,84

F RÅDATA AF MÅLINGER FOR MØRTELPRØVNINGER

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			
1	41,08	40,04	160,50	591,17	37,70	Test 1	kN	87,00
	41,20	40,20				Test 2		91,00
	41,18	39,99						
	41,15	40,08	160,50	591,17	37,70	Avg.		89,00
						Spænding		44,41
						Densitet		2.233,27
2	40,09	40,32	161,20	585,78	38,10	Test 1	kN	70,00
	40,64	40,04				Test 2		72,00
	40,62	39,98						
	40,45	40,11	161,20	585,78	38,10	Avg.		71,00
						Spænding		35,40
						Densitet		2.239,56
3	41,08	40,15	161,60	593,45	38,10	Test 1	kN	57,00
	40,81	40,40				Test 2		82,00
	40,81	40,32						
	40,90	40,29	161,60	593,45	38,10	Avg.		69,50
						Spænding		34,50
						Densitet		2.228,55

F.1.1.6 Prøve B - vasket

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
1	40,79	40,14	160,10	584,11	40,70	Test 1	77,00
	40,97	40,20				Test 2	84,00
	40,83	40,17					
	40,86	40,17	160,10	584,11	40,70	Avg.	80,50
						Spænding	40,08
						Densitet	2.222,63
	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
2	40,82	40,02	160,10	582,08	40,60	Test 1	61,00
	40,28	40,40				Test 2	43,00
	41,76	40,09					
	40,95	40,17	160,10	582,08	40,60	Avg.	61,00
						Spænding	30,37
						Densitet	2.210,04
	Bredde (mm)	Tykkelse	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
3	40,50	40,08	160,00	581,17	40,30	Test 1	63,00
	40,32	40,46				Test 2	60,00
	41,43	40,08					
	40,75	40,21	160,00	581,17	40,30	Avg.	61,50
						Spænding	30,59
						Densitet	2.216,96

F RÅDATA AF MÅLINGER FOR MØRTELPRØVNINGER

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			
1	40,08	40,26	161,10	585,52	39,00	Test 1	kN	95,00
	41,58	39,90				Test 2		82,00
	41,70	40,18						
	41,12	40,11	161,10	585,52	39,00	Avg.		88,50
						Spænding		44,12
						Densitet		2.203,46
2	39,14	40,90	161,70	573,41	39,10	Test 1	kN	90,00
	39,96	40,07				Test 2		85,00
	41,19	40,12						
	40,10	40,36	161,70	573,41	39,10	Avg.		87,50
						Spænding		43,36
						Densitet		2.191,09
3	39,10	39,91	161,80	578,57	38,70	Test 1	kN	80,00
	40,12	39,94				Test 2		88,00
	41,27	39,99						
	40,16	39,95	161,80	578,57	38,70	Avg.		84,00
						Spænding		42,06
						Densitet		2.228,78

F.1.1.7 Prøve C - vasket

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
1	39,88	40,16	159,00	559,57	43,20	Test 1	62,00
	39,63	40,52				Test 2	63,00
	39,83	40,06					
	39,78	40,25	159,00	559,57	43,20	Avg.	62,50
						Spænding	31,06
						Densitet	2.198,18
	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
2	40,55	39,93	159,00	570,83	43,00	Test 1	65,00
	40,74	40,04				Test 2	52,00
	40,20	39,95					
	40,50	39,97	159,00	570,83	43,00	Avg.	58,50
						Spænding	29,27
						Densitet	2.217,79
	Bredde (mm)	Tykkelse	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
3	40,25	39,99	159,10	573,31	42,50	Test 1	66,00
	41,04	39,89				Test 2	52,00
	40,18	40,06					
	40,49	39,98	159,10	573,31	42,50	Avg.	59,00
						Spænding	29,51
						Densitet	2.226,02

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			
1	40,90	40,20	162,20	590,93	42,80	Test 1	kN	74,00
	40,96	40,14				Test 2		59,00
	41,01	40,11						
	40,96	40,15	162,20	590,93	42,80	Avg.		66,50
						Spænding		33,13
						Densitet		2.215,52
	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			
2	39,98	39,92	162,20	578,10	42,10	Test 1	kN	76,00
	40,52	39,88				Test 2		65,00
	40,52	39,90						
	40,34	39,90	162,20	578,10	42,10	Avg.		70,50
						Spænding		35,34
						Densitet		2.214,34
						Standardafv		1.034,52
	Bredde (mm)	Tykkelse	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			
3	40,08	40,10	161,80	575,22	42,30	Test 1	kN	68,00
	40,36	40,12				Test 2		66,00
	40,66	40,18						
	40,37	40,13	161,80	575,22	42,30	Avg.		67,00
						Spænding		33,39
						Densitet		2.194,46

F.1.1.8 Prøve A - formalet

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
1	40,48	41,68	162,20	609,41	39,50	Test 1	104,00
	40,15	40,81				Test 2	95,00
	40,19	41,30					
	40,27	41,26	162,20	609,41	39,50	Avg.	99,50
						Spænding	48,23
						Densitet	2.260,88
	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
2	40,25	42,34	161,90	607,78	39,00	Test 1	98,00
	40,17	41,82				Test 2	101,00
	40,21	42,05					
	40,21	42,07	161,90	607,78	39,00	Avg.	99,50
						Spænding	47,30
						Densitet	2.219,18
	Bredde (mm)	Tykkelse	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
3	40,18	42,11	162,00	609,01	40,00	Test 1	101,00
	40,20	42,33				Test 2	98,00
	40,08	42,90					
	40,15	42,45	162,00	609,01	40,00	Avg.	99,50
						Spænding	46,88
						Densitet	2.205,69

F RÅDATA AF MÅLINGER FOR MØRTELPRØVNINGER

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			
1	40,48	41,68	162,20	609,41	39,50	Test 1	kN	104,00
	40,15	41,30				Test 2		95,00
	40,19	40,81						
	40,27	41,26	162,20	609,41	39,50	Avg.		99,50
						Spænding		48,23
						Densitet		2.260,88
	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			
2	40,25	42,34	161,90	607,78	39,00	Test 1	kN	98,00
	40,17	41,82				Test 2		101,00
	40,21	42,05						
	40,21	42,07	161,90	607,78	39,00	Avg.		99,50
						Spænding		47,30
						Densitet		2.219,18
	Bredde (mm)	Tykkelse	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			
3	40,18	42,11	162,00	609,01	40,00	Test 1	kN	101,00
	40,20	42,33				Test 2		98,00
	40,08	42,90						
	40,15	42,45	162,00	609,01	40,00	Avg.		99,50
						Spænding		46,88
						Densitet		2.205,69

F.1.1.9 Prøve B - formalet

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
1	40,02	40,53	161,70	585,81	39,30	Test 1	96,00
	40,18	40,60				Test 2	98,00
	40,30	40,68					
	40,17	40,60	161,70	585,81	39,30	Avg.	97,00
						Spænding	47,78
						Densitet	2.221,36
	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
2	39,93	40,86	161,00	586,05	41,00	Test 1	84,00
	39,94	41,61				Test 2	84,00
	40,17	41,02					
	40,01	41,16	161,00	586,05	41,00	Avg.	84,00
						Spænding	40,81
						Densitet	2.210,01
	Bredde (mm)	Tykkelse	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)		kN
3	40,50	41,43	160,40	588,21	40,60	Test 1	76,00
	40,16	41,04				Test 2	94,00
	40,14	40,94					
	40,27	41,14	160,40	588,21	40,60	Avg.	85,00
						Spænding	41,33
						Densitet	2.213,88

F RÅDATA AF MÅLINGER FOR MØRTELPRØVNINGER

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			
1	40,02	40,53	161,70	585,81	39,30	Test 1	kN	96,00
	40,18	40,60				Test 2		98,00
	40,30	40,68						
	40,17	40,60	161,70	585,81	39,30	Avg.		97,00
						Spænding		47,78
						Densitet		2.221,36
2	39,93	40,86	161,00	586,05	41,00	Test 1	kN	84,00
	40,17	41,02				Test 2		84,00
	39,94	41,61						
	40,01	41,16	161,00	586,05	41,00	Avg.		84,00
						Spænding		40,81
						Densitet		2.210,01
3	40,50	41,43	160,40	588,21	40,60	Test 1	kN	76,00
	40,16	41,04				Test 2		94,00
	40,14	40,94						
	40,27	41,14	160,40	588,21	40,60	Avg.		85,00
						Spænding		41,33
						Densitet		2.213,88

F.1.1.10 Prøve C - formalet

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (-)		kN
1	40,01	40,41	161,10	592,77	40,30	Test 1	84,00
	39,97	40,42				Test 2	81,00
	39,93	40,57					
	39,97	40,47	161,10	592,77	40,30	Avg.	82,50
						Spænding	40,77
						Densitet	2.274,88
	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (-)		kN
2	39,86	40,41	161,10	592,77	40,80	Test 1	83,00
	39,84	40,42				Test 2	83,00
	39,93	40,57					
	39,88	40,47	161,10	592,77	40,80	Avg.	83,00
						Spænding	41,02
						Densitet	2.280,21
	Bredde (mm)	Tykkelse	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (-)		kN
3	40,51	41,94	161,20	595,59	41,50	Test 1	81,00
	40,25	41,90				Test 2	84,00
	39,93	41,79					
	40,23	41,88	161,20	595,59	41,50	Avg.	82,50
						Spænding	39,40
						Densitet	2.193,11

F RÅDATA AF MÅLINGER FOR MØRTELPRØVNINGER

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (-)			
1	40,01	40,41	161,10	592,77	40,30	Test 1	kN	84,00
	39,97	40,42				Test 2		81,00
	39,93	40,57						
	39,97	40,47	161,10	592,77	40,30	Avg.		82,50
						Spænding		40,77
						Densitet		2.274,88
2	39,86	41,94	160,70	586,48	40,80	Test 1	kN	83,00
	39,84	41,90				Test 2		83,00
	39,90	41,79						
	39,87	41,88	160,70	586,48	40,80	Avg.		83,00
						Spænding		39,64
						Densitet		2.186,03
3	40,51	42,87	161,20	595,59	41,50	Test 1	kN	81,00
	40,25	42,92				Test 2		84,00
	39,93	42,63						
	40,23	42,81	161,20	595,59	41,50	Avg.		82,50
						Spænding		38,55
						Densitet		2.145,46

F.1.1.11 Reference - formalet

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)			
1	40,36	41,72	161,60	601,85	38,90	Test 1	kN	107,00
	40,68	41,53				Test 2		103,00
	40,01	41,98						
	40,35	41,74	161,60	601,85	38,90	Avg.		105,00
						Spænding		50,31
						Densitet		2.211,14
2	39,86	41,94	160,50	598,58	38,90	Test 1	kN	97,00
	39,84	41,90				Test 2		99,00
	39,90	41,79						
	39,87	41,88	160,50	598,58	38,90	Avg.		98,00
						Spænding		46,80
						Densitet		2.233,91
3	40,12	41,91	160,40	591,50	38,30	Test 1	kN	101,00
	40,01	41,18				Test 2		99,00
	39,99	41,15						
	40,04	41,41	160,40	591,50	38,30	Avg.		100,00
						Spænding		48,29
						Densitet		2.223,90
1	40,36	41,72	161,60	601,85	38,90	Test 1	kN	107,00
	40,68	41,53				Test 2		103,00
	40,01	41,98						
	40,35	41,74	161,60	601,85	38,90	Avg.		105,00
						Spænding		50,31
						Densitet		2.211,14
2	40,03	41,41	160,50	598,58	38,90	Test 1	kN	97,00
	39,95	41,50				Test 2		99,00
	40,13	41,49						
	40,04	41,47	160,50	598,58	38,90	Avg.		98,00
						Spænding		47,27
						Densitet		2.246,42
3	40,12	41,91	160,40	591,50	38,30	Test 1	kN	101,00
	40,01	41,18				Test 2		99,00
	39,99	41,15						
	40,04	41,41	160,40	591,50	38,30	Avg.		100,00
						Spænding		48,29
						Densitet		2.223,90

F RÅDATA AF MÅLINGER FOR MØRTELPRØVNINGER

	Bredde	Tykkelse	Længde	Vægt	Ultralyd		
		(mm)		(g)	(μ s)		kN
1	40,00	41,50	160,20	586,19	38,80	Test 1	82,00
	40,00	41,30				Test 2	86,00
	40,00	40,90					
	40,00	41,23	160,20	586,19	38,80	Avg.	84,00
						Spænding	40,74
						Densitet	2.218,54
	Bredde	Tykkelse	Længde	Vægt	Ultralyd		
		(mm)		(g)	(μ s)		kN
2	40,10	41,10	160,60	595,06	39,10	Test 1	75,00
	40,30	41,60				Test 2	95,00
	40,35	42,20					
	40,25	41,63	160,60	595,06	39,10	Avg.	85,00
						Spænding	40,83
						Densitet	2.211,10
	Bredde	Tykkelse	Længde	Vægt	Ultralyd		
	(mm)			(g)	(μ s)		kN
3	40,03	41,15	161,50	590,44	39,30	Test 1	79,00
	40,45	41,80				Test 2	90,00
	40,25	40,75					
	40,24	41,23	161,50	590,44	39,30	Avg.	84,50
						Spænding	40,99
						Densitet	2.203,24

	Bredde	Tykkelse (mm)	Længde	Vægt (g)	Ultralyd (μ s)	
1	40,50	40,90	160,80	583,97	38,90	Test 1
	40,25	42,20				Test 2
	40,40	41,10				
	40,38	41,40	160,80	583,97	38,90	Avg. Spænding Densitet
2	40,05	41,30	161,20	589,25	39,30	Test 1
	40,10	42,10				Test 2
	40,50	41,85				
	40,22	41,75	161,20	589,25	39,30	Avg. Spænding Densitet
3	40,5	41,4	159,8	575,95	39,7	Test 1
	40,2	41,5				Test 2
	40	41,1				
	40,23	40,82	162,00	571,02	40,00	Avg. Spænding Densitet

F.2 Langtidsprøver

F.2.1 7-,14-,21-,28-,35-,42-døgns prøver

F.2.1.1 7-døgns prøver

		7-døgn prøve							
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultralyd	Tryk		
7-døgn prøve	Ref	1,00	40,07	41,46	162,00	602,69	37,10	80,00	70,00
		2,00	40,25	41,87				Average	75,00
		3,00	40,26	40,70					
	Ref	1,00	39,97	41,61	161,20	585,44	37,50	72,00	70,00
		2,00	39,90	40,52				Average	71,00
		3,00	39,82	40,44					
	0,05	1,00	40,04	39,86	161,60	572,51	38,50	74,00	78,00
		2,00	40,02	39,21				Average	76,00
		3,00	40,03	40,52					
	0,05	1,00	40,21	40,45	160,70	586,85	38,20	83,00	67,00
		2,00	40,27	40,84				Average	75,00
		3,00	40,10	40,51					
	5% x1½	1,00	40,08	40,15	160,60	576,83	38,10	80,00	83,00
		2,00	39,87	40,48				Average	81,50
		3,00	39,89	40,39					
	5% x2	1,00	40,09	40,81	160,30	579,91	37,70	70,00	68,00
		2,00	40,33	40,94				Average	69,00
		3,00	39,87	41,04					

F RÅDATA AF MÅLINGER FOR MØRTELPRØVNINGER

		7-døgn prøve						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultral lyd	1,00	2,00	
7-døgn prøve	Ref	1,00	40,02	41,83	161,30	598,17	37,10	77,00	54,00
		2,00	39,92	41,56				Average	65,50
		3,00	39,98	41,08					
	Ref	1,00	40,01	41,00	161,20	585,14	37,60	67,00	55,00
		2,00	39,98	40,31				Average	61,00
		3,00	40,00	40,25					
	0,05	1,00	40,18	39,67	161,50	573,85	39,80	74,00	74,00
		2,00	40,04	39,55				Average	74,00
		3,00	40,09	39,67					
	0,05	1,00	40,01	40,92	159,90	578,71	37,10	74,00	75,00
		2,00	40,02	40,35				Average	74,50
		3,00	39,99	40,46					
5% x1½	1,00	40,16	40,55	160,50	574,97	37,50	81,00	80,00	
	2,00	39,97	39,68				Average	80,50	
	3,00	39,87	40,56						
5% x2	1,00	39,90	40,02	160,50	576,76	37,40	71,00	72,00	
	2,00	39,89	40,71				Average	71,50	
	3,00	39,86	40,78						

		7-døgn prøve						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultral lyd	1,00	2,00	
7-døgn prøve	Ref	1,00	40,26	41,17	160,90	594,36	37,30	69,00	54,00
		2,00	40,34	41,30				Average	61,50
		3,00	40,12	41,67					
	Ref	1,00	40,31	42,00	161,40	596,35	37,40	79,00	77,00
		2,00	40,14	39,71				Average	78,00
		3,00	40,08	40,20					
	0,05	1,00	39,99	40,05	161,30	578,93	38,40	69,00	50,00
		2,00	40,14	39,79				Average	59,50
		3,00	40,04	40,21					
	0,05	1,00	39,83	40,26	159,30	579,34	37,90	79,00	75,00
		2,00	39,86	40,86				Average	77,00
		3,00	39,85	40,38					
5% x1½	1,00	39,87	40,53	160,70	578,27	37,60	80,00	81,00	
	2,00	39,90	40,62				Average	80,50	
	3,00	39,94	40,36						
5% x2	1,00	40,00	40,39	161,00	576,93	37,70	75,00	67,00	
	2,00	39,92	41,36				Average	71,00	
	3,00	39,91	40,72						

F.2.1.2 14-døgns prøver

		14-døgn prøve						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultral lyd	1,00	2,00	
14-døgn prøve	Ref	1,00	39,99	39,71	161,30	581,21	35,90	87,00	90,00
		2,00	40,02	40,03				Average	88,50
		3,00	40,01	40,68					
	Ref	1,00	39,91	39,77	160,70	569,68	36,30	51,00	76,00
		2,00	40,56	39,67				Average	63,50
		3,00	40,01	40,37					
	0,05	1,00	39,96	39,85	161,20	581,21	36,10	86,00	84,00
		2,00	40,06	39,96				Average	85,00
		3,00	40,05	39,90					
	0,05	1,00	40,00	39,53	160,50	576,58	37,10	87,00	89,00
		2,00	40,18	39,50				Average	88,00
		3,00	39,90	40,40					
5% x1½	1,00	40,00	40,50	161,70	594,11	38,00	93,00	92,00	
	2,00	40,09	41,20				Average	92,50	
	3,00	40,06	40,45						
5% x2	1,00	39,96	39,92	161,30	578,64	37,20	94,00	91,00	
	2,00	39,92	39,83				Average	92,50	
	3,00	39,86	40,19						

		14-døgn prøve						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultral lyd	1,00	2,00	
14-døgn prøve	Ref	1,00	40,16	39,92	161,20	578,29	36,40	89,00	91,00
		2,00	40,11	39,92				Average	90,00
		3,00	39,94	40,63					
	Ref	1,00	40,28	39,59	160,40	564,15	36,20	82,00	82,00
		2,00	39,87	39,55				Average	82,00
		3,00	39,97	39,91					
	0,05	1,00	40,44	39,69	161,40	580,53	36,50	82,00	85,00
		2,00	40,08	39,76				Average	83,50
		3,00	40,18	40,89					
	0,05	1,00	39,93	39,95	160,40	576,55	37,90	88,00	85,00
		2,00	39,88	39,83				Average	86,50
		3,00	39,97	40,24					
5% x1½	1,00	39,98	40,49	161,70	586,37	38,50	54,00	56,00	
	2,00	40,00	40,06				Average	55,00	
	3,00	40,02	40,28						
5% x2	1,00	40,06	40,58	160,60	575,11	37,60	92,00	88,00	
	2,00	40,04	39,72				Average	90,00	
	3,00	40,03	39,86						

F RÅDATA AF MÅLINGER FOR MØRTELPRØVNINGER

		14-døgn prøve							Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultralyd	1,00	2,00		
14-døgn prøve	Ref	1,00	39,85	39,61	161,00	578,07	36,20	92,00	84,00	
		2,00	40,67	40,31				Average	88,00	
		3,00	39,99	40,54						
	Ref	1,00	40,03	39,28	160,10	561,82	36,10	85,00	78,00	
		2,00	39,82	39,11				Average	81,50	
		3,00	39,83	40,08						
	0,05	1,00	40,02	39,82	161,60	582,54	36,60	86,00	83,00	
		2,00	39,98	40,10				Average	84,50	
		3,00	40,37	39,88						
	0,05	1,00	39,90	39,68	160,10	571,24	36,00	91,00	84,00	
		2,00	39,86	39,77				Average	87,50	
		3,00	39,80	40,14						
5% x1½	1,00	40,30	40,68	161,50	586,36	37,90	93,00	87,00		
	2,00	40,01	40,11				Average	90,00		
	3,00	40,42	40,58							
5% x2	1,00	39,94	41,00	160,00	572,71	37,10	87,00	80,00		
	2,00	39,82	40,40				Average	83,50		
	3,00	39,80	39,88							

F.2.1.3 21-døgns prøver

		21-døgn prøve						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultralyd	1,00	2,00	
21-døgn prøve	Ref	1,00	39,95	40,00	160,60	572,57	37,50	99,00	93,00
		2,00	40,04	40,27				Average	96,00
		3,00	39,84	40,13					
	Ref	1,00	39,88	40,72	161,00	579,67	37,40	87,00	72,00
		2,00	40,01	40,48				Average	79,50
		3,00	40,59	40,16					
	0,05	1,00	40,08	40,12	161,60	584,20	38,10	87,00	92,00
		2,00	40,37	40,76				Average	89,50
		3,00	40,28	40,41					
	0,05	1,00	40,55	39,46	161,40	564,88	37,50	96,00	95,00
		2,00	40,17	40,05				Average	95,50
		3,00	40,56	39,97					
5% x1½	1,00	40,00	40,06	160,30	587,55	37,60	103,00	100,00	
	2,00	40,64	40,95				Average	101,50	
	3,00	40,50	41,52						
5% x2	1,00	39,91	39,74	159,60	565,40	37,60	101,00	99,00	
	2,00	40,57	39,99				Average	100,00	
	3,00	40,15	39,96						

		21-døgn prøve						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultralyd	1,00	2,00	
21-døgn prøve	Ref	1,00	40,06	39,26	159,70	559,54	37,50	89,00	90,00
		2,00	40,02	39,52				Average	89,50
		3,00	40,00	39,92					
	Ref	1,00	40,03	41,05	161,30	575,09	37,70	62,00	61,00
		2,00	40,04	40,63				Average	61,50
		3,00	40,09	40,14					
	0,05	1,00	39,90	40,45	161,40	577,44	38,30	90,00	92,00
		2,00	39,91	40,35				Average	91,00
		3,00	39,96	40,16					
	0,05	1,00	40,01	39,51	161,20	553,37	38,40	91,00	87,00
		2,00	40,06	39,61				Average	89,00
		3,00	40,60	39,08					
5% x1½	1,00	40,10	39,53	160,50	578,90	38,30	98,00	95,00	
	2,00	40,06	40,73				Average	96,50	
	3,00	40,26	41,12						
5% x2	1,00	39,96	39,32	160,10	560,65	38,40	87,00	100,00	
	2,00	40,26	40,24				Average	93,50	
	3,00	40,96	40,11						

F RÅDATA AF MÅLINGER FOR MØRTELPRØVNINGER

		21-døgn prøve							
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultralyd	Tryk		
21-døgn prøve	Ref	1,00	39,87	39,93	159,30	567,49	37,60	87,00	82,00
		2,00	39,91	40,53				Average	84,50
		3,00	39,94	40,56					
	Ref	1,00	40,17	40,67	161,70	581,89	37,50	90,00	67,00
		2,00	40,12	40,42				Average	78,50
		3,00	40,25	40,51					
	0,05	1,00	40,23	40,02	161,20	581,66	38,50	67,00	96,00
		2,00	40,62	40,43				Average	81,50
		3,00	40,35	40,49					
	0,05	1,00	40,13	39,36	161,10	553,39	38,00	95,00	93,00
		2,00	40,41	38,76				Average	94,00
		3,00	40,39	38,27					
5% x1½	1,00	40,12	40,41	159,17	588,02	38,10	103,00	98,00	
	2,00	40,21	41,08				Average	100,50	
	3,00	40,52	42,13						
5% x2	1,00	40,02	39,77	160,50	569,77	39,10	101,00	75,00	
	2,00	39,99	39,77				Average	88,00	
	3,00	40,12	39,99						

F.2.1.4 28-døgns prøver

		28-døgn prøve						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultralød	1,00	2,00	
28-døgn prøve	Ref	1,00	39,96	39,69	161,10	570,36	37,50	98,00	103,00
		2,00	39,99	39,81				Average	100,50
		3,00	39,85	40,54					
	Ref	1,00	40,12	38,98	161,30	572,01	37,20	102,00	102,00
		2,00	40,05	39,44				Average	102,00
		3,00	39,98	39,93					
	0,05	1,00	40,22	39,18	159,70	568,35	37,20	94,00	96,00
		2,00	39,93	39,49				Average	95,00
		3,00	39,92	39,36					
	0,05	1,00	40,00	39,73	161,10	582,15	38,60	98,00	99,00
		2,00	39,96	40,36				Average	98,50
		3,00	39,99	39,50					
5% x1½	1,00	40,22	39,06	160,00	562,73	38,00	94,00	88,00	
	2,00	39,97	39,21				Average	91,00	
	3,00	40,03	39,16						
5% x2	1,00	40,13	40,93	161,40	591,58	38,50	55,00	81,00	
	2,00	39,98	40,76				Average	68,00	
	3,00	39,94	40,71						

		28-døgn prøve						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultralød	1,00	2,00	
28-døgn prøve	Ref	1,00	40,15	38,80	160,80	568,12	37,40	68,00	91,00
		2,00	40,25	39,21				Average	79,50
		3,00	40,05	40,35					
	Ref	1,00	40,20	38,80	161,30	571,01	37,30	88,00	97,00
		2,00	40,16	39,48				Average	92,50
		3,00	40,18	39,67					
	0,05	1,00	40,17	40,25	160,20	577,86	37,70	95,00	76,00
		2,00	40,04	40,17				Average	85,50
		3,00	40,06	39,92					
	0,05	1,00	40,16	40,01	161,30	586,97	37,70	98,00	94,00
		2,00	40,13	39,81				Average	96,00
		3,00	40,02	39,84					
5% x1½	1,00	40,05	39,26	160,20	560,93	38,30	93,00	82,00	
	2,00	40,07	39,09				Average	87,50	
	3,00	40,06	39,22						
5% x2	1,00	39,99	40,71	161,30	584,01	39,20	94,00	94,00	
	2,00	40,01	40,47				Average	94,00	
	3,00	39,97	39,95						

F RÅDATA AF MÅLINGER FOR MØRTELPRØVNINGER

		28-døgn prøve						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultral lyd	1,00	2,00	
28-døgn prøve	Ref	1,00	40,02	38,30	160,40	564,95	37,50	97,00	97,00
		2,00	40,05	39,38				Average	97,00
		3,00	40,03	40,17					
	Ref	1,00	40,00	38,85	161,80	571,99	37,00	81,00	100,00
		2,00	40,00	39,34				Average	90,50
		3,00	40,02	40,00					
	0,05	1,00	40,05	38,53	160,50	557,78	38,60	90,00	72,00
		2,00	40,25	38,88				Average	81,00
		3,00	39,93	38,87					
	0,05	1,00	40,09	40,16	161,20	586,92	38,30	99,00	101,00
		2,00	40,41	39,95				Average	100,00
		3,00	40,19	39,72					
5% x1½	1,00	39,92	39,17	160,40	562,79	38,80	91,00	84,00	
	2,00	39,84	39,22				Average	87,50	
	3,00	39,88	39,00						
5% x2	1,00	40,60	40,92	161,10	587,71	38,70	95,00	90,00	
	2,00	39,94	40,38				Average	92,50	
	3,00	40,08	40,04						

F.2.1.5 35-døgns prøver

	35-døgn prøve								Porøsitet		
	Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultralyd	Tryk		våd	tør		
						1,00	2,00				
35-døgn prøve	Ref	1,00	40,27	39,78	162,00	574,53	39,00	101,00	98,00	582,75	574,53
		2,00	40,19	40,29				Average	99,50		
		3,00	40,09	40,68							
	Ref	1,00	40,70	40,89	160,20	567,42	38,10	97,00	91,00	575,60	567,42
		2,00	40,04	40,39				Average	94,00		
		3,00	40,18	40,29							
	0,05	1,00	39,91	39,71	161,50	572,24	38,10	99,00	92,00	580,71	572,24
		2,00	39,86	39,36				Average	95,50		
		3,00	40,18	39,39							
	0,05	1,00	40,00	40,29	161,30	578,19	38,00	105,00	107,00	586,38	578,19
		2,00	40,01	40,18				Average	106,00		
		3,00	39,92	40,21							
0,05 (3)	1,00	40,00	40,10	161,50	575,69	37,80	87,00	87,00	584,90	575,69	
	2,00	40,04	40,30				Average	87,00			
	3,00	40,10	40,55								
5% x1½	1,00	40,03	38,87	160,60	549,53	39,10	98,00	88,00	557,90	549,53	
	2,00	40,03	38,98				Average	93,00			
	3,00	39,93	39,48								
5% x2	1,00	40,04	40,02	161,30	558,69	38,50	90,00	92,00	567,34	558,69	
	2,00	40,06	39,71				Average	91,00			
	3,00	40,13	39,52								

	35-døgn prøve								Porøsitet		
	Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultralyd	Tryk		våd	tør		
						1,00	2,00				
35-døgn prøve	Ref	1,00	40,04	39,00	161,70	572,76	37,60	80,00	83,00	581,12	572,76
		2,00	40,04	39,34				Average	81,50		
		3,00	40,04	39,73							
	Ref	1,00	40,10	40,21	160,50	553,94	40,40	92,00	93,00	562,18	553,94
		2,00	40,17	39,94				Average	92,50		
		3,00	40,13	39,95							
	0,05	1,00	39,88	39,77	161,40	571,91	39,40	95,00	86,00	580,63	571,91
		2,00	39,98	39,59				Average	90,50		
		3,00	40,11	39,39							
	0,05	1,00	39,97	40,06	161,30	576,16	37,70	102,00	101,00	584,41	576,16
		2,00	39,98	40,28				Average	101,50		
		3,00	39,99	40,82							
0,05 (3)	1,00	40,09	40,05	161,20	570,92	37,60	89,00	86,00	580,32	570,92	
	2,00	40,24	40,50				Average	87,50			
	3,00	40,24	39,95								
5% x1½	1,00	40,16	39,33	161,30	548,55	40,30	91,00	93,00	557,12	548,55	
	2,00	40,08	39,74				Average	92,00			
	3,00	40,04	39,57								
5% x2	1,00	39,83	39,90	161,20	563,60	40,50	93,00	85,00	572,46	563,60	
	2,00	39,83	40,85				Average	89,00			
	3,00	39,93	40,75								

F RÅDATA AF MÅLINGER FOR MØRTELPRØVNINGER

	35-døgn prøve										
								Tryk		Porøsitet	
	Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultralyd	Tryk	Tryk	våd	tør		
Ref	1,00	40,08	39,68	161,20	574,69	37,70	105,00	84,00	582,63	574,69	
	2,00	40,01	39,94				Average	94,50			
	3,00	39,97	40,07								
Ref	Tryk							1,00	2,00		
	1,00	39,94	41,04	160,80	566,39	38,50	91,00	84,00	575,17	566,39	
	2,00	40,10	40,31				Average	87,50			
0,05	Tryk							1,00	2,00		
	1,00	39,97	39,88	162,90	570,03	38,70	84,00	88,00	578,74	570,03	
	2,00	39,94	39,70				Average	86,00			
0,05	Tryk							1,00	2,00		
	1,00	stykker	stykker	stykker	stykker	stykker	stykker	stykker	stykker	stykker	
	2,00	stykker	stykker				Average	#DIV/0!			
0,05 (3)	Tryk							1,00	2,00		
	1,00	40,08	40,18	160,90	571,47	37,80	85,00	94,00	580,42	571,47	
	2,00	40,52	40,89				Average	89,50			
5% x1½	Tryk							1,00	2,00		
	1,00	40,09	38,60	160,20	542,81	39,30	92,00	98,00	551,19	542,81	
	2,00	40,07	39,40				Average	95,00			
5% x2	Tryk							1,00	2,00		
	1,00	39,98	40,27	160,90	575,70	39,10	95,00	93,00	584,38	575,70	
	2,00	40,01	41,12				Average	94,00			
	3,00	40,15	41,43								

F.2.1.6 42-døgns prøver

	42-døgn prøve								Porøsitet vægt	
	Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultralyd	Tryk		våd	tør	
						1,00	2,00			
Ref	1,00	40,08	40,47	161,60	573,02	38,90	103,00	73,00	581,26	573,02
	2,00	40,72	40,27				Average 88,00			
	3,00	40,09	40,11							
Ref	1,00	40,05	40,34	161,20	580,87	39,30	94,00	58,00	588,72	580,87
	2,00	39,99	40,37				Average 76,00			
	3,00	40,01	40,92							
0,05	1,00	39,92	39,51	161,20	564,04	37,80	102,00	95,00	572,75	564,04
	2,00	39,93	39,38				Average 98,50			
	3,00	39,93	39,48							
0,05	1,00	39,98	40,25	161,00	573,39	37,60	107,00	105,00	582,10	573,39
	2,00	39,95	40,07				Average 106,00			
	3,00	40,00	40,32							
5% x1½	1,00	40,11	40,91	161,30	581,77	37,60	102,00	96,00	590,32	581,77
	2,00	40,01	40,62				Average 99,00			
	3,00	40,12	40,52							
5% x2	1,00	39,89	40,39	160,00	574,59	36,50	115,00	91,00	583,01	574,59
	2,00	39,89	40,74				Average 103,00			
	3,00	40,26	40,82							

	42-døgn prøve								Porøsitet vægt	
	Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultralyd	Tryk		våd	tør	
						1,00	2,00			
Ref	1,00	39,99	39,47	161,20	562,61	38,20	105,00	108,00	570,42	562,61
	2,00	39,99	39,67				Average 106,50			
	3,00	40,01	39,69							
Ref	1,00	40,14	40,21	160,90	581,34	39,60	106,00	104,00	589,46	581,34
	2,00	40,20	40,56				Average 105,00			
	3,00	40,57	41,07							
0,05	1,00	39,89	39,92	161,50	560,39	38,30	85,00	88,00	569,35	560,39
	2,00	39,95	39,79				Average 86,50			
	3,00	40,01	39,37							
0,05	1,00	39,95	40,76	160,00	572,63	38,40	110,00	98,00	580,99	572,63
	2,00	39,90	40,30				Average 104,00			
	3,00	39,96	40,25							
5% x1½	1,00	39,82	40,93	161,20	576,90	37,20	107,00	90,00	585,35	576,90
	2,00	39,92	40,44				Average 98,50			
	3,00	39,89	40,39							
5% x2	1,00	40,06	40,65	160,40	576,98	36,70	103,00	90,00	585,50	576,98
	2,00	40,03	40,68				Average 96,50			
	3,00	40,04	40,88							

F RÅDATA AF MÅLINGER FOR MØRTELPRØVNINGER

	42-døgn prøve										
	Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultral lyd	Tryk		Porøsitet			
						1,00	2,00	våd	tør		
42-døgn prøve	Ref	1,00	40,15	40,12	161,40	570,13	37,10	107,00	106,00	579,14	570,13
		2,00	40,02	41,30				Average	106,50		
		3,00	39,99	39,90							
	Ref	1,00	39,88	40,97	160,40	576,18	40,50	97,00	108,00	583,70	576,18
		2,00	39,96	40,28				Average	102,50		
		3,00	39,95	40,19							
	0,05	1,00	39,97	39,87	161,30	570,40	37,60	97,00	98,00	579,00	570,40
		2,00	39,95	39,87				Average	97,50		
		3,00	40,09	40,26							
	0,05	1,00	39,97	40,08	160,50	573,63	38,10	111,00	67,00	581,86	573,63
		2,00	40,21	40,08				Average	89,00		
		3,00	40,22	40,30							
5% x1½	1,00	40,23	40,51	161,10	581,53	36,90	96,00	105,00	589,73	581,53	
	2,00	40,05	40,71				Average	100,50			
	3,00	40,07	40,38								
5% x2	1,00	39,85	40,61	160,80	579,93	36,90	88,00	110,00	588,51	579,93	
	2,00	39,88	41,03				Average	99,00			
	3,00	39,91	41,17								

F.2.1.7 Rapidecement

		RAPID-CEMENT						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultral lyd	1,00	2,00	
7-døgn	1,00	40,07	39,92	161,90	579,75	37,40	106,00	101,00	
	2,00	39,94	40,10				Average	103,50	
	3,00	39,99	40,32						
		RAPID-CEMENT						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultral lyd	1,00	2,00	
14-døgn	1,00	38,73	39,74	160,70	575,18	37,20	119,00	117,00	
	2,00	38,53	39,66				Average	118,00	
	3,00	38,58	40,23						
		RAPID-CEMENT						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultral lyd	1,00	2,00	
28-døgn	1,00	40,58	39,72	159,90	574,64	35,80	88,00	96,00	
	2,00	40,65	40,50				Average	92,00	
	3,00	40,42	40,34						

		RAPID-CEMENT						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultral lyd	1,00	2,00	
7-døgn	1,00	40,07	39,92	161,90	579,75	37,40	106,00	101,00	
	2,00	39,94	40,10				Average	103,50	
	3,00	39,99	40,32						
		RAPID-CEMENT						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultral lyd	1,00	2,00	
14-døgn	1,00	38,73	39,74	160,70	575,18	37,20	119,00	117,00	
	2,00	38,53	39,66				Average	118,00	
	3,00	38,58	40,23						
		RAPID-CEMENT						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultral lyd	1,00	2,00	
28-døgn	1,00	40,58	39,72	159,90	574,64	35,80	88,00	96,00	
	2,00	40,65	40,50				Average	92,00	
	3,00	40,42	40,34						

		RAPID-CEMENT						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultral lyd	1,00	2,00	
7-døgn	1,00	40,07	39,92	161,90	579,75	37,40	106,00	101,00	
	2,00	39,94	40,10				Average	103,50	
	3,00	39,99	40,32						
		RAPID-CEMENT						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultral lyd	1,00	2,00	
14-døgn	1,00	38,73	39,74	160,70	575,18	37,20	119,00	117,00	
	2,00	38,53	39,66				Average	118,00	
	3,00	38,58	40,23						
		RAPID-CEMENT						Tryk	
		Bredde	Højde	Længde	Vægt	Ultral lyd	1,00	2,00	
28-døgn	1,00	40,58	39,72	159,90	574,64	35,80	88,00	96,00	
	2,00	40,65	40,50				Average	92,00	
	3,00	40,42	40,34						

G Blaine-tal

G.1 Ubehandlet aske



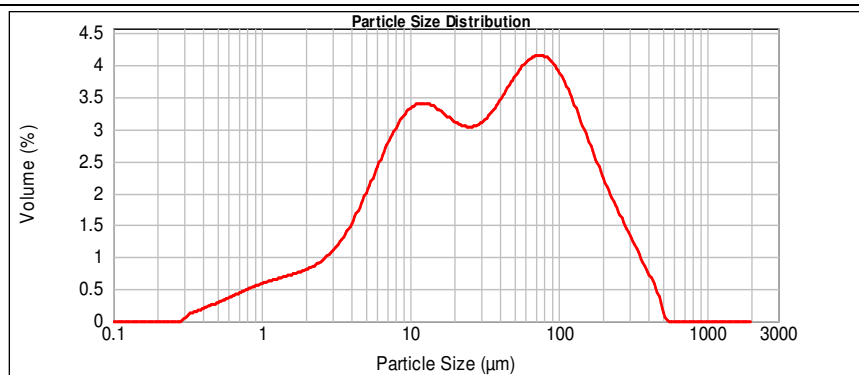
Result Analysis Report

Sample Name: Ubehandlet aske	SOP Name: Bundaske	Measured: 11. april 2013 09:49:39
Sample Source & type: Paris	Measured by: f-user	Analysed: 11. april 2013 09:49:40
Sample bulk lot ref: 123-ABC	Result Source: Measurement	

Particle Name: aske	Accessory Name: Scirocco 2000	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 1.500	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 5.89 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.805 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0013 %Vol	Span : 5.213	Uniformity: 1.65	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.754 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 7.955 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 64.603 um	

d(0.1): 3.754 um d(0.5): 32.033 um d(0.9): 170.745 um



Ubehandlet aske, 11. april 2013 09:49:39

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.46	7.096	2.18	50.238	2.93	355.656	0.66
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.48	7.962	2.34	56.368	3.04	399.052	0.49
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.51	8.934	2.46	63.246	3.11	447.744	0.29
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.53	10.024	2.53	70.963	3.13	502.377	0.01
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.56	11.247	2.56	79.621	3.10	563.677	0.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.59	12.619	2.55	89.337	3.00	632.456	0.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.63	14.159	2.51	100.237	2.86	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.01	2.244	0.67	15.897	2.44	112.468	2.67	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.10	2.518	0.74	17.825	2.38	126.191	2.46	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.13	2.825	0.82	20.000	2.32	141.589	2.24	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.20	3.170	0.93	22.440	2.29	158.866	2.01	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.24	3.557	1.06	25.179	2.29	178.250	1.79	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.28	3.991	1.22	28.251	2.33	200.000	1.58	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.32	4.477	1.40	31.698	2.41	224.404	1.39	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.35	5.024	1.60	35.566	2.52	251.785	1.20	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.39	5.637	1.80	39.905	2.66	282.508	1.02	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.43	6.325	2.00	44.774	2.80	316.979	0.85		
0.142	0.00	1.002		7.096		50.238		355.656			

Operator notes:

G.2 Vasket og håndformalet aske



MASTERSIZER 2000

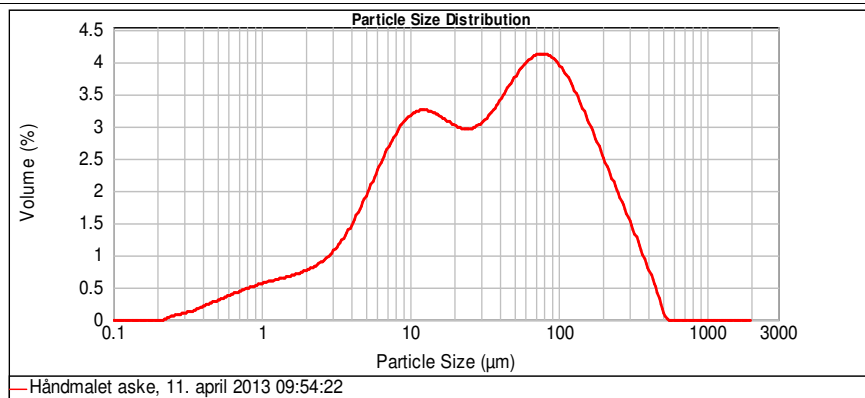
Result Analysis Report

Sample Name: Håndmalet aske	SOP Name: Bundaske	Measured: 11. april 2013 09:54:22
Sample Source & type: Paris	Measured by: f-user	Analysed: 11. april 2013 09:54:23
Sample bulk lot ref: 123-ABC	Result Source: Measurement	

Particle Name: aske	Accessory Name: Scirocco 2000	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 1.500	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 6.69 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.889 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0015 %Vol	Span : 5.143	Uniformity: 1.61	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.775 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 7.738 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 68.089 um	

d(0.1): 3.836 um d(0.5): 34.629 um d(0.9): 181.921 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.44	7.096	2.09	50.238	2.89	355.656	0.72
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.46	7.962	2.24	56.368	3.00	399.052	0.50
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.48	8.934	2.35	63.246	3.08	447.744	0.26
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.50	10.024	2.43	70.963	3.11	502.377	0.01
0.032	0.00	0.224	0.03	1.589	0.53	11.247	2.45	79.621	3.10	563.677	0.00
0.036	0.00	0.252	0.05	1.783	0.56	12.619	2.45	89.337	3.04	632.456	0.00
0.040	0.00	0.283	0.08	2.000	0.60	14.159	2.41	100.237	2.83	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.10	2.244	0.64	15.887	2.35	112.468	2.79	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.13	2.518	0.71	17.825	2.30	126.191	2.61	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.17	2.825	0.79	20.000	2.25	141.589	2.42	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.21	3.170	0.89	22.440	2.23	158.866	2.21	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.24	3.557	1.02	25.179	2.25	178.250	2.00	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.28	3.991	1.18	28.251	2.30	200.000	1.79	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.32	4.477	1.35	31.698	2.38	224.404	1.59	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.35	5.024	1.54	35.966	2.49	251.785	1.37	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.38	5.637	1.73	39.905	2.62	282.508	1.16	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.41	6.325	1.92	44.774	2.76	316.979	0.95		
0.142	0.00	1.002	0.44	7.096	2.09	50.238	2.76	355.656	0.95		

Operator notes:

G.3 Formalet aske



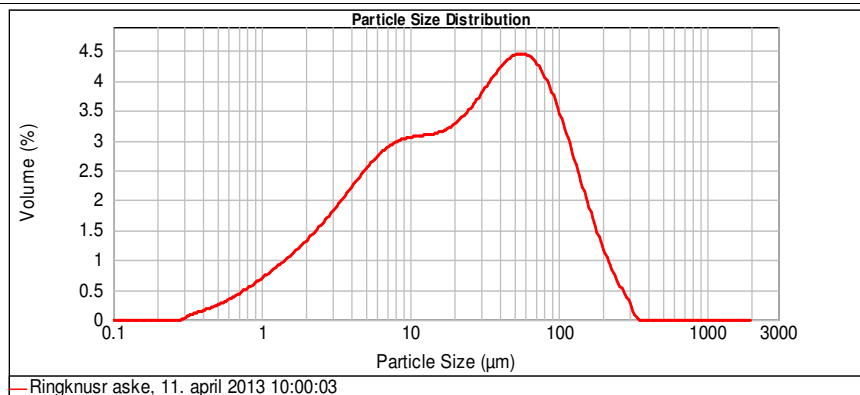
Result Analysis Report

Sample Name: Ringknusr aske	SOP Name: Bundaske	Measured: 11. april 2013 10:00:03
Sample Source & type: Paris	Measured by: f-user	Analysed: 11. april 2013 10:00:04
Sample bulk lot ref: 123-ABC	Result Source: Measurement	

Particle Name: aske	Accessory Name: Scirocco 2000	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 1.500	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 11.44 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.431 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0022 %Vol	Span : 4.447	Uniformity: 1.41	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.872 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 6.881 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 43.793 um	

d(0.1): 2.720 um d(0.5): 24.621 um d(0.9): 112.199 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.56	7.096	2.21	50.238	3.35	355.656	0.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.63	7.962	2.26	56.368	3.34	399.052	0.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.70	8.934	2.29	63.246	3.28	447.744	0.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.78	10.024	2.31	70.963	3.17	502.377	0.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.86	11.247	2.32	79.621	2.99	563.677	0.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.95	12.619	2.33	89.337	2.76	632.456	0.00
0.040	0.00	0.283	0.01	2.000	1.04	14.159	2.35	100.237	2.50	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.07	2.244	1.14	15.887	2.38	112.468	2.20	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.09	2.518	1.25	17.825	2.43	126.191	1.89	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.13	2.825	1.36	20.000	2.50	141.589	1.58	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.16	3.170	1.47	22.440	2.60	158.866	1.29	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.21	3.557	1.60	25.179	2.71	178.250	1.02	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.25	3.991	1.72	28.251	2.84	200.000	0.78	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.30	4.477	1.84	31.698	2.97	224.404	0.56	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.36	5.024	1.95	35.566	3.10	251.785	0.38	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.42	5.637	2.05	39.905	3.22	282.508	0.23	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.49	6.325	2.14	44.774	3.30	316.979	0.01		
0.142	0.00	1.002		7.096		50.238		355.656			

Operator notes:

G.4 Ubehandlet basiscement



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
Ubehandlet cement - s102947

Sample Source & type:
Paris

Sample bulk lot ref:
123-ABC

SOP Name:
Cement tør

Measured by:
f-user

Result Source:
Measurement

Measured:
11. april 2013 09:07:44

Analysed:
11. april 2013 09:07:45

Particle Name:
Cement

Particle RI:
1.500

Dispersant Name:

Accessory Name:
Scirocco 2000

Absorption:
0

Dispersant RI:
1.000

Analysis model:
General purpose

Size range:
0.020 to 2000.000 μm

Weighted Residual:
0.505 %

Sensitivity:
Enhanced

Obscuration:
6.85 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0010 %Vol

Span :
4.594

Uniformity:
2.47

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
1.08 m^2/g

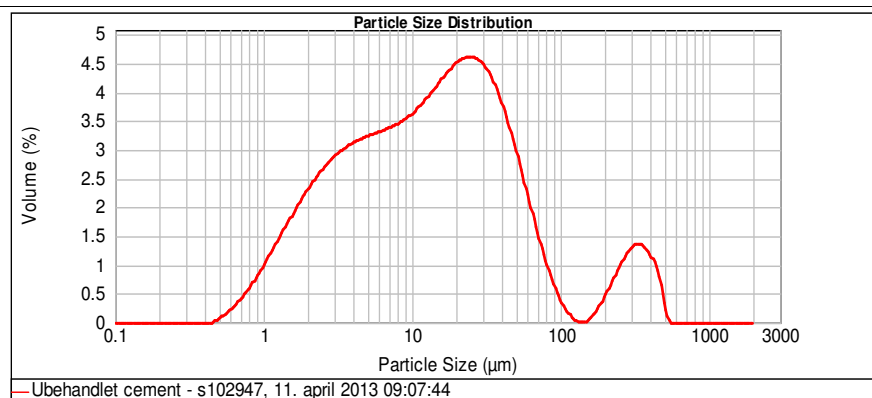
Surface Weighted Mean D[3,2]:
5.579 μm

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
38.975 μm

d(0.1): 2.045 μm

d(0.5): 13.591 μm

d(0.9): 64.480 μm



Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.83	7.096	2.57	50.238	2.06	355.656	0.96
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	1.00	7.962	2.63	56.368	1.68	399.052	0.81
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	1.18	8.904	2.69	63.246	1.31	447.744	0.52
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	1.35	10.024	2.78	70.963	0.96	502.377	0.02
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	1.52	11.247	2.88	79.621	0.65	563.677	0.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	1.68	12.619	3.00	89.337	0.39	632.456	0.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	1.82	14.159	3.12	100.237	0.20	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	1.95	15.887	3.25	112.468	0.07	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	2.07	17.825	3.36	126.191	0.01	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	2.17	20.000	3.44	141.589	0.02	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.02	3.170	2.25	22.440	3.48	158.866	0.12	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.09	3.557	2.32	25.179	3.46	178.250	0.27	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.16	3.991	2.38	28.251	3.39	200.000	0.45	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.27	4.477	2.42	31.698	3.24	224.404	0.66	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.38	5.024	2.46	35.566	3.03	251.785	0.84	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.52	5.637	2.49	39.905	2.75	282.508	0.98	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.67	6.325	2.53	44.774	2.42	316.979	1.03		
0.142	0.00	1.002	0.67	7.096	2.53	50.238	2.42	355.656	1.03		

Operator notes:

G.5 Formalet basiscement



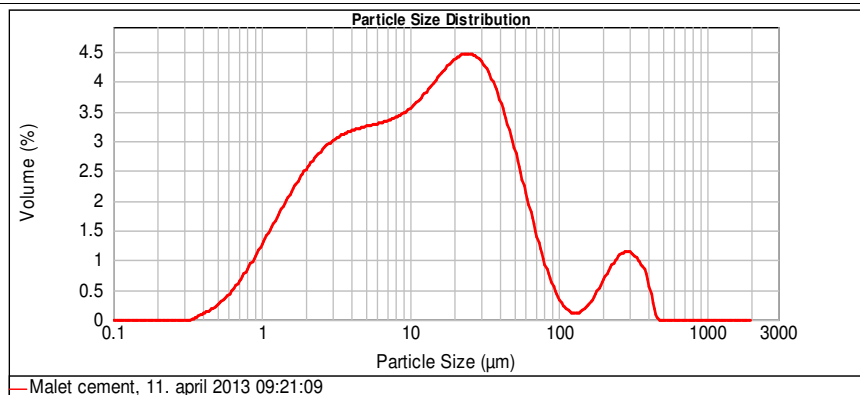
Result Analysis Report

Sample Name: Malet cement	SOP Name: Cement tør	Measured: 11. april 2013 09:21:09
Sample Source & type: Paris	Measured by: f-user	Analysed: 11. april 2013 09:21:10
Sample bulk lot ref: 123-ABC	Result Source: Measurement	

Particle Name: Cement	Accessory Name: Scirocco 2000	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Enhanced
Particle RI: 1.500	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 9.63 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.432 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0012 %Vol	Span : 4.646	Uniformity: 2.26	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.25 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 4.785 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 32.433 um	

d(0.1): 1.758 um d(0.5): 12.260 um d(0.9): 58.714 um

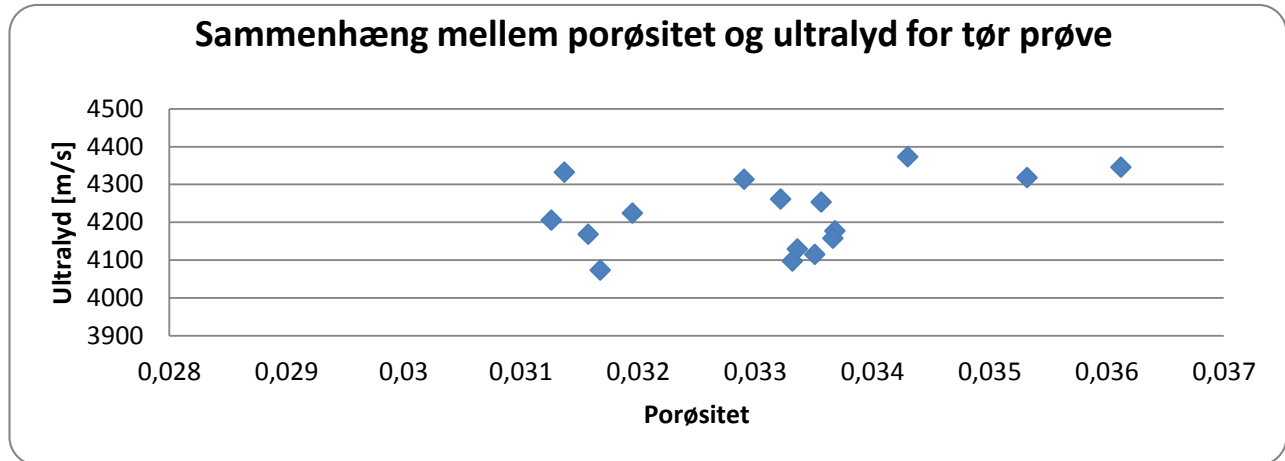


Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	1.03	7.096	2.53	50.238	1.99	355.656	0.65
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	1.20	7.962	2.57	56.368	1.62	399.052	0.28
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	1.38	8.904	2.63	63.246	1.25	447.744	0.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	1.54	10.024	2.71	70.963	0.91	502.377	0.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	1.70	11.247	2.80	79.621	0.60	563.677	0.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	1.84	12.619	2.91	89.337	0.36	632.456	0.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	1.97	14.159	3.03	100.237	0.19	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	2.08	15.887	3.14	112.468	0.10	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.05	2.518	2.17	17.825	3.25	126.191	0.08	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.09	2.825	2.25	20.000	3.32	141.589	0.14	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.15	3.170	2.31	22.440	3.36	158.866	0.25	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.22	3.557	2.36	25.179	3.34	178.250	0.41	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.31	3.991	2.40	28.251	3.27	200.000	0.58	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.43	4.477	2.43	31.698	3.13	224.404	0.73	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.56	5.024	2.45	35.566	2.93	251.785	0.84	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.70	5.637	2.47	39.905	2.66	282.508	0.86	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.86	6.325	2.50	44.774	2.34	316.979	0.77		
0.142	0.00	1.002	0.86	7.096	2.50	50.238	2.34	355.656	0.77		

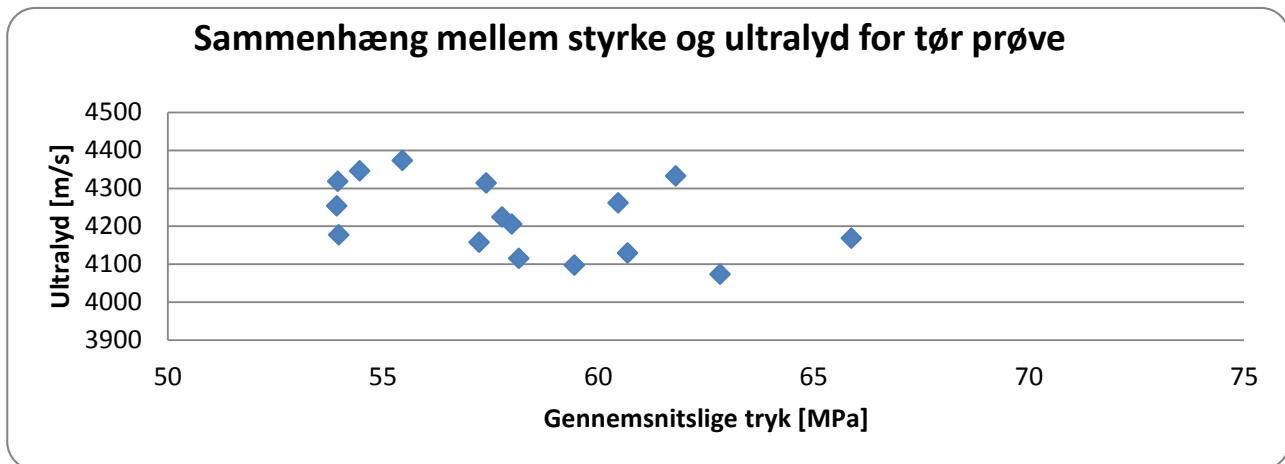
Operator notes:

H Sammenhænge for ultralyd

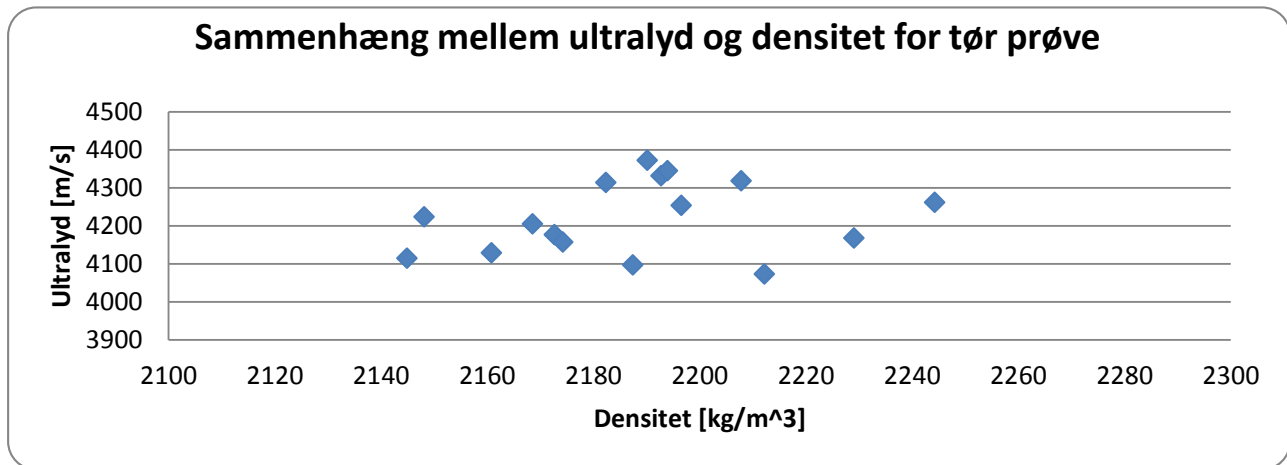
H.1 35 døgns prøver



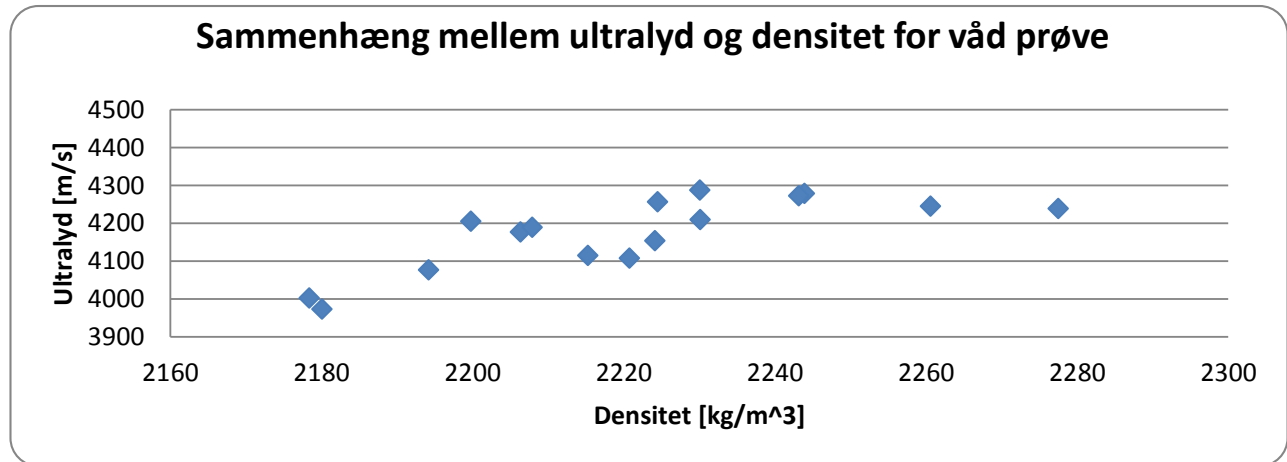
Figur 27: Ultralydens hastighed gennem de tørre 35-døgns prøver i forhold til porøsiteten.



Figur 28: Ultralydens hastighed gennem de tørre 35-døgns prøver i forhold til styrken.

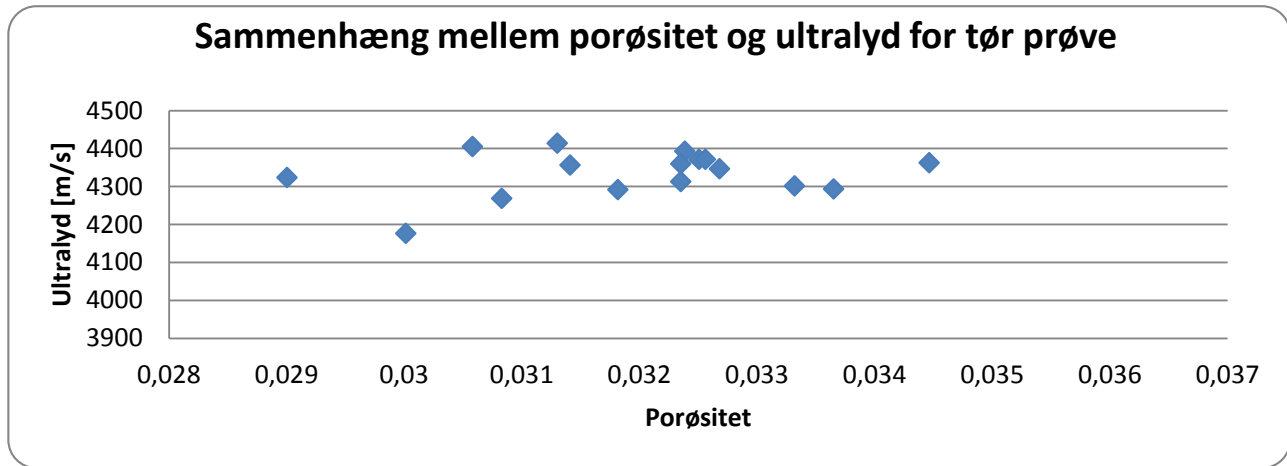


Figur 29: Ultralydens hastighed gennem de tørre 35-døgns prøver i forhold til densiteten.

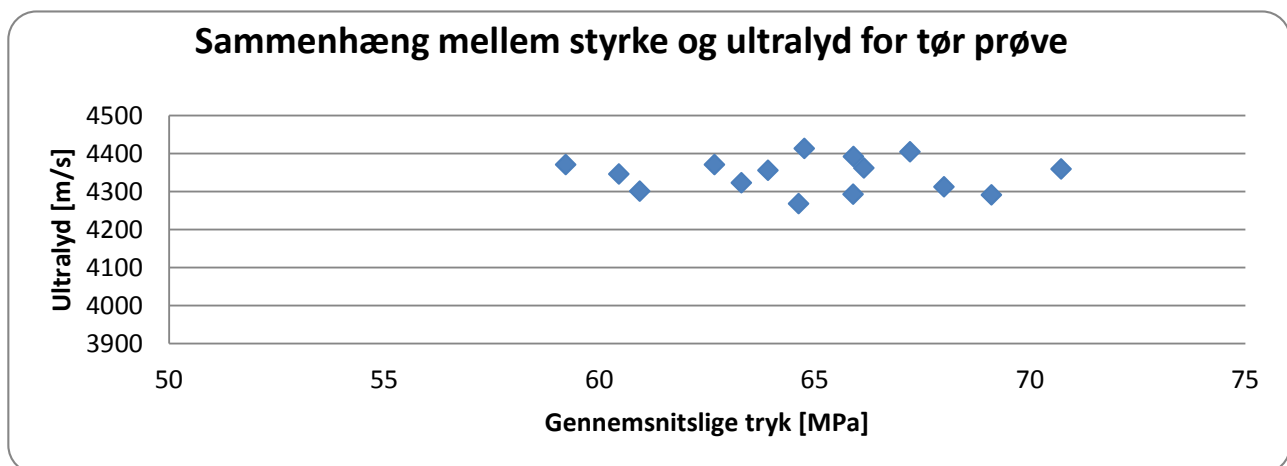


Figur 30: Ultralydens hastighed gennem de våde 35-døgns prøver i forhold til densiteten.

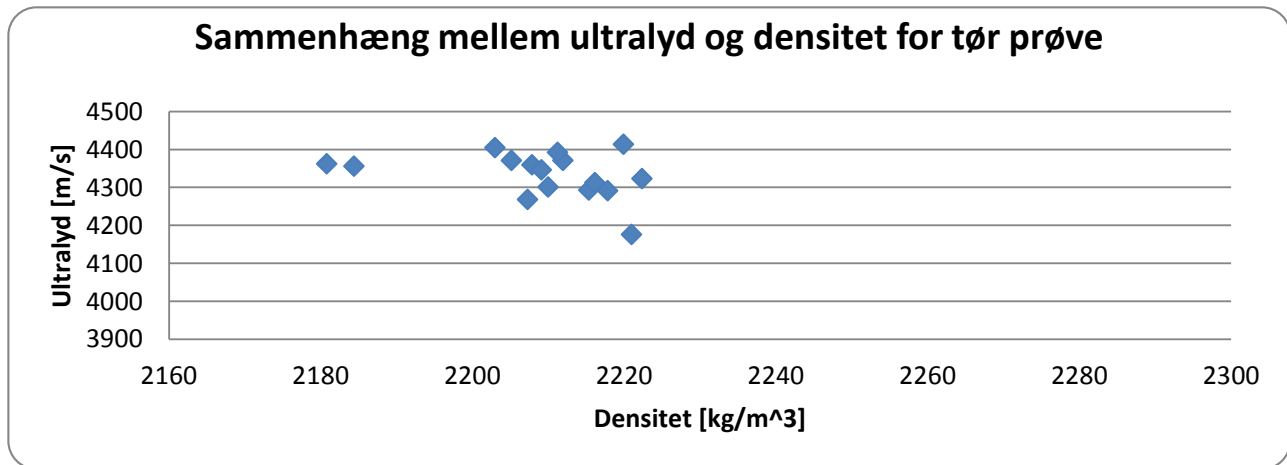
H.2 42 døgns prøver



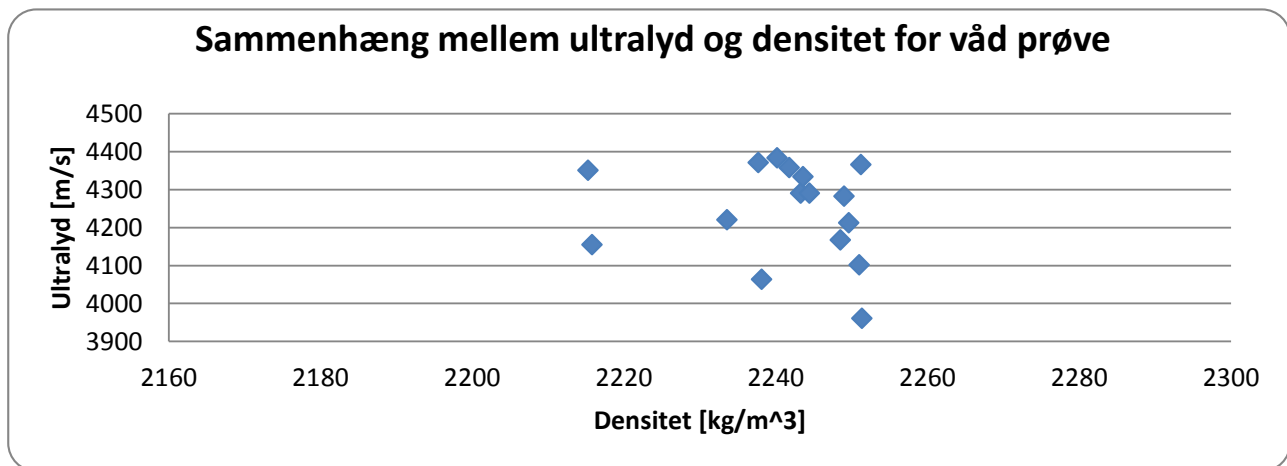
Figur 31: Ultralydens hastighed gennem de tørre 42-døgns prøver i forhold til porøsiteten.



Figur 32: Ultralydens hastighed gennem de tørre 42-døgns prøver i forhold til styrken.



Figur 33: Ultralydens hastighed gennem de tørre 42-døgns prøver i forhold til densiteten.



Figur 34: Ultralydens hastighed gennem de våde 42-døgns prøver i forhold til densiteten.

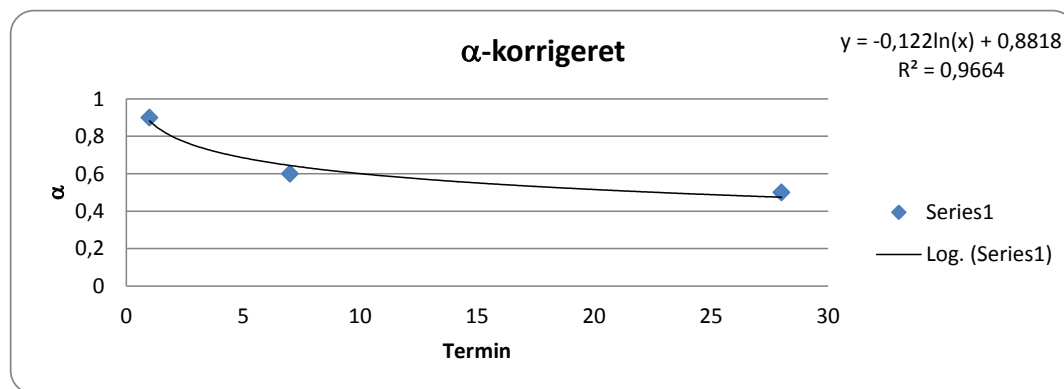
I Styrketab og standardafvigelse for langtidsprøver

Tabel 26: Styrketabet ift. referenceprøverne, samt relative standardafvigelse. Ved negativt styrketab forstås en forøgelse af styrken.

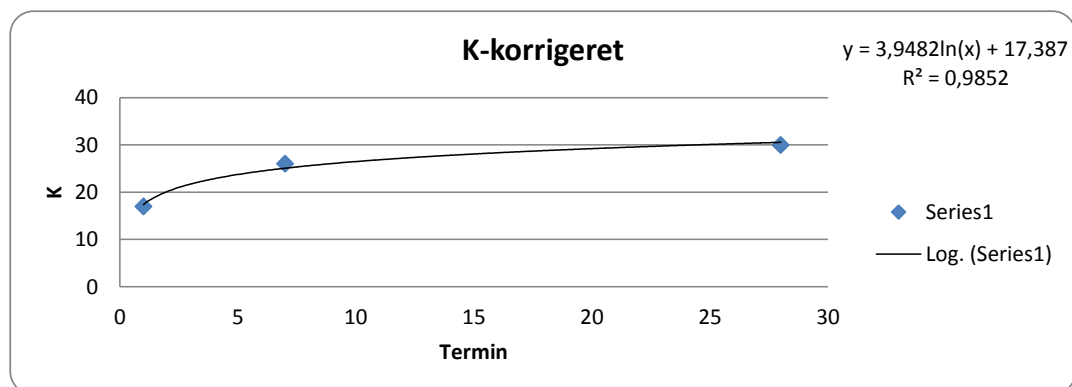
Prøve A			Prøve E		
Termin [døgn]	Styrketab ift. ref	Relativ Standard- afvigelse	Termin [døgn]	Styrketab ift. ref	Relativ Standard- afvigelse
7	-4 %	6 %	7	-12 %	2 %
14	-1 %	3 %	14	-6 %	3 %
21	-6 %	4 %	21	-12 %	3 %
28	0 %	3 %	28	7 %	6 %
35	-2 %	8 %	35	-4 %	4 %
42	3 %	8 %	42	5 %	7 %
Prøve F			Reference		
7	3 %	4 %	7	-	7 %
14	-4 %	6 %	14	-	6 %
21	-12 %	6 %	21	-	9 %
28	8 %	7 %	28	-	7 %
35	1 %	4 %	35	-	8 %
42	0 %	10 %	42	-	5 %

J Bolomey

De korrigerede værdier for α og K er fundet ved at opstille de kendte værdier for de to, i hver deres graf, og herefter lave en regression over dem. Denne regression har givet en ligning som α og K så er korrigeret ved.



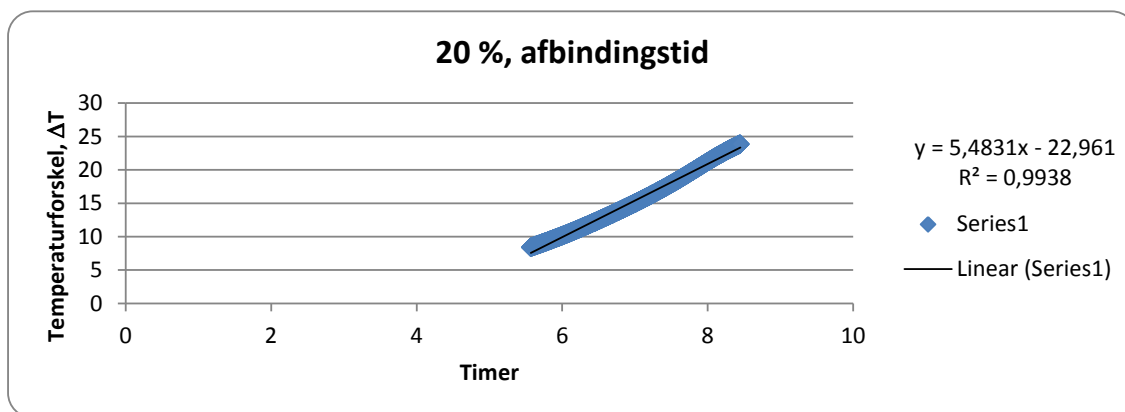
Figur 35: Kurve opstillet for α med tilhørende tendenslinie og R-kvadrat.



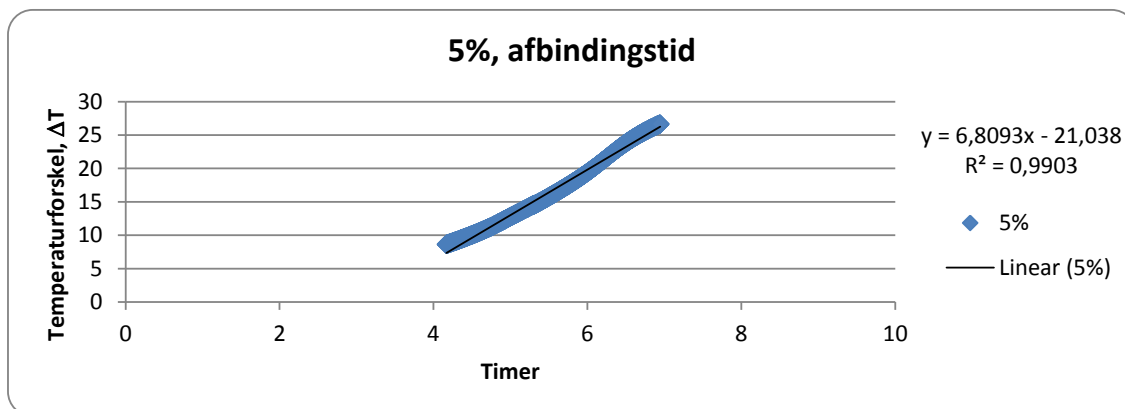
Figur 36: Kurve opstillet for K med tilhørende tendenslinie og R-kvadrat.

K Varmeudvikling og afbindingstid

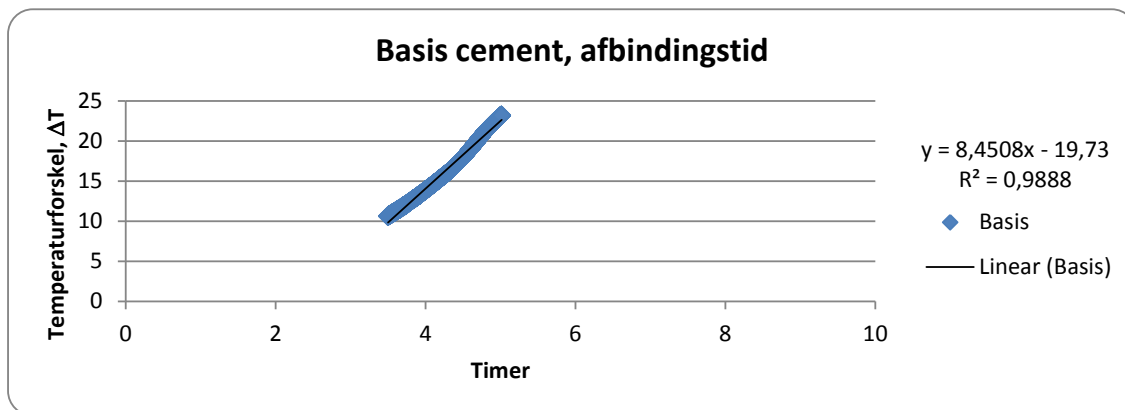
Afbindingstiden er fundet via regressionerne for de nedenstående kurver. Kurverne er opstillet ved den stejleste del af den givne varmeudviklingskurve. Herefter er en tendenslinje sat op vha. en reggressionlinje, og herved er afbindingstiden fundet som skæringspunktet mellem tendenslinje og en vandret linje der udgør nulpunktet for starttemperaturen.



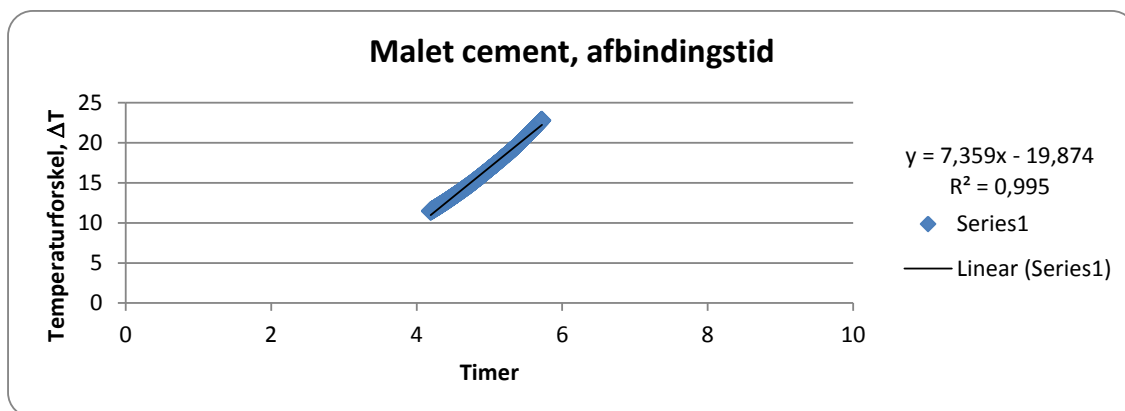
Figur 37: Udsnit af varmeudviklingskurven for C-prøven. Afbindingstiden findes ved formelen for tendenslinjen.



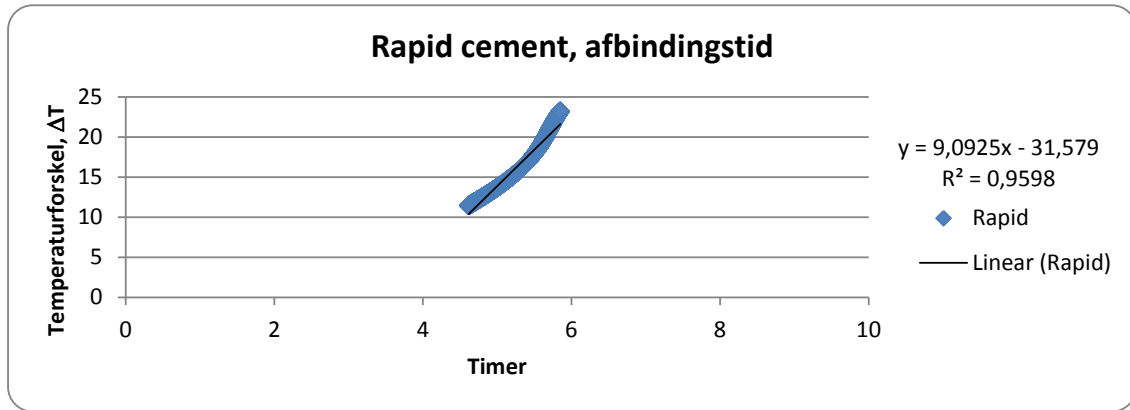
Figur 38: Udsnit af varmeudviklingskurven for A-prøven. Afbindingstiden findes ved formelen for tendenslinjen.



Figur 39: Udsnit af varmeudviklingskurven for basis cementen. Afbindingstiden findes ved formelen for tendenslinjen.



Figur 40: Udsnit af varmeudviklingskurven for formalet basis cement. Afbindingstiden findes ved formelen for tendenslinjen.



Figur 41: Udsnit af varmeudviklingskurven for rapid cement. Afbindingstiden findes ved formlen for tendenslinjen.

L Måleresultater fra [Madsen og Fjelstrup, 2013]

	Prøve	Længde [cm]	Bredde [mm]	Tykkelse [mm]	Vægt [g]	Rumfang [m ³]
5 % prøven (38)	A	16,15	39,57	40,16	565,56	2,57E-04
Mindre cement	B	16,10	40,29	40,00	571,85	2,59E-04
7-døgns	C	16,20	39,81	40,12	566,10	2,59E-04
Gennemsnit:		16,15	39,89	40,09	567,84	2,58E-04
		Densitet [kg/m ³]	Ultralyd [μs]	Ultralyd [s]	Ultralyd [s/m]	Trykstyrke [MPa]
5 % prøven (38)	A	2203,48	38,50	3,85E-05	2,38E-04	40,04
Mindre cement	B	2204,12	38,30	3,83E-05	2,38E-04	43,63
7-døgns	C	2188,07	38,70	3,87E-05	2,39E-04	42,03
Gennemsnit:		2198,56	38,50	3,85E-05	2,38E-04	41,90

M Forsøgsvejledninger

M.1 Metode 4, pH i 1 M KCl opløsning

Electrochemistry in Civil Engineering, Metode 4, 16/11/10

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

A Princip

Jordens pH måles potentiometrisk i en opløsning 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.

M.2 Metode 9, Vandindhold i Jord

Electrochemistry in Civil Engineering, Metode 9, 16/11/10

Vandindhold i jord

A Princip

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

B Specielt apparatur

Til analysen benyttes et varmeskab.

C Analysens udførelse

Ved meget præcis måling:

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

Dette gøres vha. en tang, fingrene afsætter fugt.

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

Ved mindre præcis måling (mest anvendt):

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

M.3 Metode 11A, Oplukning af jordprøve efter [DS259, 2003]

Electrochemistry in Civil Engineering, Metode 11A, 16/11/10

Oplukning af jordprøve efter DS 259

A **Princip**

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

B **Specielt apparatur**

Til målingen benyttes et atomabsorptionsspektrofotometer (AAS).

C **Kemikalie sikkerhed**

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

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

M.4 Metode 16, Glødetab i jord

Electrochemistry in Civil Engineering, Metode 16, 16/11/10

Glødetab i jord

A Princip

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

B Specielt apparatur

Til analysen benyttes et muffelovn.

C Analysens udførelse

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

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

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

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

D Beregning af resultat

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

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

M.5 Vandopløselighed

Vandopløselighed

Analyse:

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

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

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

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

Hele prøven hældes over i filteret og stilles til afdrypning.

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

Asken og filteret vejes og vægten noteres.

M.6 Vandopløselige anioner

Vandopløselige anioner

Analyse:

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

Prøven stilles på rystebord natten over.

Prøven filtreres med sprøjtefilter og prøven gemmes til ionchromotograf og AAS