

# STYRKEUDVIKLING & AFBINDINGSTID I BETON

- ved delvis cementerstatning med træaske



Raja Saif - s120013

DiplomByg Afgangprojekt – 2016

Institut for Byggeri og Anlæg

Danmarks Tekniske Universitet

## 1 – Forord

Denne rapport er udarbejdet som et DiplomByg afgangsprøveprojekt under Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet (DTU).

Projektet er en del af ZeroWaste Byg, og omhandler styrkeudvikling af mørtel ved delvis erstatning af cement med træaske.

Afgangsprøveprojektet er vurderet til 20 ECTS-points, og er udarbejdet i foråret 2016.

Indholdet af rapporten er rettet til medstuderende.

Der skal lyde en særlig tak til:

Professor Lisbeth M. Ottosen, som har virket som hovedvejleder.

Professor Per Goltermann og lektor Pernille E. Jensen, som har virket som supplerende vejledere.

Laborantkoordinator Ebba Cederberg Schnell og laborant Malene Grønvold for assistance og vejledning i forbindelse med forsøg; mørtel-prøver og askekaraktistik.

Betontechniker Per Leth for assistance i forbindelse med arbejdet i støberiet.

---

Raja Saif – s120013

Kongens Lyngby

Juni 2016

## 2 – Resumé

Formålet med ”Styrkeudvikling & afbindingstid i beton – ved delvis cementerstatning med træaske” er at undersøge hvorledes tilsætning af aske vil påvirke styrkeudvikling, beton trykstyrke og aktivitetsfaktoren. Derudover vil anvendelsesmulighederne for asken i betonsammenhænge undersøges.

Som tilsætning vil en træaske fra Køge Kraftvarmeværk blive brugt. Dertil er en askekarakteristik for træasken udført, hvor vandindhold, vandopløselighed, glødetab, ledningsevne, pH og kornstørrelse bestemmes. Derudover bestemmes mængden af de vandopløselige anioner og kationer og de syreopløselige tungmetaller i træasken. Træasken vil bruges som en 10 % sanderstatning og 2,5%, 5%, 7,5% og 10% cementerstatning. Disse nævnte blandinger sammenlignes med en reference prøve. Mørtelprøverne bruges til at bestemme blandingerne flydesætmål, afbindingstid, porøsitet, densitet, kapillarsugning og trykstyrke, hvorfra aktivitetsfaktorer for træasken bestemmes.

Udefra de udførte undersøgelser er det konkluderet, at askens sammensætning begrænser anvendelsesmulighederne, men kan sagtens bruges indenfor nogle bestemte grænser. Bl.a. er der en bestemt maksimal tilladt erstatning af cement eller sand vedr. askens chlorid indhold. Ydermere viser kapillarsugning, at askens kornstørrelse virker som filler, eftersom der ses en mindre vandsugning i en prøve med træaske i forhold til reference prøven. Derudover bemærkes, at porøsitet stiger ved asketilsætning, mens densitet falder, eftersom træasken er et porøst materiale. Ved større askemængde i blandingen, bliver flydesætmålet mindre og afbindingstiden kortere. Tilmed, som følge af stigende porøsitet og faldende densitet, falder trykstyrken af mørtlen, som forventet. Selvom der fremkommer fald i styrken ved tilsætning af aske, betyder det ikke at mørtel med aske ikke er brugeligt. Der findes en del muligheder for at anvende betonen med de opnåede trykstyrker ved disse blandinger.

Udefra målt trykstyrke beregnes aktivitetsfaktorer for de forskellige blandinger, hvor det bevises, at en fast aktivitetsfaktor ikke holder. En aktivitetsfaktor afhænger af termin, tilsætningsmængde og tilsætningsart. At der bliver brugt en aktivitetsfaktor for flyveaske, for alle andre tilsætninger, tilsætningsmængde og termin er ikke korrekt.

### 3 - Summary

The purpose of “Strength development and setting time of concrete – by partial replacement of cement with wood ashes” is to investigate how the addition of the ash will affect the strength development, the compressive strength of concrete and the activity factor. Furthermore, possibilities for the use of the ash in concrete mixtures will be reviewed.

A wood ash from Køge CHP (Combined Heat & Power Station) will be used as substitution.

An ash characteristic of the wood ash is performed in which the water content, water solubility, ignition loss, conductivity, pH, and the grain size is determined. The amount of the water-soluble anions and cations and the acid-soluble heavy metals in the wood ash are also determined.

The wood ash will be used as a 10% sand replacement and 2.5%, 5%, 7.5% and 10% cement replacement. The mentioned mixtures will be compared with a reference sample.

The mortar samples are used to determine the slump flow, setting time, porosity, density, capillary suction and compressive strength, wherefrom the activity factors for the wood ash are determined.

It is concluded from the performed tests that the ash composition limits its use, but can still be used within certain limits. As for a maximum allowed replacement of cement or sand regarding the chloride content in the wood ash. Furthermore, the capillary suction shows that the ash grain size acts as filler since there is a reduced water suction in the sample with wood ash compared to the reference sample. It is also noted that the porosity increases with the addition of ash, while the density decreases, since the wood ash is a porous material. For larger amounts of ash in the mixtures the slump flow becomes smaller and the setting time shorter. In addition, due to increasing porosity and decreasing density, the compressive strength of the mortar is reduced, as expected. Although there is a decrease in the compressive strength by addition of ash, it does not mean that mortars with ash is not of use. There are several options for the use of concrete with the obtained compressive strengths of these mixtures.

From the measured compressive strengths, activity factors for the different mixtures are determined, where it is proven that a permanent activity factor does not hold. An activity factor depends on the hardening time, substitution rate and substitution type. The fact that the activity factor for fly ash is used for all other substitution types, substitution rate and hardening time is not correct.

## 4 - Indholdsfortegnelse

1 – Forord.....	1
2 – Resumé.....	2
3 - Summary.....	3
4 - Indholdsfortegnelse .....	4
5 – Indledning .....	7
6 - Teori.....	8
6. 1 – Beton .....	8
6.1.1 - Cement .....	8
6.1.2 – Tilsætninger .....	10
6.1.3 – Porøsitet og densitet.....	11
7 - Metoder og materialer .....	12
7.1 – Askekarakteristik.....	12
7.1.1 – Vandindhold .....	12
7.1.2 – Vandopløselighed .....	12
7.1.3 – Anioner, pH og ledningsevne .....	12
7.1.4 – Oplukning af askeprøve efter DS 259 .....	13
7.1.5 – Glødetab.....	13
7.1.6 – Kornstørrelse .....	13
7.2 – Mørtelprøver.....	14
7.2.1 – Støbeprocess.....	14
7.2.2 – Flydesætmål.....	15
7.2.3 – Afbinding; Vicatronic.....	16
7.2.4 – Porøsitet & densitet .....	17
7.2.5 – Kapillarsugning .....	17
7.2.6 – Trykprøvning .....	18

8 - Resultater og diskussion .....	20
8.1 - Askekarakteristik .....	20
8.1.1 – Vandopløselige salte.....	21
8.1.2 – Tungmetaller.....	24
8.1.3 – Kornkurve.....	26
8.2 – Mørtelprøver.....	27
8.2.1 – Flydesætmål.....	27
8.2.2 – Afbindingstid.....	29
8.2.3 – Porøsitet, densitet & kapillarsugning.....	31
8.2.4 – Trykstyrke.....	33
8.2.5 – Aktivitetsfaktor.....	37
Konklusion.....	44
Litteratur .....	45
Bilag.....	47
A – Forsøgsvejledninger .....	47
A.1 Vandindhold .....	48
A.2 Vandopløselighed .....	49
A.3 Ledningsevne i jord .....	50
A.4 Anioner .....	51
A.5 Oplukning af jord- og askeprøve efter DS/EN-259.....	52
A.6 Glødetab.....	54
A.7 Porøsitet og densitet.....	55
A.8 Kapillarsugning.....	57
B – Askekarakteristik data .....	58
B.1 – Vandindhold, Vandopløselighed & Glødetab.....	59
B.2 – Anioner, pH, ledningsevne & tungmetaller .....	60
B.3 – Kornstørrelse.....	63

C – Mørtelprøver data .....	65
C.1 – Vicatronic resultater.....	65
C.2 – Flydesætmål .....	69
C.3 – Støbeskema .....	70
C.4 – Porøsitet, densitet & kapillarsugning.....	71
C.5 – Trykskema.....	71

## 5 – Indledning

Cement er et grundlæggende materiale for nutidens og fremtidens byggeri, eftersom største delen af bygningsmaterialer er beton.

Cementbrug har sine fordele i byggebranchen, men ulemper følger desværre med ved cementproduktionen. Ved cementproduktion udledes en del CO<sub>2</sub>, som i dag udgør ca. 8 % af verdens samlede CO<sub>2</sub>-udledning. [videnskab.dk, 2010]

Det er desværre ikke muligt at undgå al CO<sub>2</sub>-udledning, men at formindske eller begrænse det vil gøre en forskel. Dette kunne bl.a. gøres ved at mindske brugen af cement i beton, ved at erstatte det med aske.

Cementerstatning med aske er intet nyt, og er allerede en del af mange betonblandinger. Flyveaske bruges i dag som cementerstatning, både for at spare på cement, men også, at det har nyttige egenskaber, som bidrager til en bedre beton.

Eftersom flyveaske allerede er et alternativ for cementerstatning, kunne det tænkes om andre asker også kunne bruges. Mange kraftværker producerer slamaske eller træaske som restprodukt, som også kunne tænkes at bidrage med gode egenskaber til beton.

Køge Kraftvarmeværk er et af de kraftværker som producerer træaske. Der bruges udelukkende biomasse som brændsel, som f.eks. træflis, slibestøv, savsmuld, olivenkerner etc., til fjernvarme. Deraf er restproduktet ren træaske, som er CO<sub>2</sub>-neutral. [VEKS.dk]

Denne rapport tager udgangspunkt i delvis cementerstatning med træaske fra Køge Kraftvarmeværk.

Det eksperimentelle fokus vil være styrkeudviklingen og afbindingstiden ved forskellige %-del cementerstatninger. Parametre, som har en betydning for de to ting, vil blive undersøgt, som askekarakteristik, flydesætmål, porøsitet, densitet, kapillarsugning og trykstyrke.

Derved vil fokus af databehandling være askens påvirkning af betonstyrke og askens aktivitetsfaktor. Ydermere vil anvendelsesmuligheder for en askebeton undersøges. Jo flere anvendelsesmuligheder der er for større cementerstatninger, jo bedre vil det være.



## 6 - Teori

### 6.1 – Beton

Beton er et materiale, som udgør mere end 90 % af byggerimateriale volumen i dag. Det har høj trykstyrke, god holdbarhed og er billigere end andre byggematerialer. Udover dette er, det nemmere at arbejde med, da beton både kan insitu-støbes eller leveres som færdige elementer.

Beton består af 3 komponenter; vand, cement og tilslag (sten/sand). Hvor cement er et hydraulisk bindemiddel, som hærdner ved reaktion med vand, og danner et produkt med betydelig styrke.

[Beton-bogen, 1985]

Tilslaget virker stort set som fylde i betonen og fylder ca. 75 %. Størrelsen af tilslaget spiller også en rolle i, hvor meget et betonelement kan bære eller klare af miljø. Det har en betydning for styrken, da betondensiteten også afhænger af det.

Jo større tilslag, jo større densitet → Jo større densitet, jo bedre bæreevne.

Selvom tilslaget har en betydning for betonstyrken, er det ikke det afgørende. Ved tryk er det cementpastaen, som bryder, hvilket gør den bestemmende for betonstyrken. Tilslaget har i forvejen en høj trykstyrke, hvilket gør, at tilslaget ikke rigtig deltager i bruddet af betonen.

Eftersom styrken afgøres udefra cementpastaen, udføres betonstyrke test på mørtelprøver, hvilket anses som den svageste beton-blanding, grundet dens tilslagsstørrelse på 0-4 mm (sand).

#### 6.1.1 - Cement

***”Cement (hydraulisk bindemiddel) – Et fintformalet uorganisk materiale, som blandet med vand danner en pasta, som afbinder og hærdner ved hydratiseringsreaktioner og -processer, og som efter hærdning bevarer sin styrke og stabilitet selv under vand.”*** – [DS/EN 206-1]

Cement fremstilles ved brænding af råstoffer, som hovedsageligt indeholder calcium, silicium, aluminium og jern, hvor der så dannes klinkerminerale. Nedenunder i Tabel 1 er der vist hvilke klinkerminerale portlandcement hovedsageligt består af:

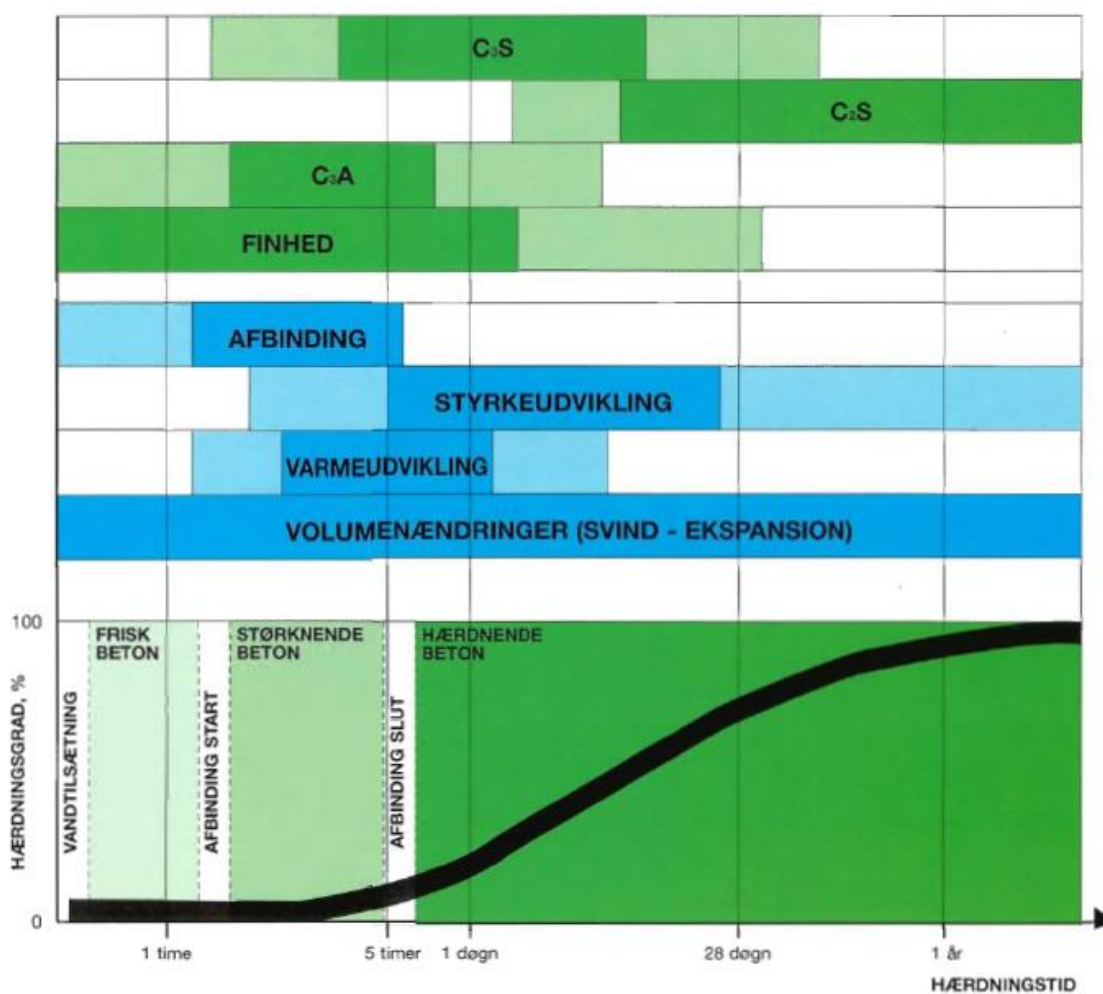
Klinkermineral	Symbol	Indhold [%]
Tricalciumsilikat – $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	55
Dicalciumsilikat – $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	20
Tricalciumaluminat – $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	7
Tetracalciumaluminatferrit – $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	9
Gips	$\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	3
Fri kalk	$\text{CaO}$	1

Tabel 1 – Sammensætning af portlandcement [Beton-bogen, 1985]

Når vandet tilsættes til cementen, er det  $C_3A$  som hydratiserer først.  $C_3A$  er et lynafbindende mineral, som ville størkne pastaen lynhurtigt, hvis det ikke var for gips. Gips ( $CaSO_4 + H_2O$ ) tilsættes i cementen som en retarder, der sænker afbindingstiden i starten. [Portlandcementer, 1999]

$C_3A$  og gips fremmer så hydratiseringen af  $C_3S$  og  $C_2S$ , som har væsentlig betydning for cementpastaens styrkeudvikling.  $C_3S$  har en betydning for styrkeudviklingen i den tidlige fase, mens  $C_2S$  har en betydning for senstyrke. [Beton-bogen, 1985]

Afbindingstiden har en betydning for bearbejdigheden af beton, men også for styrkeudviklingen. Lynafbinding kan være med til at ødelægge styrkeudviklingen, hvilket starter senere hen ved afbindingsprocessen, som vist på Figur 1 nedenunder.



Figur 1 – Oversigt over de forskellige faser & hærdningsgrad over tid [Portlandcementer, 1999]

Alle processer starter ved reaktion af cement og vand, hvilket gør, at blandingsforholdet mellem vand og cement ( $v/c$ -forhold) har en stor betydning, især for betonens trykstyrke.

Sammenhængen mellem  $v/c$ -forhold og betonens trykstyrke udtrykkes normalt med Bolomeys formel:

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

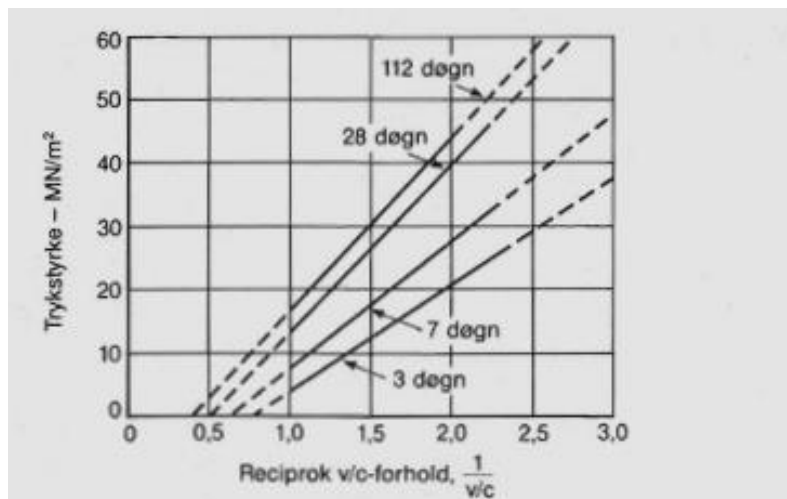
Hvor K er hærdningsgraden, som er afhængig af cementtype og termin døgn, som vist i Figur 2.  $\alpha$  varierer også efter termin, men sættes normalt til  $\alpha = 0,5$  for alle termin for basis cement.

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

Figur 2 – Vejledende konstanter til Bolomeys formel for Basis cement [Aalborg P., 2010].

For termin mellem 7 og 28 døgn, regnes K med lineær interpolation. For termin over 28 døgn bruges  $K = 30$ , eftersom K i reglen ligger i intervallet fra ca. 20-30. [Beton-bogen, 1985]

Nedenunder, Figur 3, er vist en graf over forholdet mellem trykstyrken og den reciprokke v/c-forhold afbilledet efter Bolomeys formel:



Figur 3 – Trykstyrke som funktion af reciprok v/c-forhold [Beton-bogen, 1985]

Den reciprokke v/c-forhold stiger ved mindre v/c-forhold, dvs. at trykstyrken bliver større ved mindre v/c-forhold.

### 6.1.2 – Tilsætninger

Udover de 3 hovedkomponenter betonen er opbygget af, kan man tilsætte andre materialer i blandingen med det formål at forbedre nogle af betonens egenskaber eller erstatte noget af cementen for at spare på det.

Tilsætninger er normalt materialer, der er reaktive i et vandigt miljø, som kan bidrage positivt til cements eller betons egenskaber, såsom materialer med puzzolan-egenskaber. De mest anvendte

puzzolaner i Danmark er flyveaske og mikrosilica.

*Puzzolaner* forstås som materialer, der i findelt form har evnen til at reagere med calciumhydroxid, hvorved det danner svært opløselige produkter med bindemiddelegenskaber. [Beton-bogen, 1985]

Puzzolaners styrkebidrag tages i regning ved brug af Bolomeys formel, hvor puzzolan-mængden og en *aktivitetsfaktor k* tages i betragtning.

Bolomeys formel ved tilsætning af puzzolan:

$$f_c = K \cdot \left( \frac{1}{V/(C + k \cdot P)} - \alpha \right)$$

Hvor P er den brugte puzzolan-mængde, C er cementmængden og V vandmængden. K og  $\alpha$  er de samme faktorer nævnt tidligere i afsnit 6.1.1. Og *k* er aktivitetsfaktoren, som normalt sættes til  $k = 0,5$ ; selvom det ikke er en fast faktor.

*"Puzzolaners aktivitetsfaktor afhænger af deres reaktionsevne, dvs. af arten og af reaktionstiden."* – [Beton-bogen, 1985]

### 6.1.3 – Porøsitet og densitet

Porøsiteten defineres som porevolumen i forhold til prøvens totalvolumen, som udtrykt i formlen nedenunder.

$$P = \frac{V_p}{V}$$

Hvor:

$$V = \frac{m_{ssd} - m_{sw}}{\rho_w}$$

$$V_p = \frac{m_{ssd} - m_t}{\rho_w}$$

$m_{ssd}$  – masse af prøvelegemet over vand efter vakuumvandmætning.

$m_{sw}$  – masse af vakuumvandmættet prøvelegeme vejet i vand

$m_t$  – masse af tør prøve

$\rho_w$  – densitet af vand

Densitet defineres som materialets masse pr. volumenenhed, som udtrykt i formlen nedenunder:

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

Porøsitet og densitet har en væsentlig betydning for betonens holdbarhed og styrke. Betonstyrken vil falde ved en stigende porøsitet, og omvendt vil styrken stige ved en større densitet.

De to ting hænger også sammen, da densiteten vil falde ved en stigende porøsitet.

## 7 - Metoder og materialer

I dette afsnit bliver de forskellige metoder for askekarakteristik og mørtelprøver præsenteret.

### 7.1 – Askekarakteristik

#### 7.1.1 – Vandindhold

Vandindholdet i asken er vigtigt at kende, da det har en betydning for v/c-forholdet.

5 g træaske afvejes i 3 bægere, som stilles i varmeskab ved 105°C natten over. Vandindhold beregnes derefter udefra vægtforskellen på den våde prøve og den tørre prøve.

Den fulde forsøgsvejledning findes som Bilag A.1.

#### 7.1.2 – Vandopløselighed

Vandopløseligheden har en betydning for, hvor meget af asken opløses ved blanding i beton. De opløselige stoffer i asken er hovedsagligt salte. Så jo mere vandopløselig den er, jo flere salte indeholder asken.

100 g aske skylles og filtreres, rester af aske i beholderen skylles igen og hældes ned i filteret. Dette gentages 5 gange. Når asken er filtreret, vejes den tilbageblivende aske i filteret. Derefter lægges det til at tørre ved 105°C natten over, hvor det så vejes igen. Vandopløseligheden regnes udefra vægten af den oprindelige aske mængde og den tilbageblivende tørre aske.

Den fulde forsøgsvejledning findes som Bilag A.2.

#### 7.1.3 – Anioner, pH og ledningsevne

Anioner er de eksisterende salte i asken. Mængden af de forskellige salte har en stor betydning for brugen af asken i beton, da nogle salte kan have dårlige påvirkninger, såsom korrosion af armeringsjern. Ledningsevne tyder også på mængden af salt i asken, jo højere ledningsevne, jo flere salte.

pH påvirker hærdningsprocessen i beton, jo højere pH, jo bedre hærdning. Derfor er det vigtigt, at asken ikke har en for lav pH.

Anionerne findes ved en IC-måling.

pH og ledningsevne måles på samme blanding, som anionerne bliver bestemt fra.

De fulde forsøgsvejledninger findes som Bilag A.3 og A.4.

#### 7.1.4 – Oplukning af askeprøve efter DS 259

Ved denne metode bestemmes mængderne af de syreopløselige tungmetaller i asken. Tungmetaller kan være giftige, derfor er der krav til, hvor store mængder af de metaller asken må indeholde. Hvis kravene ikke overholdes, må asken ikke bruges uden tilladelse.

Tungmetallerne findes ved en ICP-måling.

Den fulde forsøgsvejledning findes som Bilag A.5.

#### 7.1.5 – Glødetab

Ved glødetab, forstås indholdet af organisk materiale i asken. Man er interesseret i så lidt organisk materiale i materialet som muligt, eftersom det risikerer at danne hulrum i betonen efter længere perioder. Derfor er der bestemte krav for, hvor højt glødetabet af asken er.

3 x 2,5 g vejes og sættes i en 550°C ovn i en time. De vejes igen efter tørringen og glødetab beregnes udefra før og efter vægten.

Den fulde forsøgsvejledning findes som Bilag A.6.

#### 7.1.6 – Kornstørrelse

Der ligger en interesse i at kende kornstørrelsen på asken, da det også har en betydning på, hvordan asken vil reagere i mørtlen. Jo finere kornene er, jo mere vil de reagere.

Kornstørrelsen måles med en laser-diffraktometer, hvor noget tørret aske køres igennem 3 gange.

## 7.2 – Mørtelprøver

Apparatur brugt til støbning:

- Vægt
- Hobart-mixer; for C5% blanding, Reference 7,14 og 28 og S10% blanding blev der brugt den gamle Hobart-mixer, mens for de resterende blandinger blev en ny Hobart-mixer brugt, da den gamle gik i stykker.
- Det lille vibratorbord i Støberiet (Byg. 119 DTU Lyngby)

### 7.2.1 – Støbeprocess

Cement, aske, sand og vand afvejes og nedenstående proces (Tabel 2) køres.

Støbeprocessen er udført jf. [DS/EN 196-1].

Tid [sek.]	Handling
-	Aske og Cement blandes (tilsættes i blandingskål)
[0-30]	Vand tilsættes og blandes med cement & aske på lav hastighed.
[30-60]	Sand tilsættes.
[60-90]	Mørtlen blandes på medium hastighed.
[90-180]	Maskinen stoppes, mørtel på skål siderne og bund skræbes af med dejskraber, og lades hvile.
[180-240]	Mørtlen blandes på medium hastighed.

*Tabel 2 – Blandingsproces jf. [DS/EN – 196-1]*

Til blanding af mørtel blev der brugt en Hobart-mixer, som vist i Figur 4.



*Figur 4 – Hobart-mixer (Den nye Hobart)*





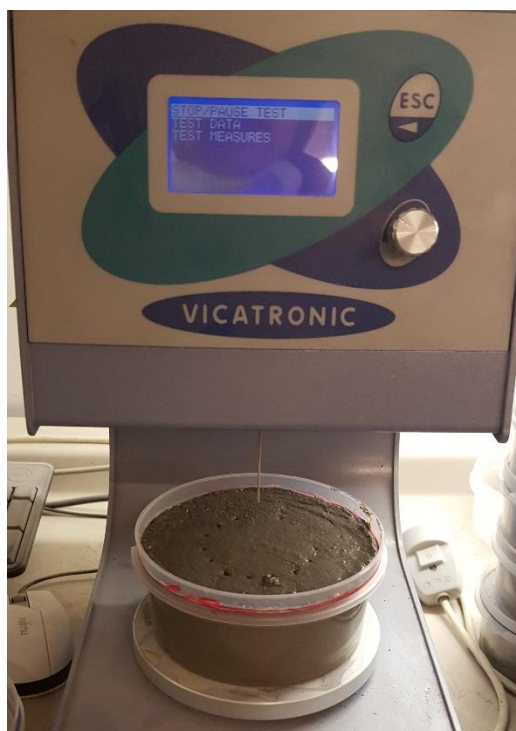
Mørtlens flydesætmål måles i to retninger vinkelret på hinanden, men i denne rapport er der blevet målt i 4 retninger.

Ved tilsætning af flyveaske skal flydesætmålet overholde en spredning af  $\pm 10$  mm fra reference flydesætmålet. [DS/EN-450-1]

### 7.2.3 – Afbinding; Vicatronic

Afbindingsforløbet bliver målt ved brug af en Vicatronic, som måler nedsynkningsdybden af nålen, vist på Figur 7, som funktion af tiden

Forsøget er udført jf. [DS/EN-196-3].



*Figur 7 – Afbindingstid målt med Vicatronic.*

Nedsynkningsdybden bliver mindre, jo mere mørtlen afbinde, eftersom den hærder. Når mørtlen er hærdet helt, vil der ikke være nogen nedsynkningsdybde.

Nedenunder, Figur 8, ses den afbundede prøve, hvor penetreringer af nålen kan ses.



*Figur 8 – Nål penetreringsmønster i prøven.*

#### 7.2.4 – Porøsitet & densitet

Formålet med dette forsøg er at finde porevolumen og tørdensiteten af prøven.

Prøverne tørres ved 50°C i ca. 3 uger, indtil konstant vægt. Efter tørringen vejes de og lægges i eksikator, se Figur 9, tilsluttet til en vakuumpumpe i 3 timer. Derefter lukkes destilleret vand ind gennem en slange, hvor prøverne står lukket under vand i en time. Efter en time åbnes eksikatoren og prøverne vejes over vand og under vand.



*Figur 9 – Mørtelprøver lagt i eksikator.*

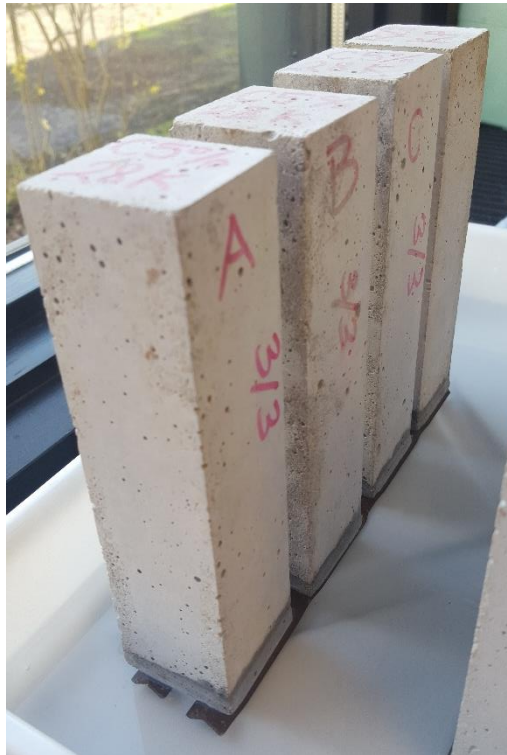
Porøsitet og densitet beregnes så udefra prøvernes mættede og umættede vægt, samt volumen.

Den fulde forsøgsvejledning findes som Bilag A.7.

#### 7.2.5 – Kapillarsugning

Formålet med dette forsøg er at undersøge materialets sugeevne, hvor vand transporteres op i materialet gennem snævre kanaler/porer i materialet. Jo mere vand der suges over tid, jo flere snævre porer indeholder materialet.

Prøverne tørres ved 50°C i ca. 3 uger, indtil konstant vægt. Efter tørringen vejes de og lades stå 5 mm under vand i en bakke med destilleret vand, se Figur 10. Prøverne forbliver i vandet i 6 timer, hvor de vejes løbende.



*Figur 10 – Kapillarsugning forsøgs opstilling*

Den fulde forsøgsvejledning findes som Bilag A.8.

### 7.2.6 – Trykprøvning

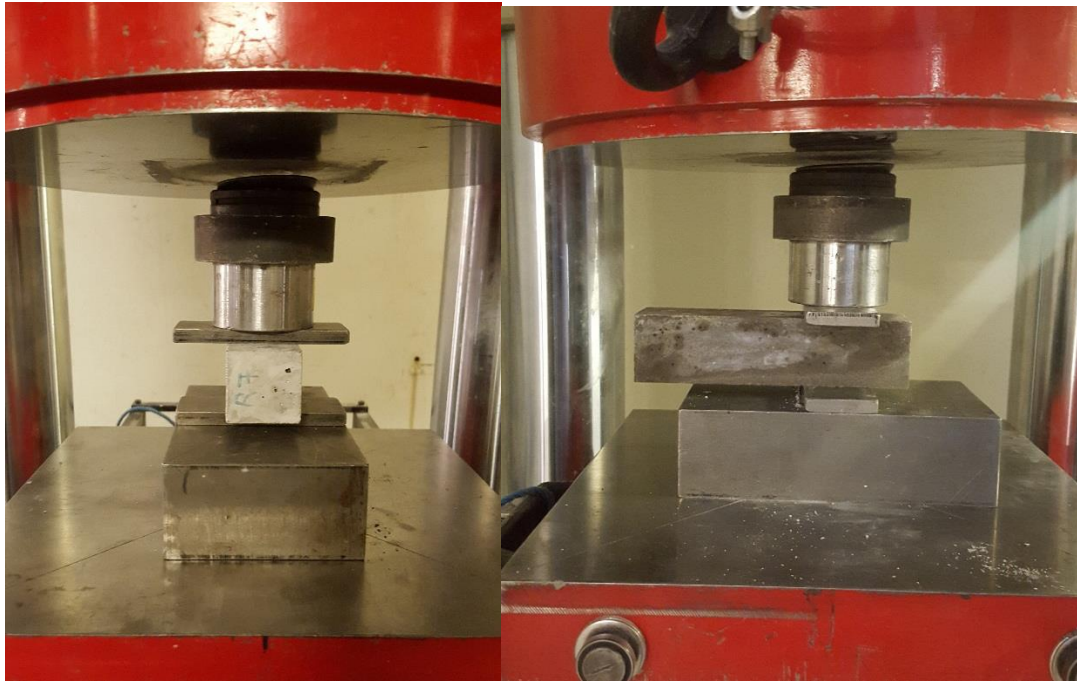
For at finde betonens trykstyrke, trykkes de støbte prismer til brud med en Toni 300.

Trykprøvningen er udført jf. [DS/EN-196-1].

Opstillingen af forsøget ses på Figur 11. Når opstillingen er klar, startes maskinen, hvor den angiver trykket i kN, som derefter skal beregnes til MPa.

For at omregne kN til MPa, skal tværsnitsareal bruges, derfor skal højde og bredde måles 3 steder langs prismen og længden 2 gange før tryk.

Fra alle målte resultater trækkes 4 kN fra før omregning til MPa, eftersom det er maskinens nulvisning.



*Figur 11 – Trykprøve opstilling af mørtelprisme*

## 8 - Resultater og diskussion

Nedenunder ses en tabel over de brugte blandinger til mørtelprøverne.

Prøve	Erstatning med aske	Cement [g]	Aske [g]	Vand [g]	Sand [g]
Reference	0	450	0	225	1350
C2,5%	2,5 % cement	438,75	11,25	225	1350
C5%	5 % cement	427,50	22,50	225	1350
C7,5%	7,5 % cement	416,25	33,75	225	1350
C10%	10 % cement	405	45	225	1350
S10%	10 % sand	450	135	225	1215

Tabel 3 – De støbte prøveblandinger

### 8.1 - Askekarakteristik

Resultater fra askekarakteristikken vil blive diskuteret i dette afsnit.

Rå data findes i Bilag B.1 & B.2.

Resultater fra egne forsøg betegnes **KV2016** (Køge værket).

Det vælges at sammenligne egne resultater med data fra en tidligere bachelorprojekt, hvor samme aske og undersøgelsesprocesser er brugt. Disse data betegnes **KV2014**<sup>1</sup>. [Hansen, 2015]

Analyse	Enhed	KV2016	KV2014
Vandindhold	%	13,92	15,23
Vandopløselighed	%	29,29	24,2
Glødetab	%	4,84	2,86
pH	-	13,12	12,86
Ledningsevne	[mS/cm]	77,97	79,33

Tabel 4 – Askekarakteristik for Køgeværket træaske fra 2016 og 2014

I Tabel 4 ses resultaterne for nogle af de udførte forsøg for askekarakteristikken.

Vandindholdet af asken ligger på 13,92 %, som hovedsageligt skyldes vanding ved afkøling af asken i kraftværket. [Hansen, 2015]

<sup>1</sup> Data for uvasket aske fra [Hansen, 2015]

Vandindholdet kan ligge meget forskelligt, da det afhænger lidt af opbevaringen af asken efter vanding. Om det er opbevaret et tørt eller fugtigt sted, varme eller kolde omgivelser, lukket eller åben beholder.

Vandindholdet vil ikke være et problem som sådan, men det skal huskes at tages i betragtning ved askebrug i mørtelprøver, da det vil påvirke v/c-forholdet.

Til analyser, hvor vandindholdet vil gøre en forskel, er der blevet brugt tørret aske.

Vandopløseligheden ligger på 29,29 %, hvilket er relativt højt. Dette tyder på højt indhold af vandopløselige salte i asken. Det samme udtrykkes med ledningsevnen, som også er meget højt med en værdi på 77,97 mS/cm. Ledningsevnen af træasken fra 2014 ligger meget tæt på træasken fra 2016, mens vandopløseligheden er steget fra 2014 med ca. 5 %.

For glødetabet i asken er der bestemte krav jf. [DS/EN-450-1]:

Kategori	Maksimal Glødetab [%]
A	5,0
B	7,0
C	9,0

*Tabel 5 – Kategorier for glødetab jf. DS/EN-450-1:2012*

Glødetabet ligger på 4,84 %, hvilket overholder Kategori A for glødetabet. Det er dog stadig højt, og tyder på højt indhold af organisk materiale i asken.

pH'en af asken på 13,12 gør asken velegnet til brug i betonsammenhænge, eftersom den passer til kravet om, at pH for beton skal ligge på ca. 13.

### 8.1.1 – Vandopløselige salte

Rå data findes i Bilag B.2.

Tabel 6, nedenunder, viser de vandopløselige anioner asken indeholder.

	KV2016		KV2014		Krav jf. [DS/EN-450-1]
	Koncentration [mg/kg]	Procentdel af prøve [%]	Koncentration [mg/kg]	Procentdel af prøve [%]	
Cl	39.400	3,9	32.700	3,3	< 0,10 %
NO <sub>3</sub>	1.110	0,1	290	0,03	-
SO <sub>4</sub>	81.600	8,2	54.500	5,5	< 3,0 %

*Tabel 6 – Vandopløselige anioner i asken fra 2014 og 2016 + krav jf. [DS/EN-450-1]*

Det viser sig, at chlorid-indholdet, både fra 2014 og 2016, overstiger kravene jf. [DS/EN-450-1]. Det samme gælder sulfat. For nitrat er der ikke fundet nogen grænseværdi, men det fundne indhold er forholdsvis lille, og vil sandsynligvis ikke have nogen betydning.

Det høje sulfat indhold kan være et problem ved askebrug i betonsammenhænge, da det kan risikere sulfat angreb, som forårsager udvidelse og revner i beton.

Chlorid-indholdet er afgørende for, om det er muligt at bruge armering i beton eller ikke, pga. korrosion. Dette bestemmes jf. [DS/EN-206-1], hvor der stilles krav til chlorid-indholdet i forhold til cementmassen. Udefra disse krav er det muligt at beregne den maksimale %-erstatning af cement med træasken, hvor chlorid grænseværdierne overholdes.

Den maksimale %-erstatning af cement regnes således, at askens chlorid indhold tages i betragtning.

$$0,039 \cdot \% \text{ erstatning} = \% \text{ tilladt } Cl^{-} \text{ i cement}$$

Hvis sandet ønskes erstattes med træaske, beregnes den maksimale tilladte sanderstatningen således:

$$\frac{0,039 \cdot \% \text{ erstatning} \cdot 1350 \text{ g sand}}{450 \text{ g cement}} = \% \text{ tilladt } Cl^{-} \text{ i cement}$$

I Tabel 7 er kravene for beton-anvendelse jf. [DS/EN-206-1] opstillet, hvor den maximale tilladte cement- og sand-erstatning også findes.

Betonens anvendelse	Max. Cl-forhold i forhold til cementmassen [%]	Max. tilladt cementerstatning med aske [%]	Max. tilladt sanderstatning med aske [%]
Uden armeringsstål eller andet indstøbt metal med undtagelse af korrosionsbestandige løfteanordninger	1,0	25,64	8,55
Med armeringstål eller andet indstøbt metal	0,20	5,13	1,71
	0,40	10,26	3,42
Med spændarmering af stål	0,10	2,56	0,85
	0,20	5,13	1,71

Tabel 7 – Max. chlorid-indhold og max. cement- & sanderstatning i forhold til beton anvendelse jf. [DS/EN-206-1]

Det viser sig, at asken sagtens kan bruges i spændarmeret beton, så længe cementerstatningen ikke overstiger de 5 %. Ellers vil det stadig være muligt at bruge armeringsstål eller andet indstøbt metal, hvis erstatningen ikke overstiger 10 %. Hvis erstatningen er mellem 10 – 25 % er det ikke tilladt at

bruge noget armeringsstål eller andet indstøbt metal. Cementerstatningen må ikke overstige 25 % med askens chlorid indhold på 3,39 %.

En erstatning af sand er ikke tilladt at overstige 8,6 % for alt beton. Hvis man ønsker spændarmeret beton, må sanderstatningen ikke overstige 1,7 %.

Det viser sig, at de valgte prøveblandinger; C2,5%, C5%, C7,5% og C10%, overholder alle den maksimale tilladte erstatning. Blandingerne C2,5% og C5% kan sagtens bruges til spændarmeret beton. Mens de to andre kan bruges til beton med armeringsstål eller andet indstøbt metal. Prøveblandingen S10% er ikke tilladt at bruge i betonsammenhænge, da den overstiger den maksimale tilladte sanderstatning og chlorid indhold.

I Tabel 8, nedenunder, ses de vandopløselige kationer i asken.

	KV2016		KV2014		Krav for alkali-indhold jf. [DS/EN-450-1]
	Koncentration [mg/kg]	Procentdel af prøve [%]	Koncentration [mg/kg]	Procentdel af prøve [%]	
<b>Ca</b>	470	0,05	2.240	0,2	< 5,0 %
<b>Na</b>	26.720	2,7	12.500	1,3	
<b>K</b>	95.430	9,5	61.100	6,1	

*Tabel 8 – Vandopløselige kationer i asken fra 2014 og 2016 + krav jf. [DS/EN-450-1]*

Grænseværdien betegner summen af alkali-indhold (kationerne), som ikke må overstige 5,0 %.

Summen for alkali i asken ligger på 12,25 %, som er langt over grænseværdien, og er næsten fordoblet fra 2014, hvor det lå på 7,6 %. Dette tyder på en ustabilitet i askens sammensætning, dvs. for hver forbrænding, vil asken have en anderledes sammensætning end den forrige. Dette gør ikke asken ubrugelig, men danner blot en usikkerhed for dens anvendelse i betonsammenhænge.

Det kan så siges, at det værste der kan forekomme ved brug af en aske med så højt alkali-indhold, er hvis det bruges i en betonblanding med alkali-reaktivt tilslag. Derfor kan asken sagtens bruges i beton ved simpelt at undgå alkali-reaktivt tilslag.

Det noteres at masseprocent summen af de vandopløselige salte fundet udgør 24,45 % af asken, mens vandopløseligheden af asken var på 29,29 %. Dette viser blot, at undersøgelserne, brugt til at finde ovenstående resultater, ikke oplyser alle ioner i asken, men kun dem, der er flest af.



## 8.1.2 – Tungmetaller

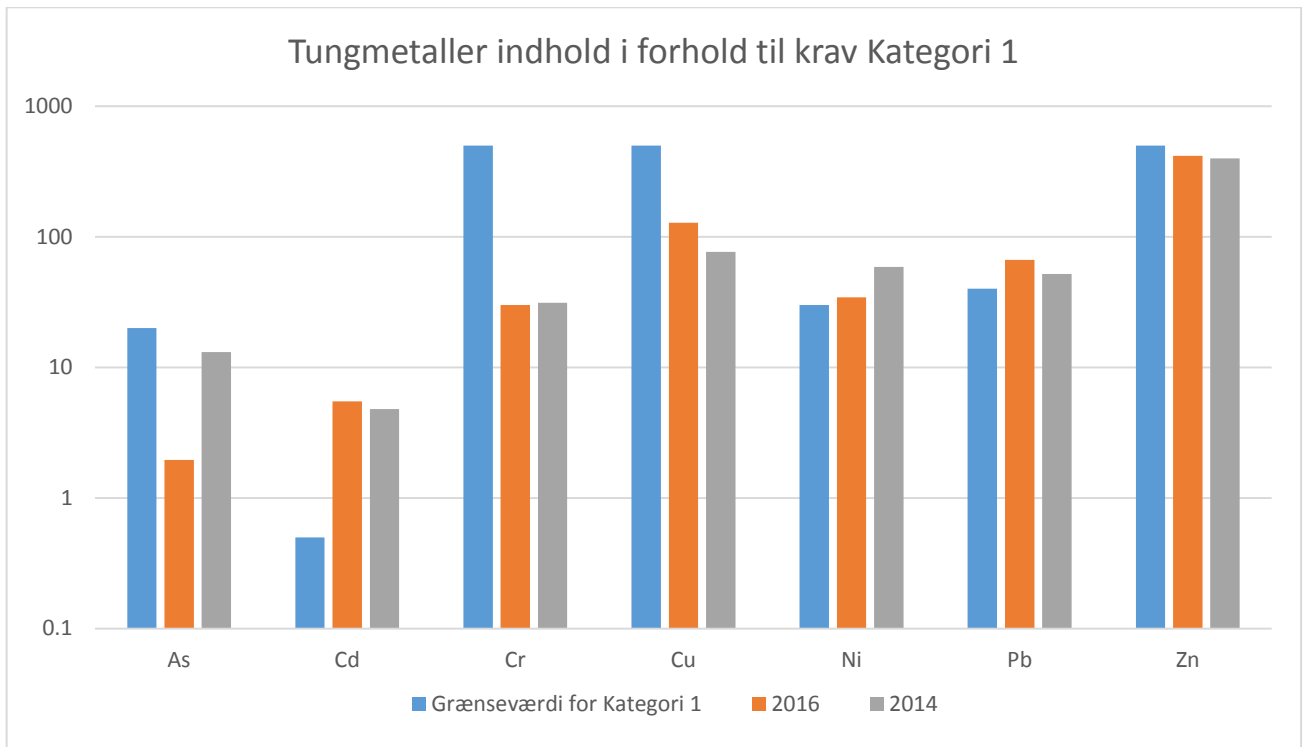
Rå data findes i Bilag B.2.

Tungmetal koncentrationer i asken er vist i Tabel 9 nedenunder.

Element	Fulde navn	KV2016		KV2014 Koncentration [mg/kg]	Krav for tungmetaller jf. [BEK 1414-2015]		
		Koncentration [mg/kg]	Procentdel af prøve [%]		Kategori 1	Kategori 2	Kategori 3
<b>Al</b>	Aluminium	1.960	0,2	17.590,5			
<b>As</b>	Arsen	2,0	0,0002	13,1	0-20	>20	>20
<b>Ba</b>	Barium	1.820	0,2				
<b>Ca</b>	Calcium	207.000	20,7	56.298,6			
<b>Cd</b>	Cadmium	5,5	0,0005	4,8	0-0,5	>0,5	>0,5
<b>Cr</b>	Krom	30,0	0,003	31,3	0-500	>500	>500
<b>Cu</b>	Kobber	130,0	0,01	76,4	0-500	>500	>500
<b>Fe</b>	Jern	4.900	0,5	16.737,8			
<b>K</b>	Kalium	102.500	10,3	61.685,9			
<b>Mg</b>	Magnesium	19.500	1,9	13.820,1			
<b>Mn</b>	Mangan	9.200	0,9	1.364,7			
<b>Na</b>	Natrium	28.900	2,9	1.066,1			
<b>Ni</b>	Nikkel	34,4	0,003	58,7	0-30	>30	>30
<b>P</b>	Fosfor	8.600	0,9	6.502,5			
<b>Pb</b>	Bly	66,0	0,007	51,9	0-40	>40	>40
<b>S</b>	Selen	7,0	0,0007				
<b>Zn</b>	Zink	420,0	0,04	397,8	0-500	>500	>500

Tabel 9 – Tungmetaller i Køgeværk aske fra 2016 og 2014 + anvendelseskrav jf. [BEK.1414-2015]

Som vist i Tabel 9, er det ikke alle tungmetaller, som har en grænseværdi. For at give et bedre billede af tungmetallerne, er de plottet i et søjlediagram, se Figur 12, hvor værdier fra 2014, 2016 og grænseværdier er vist.



*Figur 12 – Indhold af tungmetaller fra 2014, 2016 og grænseværdier for Kategori 1*

Det ses på Figur 12, at de fleste tungmetaller overholder kravene for Kategori 1.

Mens Cadium, Nikkel og Bly falder i Kategori 2, da de overstiger grænseværdierne.

Asken klassificeres til Kategori 2, eftersom den indeholder tungmetaller, som falder i Kategori 2.

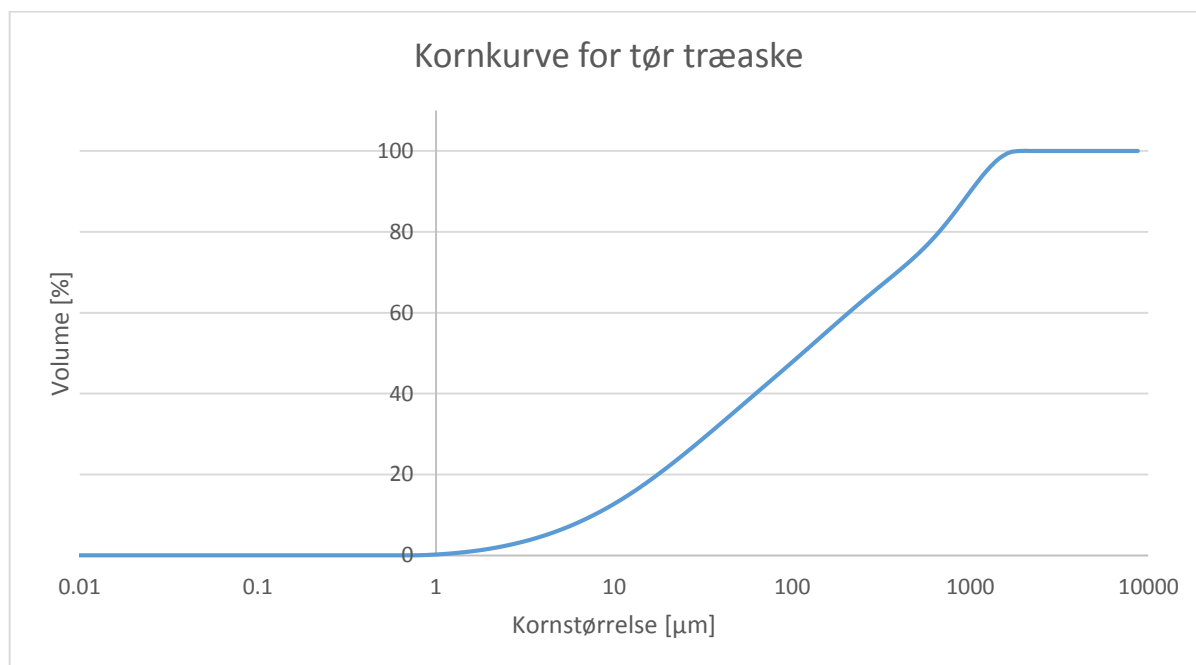
Kategori 2 begrænser anvendelsen af aske-beton uden tilladelse.

De steder det kan bruges uden tilladelse jf. [BEK 1414-2015] indenfor bygge- og anlægsarbejde er veje, stier, pladser, ledningsgrave, ramper, støjvolde, fundamenter og gulve.

### 8.1.3 – Kornkurve

På Figur 13 ses kornkurven for træasken i tørret tilstand. Værdierne brugt i kurven er gennemsnit fra 3 målinger.

Rå data for den gennemsnitlige volumen findes i Bilag B.3.



*Figur 13 – Akkumuleret kornkurve for tør træaske KV2016*

På Figur 13 ses, at askens kornstørrelser ligger mellem 1  $\mu\text{m}$  og ca. 2000  $\mu\text{m}$ . Hvilke er forholdsvis store i forhold til cements kornstørrelse, som ligger mellem 1  $\mu\text{m}$  – 50  $\mu\text{m}$ . [Aalborg P., 2010]







Fra de plottede værdier i grafen, som findes i Bilag B.3, aflæses at kun 32,6 % af asken ligger under 50  $\mu\text{m}$ . Selvom 67,4 % kornstørrelserne er større end 50  $\mu\text{m}$ , kan askens kornstørrelse bruges som filler. Et materiale med korn mindre end 250  $\mu\text{m}$  kan bruges som filler, hvilket ca. 60 % af askens korn er. [Beton-bogen, 1985]

## 8.2 – Mørtelprøver

Til mørtelprøverne er intet af askekarakteristikken taget i betragtning. Asken er blevet brugt som den er, direkte fra spanden. I starten af afsnit 8 – Resultater & diskussion findes Tabel 3, hvor de brugte blandinger er vist.

I Tabel 10 nedunder findes prøve nr., faktiske v/c-forhold beregnet i betragtning af askens vandindhold og farvekoder for grafer i dette afsnit.

I v/c-forholdet er askens tilsætning ikke medregnet som en del af cementmassen, da aktivitetsfaktoren ikke er kendt og derfor går ud fra, at asken ingen aktivitetsfaktor har. Dette vil blive kigget nærmere på senere i afsnit 8.2.5.

Prøve nr.	v/c-forhold	Farvekode i grafer
Reference	0,5	
S10%	0,54	
C2,5%	0,52	
C5%	0,53	
C7,5%	0,55	
C10%	0,57	

Tabel 10 – Erstatninger i mørtelprøverne, v/c-forhold og farvekoder

### 8.2.1 – Flydesætmål

Flydesætmålet er et gennemsnit af 4 mål fra 3 blandinger, i Bilag C.2 findes alle målte flydesætmål.

Prøve nr.	Flydesætmål [mm]	Afvigelse fra Reference [mm]
Reference	164,58	-
S10%	120,83	-43,75
C2,5%	164,58	0
C5%	159,83	-4,75
C7,5%	153,75	-10,83
C10%	153,75	-10,83

Tabel 11 – Flydesætmål på mørtelprøverne

Krav for flydesætmål stillet i [DS/EN-450-1] bruges her, da samme reference mørtelblanding er blevet brugt. Ved tilsætning af flyveaske i mørtel er kravet jf. [DS/EN-450-1], at flydesætmål må afvige med  $\pm 10$  mm fra reference flydesætmål.

Det ses i Tabel 11, at kun C2,5% og C5% blandingerne overholder kravet, mens alle de andre falder ud. For at bevare flydesætmålet indenfor  $\pm 10$  mm fra reference flydesætmål, skal der tilsættes ekstra vand til blandingerne. Dette vil så ændre på v/c-forholdet, hvilket ikke er ønsket, da det vil forringe betonstyrken.

Det noteres at C7,5% og C10% har samme flydesætmål, som skyldes en pludselig ændring i C10%'s flydesætmål målt fra den første blanding til de to andre, som blev blandet på et andet tidspunkt end den første.

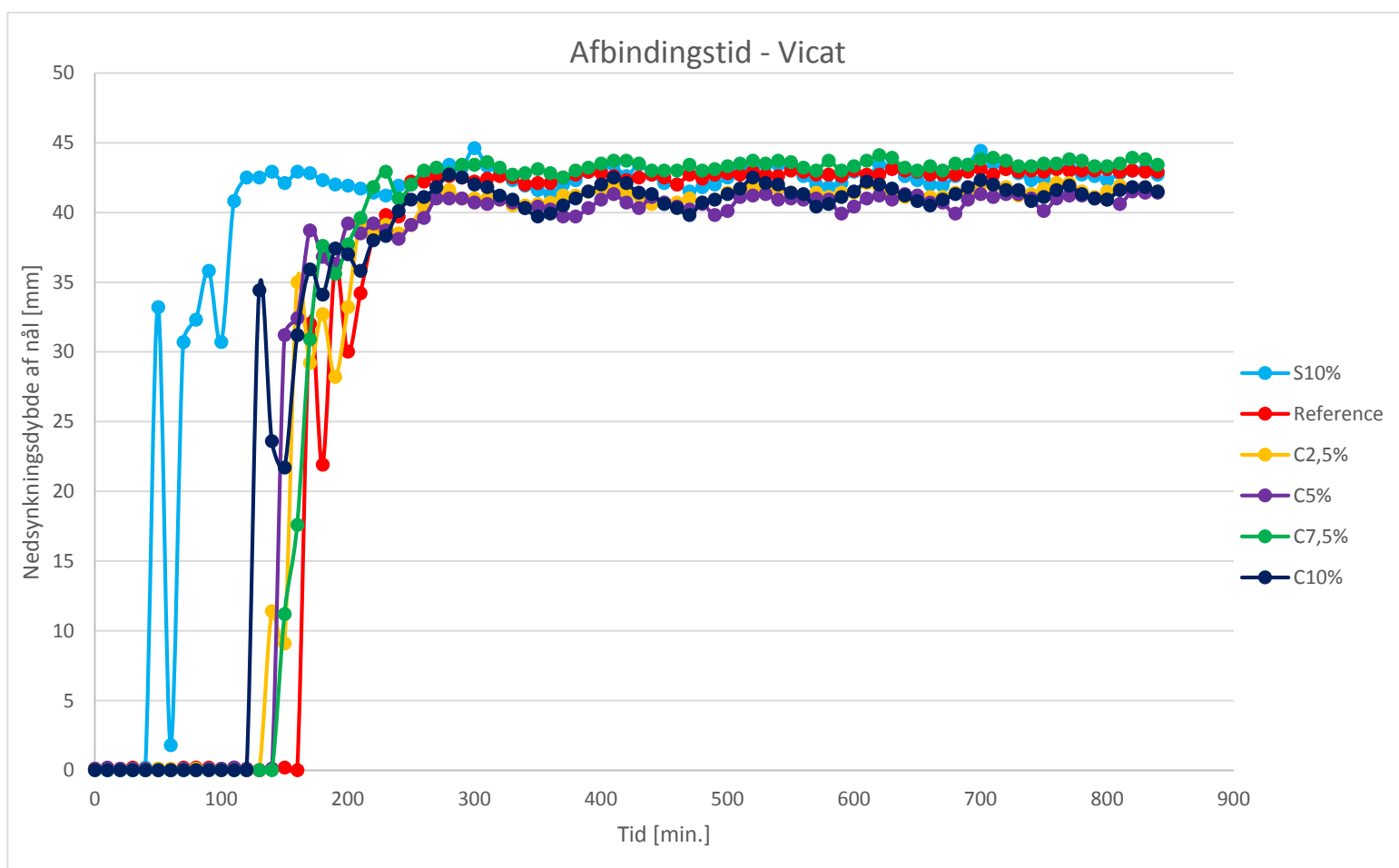
Fra den første blanding lå flydesætmålet af C10% på 145-150 mm, men kom op på 160 mm ved de to sidste blandinger, tallene kan ses i Bilag C.2. Derved fås gennemsnittet vist i Tabel 11 for C10%. Dette kan skyldes vandindholdet af asken, som ikke er blevet betragtet ved blanding. Derudover må det have ligget højere i asken brugt til de to sidste blandinger af C10% end den første, eftersom flydesætmålet på præcis samme blanding ændrer sig så meget.

Det ser ud til, at vandindholdet varierer efter, hvor prøven er taget fra i spanden. Det kan være at noget væske er kommet til at dryppe ned i asken, eller at selve asken har varierende vandindhold. Aske længere nede i spanden holder på mere vand, da den ligger i lukket beholder, og vand har ikke mulighed for at fordampe.

## 8.2.2 – Afbindingstid

Figur 14 viser afbindingstid for de brugte mørtelblandinger.

Rå data for grafen findes i Bilag C.1.



Figur 14 – Oversigt over de forskellige blandingers afbindingstid (Vicat).

Afbindingstiden for S10% er meget kort i forhold til alle de andre blandinger, da det er sandet, som er blevet erstattet med aske. Dette fører til, at både aske og cement tager brug af vandet, hvilket gør at blandingen størkner hurtigere.

I afsnit 8.1.2 i Tabel 9, hvor tungmetallerne er listet, ses at asken indeholder en stor del Calcium, derudover indeholder asken også Aluminium og Jern. Det kunne tænkes, at ved blanding af aske med vand og cement, dannes små mængder  $C_3A$  og  $C_4AF$ . Hvilket ville forårsage en hurtigere afbinding i blandingen, hvorefter cementen ikke når at hydratisere fuldt ud, og styrkeudviklingen hæmmes.

Ved brug af større aske mængder, tilføres mere  $C_3A$  og  $C_4AF$  til blandingen.

Dette kunne også forklare den meget korte afbindingstid af S10%, hvor der bruges 135 g aske uden at erstatte noget af cementen.

Mens der bruges mindre aske mængder til C2,5%, C5%, C7,5% og C10%, hvor cement også erstattes. Dvs. at der ikke vil være en lige så stor påvirkning af afbindingstiden på disse blandinger som S10%, som det også ses i grafen.

Afbindingstiderne bliver kortere, jo højere cementerstatningen er, udover C7,5% blandingen. Den virker til at have en længere afbindingstid i forhold til C5% og C2,5%.

Det ses ellers klart, at alle blandinger med aske har en mindre afbindingstid end referencen, hvilket også var forventet.

<b>Indledende afbindingstid [min]</b>	
<b>Reference</b>	160
<b>S10%</b>	40
<b>C2,5%</b>	130
<b>C5%</b>	140
<b>C7,5%</b>	160
<b>C10%</b>	120

*Tabel 12 – Indledende afbindingstider for de forskellige blandinger*

Det ses i Tabel 12, at de indledende afbindingstider for C2,5%, C5% og C7,5% går lidt op og ned i forhold til askemængden i blandingerne. Dette tyder på ustabilitet i blandingerne, som også kan ses i grafen.

En typisk afbindingstid for Basis cement ligger på 165 min [Aalborg P., 2010], det ses i tabellen, at referencen ligger på 160 min, hvilket passer meget fint.

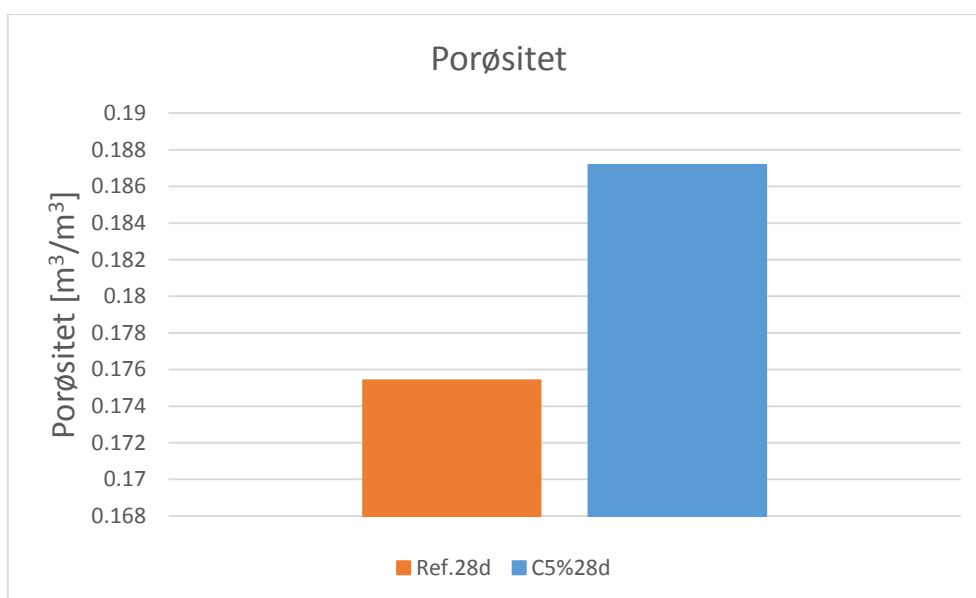
Afbindingstiderne for C2,5%, C5%, C7,5% og C10% er kortere end referencen, men ses ikke som et problematisk fald i afbinding.

Derimod er afbindingstiden for S10% meget lavt, og giver ingen mulighed for at arbejde med blandingen. Den var allerede tør ved blandingsprocessen og var svær at vibrere i formen.

### 8.2.3 – Porøsitet, densitet & kapillarsugning

I dette afsnit kigges på porøsitet, densitet og kapillarsugning af en reference og en C5% blanding, begge blandinger har hærdet i 28 døgn. Resultater for C5% er et gennemsnit af 3 prøver, mens til referencen er brugt 1 prøve.

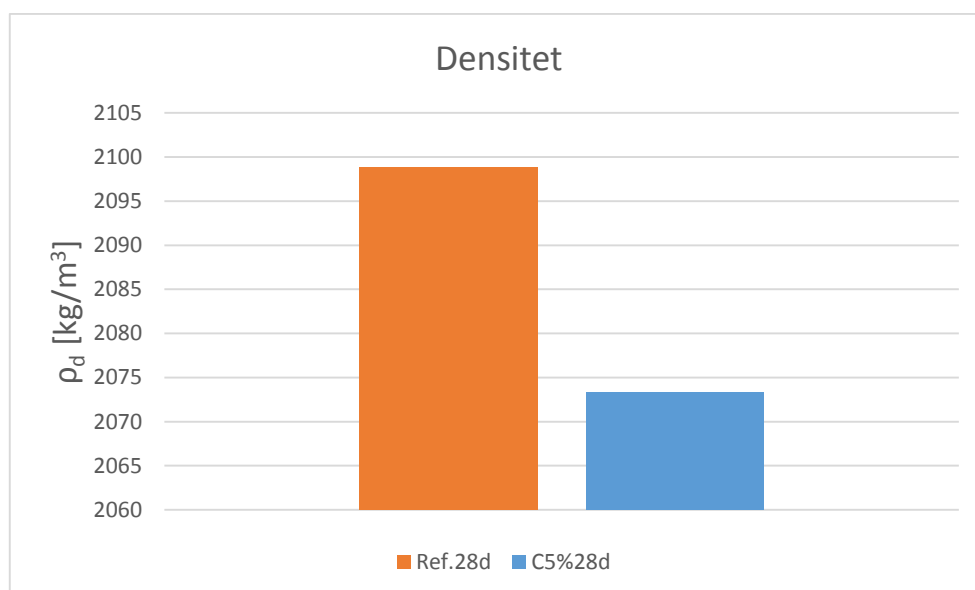
Rå data til dette afsnit findes i Bilag C.4.



Figur 15 – Porøsitet af 28 døgn C5% blanding og reference

På Figur 15 fremgår porøsiteten af de to mørtelprøver, hvor det tydeligt ses, at porøsiteten stiger meget ved anvendelse af træasken i mørtel.

Mens densiteten, som vist på Figur 16, falder ved træaskens tilsætning, hvilket passer meget godt med teorien i afsnit 6.1.3.



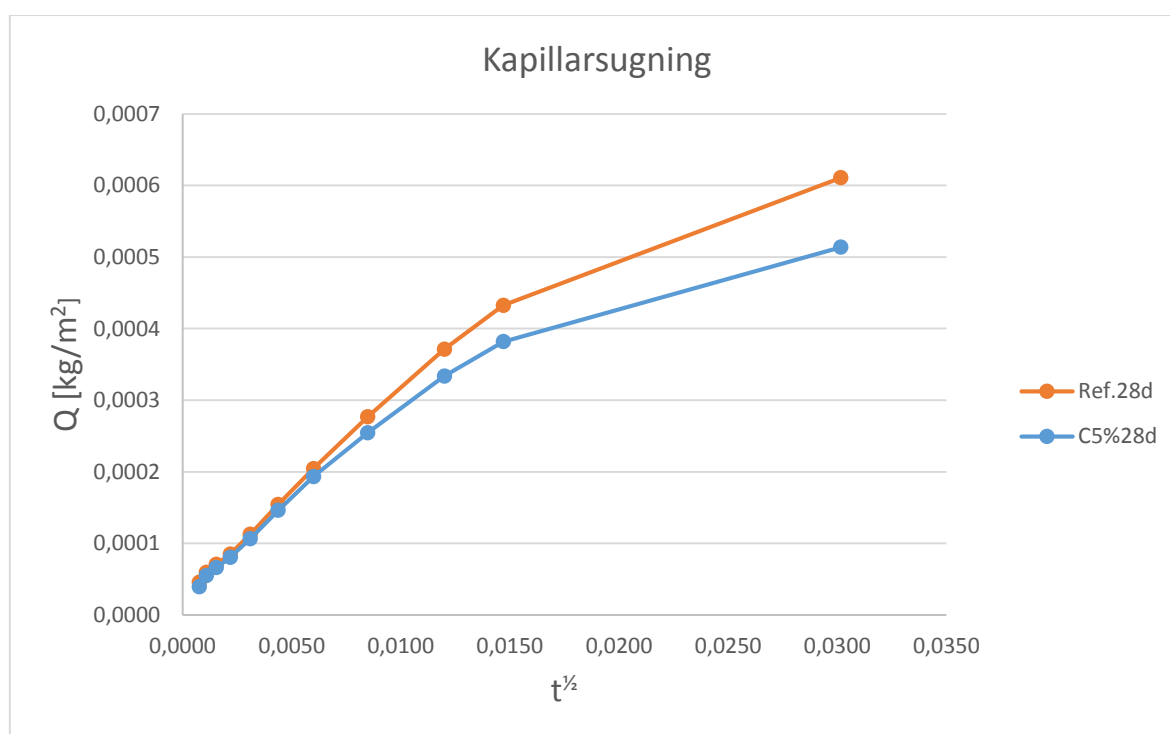
Figur 16 – Densitet af 28 døgn C5% blanding og reference



Ved stigende porøsitet og faldende densitet forventes et fald i styrken.

Prøven er kun lavet på en C5% blanding, men resultaterne tyder på, at porøsiteten vil stige ved tilsætning af træaske i mørtel. Dvs. at C2,5% vil have en mindre porøsitet end C5%, mens C7,5% og C10% får en højere porøsitet. Dermed vil densiteten falde ved tilsætning af aske i mørtel, hvor C2,5% vil have større densitet end C5%, mens C7,5% og C10% vil have en mindre densitet.

Figur 17, nedenunder, viser kapillarsugning af referencen og C5% prøven. Det ses, at kapillarsugningen af C5% er mindre end referencen. Dette betyder at C5% har en mindre vandsugningsevne, pga. færre kapillarporer.



Figur 17 – Kapillarsugning af 28 døgns C5% blanding og reference

Det skal bemærkes at kapillarporer ikke kobles til porøsiteten af materialet. Kapillarporer er smalle porer, som går gennem et materiale, mens porer er hulrum i materialet. Porer kan være nyttige i frost vejr, hvor vand kan ekspandere i porerene uden at udvide selve betonen. Mens kapillarporer er uønsket i beton, da de ret tit opfører sig som nemme transportveje til vand og skadelige stoffer i betonen.

Selvom C5% havde en større porøsitet i forhold til referencen, kan den stadig have færre kapillarporer, hvilket er en fordel. Dette tyder på, at asken har virket som filler i mørtlen, da det tydeligt ses, at prøven C5% suger mindre vand end reference prøven.

## 8.2.4 – Trykstyrke

Trykstyrkerne af de anvendte mørtelblandinger i dette afsnit er et gennemsnit af 6 trykresultater. Der trykkes 2 gange på hver af de støbte 3 prismer for hver blanding.

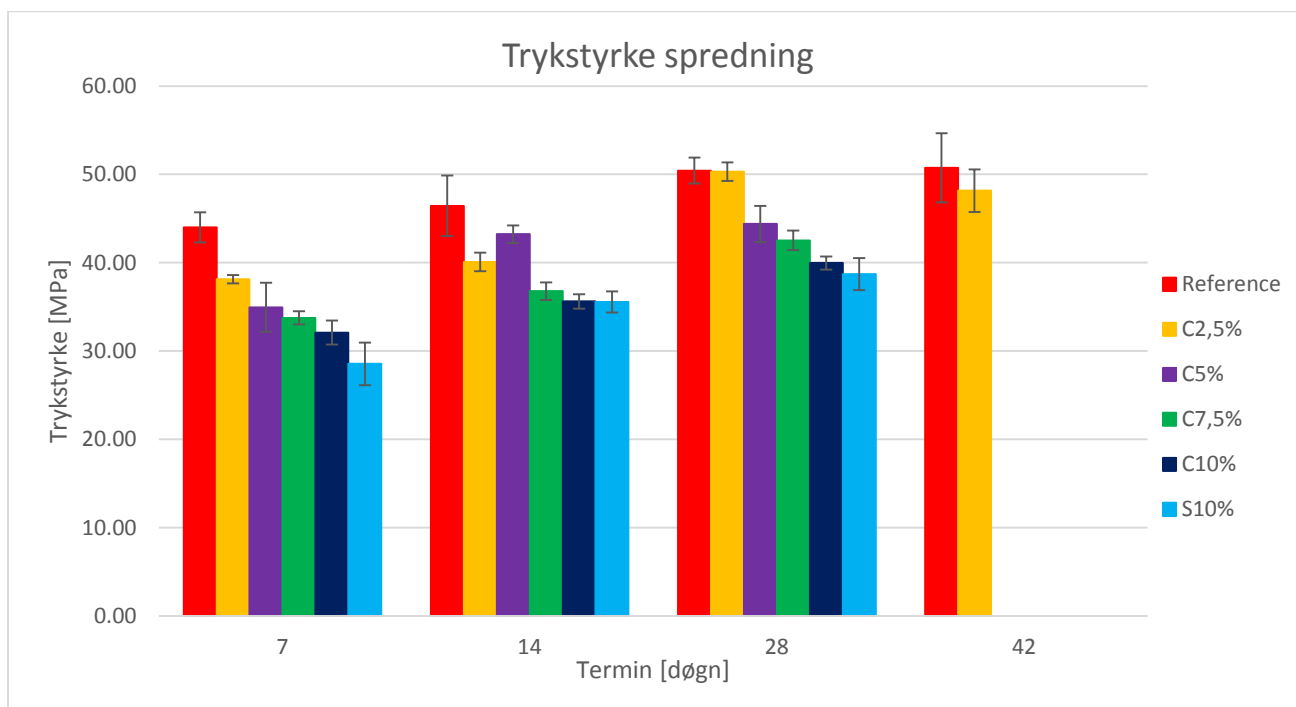
Jf. [DS/EN-196-1] skal man tjekke efter om de 6 tryk resultater holder sig til  $\pm 10\%$  fra middelstyrken. Hvis et resultat falder ud, skal dette kasseres.

Det er blevet valgt at undlade dette. Ingen resultater fra tryktesten kasseres, selvom der er nogle resultater, som falder ud.

Eftersom noget af cementen eller sandet bliver erstattet med træaske, forventes ustabilitet i prøverne. Derfor er alle resultater lige vigtige for denne undersøgelse.

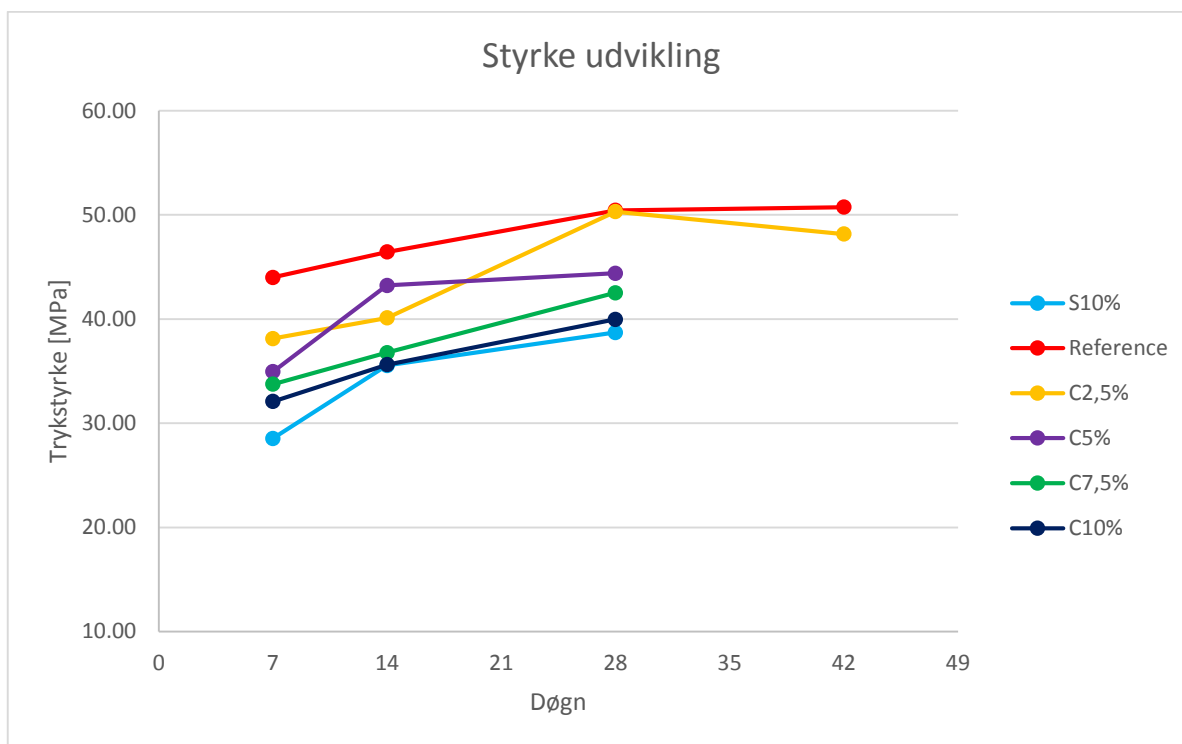
Rå data for tryktesten findes i Bilag C.5.

På Figur 18, nedenunder, er trykstyrkerne for de forskellige blandinger vist med deres spredning. Det ses på diagrammet, at spredningerne for de forskellige blandinger er relative små, hvilket er endnu en grund til, at det ikke er nødvendigt at kassere nogle af resultaterne, selvom er par resultater falder ud fra  $\pm 10\%$  intervallet.



Figur 18 – Trykstyrker med spredning

På Figur 19, nedenunder, er styrkeudviklingen vist over termin.



Figur 19 – Trykstyrke af prøverne over termin

Det ses på Figur 19, hvordan trykstyrkerne ligger for de forskellige mørtelblandinger. Fald i trykstyrken fremgår ved større aske mængde i blandingerne, som forventet. Dette skyldes både en stigende v/c-forhold ved større askemængde i blandingerne pga. askens vandindhold, den stigende porøsitet og faldende densitet.

Styrkeudviklingen i blandingerne ses også meget klart over termin, jo længere tid de hærder, jo større styrke opnås, indtil 28 døgn.

Der er, udover de typiske brugte termin, lavet en 42 døgns prøve af reference og C2,5%. Dette var for at se om der kunne være tale om sen styrkeudvikling af asken, men intet tyder på det, da prøvens styrke falder i forhold til 28 døgns prøven. Det ses på referencen, at styrken forbliver konstant fra 28 døgn til 42 døgn.

Selvom trykstyrken falder ved tilsætning af aske, betyder det ikke at betonen ikke kan bruges.

Tværtimod er der mange steder, hvor der bliver brugt beton med unødvendig høj trykstyrke, hvor det kunne være et alternativ at bruge denne beton og samtidig spare på cement.

	7 døgn	14 døgn	28 døgn	42 døgn
Reference	44,00	46,44	50,43	50,75
S10%	28,54	35,54	38,71	
C2,5%	38,13	40,10	50,31	48,16
C5%	34,94	43,23	44,39	
C7,5%	33,75	36,77	42,52	
C10%	32,08	35,62	39,96	

Tabel 13 – Trykstyrke [MPa] af de forskellige blandinger over termin.

I Tabel 14, nedenunder, er listet nogle anvendelsesmuligheder for forskellige trykstyrker.

Anvendelse	Mindst forventet trykstyrke
<b>1</b> Betongulve udsat for kraftigt slid. Gulve i stier og båse. Vægge og gulve udsat for vandtryk.	40 MPa
<b>2</b> Betongulve med almindeligt slid. Udendørs konstruktioner.	30 MPa
<b>3</b> Gulve til lettere færdsel. Underbeton til slidlag, klinker o.l. Indendørs konstruktioner.	25 MPa
<b>4</b> Fundamenter i større bygninger. Udstøbning i fundamentblokke.	20 MPa
<b>5</b> Fundamenter til parcelhuse.	12 MPa

Tabel 14 – Anvendelsesmuligheder for trykstyrker [Aalborg P., 2010]

- S10%

Aske tilsætningen er alt for højt til, at denne blanding kan bruges til noget. Hverken Chlorid indholdet er tilladt, afbindingstiden eller flydesætmålet. Men styrkemæssigt viser den sig til at være til brug.

Med en mindste styrke efter 7 døgn på 28,54 MPa, kan den bruges til anvendelsesmulighederne 3-5 i Tabel 14.

Med dens trykstyrke efter 28 døgn kan den også bruges til nr. 2.

Afbindingstid og flydesætmål kan ordnes ved tilsætning af plastizisers.

Chlorid indholdet kan overholdes ved at mindske askebrugen, hvor det højst må være 8 % af sandmassen, for at kunne bruges i beton uden armering.

Men ved at erstatte sandet i stedet for cementen, er der ikke mange fordele. Formålet var at mindske brugen af cement, hvilket ikke sker her. Samtidig er man nødsaget til at tilføje andre kemikalier for at gøre blandingen bearbejdelig. Dette kommer til at kræve mere end det kommer til at spare.

- *C2,5%*

Aske tilsætningen her er forholdsvis lille, da den kun erstatter 2,5% af cementen. Det er ikke meget at erstatte, men stadig ses et stort fald i styrken ved 7 døgn i forhold til referencen. Det bemærkes herefter, at styrken stiger pludseligt efter 14 døgn, hvor den til 28 døgn rent faktisk kommer op på samme styrke som referencen. Efter 28 døgn ser man et ikke forventet fald i styrken ved 42 døgn. Man forventer mindst en konstant styrke efter 28 døgn, som det ses på referencen. Men faldet i styrken er ikke meget stort, og ændrer alligevel ikke i anvendelsesmulighederne af blandingen, derfor vil det ses som et ubetydeligt fald.

C2,5% kan bruges til alle anvendelsesmulighederne listet i Tabel 14.

Fordelene ved denne blanding er mange, men er ikke interessante nok, da erstatningen er meget lille.

- *C5%*

Denne blanding er mere interessant at kigge på end de forrige, da den har en mere betydelig cementerstatning.

Jo større cementerstatning, jo mere interessant bliver det, da man sparer mere på cementen, hvilket gavner formålet med disse undersøgelser.

Trykstyrken for C5% starter lidt lavt med 34 MPa, men springer hurtigt på 43 MPa ved 14 døgn. Derefter ses kun en lille stigning op til 28 døgn.

Ved 7 døgn trykstyrke er anvendelsesmulighederne 2-5, men efter 14 døgn kan blandingen bruges til alle anvendelser nævnt i Tabel 14.

Fordelene med C5% er mange, da både flydesætmål, afbindingstid og cementerstatning overholder stillede krav diskuteret i tidligere afsnit.

- *C7,5%*

Med denne blanding overholdes også de fleste krav, udover flydesætmålet. Dette kan ordnes ved tilsætning af plastizers, og få en bedre bearbejdelighed.

Dens trykstyrker ved 7 og 14 døgn gør den anvendelig til 2-5 i Tabel 14. Med 28 døgn hærkning er den anvendelig til alle nævnte muligheder.

- C10%

For denne blanding gælder det samme som C7,5%. Ved tilsætning af plastizisers kan den gøres bearbejdelig og samtidig spare en del cement.

Men med dens trykstyrke holdes den kun til anvendelsesmulighederne 2-5 i Tabel 14.

## 8.2.5 – Aktivitetsfaktor

Aktivitetsfaktoren beregnes med Bolomeys formel for puzzolan tilsætninger udefra de målte trykstyrker i afsnit 8.2.4.

$$f_c = K \cdot \left( \frac{1}{V/(C + k \cdot P)} - \alpha \right)$$
$$\rightarrow k = \frac{(\alpha \cdot K + f_c) \cdot V - C \cdot K}{K \cdot P}$$

hvor  $\alpha = 0,5$

V = 225 g + vandindhold af tilsat aske

C = mængde cement brugt i blanding

P = mængde aske tilsat i blanding

$f_c$  = målt trykstyrke

K = hærdningsgrad afhængig af termin.

- 7 døgn – K = 26
- 14 døgn – K = 27,33 (regnet med lineær interpolation)
- 28 døgn & 42 døgn – K = 30

Vandindholdet af asken er medregnet, da den har betydning for v/c-forholdet, dvs. også for trykstyrke og aktivitetsfaktor.

S10% blandingen er ikke medtaget i dette afsnit, da ingen aktivitetsfaktor var tilstede.

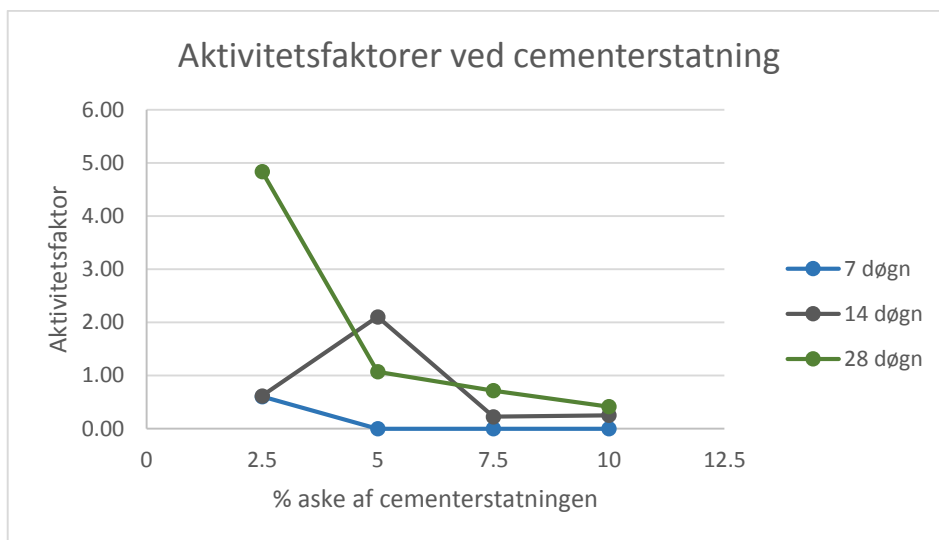
Rå data findes i Bilag C.3.

Termin [døgn]	Erstatning [%]			
	2,5	5	7,5	10
7	0,61	0	0	0
14	0,62	2,11	0,23	0,25
28	4,84	1,07	0,72	0,42
42	3,40			

Tabel 15 – Aktivitetsfaktorer for de forskellige termin og cementerstatninger

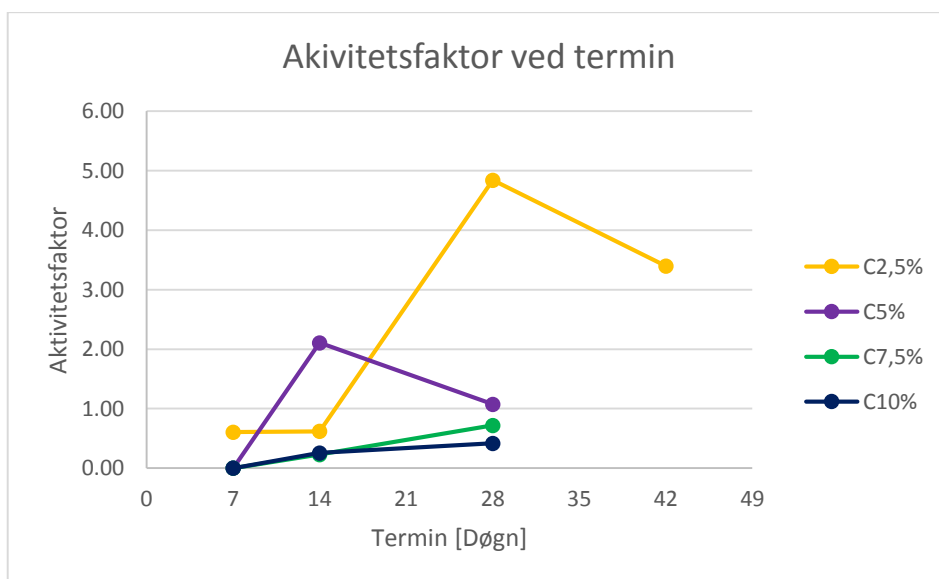
Aktivitetsfaktorerne listet i Tabel 15, ses som grafer nedenunder.

Figur 20 viser aktivitetsfaktorerne for de forskellige termin over %-cementerstatning, mens Figur 21 viser aktivitetsfaktorerne for de forskellige cementsætningsblandinger over termin.



Figur 20 – Aktivitetsfaktorer over % aske som cementsætning

På Figur 20 ses en tydelig fald i aktivitetsfaktorerne jo højere cementsætningen bliver, hvilket betyder, at mængden af tilsætningen også har en betydning for aktivitetsfaktoren.



Figur 21 – Aktivitetsfaktorer over termin

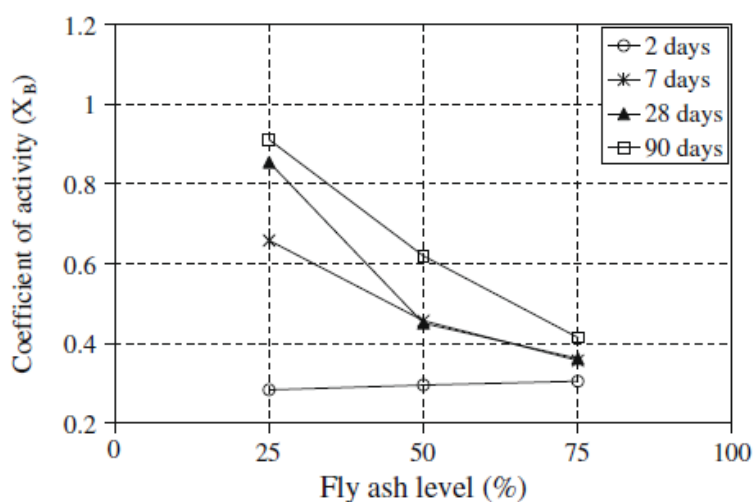
På Figur 21 ses, at aktivitetsfaktoren generelt stiger over termin. Det viser, at blandingen hærder og en styrkeudvikling er i gang.

Udefra Figur 20 og 21, kan det tydeligt ses, at der er en sammenhæng mellem termin, tilsætningsmængde, tilsætningsart og aktivitetsfaktor, som teorien også fremlagde i afsnit 6.1.2.

De bestemte aktivitetsfaktorer er for træaske. Mens den typisk anvendte aktivitetsfaktor  $k = 0,5$  er oprindeligt for flyveaske. Det er angivet, at aktivitetsfaktoren for flyveaske ligger normalt mellem 0,3-0,5 for 28 døgns hærdning. [Beton-bogen, 1985]

Den bliver brugt som en generel aktivitetsfaktor for tilsætninger, fordi andre tilsætninger endnu ikke er blevet brugt i den virkelige verden. Og eftersom flyveaske er den mest brugte cementerstatning er denne blevet en fast faktor for alle erstatninger, hvilket ikke er korrekt at gøre. Forskellige asker har forskellige sammensætninger og reaktioner. Altså er selve aktivitetsfaktoren  $k = 0,5$  korrekt, men bliver brugt i forkerte sammenhænge. Det skal bemærkes, at den ikke gælder for alle tilsætninger i mørtel.

Valget for at undersøge aktivitetsfaktorer startede ved at læse en artikel [Khokhar, 2010], hvor lignende forsøg bliver udført, udover at de bruger meget større cementerstatninger og optimerer blandingerne, så de får bestemte ønskede trykstyrker i en tidlig alder. Men samme konklusion for aktivitetsfaktoren opnås som her. I artiklen bliver aktivitetsfaktorerne undersøgt for bl.a. slamaske og flyveaske, hvor de kommer frem til at selv flyveasken har forskellige aktivitetsfaktorer afhængigt af mængde brugt og termin. Nedenunder, Figur 22, ses resultater for flyveaske fra artiklen.



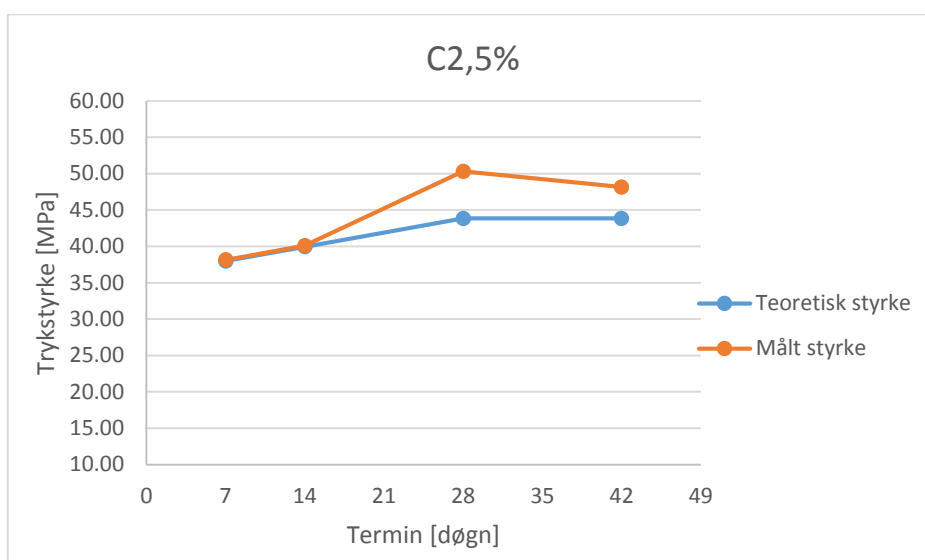
Figur 22 – Aktivitetsfaktor for forskellige flyveaske tilsætning [Khokhar, 2010]

På Figur 22 ses, at aktivitetsfaktoren for flyveasken er på ca.  $k = 0,3$  uanset asketilsætning, som stemmer overens med de angivne faktorer 0,3-0,5, men dette er kun for 2 døgns hærdning. Så snart det kommer op på 7 døgns ses andre aktivitetsfaktorer, som varierer efter mængde tilsat og termin.

Dette tyder på, at den faste aktivitetsfaktor er misvisende og usikker, og det kan være risikabelt at bruge som teoretisk faktor, uden at undersøge det nærmere.

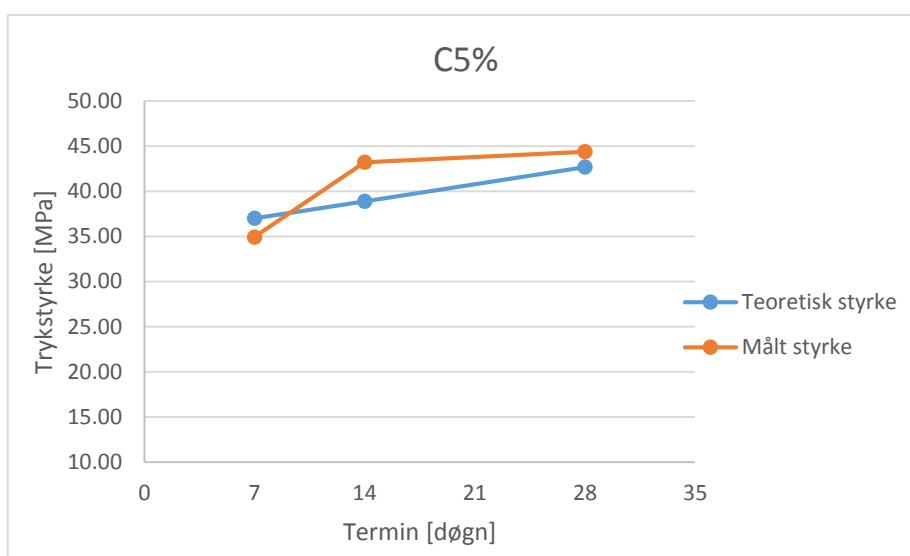
Nedenunder ses grafer, hvor de teoretiske trykstyrker beregnet med  $k = 0,5$  sammenlignes med de målte styrker, hvorfra aktivitetsfaktorerne i Tabel 15 er beregnet.





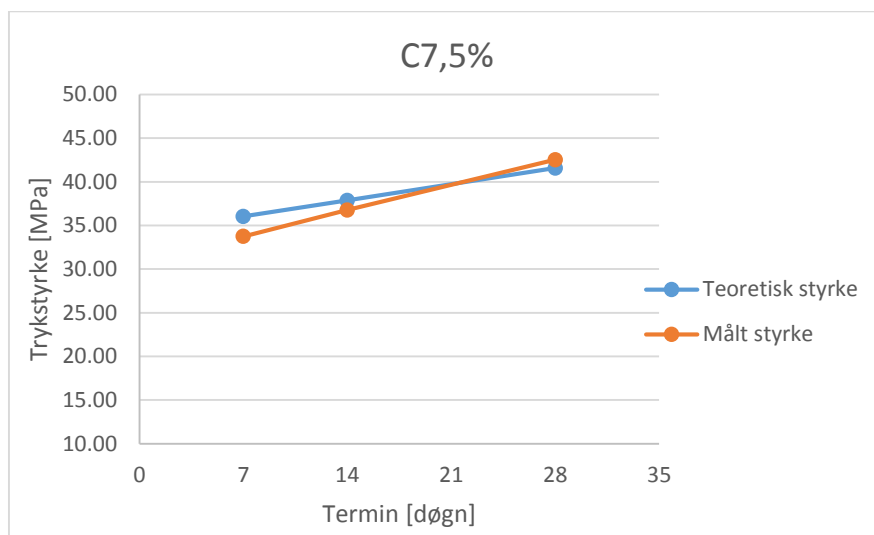
Figur 23 – Teoretisk og målt trykstyrke for C2,5%

I Figur 23 ses, at de målte styrker for C2,5% rammer næsten præcist de teoretiske styrker ved 7 og 14 døgn, men kommer over ved 28 og 42 døgn, som ønsket. Ved en så lille erstatning vil  $k = 0,5$  ikke være noget problem, men det er bedre hvis man fik regnet en teoretisk trykstyrke, som forbliver under den målte styrke hele vejen, for at undgå alt usikkerhed.



Figur 24 – Teoretisk og målt trykstyrke for C5%

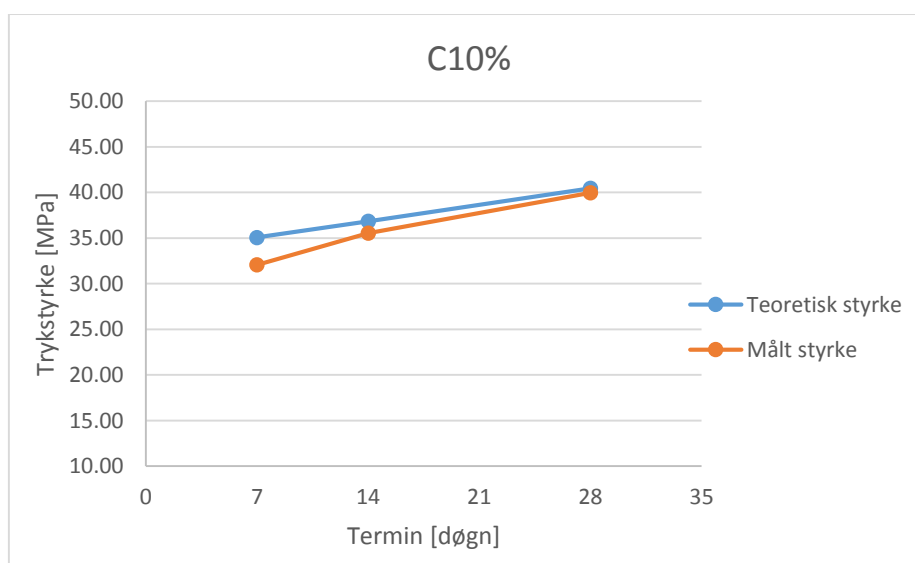
I Figur 24 ses de målte styrker for C5%, hvor der igen udtrykkes usikkerhed ved, at den teoretiske ligger højere ved 7 døgn. Dette kan man måske kigge lidt bort fra, da der forventes ustabilitet i blandingen ved de første døgn. Ellers holder de målte styrker sig over de teoretiske som ønsket.



Figur 25 – Teoretisk og målt trykstyrke for C7,5%

I Figur 25 ses de målte styrker for C7,5%, hvor problemet med en fast aktivitetsfaktor kommer til udtryk. Ved en erstatning på kun 7,5% af cementen ses det klart, at den målte styrke ligger under den teoretiske, men op til 28 døgn kommer den lige over den teoretiske.

Nedenunder i Figur 26 ses de målte og teoretiske styrker for C10%, hvor det samme kommer igen til udtryk. En aktivitetsfaktor på 0,5 holder ikke til cementerstatning med træaske over 5 %.



Figur 26 – Teoretisk og målt trykstyrke for C10%

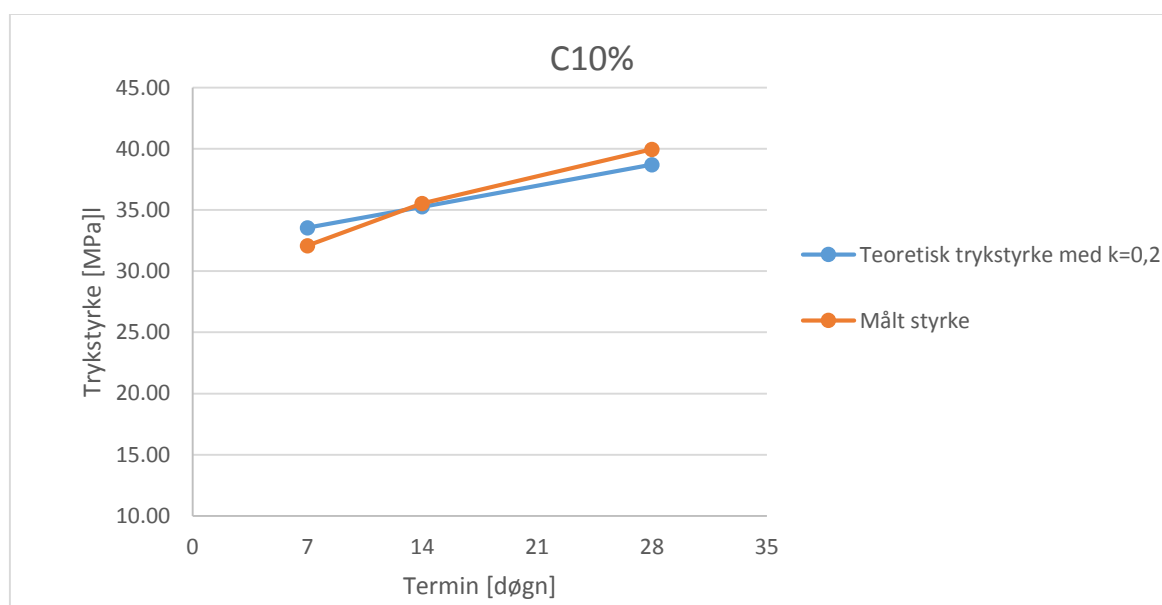
Problematikken ligger i, at hvis man antager  $k = 0,5$  som en faktor for alle tilsætninger, vil ens teoretiske trykstyrker ikke holde til de målte.

Når man beregner værdier teoretisk forventes altid, at der er taget hensyn til usikkerheder og ustabilitet. En teoretisk trykstyrke skal altid holde sig under de målte styrker.

På alle grafer var de målte styrker enten for tætte på de teoretiske styrker eller skred ud og var lavere. Dette er simpelthen for usikkert at arbejde med denne teoretiske aktivitetsfaktor, som i bund og grund ikke overholder teorien i afsnit 6.1.2.

I stedet for en fast aktivitetsfaktor, kunne det tænkes at liste de forskellige kvalificerede tilsætninger til beton i en tabel, hvor der f.eks. angives en minimum aktivitetsfaktor for de forskellige hærdedøgn, f.eks.  $\leq 7$  døgn og  $\leq 28$  døgn. Minimum aktivitetsfaktoren bliver den mindst fundne faktor udefra de forskellige erstatningsmængder. For flyveasken kunne den sættes til  $k = 0,3$  i stedet for  $0,5$ , da det er den mindste fundne faktor uanset flyveaske mængde til en hærdningstid på 2 døgn og ville være sikrest at regne en teoretisk trykstyrke med.

For træasken kunne aktivitetsfaktoren sættes til  $0,2$  for hærdetid over 14 døgn, da den mindst fundne ud fra alle regnede aktivitetsfaktorer var på  $0,23$  (se Tabel 15). For 7 døgn og under er aktivitetsfaktoren  $0$ . På denne måde kunne det sikres, at den teoretiske styrke holder sig under den målte styrke. Nedenunder på Figur 27 ses den målte og teoretiske trykstyrke af C10% med  $k = 0,2$ . For 7 døgn er  $k = 0,2$  alt for højt og derfor ligger den målte under den teoretiske, det anbefales derfor for træaske, at uanset tilsætningsmængde regnes der med  $k = 0$  for 7 døgn hærningstid. Men for 14 døgn og over virker  $k = 0,2$  som en fin aktivitetsfaktor, hvor den målte trykstyrke lige holder sig over den teoretiske med en 10% cementerstatning. Altså holdes de teoretiske trykstyrker med  $k = 0,2$  også under de målte styrker for de andre erstatninger.



Figur 27 – Målt og teoretisk trykstyrke med  $k = 0,2$  for C10%

Der er stadig en usikkerhed med de anbefalede aktivitetsfaktorer listet i Tabel 16, men det skyldes også, at det er få resultater der er blevet brugt. Flere undersøgelser skal udføres for at bestemme et mere stabilt og sikkert aktivitetsfaktor for træaske. Men dette kunne være en start.

<b>Aktivitetsfaktor</b>	
<b>7 døgn</b>	0
<b>14 døgn</b>	0,2
<b>28 døgn</b>	0,2

*Tabel 16 – Anbefalede aktivitetsfaktorer for træaske*

## Konklusion

Træaskens sammensætning konkluderes at kunne bruges i betonsammenhænge, bare i begrænsede mængder. Pga. af chlorid indholdet på 3,9 %, må asken kun erstatte 25 % af cementen og 8,5 % af sandet for at være tilladt at bruge i beton.

Træaskens alkali indhold er på 12,25 %, men kan stadig bruges i beton uden alkali reaktivt tilslag. Tungmetalindholdet klassificerer asken i Kategori 2, hvor det kan bruges i beton brugt til veje, stier, pladser, ledningsgrave, ramper, støjvolde, fundamenter og gulve.

Derudover har træasken et vandindhold på 13,9 %, vandopløselighed på 29,29 %, ledningsevne på 77,97 mS/cm og en pH på 13,12.

Glødetabet blev fundet til at være 4,84 %, hvilket klassificerer asken i Kategori A.

Med 60 % af kornkurven, hvor størrelsen er under 250  $\mu\text{m}$ , vil asken kunne bruges som filler. Dette bekræftes med kapillarsugning, hvor det viser sig, at prøver med aske suger mindre vand end en reference.

Træasken viser sig til at fremkalde større porøsitet og faldende densitet i mørtelprøverne ved større asketilsætning.

Flydesætmål og bearbejdelighed af mørtel bliver mindre ved større asketilsætning, samtidig bliver afbindingstiden kortere.

Trykstyrke falder også ved større asketilsætning, som følge af stigende porøsitet og faldende densitet. Men selv med et fald i trykstyrken ved højere aske tilsætning, falder trykstyrken ikke under 25 MPa. Dette giver rigeligt af anvendelsesmuligheder, især til gulve og fundamenter.

Fra de målte trykstyrker udregnes aktivitetsfaktorer for træasken. Aktivitetsfaktorerne viser sig at være afhængige af både tilsætningsmængde, tilsætningstype og termin. Derfor anses den teoretiske aktivitetsfaktor for flyveaske  $k = 0,5$  som misvisende og usikker. Den egner sig ikke til andre tilsætninger, derfor er en minimum aktivitetsfaktor for træasken blevet bestemt udefra fundne resultater. Aktivitetsfaktor for træasken op til 7 døgns hærkning sættes lig 0, mens efter 14 og 28 døgn vil aktivitetsfaktoren sættes til  $k = 0,2$ . Dette vil sikre, at teoretisk trykstyrke ikke overstiger målt trykstyrke.

## Litteratur

[videnskab.dk, 2010]

<http://videnskab.dk/teknologi/klimavenlig-cementproduktion-er-et-guldaeg>

(besøgt d. 15.05.2016 kl. 23.45)

[VEKS.dk]

<http://www.veks.dk/da/varmeproduktion/koege-kraftvarmevaerk>

(sidst besøgt d. 14.06.2016 kl. 15.01)

[BEK nr. 1414, 2015]

BEK nr. 1414 (2015). Bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter og jord til bygge og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret, uforurennet bygge- og anlægsaffald. {<http://retsinformation.dk>}. I skrivende stund den gældende bekendtgørelse. Offentliggjort af miljøministeriet d. 30. november 2015. *Bekendtgørelsen downloadet 5. maj 2016.*

[DS/EN-206-1]

DS/EN-206-1 (2002) – Beton – Del 1: Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse  
2. udgave; Dansk Standard

[DS/EN-196-1]

DS/EN-196-1 (2005) – Metoder til prøvning af cement – Del 1: Styrkebestemmelse  
2. udgave; Dansk Standard

[DS/EN-196-2]

DS/EN-196-2 (2005) – Metoder til prøvning af cement – Del 2: Kemisk analyse af cement  
1. udgave; Dansk Standard

[DS/EN-196-3]

DS/EN-196-3 + A1 (2009) – Metoder til prøvning af cement – Del 3: Bestemmelse af afbindingstid og volumenbestandighed  
3. udgave; Dansk Standard

[DS/EN-450-1]

DS/EN-450-1 (2012) – Flyveaske til beton – Del 1: Definition, specifikationer og overensstemmelseskriterier”  
3. udgave; Dansk Standard

[DS/EN-1015-3]

DS/EN-1015 (1999) – Prøvningsmetoder til undersøgelse af mørtel til murværk – Del 3: Bestemmelse af mørtels konsistens (rystebord)  
1. udgave; Dansk Standard.

[Beton-bogen, 1985]

Herholdt, Aage D.; Justesen, Chr. F. P.; Nepper-Christensen, Palle; Nielsen, Anders (1985) *Beton-Bogen*  
2. udgave; Aalborg Portland, cementfabrikkernes tekniske oplysningskontor.

[Aalborg P., 2010]  
Aalborg Portland (2010)  
*Cement og Beton – Håndbogen om cement, beton og mørtel*  
19. udgave

[Portlandcementer, 1999]  
Aalborg Portland, cementfabrikkernes tekniske oplysningskontor. (1999)  
*Portlandcementer – Beton-teknik*

[Hansen, 2015]  
Hansen, Esben Østergaard (2015)  
*Trykstyrke og densitet for beton, ved samtidig og delvis erstatning af cement og sand med træaske*  
Bachelorprojekt; Institut for Byggeri og Anlæg, DTU Lyngby.

[Amanda & Nina, 2014]  
Bonnerup, Amanda Helena; Sigvardsen, Nina Marie (2014)  
*Anvendelse af alternativ aske i beton – Bearbejdelighed og afbindingsforløb*  
DiplomByg Afgangprojekt; Institut for Byggeri og Anlæg, DTU Lyngby.

[Khokhar, 2010]  
Khokhar, M.I.A; Roziere, E.; Turcry, P.; Grondin, F.; Loukili, A. (2010)  
*Mix design of concrete with high content of mineral additions: Optimisation to improve early age strength*  
Cement & Concrete Composites

# Bilag

## A – Forsøgsvejledninger



# Vandindhold

## A Princip

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

## B Specielt apparatur

Til analysen benyttes et varmeskab.

## C Analysens udførelse

*Ved meget præcis måling:*

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

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

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

*Ved mindre præcis måling (mest anvendt):*

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

## D Beregning af resultat

Vandindholdet angives i procent af vægten af den fugtige jord.

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

## E Affaldshåndtering

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald og bægerglassene rengøres.

### Vandopløselighed

#### A Princip

Ved at foretage en skylning af asken skal der bestemmes hvor meget at materialet som er vandopløselig. De vandopløselige materialer er i de fleste tilfælde salte.

#### B Analysens udførelse

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 i et måleglas.

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

Topvæsken 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 der skylles efter med destilleret vand for at få alle partiklerne med over i filteret. Det stilles til afdrypning.

Når asken i filteret er næste tør, lægges filter med asken i en petriskål og vejes og derefter stilles dem i varmeskab ved 105°C natten over.

Asken og filteret afkøles og vejes.

#### C Beregning af resultat

$$\boxed{Aske\ tilbage = (tørfilter + aske + petri) - (filter + petri)}$$

$$\boxed{Opløst\ materiale = (aske\ før) - (aske\ tilbage)}$$

#### D Affaldshåndtering

Filter med aske skal opsamles i beholder til jord- og askeaffald.

### Ledningsevne i jord

#### **A**    **Princip**

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

#### **B**    **Specielt apparatur**

Til målingen benyttes ledningsevne måler.

#### **C**    **Analysens udførelse**

10,00 g tør knust jord afvejes på teknisk vægt til en 50 mL plastikflaske.

Der tilsættes 25,00 mL destilleret vand med fuld pipette og ryst i 30 min.

Jorden skal nu bundfælde i ca. 10 minutter, indtil en væskefase har udskilt sig over jorden.

Ledningsevne elektroden skylles med destilleret vand. Sæt elektroden ned i væske. Når displayet viser "STAB" og aflæs resultatet og noteres som mS/cm.

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

Ledningsevnen anvendes uden yderlig beregning som mS/cm.

#### **E**    **Affaldshåndtering**

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

## Anioner

### A Princip

En jordvæskes indhold af ioner og opløste forbindelser er af stor interesse. Denne analyse viser de primære opløselige anioner som er i jorden.

### B Specielt apparatur

Til målingen benyttes ICP og IC

### C Analysens udførelse

10,00 g jord eller aske afvejes på teknisk vægt til 50 mL plastikflasker.

Der tilsættes forsigtig 25,00mL destilleret vand med fuld pipette. Prøverne stilles på rystebord natten over

Prøverne tages af og sedimenteres i 15 min. Der måles pH på prøverne.

Efter pH-målingerne filtreres prøverne gennem et 0,45µm sprøjtefilter over en 20 mL plast-vial og gemmes til ICP og IC.

### D Bestemmelse af metaller

Ekstraktens indhold af metaller måles på ICP under benyttelse af de standarder som hører til de enkelte metaller.

### E Beregning af resultat

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

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

hvor

A = ekstraktens metal koncentration, mg/L = ppm

B = g jord afvejet

C = fortyndingsfaktor

### F Affaldshåndtering

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Filterpapiret smides ud i skraldespanden i stinkskalet

Jord og aske skal opsamles i jord – og askeaffaldsspand

### Oplukning af jord- og askeprøve 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 metal-koncentrationen i jorden.

#### B Specielt apparatur

Til målingen benyttes ICP  
Autoklave

#### C Kemikalie sikkerhed

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

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

**Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.**

#### D Reagenser

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

500 mL koncentreret HNO<sub>3</sub> overføres med måleglas til en 1000,00 mL målekolbe som er ½ fyldt med destilleret vand. Der blandes godt og tilsættes vand til mærket. Efter blanding overføres opløsningen til en plastikflaske og mærkes.

#### E Analysens udførelse

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

Autoklavflaskerne lukkes helt, da HNO<sub>3</sub> ellers ville fordampe. Flaskerne stilles i autoklaven.

Der hældes 1,5L destilleret vand i autoklaven og låget lukket helt og den orange låseknop

lukkes. Den sorte ventil midt på låget åbnes helt og drejes derefter en ½ omgang tilbage.

Autoklaven tændes og der går ca. 10-15 min indtil den er varmet op. Efter 3 min med damp ud at ventilen lukkes denne og trykket begynder at sige. Når trykket er kommet op i det blå felt på manometeret tages der tid på autoklaveringen (30min). Derefter slukkes autoklaven.

Flaskerne afkøles derefter til stuetemperatur.

Prøverne filtreres med sug gennem et 0,45 µm filter i stinkskaab. **Brug engangshandsker.**

Autoklaveflasken skylles med 3 gange destilleret vand. Filteret skal suge tør mellem hvert skyl.

Filtratet hældes i en 100,00 mL målekolbe og der tilsættes destilleret vand til mærket og

blandes. Væsken hældes på en 20 mL plast-vials og gemmes til ICP.

## **F Bestemmelse af metaller**

Ekstraktens indhold af metaller måles på ICP under benyttelse af de standarder som hører til de enkelte metaller.

## **G Beregning af resultat**

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

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

hvor

A = ekstraktens metal koncentration, mg/L = ppm

B = g jord afvejet

C = fortyndingsfaktor

## **H Affaldshåndtering**

Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Filterpapiret bortkastes i skraldespanden i stinkskaabet.

Jorden og asken skal opsamles i beholder til jordaffald.

## Glødetab

### A Princip

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

### B Specielt apparatur

Til analysen benyttes et muffelovn.

### C Analysens udførelse

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

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

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

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

### D Beregning af resultat

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

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

### E Affaldshåndtering

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

### **Porøsitet og densitet (LBM-standard)**

#### **A Princip**

Porøsiteten i et materiale fortæller hvor porøst materialet er, dvs. hvor skrøbeligt det er. Jo højere porøsiteten er, des større evne har materialet til at optage vand. Det betyder også at en god evne til at optage vand. Densiteten er materialets masse pr. volumenenhed. Massen af et porøst materiale kan være en tør masse eller en masse med vand i de åbne porer, dvs. ved at finde densiteten kan man udregne massen ved forskellige forhold.

#### **B Specielt apparatur**

Til målingen benyttes vakuumpumpe, teknisk vægt med mulighed for at veje under vand.

#### **C Analysens udførelse**

Prøven tørres ved 105°C til prøven er hel tør dvs. ved kontant vægt.

Hvis der er tale om en betonprøve skal denne tørres ved 50°C i min 3 uger, da en tørring ved høj temperatur vil medføre ændring i porestrukturen.

Prøven vejes på teknisk vægt og vægten noteres som ( $m_{105}$ )

Prøven placeres i en eksikator med låg og hane. Eksikatoren tilsluttes vakuumpumpen og pumpes ned i minimum 3 timer.

Destilleret vand med rumtemperatur ledes ind i eksikatoren vha en slange og undertrykket i eksikatoren. Hanen lukkes lige så snart vandstanden er 3 cm over prøvelegemet. Derefter skal den stå lukket i 1 time.

Herefter lukkes luften ind og prøven skal stå under vand natten over ved atmosfæretryk.

Den vandmættede prøve vejes først under vand på en teknisk vægt med ophæng under.

Vandet i karret skal have rumtemperatur. Vægten noteres som ( $m_{sv}$ ).

Prøven duppes med en hårdt opvredet klud inden den vejes over vand. Vægten noteres som ( $m_{ssd}$ ).

For at kontrollere om der er sket en udvaskning af prøven ved vandmætning tørres prøven ved 105°C og kontrolvejes.



## D Beregning af resultat

Rumtemp: °C	Vandtemp: °C	Vanddensitet $\rho_w = \text{kg/m}^3$		
Kontrollod:				
Før: kg				
Efter: kg				
Prøvelegement nr:				
$m_{105}$	Kg			
$m_{\text{ssd}}$	Kg			
$m_{\text{sw}}$	Kg			
$V = (m_{\text{ssd}} - m_{\text{sw}}) / \rho_w$	$\text{m}^3$			
$V_{\text{på}} = (m_{\text{ssd}} - m_{105}) / \rho_w$	$\text{m}^3 / \text{m}^3$			
$P_{\text{å}} = V_{\text{på}} / V$	$\text{Kg} / \text{m}^3$			
$\rho_d = m_{105} / V$	$\text{Kg} / \text{m}^3$			
$\rho_f = m_{105} / (V - V_{\text{på}})$	$\text{Kg} / \text{m}^3$			
$\rho_{\text{ssd}} = m_{\text{ssd}} / V$	$\text{Kg} / \text{m}^3$			
$u_{\text{ssd}} = (m_{\text{ssd}} - m_{105}) / m_{105}$	$\text{Kg} / \text{kg}$			

### Definitioner, begreber og symboler

$m_{105}$  Masse af prøvelegemet efter tørring ved 105°C (kg)

$m_{\text{ssd}}$  Masse af prøvelegemet over vand efter vakuumvandmætning (kg)

$m_{\text{sw}}$  Masse af vakuumvandmættet prøvelegeme vejet i vand (kg)

$V$  Prøvelegemets volumen ( $\text{m}^3$ )

$V_{\text{på}}$  Volumen af åbne porer ( $\text{m}^3$ )

$\rho_f$  Faststoffdensitet ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )

$\rho_d$  Tørdensitet ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )

$\rho_{\text{ssd}}$  Densitet af prøvelegeme i vakuumvandmættet overfladetør tilstand ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )

$P_{\text{å}}$  Prøvelegemets åbne porøsitet ( $\text{m}^3 / \text{m}^3$ )

$u_{\text{ssd}}$  Vandtørstofforhold i vakuumvandmættet overfladetør tilstand ( $\text{kg} / \text{kg}$ )

### Kapillarsugning

#### **A Princip**

Hvis et tørt porøst materiale bringes i forbindelse med vand, vil materialet opfugtes som følge af kapillarsugning. Ved kapillarsugning sker der en transport af vand fra overfladen ind i materialet, denne transport sker igennem snævre kanaler i materialet, som også kaldes kapillarer.

På figuren ses det ideelle forhold hvor den optagne vandmængde pr. areal ( $Q$ ) som funktion af  $t_{1/2}$  viser en ret stilet linje, indtil vandmængden svarende til  $Q_{\text{kap}}$  er opsuget. Herefter optages ikke mere vand og kurvens hældning bliver derfor nul.

I virkeligheden vil en kurve se ud som vist med den fuldt optrukne linje, da porerne ikke fyldes lige hurtigt. Ligeledes vil der for nogle materialer være en svagt stigende tendens, efter vandoverfladen har nået toppen af prøven. Dette skyldes at fyldningen af de mindste porer tager længere tid. Derfor vil vandtransporten gå langsomt hvis porerne i materialet er små, og omvendt hurtig hvis porerne er større.

#### **B Specielt apparatur**

Til målingen teknisk vægt.

#### **C Analysens udførelse**

Prøven tørres ved 105°C til prøven er hel tør dvs. ved kontant vægt.

Arealet af prøvelegemet måles som højde, længde og bredde.

Hvis der er tale om en betonprøve skal denne tørres ved 50°C i min. 3 uger (konstant vægt), da en tørring ved høj temperatur vil medføre ændring i porestrukturen.

Prøven vejes på teknisk vægt og vægten noteres ( $m_0$ )

En fotobakke fyldes med destilleret vand indtil vandet når ca. 5mm op over messingstængerne som ligger i bunden af bakken.

Temperaturen i rummet måles ( $T_{\text{rum}}$ ) og destilleret vand skal være 20°C ± 2°C ( $T_{\text{vand}}$ )

Derefter anbringes prøvelegemet således at sugefladerne er på messing-stængerne og vandet når 5 mm op af prøven. Tiden startes i det øjeblik prøven får kontakt med vandet.

Prøven vejes efter 1 – 2 – 4 – 8 – 16 – 32 – 60 – 120 – 240 - 360 minutter fra starttidspunktet. Vejningen sker ved at prøven tages op og trykkes kortvarig ned på en hårdt opvredet klud og vejes. Vægten noteres som ( $m_t$ )

## D Beregning af resultat

Start værdier		
T <sub>rum</sub>	°C	
T <sub>vand</sub>	°C	
ρ <sub>w</sub>	kg/m <sup>3</sup>	998
Højde	m	
Længde	m	
Bredde	m	
Areal (A)	m <sup>2</sup>	
m <sub>0</sub>	kg	

t (min)	t <sub>1/2</sub>	m <sub>t</sub> (kg)	Q (kg/m <sup>2</sup> )
0			
1			
2			
4			
8			
16			
32			
60			
120			
240			
360			

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

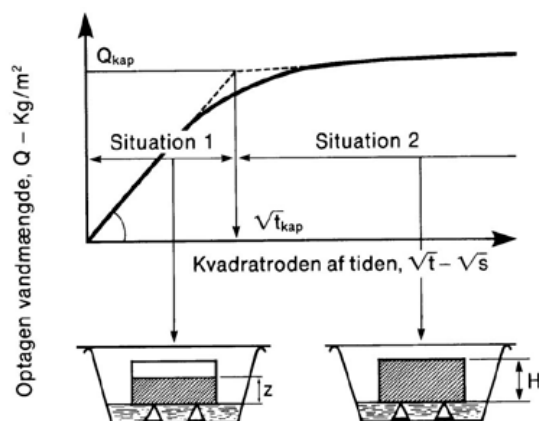
hvor

Q er den opsugede masse pr. opsugningsareal [kg/m<sup>2</sup>]

m<sub>t</sub> er massen af prøvelegemet til tiden t [kg]

m<sub>0</sub> er tørmassen af prøvelegemet [kg]

A er opsugningsarealet [m<sup>2</sup>]



## B – Askekarakteristik data

### B.1 – Vandindhold, Vandopløselighed & Glødetab

Vandindhold				
Prøvenr.	Bæger vægt [g]	Prøvevægt [g]	Prøvevægt efter tørring + bæger [g]	Prøvevægt efter tørring [g]
RSA 1	4,56	5,03	8,92	4,36
RSA 2	4,43	5,02	8,74	4,31
RSA 3	4,39	5,04	8,71	4,32
			Middel af vådprøver [g]	Middel af tørprøver [g]
			5,03	4,33
				Vandindhold [%] 13,9165

Vandopløselighed		Aske tilbage [g]
Tøraske	100	70,71
Filter vægt	6,72	Opløst materiale [g]
Petriskål vægt	105,16	29,29
Petriskål+filter+vådaske	302,61	Vandopløs. [%]
Petriskål+filter+tøraske	182,59	29,29

Glødetab				
Prøvenr.	Digel vægt [g]	Prøvevægt før [g]	Prøvevægt+digel efter ovn [g]	Prøvevægt efter ovn [g]
RSA1 ( E)	14,5445	2,5003	16,9213	2,3768
RSA2 (D)	13,8027	2,5022	16,1867	2,384
RSA3 (4)	10,3668	2,5052	12,7506	2,3838
Gennemsnit		2,5026		2,3815
				%-glødetab 4,8364

## B.2 – Anioner, pH, ledningsevne & tungmetaller

Anioner						
Prøve:	Prøve vægt [g]	tilsat dest. [mL]	mg/L Cl	mg/kg Cl	mg/L NO3	mg/kg NO3
RSA 1	10,0354	25,00	15448,29	38484,49	803,69	2002,15
RSA 2	10,0071	25,00	16490,96	41198,14	266,52	665,84
RSA 3	10,0107	25,00	15411,38	38487,27	264,28	660,00
Gennemsnit			15783,54182	39389,966	444,834	1109,329
% af prøven			1,5784	3,9390	0,0445	0,1109
Standardafvigelse			1107		547	
%-standardafvigelse			0,1		0,05	
Prøve:	Prøve vægt [g]	tilsat dest. [mL]	mg/L SO4	mg/kg SO4	pH	Ledningsevne [mS/cm]
RSA 1	10,0354	25,00	31901,00	79471,18	13,13	77,70
RSA 2	10,0071	25,00	34318,07	85734,30	13,12	78,40
RSA 3	10,0107	25,00	31866,80	79581,85	13,11	77,80
Gennemsnit			32695,29091	81595,777	13,12	77,967
% af prøven			3,2695	8,1596		
Standardafvigelse			2535		0,27	
%-standardafvigelse			0,3			

Oplukning - Tungmetaller								
Tube	Sample Labels	Prøvevægt [g]	mg/l Al	mg/kg Al	mg/l As	mg/kg As	mg/l Ba	mg/kg Ba
1 : 57	RSA opl 1	1,0023	19,3774	1933,29	0,0171	1,70	17,9611	1791,99
1 : 58	RSA opl 2	1,0002	19,7223	1971,84	0,0217	2,17	18,2436	1824,00
1 : 59	RSA opl 3	1,0129	19,8479	1959,51	0,0200	1,97	18,7508	1851,20
2 : 2	RSA anioner 1_2	10,0354	9,2952	23,16	0,0373	0,09	0,4954	1,23
2 : 3	RSA anioner 2_2	10,0071	0,0000	0,00	0,0441	0,11	0,4536	1,13
2 : 4	RSA anioner 3_2	10,0107	0,0000	0,00	0,0413	0,10	0,4418	1,10
Gennemsnit af opl.			1954,880		1,947		1822,394	
Gennemsnit af kationer								
% tungmetaller af prøven			0,1955		0,0001947		0,1822	
Standardafvigelse opl.			13,9		0,16		21	
%-standardafvigelse opl.			0,0014		0,00002		0,002	

Tube	Sample Labels	Prøvevægt	mg/l Ca	mg/kg Ca	mg/l Cd	mg/kg Cd	mg/l Cr	mg/kg Cr
		[g]						
1 : 57	RSA opl 1	1,0023	2048,67	204396,89	0,0535	5,34	0,2965	29,58
1 : 58	RSA opl 2	1,0002	2066	206558,69	0,0553	5,53	0,3035	30,35
1 : 59	RSA opl 3	1,0129	2127,03	209994,08	0,0568	5,61	0,3028	29,89
2 : 2	RSA anioner 1_2	10,0354	218,1820	543,53	0,0000	0,00	7,1537	17,82
2 : 3	RSA anioner 2_2	10,0071	170,1870	425,17	0,0015	0,00	7,1971	17,98
2 : 4	RSA anioner 3_2	10,0107	171,6620	428,70	0,0007	0,00	7,1770	17,92
Gennemsnit af opl.				206983,217		5,4909		29,9389
Gennemsnit af kationer				465,7976				
% tungmetaller af prøven				20,6983		0,000549		0,00299
Standardafvigelse opl.				1995,9		0,097		0,27
%-standardafvigelse opl.				0,2		0,0000097		0,000027
Standardafvigelse kationer				47,62				
%-standardafvigelse kationer				0,005				
Tube	Sample Labels	Prøvevægt	mg/l Cu	mg/kg Cu	mg/l Fe	mg/kg Fe	mg/l K	mg/kg K
		[g]						
1 : 57	RSA opl 1	1,0023	1,2660	126,31	54,2570	5413,25	1040,7600	103837,17
1 : 58	RSA opl 2	1,0002	1,3013	130,10	45,1990	4519,00	1032,8000	103259,35
1 : 59	RSA opl 3	1,0129	1,2913	127,48	47,9005	4729,05	1018,2500	100528,19
2 : 2	RSA anioner 1_2	10,0354	0,0890	0,22	3,1372	7,82	36685,8	91390,98
2 : 3	RSA anioner 2_2	10,0071	0,0161	0,04	0,1506	0,38	39413,7	98464,34
2 : 4	RSA anioner 3_2	10,0107	0,0126	0,03	0,0647	0,16	38620,9	96449,05
Gennemsnit af opl.				127,965		4887,097		102541,570
Gennemsnit af kationer								95434,789
% tungmetaller af prøven				0,01280		0,4887		10,2542
Standardafvigelse opl.				1,37		330,6		1249,8
%-standardafvigelse opl.				0,00014		0,033		0,125
Standardafvigelse kationer								2576,79
%-standardafvigelse kationer								0,26
Tube	Sample Labels	Prøvevægt	mg/l Mg	mg/kg Mg	mg/l Mn	mg/kg Mn	mg/l Na	mg/kg Na
		[g]						
1 : 57	RSA opl 1	1,0023	190,6430	19020,55	90,0908	8988,41	288,3110	28764,94
1 : 58	RSA opl 2	1,0002	193,3030	19326,43	91,5690	9155,07	290,2980	29024,00
1 : 59	RSA opl 3	1,0129	203,1850	20059,73	95,0868	9387,58	292,3530	28862,97
2 : 2	RSA anioner 1_2	10,0354	1,4507	3,61	0,0881	0,22	10256,8	25551,55
2 : 3	RSA anioner 2_2	10,0071	0,0074	0,02	0,0075	0,02	11140,1	27830,49
2 : 4	RSA anioner 3_2	10,0107	0,0468	0,12	0,0086	0,02	10727,3	26789,59
Gennemsnit af opl.				19468,906		9177,019		28883,968
Gennemsnit af kationer								26723,87434
% tungmetaller af prøven				1,9469		0,9177		2,8884
Standardafvigelse opl.				377,6		141,77		92,49

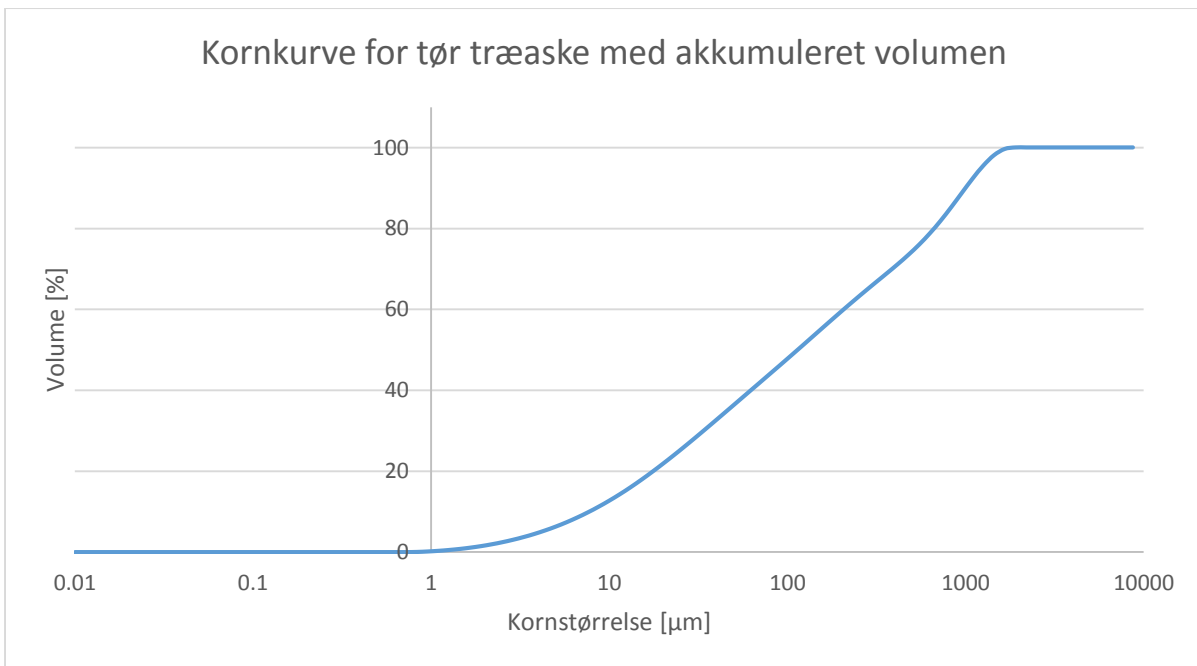
%-standardafvigelse opl.		0,038		0,014		0,0092		
Standardafvigelse kationer						806,7		
%-standardafvigelse kationer						0,081		
Tube	Sample Labels	Prøvevægt	mg/l Ni	mg/kg Ni	mg/l P	mg/kg P	mg/l Pb	mg/kg Pb
		[g]						
1 : 57	RSA opl 1	1,0023	0,3383	33,75	83,6243	8343,24	0,6671	66,56
1 : 58	RSA opl 2	1,0002	0,3437	34,36	87,3759	8735,84	0,6679	66,78
1 : 59	RSA opl 3	1,0129	0,3562	35,17	87,2567	8614,54	0,6658	65,74
2 : 2	RSA anioner 1_2	10,0354	0,0119	0,03	14,4645	36,03	0,1529	0,38
2 : 3	RSA anioner 2_2	10,0071	0,0109	0,03	1,1949	2,99	0,1534	0,38
2 : 4	RSA anioner 3_2	10,0107	0,0108	0,03	0,9847	2,46	0,0000	0,00
Gennemsnit af opl.		34,426		8564,542		66,357		
Gennemsnit af kationer								
% tungmetaller af prøven		0,00344		0,8565		0,00664		
Standardafvigelse opl.		0,5		142,14		0,39		
%-standardafvigelse opl.		0,0001		0,014		0,00004		
Tube	Sample Labels	Prøvevægt	mg/l Se	mg/kg Se	mg/l Zn	mg/kg Zn		
		[g]						
1 : 57	RSA opl 1	1,0023	0,0711	7,09	4,1206	411,12		
1 : 58	RSA opl 2	1,0002	0,0618	6,18	4,1945	419,37		
1 : 59	RSA opl 3	1,0129	0,0668	6,59	4,2053	415,17		
2 : 2	RSA anioner 1_2	10,0354	0,2407	0,60	0,4984	1,24		
2 : 3	RSA anioner 2_2	10,0071	0,2881	0,72	0,2424	0,61		
2 : 4	RSA anioner 3_2	10,0107	0,2779	0,69	0,2332	0,58		
Gennemsnit af opl.		6,622		415,220				
Gennemsnit af kationer								
% tungmetaller af prøven		0,000662		0,0415				
Standardafvigelse opl.		0,32		2,92				
%-standardafvigelse opl.		0,00003		0,0003				

### B.3 – Kornstørrelse

Size [ $\mu\text{m}$ ]	Volume [%]	Akkumulert Volume [%]	Size [ $\mu\text{m}$ ]	Volume [%]	Akkumulert Volume [%]
0,01			11,482	1,50	12,72
0,011	0	0	13,183	1,61	14,33
0,013	0	0	15,136	1,72	16,05
0,015	0	0	17,378	1,83	17,88
0,017	0	0	19,953	1,92	19,8
0,02	0	0	22,909	2,00	21,8
0,023	0	0	26,303	2,07	23,87
0,026	0	0	30,200	2,13	26
0,03	0	0	34,674	2,18	28,18
0,035	0	0	39,811	2,22	30,4
0,04	0	0	45,709	2,24	32,64
0,046	0	0	52,481	2,26	34,9
0,052	0	0	60,256	2,27	37,17
0,06	0	0	69,183	2,27	39,44
0,069	0	0	79,433	2,27	41,71
0,079	0	0	91,201	2,27	43,98
0,091	0	0	104,713	2,28	46,26
0,105	0	0	120,226	2,3	48,56
0,12	0	0	138,038	2,31	50,87
0,138	0	0	158,489	2,33	53,2
0,158	0	0	181,970	2,33	55,53
0,182	0	0	208,930	2,32	57,85
0,209	0	0	239,883	2,30	60,15
0,24	0	0	275,423	2,26	62,41
0,275	0	0	316,228	2,22	64,63
0,316	0	0	363,078	2,18	66,81
0,363	0	0	416,869	2,17	68,98
0,417	0	0	478,630	2,21	71,19
0,479	0	0	549,541	2,32	73,51
0,55	0	0	630,957	2,51	76,02
0,631	0	0	724,436	2,78	78,8
0,724	0	0	831,764	3,09	81,89
0,832	0	0	954,993	3,38	85,27
0,955	0,04	0,04	1.096,478	3,55	88,82
1,096	0,11	0,15	1.258,925	3,52	92,34
1,259	0,16	0,31	1.445,440	3,20	95,54
1,445	0,21	0,52	1.659,587	2,57	98,11
1,660	0,26	0,78	1.905,461	1,54	99,65
1,905	0,32	1,1	2.187,762	0,38	100
2,188	0,38	1,48	2.511,886	0	100
2,512	0,45	1,93	2.884,032	0	100
2,884	0,52	2,45	3.311,311	0	100



3,311	0,60	3,05	3.801,894	0	100
3,802	0,68	3,73	4.365,158	0	100
4,365	0,77	4,5	5.011,872	0	100
5,012	0,86	5,36	5.754,399	0	100
5,754	0,96	6,32	6.606,934	0	100
6,607	1,06	7,38	7.585,776	0	100
7,586	1,17	8,55	8.709,636	0	100
8,710	1,28	9,83	10.000,000	0	100
10,000	1,39	11,22			

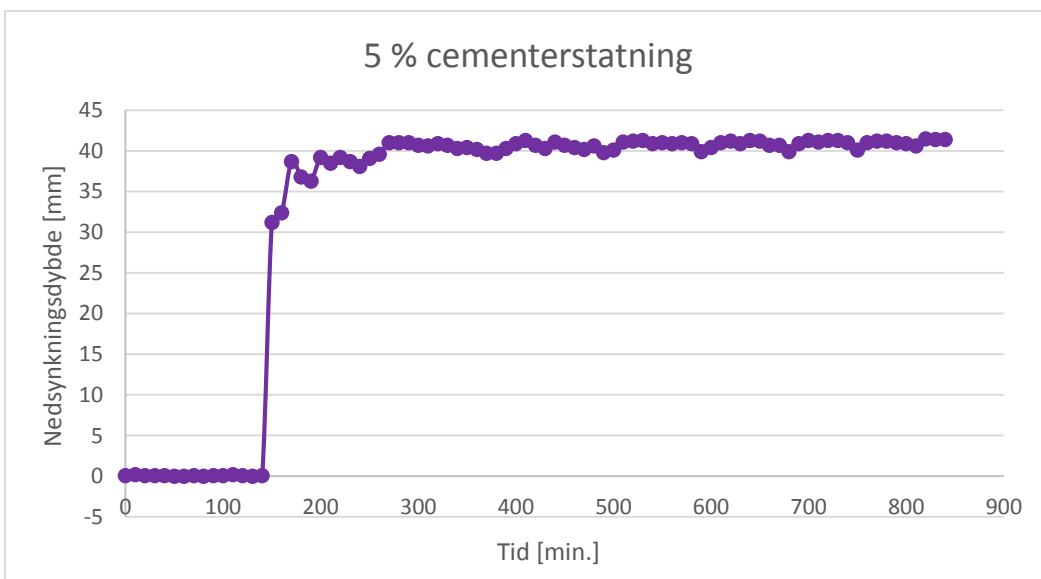
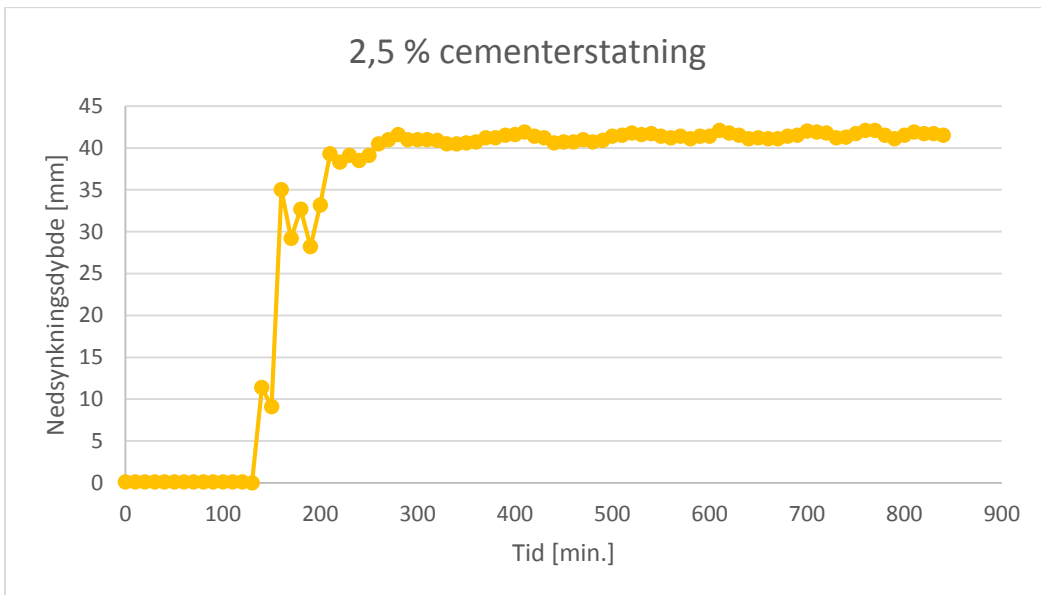
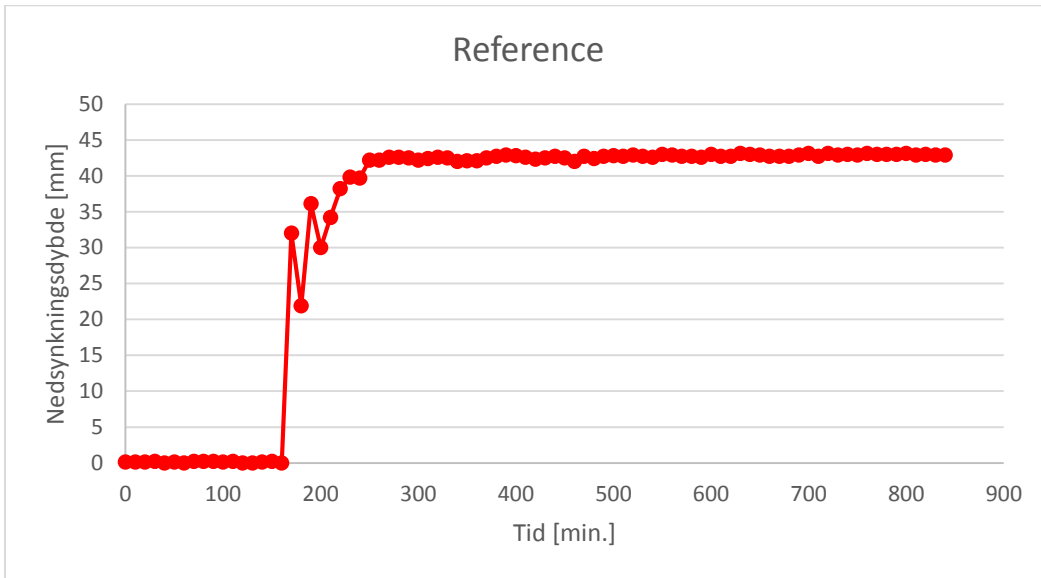


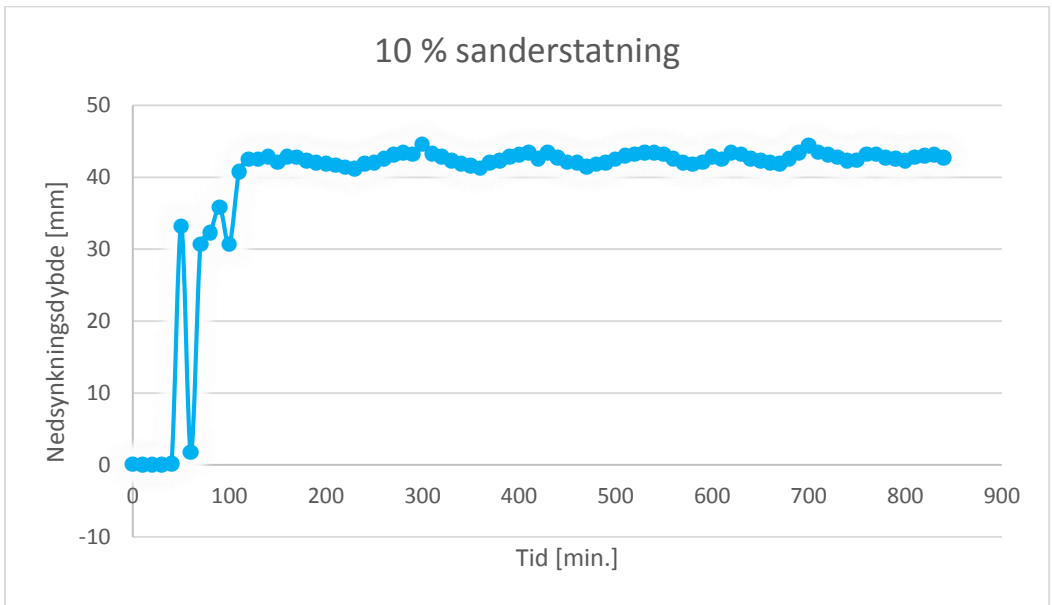
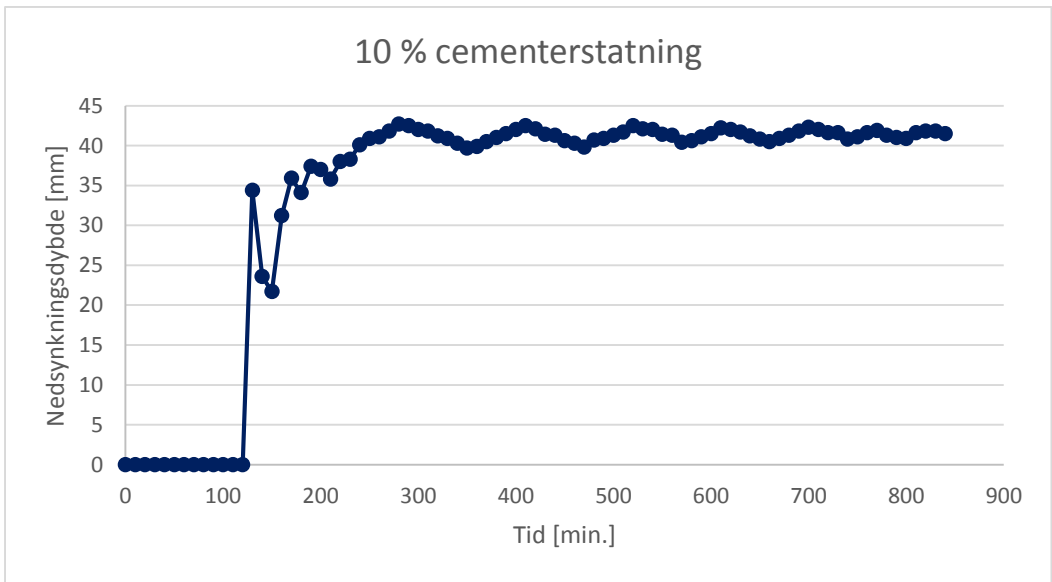
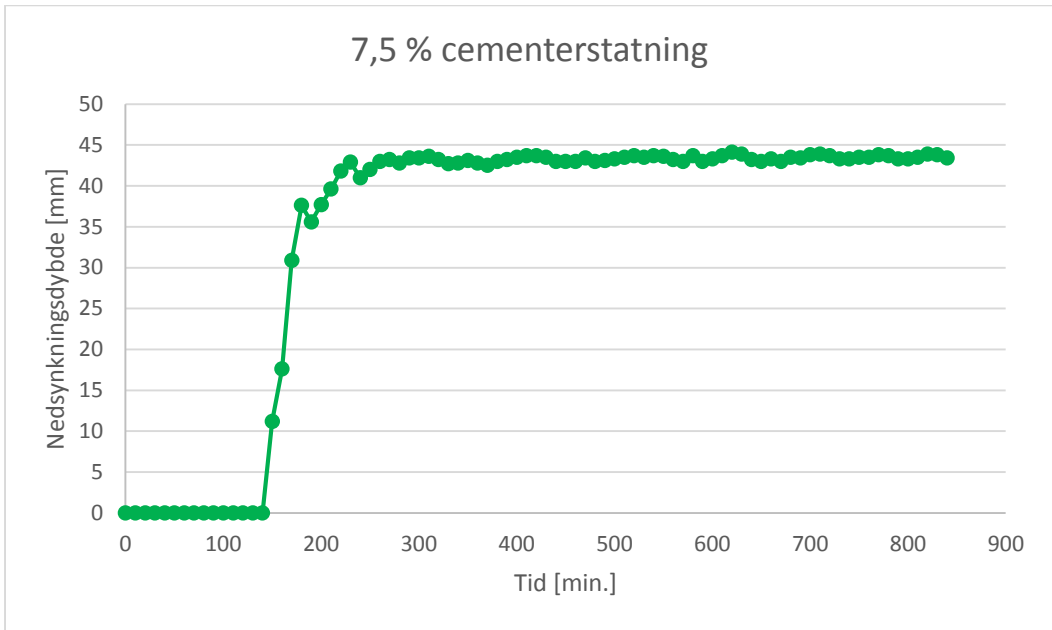
## C – Mørtelprøver data

### C.1 – Vicatronic resultater

Reference		2,5% cementerstatning		5% cementerstatning		7,5% cementerstatning		10% cementerstatning		10% sanderstatning	
PEN. [mm]	l [m.s]	PEN. [mm]	l [m.s]	PEN. [mm]	l [m.s]	PEN. [mm]	l [m.s]	PEN. [mm]	l [m.s]	PEN. [mm]	l [m.s]
0,1	0	0,1	0	0,1	0	0	0	0	0	0,1	0
0,1	10	0,1	10	0,2	10	0	10	0	10	0	10
0,1	20	0,1	20	0,1	20	0	20	0	20	0	20
0,2	30	0,1	30	0,1	30	0	30	0	30	0	30
0	40	0,1	40	0,1	40	0	40	0	40	0,2	40
0,1	50	0,1	50	0	50	0	50	0	50	33,2	50
0	60	0,1	60	0	60	0	60	0	60	1,8	60
0,2	70	0,1	70	0,1	70	0	70	0	70	30,7	70
0,2	80	0,1	80	0	80	0	80	0	80	32,3	80
0,2	90	0,1	90	0,1	90	0	90	0	90	35,8	90
0,1	100	0,1	100	0,1	100	0	100	0	100	30,7	100
0,2	110	0,1	110	0,2	110	0	110	0	110	40,8	110
0	120	0,1	120	0,1	120	0	120	0	120	42,5	120
0	130	0	130	0	130	0	130	34,4	130	42,5	130
0,1	140	11,4	140	0,1	140	0	140	23,6	140	42,9	140
0,2	150	9,1	150	31,2	150	11,2	150	21,7	150	42,1	150
0	160	35	160	32,4	160	17,6	160	31,2	160	42,9	160
32	170	29,2	170	38,7	170	30,9	170	35,9	170	42,8	170
21,9	180	32,7	180	36,8	180	37,6	180	34,1	180	42,3	180
36,1	190	28,2	190	36,3	190	35,6	190	37,4	190	42	190
30	200	33,2	200	39,2	200	37,7	200	37	200	41,9	200
34,2	210	39,3	210	38,5	210	39,6	210	35,8	210	41,7	210
38,2	220	38,3	220	39,2	220	41,8	220	38	220	41,4	220
39,8	230	39,1	230	38,7	230	42,9	230	38,3	230	41,2	230
39,7	240	38,5	240	38,1	240	41	240	40,1	240	41,9	240
42,2	250	39,1	250	39,1	250	42	250	40,9	250	42	250
42,2	260	40,5	260	39,6	260	43	260	41,1	260	42,6	260
42,6	270	41	270	41	270	43,2	270	41,8	270	43,1	270
42,6	280	41,6	280	41	280	42,8	280	42,7	280	43,4	280
42,5	290	41	290	41	290	43,4	290	42,5	290	43,2	290
42,2	300	41	300	40,7	300	43,4	300	42	300	44,6	300
42,4	310	41	310	40,6	310	43,6	310	41,8	310	43,3	310
42,6	320	40,9	320	40,9	320	43,2	320	41,2	320	42,9	320
42,5	330	40,5	330	40,7	330	42,7	330	40,9	330	42,3	330
42	340	40,5	340	40,3	340	42,8	340	40,3	340	41,9	340
42,1	350	40,6	350	40,4	350	43,1	350	39,7	350	41,6	350
42,1	360	40,7	360	40,2	360	42,8	360	39,9	360	41,3	360
42,5	370	41,2	370	39,7	370	42,5	370	40,5	370	42	370
42,7	380	41,2	380	39,7	380	43	380	41	380	42,3	380

42,9	390	41,5	390	40,3	390	43,2	390	41,5	390	42,9	390
42,8	400	41,6	400	40,9	400	43,5	400	42	400	43,1	400
42,6	410	41,9	410	41,3	410	43,7	410	42,5	410	43,4	410
42,3	420	41,4	420	40,7	420	43,7	420	42,1	420	42,6	420
42,5	430	41,2	430	40,3	430	43,5	430	41,4	430	43,4	430
42,7	440	40,6	440	41,1	440	43	440	41,3	440	42,7	440
42,5	450	40,7	450	40,7	450	43	450	40,6	450	42,1	450
42	460	40,7	460	40,4	460	43	460	40,3	460	42	460
42,7	470	41	470	40,2	470	43,4	470	39,8	470	41,5	470
42,4	480	40,7	480	40,6	480	43	480	40,7	480	41,8	480
42,7	490	40,9	490	39,8	490	43,1	490	40,9	490	42	490
42,8	500	41,4	500	40,1	500	43,3	500	41,3	500	42,5	500
42,7	510	41,5	510	41,1	510	43,5	510	41,7	510	43	510
42,9	520	41,8	520	41,2	520	43,7	520	42,5	520	43,2	520
42,7	530	41,6	530	41,3	530	43,5	530	42,1	530	43,4	530
42,6	540	41,7	540	40,9	540	43,7	540	42	540	43,4	540
43	550	41,4	550	41	550	43,6	550	41,4	550	43,2	550
42,9	560	41,2	560	40,9	560	43,2	560	41,3	560	42,6	560
42,7	570	41,4	570	41	570	43	570	40,4	570	42	570
42,7	580	41,1	580	40,9	580	43,7	580	40,6	580	41,8	580
42,6	590	41,4	590	39,9	590	43	590	41,1	590	42,1	590
43	600	41,4	600	40,4	600	43,3	600	41,5	600	42,9	600
42,7	610	42,1	610	41	610	43,7	610	42,2	610	42,5	610
42,7	620	41,8	620	41,2	620	44,1	620	42	620	43,4	620
43,1	630	41,5	630	40,9	630	43,9	630	41,7	630	43,2	630
43	640	41,1	640	41,3	640	43,2	640	41,2	640	42,6	640
42,9	650	41,2	650	41,2	650	43	650	40,8	650	42,3	650
42,7	660	41,1	660	40,7	660	43,3	660	40,5	660	42	660
42,7	670	41,1	670	40,7	670	43	670	40,9	670	41,9	670
42,7	680	41,4	680	39,9	680	43,5	680	41,3	680	42,6	680
42,9	690	41,5	690	40,9	690	43,4	690	41,8	690	43,4	690
43,1	700	42	700	41,3	700	43,8	700	42,3	700	44,4	700
42,7	710	41,9	710	41,1	710	43,9	710	42	710	43,5	710
43,1	720	41,8	720	41,3	720	43,7	720	41,6	720	43,1	720
42,9	730	41,2	730	41,3	730	43,3	730	41,6	730	42,8	730
43	740	41,3	740	41	740	43,3	740	40,8	740	42,3	740
42,9	750	41,7	750	40,1	750	43,5	750	41,1	750	42,4	750
43,1	760	42,1	760	41	760	43,5	760	41,6	760	43,2	760
43	770	42,1	770	41,2	770	43,8	770	41,9	770	43,2	770
43	780	41,5	780	41,2	780	43,7	780	41,3	780	42,7	780
43	790	41,1	790	41	790	43,3	790	41	790	42,6	790
43,1	800	41,5	800	40,9	800	43,3	800	40,9	800	42,3	800
42,9	810	41,9	810	40,6	810	43,5	810	41,6	810	42,8	810
43	820	41,7	820	41,5	820	43,9	820	41,8	820	43	820
42,9	830	41,7	830	41,4	830	43,8	830	41,8	830	43,1	830
42,9	840	41,5	840	41,4	840	43,4	840	41,5	840	42,7	840





Sætnål [mm]																				Flydesætnål
S10%	120	120	123	121	123	122	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	121	120,83
C2,5%	160	160	160	165	160	175	165	160	165	165	165	165	165	165	170	170	170	170	170	164,58
C5%	155	159	160	165	160	160	156	156	160	160	160	160	160	160	162	165	165	165	165	159,83
C7,5%	155	155	155	155	150	160	140	140	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	155	153,75
C10%	145	145	150	145	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	140	153,75
Reference	159	162	160	160	169	169	168	166	163	164	164	165	165	165	165	165	165	165	170	164,58

## C.2 – Flydesætnål

### C.3 – Støbeskema

Prøvenr.	Støbe Dato	Cement	Aske	Vand	SAND	Teoretisk trykstyrke	Trykstyrke	Aktivitetsfaktor	Kommentarer
		[g]	[g]	[g]	[g]	[Mpa]	[Mpa]		
S10%7	01-03-2016	450,1	135	225,01	1215,01	42,21	28,54	-0,4491	Trykkes ind i form - meget tør
S10%14	01-03-2016	450	135	225	1215,02	44,36	35,54	-0,0824	Trykkes ind i form
S10%28	01-03-2016	450	135,01	225	1215,01	48,69	38,71	-0,1006	Trykkes ind i form
C5%7	02-03-2016	427,52	22,5	225	1350,03	37,01	34,94	-0,3061	
C5%14	02-03-2016	427,5	22,5	225	1350,02	38,90	43,23	2,1071	
C5%28	02-03-2016	427,51	22,51	225,01	1350	42,70	44,39	1,0719	
Ref.7	01-03-2016	450,01	0	225,01	1350	39	44	1125,31	
Ref.14	02-03-2016	450,01	0	225	1350,01	41,00	46,44	1224,85	
Ref.28	01-03-2016	450	0	225	1350	45	50,31	1194,75	
Ref.28 - 2	02-03-2016	450,01	0	225	1350,01	45	50,55	1248,45	
Ref. 42	14-04-2016	450,04	0	225,01	1350,16	45	50,75	1293,21	
C2,5%7	20-04-2016	438,75	11,25	225,01	1350,14	37,99	38,13	0,6059	
C2,5%14	20-04-2016	438,75	11,26	225	1350,05	39,94	40,1	0,6182	
C2,5%28	14-04-2016	438,76	11,26	225,02	1350,05	43,84	50,31	4,8415	
C2,5%42	14-04-2016	438,76	11,25	225	1350,14	43,84	48,16	3,3984	
C7,5%7	20-04-2016	416,26	33,76	225	1350,01	36,03	33,75	-0,0964	
C7,5%14	20-04-2016	416,25	33,75	225,02	1350,09	37,87	36,77	0,2270	
C7,5%28	14-04-2016	416,26	33,76	225,03	1350,13	41,56	42,52	0,7167	
C10%7	20-04-2016	405,03	45,02	225	1350,12	35,07	32,08	-0,0903	Mere flydende end C10%28
C10%14	20-04-2016	405,01	45,01	225,04	1350,08	36,85	35,54	0,2536	Mere flydende end C10%28
C10%28	14-04-2016	405,01	45	225,02	1350,02	40,45	39,96	0,4152	Trykket ned i form - for tør
C5%28Kapillar	03-03-2016	427,5	22,5	225	1350,01				
C5%28Porøsitet	03-03-2016	427,5	22,51	225,01	1350,01				
Ref.Por.+Kap.	03-03-2016	450,01	0	225,02	1350				

Porøsitet & densitet

Prøvenr.	Vægt [kg]	Længde [m]	Højde [m]	Bredde [m]	Vægt under vand		Vægt over vand		V [m <sup>3</sup> ]	Vp [m <sup>3</sup> ]	P [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	p_d [kg/m <sup>3</sup> ]	p_f [kg/m <sup>3</sup> ]	p_ssd [kg/m <sup>3</sup> ]	u_ssd [kg/kg]
					[kg]	[kg]	[kg]	[kg]							
C5%P28 - A	0,5286					0,3214	0,5760	0,000255	4,737E-05	0,1861	2076,364	2551,062	2262,443	0,08962	
C5%P28 - B	0,5257					0,3195	0,5737	0,000254	4,795E-05	0,1887	2068,340	2549,268	2256,993	0,09121	
C5%P28 - C	0,5295					0,3220	0,5771	0,000255	0,00004765	0,1868	2075,337	2551,983	2262,112	0,09000	
C5%K28 - Average	0,5347														
R28KP - A	0,5393														
R28KP - B	0,5347	0,16	0,04	0,04	0,04										
R28KP - C	0,5342					0,3243	0,5788	0,000255	0,00004464	0,1754	2098,861	2545,316	2274,263	0,08357	

Kapillarsugning

Prøvenr.	Sekunder														
	60	120	240	480	960	1920	3600	7200	14400	21600	90960				
C5%K28 - A	0,5374	0,5376	0,5378	0,5381	0,5385	0,5392	0,5400	0,5410	0,5423	0,5430	0,5452				
C5%K28 - B	0,5348	0,5351	0,5353	0,5355	0,5359	0,5364	0,5372	0,5381	0,5394	0,5401	0,5422				
C5%K28 - C	0,5339	0,5341	0,5343	0,5345	0,5350	0,5356	0,5364	0,5373	0,5386	0,5393	0,5414				
R28KP - B	0,5354	0,5356	0,5358	0,5360	0,5365	0,5371	0,5379	0,5391	0,5406	0,5416	0,5444				
C5%K28 - Average	0,5354	0,5356	0,5358	0,5360	0,5364	0,5371	0,5378	0,5388	0,5401	0,5408	0,5430				
Q - R28KP	0,4563	0,5938	0,7062	0,85	1,125	1,5437	2,0438	2,7687	3,7125	4,3250	6,1062				
Q - C5%K28	0,3917	0,55	0,6604	0,8063	1,0625	1,4604	1,9333	2,5458	3,3375	3,8167	5,1375				
t <sup>1/2</sup>	7,7460	10,9545	15,4919	21,9089	30,9839	43,8178	60	84,8528	120	146,9694	301,5958				



# TRYKTEST

## Geometri Forsøgsresultater

Prøvenr.	Hærdetid [døgn]	Prøvedag [dato]	Bredde [mm]	Snit [mm]	Højde [mm]	Snit [mm]	Længde [mm]	Snit [mm]	Vægt [g]	Vægt under vand [g]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Tryk 1 [kN]	Tryk 2 [kN]	Trykstyrkesnit [Mpa]	Trykstyrkesnit		
															Plus 10%	Minus 10%	
S10%7 - A	7	08.03.16	40	40	39	40	160	160	568,44	310	2220,47	44	27,5	39	24,375		
			40	40	40	40	160	160	567,22	309	2215,70	43	26,875	52	32,5		
			40	40	40	40	160	160	568,75	310	2221,68	48	30	48	30		
S10%7 - B	7	08.03.16	40	40	40	40	160	160	568,75	310	2221,68	48	30	48	30		
			40	40	40	40	160	160	568,75	310	2221,68	48	30	48	30		
			40	40	40	40	160	160	568,75	310	2221,68	48	30	48	30		
S10%7 - C	7	08.03.16	40	40	40	40	160	160	568,75	310	2221,68	48	30	48	30		
			40	40	40	40	160	160	568,75	310	2221,68	48	30	48	30		
			40	40	40	40	160	160	568,75	310	2221,68	48	30	48	30		
Standard afvigelse [MPa]															28,54	31,40	25,69
															2,42		

S10%14 - A	14	15.03.16	41	40	160	160	576,47	318	2233,23	59	36,57	59	36,57		
			40	40	160	160	585,86	324	2269,60	57	35,33	56	34,71		
S10%14 - B	14	15.03.16	40	40,33	40	160	160	584,88	323	2247,23	54	33,20	60	36,89	
			42	40	160	160	589,94	325	2248,25	63	38,41	66	40,24		
S10%14 - C	14	15.03.16	40	40,67	40	160	160	592,12	326	2220,45	65	39	68	40,8	
			40	40	160	160	583,37	320	2223,21	57	34,76	64	39,02		
S10%28 - A	28	29.03.16	41	41	40	160	160	589,94	325	2248,25	63	38,41	66	40,24	
			41	41	40	160	588,18	323	2238,92	49	30,12	58	35,66		
S10%28 - B	28	29.03.16	41	41	40	160	160	588,18	323	2238,92	49	30,12	58	35,66	
			41	41	40	160	584,41	321	2242,96	62	38,43	62	38,43		
S10%28 - C	28	29.03.16	42	41,67	40	160	160	584,41	321	2242,96	62	38,43	62	38,43	
			42	40	160	160	581,64	319	2214,03	53	32,58	56	34,43		
C5%7 - A	7	09.03.16	40	40,33	40	161	161	581,64	319	2214,03	53	32,58	56	34,43	
			41	40	161	161	588,18	323	2238,92	49	30,12	58	35,66		
C5%7 - B	7	09.03.16	41	40,67	40	162	162	588,18	323	2238,92	49	30,12	58	35,66	
			40	40	162	162	584,41	321	2242,96	62	38,43	62	38,43		
C5%7 - C	7	09.03.16	41	40,67	40	161	161,5	588,18	323	2238,92	49	30,12	58	35,66	
			40	40	161	161,5	584,41	321	2242,96	62	38,43	62	38,43		
Standard afvigelse [MPa]													34,94	38,44	31,45
Standard afvigelse [MPa]													2,78		

C5%14 - A	14	16.03.16	41	40	160	160	573,78	316	2186,66	68	41,46	69	42,07	44,39	48,83	39,95
		16.03.16	41	40	160	160	579,09	320	2243,38	72	44,63	74	45,87			
		08.03.16	40	40	160	160	579,09	320	2243,38	72	44,63	74	45,87			
C5%14 - B	14	16.03.16	39	40	159	159,5	569,72	314	2251,21	70	44,12	70	44,12	44,39	48,83	39,95
		16.03.16	40	40	160	160	579,31	321	2262,93	69	43,13	65	40,63			
		08.03.16	40	40	160	160	579,31	321	2262,93	69	43,13	65	40,63			
C5%14 - C	14	16.03.16	40	40	159	159,5	572,2	316	2261,00	69	43,49	70	44,12	43,23	47,55	38,91
		16.03.16	39	40	160	160	578,9	321	2224,26	75	46,11	71	43,65			
		08.03.16	40	40	160	160	578,9	321	2224,26	75	46,11	71	43,65			
C5%28 - A	28	30.03.16	41	40	160	160	575	318	2209,27	65	39,96	75	46,11	44,39	48,83	39,95
		30.03.16	41	40	160	160	576,45	319	2196,84	73	44,51	72	43,90			
		30.03.16	41	40	160	160	576,45	319	2196,84	73	44,51	72	43,90			
C5%28 - B	28	30.03.16	41	40	160	160	574,47	318	2244,02	75	46,88	72	45	44,39	48,83	39,95
		30.03.16	40	40	160	160	574,47	318	2244,02	75	46,88	72	45			
		30.03.16	40	40	160	160	574,47	318	2244,02	75	46,88	72	45			
C5%28 - C	28	30.03.16	40	40	160	160	574,47	318	2244,02	75	46,88	72	45	44,39	48,83	39,95
		30.03.16	40	40	160	160	574,47	318	2244,02	75	46,88	72	45			
		30.03.16	40	40	160	160	574,47	318	2244,02	75	46,88	72	45			
Standard afvigelse [MPa] 2,05																
Ref.7 - A	7	08.03.16	41	40	160	160	579,09	320	2243,38	72	44,63	74	45,87	44,39	48,83	39,95
		08.03.16	40	40	160	160	579,09	320	2243,38	72	44,63	74	45,87			
		08.03.16	40	40	160	160	579,09	320	2243,38	72	44,63	74	45,87			
Ref.7 - B	7	08.03.16	40	40	160	160	579,31	321	2262,93	69	43,13	65	40,63	44,39	48,83	39,95
		08.03.16	40	40	160	160	579,31	321	2262,93	69	43,13	65	40,63			
		08.03.16	40	40	160	160	579,31	321	2262,93	69	43,13	65	40,63			
Ref.7 - C	7	08.03.16	41	40	160	160	578,9	321	2224,26	75	46,11	71	43,65	44,00	48,40	39,60
		08.03.16	41	40	160	160	578,9	321	2224,26	75	46,11	71	43,65			
		08.03.16	41	40	160	160	578,9	321	2224,26	75	46,11	71	43,65			
Standard afvigelse [MPa] 1,71																







C10%7 - A	7	27.04.16	40	40	40	160	160	569,1	312	2223,05	54	33,75	51	31,88	32,08	35,29	28,88
		40	40	40	160	160	568,9	312	2222,27	51	31,88	54	33,75				
		40	40	40	160	160	566,9	310	2214,45	51	31,88	47	29,38				
C10%7 - C	7	27.04.16	40	40	40	160	160	566,9	310	2214,45	51	31,88	47	29,38	32,08	35,29	28,88
		40	40	40	160	160	566,9	310	2214,45	51	31,88	47	29,38				
		40	40	40	160	160	566,9	310	2214,45	51	31,88	47	29,38				
Standard afvigelse [MPa] 1,36																	
C10%14 - A	14	04.05.16	40	40	40	160	160	567,53	311	2235,54	55	34,66	55	34,66	35,62	39,18	32,06
		40	40	40	160	160	569,44	312	2224,38	56	35	59	36,88				
		40	40	40	160	160	569,05	313	2222,85	58	36,25	58	36,25				
C10%14 - B	14	04.05.16	40	40	40	160	160	569,44	312	2224,38	56	35	59	36,88	35,62	39,18	32,06
		40	40	40	160	160	569,44	312	2224,38	56	35	59	36,88				
		40	40	40	160	160	569,05	313	2222,85	58	36,25	58	36,25				
C10%14 - C	14	04.05.16	40	40	40	160	160	569,05	313	2222,85	58	36,25	58	36,25	35,62	39,18	32,06
		40	40	40	160	160	569,05	313	2222,85	58	36,25	58	36,25				
		40	40	40	160	160	569,05	313	2222,85	58	36,25	58	36,25				
Standard afvigelse [MPa] 0,81																	
C10%28 - A	28	12.05.16	40	40,33	40	160	160	575,03	316	2227,65	67	41,53	65	40,29	39,96	43,96	35,97
		40	40	40	160	160	575,76	316	2194,21	65	39,63	64	39,02				
		40	40	40	160	160	575,76	316	2194,21	65	39,63	64	39,02				
C10%28 - B	28	12.05.16	40	40,33	40	160	160	575,03	316	2227,65	67	41,53	65	40,29	39,96	43,96	35,97
		40	40	40	160	160	575,76	316	2194,21	65	39,63	64	39,02				
		40	40	40	160	160	575,76	316	2194,21	65	39,63	64	39,02				
C10%28 - C	28	12.05.16	40	40,67	40	160	160	570,65	313	2192,56	65	39,96	64	39,34	39,96	43,96	35,97
		40	40	40	160	160	570,65	313	2192,56	65	39,96	64	39,34				
		40	40	40	160	160	570,65	313	2192,56	65	39,96	64	39,34				
Standard afvigelse [MPa] 0,75																	

C2,5%42 - A	42	40	40	40	160	160	575,84	319	2212,50	77	47,34	83	51,02	48,16	52,97	43,34
	41	40,67	40	40	160	160	575,84	319	2212,50	77	47,34	83	51,02			
C2,5%42 - B	42	40	40	40	160	160	573,89	317	2205,01	79	48,57	82	50,41	48,16	52,97	43,34
	41	40,67	40	40	160	160	573,89	317	2205,01	79	48,57	82	50,41			
C2,5%42 - C	42	40	40	40	160	160	575,43	319	2210,92	79	48,57	70	<b>43,03</b>	48,16	52,97	43,34
	41	40,67	40	40	160	160	575,43	319	2210,92	79	48,57	70	<b>43,03</b>			
														Standard afvigelse [MPa]		
														2,41		
Ref. 42 - A	42	40	40	40	160	160	578,56	321	2241,32	85	52,69	67	<b>41,53</b>	50,75	55,82	45,67
	41	40,33	40	40	160	160	578,56	321	2241,32	85	52,69	67	<b>41,53</b>			
Ref. 42 - B	42	40	40	40	160	160	578,8	321	2205,79	83	50,61	88	53,66	50,75	55,82	45,67
	41	40,33	40	40	160	160	578,8	321	2205,79	83	50,61	88	53,66			
Ref. 42 - C	42	40	40	40	160	160	578,73	321	2241,98	85	52,69	86	53,31	50,75	55,82	45,67
	41	40,33	40	40	160	160	578,73	321	2241,98	85	52,69	86	53,31			
														Standard afvigelse [MPa]		
														3,92		