

Aske som erstatning for cement i beton

Institut for byggeri og anlæg

Sammenligning af egenskaber for træaske og
flyveaske i en mørtelblanding

B.Eng 2016

Skrevet af:
Henrik Haslund Thustrup
S110289
DTU byg
Juni 2016

1 Forord

Nærværende projekt er udarbejdet som et afgangprojekt på diplomingeniøruddannelsen DTU byg. Projektet omfatter 20 ECTS point og er udarbejdet i perioden 1. februar 2016 til 6. juni 2016 på institut for byggeri og anlæg med professor Lisbeth M. Ottosen som vejleder.

Rapporten er udført med henblik på at forsøge at bestemme hvilke egenskaber en mørtel får ved sammenblanding med en træaske fra Amagerværket. Rapporten er tiltænkt studerende og undervisere på DTU byg og der forventes en grundlæggende viden fra læseren om emnet.

Der skal rettes en særlig stor tak til professor Lisbeth M. Ottosen for vejledning gennem hele forløbet. Derudover rettes der en tak til laboranter Ebba Cederbergh Schnell og Malene Grønvold, samt betontekniker Per Leth. Projektet er udarbejdet af Henrik Haslund Thustrup.

Henrik Haslund Thustrup
Kgs. Lyngby, sommer 2016

2 Sammenfatning

Denne rapport omhandler brugen af aske som erstatning for cement i beton, med særligt fokus på trykstyrken og bestemmelse af en aktivitetsfaktor.

I dag benyttes flyveaske fra kulfyrede kraftværker som erstatning for cement i beton. Men med øget fokus på CO₂ udledning er kulfyrede kraftværker på vej mod at blive udfaset. Derfor er det interessant at forsøge at finde andre asketyper, der også besidder puzzolanske egenskaber.

Den alternative aske, der undersøges i denne rapport, er en træaske fra Amagerværket blok 1 og denne askes egenskaber forsøges sammenlignet med en flyveaskes egenskaber. Der er således udført tre forskellige typer forsøg på mørtelblandinger, hvor cementindholdet er erstattet med 5% og 10% flyveaske som referenceprøve og ligeledes er der blandet mørtelrecepter med 5% og 10% træaske som erstatning for cementen.

Disse to grupper af mørtelblandinger er sammenlignet på trykstyrke, afbindingstid og sætmål, hvor trykstyrken blev undersøgt efter 7, 14 og 28 hærdedøgn. Trykstyrken er også undersøgt med 7,5% askeerstatning. Her blev det fundet, at trykstyrken var den samme for mørtelrecepter med de to asketyper. Afbindingstiden viste sig at være dobbelt så lang for recepter med træaske og samtidig gik der længere tid inden afbindingen påbegyndtes. Ligeledes var der en forskel i sætmålet for de to recepttyper. Her var sætmålet for recepter med træaske lavere end recepter med flyveaske. Dette medførte en dårligere bearbejdelighed for mørtler med træaske.

Forsøg med porøsitet/densitet og kappilarsugning er udelukkende udført på mørtelrecepter med træaske og er således ikke sammenlignet med flyveaske.

En aktivitetsfaktor blev forsøgt bestemt på baggrund af trykstyrkemålinger, ved hjælp af en omskrivning af Bolomeys formel. Her blev den alment accepterede aktivitetsfaktor for flyveaske på 0,5 forsøgt eftervist. Dette lykkedes ikke, og ligeledes lykkedes det heller ikke at bestemme en aktivitetsfaktor for træasken. Det blev observeret, at alle trykstyrkemålinger for prizmer med flyveaske, bortset fra tre, lå højere end den beregnede trykstyrkemåling.

Den beregnede trykstyrkemåling blev beregnet efter Bolomeys formel med en aktivitetsfaktor på 0,5. Det blev derfor forsøgt at undersøge om den beregnede trykstyrke kunne være 5% fraktilen, men da der var for få målinger kunne en tilpas normalfordeling ikke opstilles. Det var derfor heller ikke muligt på baggrund af statistik at bestemme en aktivitetsfaktor ved at vurdere sandsynligheden for, at en måling vil ligge over den beregnede trykstyrke.

Der er ligeledes udført en askekarakteristik af træasken, som er sammenlignet med en askekarakteristik for en flyveaske, med data stammende fra et tidligere projekt. Her blev pH værdien fundet til at være ens for de to asketyper. Glødetabet kunne for træasken godkendes til brug i beton, i henhold til DS/EN 450-1. Dog blev der i forbindelse med askekarakteristikken fundet for høje værdier af bly, zink og cadmium i træasken. Asken kan derfor ikke godkendes til brug i beton i henhold til DS/EN 450-1.

3 Abstract

This project deals with the use of ash as a replacement for cement in concrete, focusing on determining an activity factor and the pressure strength. Today fly ash from coal power plants is used as replacement for cement in concrete. But with focus on replacing coal power plants with green energy, to reduce CO₂, its getting more interesting to find an ash type that has pozzolanic abilities.

The ash used in this study is a wood ash from Amagerværket. The abilities of this wood ash are compared to a regular fly ash. Three types of tests has been performed with 5% and 10% fly ash replacing cement, as a reference, and with 5% and 10% wood ash.

These two types of mortar mixes has been compared on pressure strength, setting time and slump. The pressure strength is tested after 7, 14 and 28 days of hardening. The pressure strength is also tested with 7,5% ash. The pressure strength for the two types of mortars where found to be the same.

The setting time where twice as long for mortars with wood ash and it also took longer time before the setting began for this type of mortar. The slump were also different for the two types of mortars, and were lower for mortars with wood ash. This lower slump, were the cause of a lesser workability for this type of mortar.

Tests with porosity, density and capillary suction were only performed on mortars with wood ash as replacement for cement, and there is therefore no comparison between the two types of mortars.

By using the pressure strength an activity factor were tried calculated, this was by the use of Bolomeys formula. The known activity factor of 0,5 for fly ash were also tried proven. This were not possible and there were no success in trying to calculate an activity factor for the mortars with wood ash either.

It was observed that all, but three of the pressure measurings were higher than the calculated pressure strength, for the mortar with fly ash.

The pressure strength were calculated using an activity factor of 0,5. Therefor it was tried to determine if the calculated pressure strength were a 5% quartile, but with only six measurements there were not enough observations to make a normal distribution. So it was not possible to decide an activity factor on the grounds of statistics.

There is also performed an ash characteristic of the wood ash, and this is compared to the fly ash with data from an earlier report. The pH value were found to be the same for the two ash types. The loss of ignition on the wood ash where low enough to be approved by the standards in DS/EN 450-1
But the amount of metals in the ash were to high. This were for lead, zinc and cadmium. Therefor the ash can not be approved by the standards in DS/EN 450-1, without first washing the metals out of the ash.

Indholdsfortegnelse

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | Forord | 2 |
| 2 | Sammenfatning | 3 |
| 3 | Abstract | 5 |
| 4 | Introduktion | 9 |
| 5 | Teori | 10 |
| 5.1 | Beton | 10 |
| 5.2 | Bindemidler og mørtelblanding | 11 |
| 5.2.1 | Cement..... | 11 |
| 5.2.2 | Flyveaske | 12 |
| 5.2.3 | Mørtel..... | 13 |
| 5.2.4 | Sand og sten..... | 15 |
| 5.3 | Trykstyrke | 15 |
| 5.3.1 | Porøsitet/Densitet..... | 16 |
| 5.3.2 | V/C forhold | 17 |
| 5.3.3 | Kappilarsugning..... | 17 |
| 5.4 | Beregning af trykstyrken | 18 |
| 5.4.1 | Bolomeys formel | 19 |
| 6 | Eksperimentielt arbejde | 21 |
| 6.1 | Askekarakteristik | 21 |
| 6.1.1 | pH værdi..... | 21 |
| 6.1.2 | Ledningsevne..... | 21 |
| 6.1.3 | Glødetab | 21 |
| 6.1.4 | Vandindhold | 21 |
| 6.1.5 | Vandopløselighed..... | 22 |
| 6.1.6 | Oplukning | 22 |
| 6.1.7 | Vandopløselige anioner..... | 22 |
| 6.2 | Mørtlens fysiske egenskaber | 22 |
| 6.2.1 | Blanding og støbning af mørtel recepter | 22 |
| 6.2.2 | Afbindingstid..... | 23 |
| 6.2.3 | Sætmål | 23 |
| 6.2.4 | Porøsitet/Densitet..... | 23 |
| 6.2.5 | Kappilarsugning..... | 23 |
| 6.2.6 | Trykstyrkemåling..... | 24 |
| 7 | Resultater og diskussion | 25 |
| 7.1 | Askekarakteristik | 25 |
| 7.1.1 | pH værdi og ledningsevne..... | 25 |
| 7.1.2 | Vandopløselighed..... | 26 |
| 7.1.3 | Glødetab | 26 |
| 7.1.4 | Vandindhold | 26 |
| 7.1.5 | Oplukning | 27 |
| 7.1.6 | Vandopløselige anioner..... | 28 |
| 7.2 | Mørtelprøvernes fysiske egenskaber | 29 |
| 7.2.1 | Afbindingstid..... | 29 |
| 7.2.2 | Sætmål | 31 |
| 7.2.3 | Porøsitet/Densitet..... | 32 |
| 7.2.4 | Kapillarsugning..... | 34 |
| 7.2.5 | Trykstyrketest..... | 35 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 7.2.6 | Aktivitetsfaktor til Bolomeys formel | 38 |
| 7.2.7 | Statistisk bestemmelse af aktivitetsfaktor | 41 |
| 7.3 | Videre forskning | 44 |
| 8 | Konklusion | 46 |
| 9 | Referenceliste | 47 |
| Bilag | | 49 |
| A | Forsøgsvejledninger | 49 |
| A1 | Askekarakteristik | 49 |
| A2 | Mørtelens fysiske egenskaber | 58 |
| B | Forsøgsresultater | 62 |
| B1 | Askekarakteristik | 62 |
| B2 | Støbeskema | 64 |
| B3 | Mørtlens fysiske egenskaber | 68 |

4 Introduktion

Beton er det mest benyttede byggemateriale i verden i dag. Alene i USA produceres der en så stor mængde beton, at det centrale København kan dækkes af et 80m tykt lag. [DanskBeton.dk]

Da det vigtigste delmateriale i en betonblanding er cement, skal der produceres store mængder cement for at kunne opretholde den store betonproduktion. Produktionen af cement foregår ved en kalcineringsproces, der kræver høje temperaturer og denne produktion medfører et højt udslip af CO₂. Det vurderes, at verdens cement produktion er årsag til 5% af det samlede CO₂ udslip på verdensplan. [Johanneson 2012]

Umiddelbart er 5% af den samlede mængde CO₂ ikke meget, men det svarer til ca. 307mio. ton om året og kan den årlige cement produktion nedsættes med bare 5% vil det medføre en reduktion på hele 15.350.000 ton CO₂ årligt. [Johanneson 2012] På grund af de store mængder beton, der produceres kan denne reduktion i CO₂ opnås ved at erstatte bare en lille smule cement pr. kg. beton.

I dag erstattes cement med blandt andet flyveaske, hvilket nedsætter behovet for cement.

Der forskes i dag i at forsøge at finde andre asker, der kan erstatte cement i en betonblanding. Dette gøres blandt andet for at finde en aske, der muligvis kan erstatte mere cement end flyveaske kan og stadig bevare de samme egenskaber. Den flyveaske, der benyttes til betonproduktion i dag, stammer fra afbrænding af kul fra kraftværker. Afskaffelse af de kulfyrede kraftværker medfører en nedgang i tilgangen til flyveaske. Derfor er det vigtigt at finde en erstatning for flyveaske.

På DTU findes projekt Zero Waste, hvor der forskes i at udnytte forskellige affaldsmaterialer, som erstatning for miljøbelastende byggematerialer. Her forskes der blandt andet i at finde alternative asker til erstatning af cement i beton. Denne rapport er et led i denne søgen efter en brugbar aske. Mange asker undersøges og der ses på flere forskellige egenskaber. Lykkes det at finde en aske, der udviser gode evner til at erstatte cement i beton, kan det være med stor miljømæssig gevinst til følge.

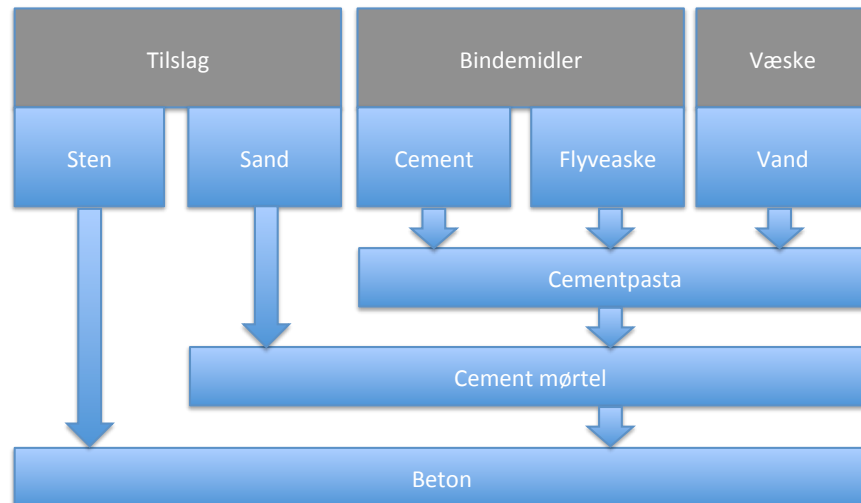
Udover at forske i asker som cementproduktion, forskes der i mange andre spændende projekter. Men alle med det formål at forsøge at udnytte affaldsmaterialer i byggeriet, til gavn for vores miljø.

5 Teori

5.1 Beton

Beton er det mest benyttede byggemateriale i verden. Broer, vægge, fundamenter og mange andre ting støbes i dag i beton. Årsagen til betons popularitet skyldes blandt andet den lave pris, høje styrke og dens gode bearbejdelighed.

Beton er et blandingprodukt mellem bindemidler, væske og tilslag som vist på Figur 1. På figuren er det muligt at se hvilke faser der opnås ved sammenblanding af de enkelte delmaterialer. Første fase er blanding af bindemidler og væske, dette giver en cementpasta som med tiden hærder op og bliver til en hård sten. Tilsættes sand opnås mørtel, hvilket blandt andet benyttes som bindemiddel mellem mursten i murstensvægge. Tilsættes sten til blandingen opnås der beton.



Figur 1 Delmaterialer og faser i betonblandinger [Geiger, 2008, s.537]

Uden sten eller sand skal der benyttes store mængder cement for at opnå et tilsvarende volumen. Derfor tilsættes sten og sand til cementpastaen for at øge volumenet betydeligt. Cementpastaen bliver således en lim der sammenbinder sten og sand, og sammen bliver disse delmaterialer ved hærkning til en hård sten. I en betonblanding har tilslaget en højere trykstyrke end mørtel, derfor undersøges mørtlens trykstyrke uden sten og det antages således, at styrken i betonen er bestemt af mørtlens styrke. [Aalborg Portland, 2010, s.87] Da cementen er det absolut mest forurenende delmateriale i en betonblanding, ønskes der et så lavt som muligt indhold af cement i blandingen, men den samme trykstyrke. Derfor er det af interesse at undersøge, hvorledes cement kan erstattes af asker og på den måde opnå samme trykstyrke.

5.2 Bindemidler og mørtelblanding

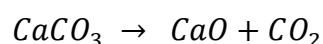
Med udgangspunkt i Figur 1 beskrives først de enkelte bindemidler, herefter beskrives hvorledes delmaterialerne reagerer med hinanden ved tilsætning af vand for at opnå cementmørtel. I det følgende forklares de enkelte delmaterialer med udgangspunkt i at den vigtigste egenskab for en beton er trykstyrken.

5.2.1 Cement

Cement er selve limen i beton og hydratiserer ved sammenblanding med vand. En udbredt type af cement er Portlandcementen, som i hovedtræk produceres ved sammenblanding af brændt kalk og sand. [Herholdt, 1985, s. 269]

Kridtet leverer hovedbestanddelen i cement, nemlig den brændte kalk CaO der udgør op til ca. 70% af indholdet i cement. Ved fremstillingen af brændt kalk udledes en stor mængde kuldioxid, hvilket medfører, at cementproduktionen er meget miljøbelastende.

Den brændte kalk fremstilles ved en såkaldt kalcineringsproces, hvor kridtet opvarmes til ca. $900^{\circ}C$. Herved frigives kuldioxiden fra kalken ved følgende reaktion:



Ved en yderligere opvarmning og en forarbejdning i roterovne sammenblandes den brændte kalk med sand. Sandet leverer siliciumdioxiden der står for den næststørste bestanddel af cement. Herved dannes såkaldte klinkerminerale. Indholdet af de såkaldte oxider, der sammenblandes i roterovne, fremgår af Figur 2.

| Oxider | Indhold - % | | Klinker-mineral | Indhold - % Typisk sammensætning |
|--------------------------------|-------------------|----------------------|-----------------|-------------------------------------|
| | Variations-område | Typisk sammensætning | | |
| CaO | 60-67 | 65 | C_3S | 55 |
| SiO ₂ | 17-25 | 22 | C_2S | 20 |
| Al ₂ O ₃ | 2-8 | 4 | C_3A | 7 |
| Fe ₂ O ₃ | 0-6 | 3 | C_4AF | 9 |
| MgO | 0,1-4,0 | 1 | $CaSO_4$ | 3 |
| SO ₃ | 1-4 | 2,5 | Fri CaO | 1 |
| Alkalioxider | 0,2-1,5 | 0,8 | | |

Figur 2 Sammensætning af portlandcement [Herholdt, 1985, s. 273]

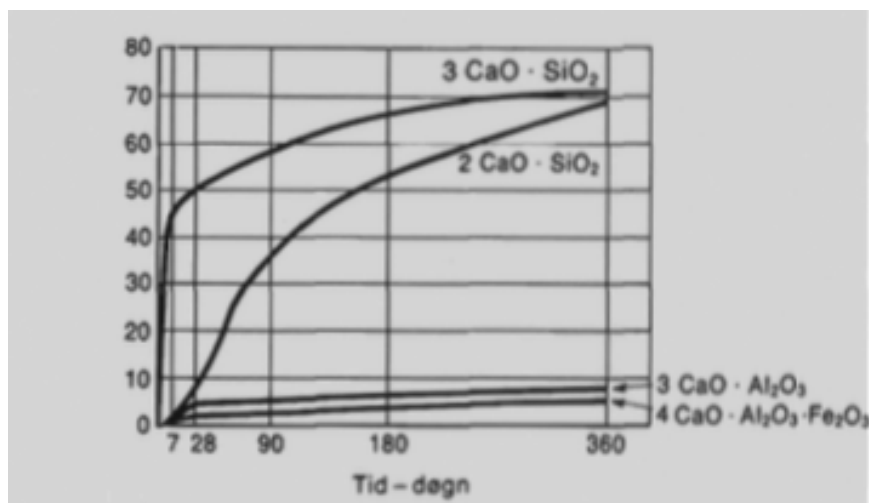
Af Figur 2 fremgår ligeledes klinkermineralsammensætningen i en typisk Portlandcement.

Styrkeudviklingen i cement fremkommer hovedsageligt som følge af 2 klinkermineraller:

-**Tricalciumsilikat (C_3S)** benævnes *alit*, er den største komponent i cement og er medvirkende til den tidlige styrkeudvikling og en høj slutstyrke.

-**Dicalciumsilikat (C_2S)** benævnes *belit*, udgør op til 20% af klinkerminerallerne i cement og medvirker til den sene styrkeudvikling og en høj slutstyrke.

Af Figur 3 fremgår styrkeudviklingen for klinkerminerallerne som funktion af tiden. Her er det særligt interessant at bemærke styrkeudviklingen for de 2 klinkermineraller efter 28 døgn. Det ses her, at belit kun har en styrke på ca. 10MPa.



Figur 3 Styrkeudvikling i MPa for klinkermineraller som funktion af tiden [Herholdt, 1985, s. 276]

5.2.2 Flyveaske

Flyveaske er et affaldsprodukt fra afbrænding af kul i kraftværker. Flyveasken opsamles ved hjælp af filtre i skorstenene. Herfra blæses flyveasken over i store beholdere, hvorfra det knuses og sendes til cement- og betonproducenter. [Betonforening 2013]

Da flyveaske har puzzolanske egenskaber, benyttes det derfor som erstatning for cement i beton. [Herholdt, 1985, s. 294]

Flyveasken benyttes ligeledes i selve produktionen af cementklinker.

Ved tilsætning af flyveaske i en mørtel, øges tætheden. Dette medfører en øget permeabilitet, hvilket medfører at det er sværere for vand at trænge ind i en hærdet beton. Flyveaske tilsættes ligeledes til en beton blanding for at øge bearbejdeligheden. [AalborgPortland.dk]

I henhold til DS/EN 450-1 er der visse minimumskrav til indholdet af mineraler i en flyveaske for at asken kan benyttes i cement- og mørtelproduktion. Ved hjælp af en kemisk analyse kan mineralsammensætningen i flyveaske bestemmes, hvor en typisk sammensætning vil være som anført på Figur 4

| Bestanddel | Naturlige puzzolaner Indhold - % | Flyveaske Indhold - % | Mikrosilica Indhold - % |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| SiO ₂ | 50-65 | 35-55 | 94-98 |
| Al ₂ O ₃ | 10-20 | 20-35 | -0 |
| Fe ₂ O ₃ | 4-6 | 3-30 | 0-0,5 |
| CaO | 3-6 | 1-10 | 0-0,3 |
| MgO | 1-2 | 1-4 | 0-1 |
| SO ₃ | 0-2 | 0-3 | 0-0,3 |
| Na ₂ O+K ₂ O | 3-10 | 1-8 | 0-1 |
| Glødetab | 5-10 | 2-15 | 1-1,5 |

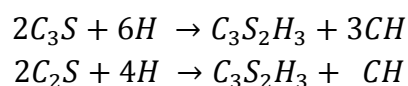
Figur 4 Typisk kemisk sammensætning af flyveaske, mikrosilica og naturlig puzzolaner [Herholdt, 1985, s. 295]

Her er indholdet af amorft siliciumoxid særligt interessant da dette reagerer med calciumhydroxid og giver en puzzolansk reaktion. Det er i afsnit om mørtel beskrevet, hvordan reaktionen mellem calciumhydroxid og siliciumoxid forløber.

5.2.3 Mørtel

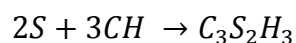
I det følgende beskrives selve reaktionen mellem cement og vand, og hvordan dette bliver til en hård sten.

Cement er et hydraulisk bindemiddel, derfor sker hærdeprocessen efter reaktion med vand. Det øjeblik vand og cement sammenblandes sker den såkaldte hydratiseringsproces, hvorved klinkermineraleerne omdannes til nye kemiske forbindelser. Under denne proces udvikler cementen sin styrke og en del varme. De enkelte klinkerminerale, alit og belit, reagerer med vand efter følgende kemiske udtryk [Geiger, 2008, s. 545]:



Det er denne proces, der giver cementen sin egentlige styrke. I hydratiseringsprocessen dannes der et overskud af calciumhydroxid (CH) og denne kan ved tilsætning af mikrosilica eller flyveaske i cementblandingen danne en puzzolansk reaktion, som danner yderligere C₃S₂H₃ og derved øger styrkeudviklingen.

En puzzolansk reaktion kan forløbe som følgende:



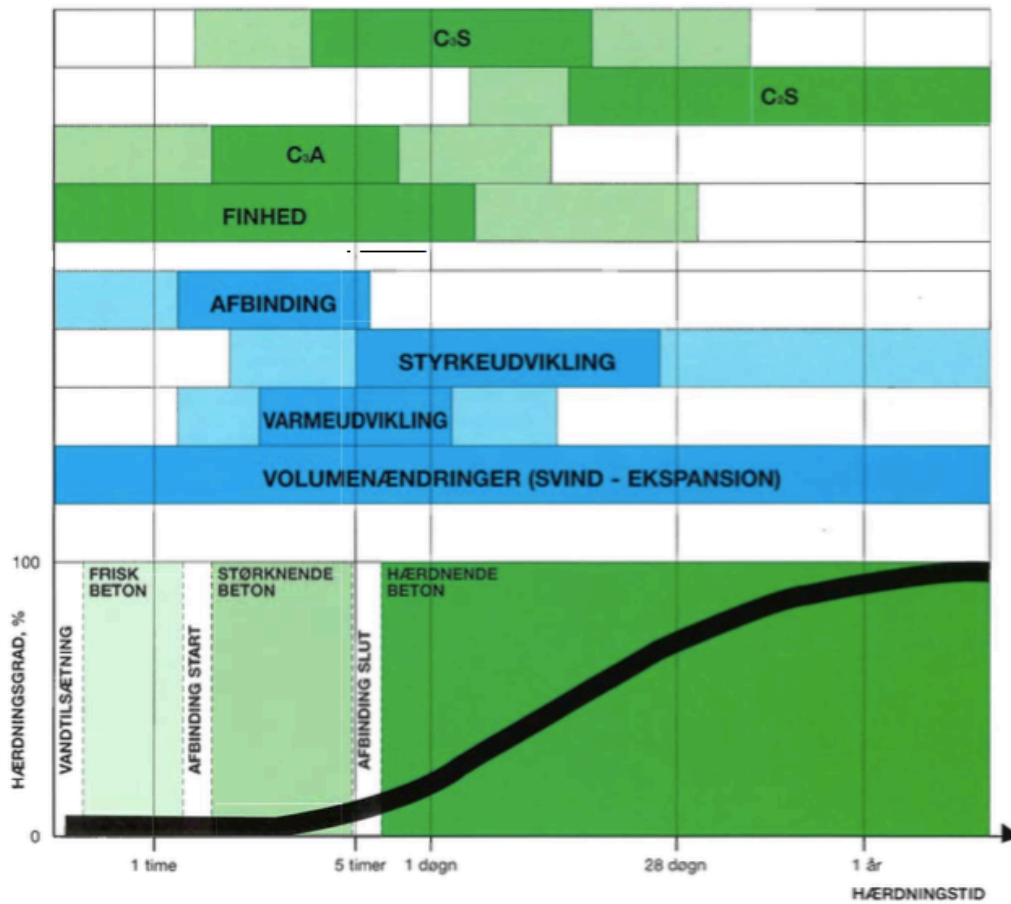
Inden for de første timer efter cementens sammenblanding med vand vil cementpastaen være hærdet op, dette kaldes afbinding og er afsluttet indenfor det første døgn.

Afbindingen betegnes som være startet det øjeblik cementpastaen begynder at hærde og afsluttet når cementpastaen er blevet til en hård sten.

Under afbindingen hydratiserer C_3A meget hurtigt med vand. Det er derfor nødvendigt at bremse denne reaktion, for at undgå at cementpastaen størkner indenfor et par minutter. C_3A reagerer ligeledes med gips og tilsætning af gips er med til at retardere hærdeprocessen. [Herholdt, 1985, s. 277]

Efter endt afbinding vil cementpastaen være en hård masse, men da C_3A har en ringe styrke vil cementpastaen på dette tidlige stadie være meget tryksvag. Dannelsen af $C_3S_2H_3$ er dog kun lige begyndt og da det er denne udvikling der giver styrken, kræves det at hærdetiden er længere end afbindingen.

Her giver klinkermineralet C_3S den tidlige styrkeudvikling og C_2S den sene styrkeudvikling. Da cement og vand fortsætter med at hydratisere vil beton udvikle højere trykstyrke i hele dens levetid. Oftest anvendes 28 døgns trykstyrken som reference for hvor stærk en beton er. På Figur 5 er det muligt at se, hvorledes de enkelte forløb udvikler sig i betonen over tid.



Figur 5 Skematisk fremstilling af hærdetiden som funktion af tiden. [Beton teknik 1999, s.14]

5.2.4 Sand og sten

Sand er en billig bestanddel i mørtel og tilsættes hovedsageligt for at forøge volumenet på mørtlen. Ved fremstilling af beton tilsættes der ligeledes sten. Sand betegnes som de partikler, der falder igennem en standard sigte på 4mm og sten er dem, der ikke falder igennem sigten.

Ved beton- og mørtelfremstilling er det vigtigt at kende sandets indhold af vand, da vandet i sandet vil reagere med cementen og på den måde vil vand/cementforholdet ændres.

5.3 Trykstyrke

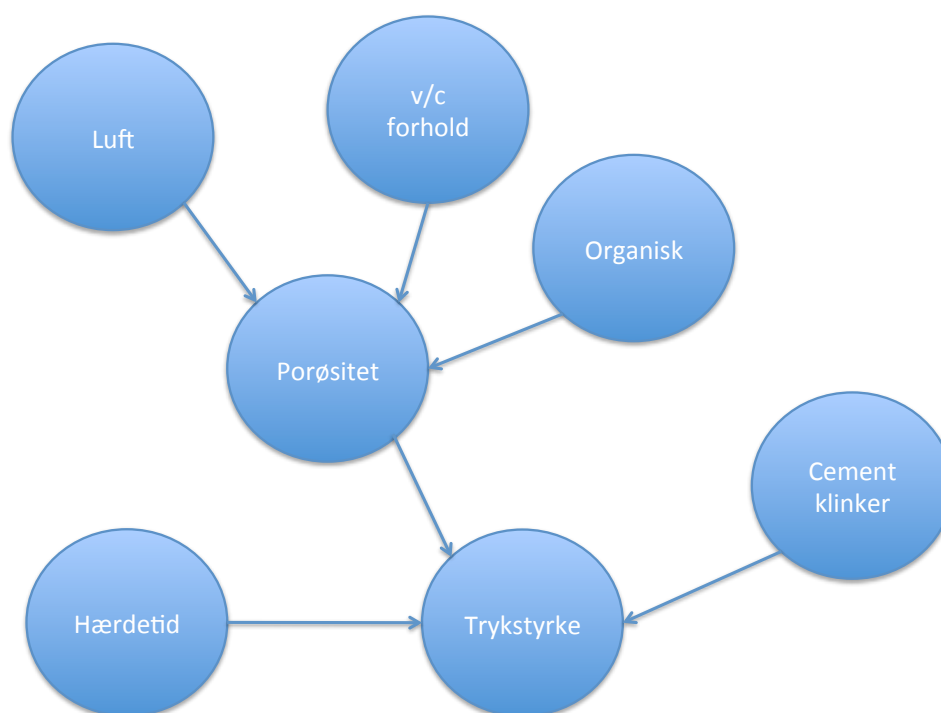
Cement er et utrolig trykstærkt materiale i modsætning til cementens trækstyrke, som ligger på omkring 5-10% af trykstyrken. [Aalborg Portland, 2010, s. 87]

Derfor er det nødvendigt at indstøbe armeringsjern i betonen, såfremt der skal kunne optages trækkræfter. Der er i denne rapport ikke undersøgt trækstyrker i beton og det vil ikke blive omtalt yderligere.

I det foregående afsnit er det beskrevet hvorledes en cement blandet med vand, sand og aske via en kemisk reaktion kan blive til en hård sten. Men der er flere

faktorer end bare den kemiske reaktion, der afgør trykstyrken for en mørtel. Således er det ikke udelukkende valget af cementtype, der er afgørende for den endelige styrke på mørtlen.

I nedenstående Figur 6 er en sammenhæng mellem faktorer, der har indflydelse på trykstyrken forsøgt vist. På figuren er det ligeledes muligt at se, hvordan flere faktorer er afgørende for porøsiteten som igen er afgørende for trykstyrken. Sammenhængen mellem disse faktorer er forsøgt forklaret i de følgende afsnit.



Figur 6 Sammenhænge mellem faktorer for at opnå trykstyrke

5.3.1 Porøsitet/Densitet

Da mørtel er et porøst materiale opstår der naturligt porer i den hærdede mørtel. Det samlede volumen af porer angiver porøsiteten for en mørtel, og ved mange porer i en mørtel nedsættes trykstyrken. Derfor er der sammenhæng mellem høj porøsitet og lav trykstyrke. Dette medfører et behov for at nedbringe det samlede volumen af porer så meget som muligt i en mørtel for at opnå højere trykstyrke.

Der skelnes mellem åbne og lukkede porer. Åbne porer vil, som følge af kapillarsugning i tør mørtel opsuge vand. Det opsugede vand i de åbne porer vil pga. hårrørseffekt blive trukket ind i de lukkede porer. Dette er nærmere beskrevet i afsnit om kapillarsugning.

Materialets porøsitet, angives som den åbne porøsitet af prøvelegemet. Og defineres som forholdet mellem volumen af åbne porer og prøvelegemets samlede volumen.

Den åbne porøsitet for mørtelprismerne bestemmes efter følgende formler:

$$\text{Densitet: } \rho_f = \frac{m_{105}}{V} \quad \rho_d = \frac{m_{105}}{(V - V_p)} \quad \rho_{ssd} = \frac{m_{ssd}}{V}$$

$$\text{Porøsitet: } p_a = \frac{V_p}{V}$$

$$\text{Vandtørstofforhold: } u_{ssd} = \frac{m_{ssd} - m_{105}}{m_{105}}$$

På Figur 6 er det muligt at se faktorer, der er medvirkende til poredannelse i en mørtel. Her er luft indkapslet i mørtelblandingen medvirkende til at øge porøsiteten. Disse luftbobler kan ved vibration minimeres. Ligeledes kan organisk materiale i den tilsatte aske være med til at efterlade porer, når det organiske materiale rådner væk.

5.3.2 V/C forhold

Vand/Cement-forholdet, i det følgende benævnt v/c forhold, er et mål for forholdet mellem vand og cement i en mørtel. Ved store mængder vand i forhold til cement siges v/c forholdet at være højt. Dette medfører en våd mørtel, der flyder meget. Ved høje v/c forhold vil porøsiteten stige da mængden af vand indkapslet i mørtlen er høj. Dette efterlader porer i mørtlen, når vandet er opbrugt i hydratiseringsprocessen.

For at undersøge v/c forholdet udføres en **sætmålsprøve**. Her vil høje sætmål være ensbetydende med en meget flydende mørtel, hvilket kan være på grund af et højt v/c forhold.

5.3.3 Kappilarsugning

Ved kappilarsugning forstås et materiales evne til at opsuge vand i kapillarer og porer. Ved opfugtning af beton trænger vandet ind i disse små kanaler og porer. I de tilfælde, hvor vandet i porerne fryser til is, vil dette medføre frostsprængninger i betonen som følge af volumenudvidelsen fra flydende vand til is. På denne måde kan beton nedbrydes over tid alene ved kappilarsugning.

Ligeledes kan vand, der trænger ind i betonen via disse porer og kapillarer forårsage korrosion af armeringsjern i betonen. Dette vil over tid medføre en svækkelse af armeringsjernet trækstyrke.

5.4 Beregning af trykstyrken

Beton inddeles i styrkeklasser bestemt efter DS/EN 206-1. Disse styrkeklasser benyttes til at vælge beton på baggrund af dimensioneringsberegninger.

På Figur 7 er de forskellige styrkeklasser i henhold til DS/EN 206-1 angivet. I Danmark benyttes angivelsen for cylinderstyrken. Cylinderstyrken måles i Danmark på en Ø150mm cylinder med en højde på 300mm. [Aalborg Portland, 2010, s. 42]

| Trykstyrkeklasse | Mindste karakteristiske cylinderstyrke MPa | Mindste karakteristiske terningstyrke MPa |
|------------------|--|---|
| C8/10 | 8 | 10 |
| C12/15 | 12 | 15 |
| C16/20 | 16 | 20 |
| C20/25 | 20 | 25 |
| C25/30 | 25 | 30 |
| C30/37 | 30 | 37 |
| C35/45 | 35 | 45 |
| C40/50 | 40 | 50 |
| C45/55 | 45 | 55 |
| C50/60 | 50 | 60 |
| C55/67 | 55 | 67 |
| C60/75 | 60 | 75 |
| C70/85 | 70 | 85 |
| C80/95 | 80 | 95 |
| C90/105 | 90 | 105 |
| C100/115 | 100 | 115 |

Figur 7 Styrkeklasser i henhold til DS/EN 206-1 [Aalborg Portland, 2010, s. 42]

De angivne værdier for den karakteristiske trykstyrke angives som 5% fraktilen. Dette betyder, at der er udført tilpas mange trykstyrkemålinger til at kunne danne en normalfordeling. Ud fra denne normalfordeling kan man konkludere, at trykstyrken af en beton, produceret efter en bestemt recept, er lig med eller over den angivne trykstyrke med en sandsynlighed på 95%.

De angivne værdier i Figur 7 er således bestemt empirisk. De benyttes i dag af ingeniører til at afgøre, hvilken type beton der skal bestilles til en given opgave.

5.4.1 Bolomeys formel

Der findes flere forskellige metoder til at beregne en trykstyrke for en given beton. I det følgende er Bolomeys formel beskrevet, hvor v/c forholdet benyttes til at bestemme trykstyrken.

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

Hvor :

f_c - trykstyrken

K - er en konstant der afhænger af cementtypen og hærdetiden

V - indholdet af vand

C - indholdet af cement

α - er en konstant der afhænger af cementtype og hærdetid

Bolomeys formel er en empirisk bestemt formel.

På Figur 8 er værdier for K og α anført for forskellige cementtyper og ved forskellig hærdetid.

| Cementtyper | Termin døgn | K | α |
|----------------------------------|----------------|----|----------|
| BASIS CEMENT | 1 | 17 | 0,9 |
| | 7 | 26 | 0,6 |
| | 28 | 30 | 0,5 |
| RAPID CEMENT | 1 | 13 | 0,9 |
| | 7 | 24 | 0,6 |
| | 28 | 30 | 0,5 |
| LAVALKALI SULFATBESTANDIG CEMENT | 1 | 5 | 0,8 |
| | 7 | 19 | 0,8 |
| | 28 | 29 | 0,7 |
| AALBORG WHITE | 1 | 14 | 1,0 |
| | 7 | 25 | 0,8 |
| | 28 | 35 | 0,7 |
| BASIS AALBORG CEMENT | 1 | 13 | 1,0 |
| | 7 | 24 | 0,7 |
| | 28 | 29 | 0,6 |

Figur 8 Konstanter til Bolomeys formel [Aalborg, 2010, s. 88]

Ved tilføjelse af puzzolaner, så som flyveaske, til cementpastaen skal der tages højde for styrkebidraget. Dette kan gøres ved at anvende en aktivitetsfaktor for puzzolanen i Bolomeys formel, som anvist:

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

Hvor :

k – er aktivitetsfaktoren for den pågældende puzzolan

P – er indholdet af puzzolanen i blandingen

Aktivitetsfaktorerne kan for flyveaske ansættes til 0,5 og for microsilicia ansættes til 3,0. [Aalborg Portland, 2010, s. 59]

Aktivitetsfaktorerne er udtryk for reaktiviteten af puzzolanen.

6 Eksperimentielt arbejde

I dette afsnit beskrives forsøgsudførelse og formål. Der henvises til forsøgsbeskrivelser, som er vedlagt i bilag og til danske standarder.

6.1 Askekarakteristik

For at bestemme træaskens karakteristika er der udført en række forsøg. Kemiske og fysiske egenskaber er bestemt så træasken kan sammenlignes med eksisterende krav til flyveasker, i henhold til DS/EN 450.

6.1.1 pH værdi

For at undgå korrosion af armeringsjern indstøbt i betonen er det nødvendigt at mørtelblandingen har en høj pH-værdi. Derfor er det også nødvendigt at asken der tilsættes mørtelblandingen ikke har en lav pH-værdi, som kan forsure blandingen.

Forsøgsbeskrivelse fremgår af bilag A1

6.1.2 Ledningsevne

Da ioner er ledende partikler vil disse lede strøm igennem en væske. På denne måde kan indholdet af ioner i træasken bestemmes.

Ledningsevnen undersøges i en blanding af 10g aske tilsat 25mL destilleret vand. Her vil en høj ledningsevne betyde et højt indhold af ioner og omvendt vil et lavt indhold af ioner give udslag i en lav ledningsevne.

Ledningsevnen måles i Siemens, der angives i mS/cm.

Forsøgsbeskrivelse fremgår af bilag A1

6.1.3 Glødetab

Indholdet af organisk materiale i aske har betydning for mørtlens styrke. Som vist på Figur 6 er det organiske indhold af en træaske med til at øge porøsiteten i en mørtel. Organisk materiale fra asken vil efter hærkning rådne væk og efterlade porer i mørtlen. Disse porer vil have indflydelse på porøsiteten af mørtlen, som har indflydelse på styrken. For at afgøre indholdet af organisk materiale i træasken bestemmes glødetabet ved at veje en mængde aske inden asken opvarmes ved 550°C for derefter at veje den igen efter afkøling.

Forsøgsbeskrivelse fremgår af bilag A1

6.1.4 Vandindhold

For at vurdere, hvorvidt der skal tilføres mere eller mindre vand for at opnå det samme v/p forhold ved erstatning af cement med træaske, bestemmes vandindholdet i asken.

Forsøgsbeskrivelse fremgår af bilag A1

6.1.5 Vandopløselighed

Ved skylning af asken bestemmes, hvor meget af materialet, der er vandopløseligt. De fleste vandopløselige materialer i asken er salte.

Forsøgsbeskrivelse fremgår af bilag A1

6.1.6 Oplukning

For at fastlægge indholdet af syreopløselige metaller i træasken, udføres der en oplukning af asken.

Forsøgsbeskrivelse fremgår af bilag A1

6.1.7 Vandopløselige anioner

Analysen viser de primære opløselige anioner i asken.

Forsøgsbeskrivelse fremgår af bilag A1

6.2 Mørtlens fysiske egenskaber

Mørtelens fysiske egenskaber er forsøgt beskrevet ved en række forsøg. For den våde mørtel er sætmål og afbindingstiden testet og for den hærdede mørtel er der udført trykstyrketest, kapillarsugning og porøsitet/densitet test. Disse forsøg er kort beskrevet i det følgende. Uddybende forsøgsbeskrivelse er angivet i bilag A2.

6.2.1 Blanding og støbning af mørtel recepter

I dette projekt er der udført forsøg på 6 forskellige slags mørtelrecepter. Blanding af mørtelrecepter er udført i henhold til DS/EN 196-1. Til de recepter hvor hærkning var nødvendig, er der benyttet mørtelforme, der opfylder krav angivet i DS/EN 196-1.

Af Tabel 1 fremgår mængden af delmaterialer i mørtelrecepterne. For hver recept er der blandet en reference med flyveaske og en med træaske. I bilag B er hver enkelt recept vist med nøjagtige delmængder.

| Recept | Vand [g] | Sand [g] | Cement [g] | Aske [g] |
|--------|----------|----------|------------|----------|
| 5% | 225 | 1350 | 427,50 | 22,50 |
| 7,5% | 225 | 1350 | 416,25 | 33,75 |
| 10% | 225 | 1350 | 405,00 | 45,00 |

Tabel 1 Blandingsforhold for mørtelrecepter

6.2.2 Afbindingstid

Der benyttes DS/EN 196-3 som vejledning for forsøget til afbindingstid. Forsøget udføres ved hjælp af et Vicatronic-apparat. Der fyldes 40mm mørtel i et plastikbæger, som anbringes i Vicatronic-apparatet. Testen igangsættes og nålen fra Vicatronicen droppes ned i mørtlen for hvert tiende minut. Herved bestemmes afbindingens start- og sluttidspunkt.

Tiden fra vandet er tilføjet blandingen til afbindingen begynder afgøres, ifølge DS/EN 196-3, som det tidspunkt hvor afstanden mellem nålen og bundpladen i beholderen første gang er mellem 3mm og 9mm.

Tidspunktet for afbindingens sluttidspunkt bestemmes som det tidspunkt, hvor nålen første gang ikke kommer længere end 0,5mm ned i mørtlen.

6.2.3 Sætmål

Da mørtlens konsistens og særligt v/c forholdet påvirker styrken og afbindingstiden er det nødvendigt at have en så ensartet mørtel som muligt for at kunne sammenligne dem indbyrdes. Derfor udføres en sætmålsprøve på alle fire recepter.

Sætmålsprøven er udført som følgende:

Formen fyldes ca. 25mm op med mørtel og der stemples forsigtigt 20 gange med stamperen. Herefter fyldes formen helt op og der stemples igen 20 gange.

Overskydende mørtel skrabes af. Formen fjernes og håndsvinget drejes så pladen dropper 25 gange på 15 sekunder.

Diameteren på mørtlen måles herefter og angives som sætmålet.

Forsøgsbeskrivelse fremgår af bilag A2

6.2.4 Porøsitet/Densitet

Da porøsiteten som beskrevet i teorien har stor indflydelse på styrken i mørtelprismen, bestemmes rumfanget af porevolumenet i mørtelprismene.

Forsøgsbeskrivelse fremgår af bilag A2

6.2.5 Kappilarsugning

For at bestemme hvor hurtigt mørtelprismen optager vand og hvor meget vand der optages, testes kappilarsugning af mørtelprismen.

Forsøgsbeskrivelse fremgår af bilag A2

6.2.6 Trykstyrkemåling

Trykstyrkemålinger sker i henhold til DS/EN 196-1 og er udført på toni300-apparat. Der udføres trykstyrkemålinger på mørtelrecepter, hvor cementen er erstattet med enten flyveaske eller bioaske, og forholdet for erstatningen er på 5%, 7,5% og 10% for begge asketyper.

For hver recept er der støbt tre mørtelprismer, og hver prisme trykkes i begge ender, hvilket giver to test på hver prisme. Således opnås der 6 trykforsøg for hver enkelt mørtelrecept. Af de 6 resultater udregnes et gennemsnit og afviger et af resultaterne med mere end 10% fra det beregnede gennemsnit kasseres dette resultat og der udregnes et nyt gennemsnit på baggrund af de fem resterende resultater. Er der endnu et tal der afviger med mere end 10% kasseres hele testen og der skal derfor støbes et nyt sæt.

Trykstyrketesten udføres i toni300-apparatet og opstilles som vist på Figur 9. Der trykkes indtil prismet bryder og trykstyrken noteres.



Figur 9 Opstilling i Toni300 apparat

7 Resultater og diskussion

7.1 Askekarakteristik

I det følgende er indledende forsøg for asken vist og diskuteret.

En overordnet karakteristik af asken er vist i Tabel 2 hvor træasken er sammenlignet med en flyveaske. Værdier for flyveasken stammer fra [Mathiasen, 2014, s. 30].

| Indledende askekarakteristik | | |
|------------------------------|-----------|---------|
| Forsøg | Flyveaske | Træaske |
| pH værdi [-] | 12,42 | 12,98 |
| Ledningsevne [mS/cm] | 7,3 | 70,4 |
| Vandindhold [%] | - | 0,001 |
| Vandopløselighed [%] | 1,15 | 50,8 |
| Glødetab [%] | 1,26 | 2,98 |
| Oplukning | [g/kg] | [g/kg] |
| Al | 25,00 | 6,39 |
| As | - | 0,00 |
| Ba | - | 0,79 |
| Ca | - | 137,04 |
| Cd | 0,0004 | 0,0056 |
| Cr | 0,054 | 0,078 |
| Cu | 0,089 | 0,087 |
| Fe | - | 6,23 |
| K | 0,022 | 148,66 |
| Mg | 6,25 | 18,37 |
| Mn | - | 3,39 |
| Na | 1,402 | 4,40 |
| Ni | 0,027 | 0,02 |
| P | 2,20 | 13,64 |
| Pb | 0,052 | 0,06 |
| Se | - | 0,00 |
| Zn | 0,068 | 0,93 |

Tabel 2 Overordnet askekarakteristik af træasken

7.1.1 pH værdi og ledningsevne

Som det fremgår af Tabel 2 er træaskens pH værdi målt til 12,98. Denne værdi er særdeles god, da en beton bør have en pH værdi mellem 12-14. Samtidig skal armeringsjern indstøbt i betonen være i et meget basisk miljø, ca. pH 13, for at undgå korrosion. Træasken kan således ikke forventes at forandre pH værdien væsentligt. Den målte pH værdi for flyveaske er 12,42 og de to askers pH værdi er således meget ens.

Ledningsevnen er derimod ikke ens for de to asketyper. Træaskens ledningsevne er målt til 70,4mS/cm, hvilket er ca. 10 gange så højt som ledningsevnen for flyveaske. Ledningsevnen giver et indtryk af mængden af negativt ladede ioner, såkaldte anioner, der er i asken. Ledningsevnen hænger derfor sammen med antallet af letopløselige anioner i asken.

7.1.2 Vandopløselighed

Vandopløseligheden for træasken er bestemt til 50,8% hvilket er meget højt. Over halvdelen af asken er således letopløselige salte. Den høje opløselighed bekræfter den høje ledningsevne så der er altså en sammenhæng her, hvilket kan være med til at bekræfte resultatet, på trods af at ledningsevnen er meget høj.

7.1.3 Glødetab

Glødetabet for træasken er på 2,98% dette er lavere end de i DS/EN450-1 krævede værdier til en flyveaske. De maksimale glødetabsværdier for en flyveaske fremgår af Tabel 3. Høje glødetab indikerer højt indhold af organisk materiale i træasken og kan således være med til at øge porøsiteten i den færdige mørtelblanding.

| Krav til glødetab i henhold til DS/EN 450-1 | |
|--|---------------------------|
| Kategori | Maksimalt glødetab |
| A | 5% |
| B | 7% |
| C | 9% |

Tabel 3 Krav til maksimalt glødetab i henhold til DS/EN450-1

Da glødetabet er lavere end kravet i DS/EN450-1 skal der således ikke gøres noget for at asken kan benyttes i en mørtelblanding. Var glødetabet højere end de angivne kategorier, kunne man have brændt det organiske materiale i asken inden brug.

7.1.4 Vandindhold

Vandindholdet er meget lavt i træasken, målt til 0,0001%. Dette medfører, at der ikke skal tages højde for om træasken kan påvirke v/c forholdet.

7.1.5 Oplukning

Resultaterne fra oplukningen er vist i Tabel 4 og viser indholdet af grundstoffer i træasken. Resultaterne er vist som vægt %.

| Grundstof | [mg/kg] | % |
|-----------|-----------|--------|
| Al | 6387,78 | 0,639 |
| As | 4,40 | 0,000 |
| Ba | 789,57 | 0,079 |
| Ca | 137039,33 | 13,704 |
| Cd | 5,61 | 0,001 |
| Cr | 77,90 | 0,008 |
| Cu | 87,13 | 0,009 |
| Fe | 6225,66 | 0,623 |
| K | 148655,33 | 14,866 |
| Mg | 18372,73 | 1,837 |
| Mn | 3387,68 | 0,339 |
| Na | 4399,52 | 0,440 |
| Ni | 16,66 | 0,002 |
| P | 13643,10 | 1,364 |
| Pb | 57,16 | 0,006 |
| Se | 2,55 | 0,000 |
| Zn | 930,95 | 0,093 |

Tabel 4 Indhold af grundstoffer i træasken

Det har ikke været muligt at finde krav til alle grundstoffer men i henhold til DS/EN 450-1 er der krav til de i Tabel 5 angivne grundstoffer. Kravene fra DS/EN450-1 er de krav der stilles til en flyveaske i dag. Derfor forventes det at en træaske skal kunne leve op til de samme krav for grundstoffer ved en oplukning.

| | Maksimalt indhold %-vægt | Indhold i træaske %-vægt |
|----|-----------------------------|-----------------------------|
| Cd | 0,00005 | 0,001 |
| Cr | 0,05 | 0,008 |
| Cu | 0,05 | 0,009 |
| Zn | 0,003 | 0,093 |
| Pb | 0,004 | 0,006 |
| Ni | 0,05 | 0,002 |

Tabel 5 Tilladelige værdier for grundstoffer i aske sammenlignet med værdier for træasken.

Af den ovenstående tabel fremgår det at halvdelen af de 6 grundstoffer overholder kravet. Således vil træasken derfor ikke kunne godkendes til brug i en mørtelblanding. Indholdet af cadmium er meget over den tilladte værdi og ligeledes er zink og bly over de tilladte værdier.

7.1.6 Vandopløselige anioner

Indholdet af chlorid er meget vigtigt at kende, da chlorid er med til at korrodere armeringsjernet. Ifølge i DS/EN 450-1 må det maksimale indhold af chlorid være 9%.

| Type | [mg/kg] | % |
|-----------------|----------|-------------|
| Cl ⁻ | 50199,53 | 5,019952868 |
| NO ₃ | 169,44 | 0,016944491 |
| SO ₄ | 38931,63 | 3,89316271 |

Tabel 6 Indhold af anioner i træasken

Som anvist på Tabel 6 er indholdet af chlorid i træasken på ca. 5%. Træasken kan således godt godkendes på baggrund af dette og forventes ikke at give problemer for armeringsjernet.

7.2 Mørtelprøvernes fysiske egenskaber

I det følgende beskrives og diskuteres resultaterne for mørtelprøverne.

7.2.1 Afbindingstid

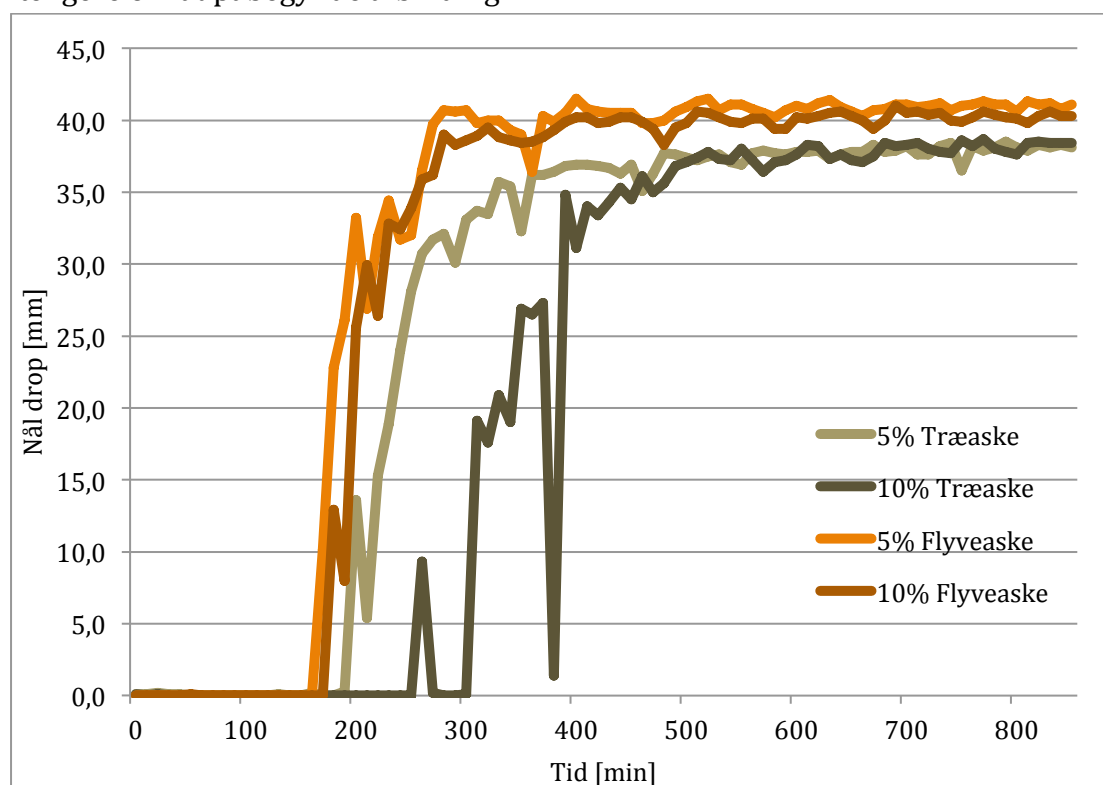
Afbindingstiden bestemmes ved hjælp af Vicat test i henhold til DS/EN 196-3. I forsøget er afbindingstiden for mørtelrecepter med henholdsvis 5% og 10% flyve- og træaske bestemt. Resultaterne er i bilag B.

På Figur 10 ses udviklingen i afbindingen for de 4 mørtelrecepter.

Afbindingstiden for de to recepter med flyveaske er omtrentlig den samme, og det tager cirka 100min for begge disse recepter at afbinde. Tidspunktet for hvornår de to flyveaske recepter påbegynder afbindingen må betragtes at være ens, dog tog det 10min længere før recepten med 10% flyveaske begyndte at afbinde.

Recepter med træaske var begge ca. 200min om at afbinde, og tidspunktet for hvornår afbindingen påbegyndtes var også længere. Her tog det 200min før recepten med 5% træaske begyndte at binde af, og tæt på 300min for recepten med 10%. Her er det særligt bemærkelsesværdigt at mørtelrecepten med 5% træaske viser en længere afbindingstid end mørtelrecepten med 10% flyveaske. Dette kan muligvis indikere at C_3A indholdet i mørtlen med træaske er længere tid om at hydratisere og der derfor ses en øget afbindingstid på trods af et lavere askeindhold.

Det er ikke kun afbindingstiden der er forskellige. Recepter med træaske er også længere om at påbegynde afbinding.



Figur 10 Afbindingstid for mørtelrecepter

Overfladen for recepter med træaske synes mere porøs, selv efter endt afbinding. Dette kom til udtryk i at nålen kunne penetrere længere ned i den tørre mørtel og kan ses ved at se på figur 10 hvor nål droppet aldrig kommer op på 40mm som recepter med flyveaske gør.

På baggrund af den store forskel i afbindingstiden mellem træaske og flyveaske, er mørtelrecepterne derfor ikke sammenlignelige på afbindingstid. Der er ikke arbejdet yderligere med hvorfor der ses denne forskel, men udelukkende konkluderet at der er en stor forskel.

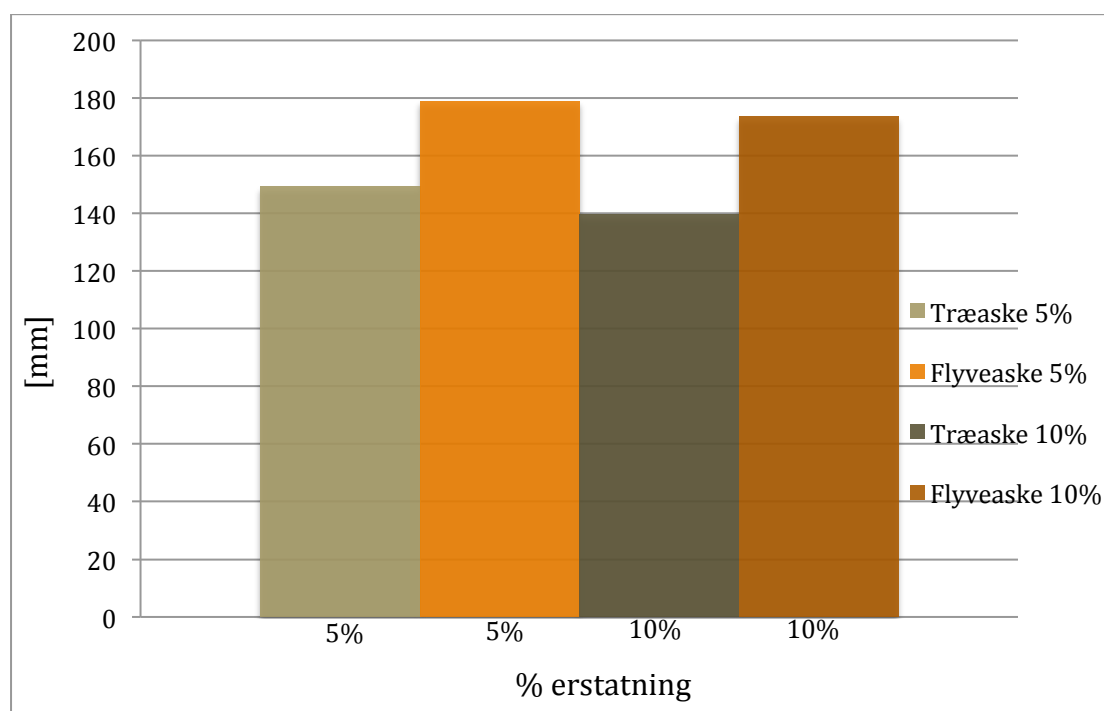
7.2.2 Sætmål

Der er udført sætmålsprøver på mørtelrecepter med henholdsvis 5% og 10% flyveaske og træaske. Forsøget er udført for at forsøge at vurdere, om der er en sammenhæng mellem asketypen og sætmålet.

Af Figur 11 fremgår det, at der generelt ses faldende sætmål for højere indhold af aske, uanset hvilken asketype.

For flyveasken falder sætmålet fra 179mm med 5% flyveaske til 173,5mm med 10% flyveaske. Ligeledes ses et fald i sætmålet ved øget indhold af træaske. Her falder sætmålet fra 149mm til 140mm.

Som det fremgår af figuren er der en stor forskel i sætmålet på flyveaske og træaske. Træaskens sætmål er væsentligt lavere end flyveaskens. Dette skyldes formentlig, at træasken optager mere vand en flyveasken og medfører at mørtelrecepten med træaske har en dårligere bearbejdelighed end mørtlen med flyveaske. Dette kom til udtryk i at mørtel med træaske var væsentlig sværere at fordele i formene end mørtel med flyveaske. Dette betyder at bearbejdeligheden bliver dårligere for recepter med træaske, og altså derfor ikke på samme måde kan benytte som tilsætning i en beton blanding for at øge bearbejdeligheden, som ellers er tilfældet for flyveaske.

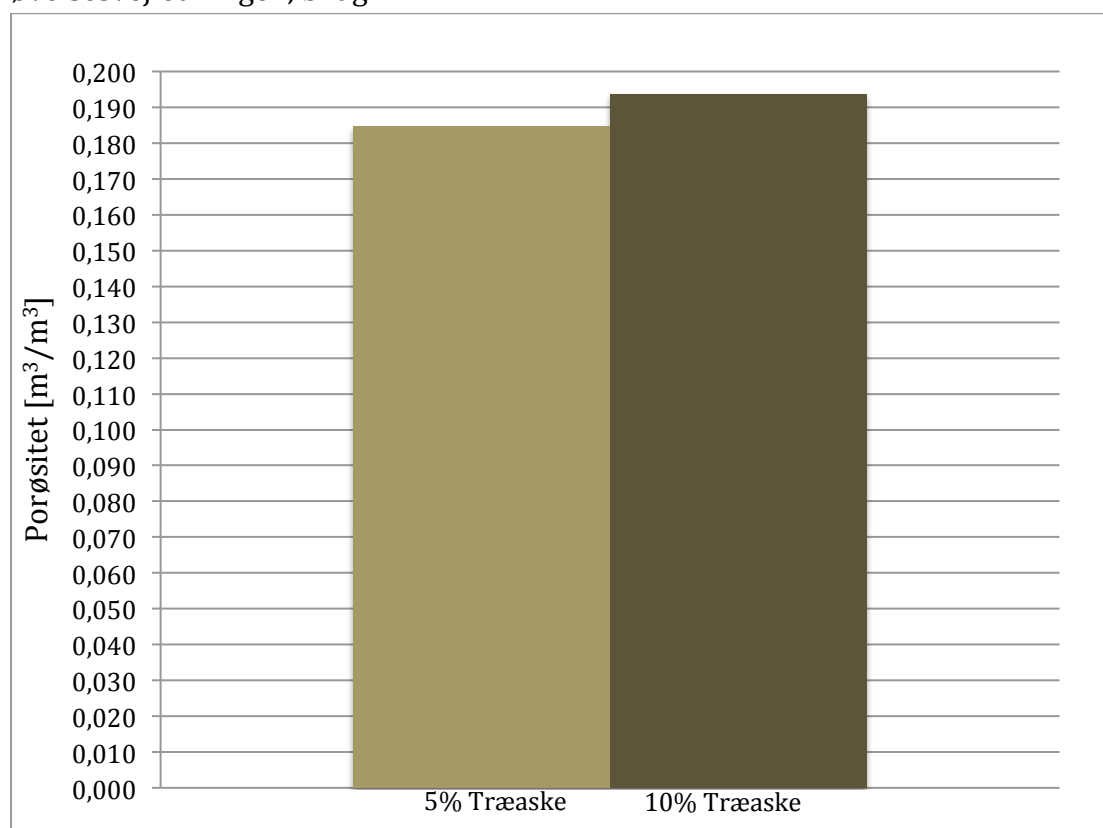


Figur 11 Sætmål for mørtelrecepter med flyveaske

7.2.3 Porøsitet/Densitet

Porøsitet- og densitetsundersøgelsen er foretaget for recepter med henholdsvis 5% og 10% træaske indhold. Forsøget er udført på 3 prismer for hver mørtelrecept og resultaterne er beregnet som et gennemsnit af de 3 prismer. På grund af tidsmangel er der udelukkende udført forsøg på prismer med 5% og 10% træaske som cementerstatning og ikke på prismer med flyveaske.

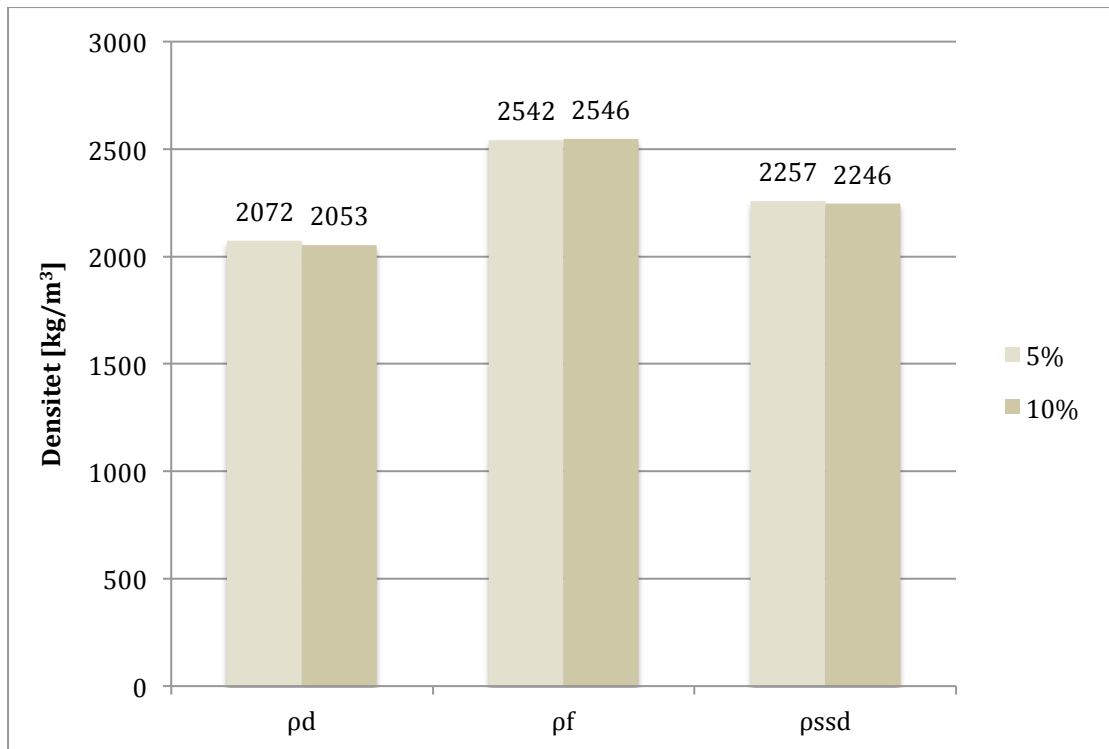
Porøsiteten og densiteten for prismerne er beregnet som beskrevet i øvelsesvejledningen, bilag A2.



Figur 12 Porøsitet for mørtelrecepter med træaske

Porøsiteten ses i Figur 12 at være stigende ved højere indhold af aske, hvor den beregnede porøsitet for 5% og 10% træaskeindhold var henholdsvis 0,185 og 0,194. Den øgede porøsitet kan skyldes at der i recepter med 10% træaske bindes mere blandevand i asken, og når dette vand er opbrugt i hydratiseringen efterlades der porer. I henhold til [Aalborg, 2010, s.87] er lavere porøsitet forbundet med et lavere v/c forhold. Da sætmålet for recepten med 10% træaske var lavere end recepten med 5% træaske, kunne dette muligvis indikere et lavere v/c forhold, hvilket burde medføre lavere porøsitet for recepten med 10% træaske. Da dette ikke er tilfældet, kan dette muligvis bekræfte formodningen om at den øgede porøsitet skyldes at der bindes mere blandevand i asken som efterlader porer efter endt hydratisering.

Ved at se på resultaterne for trykstyrketesten er det muligt at se, at der er en sammenhæng mellem den stigende porøsitet og en lavere styrke. Dette stemmer overens med teorien.

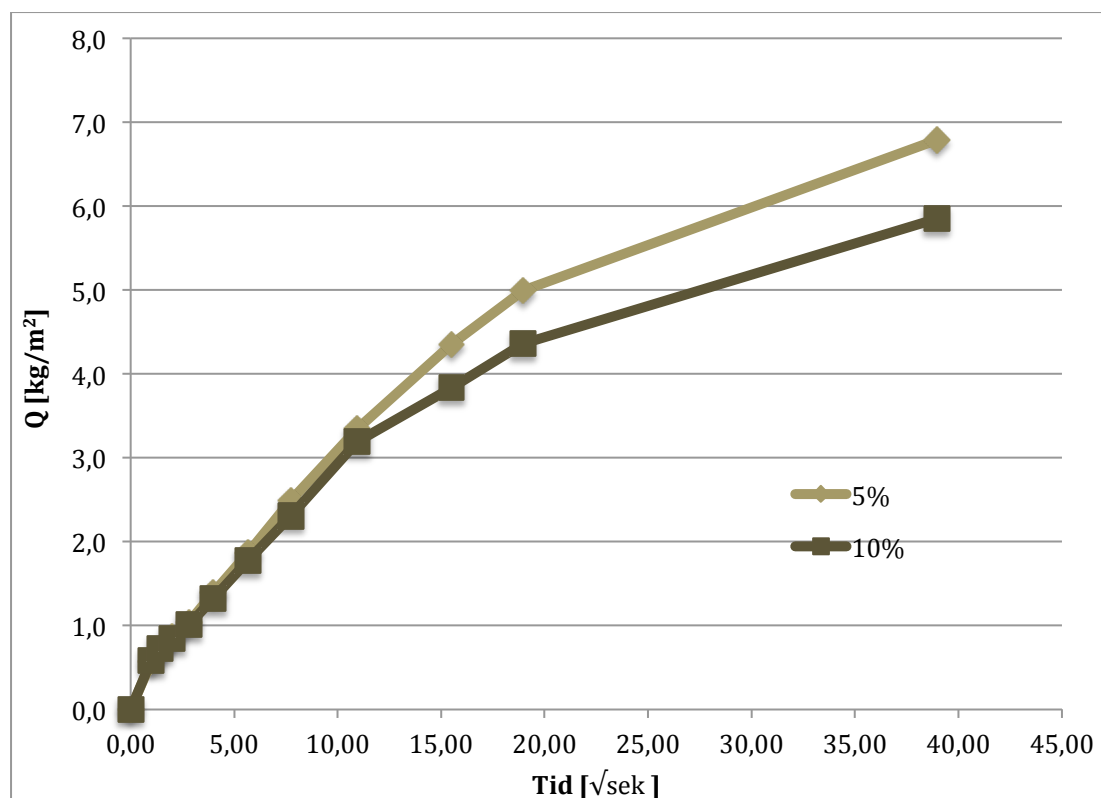


Figur 13 Densiteter for mørtelrecepter med træaske

Der ses ingen nævneværdige forskelle i densiteten for de to recept typer ved at se på Figur 13. Tørstofsdensiteten ρ_d ses at være 2072kg/m³ for recepten med 5% træaske og 2053kg/m³ for recepten med 10%. Faststofsdensiteten ρ_f ses at være ens, med en lille forskel på 4kg/m³ og de vacuumvandmættede densiteter ρ_{ssd} der angiver prøvens faststof inkl. både de åbne og lukkede porer, blev fundet til at være 2257kg/m³ for 5% træasken og 2246 kg/m³ for recepten med 10% aske.

7.2.4 Kapillarsugning

Kapillarsugningsforsøget er udført på mørtelrecepter med henholdsvis 5% og 10% træaske. Der er på grund af tidsmangel ikke udført forsøg på recepter med flyveaske. Som det fremgår af Figur 14 ligger resultaterne meget tæt for de to mørtelrecepter. Dog har recepterne med 10% askeindhold lidt lavere værdier. Disse har altså ikke suget ligeså meget vand som recepterne med 5%.



Figur 14 Kappilarsugning for mørtelrecepter med træaske

Mængden af vand der opsuges i porerne burde umiddelbart være højest for den recept med den højeste porøsitet. Det er derfor lidt uklart hvorfor der ses lavere værdier for recepten med den højeste porøsitet, recepten med 10% træaske.

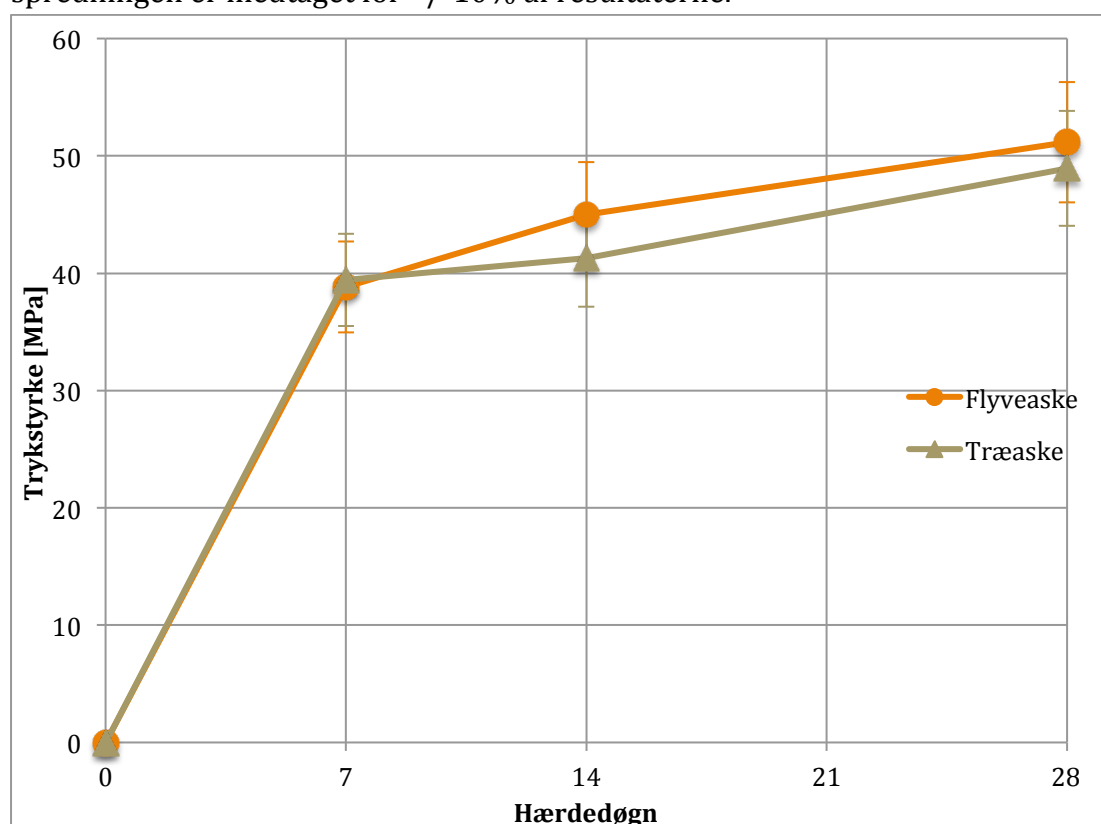
Det har ikke været muligt at kunne bestemme et kapillaritetstal k , da forsøget ikke har varet længe nok og da kun den mindste flade af mørtelprismen har været sat i vand. Derfor ses der ikke en udfladning af kurven på figuren men ved forsøgets afslutning var der fortsat opsugning af vand.

7.2.5 Trykstyrketest

Trykstyrken er testet for mørtelprismer, hvor alle forhold er holdt ens, men asketyper er erstattet. Resultaterne for mørtelprismernes styrkeudvikling er i det følgende vist og sammenlignet. Resultaterne er for henholdsvis 5%, 7,5% og 10% cementerstatning med træaske og flyveaske. I bilag B er resultaterne for trykstyrkemålingerne anført.

De viste og diskuterede værdier er gennemsnitsværdier beregnet i henhold til DS/EN 196-1. Der er altså ingen garanti for at disse værdier er den sande middelværdi og tryktestes et nyt sæt prismes vil der fremkomme en lidt anden gennemsnitsværdi for trykstyrkerne.

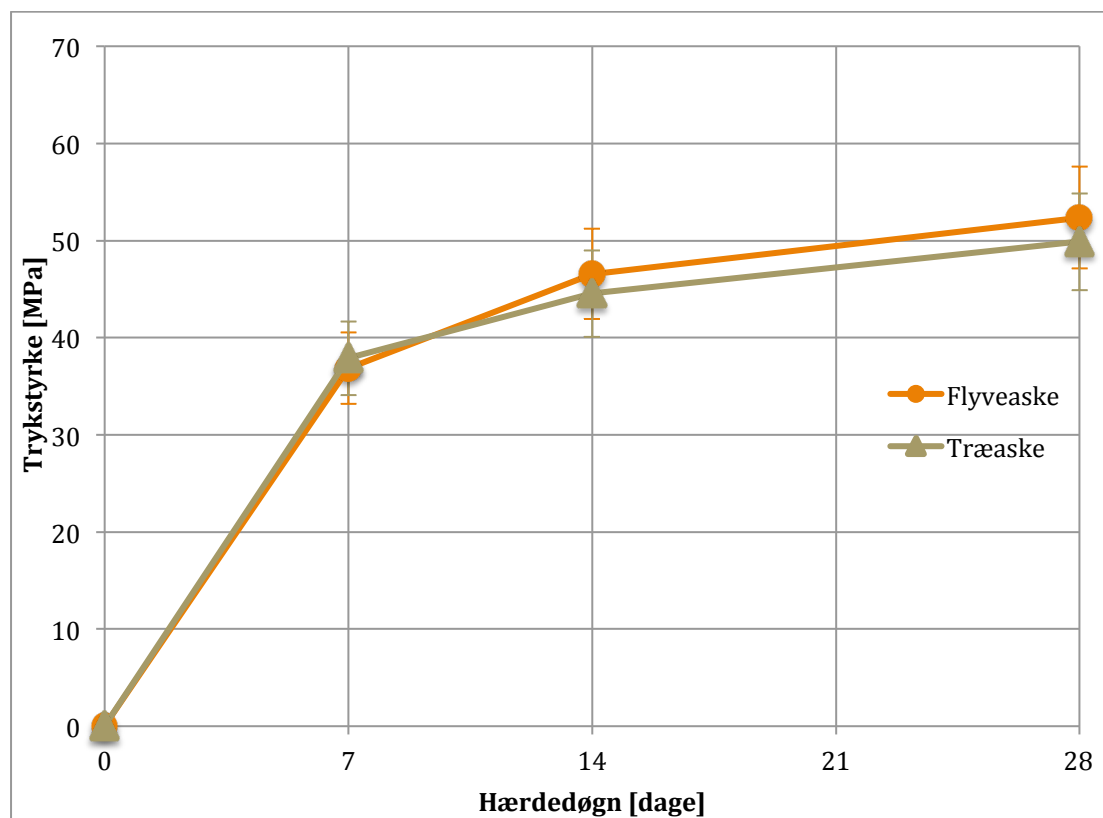
På Figur 15 vises resultaterne for prismes med 5% cementerstatning, hvor spredningen er medtaget for +/-10% af resultaterne.



Figur 15 Trykstyrkeresultater for 5% askeerstatning

Efter syv hærdedøgn er den målte trykstyrke for begge asketyper på 39MPa. Efterfølgende hærdedøgn viser dog et billede af en højere styrkeudvikling for prismes med flyveaske, og efter 28 hærdedøgn når træasken op på 49MPa og prismes med flyveaske når 51MPa. Udviklingen i forskellen er dog ikke voldsomt stor og de to asketyper følges pænt ad og er meget ens. Tages usikkerheden for resultaterne i betragtning, vurderes det, at de to asketyper giver en ensartet styrkeudvikling. Dog giver flyveasken en meget mere linear udvikling.

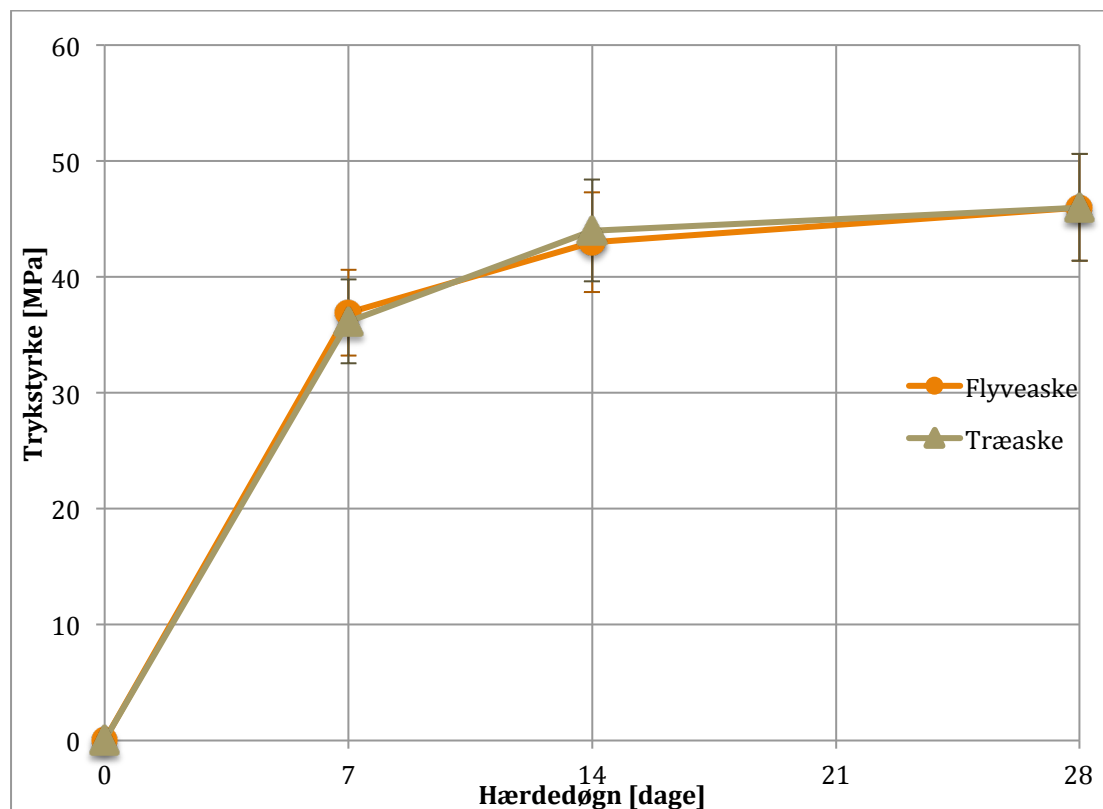
På Figur 16 fremgår resultaterne for mørtelprismer med 7,5% cementerstatning. Som for resultaterne med 5% erstatning følges de to mørtelprismer ligeledes meget tæt.



Figur 16 Trykstyrkeresultater for 7,5% askeerstatning

Efter 7 hærdedøgn opnår prismene med træaske en styrke på 38MPa og for flyveasken en styrke på 37MPa. Medtages usikkerheden i resultaterne svinger de ligeledes indenfor det samme område. Efter 28 hærdedøgn er flyveasken dog blevet en smule stærkere og opnår således en styrke på 52MPa, hvor prismen med træaske kun opnår 50MPa.

På Figur 17 fremgår resultaterne for prismer med 10% cementerstatning. Her konstateres ligeledes en meget ens styrkeudvikling for de to asketyper.



Figur 17 Trykstyrkeresultater for 10% askeerstatning

Efter 7 hærdedøgn opnår flyveasken en styrke på 37MPa og træasken en styrke på 37MPa. Efter 28 hærdedøgn opnår begge asketyper en styrke på 46MPa. Ved at se på spredningen på figuren er der ligeledes ingen synlig forskel mellem disse to asketyper.

Styrkeudviklingen i prismerne med træaske er meget lig udviklingen i prismer med flyveaske. Det generelle billede er dog at prismer med træaske har en smule lavere trykstyrke end prismer med flyveaske. For prismer med 10% askeerstatning ligger trykstyrken dog endnu tættere. Resultatet giver dog anledning til at vurdere at de to asketyper giver den samme trykstyrke. Da flyveaske specielt efter 28 hærdedøgn bidrager til styrkeudviklingen er det muligt at der vil være en højere styrkeudvikling for recepter med flyveaske efter 28 hærdedøgn. Dette er dog ikke undersøgt i denne rapport.

7.2.6 Aktivitetsfaktor til Bolomeys formel

På baggrund af resultaterne fra trykstyrkemålinger, er det ved hjælp af Bolomeys formel forsøgt at beregne aktivitetsfaktoren for mørtelrecepter med træaske. For recepter med flyveaske er det forklaret, hvorledes det blev forsøgt at eftervise en aktivitetsfaktor på 0,5 som angivet i teorien. Det er ligeledes forklaret, hvorledes det ikke er muligt at kunne fastsætte en præcis aktivitetsfaktor, hverken for flyveaske eller træasken.

Aktivitetsfaktoren er beregnet på baggrund af følgende formelomskrivning hvor Bolomeys formel er præsenteret i teoriafsnittet som:

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

og omskrives her til:

$$k = \frac{(f_c + 0,5K)V - C \cdot K}{K \cdot P}$$

Hvor :

f_c - trykstyrken i MPa

K - er en konstant der afhænger af cementtype og hærdetid

V - indholdet af vand

C - indholdet af cement

α - er en konstant der afhænger af cementtype og hærdetid

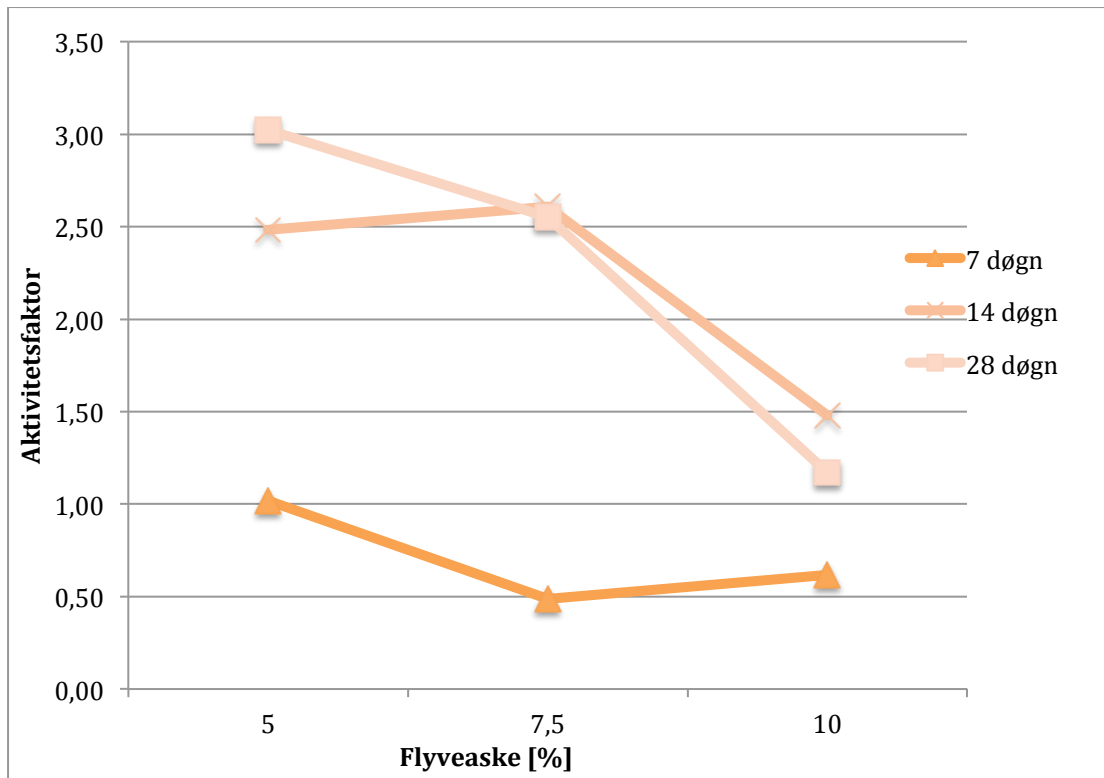
k - er aktivitetsfaktoren for den pågældende puzzolan

P - er indholdet af puzzolanen i blandingen

Resultater for beregninger af aktivitetsfaktoren findes i bilag B.

På Figur 18 er aktivitetsfaktoren for mørtelrecepter med flyveaske plottet med hensyn til det procentmæssige indhold.

Her kunne det forventes at se en aktivitetsfaktor på 0,5. Dette er dog ikke tilfældet og der er heller ikke en lineær linje for aktivitetsfaktoren som teoretisk burde være tilfældet ud fra Bolomeys formel.

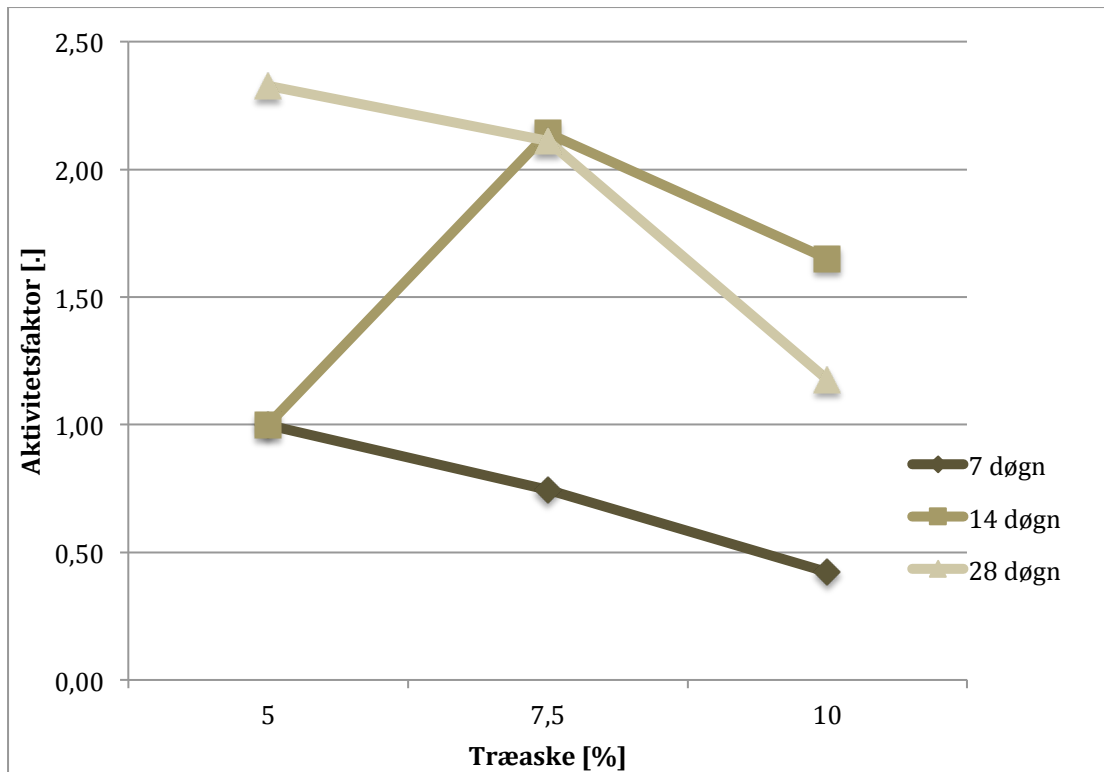


Figur 18 Aktivitetsfaktorer for mørtel med flyveaske

I stedet ses en noget utilregnelig aktivitetsfaktor og det må forventes at trykprøves et nyt sæt mørtelprismer med samme blandingsforhold vil der formentlig fremkomme helt andre kurver for aktivitetsfaktoren. Dog ses de laveste aktivitetsfaktorer ved lavest hærdetid, hvilket hænger sammen med at vi her ser de laveste værdier for trykstyrken.

Der er altså ingen bevis for, at aktivitetsfaktoren for flyveaske er 0,5 som antaget i teorien. Derimod er kun én aktivitetsfaktor af de ni angivet i Figur 18 lavere end 0,5. Det er aktivitetsfaktoren for 7,5% erstatning ved 7 hærdedøgn, der ligger på 0,49.

På Figur 19 er aktivitetsfaktoren for mørtelrecepter med træaske som erstatning præsenteret på samme måde som i Figur 18. For træaske er der ikke på forhånd kendskab til en aktivitetsfaktor og derfor ville ensartede værdier i Figur 19 måske have givet belæg for at bestemme en aktivitetsfaktor for træaske. Dette er dog langt fra tilfældet og der kan ikke fastsættes en præcis værdi for aktivitetsfaktoren.

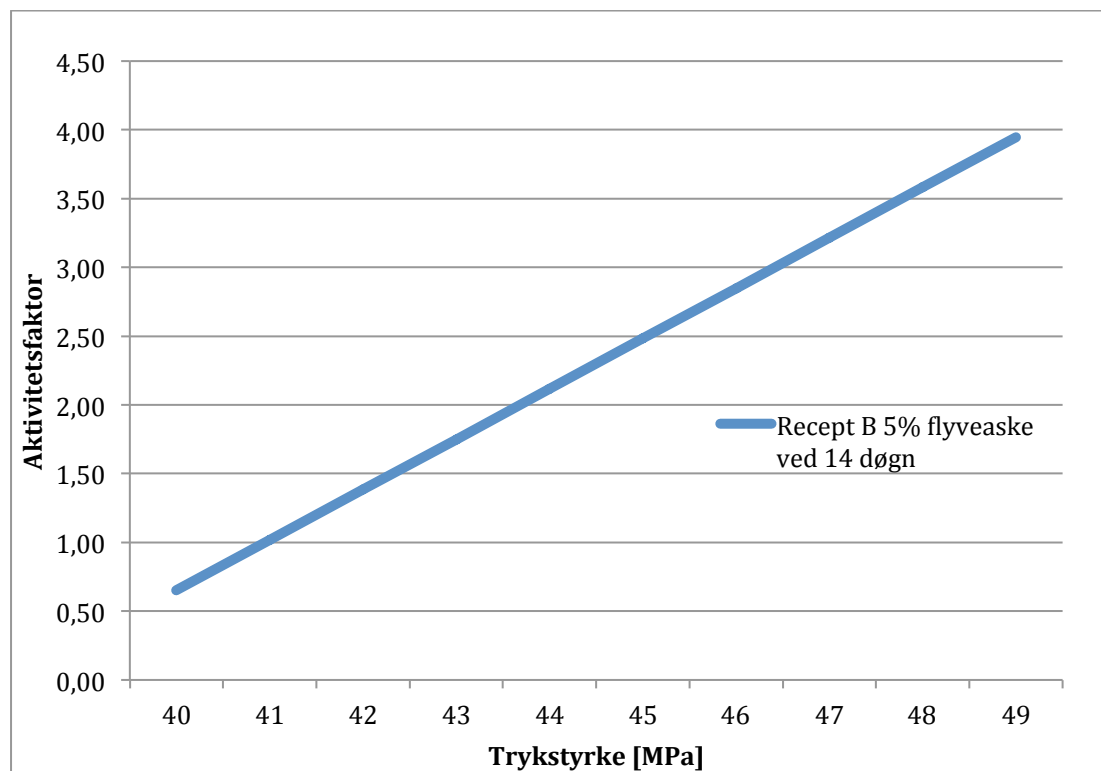


Figur 19 Aktivitetsfaktorer for mørtel med træske

På både Figur 18 og Figur 19 ses der en lille tendens til, at aktivitetsfaktoren er faldende ved højere askeindhold. Dette hænger sammen med, at trykstyrken bliver lavere ved højere indhold af aske.

For yderligere at illustrere hvor besværligt det kan være at bestemme en aktivitetsfaktor er der i Figur 20 vist værdier for aktivitetsfaktoren ved målte trykstyrker. På figuren er der taget udgangspunkt i resultaterne for mørtelprismer med 5% flyveaske som erstatning ved 14 hærde døg, benævnt i bilag B som recept B hvor resultaterne fremgår.

Den beregnede middelværdi er 45MPa og spredningen på +/- 10% ligger fra 40MPa til 49MPa.



Figur 20 Aktivetsfaktor for recept B 5% flyveaske ved 14 døg. På x-akse er angivet +/-10% spredningen af middelværdi på 45MPa

I intervallet fra 40MPa til 49MPa går aktivitetsfaktoren fra ca. 0,5 til ca. 4,00. Derfor er der indenfor +/-10% spredningen af trykstyrken en meget stor forskel i aktivitetsfaktoren. Derfor er der ud fra forsøg i denne rapport ikke mulighed for at kunne fastlægge en bestemt aktivitetsfaktor for træaske. Det er heller ikke muligt i denne rapport at eftervise den af betonindustrien benyttede aktivitetsfaktor for flyveaske på 0,5.

7.2.7 Statistisk bestemmelse af aktivitetsfaktor

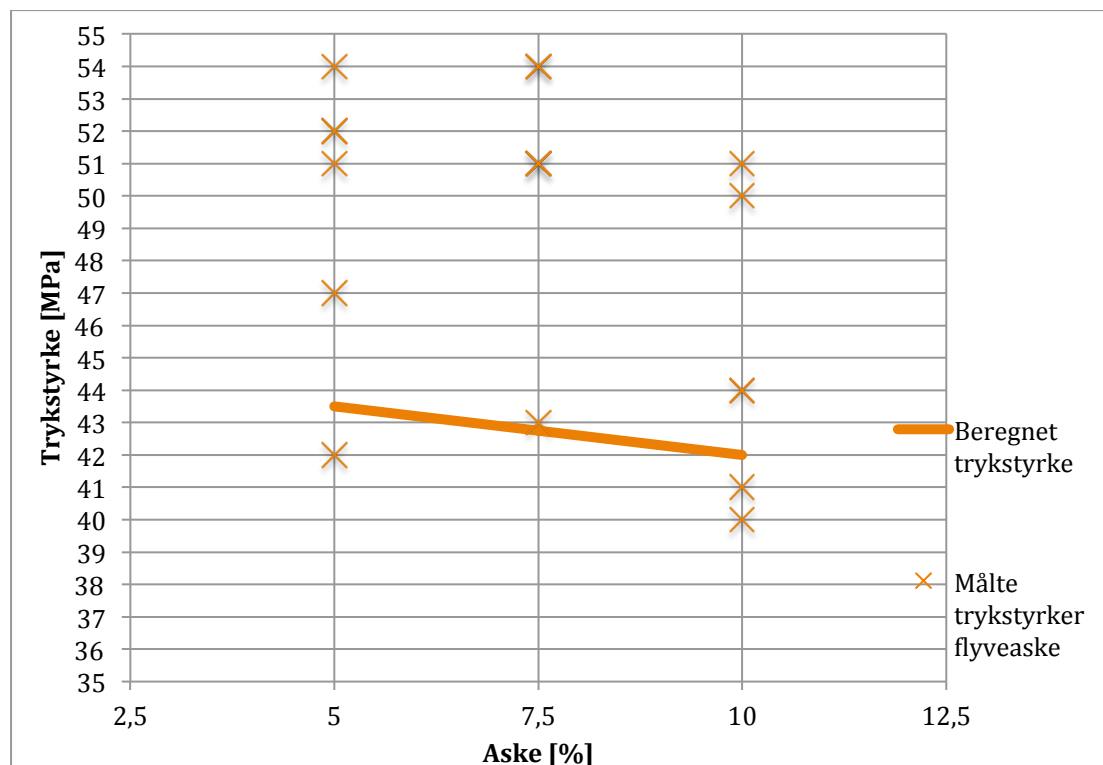
I teoriafsnittet blev det kort beskrevet, hvorledes trykstyrken for en beton beregnes i henhold til DS/EN 206-1 som en 5% fraktil.

Ved at forsøge at benytte den beregnede trykstyrke som 5% fraktilen, kan en højeste værdi for aktivitetsfaktoren bestemmes. Således at aktivitetsfaktoren vælges så en målt trykstyrke med 95% sandsynlighed vil være lig med eller højere end den beregnede trykstyrke.

Dette kræver dog en tilpas mængde målte værdier før en normalfordeling kan opstilles. Der er i dette projekt udelukkende udført seks tryktest ved hver enkelt aske % og der redegøres i dette afsnit for, hvorfor en normalfordeling ikke vurderes at kunne opstilles på baggrund af kun seks målinger.

Først vurderes de målte trykstyrker i forhold til den beregnede trykstyrke. Trykstyrken beregnes efter Bolomeys formel som følgende:

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



Figur 21 Trykstyrkemålinger i forhold til beregnet trykstyrke for prismer med flyveaske

Figur 21 viser de målte værdier for trykstyrken med flyveaske efter 28 hærdedøgn. Her ses det at alle målinger undtagen tre er højere end den beregnede. Den beregnede trykstyrke er ved 5% aske erstatning beregnet til 43,5MPa og falder 0,3MPa/% til 42MPa ved 10% erstatning.

Til beregning af trykstyrken er der benyttet en aktivitetsfaktor på 0,5. Hvis der benyttes en lavere aktivitetsfaktor, vil den beregnede trykstyrke blive lavere og hvis der benyttes en højere aktivitetsfaktor, vil den beregnede trykstyrke blive højere. På denne måde kan den beregnede trykstyrke altså flyttes op og ned, så det passer med, at den beregnede trykstyrke bliver 5% fraktilen ved en normalfordeling.

Ved at se på Figur 21 er der en indikation af, at den beregnede trykstyrke kan være 5% fraktilen, men det er ikke muligt at bevise, da dette som nævnt tidligere, kræver at der opstilles en tilpas normalfordeling til de målte data. Da der på Figur 21 ses en meget stor spredning på de målte værdier og da der samtidig kun er seks observationer for hver aske % vil det være forbundet med

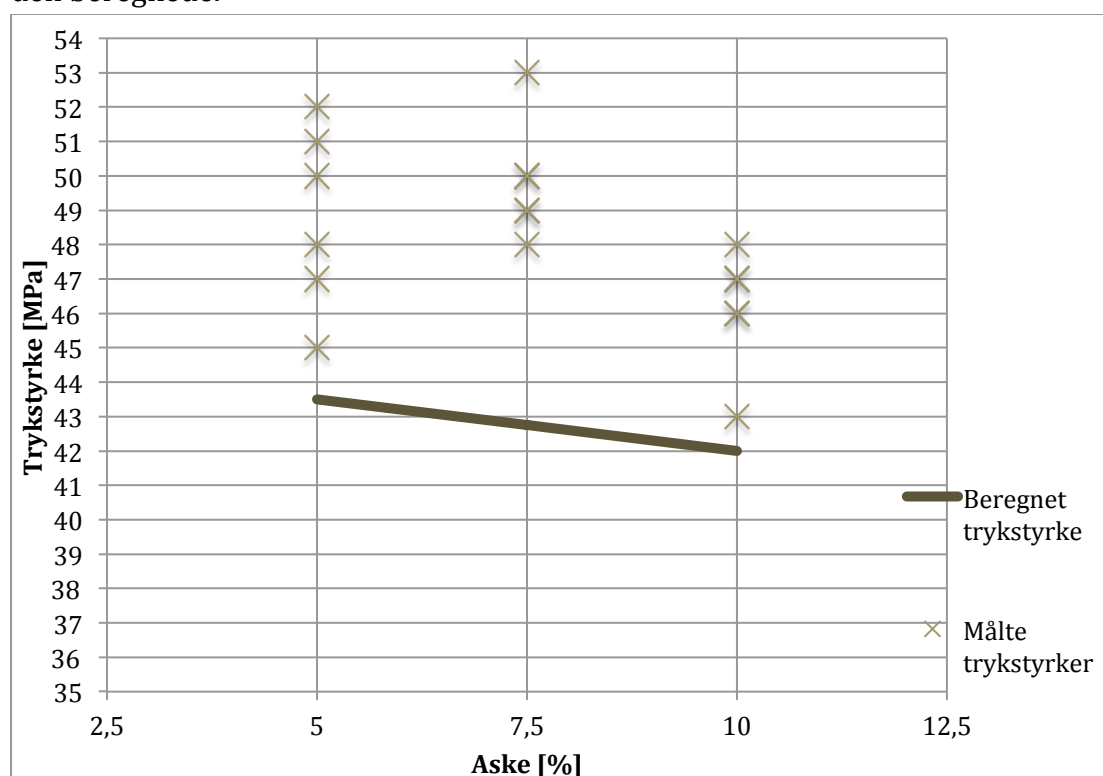
en stor usikkerhed at bestemme en tilpas præcis middelværdi. Dette kan demonstreres ved at se på et 95% konfidensinterval for middelværdien som beregnes efter formel 3-5 metode 3.8 i [Enote3]. Først beregnes en middelværdi til 49,67MPa og en spredning på 4,41MPa. Middelværdien og spredningen er beregnet for trykstyrkemålinger med 5% flyveaske og trykstyrkemålingerne fremgår af bilag B.

Her beregnes konfidensintervallet:

$$49,67MPa \pm 2,57 \cdot \frac{4,41MPa}{\sqrt{6}} = [45,07MPa; 54,30MPa]$$

Hvor de 2,57 stammer fra t-fraktilen for en tilnærmet normalfordeling med 5 frihedsgrader. 95% konfidensintervallet der er beregnet viser, at med 95% sandsynlighed er den sande middelværdi et sted imellem 45,07MPa og 54,30MPa. Der er således en spredning på ca. 9MPa og det vurderes derfor, at en middelværdi ikke kan bestemmes med en tilfredsstillende præcision til, at en normalfordeling kan opstilles. Uden denne normalfordeling er det ikke muligt at beregne 5% fraktilen.

På Figur 22 er de målte trykstyrker for prismer med træaske plottet i forhold til den beregnede.



Figur 22 Trykstyrkemålinger i forhold til beregnet trykstyrke for prismer med træaske

Her ses det, at alle de målte trykstyrker er højere end den beregnede. Dette medfører, at den benyttede aktivitetsfaktor på 0,5 muligvis er for lav til, at den beregnede trykstyrke kan være 5% fraktilen, da 100% af målingerne ligger over

den beregnede. Her kunne aktivitetsfaktoren sættes op i forsøget på at finde 5% fraktilen. Dette er dog ikke gjort, da der ligeledes her er for få målinger til at kunne opstille en passende normalfordeling.

7.3 Videre forskning

Da der i denne rapport er fundet et meget stort sammenfald mellem trykstyrken på prismer med flyveaske og træaske, vil det være oplagt at foretage yderligere målinger for at se, hvorvidt dette billede fortsætter eller om der var tale om et tilfælde. Samtidig vil det være interessant at se på styrkeudviklingen efter 28 hærdedøgn for at se om de to asketyper giver den samme udvikling ved længere hærdetid.

Hvis der ved yderligere målinger stadig ses en ensartethed i trykstyrken, kan der arbejdes videre med et af hovedformålene med denne rapport, der var at forsøge at bestemme en aktivitetsfaktor for træaske.

Dette kan gøres ud fra forslag til, hvordan en højeste værdi for aktivitetsfaktoren kan bestemmes ved hjælp af en 5% fraktil.

Som beskrevet i foregående afsnit er det nødvendigt at have et tilpas antal målinger for at kunne danne en normalfordeling. Antallet af målinger afhænger i meget høj grad af, hvor præcist man ønsker at kunne bestemme middelværdien og spredningen. Derfor bør der først foretages yderligere trykstyrkemålinger, således at konfidensintervallet for middelværdi og spredning bliver mindre. Det foreslås derfor, at der foretages yderligere fjorten målinger for prismer med henholdsvis 5% og 10% træaskeerstatning. Dette vil medføre, at der tilsammen er 20 målinger for hver % cementerstatning, hvilket gør, at antallet af observationer nærmer sig kravene i den centrale grænseværdisætning, hvor der dog anbefales ikke færre end 30 observationer. [Enote3]

Ved 20 observationer er denne grænseværdi sætning ikke overholdt, men der kan dannes et billede af, hvor godt normalfordelt resultaterne er, og samtidig begynder konfidensintervallet at blive mere præcist, hvilket medfører, at der bedre kan vurderes et endeligt antal målinger.

Samtidig og hvad mere interessant er, at bliver konfidensintervallet ikke væsentligt mindre ved yderligere målinger, fortsætter spredningen altså med at være stor, hvilket betyder at der vil være en stor usikkerhed i at forsøge at forudsige en trykstyrke for mørtel blandet med træaske.

Derfor bør og kan det ikke afgøres på nuværende tidspunkt, hvor mange yderligere tryktest, der skal udføres før en højeste værdi for aktivitetsfaktoren kan bestemmes. Men der bør løbende vurderes, om der skal foretages yderligere test på baggrund af, hvad resultaterne viser.

Ved askekarakteristikken blev der fundet for høje værdier af blandt andet bly og cadmium. Det kan derfor være interessant at foretage en udvaskning af mørtelprismer med træaske, for at se hvor mange af disse stoffer vil blive ledt ud i miljøet. Samtidig bør der foretages forsøg, der kan vise, hvor nemt disse stoffer kan udvaskes af træasken, inden den benyttes i en mørtelblanding.

8 Konklusion

I rapporten blev mørtelblandinger tilsat træaske fra Amagerværket undersøgt. Disse blev sammenlignet med mørtelblandinger tilsat flyveaske.

Her blev trykstyrken undersøgt for mørtelblandinger med de to asketyper.

Trykstyrken viste sig at være særdeles ensartet og middelværdierne lå meget tæt på hinanden. Således var den højeste forskel mellem de to trykstyrker på +/- 2MPa. Medtages spredningen for de to resultater var der en lille tendens til at trykstyrken for prismer med flyveaske var højere end styrken for prismer med træaske.

Afbindingstiden for recepter med træaske var 200 min og var således 100 min længere end for recepter med flyveaske. Samtidig startede afbindingen ca. 100 min senere for recepter med træaske.

Sætmålsprøverne viste lavere sætmål for mørtelrecepter med træaske. Således blev der fundet en forskel på ca. 30mm. Mørtelrecepten med 5% og 10% træaske havde sætmål på henholdsvis 149mm og 140mm og mørtelrecepter med flyveaske viste et sætmål på 179mm og 173,5mm. Dette viser, at træasken optager mere vand end flyveasken og kom til udtryk, da det var svært at vibrere mørtlen med 10% træaske ud i formen.

Porøsiteten for recepter med træaske blev ikke sammenlignet med recepter med flyveaske. Porøsiteten for mørtelrecept med 5% træaskeerstatning blev fundet til 0,185 og 0,194 for recepten med 10% træaske.

Askekaraktistikken for træasken viste en pH værdi på 12,98 og en meget høj ledningsevne på 70,4mS/cm. pH værdien var således basisk, hvilket er fint for en sund og god beton, og dette niveau af pH er samtidig med til at beskytte armeringsjern mod korrosion.

Glødetabet for træasken blev bestemt til 2,98% og kan således godkendes i henhold til DS/EN 450-1. Indholdet af cadmium, bly og zink overskred de tilladte grænser og på baggrund af dette kan træasken ikke godkendes i henhold til DS/EN 450-1. Der skal derfor udføres en syreudvaskning af asken for at nedbringe indholdet af disse metaller, før asken kan godkendes

Det lykkede ikke at bestemme en aktivitetsfaktor for træasken, ligesom det heller ikke lykkedes at eftervise en aktivitetsfaktor på 0,5 for flyveaske.

9 Referenceliste

Bøger

- [Aalborg Portland 2010] Aalborg Portland 2010: Cement og beton, 19 udgave, Aalborg Portland.
- [Geiger 2008] Geiger, M.; Nielsen, A. 2008: Materialebogen, D5 Beton, 1 udg., Nyt teknisk forlag
- [Herholdt 1985] Herholdt, Aage D.; Justensen, Chr. F. P.; Nepper-Christensen, Palle; Nielsen, Anders (1985): *Beton-Bogen*, 2. udgave, Aalborg Portland, Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor
- [Betonforening 2013] Dansk Betonforening 2013: *Beton håndbogen* 2013, Dansk Betonforening.

Undervisningsslides

- [Johanneson 2012] Johanneson, Bjørn 2012: Introduktion til beton, kursus 11735 Materialeleære, Danmarks tekniske universitet

Artikler

- [Beton teknik 1999]

Rapporter

- [Mathiasen, 2014] Mathiasen, Rikke Klavstrup 2014: Anvendelse af slamaske fra depot i beton, DTU byg, Danmarks tekniske universitet.

Internetsider

- [Enote3] ; <http://introstat.compute.dtu.dk/enote/afsnit/NUID174/> , 30/5-2016
- [DanskBeton.dk] ; <http://www.danskbeton.dk/artikler+-c12-+video/bæredygtighed/100+grunde+til+at+beton+styrer+verden> , 25/4-2016
- [AalborgPortland.dk] ; <http://www.aalborgportland.dk/default.aspx?m=4&i=109&pi=22&pr=5>

Danske standarder

- [DS/EN 196-1] Metoder til prøvning af cement Del 1: Styrkebestemmelse, 2. udgave, Dansk Standard.
- [DS/EN 196-2] Metoder til prøvning af cement Del 2: Kemisk analyse af cement, 1. udgave, Dansk Standard.

- [DS/EN 196-3] Metoder til prøvning af cement Del 3: Bestemmelse af afbindingstiden og volumenbestandighed, 3. udgave, Dansk Standard.
- [DS/EN 196-6] Metoder til prøvning af cement Del 6: Bestemmelse af finhed, 2. udgave, Dansk Standard.
- [DS/EN 196-8] Metoder til prøvning af cement Del 8: Hydratiseringsvarme - Opløsningsmetode, 2. udgave, Dansk Standard.
- [DS/EN 206-1] Beton, Materialer, Regler for anvendelse af EN 206-1 i Danmark, 4. udgave, Dansk Standard.
- [DS/EN 450-1] Flyveaske til beton Del 1: Definition, specifikationer og overensstemmelseskriterier, 3. udgave, Dansk Standard.

Bilag

A Forsøgsvejledninger

I det følgende er de udleverede forsøgsvejledninger til projektet gengivet. I visse tilfælde er der ikke udleveret en forsøgsvejledning, men i stedet udført en demonstration af en til rapporten tilknyttet laborant eller henvist til en Dansk standard. Ved disse tilfælde vil beskrivelsen ikke være medbragt her.

A1 Askekarakteristik

pH værdi

pH i 1 M KCl opslemning. L/S: 2,5

A Princip

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

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes pH-meter

C Kemikalie sikkerhed

Kaliumchlorid - Der foreligger ikke information, der gør det muligt at klassificere stoffet. Bruges med omtanke. Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.

D Reagenser

1) Kaliumchlorid 1 M KCl:

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

2) Bufferopløsning, pH 4,00:

Radiometer pH 4.

3) Bufferopløsning, pH 7,00:

Radiometer pH 7

E Analysens udførelse

5,00 g tør, knust jord afvejes på teknisk vægt i en 20 mL plast-vials. Der tilsættes 12,5 mL 1 M KCl med finpipette. Prøverne stilles på rystebord i 1 time.

Prøverne tages af og sedimenteres i 10 min. Der måles pH på prøverne.

F Beregning af resultat

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

G Affaldshåndtering

Kaliumchlorid og Metrohm pH 4 og pH 7 hældes i vasken. Plast-vials med jordopslemningen skal opsamles i beholder til jordaffald.

Ledningsevne

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 fuldpipette 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).

Glødetab

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.

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

E Affaldshåndtering

Jorden skal opsamles i beholder til jordaffald.

Vandindhold

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

Vandopløselighed

A Princip

Ved at foretage en skylning af asken skal der bestemmes hvor meget af 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

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

$Opløst\ materiale = (askefør) - (asketilbage)$

D Affaldshåndtering

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

Oplukning

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 stinkskaab ved afmåling.

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

Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.

D Reagenser

Salpetersyre halvkonc, (1:1) HNO_3 :

I en 1000,00 mL målekolbe som er 1/2 fyldt med destilleret vand. Der blandes godt og tilsættes vand til mærket. Efter blanding overføres opløsningen til en plastikflaske og mærkes.

E Analysens udførelse

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

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 1/2 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 stinkskab. Brug engangshandsker. Autoklaveflasken skylles med 3 gange destilleret vand. Filtreret skal suges tør mellem hvert skyl. Filtratet hældes i en 100,00 mL målekolbe og der tilsættes destilleret vand til mærket og blandes. Væsken hældes på en 20 mL plast-vials og gemmes til 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.

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

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 stinkskaftet.

Jorden og asken skal opsamles i beholder til jordaffald.

Vandopløselige anioner

Anioner

A Princip

En jordvæskes indhold af ioner og opløste forbindelser er af stor interesse. Denne analyse viser de primær 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

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

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 stinkskabet

Jord og aske skal opsamles i jord – og askeaffaldsspand

A2 Mørtelens fysiske egenskaber

Sætmål

Forsøgsbeskrivelse for sætmål

6. Materials

6.1 Hydraulic Cement Mortar—A mortar for which the determination of flow is specified or desired.

7. Procedure

7.1 Determination of Flow:

7.1.1 Carefully wipe the flow table clean and dry, and place the flow mold at the center. Place a layer of mortar about 25 mm (1 in.) in thickness in the mold and tamp 20 times with the tamper. The tamping pressure shall be just sufficient to ensure uniform filling of the mold. Then fill the mold with mortar and tamp as specified for the first layer. Cut off the mortar to a plane surface flush with the top of the mold by drawing the straightedge or the edge of the trowel with a sawing motion across the top of the mold. Wipe the table top clean and dry, being especially careful to remove any water from around the edge of the flow mold. Lift the mold away from the mortar 1 min after completing the mixing operation. Immediately drop the table 25 times in 15 s, unless otherwise specified.

7.1.2 If using the caliper specified in Specification C230/ C230M, measure the diameter of the mortar along the four lines scribed in the table top, recording each diameter as the number of caliper divisions, estimated to one tenth of a division. If some other caliper is being used, measure the diameter of the mortar along the four lines scribed in the table top, recording each diameter to the nearest millimetre.

8. Calculation

8.1 The flow is the resulting increase in average base diameter of the mortar mass, expressed as a percentage of the original base diameter. 8.2 If using the caliper specified in Specification C230/ C230M, add the four readings, and record the total. This gives the flow in percent. If using some other caliper, compute the flow in

percent by dividing "A" by the original inside base diameter in millimetres and multiplying by 100.

where: A = average of four readings in millimetres, minus the original inside base diameter in millimetres. Report the flow to the nearest 1 %.

Porøsitet/densitet

Forsøgsbeskrivelse for porøsitet og densitet

Anvendelsesområde:

Metoden anvendes til for et uorganisk, porøst materiale såsom beton, tegl og gasbeton, at bestemme porøsitet og densitet.

Referencer:

Metoden er en bearbejdet udgave af metode TI-B-25 fra Teknologisk Institut, Byggeteknik, 1983. Denne baserer sig på en RILEM Standard udgivet i *Materiaux et Constructions* Vol. 10, nr. 58.

Definitioner, begreber og symboler:

Vægtkonstans regnes at gælde, når prøvelegemets masse ikke ændrer sig mere end 0,1% i løbet af 4 timer.

| | |
|--------------------------------|---|
| m_0 [kg] | Masse af prøvelegemet før forsøget |
| m_{105} [kg] | Masse af prøvelegeme efter tørring ved 105 ° C. |
| m_{ssd} [kg] | Masse af prøvelegeme efter tørring ved 105 ° C. |
| m_{sw} [kg] | Masse af vakuumvandmættet prøvelegeme, vejet i vand |
| V [m ³] | Prøvelegemets volumen |
| $V_{på}$ [m ³] | Volumen af åbne porer |
| P_f [kg/m ³] | Faststofdensitet |
| P_d [kg/m ³] | Tørdensitet |
| P_{ssd} [kg/m ³] | Densitet af prøvelegeme i vakuumvandmættet, overfladetør tilstand |
| P_a [kg/m ³] | Prøvelegemets åbne porøsitet |
| U_{ssd} [kg/kg] | Vandtørstofforhold i vakuumvandmættet, overfladetør tilstand |

Prøveudtagning

Antallet af prøver bestemmes ud fra statistisk analyse.

Prøvelegemets størrelse bestemmes ud fra, hvor meget materiale, der er til rådighed, og ud fra, om det pågældende materiale er svært at vandmætte.

Hvis prøvelegemer er cementbaserede materialer skal opbevares i længere tid før prøvningen, må de beskyttes mod kemiske forandringer såsom karbonatisering.

Apparatur:

- Varmeskab til udtørring ved $105 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Ekssikator med silicagel til opbevaring af prøvelegemerne under afkøling.
- Vægt, hvor prøvelegemernes masse kan bestemmes med en nøjagtighed på 0,1%- vægtskontrollod.
- Udstyr til vejning af prøvelegeme under vand. - Destilleret vand. - Termometer ($0,1^\circ\text{C}$ deling).
- Vakuumpumpe til tryk på ca. 100 N/m^2 . - Ekssikator til vakuummætning af prøvelegemer.
- Klude.

Fremgangsmåde:

I tilfælde af, at man skal måle kapillarsugning på de samme prøvelegemer, skal sugningen, jf. LBM-PM-1, være udført først.

Prøvelegemer tørres ved $105 \pm 5^\circ\text{C}$ i en ventileret ovn til vægskonstans. Tørring ved 105°C kan for nogle materialer medføre ændringer i porestrukturen. Disse materialer bør tørres ved en lavere temperatur. Derefter afkøling i ekssikator til stuetemperatur. Prøvelegemet vejes (vægt m_{105}).

Det udtørrede prøvelegeme evakueres kontinuerligt tørt i ekssikator i mindst 3 timer ved tryk på.

Demineraliseret vand med rumtemperatur ledes ind i ekssikatoren. Prøvelegemer skal være helt dækket med vand og henstår ved dette tryk i mindst 1 time uden pumpning. Herefter ledes luft ind og prøverne henstår i vandet natten over ved atmosfæretryk.

De vandmættede prøvelegemer vejes i vand (vægt m_{sw}). Efter aftørring af overfladen med en hårdt opvredet klud, vejes prøvelegemer i luft (vægt m_{ssd}).

Efter tørringen udtørres prøverne ved $105 \pm 5^\circ\text{C}$ til vægskonstans og der foretages en kontrolvejning, så det kan konstateres, om der er sket en udvaskning af prøverne ved vandmætning.

Parametrene bestemmes jf. følgende formler:

$$\text{Densitet: } \rho_f = \frac{m_{105}}{V} \quad \rho_d = \frac{m_{105}}{(V - V_p)} \quad \rho_{ssd} = \frac{m_{ssd}}{V}$$

$$\text{Porøsitet: } p_a = \frac{V_p}{V}$$

$$\text{Vandtørstofforhold: } u_{ssd} = \frac{m_{ssd} - m_{105}}{m_{105}}$$

B Forsøgsresultater

B1 Askekarakteristik

I det følgende opstille resultater for askekarakteristik forsøg.

pH og ledningsevne

| pH værdi | | Ledningsevne | |
|----------|-------|--------------|------|
| 1 | 12,97 | 1 | 69,5 |
| 2 | 12,98 | 2 | 70,3 |
| 3 | 12,98 | 3 | 71,3 |
| Gnms. | 12,98 | Gnms. | 70,4 |

Glødetab

| Glødetab for træaske | | | | | | |
|----------------------|-------------------|----------------|----------|----------------|----------|--------------|
| Forsøg nr. | Vægt af digel [g] | Før varme | | Efter varme | | Glødetab [%] |
| | | digel+aske [g] | aske [g] | digel+aske [g] | aske [g] | |
| - | | | | | | |
| 1 | 13,58 | 16,08 | 2,50 | 16,01 | 2,43 | 3,00 |
| 2 | 12,41 | 14,91 | 2,50 | 14,83 | 2,43 | 3,05 |
| 3 | 12,41 | 14,92 | 2,50 | 14,84 | 2,43 | 2,88 |
| Gnms. | 12,80 | 15,30 | 2,50 | 15,23 | 2,43 | 2,98 |

Vandindhold

| Vandindhold | | | | | | | |
|-------------|------------------|---------------|----------|---------------|----------|----------|-----------------|
| Forsøg | Vægt af glas [g] | Før tørring | | Efter tørring | | | Vandindhold [%] |
| | | aske+glas [g] | aske [g] | aske+glas [g] | aske [g] | vand [g] | |
| 1 | 4,37 | 9,38 | 5,01 | 9,36 | 4,99 | 0,02 | 0,001 |
| 2 | 4,41 | 9,41 | 5,00 | 9,37 | 4,96 | 0,04 | 0,002 |
| 3 | 4,39 | 9,43 | 5,04 | 9,41 | 5,02 | 0,02 | 0,001 |
| Gnms. | 4,39 | 9,41 | 5,02 | 9,38 | 4,99 | 0,03 | 0,001 |

Vandopløselighed

| Vandopløselighed | | | | |
|------------------|--------|-----------------|------|-------|
| Før varme [g] | | Efter varme [g] | | |
| filter+glas | aske | filter+aske | aske | Tab % |
| 103,75 | 148,32 | 176,75 | 73 | 50,8 |

Oplukning

| Grundstof | [mg/kg] | % |
|-----------|-----------|--------|
| Al | 6387,78 | 0,639 |
| As | 4,40 | 0,000 |
| Ba | 789,57 | 0,079 |
| Ca | 137039,33 | 13,704 |
| Cd | 5,61 | 0,001 |
| Cr | 77,90 | 0,008 |
| Cu | 87,13 | 0,009 |
| Fe | 6225,66 | 0,623 |
| K | 148655,33 | 14,866 |
| Mg | 18372,73 | 1,837 |
| Mn | 3387,68 | 0,339 |
| Na | 4399,52 | 0,440 |
| Ni | 16,66 | 0,002 |
| P | 13643,10 | 1,364 |
| Pb | 57,16 | 0,006 |
| Se | 2,55 | 0,000 |
| Zn | 930,95 | 0,093 |

Vandopløselige anioner

| Type | [mg/kg] | % |
|-----------------|----------|-------------|
| Cl ⁻ | 50199,53 | 5,019952868 |
| NO ₃ | 169,44 | 0,016944491 |
| SO ₄ | 38931,63 | 3,89316271 |

B2 Støbeskema

I det følgende præsenteres recepterne der er støbt i denne rapport.

Mørtel recepter for trykprøvning

5% cement erstatning

| Navn | Dato for støbning | Type | Hærdetid | % erstatning | Cement | Flyveaske | Træaske | Vand | Sand | forsøg |
|-------------------------|-------------------|------|----------|--------------|--------|-----------|---------|--------|---------|--------------|
| - | - | - | dage | % | g | g | g | g | g | - |
| A | 18/feb | | 7 | 5 | 427,9 | 22,52 | - | 225 | 1350 | Trykprøvning |
| Flyveaske 7 døgns tryk | | | | | | | | | | |
| G1 | 03/mar | | 7 | 5 | 427,50 | - | 22,55 | 225 | 1350,30 | Trykprøvning |
| Træaske 7 døgns tryk | | | | | | | | | | |
| B | 18/feb | | 14 | 5 | 427,9 | 22,52 | - | 225 | 1350 | Trykprøvning |
| Flyveaske 14 døgns tryk | | | | | | | | | | |
| G2 | 25/feb | | 14 | 5 | 427,5 | - | 22,50 | 225,00 | 1350,3 | Trykprøvning |
| Træasken 14 døgns tryk | | | | | | | | | | |
| C | 18/feb | | 28 | 5 | 427,50 | 22,53 | - | 225 | 1350,1 | Trykprøvning |
| Flyveaske 28 døgns tryk | | | | | | | | | | |
| G3 | 03/mar | | 28 | 5 | 427,50 | - | 22,53 | 225 | 1350 | Trykprøvning |
| Træasken 28 døgns tryk | | | | | | | | | | |
| G2+ | 25/feb | | 68 | 5 | 427,51 | - | 22,50 | 225,00 | 1350,3 | Trykprøvning |
| Træasken 68 døgns tryk | | | | | | | | | | |

7,5% cement erstatning

| Navn | Dato for støbning | Type | Hærdetid | % erstatning | Cement | Flyveaske | Træaske | Vand | Sand | forsøg |
|------|-------------------|-------------------------|----------|--------------|--------|-----------|---------|--------|---------|-----------|
| - | - | - | dage | % | g | g | g | g | g | - |
| I1 | 26/apr | | 7 | 7,5 | 416,3 | 33,74 | - | 225 | 1350,05 | Trykprøve |
| | | Flyveaske 7 døgns tryk | | | | | | | | |
| J1 | 18/apr | | 7 | 7,5 | 416,3 | - | 33,76 | 225 | 1350,03 | Trykprøve |
| | | Træasken 7 døgns tryk | | | | | | | | |
| I2 | 31/mar | | 14 | 7,5 | 416,2 | 33,79 | - | 225 | 1350,40 | Trykprøve |
| | | Flyveaske 14 døgns tryk | | | | | | | | |
| J2 | 31/mar | | 14 | 7,5 | 416,2 | - | 33,80 | 225 | 1350,22 | Trykprøve |
| | | Træasken 14 døgn tryk | | | | | | | | |
| I3 | 17/mar | | 28 | 7,5 | 416,2 | 33,74 | - | 225 | 1350,11 | Trykprøve |
| | | Flyveaske 28 døgns tryk | | | | | | | | |
| J3 | 17/mar | | 28 | 7,5 | 416,3 | - | 33,75 | 225,00 | 1350,13 | Trykprøve |
| | | Træasken 28 døgns tryk | | | | | | | | |

10% cement erstatning

| Navn | Dato for støbning | Type | Hærdetid | % erstatning | Cement | Flyveaske | Træaske | Vand | Sand | forsøg |
|------|-------------------|-------------------------|----------|--------------|--------|-----------|---------|------|---------|--------------|
| - | - | - | dage | % | g | g | g | g | g | - |
| D | 18/feb | Referencen 7 døgns tryk | 7 | 10 | 405 | 45,02 | - | 225 | 1350,2 | Trykprøvning |
| H1 | 03/mar | Træasken 7 døgn tryk | 7 | 10 | 405,00 | - | 45,06 | 225 | 1350,00 | Trykprøvning |
| E | 18/feb | Reference 14 døgn tryk | 14 | 10 | 405,1 | 44,99 | - | 225 | 1350,1 | Trykprøvning |
| H2 | 25/feb | Træasken 14 døgn tryk | 14 | 10 | 405,00 | - | 45,02 | 225 | 1350,1 | Trykprøvning |
| F | 18/feb | Reference 28 døgn tryk | 28 | 10 | 405 | 45,03 | - | 225 | 1350,1 | Trykprøvning |
| H3 | 03/mar | Træasken 28 døgns tryk | 28 | 10 | 405,00 | - | 45,02 | 225 | 1350,00 | Trykprøvning |

Afbindingstid (Vicat)

| Navn | Dato for støbning | Type | Hærdetid | % erstatning | Cement | Flyveaske | Træaske | Vand | Sand | forsøg |
|-----------------|-------------------|------|----------|-----------------|--------|-----------|---------|--------|--------|--------|
| - | - | - | dage | % | g | g | g | g | g | - |
| V3 | 18/apr | | 0 | 5 | 427,6 | 22,56 | - | 225 | 1350,1 | 18/apr |
| Flyveaske Vicat | | | | | | | | | | |
| V1 | 25/feb | | 0 | 5 | 427,5 | - | 22,50 | 226 | 1350,1 | 25/feb |
| Træaske Vicat | | | | | | | | | | |
| V4 | 19/apr | | 0 | 10 | 405 | 45,06 | - | 225,00 | 1350 | 19/apr |
| Flyveaske Vicat | | | | | | | | | | |
| V2 | 26/feb | | 0 | 10 | 405,1 | - | 45,02 | 225 | 1350 | 26/feb |
| Træaske Vicat | | | | | | | | | | |

Sætmål

Sætmål 5% aske erstatning

| Navn | Dato for støbning | Type | Hærdetid | % erstatning | Cement | Flyveaske | Træaske | Vand | Sand | forsøg |
|------------------|-------------------|------|----------|-----------------|--------|-----------|---------|--------|--------|--------|
| - | - | - | dage | % | g | g | g | g | g | - |
| S3 | 18/apr | | 0 | 5 | 427,5 | 22,53 | - | 224,99 | 1350 | 18/apr |
| Flyveaske Sætmål | | | | | | | | | | |
| S1 | 25/feb | | 0 | 5 | 427,5 | - | 22,49 | 225,00 | 1350,1 | 25/feb |
| Træasken Sætmål | | | | | | | | | | |

Sætmål 10% aske erstatning

| Navn | Dato for støbning | Type | Hærdetid | % erstatning | Cement | Flyveaske | Træaske | Vand | Sand | forsøg |
|------------------|-------------------|------|----------|-----------------|--------|-----------|---------|--------|------|--------|
| - | - | - | dage | % | g | g | g | g | g | - |
| S4 | 18/apr | | 0 | 10 | 405,1 | 45,04 | - | 225,12 | 1350 | Sætmål |
| Flyveaske Sætmål | | | | | | | | | | |
| S2 | 25/feb | | 0 | 10 | 405 | - | 45,02 | 225 | 1350 | Sætmål |
| Træasken Sætmål | | | | | | | | | | |

Porøsitet

| Navn | Dato for støbning | Type | Hærdetid | % erstatning | Cement | Flyveaske | Træaske | Vand | Sand | forsøg |
|------|-------------------|--------------------------------|----------|--------------|--------|-----------|---------|------|--------|-----------|
| - | - | - | dage | % | g | g | g | g | g | - |
| P1 | 03/mar | Træaske Porøsitet/ densitet | 28 | 5 | 427,5 | - | 22,51 | 225 | 1350,2 | Porøsitet |
| P2 | 03/mar | Træaske Porøsitet/ densitet | 28 | 10 | 405,1 | - | 45,11 | 225 | 1350 | Porøsitet |

Kappilarsugning

| Navn | Dato for støbning | Type | Hærdetid | % erstatning | Cement | Flyveaske | Træaske | Vand | Sand | forsøg |
|------|-------------------|----------------------------|----------|--------------|--------|-----------|---------|------|---------|-----------------|
| - | - | - | dage | % | g | g | g | g | g | - |
| K1 | 03/mar | Træaske Kappilarsugning | 28 | 5 | 427,5 | - | 22,55 | 225 | 1350,1 | Kappilarsugning |
| K2 | 03/mar | Træaske Kappilarsugning | 28 | 10 | 405,1 | - | 45,05 | 225 | 1350,00 | Kappilarsugning |

B3 Mørtlens fysiske egenskaber

Afbindingstid

Afbindingstid

| | % erstatning | 5% erstatning | | 10% erstatning | |
|----|--------------|---------------|---------|----------------|---------|
| | Aske type | Flyveaske | Træaske | Flyveaske | Træaske |
| | Prøvenavn | V3 | V1 | V4 | V2 |
| | Tid | Måling | Måling | Måling | Måling |
| | [min] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] |
| 1 | 0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,1 |
| 2 | 10 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| 3 | 20 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 0,1 |
| 4 | 30 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| 5 | 40 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| 6 | 50 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| 7 | 60 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 8 | 70 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 9 | 80 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 10 | 90 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 11 | 100 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 12 | 110 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 13 | 120 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 14 | 130 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| 15 | 140 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 16 | 150 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 17 | 160 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 0,0 |
| 18 | 170 | 10,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 19 | 180 | 22,8 | 0,0 | 12,9 | 0,0 |
| 20 | 190 | 26,1 | 0,3 | 8,0 | 0,0 |
| 21 | 200 | 33,2 | 13,6 | 25,6 | 0,0 |
| 22 | 210 | 26,9 | 5,4 | 29,9 | 0,0 |
| 23 | 220 | 31,9 | 15,3 | 26,4 | 0,0 |
| 24 | 230 | 34,4 | 18,9 | 32,8 | 0,0 |
| 25 | 240 | 31,7 | 24,0 | 32,4 | 0,0 |
| 26 | 250 | 32,0 | 28,1 | 33,9 | 0,0 |
| 27 | 260 | 36,5 | 30,7 | 35,9 | 9,3 |
| 28 | 270 | 39,7 | 31,7 | 36,2 | 0,2 |
| 29 | 280 | 40,7 | 32,1 | 39,0 | 0,0 |
| 30 | 290 | 40,6 | 30,1 | 38,3 | 0,0 |
| 31 | 300 | 40,7 | 33,1 | 38,6 | 0,1 |
| 32 | 310 | 39,8 | 33,7 | 38,9 | 19,1 |
| 33 | 320 | 40,0 | 33,5 | 39,5 | 17,6 |
| 34 | 330 | 40,0 | 35,7 | 38,8 | 20,9 |
| 35 | 340 | 39,3 | 35,4 | 38,6 | 19,0 |
| 36 | 350 | 39,0 | 32,3 | 38,4 | 26,9 |
| 37 | 360 | 36,4 | 36,2 | 38,5 | 26,5 |
| 38 | 370 | 40,3 | 36,2 | 38,8 | 27,3 |

| | | | | | |
|----|-----|------|------|------|------|
| 39 | 380 | 39,9 | 36,4 | 39,3 | 1,4 |
| 40 | 390 | 40,5 | 36,8 | 39,9 | 34,8 |
| 41 | 400 | 41,5 | 36,9 | 40,2 | 31,1 |
| 42 | 410 | 40,8 | 36,9 | 40,2 | 34,0 |
| 43 | 420 | 40,6 | 36,8 | 39,8 | 33,4 |
| 44 | 430 | 40,5 | 36,7 | 39,9 | 34,3 |
| 45 | 440 | 40,5 | 36,3 | 40,2 | 35,3 |
| 46 | 450 | 40,5 | 36,9 | 40,2 | 34,5 |
| 47 | 460 | 39,8 | 35,1 | 39,9 | 36,1 |
| 48 | 470 | 39,8 | 36,3 | 39,4 | 35,0 |
| 49 | 480 | 40,0 | 37,7 | 38,3 | 35,6 |
| 50 | 490 | 40,6 | 37,6 | 39,5 | 36,8 |
| 51 | 500 | 40,9 | 37,4 | 39,8 | 37,1 |
| 52 | 510 | 41,3 | 37,2 | 40,6 | 37,4 |
| 53 | 520 | 41,5 | 37,5 | 40,5 | 37,8 |
| 54 | 530 | 40,7 | 37,6 | 40,2 | 37,3 |
| 55 | 540 | 41,1 | 37,1 | 39,9 | 37,2 |
| 56 | 550 | 41,1 | 36,9 | 39,8 | 38,0 |
| 57 | 560 | 40,8 | 37,7 | 40,1 | 37,2 |
| 58 | 570 | 40,5 | 37,9 | 40,1 | 36,4 |
| 59 | 580 | 40,2 | 37,7 | 39,4 | 37,1 |
| 60 | 590 | 40,7 | 37,6 | 39,4 | 37,2 |
| 61 | 600 | 41,0 | 37,8 | 40,2 | 37,6 |
| 62 | 610 | 40,8 | 37,8 | 40,1 | 38,3 |
| 63 | 620 | 41,2 | 37,9 | 40,3 | 38,2 |
| 64 | 630 | 41,4 | 37,3 | 40,5 | 37,3 |
| 65 | 640 | 40,9 | 37,6 | 40,6 | 37,6 |
| 66 | 650 | 40,6 | 37,8 | 40,3 | 37,2 |
| 67 | 660 | 40,3 | 37,8 | 40,0 | 37,1 |
| 68 | 670 | 40,7 | 38,3 | 39,4 | 37,5 |
| 69 | 680 | 40,8 | 37,8 | 40,0 | 38,4 |
| 70 | 690 | 41,1 | 37,9 | 41,0 | 38,2 |
| 71 | 700 | 41,1 | 38,2 | 40,5 | 38,3 |
| 72 | 710 | 40,9 | 37,6 | 40,6 | 38,4 |
| 73 | 720 | 41,0 | 37,6 | 40,4 | 38,0 |
| 74 | 730 | 41,2 | 38,2 | 40,5 | 37,8 |
| 75 | 740 | 40,7 | 38,4 | 40,0 | 37,7 |
| 76 | 750 | 41,0 | 36,5 | 39,9 | 38,6 |
| 77 | 760 | 41,1 | 38,2 | 40,2 | 38,2 |
| 78 | 770 | 41,3 | 37,9 | 40,6 | 38,7 |
| 79 | 780 | 41,1 | 38,1 | 40,4 | 38,0 |
| 80 | 790 | 41,1 | 38,5 | 40,2 | 37,8 |
| 81 | 800 | 40,6 | 38,1 | 40,1 | 37,6 |
| 82 | 810 | 41,3 | 37,9 | 39,8 | 38,4 |
| 83 | 820 | 41,1 | 38,3 | 40,3 | 38,5 |
| 84 | 830 | 41,2 | 38,1 | 40,6 | 38,4 |
| 85 | 840 | 40,8 | 38,3 | 40,3 | 38,4 |
| 86 | 850 | 41,1 | 38,1 | 40,3 | 38,4 |

Sætmål

Sætmål for mørtelblandinger

| Aske type | % erstatning | Måling 1 | Måling 2 | Måling 3 | Måling 4 | Gns. |
|-----------|--------------|----------|----------|----------|----------|-------|
| - | [%] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] |
| Flyveaske | 5 | 178 | 178 | 180 | 180 | 179 |
| Træaske | 5 | 145 | 151 | 153 | 148 | 149 |
| Flyveaske | 10 | 174 | 174 | 176 | 170 | 173,5 |
| Træaske | 10 | 141 | 143 | 139 | 135 | 140 |

Porøsitet/Densitet

| Porøsitet/densitet af mørtelprøver efter 28 hærdedøgn | | | | | | | | | |
|---|-----------|----------------|-----------|---|-------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Rumtemp: 26°C | | Vandtemp: 24°C | | Vanddensitet $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ | | Porøsitet | | Densitet | |
| | m_{105} | m_{sw} | m_{ssd} | V | $V_{på}$ | P_a | ρ_d | ρ_f | ρ_{ssd} |
| Prøve | [kg] | [kg] | [kg] | [m ³] | [m ³] | [m ³ /m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] |
| P1_1 | 0,542 | 0,329 | 0,590 | 0,00026 | 0,00005 | 0,184 | 2077 | 2545 | 2261 |
| P1_2 | 0,534 | 0,324 | 0,582 | 0,00026 | 0,00005 | 0,186 | 2070 | 2543 | 2256 |
| P1_3 | 0,528 | 0,320 | 0,575 | 0,00026 | 0,00005 | 0,184 | 2071 | 2538 | 2255 |
| Gns. P1 | | | | | | 0,185 | 2072 | 2542 | 2257 |
| P2_1 | 0,520 | 0,315 | 0,568 | 0,00025 | 0,00005 | 0,193 | 2053 | 2546 | 2247 |
| P2_2 | 0,519 | 0,315 | 0,568 | 0,00025 | 0,00005 | 0,196 | 2049 | 2547 | 2245 |
| P2_3 | 0,523 | 0,318 | 0,572 | 0,00025 | 0,00005 | 0,192 | 2055 | 2545 | 2248 |
| Gns. P2 | | | | | | 0,194 | 2053 | 2546 | 2246 |

Prøve

| | |
|----|------------------------|
| P1 | 5% træaske erstatning |
| P2 | 10% træaske erstatning |

Hvor:

| | |
|--------------|---|
| m_{105} | Masse af prøvelegmet efter tørring ved 105°C |
| m_{sw} | Masse af vakuumvandmættet prøvelegme vejret i vand |
| m_{ssd} | Masse af prøvelegmet vejret over vand efter vakuumvandmætning |
| V | Prøvelegmets volumen |
| $V_{på}$ | Volumen af åbne porer |
| P_a | Prøvelegmets åbne porøsitet |
| ρ_d | Tørdensitet |
| ρ_f | Faststofdensitet |
| ρ_{ssd} | Densitet af prøvelegme i vakuumvandmættet overfladetør tilstand |

Kappilarsugning

| Tid [min] | 0,00 | 1,00 | 2,00 | 4,00 | 8,00 | 16,00 | 32,00 | 60,00 | 120,00 | 240,00 | 360,00 | 1516,00 | Højde [m] | Bredde [m] | Areal [m ²] |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|-----------|------------|-------------------------|
| Tid [sqrt(s)] | 0,00 | 1,00 | 1,41 | 2,00 | 2,83 | 4,00 | 5,66 | 7,75 | 10,95 | 15,49 | 18,97 | 38,94 | | | |
| K1_1 Vægt [kg] | 0,5215 | 0,5222 | 0,5224 | 0,5226 | 0,5229 | 0,5233 | 0,5240 | 0,5249 | 0,5260 | 0,5273 | 0,5281 | 0,5304 | 0,0385 | 0,0385 | 0,0015 |
| Q [kg/m ²] | 0,0000 | 0,4930 | 0,6483 | 0,7699 | 0,9387 | 1,2156 | 1,7424 | 2,3030 | 3,0458 | 3,9373 | 4,4911 | 6,0241 | | | |
| K1_2 Vægt [kg] | 0,5210 | 0,5219 | 0,5221 | 0,5223 | 0,5226 | 0,5232 | 0,5237 | 0,5246 | 0,5258 | 0,5272 | 0,5281 | 0,5306 | 0,0385 | 0,0382 | 0,0015 |
| Q [kg/m ²] | 0,0000 | 0,5926 | 0,7561 | 0,8924 | 1,0695 | 1,5054 | 1,8665 | 2,4795 | 3,2901 | 4,2438 | 4,8364 | 6,5258 | | | |
| K1_3 Vægt [kg] | 0,5194 | 0,5204 | 0,5206 | 0,5208 | 0,5211 | 0,5216 | 0,5224 | 0,5234 | 0,5249 | 0,5266 | 0,5278 | 0,5309 | 0,0385 | 0,0382 | 0,0015 |
| Q [kg/m ²] | 0,0000 | 0,6200 | 0,7836 | 0,9403 | 1,1243 | 1,4581 | 1,9964 | 2,6982 | 3,6930 | 4,8854 | 5,6622 | 7,8085 | | | |
| Gnms. | 0,0000 | 0,5686 | 0,7293 | 0,8675 | 1,0442 | 1,3931 | 1,8684 | 2,4936 | 3,3430 | 4,3555 | 4,9966 | 6,7861 | | | |
| K2_1 Vægt [kg] | 0,5190 | 0,5198 | 0,5200 | 0,5202 | 0,5205 | 0,5210 | 0,5217 | 0,5226 | 0,5236 | 0,5248 | 0,5255 | 0,5276 | 0,0385 | 0,0382 | 0,0015 |
| Q [kg/m ²] | 0,0000 | 0,5780 | 0,7343 | 0,8363 | 1,0131 | 1,3871 | 1,8767 | 2,4546 | 3,1686 | 3,9777 | 4,4673 | 5,8816 | | | |
| K2_2 Vægt [kg] | 0,5158 | 0,5167 | 0,5169 | 0,5171 | 0,5173 | 0,5177 | 0,5184 | 0,5191 | 0,5210 | 0,5214 | 0,5222 | 0,5245 | 0,0384 | 0,0377 | 0,0014 |
| Q [kg/m ²] | 0,0000 | 0,6008 | 0,7458 | 0,8701 | 1,0359 | 1,3259 | 1,7610 | 2,2927 | 3,5634 | 3,8603 | 4,3921 | 5,9597 | | | |
| K2_3 Vægt [kg] | 0,5201 | 0,5209 | 0,5211 | 0,5213 | 0,5215 | 0,5219 | 0,5225 | 0,5233 | 0,5242 | 0,5255 | 0,5263 | 0,5285 | 0,0384 | 0,0383 | 0,0015 |
| Q [kg/m ²] | 0,0000 | 0,5776 | 0,7136 | 0,8291 | 0,9786 | 1,2572 | 1,6718 | 2,1747 | 2,8475 | 3,6698 | 4,2202 | 5,7085 | | | |
| Gnms. | 0,0000 | 0,5855 | 0,7312 | 0,8452 | 1,0092 | 1,3234 | 1,7698 | 2,3073 | 3,1931 | 3,8359 | 4,3599 | 5,8499 | | | |

Trykstyrkemåling

5% cement erstatning

| Prøve [nr.] | Hærdetid [døgn] | Bredde [mm] | Højde [mm] | Længde [mm] | Vægt [g] | Tryk 1 | | Tryk 2 | | Middel [Mpa] | Minus 10% middel [Mpa] | Plus 10% middel [Mpa] |
|----------------|--------------------|----------------|---------------|----------------|-------------|--------|-------|--------|-------|-----------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | | | | | | [kN] | [Mpa] | [kN] | [Mpa] | | | |
| A1_1 | 7 | 39,60 | 40,07 | 161,5 | 559,85 | 66 | 42 | 61 | 38 | | | |
| A1_2 | 7 | 40,00 | 39,57 | 161,5 | 557,43 | 49 | 31 | 56 | 35 | | | |
| A1_3 | 7 | 39,83 | 40,50 | 161,5 | 565,64 | 60 | 37 | 67 | 42 | 39 | 35 | 43 |
| G1_1 | 7 | 40,40 | 40,20 | 160,1 | 573,74 | 70 | 43 | 61 | 38 | | | |
| G1_2 | 7 | 40,13 | 40,00 | 160,2 | 573,21 | 55 | 34 | 59 | 37 | | | |
| G1_3 | 7 | 40,10 | 40,03 | 160,1 | 566,90 | 69 | 43 | 59 | 37 | 39 | 35 | 43 |
| B1_1 | 14 | 44,67 | 40,00 | 160,9 | 573,70 | 77 | 43 | 69 | 39 | | | |
| B1_2 | 14 | 40,00 | 40,00 | 160,8 | 567,56 | 70 | 44 | 71 | 44 | | | |
| B1_3 | 14 | 40,00 | 40,00 | 160,8 | 568,76 | 77 | 48 | 73 | 46 | 45 | 40 | 49 |
| G2_1 | 14 | 40,37 | 40,00 | 160,9 | 569,53 | 73 | 45 | 61 | 38 | | | |
| G2_2 | 14 | 40,27 | 40,20 | 160,7 | 568,82 | 68 | 42 | 36 | 22 | | | |
| G2_3 | 14 | 40,23 | 40,00 | 160,6 | 570,40 | 67 | 42 | 64 | 40 | 41 | 37 | 45 |
| C1_1 | 28 | 40,43 | 40,00 | 160,7 | 574,81 | 83 | 51 | 68 | 42 | | | |
| C1_2 | 28 | 40,20 | 40,03 | 160,4 | 570,36 | 84 | 52 | 83 | 52 | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|----|-------|-------|-------|--------|----|----|----|----|----|----|----|
| C1_3 | 28 | 40,60 | 40,10 | 160,4 | 578,29 | 88 | 54 | 76 | 47 | 51 | 46 | 56 |
| G3_1 | 28 | 40,37 | 40,17 | 160,8 | 573,81 | 85 | 52 | 81 | 50 | | | |
| G3_2 | 28 | 40,33 | 40,07 | 160,8 | 574,10 | 78 | 48 | 82 | 51 | | | |
| G3_3 | 28 | 40,00 | 40,10 | 160,3 | 571,24 | 76 | 47 | 72 | 45 | 49 | 44 | 54 |
| G2_1+ | 68 | 40,03 | 40,10 | 160,3 | 568,79 | 86 | 54 | 84 | 52 | | | |
| G2_2+ | 68 | 40,13 | 39,90 | 160,3 | 559,93 | 83 | 52 | 82 | 51 | | | |
| G2_3+ | 68 | 40,10 | 40,30 | 160,2 | 575,82 | 86 | 53 | 79 | 49 | 52 | 47 | 57 |

7,5% cement erstatning

| Prøve [nr.] | Hærdetid [døgn] | Snit [mm] | Snit [mm] | Snit [mm] | Vægt [g] | Tryk 1 [kN] | Tryk 1 [Mpa] | Tryk 2 [kN] | Tryk 2 [Mpa] | Middel [Mpa] | Minus 10% middel [Mpa] | Plus 10% middel [Mpa] |
|-------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|----------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|------------------------|-----------------------|
| I1_1 | 7 | 39,97 | 40,00 | 160,1 | 563,15 | 59 | 37 | 61 | 38 | | | |
| I1_2 | 7 | 40,13 | 40,10 | 160,3 | 571,05 | 58 | 36 | 60 | 37 | | | |
| I1_3 | 7 | 40,10 | 40,03 | 160,2 | 567,77 | 60 | 37 | 57 | 36 | 37 | 33 | 41 |
| J1_1 | 7 | 40,13 | 40,20 | 160,1 | 565,35 | 62 | 38 | 63 | 39 | | | |
| J1_2 | 7 | 40,20 | 40,17 | 160,3 | 568,03 | 64 | 40 | 58 | 36 | | | |
| J1_3 | 7 | 40,30 | 40,10 | 160,2 | 566,48 | 61 | 38 | 59 | 37 | 38 | 34 | 42 |
| I2_1 | 14 | 40,67 | 40,07 | 160,2 | 580,81 | 81 | 50 | 73 | 45 | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|------|----|-------|-------|-------|--------|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | | | | | | | | | | |
| I2_2 | 14 | 40,87 | 40,20 | 160,2 | 590,79 | 74 | 45 | 39 | 24 | | | |
| I2_3 | 14 | 40,70 | 40,07 | 160,3 | 579,55 | 75 | 46 | 77 | 47 | | | |
| | | | | | | | | | | 47 | 42 | 51 |
| J2_1 | 14 | 40,13 | 40,10 | 160,3 | 566,01 | 74 | 46 | 77 | 48 | | | |
| J2_2 | 14 | 39,43 | 40,13 | 160,2 | 544,14 | 70 | 44 | 68 | 43 | | | |
| J2_3 | 14 | 39,67 | 40,07 | 160,2 | 546,73 | 66 | 42 | 71 | 45 | | | |
| | | | | | | | | | | 45 | 40 | 49 |
| I3_1 | 28 | 40,77 | 40,10 | 160,2 | 579,74 | 89 | 54 | 84 | 51 | | | |
| I3_2 | 28 | 40,70 | 40,10 | 160,3 | 574,13 | 84 | 51 | 83 | 51 | | | |
| I3_3 | 28 | 40,90 | 40,13 | 160,2 | 583,36 | 88 | 54 | 70 | 43 | | | |
| | | | | | | | | | | 52 | 47 | 58 |
| J3_1 | 28 | 40,13 | 40,07 | 160,3 | 570,27 | 81 | 50 | 85 | 53 | | | |
| J3_2 | 28 | 39,97 | 40,00 | 160,2 | 546,9 | 79 | 49 | 76 | 48 | | | |
| J3_3 | 28 | 40,03 | 40,07 | 160,1 | 569,07 | 79 | 49 | 80 | 50 | | | |
| | | | | | | | | | | 50 | 45 | 55 |

10% cement erstatning

| Prøve [nr.] | Hærdetid [døgn] | Snit [mm] | Snit [mm] | Snit [mm] | Vægt [g] | Tryk 1 | | Tryk 2 | | Middel [Mpa] | Minus 10% middel [Mpa] | Plus 10% middel [Mpa] |
|----------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------|-------|--------|-------|-----------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | | | | | | [kN] | [Mpa] | [kN] | [Mpa] | | | |
| D1_1 | 7 | 40,07 | 40,10 | 160,1 | 563,78 | 59 | 37 | 57 | 35 | | | |
| D1_2 | 7 | 40,10 | 40,10 | 160,2 | 565,72 | 60 | 37 | 60 | 37 | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|------|----|-------|-------|-------|--------|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | | | | | | | | | | |
| D1_3 | 7 | 40,07 | 40,13 | 160,1 | 563,43 | 60 | 37 | 60 | 37 | 37 | 33 | 41 |
| H1_1 | 7 | 40,07 | 40,07 | 160,2 | 573,88 | 60 | 37 | 60 | 37 | | | |
| H1_2 | 7 | 40,17 | 40,20 | 160,2 | 574,69 | 56 | 35 | 58 | 36 | | | |
| H1_3 | 7 | 40,03 | 40,23 | 160,3 | 564,78 | 57 | 35 | 42 | 26 | 36 | 33 | 40 |
| E1_1 | 14 | 40,07 | 40,07 | 160,9 | 577,78 | 72 | 45 | 71 | 44 | | | |
| E1_2 | 14 | 40,60 | 40,00 | 160,9 | 581,27 | 69 | 42 | 60 | 37 | | | |
| E1_3 | 14 | 40,50 | 40,00 | 160,8 | 584,07 | 65 | 40 | 72 | 44 | 43 | 39 | 48 |
| H2_1 | 14 | 40,27 | 40,10 | 160,4 | 570,59 | 73 | 45 | 76 | 47 | | | |
| H2_2 | 14 | 40,13 | 40,10 | 160,3 | 570,98 | 71 | 44 | 69 | 43 | | | |
| H2_3 | 14 | 40,03 | 40,13 | 160,4 | 563,23 | 69 | 43 | 64 | 40 | | | |
| | | | | | | | | | | 44 | 39 | 48 |
| F1_1 | 28 | 40,40 | 40,13 | 160,8 | 583,19 | 65 | 40 | 82 | 51 | | | |
| F1_2 | 28 | 40,40 | 40,10 | 160,9 | 575,50 | 81 | 50 | 72 | 44 | | | |
| F1_3 | 28 | 40,50 | 40,13 | 160,5 | 582,20 | 66 | 41 | 72 | 44 | | | |
| | | | | | | | | | | 46 | 41 | 51 |
| H3_1 | 28 | 40,47 | 40,10 | 160,5 | 573,84 | 75 | 46 | 78 | 48 | | | |
| H3_2 | 28 | 40,47 | 40,23 | 160,8 | 577,73 | 76 | 47 | 77 | 47 | | | |
| H3_3 | 28 | 40,17 | 40,17 | 160,9 | 570,88 | 74 | 46 | 69 | 43 | | | |

| | | | | | | |
|--|--|--|--|----|----|----|
| | | | | 46 | 42 | 51 |
|--|--|--|--|----|----|----|

DTU Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Technical University of Denmark

Brovej, Building 118
2800 Kgs. Lyngby
Telephone 45 25 17 00

www.byg.dtu.dk