

Anvendelse af alternativ aske i beton

Bearbejdelighed og afbindingsforløb



Amanda Helena Bonnerup
Nina Marie Sigvardsen

DiplomByg Afgangsprojekt

Department of Civil Engineering

Technical University of Denmark
Civil Engineering
June 2014

[Blank side]

Forord

Dette projekt er et DiplomByg afgangprojekt udført ved Institutet for Byggeri og Anlæg ved Danmarks Tekniske Universitet (DTU).

Projektet er en del af Zero Waste Byg, og belyser bearbejdelighed og afbindingsforløb af mørtel med træaske.

Afgangprojektet er vurderet til 20 ECTS-point, og er udarbejdet i foråret 2014.

L^AT_EX er anvendt til tekst, og beregninger samt grafer er udarbejdet i Excel.

Lektor MSK Lisbeth M. Ottosen har virket som hovedvejleder. Docent Per Goltermann og lektor Pernille Erland Jensen har virket som supplerende vejledere.

En generel tak til instituttet, og en speciel tak til laborantkoordinator Ebba Schnell, betonteknikker Per Leth, laborant Louise Birkemose og laborant Sabrina Madsen. Desuden en tak til Køge Kraftvarmeværk og Ulrik Jørgensen for levering af aske til projektet.

Kongens Lyngby

Juni 2014

[Blank side]

Sammenfatning

Det globale CO_2 -udslip er større end det nogen siden har været i menneskets historie. 5 % af CO_2 -udslippet kommer fra produktionen af cement. Derfor er det nødvendigt at finde en løsning, som kan nedbringe CO_2 -niveauet. En løsning af problemet kunne være at erstatte en del af cementen, som i dag anvendes i betonproduktion, med et CO_2 -neutralt produkt. I dette projekt undersøges, i hvor høj grad træaske fra Køge Kraftvarmeværk kan anvendes som erstatning for cement.

Indledningsvis udføres der en askekarakteristik for at fastlægge træaskens sammensætning. Asken knuses for at opnå en jævn kornstørrelsesfordeling, der svarer til kornstørrelsen af cement. Der foretages en undersøgelse af kornstørrelsesfordelingen, og det ses, at træasken tilhører kategori S jf. [DS/EN 450-1, 2012]. Glødetabet ligger på 2,89 %, hvilket overholder [DS/EN 450-1, 2012]. Træasken har en høj pH-værdi. Dette er positivt, da det vil bevare betonens naturligt basiske miljø. Ledningsevnen for træasken er høj, hvilket betyder, at den har nemt ved at indgå i reaktioner. Den høje ledningsevnen underbygges af vandopløseligheden, der ligger på 52,3 %. En stor del af træasken vil indgå i reaktioner ved tilsætning af vand og dermed kan mange komponenter vaskes ud af asken. Vandindholdet i træasken er 0,2 %. Dette skyldes, at asken er udtørret i varmeskab, og vandindholdet betragtes herefter som tilnærmelsesvis 0.

Indholdet af tungmetaller i træasken ligger lavt i forhold til parallelprojekternes aske, dog er indholdet af kalium højere i træasken. Kalium kan gå i forbindelse med klorid og danne et uønsket, korrosionsfremkaldende salt.

Saltindholdet i træasken, både fra depot og fra ovn, er højere end saltindholdet i parallelprojekternes aske. Træasken fra depot har et saltindhold på 8,90 %, og træasken fra ovn har et saltindhold på 6,76 %. Træasken fra ovn indholder mest klorid og nitrat, men træasken fra depot har et langt højere indhold af sulfat i forhold til alle andre aske. Sulfatindholdet medfører, at træasken fra depot samlet set får det højeste saltindhold af alle askerne.

Mørtlens trykstyrke falder jo mere aske der tilsættes. Når al cementen erstattes med aske opnår prøven ingen målbar trykstyrke. En 100 % cementerstatning kan imidlertid afbinde. Der ses, at der ikke er nogen forskel i afbindingforløbet, i forhold til referenceprøven, når der tilsættes aske i mørtel.

Flydesætmålet viser, at det er nødvendigt at tilsætte ekstra vand ved tilsætning af større mængder træaske. Flydesætmålet overholder [DS/EN 450-1, 2012] for en 5 % cementerstatning med træaske fra depot. Flydesætmålet skal vurderes på baggrund af [DS/EN 450-1, 2012] og ikke på øjemål. Ved 100 % cementerstatning er det nødvendige vandindhold vurderet ud fra [DS/EN 450-1, 2012].

Porøsiteten stiger, når der tilsættes træaske i mørtel, og samtidig falder densiteten. Over tid falder porøsiteten, mens densiteten stiger. Kapillarsugningsevnen stiger jo mere træaske der tilsættes. Dog er der ingen tydelig effekt ved tilsætning af små mængder træaske. Den høje porøsitet og kapillarsugningsevne gør mørtel med træaske uattraktiv som byggemateriale, da det kan fremme korrosion og organisk vækst.

På grundlag af forudgående undersøgelser er der valgt et fokus for de efterfølgende undersøgelser. Fokus er valgt på baggrund af en midtvejsevaluering i form af en posterpræsentation, se bilag H. Da træasken har et højt indhold af klorid, og da dette er et korrosionsfremkaldende salt, undersøges kloridens indflydelse på bearbejde-

lighed og afbindingsforløb. For at kunne se isoleret på effekten af klorid, vaskes træasken fri for alle salte, og der tilsættes klorid i form af NaCl. Massen af nitrat, sulfat og klorid beregnes på baggrund af saltenes molar masse. Den ækvivalente mængde klorid tilsættes en udvasket aske og blandes i mørtelen. Yderligere ses der på et ekstremt tilfælde, hvor der tilsættes fem gange mere NaCl til asken inden den blandes i mørtelen. Dette gøres for at fremprovokere et større udsving i resultaterne.

Det ses, at trykstyrken stiger ved tilsætning af NaCl, dog kun til en vis grænse (trykstyrken stiger ikke ved tilsætning af meget NaCl). Både trykstyrken for mørtelen med udvasket aske og mørtlen med udvasket aske tilsat NaCl, ligger højere end trykstyrken for en 5 % cementerstatning med ikke-udvasket træaske. Dette indikerer, at det er sulfat eller nitrat, som er årsag til den relativt lavere trykstyrke.

Flydesætmålet øges ved tilsætning af NaCl. Klorid forbedrer altså mørtelens bearbejdelighed, da klorid forbliver frie anioner i mørtlen.

Mørtlen afbinder hurtigere for den udvaskede aske end en 5 % cementerstatning med ikke-udvasket træaske. Der ses dog ingen ændring ved tilføjelse af NaCl i forhold til mørtelen med udvasket aske. Det forventes, at nitrat forbliver frie anioner, og dermed må det altså være indholdet af sulfat i asken der er afgørende for afbindingsforløbet.

Videre forskning kan underbygge denne rapport's resultater i forbindelse med tilsætning af NaCl. Det vil være relevant at undersøge en tilsætning af NaCl til ikke-udvasket træaske. Det kan undersøges, hvorvidt kloriden har samme påvirkning her, som den har på udvasket træaske. Herunder kan det undersøges, hvorvidt tilsætning af NaCl kan erstatte en del af vandet i mørtlen, således at det samme flydesætmål opnås, men til gengæld fås en større styrke.

En udvasket træaske tilsat NaCl har samme anvendelsesmuligheder som ikke-udvasket træaske. Overordnet set har tilsætningen af træaske ikke en positiv effekt på betonens egenskaber. Derfor skal beton eller mørtel tilsat træaske anvendes i et passivt miljø og ikke i større bærende konstruktioner.

Abstract

The global CO_2 -emission is bigger now than it has ever been in the history of mankind. 5 % of the CO_2 -emission originates from the production of cement. It is necessary to find a solution, to reduce the CO_2 -level. A solution to this problem could be to find a way to replace a part of cement used in the production of concrete with a CO_2 -neutral product. This project investigates to which degree wood-ash from KØge Kraftvarmeværk can be used as a substitution for cement.

First, an ash-characterization is executed to determine the composition of wood-ash. The wood-ash is crushed to obtain an even distribution of grain size, which is similar to the grain size of cement. An investigation of the distribution of grain size is executed. This investigation shows that the wood-ash falls into category S, according to [DS/EN 450-1, 2012]. The loss of ignition is 2,89 %, which complies with [DS/EN 450-1, 2012]. The wood-ash has a high pH-value. This is positive, since it will retain the alkaline environment of the concrete. The conductivity of the wood-ash is high, which causes the wood-ash to easily enter in chemical reactions. The high conductivity is supported by the high solubility of 52,3 %. A large amount of the wood-ash will enter in a chemical reaction when water is added, and many components will be washed out of the wood-ash. The water content of the wood-ash is 0,2 %. This is due to the wood-ash being dried out in a heating cabinet, and the water content is hereafter approximately 0.

The content of heavy metals in the wood-ash is low compared to the ashes of the parallel projects. However, the content of potassium in the wood-ash is the highest of all the ashes. Potassium is capable of reacting with chloride and cause unwanted corrosion.

The salt content in the wood-ash, both from storage and from oven, is higher than the salt content of the ashes of the parallel projects. The wood-ash from storage has a salt content of 8,90 %, and the wood-ash from oven has a salt content of 6,76 %. The wood-ash from oven contains the most chloride and nitrate, and the wood-ash from storage has the highest sulphate content of all the ashes. The sulphate content causes the total content of salt in the wood-ash from storage to be the highest of all ashes.

The compressive strength of the mortar decreases when wood-ash is added. When all the cement is substituted with ash the mortar obtains no compressive strength. However, the 100 % substitution of cement is able to set. Compared to the REF there is no difference in setting time when ash is added to the mortar.

The slump test shows, that it is required to add extra water when larger amounts of wood-ash is mixed in the mortar. The slump test of a mortar with a 5 % wood-ash from storage substitution complies with [DS/EN 450-1, 2012]. The texture of the mortar should be estimated based on [DS/EN 450-1, 2012]. The necessary water content for 100 % substitution of cement with wood-ash from storage is determined from [DS/EN 450-1, 2012].

Porosity increases and density decreases, the more wood-ash is applied in the mortar. Over time, the porosity decreases, and the density increases. The capillary action increases the more wood-ash is applied in the mortar. There is no clear impact on the capillary action when a small amount of wood-ash is added to the mortar. The high porosity and capillary action make mortar with wood-ash unattractive as a building material since it increases the risk of corrosion and growth of mould and other organic material.

Based on preceding studies a focus for further research is chosen. The focus is chosen based on a poster presentation at midterm, appendix H. Since the wood-ash has a high content of chloride, and since this is a corrosion triggering substance, the influence of chloride and its impact on workability and hardening is researched. To be able to study the effect of chloride, all the salts in the wood-ash is washed away, and NaCl is added. The mass of nitrate, sulphate and chloride is calculated based on the molar mass of these salts. The equivalent amount of chloride is added to the washed-out wood-ash and mixed in the mortar. Furthermore, an extreme case is tested, where 5 times the NaCl is added to the mortar. This is done to provoke a larger deviation in the results.

It shows, that the compressive strength increases when NaCl is added, although only to a certain point (the compressive strength does not increase when an extreme amount of NaCl is added). The compressive strength for both the mortar with washed-out wood-ash, and washed-out wood-ash with NaCl, is higher than the compressive strength for a 5 % cement substitution with non-washed-out wood-ash. This indicates that sulphate or nitrate is the reason for the lower compressive strength.

The flow increases when NaCl is added. Chloride improves the workability of the mortar, since chloride stays as free anions.

Mortar containing a 5 % cement substitution with washed-out wood-ash sets faster, than the mortar containing a 5 % cement substitution with non-washed-out wood-ash. NaCl seems to have no impact on the setting time, compared to the mortar with washed-out wood-ash. Nitrate is expected to stay as free anions, and therefore sulphate must be the governing salt, in relation to the setting time.

Further research can support the results of this report. It would be relevant to test the influence of NaCl in non-washed-out wood-ash. Further research could show if the chloride has the same effect on non-washed-out wood-ash as it has on washed-out wood-ash. Among these it could be investigated if NaCl could replace some of the water in the mortar, and hereby obtaining a greater compressive strength.

A washed-out wood-ash added NaCl has the same applications as a non-washed-out wood-ash. Over all, the addition of wood-ash has no positive effect on the qualities of the concrete. Therefore, concrete with wood-ash must be used in a passive environment and not in larger, supporting constructions.

Indhold

1	Indledning	1
1.1	Baggrund	1
1.2	Rapportens opbygning	2
1.2.1	Forklaring af parallelprojekter og forkortelser	3
2	Teori	5
2.1	Tilsætning af aske i mørtel med fokus på salte	5
2.2	Trykstyrke	6
2.3	Flydesætmål	7
2.4	Afbindingsforløb	7
2.5	Porøsitet og densitet	8
2.6	Kapillarsugning	8
3	Eksperimentelt arbejde	11
3.1	Oversigt over forsøg	11
3.2	Oversigt over støbninger	12
3.3	Askekarakteristikker	13
3.4	Blanding af mørtel	14
3.5	Trykprøvning	16
3.6	Flydesætmål	17
3.7	Afbindingsforløb	18
3.8	Porøsitet og densitet	19
3.9	Kapillarsugning	19
4	Resultater og diskussion	21
4.1	Trin 1: Indledende undersøgelser af træasken	22
4.1.1	Aksekarakteristikker	22
4.1.2	Trykstyrke	28
4.1.3	Flydesætmål	29
4.1.4	Afbindingsforløb	30
4.1.5	Porøsitet og densitet	32
4.1.6	Kapillarsugning	34
4.2	Delkonklusion for undersøgelse af træaske fra depot og fra oven	35
4.2.1	Trin 2: Forslag til videre undersøgelser	35
4.2.2	Trin 3: Valg af videre undersøgelse	36
4.3	Trin 4: Tilsætning af NaCl i mørtel	37
4.3.1	Udvaskning af træaske fra depot og tilsætning af NaCl	37
4.3.2	Trykstyrke	38
4.3.3	Flydesætmål	38
4.3.4	Afbindingsforløb	39
4.3.5	Tilsætning af NaCl til mørtel med træakse fra depot og REF	40
4.4	Delkonklusion for tilsætning af NaCl i mørtel	41
5	Konklusion	43
6	Videre forskning	45

Litteratur	47
Bilag	49
A Forsøgsvejledninger	51
A.1 Vandopløselighed	51
A.2 Vandopløselige anioner	53
A.3 Vicatronic Manual	55
A.4 Porøsitet og densitet	61
A.5 Kapillarsugning	65
B Data for askekarakteristik	79
B.1 Data for glødetab, pH, ledningsevne, vandopløselighed og vandindhold	80
B.2 Tørring af uknust træaske fra depot	82
B.3 Rådata for ICP-målinger	84
B.4 Tungmetalindhold i aske	86
B.5 Rådata for IC-målinger for alle grupperes aske	88
B.6 Rådata for IC-målinger for træaske fra ovn	90
B.7 Rådata for IC-målinger for udvasket træaske fra depot	92
B.8 Saltindhold i aske	94
B.9 Maksimale indhold af Cl i beton i fht. cementvægten	95
B.10 Rådata for kornstørrelsefordelingen	96
B.11 Kornstørrelsefordeling	103
C Data for trykstyrke	107
C.1 Samlet skema over trykstyrker	109
C.2 Oversigt over målinger i trykstyrkeforsøg	111
C.3 Oversigt over målinger i trykstyrkeforsøg udført af Louise Birkemose	123
D Data for flydesætmål	127
E Data for afbindingstid	131
E.1 Data for afbindingstid for REF, 5 % CD, 10 % SD og 5 % CO	132
E.2 Data for afbindingstid for Udvaske, Udvaske + NaCl og Udvaske + meget NaCl	135
F Data for porøsitet og densitetsforsøg	139
G Data for kapillarforsøg	141
H Poster fra midtvejspræsentation	143

Tabeller

3.1	Støbeskema	12
3.2	Opskrift for mørtel med og uden aske	14
4.1	Sammenligning af askekarakteristikker	23
4.2	Ledningsevne for slamasker [Andreasen og Jørgensen, 2013]	23
4.3	Kategoriinddeling af træaske fra depot	25
4.4	Cl^- -forhold	27
4.5	Indhold af salte	27
4.6	Flydesætmaal	29
4.7	Indledende afbindingstid	30
4.8	Endelig afbindingstid	31
4.9	Udvaskning af salte fra træaske fra depot	37
4.10	Flydesætmaal for mørtel tilsat NaCl	39
4.11	Indledende afbindingstid for 5 % cementerstatning	40
4.12	Endelig afbindingstid for 5 % cementerstatning	40
B.1	Data for forsøg med vandindhold	80
B.2	Data for ledningsevne i træaske fra depot	80
B.3	pH-værdien for hver af de 3 målinger	80
B.4	Data for forsøg med glødetab	80
B.5	Data for vandopløselighed	81
B.6	Sammenligning af tungmetalindhold	87
B.7	Saltindhold i projektgruppens aske	94
B.8	Grænseværdier for indhold af klorid jf. [DS/EN 206-1, 2002]	95
C.1	Målinger af trykstyrke	107
C.2	Beregning af trykstyrke	107

[Blank side]

Figurer

2.1	Blanding af mørtel med flyveaske	5
2.2	Illustration af afbindings- og hærdeforløb for mørtel uden aske [Jensen et al., 2008]	6
2.3	Illustration af kapillarsugningsforsøg [Bilag A.5]	9
3.1	Ringknusning af aske	13
3.2	Hobart-blandemaskine til blanding af mørtel	15
3.3	Støbning af prismen	16
3.4	Opstilling til trykprøvning i Toni 300	16
3.5	Rystebord og form til måling af flydesætmål	17
3.6	De to retninger hvor mørtlen skal måles	17
3.7	Måling af afbindingstid med Vicatronic	18
3.8	Nedsynkningsmønster	18
3.9	Undertryk medfører, at der suges vand ind i eksikkatoren	19
3.10	Prismer på afstandsholdere i bakke	19
4.1	Procesdiagram for projektet	21
4.2	Kornstørrelsesfordelingen	22
4.3	Tungmetaller i askerne vist på logaritmisk skala	24
4.4	Indhold af Cl^-	25
4.5	Indhold af SO_4^{2-}	26
4.6	Indhold af NO_3^-	26
4.7	Styrkeudvikling for REF, 5 % CD, 10 %SD og 5 % CO	28
4.8	Afbindingstid for REF, 5 % CD, 10 % SD og 5 % CO	30
4.9	Porøsitet for REF, 5 % CD og 10 % SD på 7 og 28 døgn	32
4.10	Densitet for REF, 5 % CD og 10 % SD på 7 og 28 døgn	33
4.11	Illustration af densitets- og porøsitetsforholdene	33
4.12	Kapillarsugning for REF, 5 % CD og 10 % SD på 7 og 28 døgn	34
4.13	5 døgn trykstyrker	38
4.14	Afbindingstid for 5 % cementerstatning med udvasket, udvasket + 1,13g NaCl og udvasket + 5,65g NaCl	39

[Blank side]

1 | Indledning

Dette projekt omhandler blandinger af mørtel tilsat forskellige variationer træaske. Træaskens indflydelse på bearbejdelighed og afbindingsforløb undersøges.

Der udføres en karakteristik af træasken, hvor askens egenskaber, såsom indhold af salte og vandopløselighed, undersøges. Træasken blandes i mørtel og bearbejdelighed og afbindingsforløb undersøges. Der støbes prismen, som trykprøves, primært for at fastlægge styrkeudviklingen i det tidlige stadie af hærdeforløbet. Kapillarsugeevne, densitet og porøsitet undersøges som en stikprøvekontrol og sammenlignes med en referenceprøve for at sikre, at mørtlen er brugbar.

Sidst i projektet sættes fokus på saltes indflydelse på bearbejdelighed og afbindingsforløb - her undersøges især klorids påvirkning.

Undersøgelser af flyveaske er stadig på forsøgsbasis. Flyveasken, der undersøges i dette projekt, er træaske fra Køge Kraftvarmeværk, som ikke tidligere er undersøgt. Generelt findes der ikke meget teori om saltes påvirkning på mørtel med flyvaske. Der findes dog [DS/EN 450-1, 2012], som er en dansk standard for flyveaske. Heri kan der findes sammenlignelige værdier f.eks. for glødetab og inddeling i kategori efter kornstørrelsesfordelingen. Tungmetalindholdet i asken er sammenholdt med [BEK nr. 1662, 2010], som er en standard for anvendelse af forurenede jord.

Dette projekt er en del af et af et større projektfællesskab, som undersøger slamasker og flyvaskers indflydelse på mørtel. I de nuværende projekter er der sat fokus på bearbejdelighed og afbindingsforløb. Samtidig med dette projekt er der udarbejdet fire andre parallelprojekter med andre asker. Resultaterne i denne rapport vil blive sammenlignet med resultaterne fra de fire andre projekter.

Som nævnt ovenfor er træasken, som undersøges i dette projekt, hentet på Køge Kraftvarmeværk. Asken stammer fra afbrændt træ. Træet er restprodukter fra Junckers Industrier A/S, som fremstiller parketgulve. Træet er ask, merbau, ahorn, eg, jatoba og bøg.

1.1 Baggrund

På verdensplan står produktionen af cement for 5 % af det menneskeskabte CO_2 -udslip [Højteknologifonden, 2014]. I hele menneskets historie har CO_2 -koncentrationen aldrig været højere end den er i dag [Hoyer, 2013]. Derfor er det nødvendigt at foretage initiativer, der kan nedsætte CO_2 -udslippet. Dette kunne netop ske ved at nedsætte CO_2 -udslippet i forbindelse med cementproduktion eller ved at finde et CO_2 -neutralt produkt, der kan substituere al eller noget af den cement, der bruges i betonproduktion. Erstatning af cement med et andet materiale kan ikke blot have en miljømæssig gevinst, men også en økonomisk.

Det er vigtigt, at finde det rigtige CO_2 -neutrale produkt til at erstatte dele eller al cement med. Til erstatning af en del af cementen kan aske anvendes. Dette kan eksempelvis være flyvaske, som opsamles i et partikelfilter ved afbrænding af f.eks. træ eller kul.

På Køge Kraftvarmeværk har man i lang tid afbrændt træ tilsat støttebrændsel i form af fuelolie. Køge

Kraftvarmeværk har i april måned 2014 fået et nyt forbrændingsanlæg, hvor det ikke længere er nødvendigt at tilsætte støttebrændsel. Afbrændingen fra Køge Kraftvarmeværk har derfor indtil april ikke været helt CO_2 -neutral. Afbrændingen fra det nye forbrændingsanlæg er nu blevet helt CO_2 -neutralt. Derfor er der undersøgt en træaske fra hvert forbrændingsanlæg.

Køge Kraftvarmeværk sender i dag træasken til Langøya i Nordnorge, hvor asken genanvendes til neutralisering og mineralisering af affaldssyrer [DongEnergy, 2008]. Dette er hverken en økonomisk eller miljømæssig optimal måde at komme af med træasken på. Køge Kraftvarmeværk betaler for at komme af med asken, og samtidig er der et CO_2 -udslip forbundet med transporten fra Danmark til Norge. Det ville derfor være mere økonomisk og miljømæssigt forsvarligt at finde en anden måde at komme af med asken på i Danmark, som f.eks. at ved at anvende den i betonproduktion.

På baggrund af de økonomiske og miljømæssige fordele er det derfor interessant at vide, om tilsætning af træaske i beton har en effekt (positiv eller negativ) på betonens egenskaber. I dette projekt fokuseres især på træaskens indflydelse på bearbejdigheden og afbindingsforløbet.

1.2 Rapportens opbygning

Rapporten er skrevet i forventning om, at læseren har et fagligt niveau, der svarer til 7. semester på DiplomByg eller højere.

Rapportens opbygning er som følger:

Teori: Teoriafsnittet indeholder den nødvendige teori og repetition for at forstå de foretagne beregninger, samt behandlingen af resultaterne.

Eksperimentelt arbejde: Dette afsnit indeholder en oversigt og en beskrivelse af alle forsøg, der udføres i projektet. Der vil være henvisninger til de forsøgsvejledninger og standarder, der er brugt til forsøgene. Derfor er alle eksperimenter ikke beskrevet i detaljer.

Resultater og diskussion: Denne del er inddelt i fire procestrin, som beskriver fremgangsmåden i projektets udvikling.

De fire trin er:

- *Trin 1: Indledende undersøgelser af træasken.* Her foretages en række forsøg for at få en forståelse for, hvad asken indeholder og dens egenskaber.
- *Trin 2: Forslag til videre undersøgelser.* På baggrund af trin 1 udarbejdes en liste over, hvilke resultater der skiller sig ud, og hvilke emner der kunne være relevante at bruge i videre undersøgelser.
- *Trin 3: Valg af videre undersøgelse.* På baggrund af overvejelser og konklusionerne fra trin 2 udvælges et enkelt emne, som der ønskes undersøgt dybere. Det fastlægges, hvordan disse videre undersøgelser skal forløbe.
- *Trin 4: Fokus.* Her lægges fokus på det valgte emne fra trin 3, og der fokuseres på udvalgte undersøgelser. Resultaterne for disse præsenteres og diskuteres.

Videre forskning: "Resultater og diskussion" rejser en række nye spørgsmål og emner, som det i dette projekt ikke er muligt at arbejde med på grund af tidsbegrænsning. Emnerne er dog fortsat af stor relevans i forhold til en klarlægning af træaskens egenskaber og påvirkning af mørtel. Emnerne er listet i dette afsnit, for at eventuelle andre i projektfællesskabet kan arbejde videre hermed.

Konklusion: Den endelige konklusion på projektet.

1.2.1 Forklaring af parallelprojekter og forkortelser

De fire andre aske, som der sideløbende undersøges i parallelprojekterne, er henholdsvis samfyringsaske og tre slamasker.

- [Christiansen og Øster, 2014]: Samfyringsaske (flyveaske) af halm og træ fra Amagerværket.
- [Mathiasen, 2014]: Slamasker fra Avedøre Spildevandscenter fra depot.
- [Huntley, 2014]: Slamasker fra Avedøre Spildevandscenter fra ovn.
- [Rasmussen og Andersen, 2014]: Slamasker fra Lynettefællesskabet.

Der sammenlignes primært med samfyringsaske, [Christiansen og Øster, 2014], da denne er en flyvaske, der også indeholder træ.

Tabel 1.1 er en oversigt over de forkortelser, der anvendes gennem rapporten. Desuden er der angivet en farvekode for hver type af mørtelblanding, som er gennemgående for alle grafer og oversigter igennem hele rapporten. Der vil dog optræde forskellige nuancer af de angivne farver, hvis der er tale om samme mørtelblanding, men forskellig hærdetid. Der vil altid være en forklaring af farverne ved hver enkelt graf eller oversigt.

Tabel 1: Beskrivelse af forkortelser

Forkortelser	Beskrivelse	Farvekode
Træaske fra depot	Træaske taget fra depot	
Træaske fra ovn	Træaske taget direkte fra ovn	
REF	Referenceprøve uden aske	
5 % CD	5 % af Cementen erstattes af aske fra Depot	
10 % SD	10 % af Sandet erstattes af aske fra Depot	
5 % CO	5 % af Cementen erstattes af aske fra Ovn	
Udvasket aske	Træasken fra depot vasket fri for alle vandopløselige salte	
Udvasket aske + NaCl	Træasken fra depot vasket fri for alle vandopløselige salte og tilsat 1,13g NaCl	
Udvasket aske + 5 x NaCl	Træasken fra depot vasket fri for alle vandopløselige salte og tilsat 5,65g NaCl	

Der er hentet træaske fra Køge Kraftvarmeværk to gange i projektet. Træasken fra den første afhentning kom fra det gamle forbrændingsanlæg, hvor der blev brugt fuelolie. I april 2014 overgik Køge Kraftvarmeværk til et nyt forbrændingsanlæg, hvor der ikke blev fyret med fuelolie. Derfor blev der hentet træaske igen, da der i fremtiden ikke vil blive brugt støttebrændsel i afbrændingen. Det viste sig at den første afhentning kom fra depot, hvor den anden afhentning kom direkte fra ovn.

Det oprindelige formål med at hente to træasker var at undersøge fuelolies påvirkning på asken. Det oplyses fra Køge Kraftvarmeværk at indholdet af fuelolie i træasken fra depot er meget lille, hvis det overhovedet er tilstede. Desuden har tidligere projekter har fastslået, at opbevaringsforholdene af akse har stor indflydelse på dens sammensætning. Da de to afhentede asker har været opbevaret forskelligt, må det antages at opbevaringen også ændrer træaskernes sammensætning. På baggrund af oplysningerne fra Køge Kraftvarmeværk og tidligere projekter, vurderes det, at eventuelle forskelle i resultater for træaske fra depot og træaske fra ovn hovedsageligt vil stamme fra forskellen i opbevaringsforholdene. Der ses derfor bort fra indholdet af fuelolie.

Dette er grunden til, at der er undersøgt for to forskellige træasker (CD/SD og CO).

Det er i opgaven stillet som krav, at de indledende forsøg skal udføres på en 5 % cementerstatning og en 10 % sanderstatning.

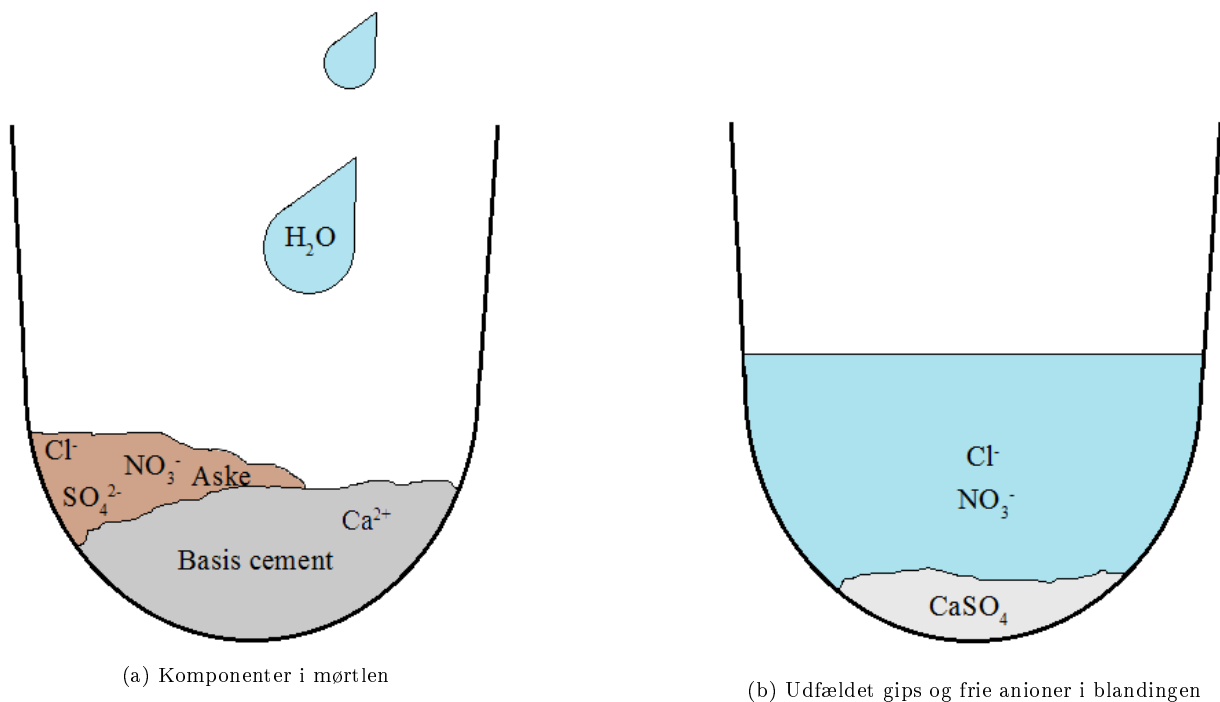
Tidligere rapporter har vist at prøver kun med flyveaske (uden cement) har kunnet størkne. Derfor er der udført forsøg med 100 % cementerstatning, for at se om træasken i sig selv kan størkne, og herunder undersøge flydesætmålt, samt trykstyrke.

2 | Teori

Beton består primært af tre komponenter: cement, vand og tilslag, typisk i form af sand eller sten. Betonen er stærkest i tryk og er aldrig stærkere end sit svageste led, som for ikke-højstyrkebeton er mørtelen. Mørtlen består af cement, vand og 0-4mm sand. Derfor er det cement og vand der er afgørende for betonens styrke, og derfor testes betonens egenskaber på prismer af mørtel. Yderligere kan beton tilsættes en række stoffer, som f.eks. kan ændre betonens bearbejdelse - eksempelvis plastificeringsstoffer og forskellige salte.

2.1 Tilsætning af aske i mørtel med fokus på salte

Flyveasken testes for indhold af SO_4^{2-} , NO_3^- og Cl^- . Figur 2.1 viser hvordan anionerne opfører sig før og efter blanding i mørtel.



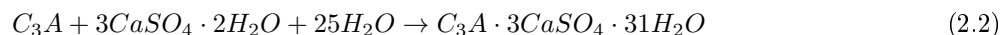
Figur 2.1: Blanding af mørtel med flyveaske

Når der tilsættes aske tilføres flere SO_4^{2-} -ioner til mørtlen som reagerer med Ca^{2+} og øjeblikkeligt udfældes til gips, jf. reaktionsskema 2.1. Dermed retarderes afbindingen af mørtlen yderligere [HJSP, 2009].



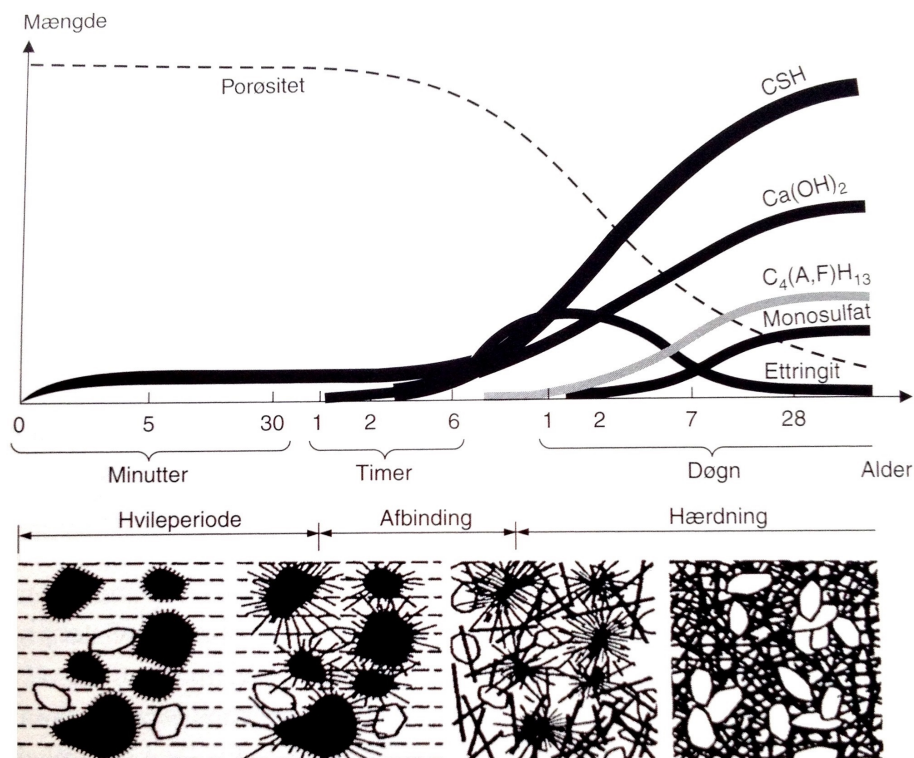
C_3A , tricalciumaluminat, er en komponent i cement, som reagerer med vand og får betonen til at afbinde i løbet af få minutter, kaldet en "lynafbinding". For at modvirke denne lynafbinding, er gips en vigtig komponent i

cementen. Gipsen reagerer med C_3A og udfælder et retarderende lag af ettringit, som får mørtlen til at afbinde langsommere, se reaktionsskema 2.2 [Hansen, 1995].



Cl^- forbliver en anion, som ikke går i forbindelse med andre komponenter, og hypotetisk bør det gøre mørtlen mere flydende.

NO_3^- forbliver også en anion, som ikke går i forbindelse med andre komponenter. Nitrat kan virke aggressiv over for beton i store mængder, [CM-P, 2009]. Det antages at NO_3^- og Cl^- har samme effekt på mørtlens konsistens, men da Cl^- har indflydelse på korrosion af armering i beton, er denne den mest interessante at arbejde med.



Figur 2.2: Illustration af afbindings- og hærdeforløb for mørtel uden aske [Jensen et al., 2008]

Figur 2.2 viser det normale afbindings- og hærdeforløb for mørtel uden træaske. Som det ses i ligning 2.1, danner sulfat og calcium, gips. Dette betyder at afbindings- og hærdeforløbet vil ændre sig, da der ikke vil blive dannet samme mængde calciumhydroxid som før. I stedet vil noget af calcium binde sig til sulfat og danne gips.

Det er svært at konkludere præcis, hvilke reaktioner der foregår i mørtel tilsat aske, da der er mange sammensætninger og komponenter til stede i blandingen samtidig. Yderligere er askens kemiske sammensætning ikke undersøgt til bunds, hvilket gør det svært at opstille teori for, hvilke reaktioner der vil forekomme. Derfor betragtes store dele af saltteorien som hypoteser.

2.2 Trykstyrke

Beton testes kun i tryk, da beton har ringe trækegenskaber. Derfor armeres der altid, hvis betonen skal optage træk.

Trykstyrken ønskes kendt, for at kunne vurdere hvilket formål betonen eller mørtlen kan anvendes til. Ofte ønskes en høj trykstyrke, men beton eller mørtel med lav trykstyrke kan dog anvendes til en række andre formål,

f.eks. gulve.

Trykkraften måles i kN og herefter beregnes trykstyrken som kraft over areal, se formel 2.3, jf [DS/EN 196-1, 2005].

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

Hvor:

- F er kraft [N]
- A er arealet af tværsnittet der trykkes over [mm^2]
- σ er trykstyrken [MPa]

2.3 Flydesætmål

Flydesætmålet bruges til at undersøge mørtel og betons flydeevne og bearbejdelighed. Flydesætmålet afhænger af vandindhold og evt. tilsætning af superplastificerende middel eller lign.

Formel 2.4 bruges til at beregne flydesætmålet i procent, jf. [C1437-07, 2007].

$$\frac{A}{D_{inside}} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

Hvor:

- D_{inside} er formens indvendige diameter i bunden.
- A er gennemsnittet af de fire målinger, jf [C1437-07, 2007].

Når der iblandes aske i en mørtel skal kan det være nødvendigt at tilsætte ekstra vand. Her bruges flydesætmålet til at vurdere om der er tilsat den rette mængde vand, ved at sammenligne flydesætmålet for mørtel med aske og en referenceprøve.

Saltindholdet i mørtelen har indflydelse på sætmålet, da nogle salte binder sig til komponenter i cementen og gør konsistensen af mørtlen mere fast. Andre forbliver vandopløselige anioner og bidrager til et højere flydesætmål, se afsnit 2.1.

2.4 Afbindingsforløb

Afbindingstiden beskriver, hvor hurtigt en cement udfører faseskrift. [HJSP, 2009]. Afbindingstiden kan måles både manuelt med Vicat eller automatisk med Vicatronic. Afbindingstiden måles som funktion af nedsænkningedybden af en nål i mørtel. Friktionen bliver større som mørtlen afbinder, og dermed kan afbindingsforløbet måles.

For at kunne sammenligne mørtlers afbindingstider angives indledende og endelige afbindingstider. Indledende afbindingstid er defineret ved tidspunktet hvor nålen nedsynker med en afstand til bunden på 6 ± 3 mm. Endelig afbindingstid er det tidspunkt hvor nålen første gang kun nedsynker 0,5 mm i forhold til højeste måling. Tiden angives i nærmeste 15 minutter [HJSP, 2009].

Sulfatindholdet i mørtlen har også indflydelse på afbindingstiden. Sulfaten, der binder sig til komponenter i cementen, medfører, at mørtlen afbinder langsommere, mens de vandopløselige anioner teoretisk set ikke påvirker afbindingstiden.

2.5 Porøsitet og densitet

Porøsitet og densitet er vigtige faktorer for et materiales styrke og holdbarhed. Porøsiteten beskriver porevolumen i forhold til det totale volumen. Styrken af materialet falder når porøsiteten øges. Til gengæld øges varmesoleringsevnen [Bilag A.4].

Et materiales densitet beskriver dets massefylde. Ved stigende densitet, ses der faldende porøsitet, og derfor hænger materialets porøsitet og densitet sammen. Porøsitet og densitet har dermed indflydelse på en mulig tilstedeværelse af kemisk og biologisk aktivitet i et materiale, og derfor er det vigtigt at kende til disse egenskaber [Gottfredsen og Nielsen, 2010].

Porøsiteten beregnes med formel 2.5 [Gottfredsen og Nielsen, 2010].

$$p_{tot} = p_{open} = \frac{V_p}{V} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

Hvor:

- p_{tot} er den totale porøsitet [%]
- p_{open} er den åbne porøsitet [%]
- V_p er det totale porevolumen [m^3]
- V er det totale volumen af prøvelegemet [m^3]

Den totale porøsitet og den åbne porøsitet er ens, da vand ikke kan trænge ind i lukkede porer i materialet.

Densiteten beregnes med formel 2.6 [Gottfredsen og Nielsen, 2010].

$$\rho_d = \frac{m_0}{V} \quad (2.6)$$

Hvor:

- ρ_d er tørdensiteten [kg/m^3]
- m_0 er tørmassen af prøvelegemet [kg]

2.6 Kapillarsugning

Porøse materialer, så som beton og mørtel, kan indeholde en større eller mindre mængde vand afhængig af omgivelsernes fugtindhold. Dermed er det ofte mest fordelagtigt at have en beton eller mørtel med en lav kapillarsugeevne, da der ikke ønskes fugt i byggematerialer.

Når et materiale nedsænkes i vand, vil det suge fugt, indtil der opstår ligevægt. Et materiales evne til at suge fugt afhænger af kapillarsugeevnen. Kapillarsugeevnen afhænger igen af porernes radier, da små porer har bedre kapillarsugeevne end store porer pga. porevæggenes hydrofile egenskaber [Bilag A.5].

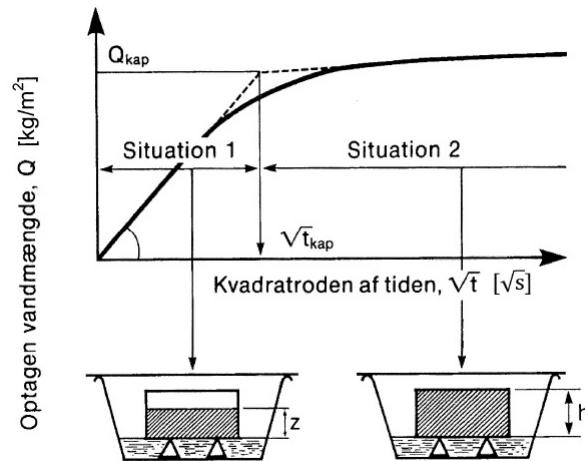
Den opsugede masse pr. areal kan bestemmes ud fra formel 2.7.

$$Q = \frac{m_t - m_0}{A} \quad (2.7)$$

Hvor:

- Q [kg/m^2]
- m_t er massen af prøvelegemet til tiden t [kg]
- m_0 er tørmasse af prøvelegemet [kg]
- A er opsugningsarealet [m^2]

I figur 2.3 ses Q som funktion af $\sqrt{t}$.



Figur 2.3: Illustration af kapillarsugningsforsøg [Bilag A.5]

Figuren illustrerer det ideelle kapillarsugningsforløb. Skæringen mellem tangenten til kapillarsugningsforløbet og Q_{kap} angiver tiden, hvor der ikke opsuges mere vand, enten fordi prøvelegemet er fyldt, eller fordi tyngdekraften og kapillarkræfterne er ækvivalente.

[Blank side]

3 | Eksperimentelt arbejde

For at få et overblik over askens egenskaber, udføres der en række indledende forsøg. Forsøgene udføres både på aske, hvor karakteristika fastlægges, og på mørtel tilsat 5 % cementerstatning og 10 % sanderstatning, samt en referenceprøve uden aske til sammenligning.

3.1 Oversigt over forsøg

Herunder er listet alle forsøg, som ligger til grund for resultaterne i denne rapport. Forsøgene er udført for forskellige hærdetider, og med forskellige indhold af aske og salte. Fremgangsmåden er ens i alle forsøg uanset indholdet af salte og aske.

Askekarakteristik

Ringknusning af aske

Kornstørrelsefordeling

pH i 1 mol kaliumklorid-opslemning

Vandindhold

Glødetab

Ledningsevne

Vandopløselighed

Tungmetalindhold ved oplukning af askeprøve

Vandopløselige anioner

Mørtelkarakteristik

Trykprøvning

Flydesætmål

Afbindingsforløb

Porøsitet

Densitet

Kapillarsugning

3.2 Oversigt over støbninger

Tabel 3.1 viser en oversigt over alle støbninger der er foretaget. Hver af støbningerne består af 3 prismer (se evt. figur 3.3), dvs. prøve 1 indeholder prisme 1A, 1B og 1C og så fremdeles.

Tabel 3.1: Støbeskema

Prøve	Støbedato	Type	Afbindings- tid	Vibrator- bord	Forsøg
1	3 feb	REF	28	Stort	Porøsitet, densitet og kapillarsugning
2	25 mar	REF	1	Stort	Trykstyrke
3	11 feb	REF	7	Stort	Porøsitet, densitet og kapillarsugning
4	13 feb	5 % CD	1	Stort	Trykstyrke
5	13 feb	10 % SD	1	Stort	Trykstyrke
6	20 feb	5 % CD	28	Lille	Porøsitet, densitet og kapillarsugning
7	20 feb	10 % SD	28	Lille	Porøsitet, densitet og kapillarsugning
8	27 feb	5 % CD	7	Stort	Porøsitet, densitet og kapillarsugning
9	27 feb	10 % SD	7	Stort	Porøsitet, densitet og kapillarsugning
10	25 mar	5 % CD	3	Stort	Trykstyrke
11	4 mar	10 % SD	3	Stort	Trykstyrke
12	5 mar	5 % CD	5	Stort	Trykstyrke
13	5 mar	10 % SD	5	Stort	Trykstyrke
14	6 maj	5 % CD	14	Stort	Trykstyrke
15	6 maj	5 % CD	14	Stort	Trykstyrke
16	8 maj	5 % CO	5	Stort	Trykstyrke
17	8 maj	5 % CD Udvasket	5	Stort	Trykstyrke
18	8 maj	5 % CD Udvasket + 1,13g salt	5	Stort	Trykstyrke
19	8 maj	5 % CD Udvasket + 5,65g salt	5	Stort	Trykstyrke

3.3 Askekarakteristikker

Dette afsnit beskriver fremgangsmåderne for alle forsøg, der er udført på flyveasken. Til alle forsøg er der brugt knust aske. Forsøget for kornstørrelsefordelingen er dog udført med både knust og uknust flyveaske.

Der udføres en askekarakteristik for at fastlægge egenskaber og indhold af forskellige stoffer, som er relevante at kende til, da de kan have en påvirkning på betonen. Hvis flyveasken har særlig markante karakteristika, vil det muligvis kræve en bearbejdning af asken, inden denne kan tilsættes betonen.

Knusning af aske

Når asken modtages fra Køge Kraftvarmeværk, er den våd og har uens konsistens. Derfor tørres asken i varmeskab ved 105°C i mindst 24 timer, hvorefter den knuses i ringknuser, inden den kan anvendes til forsøg. Asken knuses i 30 sekunder ved 1100 rpm. Ringknuseren, model "Fritsch pulverisette 9", ses på figur 3.1.



(a) Ringe til ringknusning



(b) Ringknuser

Figur 3.1: Ringknusning af aske

Kornstørrelse

Kornstørrelsefordelingen undersøges, for at finde effekten af ringknusning. Kornstørrelserne måles med laserdiffraktometer.

pH i kaliumklorid-opslemning

Askens pH-værdi måles i en opslemning af aske og KCl i volumenforholdet 1:2,5. Efter aske og KCl er tilsat, sættes denne på rystebord 1 time. Efter asken har bundfældet sig, måles pH-værdien i væskefasen.

Til udførelse af forsøget er brugt forsøgsvejledning [Schnell og Ottosen, 2010d].

Vandindhold

Vandindholdet i asken bestemmes ved afvejning af asken, før og efter tørring i varmeskab ved 105°C natten over. Vandindholdet angives i procent.

Vandindhold jf. [Schnell og Ottosen, 2010e].

Glødetab

Glødetabet beskriver til det organiske indhold i asken, og angives i procent af tørstofindholdet. Glødetabet bestemmes jf. [DS/EN 196-2, 2005].

Glødetab jf. [Schnell og Ottosen, 2010b].

Ledningsevne

Askens ledningsevne giver en indikation af ionindholdet i asken. Aske og destilleret vand blandes og sættes på rystebord, hvorefter asken bundfælder. Ledningsevnen måles med en elektrode i væskefasen.

Ledningsevne jf. [Schnell og Ottosen, 2010c].

Vandopløselighed

Vandopløseligheden af asken viser, hvorvidt de kemiske forbindelser er opløselige i vand.

Aske og destilleret vand rystets og stilles til bundfældning. Væsken hældes gennem et papirfilter, og der tilsættes mere vand til prøven, som igen omrystes og stilles til bundfældning. Dette gentages 3 gange. Til sidst hældes hele prøven i filteret, og stilles til afdrypning. Filter med aske stilles i varmeskab natten over, og herefter kan vandopløseligheden beregnes jf. forsøgsvejledning bilag A.1.

Tungmetalindhold ved oplukning af askeprøve

Oplukningsmetoden er udført jf. [DS 259, 2003]. Oplukning bruges til bestemmelse af syreopløselige metaller i asken. Metalkoncentrationen fundet ved denne metode svarer til en totalkoncentration af det pågældende metal i asken. Metalindholdet måles med ICP.

Tungmetaller jf. [Schnell og Ottosen, 2010a].

Vandopløselige anioner

Denne test bruges til at finde indholdet af salte, der potentielt kan have en indflydelse på betonen. Dette måles med IC.

Vandopløselige anioner jf. A.2.

3.4 Blanding af mørtel

Bladning af mørtel udføres jf. [DS/EN 196-1, 2005].

Blandningsforholdet til de fem forskellige blandinger kan ses i tabel 3.2.

Tabel 3.2: Opskrift for mørtel med og uden aske

	REF	5 % CD	10 % SD	5 % CO	100 % Cementsstatning
Aske [g]	0	22,5	135	22,5	450
Cement [g]	450	427,5	450	427,5	0
Sand [g]	1350	1350	1215	1350	1350
Vand [g]	225	225	285	225	275
SUM [g]	2025	2025	2085	2025	2075

Der bruges demineraliseret vand, samt søsand med kornstørrelse 0-4 mm. Cementen er Aalborg Portland Basis Cement.

For at opnå samme konsistens på alle mørtler er der tilsat 60 g ekstra vand til 10 % SD og 50 g ekstra vand til 100 % cementerstatning, da konsistensen ellers ville være for tør i forhold til referenceprøven.

Til blanding af mørtlen bruges en Hobart-blandemaskine, se figur 3.2



Figur 3.2: Hobart-blandemaskine til blanding af mørtel

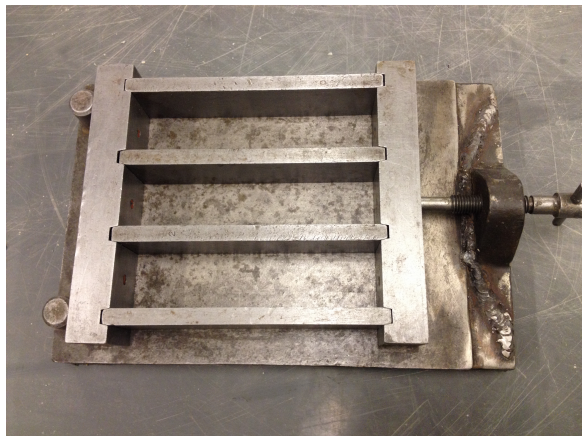
Ved blanding af mørtlen gøres følgende, jf. [DS/EN 196-1, 2005]:

- Cement og evt. træaske hældes i skålen tilhørende blandemaskinen.
- Vandet tilsættes til tiden 0 sekunder, og der køres i 30 sekunder på lav hastighed.
- Sandet tilsættes over 30 sekunder.
- Blandemaskinen sættes på mellem hastighed i 30 sekunder.
- Blandemaskinen stoppes i 90 sekunder. De første 30 sekunder bruges til at skrabe mørtel ned fra skålens sider.
- Blandemaskinen kører igen i 60 sekunder ved mellem hastighed.

Herefter er mørtlen klar til brug.

3.5 Trykprøvning

Til at teste mørtlens trykstyrke støbes prismer med målene 40 mm x 40 mm x 100 mm, jf. [DS/EN 196-1, 2005].



(a) Form til støbning af prismer



(b) Færdigstøbte prismer inden de lægges i vand

Figur 3.3: Støbning af prismer

Betonens brudstyrke findes ved den belastning, som giver brud. Uarmeret beton testes i tryk, da beton er ca. 10 gange så stærkt i tryk i forhold til træk. Det er derfor betonens trykstyrke, der er afgørende for dennes holdbarhed.

Som beskrevet tidligere, afhænger betonens egenskaber, og dermed også trykstyrken, af betonens sammensætning, med mørtel som det svageste led.

Derfor testes mørtlen til brud i en Toni 300, se figur 3.4, trykstyrken aflæses og omregnes fra kN til MPa jf. [DS/EN 196-1, 2005].



Figur 3.4: Opstilling til trykprøvning i Toni 300

I følge [DS/EN 196-1, 2005] udregnes trykstyrken, som gennemsnittet af seks målinger. Hvis en måling afviger mere end 10 % fra gennemsnittet, kasseres denne, og der udregnes et nyt gennemsnit, hvorfra trykstyrken beregnes. Hvis der kasseres mere end to målinger, skal der udføres et nyt forsøg. Gennemsnittet regnes ud på denne måde, for at undgå at inkludere fejlmålinger som en del af det endelige resultat.

3.6 Flydesætmål

Når mørtlen blandes tilsættes der vand, indtil konsistensen er vurderet til at ligne REF mest mulig. Ud fra mørtlens flydesætmål kan bearbejdeligheden vurderes. Mørtlens flydesætmål bestemmes jf. [DS/EN 1015-3, 1999]. På figur 3.5a ses rystebordet til bestemmelse af flydesætmål, og figur 3.5b viser tilhørende standardform.



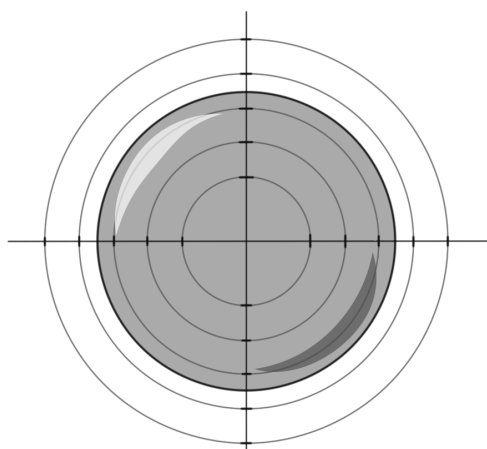
(a) Rystebord



(b) Form til måling af flydemål

Figur 3.5: Rystebord og form til måling af flydesætmål

Mørtlens flydesætmål måles i to retninger, se figur 3.6.



Figur 3.6: De to retninger hvor mørtlen skal måles

Gennemsnittet af de to målinger bruges til at beregne flydesætmålet. Ved tilsætning af flyveaske skal flydesætmålet ligge maks. $\pm 10\text{mm}$ fra referenceprøven, jf. [DS/EN 450-1, 2012].

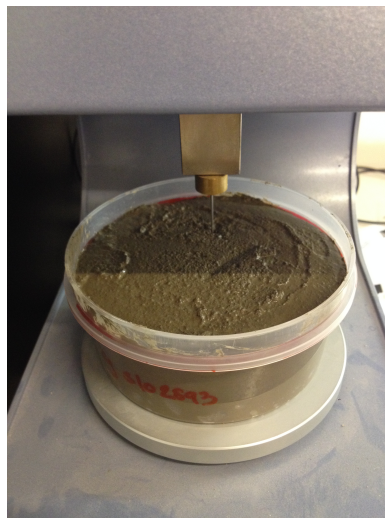
3.7 Afbindingsforløb

Til måling af afbindingsforløbet bruges en Vicatronic. Forsøget er udført jf. bilag A.3 og [DS/EN 196-3, 2009].

Vicatronic, se figur 3.7a, måler nedsynkningsdybden af nålen, se figur 3.7b, som funktion af tiden.



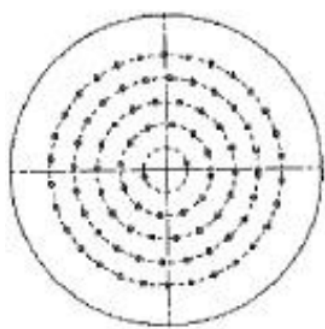
(a) Vicatronic



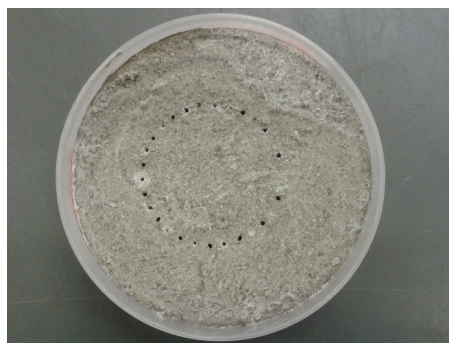
(b) Nål til måling af nedsynkningsdybde

Figur 3.7: Måling af afbindingstid med Vicatronic

Som mørtlen afbinder bliver nålens nedsynkningsdybde mindre. Når mørtlen er fuldstændig afbundet er der ingen nedsynkningsdybde. På figur 3.8a ses mønsteret, hvormed nålen penetrerer mørtlen. På figur 3.8b ses den afbundede prøve. Her ses kun en enkelt ring af penetreringer, da de andre enten er foretaget, mens mørtlen har været helt frisk, eller efter at mørtlen har opnået den endelige afbindingstid.



(a) Mønster jf. bilag A.3



(b) Afbundet prøve

Figur 3.8: Nedsynkningsmønster

Efter forsøget er udført kan resultaterne printes direkte fra maskinen.

3.8 Porøsitet og densitet

Prismerne udtørres ved 105°C indtil vægten er stabil. Herefter stilles prismerne i ekssikkator i tre timer og vejes efterfølgende. Derefter lægges prismerne igen i ekssikkator, og ved hjælp af undertryk fyldes alle åbne porer med vand ved trykudligning, se figur 3.9. Porøsiteten og densiteten kan herefter beregnes ud fra prismernes umættede og mættede vægt, samt volumen.

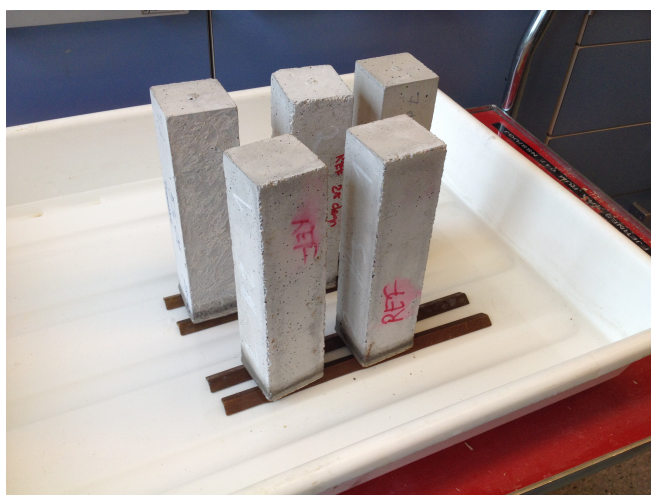


Figur 3.9: Undertryk medfører, at der suges vand ind i ekssikkatoren

Til udførelse af forsøget er brugt forsøgsvejledning bilag A.4.

3.9 Kapillarsugning

Prismerne udtørres ved 105°C til vægten er stabil og stilles herefter i ekssikkator, indtil prismerne er afkølet til rumtemperatur. Prismene stilles i en bakke på afstandsholdere og står i 0,5 cm destilleret vand, se figur 3.10. Prismene vejes efter tidsintervaller angivet i forsøgsvejledningen. Ud fra disse målinger findes kapillarsugeevnen.



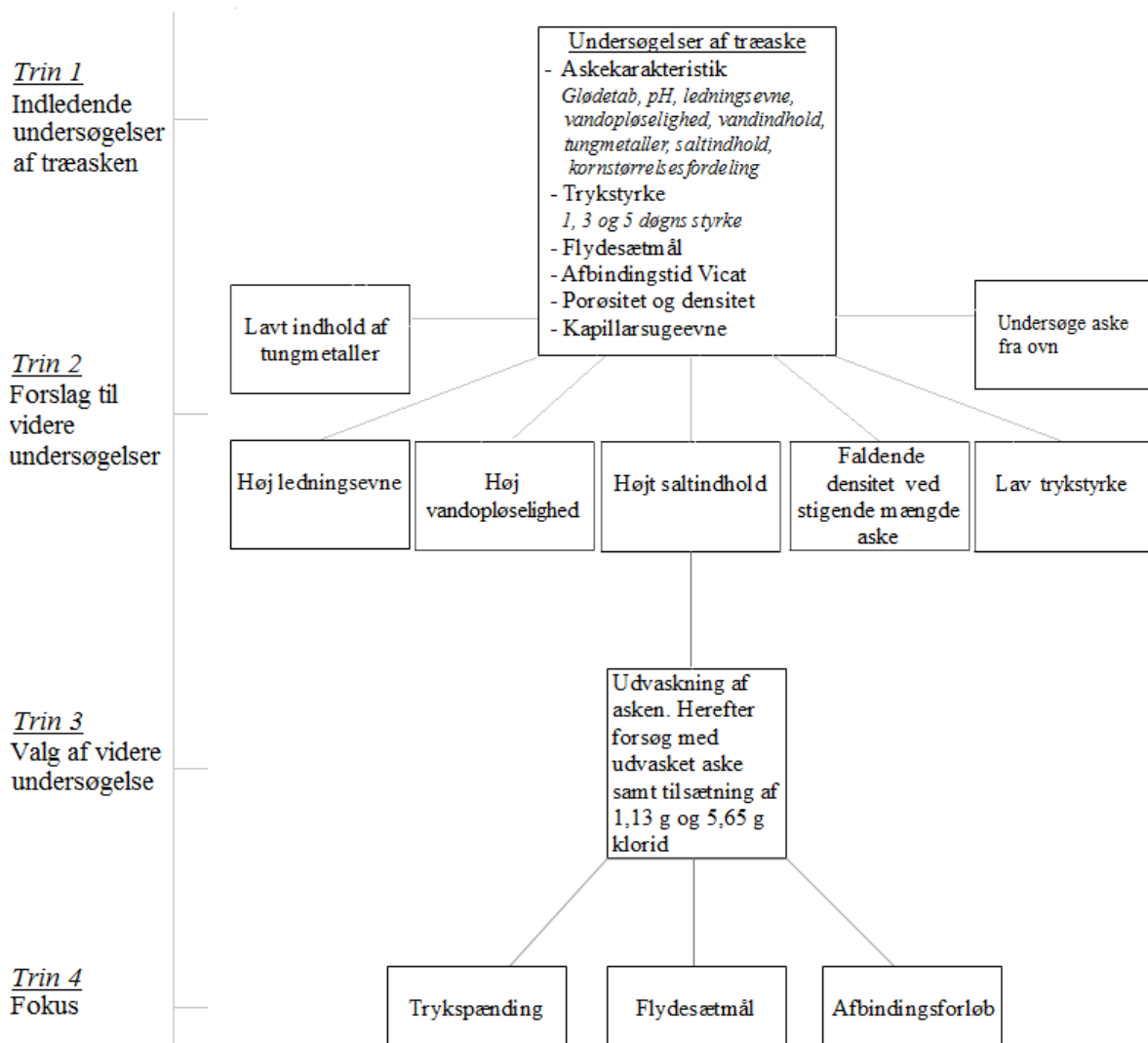
Figur 3.10: Prismen på afstandsholdere i bakke

Til udførelse af forsøget er brugt forsøgsvejledning bilag A.5.

[Blank side]

4 Resultater og diskussion

Projektet kan overordnet deles ind på en proces i fire trin. Ved hvert trin arbejdes der nærmere det endelige fokus. Figur 4.1 viser forløbet for projektets undersøgelser. Processen startes med den indledende undersøgelse af træasken, hvorfra der findes forslag til videre arbejde. Forslagene sortes, og der vælges et fokusemne at arbejde videre med.



Figur 4.1: Procesdiagram for projektet

Det følgende kapitel beskriver og diskuterer resultaterne af de indledende undersøgelser af træasken, efterfulgt af beskrivelser og diskussion af resultaterne af de videre undersøgelser.

4.1 Trin 1: Indledende undersøgelser af træasken

Trin 1 beskriver de indledende resultater for undersøgelser af træasken. Resultaterne omfatter askekarakteristik, trykstyrke, flydemål, afbindingstid, porøsitet og densitet, samt kapillarsugeevne.

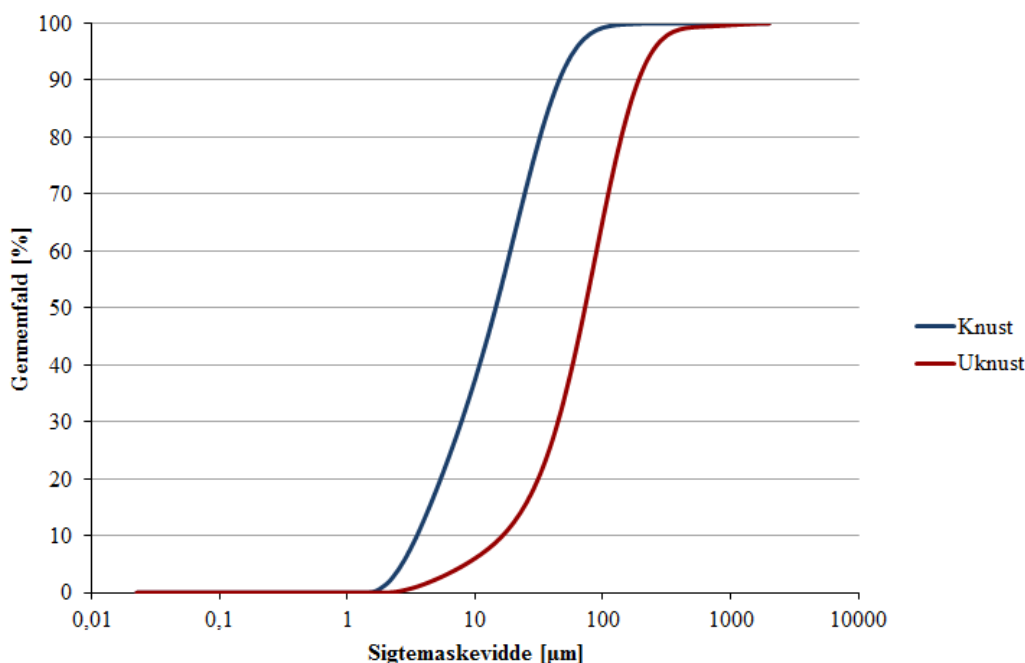
4.1.1 Aksekarakteristikker

Der indledes med at udføre en askekarakteristik, da det er vigtigt at kende askens grundlæggende sammensætning inden den blandes i mørtelen. Der ønskes kendskab til egenskaberne for at kunne foretage en realistisk vurdering af den færdige mørtels anvendelsesmuligheder.

Der er kun udført askekarakteristik på træasken fra depot, da træasken fra ovn ikke var hentet på det tidspunkt, hvor askekarakteristikken blev udført.

Kornstørrelsesfordelingen for knust og uknust træaske fra depot

Kornstørrelsesfordelingen måles på både uknust og knust aske. Rådata fra forsøget kan ses i bilag B.10, og "Result Analysis Report" for uknust og uknust kan ses i bilag B.11.



Figur 4.2: Kornstørrelsesfordelingen

Ud fra kornstørrelsesfordelingen, figur 4.2, ses det, at efter knusning bliver askens korn mindre samt mere ensartede i størrelsen. Dette ses ved at kurven for knust træaske bliver stejlere og gennemfaldet ved 100% nås ved en mindre maskevidde end for den uknuste træaske. Dette giver, ved iblanding i mørtel, en mere homogen masse, da der tilstræbes en kornstørrelsesfordeling af asken, som tilsvare cementens kornstørrelse. Ud fra kornstørrelsesfordelingen kan det konkluderes, at det er en fordel at knuse asken inden brug.

For at kunne anvende flyveaske skal asken, jf. [DS/EN 450-1, 2012], overholde enten kategori S eller kategori N. Ud fra kornstørrelsesfordelingen ses det, at træaske fra depot falder i kategori S, hvilket betyder at maks. 12 % af asken må have en kornstørrelse større end 45 μm . Kategori S er kategorien med den mindste kornstørrelse. Når asken falder i kategori S overholder den [DS/EN 450-1, 2012], og dermed kan de målte værdier for flydesætmålene sammenholdes med denne standard. Resultater for flydesætmålene gennemgås i afsnit 4.1.3.

Glødetab, pH-værdier, ledningsevne, vandopløselighed og vandindhold i træaske fra depot

Tabel 4.1 viser resultaterne for glødetab, pH, ledningsevne, vandopløselighed, samt vandindhold målt på træasken, jf. bilag B.1. Resultaterne er sammenholdt med samfyringsasken [Christiansen og Øster, 2014].

Tabel 4.1: Sammenligning af askekarakteristikker

Forsøg	Enhed	Træaske fra depot	Samfyringsaske ¹	Afvigelse [%]
Glødetab	%	2,9	4,5	35,7
pH	-	13,0	13,7	5,1
Ledningsevne	mS/cm	49,7	53,8	7,6
Vandopløselighed	%	52,3	45,5	12,9
Vandindhold	%	0,20	0,21	4,8

Glødetabet beskriver, hvor meget organisk materiale asken indeholder. Samfyringsasken indeholder væsentlig mere organisk materiale end træaske fra depot hvilket betyder, at flere tungmetaller vil binde sig i samfyringsasken, end i træaske fra depot [Schnell og Ottosen, 2010b]. I følge [DS/EN 450-1, 2012] er det i Danmark tilladt at anvende en flyveaske i beton med et glødetab på højst 5 %, dvs. en kategori A, hvilket både træaske fra depot og samfyringsasken overholder.

pH-værdierne er stort set lige høje for de to asker, og er begge meget basiske. Dette er positivt, da betonen, ved iblanding af aske, vil bevare sin basiske pH-værdi, og dermed vil korrosionsmiljøet i betonen hverken forværres eller forbedres.

Ledningsevnen beskriver aksens evne til at reagere, og dermed potentielt skaber uønskede reaktioner. Ledningsevnen er for begge flyveasker meget høj sammenlignet med slamasker i tidligere projekter [Andreassen og Jørgensen, 2013], se tabel 4.2.

Tabel 4.2: Ledningsevne for slamasker [Andreassen og Jørgensen, 2013]

Ledningsevne [mS/cm]	
Lynetten Ny-2	10,54
Lynetten Ny-1	7,81
Lynetten Depot-1	5,59

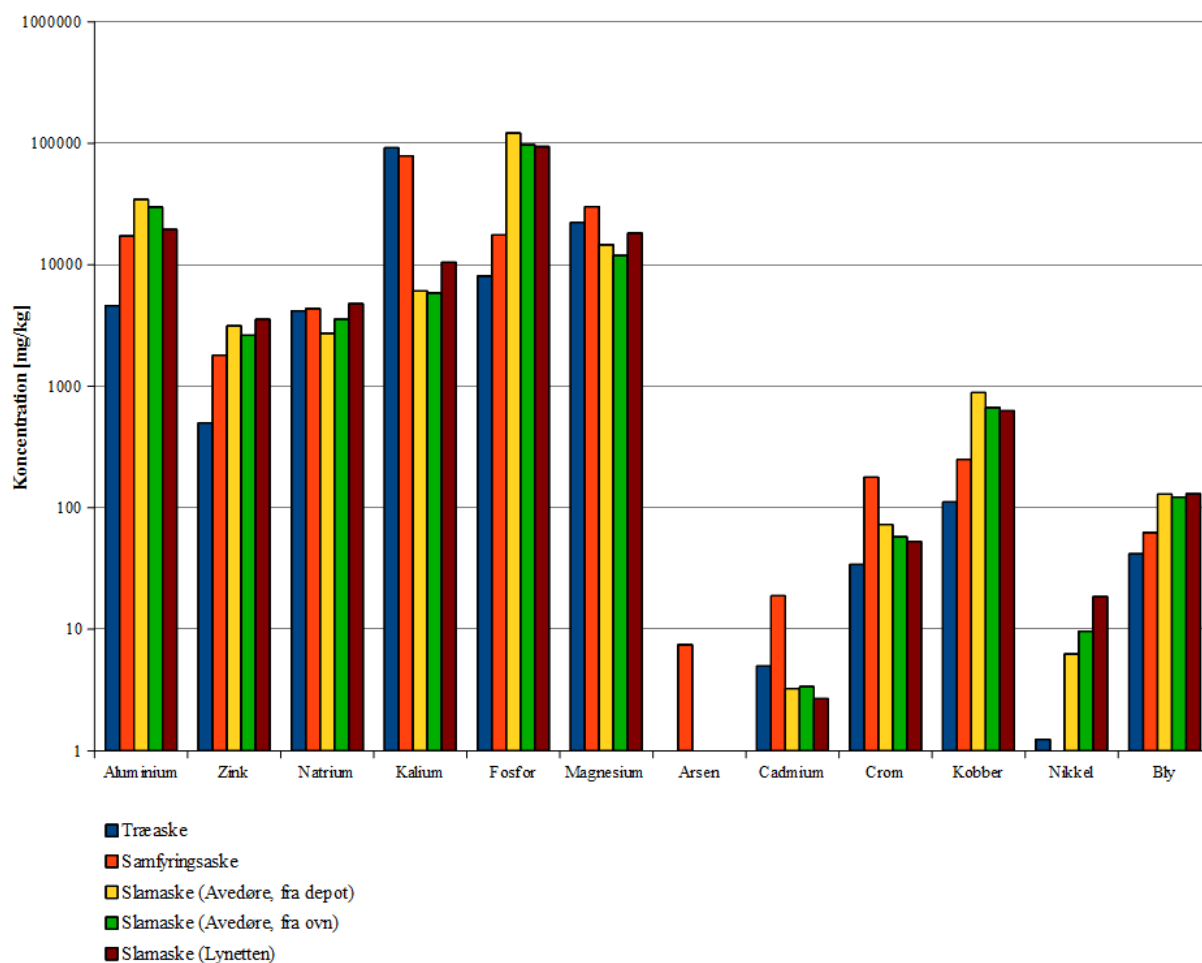
Vandopløseligheden beskriver hvor stor en del af asken, der kan opløses i vand, som f.eks. salte. Begge asker har en vandopløselighed på ca. 50 %. Træaske fra depot har ligget på depot indendørs, og der er derfor ikke tidligere blevet vasket komponenter ud af asken. Dette ville være tilfældet, hvis asken havde ligget udendørs og var blevet udsat for regnvand. Ved blanding af mørtel med træaske fra depot kan de udvaskelige komponenter i træasken fra depot reagere med vandet eller andre komponenter i mørtlen.

Ifølge bilag B.2 er det oprindelige vandindhold på træaske fra depot på 20,11%. Efter udtørring er vandindhold for både træaske fra depot og samfyringsasken ca. 0,2 %, hvilket er et lavt vandindhold i forhold til udgangspunktet. Forsøget udføres for at bekræfte, at træasken fra depot er fuldstændig udtørret før den anvendes i mørtel. Det lave vandindhold er en fordel, da det gør asken nemmere at bruge i beton, da forholdet mellem vand og cement bliver nemmere at styre.

¹Data fra [Christiansen og Øster, 2014]

Indhold af tungmetaller i træaske fra depot

Indholdet af tungmetaller i askerne er målt med ICP. Rådata fra ICP-målingerne kan ses i bilag B.3 og koncentrationerne af tungmetaller er listet i bilag B.4 for alle typer af asker.



Figur 4.3: Tungmetaller i askerne vist på logaritmisk skala

Som det ses på figur 4.3 har træaske fra depot generelt en lav koncentration af tungmetaller, på nær kalium. Det er fordelagtigt, at tungmetalindholdet i træasken fra depot er lav, da dette bl.a. gør den mere miljøvenlig. Det høje indhold af kalium giver dog mulighed for, at der kan dannes KCl, som er korrosionsfremkaldende.

Et lavt indhold af tungmetaller gør, at asken ikke kræver bearbejdning inden brug i mørtel. Asken er altså miljøvenlig, og har økonomiske fordele.

Askerne kan inddeles i tre forskellige kategorier afhængig af indholdet af tungmetaller, og alt efter hvilken kategori asken tilhører, findes der forskellige anvendelsesmuligheder. I følge [BEK nr. 1662, 2010] tilhører tungmetallerne i træaske fra depot kategorierne listet i tabel 4.3.

Tabel 4.3: Kategoriinddeling af træaske fra depot

Metal	Kategori ²
Arsen	1
Cadmium	2
Crom	1
Kobber	1
Nikkel	1
Bly	2
Zink	2
Natrium	1

Som det ses, tilhører træaske fra depot kategori 2. Asker tilhørende kategori 2 kan anvendes til visse anlægsarbejder uden at der ansøges om tilladelse. Yderligere må der ikke anvendes kategori 2 aske til arbejde tæt på indvindingsanlæg for vandforsyning. Anlægsarbejde med kategori 2 aske skal foregå over højeste grundvandspejl [BEK nr. 1662, 2010].

Resten af tungmetallerne, undersøgt ved ICP-måling, er ikke omfattet af [BEK nr. 1662, 2010].

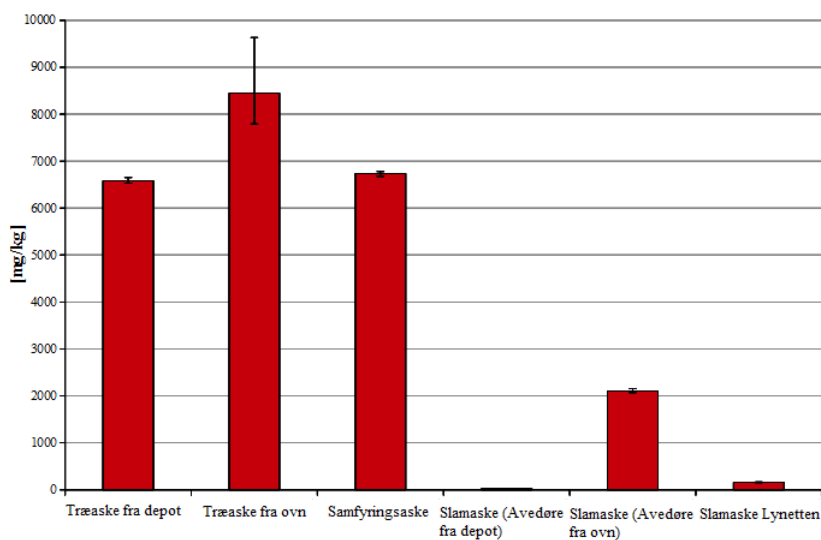
Indhold af salte i træaske fra depot og fra ovn

Askernes indhold af salte (Cl^- , NO_3^- og SO_4^{2-}) er undersøgt ved IC-måling.

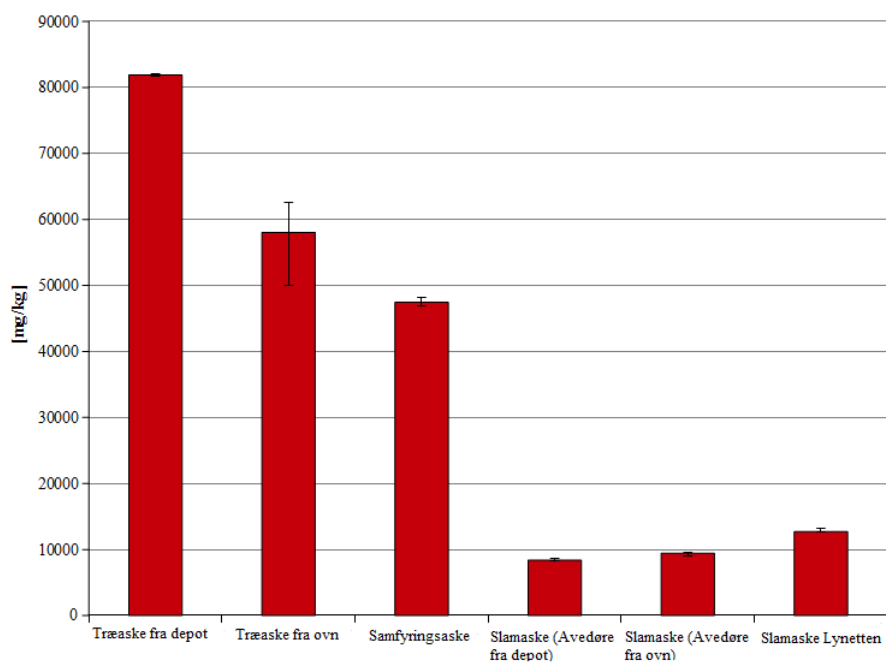
Rådata for alle askerne kan ses i bilag B.5, og rådata for træaske fra depot kan ses i bilag B.6.

Koncentrationerne af salte er listet i bilag B.8 (tabel B.7) for alle typer af aske.

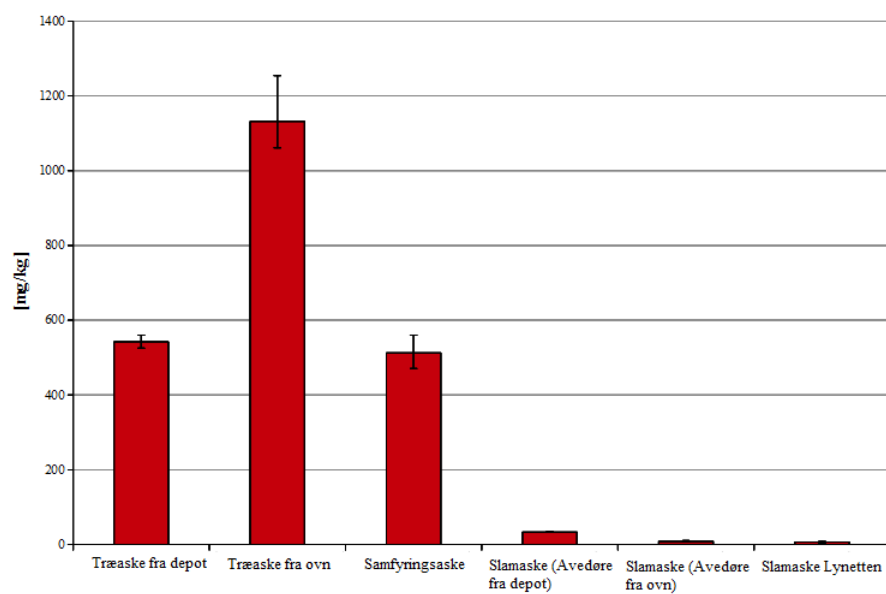
På figur 4.4 - 4.6 ses indholdet af anionerne Cl^- , NO_3^- og SO_4^{2-} i alle askerne. For hver af de tre salte er der udført tre målinger for hver aske, og fejllinjerne viser den mindste og største målte værdi.

Figur 4.4: Indhold af Cl^-

²Data fra [BEK nr. 1662, 2010]



Figur 4.5: Indhold af SO_4^{2-}



Figur 4.6: Indhold af NO_3^-

Det ses, at både træaske fra depot og fra ovn indholder mere SO_4^{2-} end alle de andre asker.

Træaske fra depot og samfyringsasken indeholder ca. samme mængde NO_3^- og Cl^- . Indholdet af NO_3^- og Cl^- i træaske fra ovn er højere end i træaske fra depot.

Indholdet af Cl^- er afgørende for den færdige betons anvendelse. Tabel 4.4, se beregning bilag B.9, viser indholdet af Cl^- i forhold til cementvægten. I følge [DS/EN 206-1, 2002] er indholdet af Cl^- for 5 % CD og 5 % CO lavt, og derfor kan disse bruges til beton med spændarmering. I mørtlen med 10 % SD er indholdet lidt højere og kan bruges til beton med armeringsstål eller andet indstøbt metal. Dermed vil et videre arbejde være mest interessant med 5 % CD, da denne har det laveste Cl^- i forhold til cementvægten og dermed har flest anvendelsesmuligheder.

Tabel 4.4: Cl^- -forhold

Mørtelblanding	Cl^- -forhold i forhold til cementvægten [%]	Betonens anvendelse jf. [DS/EN 206-1, 2002]
5 % CD	0,034	Med spændarmering af stål
10 % SD	0,2	Med armeringsstål eller andet indstøbt metal
5 % CO	0,044	Med spændarmering af stål

Tabel 4.5 viser det samlede indhold af salte i askerne. Træaske fra depot har et højere indhold af salte end træaske fra ovn, hvilket kan skyldes, at træaske fra depot har ligget opmagasineret i Køge, hvor saltindholdet i luften er højt, hvorimod den anden træaske er taget direkte fra ovn og ikke har været udsat for den saltholdige luft. Ydermere har begge træasker et højere indhold af salte end nogle af de andre asker, og dermed kunne det være interessant at undersøge saltenes indvirkning på mørtlen.

Tabel 4.5: Indhold af salte

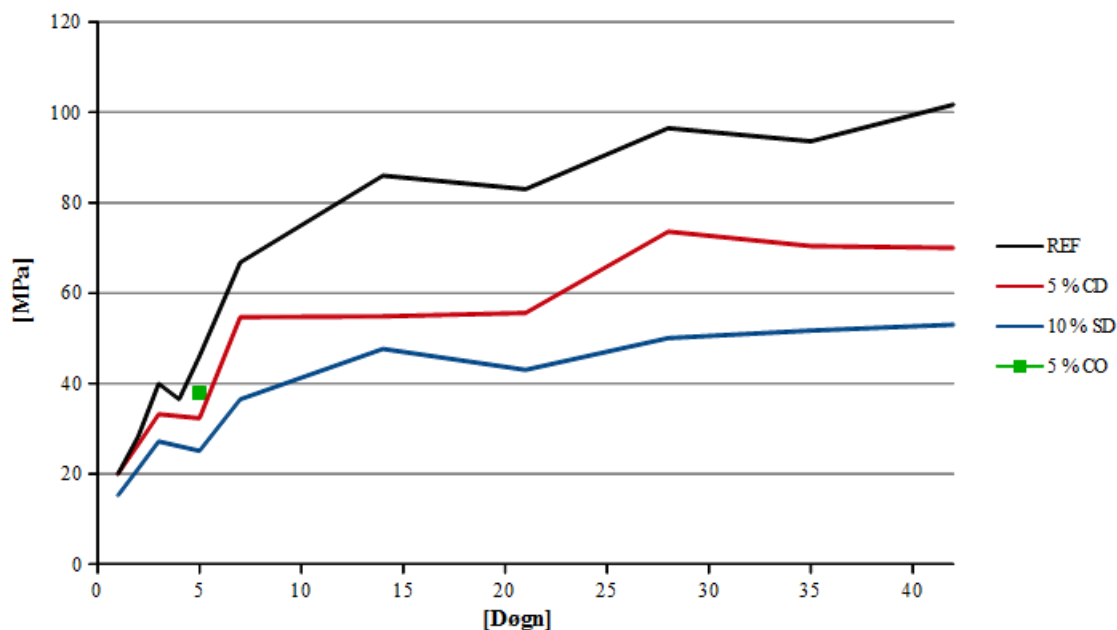
	Indhold af salte [%]
Træaske fra depot	8,90
Træaske fra ovn	6,76
Samfyringsaske	5,47
Slamaske (Advedøre, fra depot)	0,84
Slamaske (Advedøre, fra ovn)	1,15
Slamaske (Lynetten)	1,29

Det høje indhold af salte i træaskerne gør disse interessante at arbejde videre med, da det giver mulighed for at undersøge de forskellige saltes indflydelse på bearbejdigheden og afbindingsforløbet.

4.1.2 Trykstyrke

Trykstyrken for 5 % CD, 10 % SD og REF er undersøgt for 1-42 døgn. Der er målt trykstyrke for 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 35 og 42 døgn. Trykstyrken for 5 % CO er kun undersøgt for 5 døgn, da denne træaske først blev hentet sidst i projektet. Derfor er 5 døgnsprøven udført for at sikre, at sikre at fremtidige forsøg med 5 % CO kan anvendes.

Data for trykstyrkerne findes i bilag C. REF fra døgn 7-42 er hentet i [Knudsen og Larsen, 2013].



Figur 4.7: Styrkeudvikling for REF, 5 % CD, 10 %SD og 5 % CO

På figur 4.7 ses styrkeudviklingen for de fire typer af mørtelprøver. 14 døgn prøven for 5 % CD er blevet fjernet, da gentagne målinger blev vurderet fejlvise (målingerne lå lavere end 14 døgn målingen for 10 % SD).

På figur 4.7 ses det, at REF har den højeste trykstyrke, og at jo mere aske der tilsættes, des lavere bliver trykstyrken.

5 % CO viser tendens til at kunne sammenlignes med 5 % CD.

Ud af 5 % CD og 10 % SD, ligger 5 % CD tættest op af REF. Der er dog stadig en betydelig afvigelse, og dette vil medføre, at den ikke nødvendigvis kan bruges til de samme formål som REF.

Det har vist sig, at det er muligt for en 100 % cementerstatning at afbinde, og denne prøve er tryktestet. Dog viste det sig, at prøven ikke besad nogen målbar styrke.

4.1.3 Flydesætmål

Flydesætmålene er målt jf. [DS/EN 1015-3, 1999]. Der er målt flydesætmål på alle mørtelblandingerne. Yderligere er der udført en prøve med 100 % cementerstatning for at undersøge den nødvendige mængde vand, der skal tilsættes aske for at opnå ens flydesætmål med REF. Se resultater tabel 4.6.

Rådata for flydemål findes i bilag D.

Tabel 4.6: Flydesætmål

	Aske [g]	Vand [g]	Sætmål [%]	Overholder [DS/EN 450-1, 2012]
REF	-	225	154,0	
5 % CD	22,5	225	155,0	✓
10 % SD	135	285	147,3	%
5 % CO	22,5	225	164,1	%
100 % Cementerstatning	450	275	154,6	✓

Kategori S aske kan sammenlignes med værdierne angivet i [DS/EN 450-1, 2012]. Dog er der i [DS/EN 450-1, 2012] brugt en anden opskrift, og dette kan medføre, at resultaterne ikke nødvendigvis kan sammenlignes med standarden. Desuden er mørtlernes konsistenser, som beskrevet i kapitel 3.6, blevet vurderet på øjemål til at være ens med REF, og ikke som [DS/EN 450-1, 2012] foreskriver.

Det ses, at 5 % CD overholder [DS/EN 450-1, 2012] ved tilsætning af samme mængde vand som REF. Dette gør denne blanding oplagt til det videre arbejde, da den forholdsmæssigt er direkte sammenlignelig med REF.

10 % SD overholder ikke [DS/EN 450-1, 2012]. Der blev ved første blanding tilsat vand indtil konsistensen var ens med REF, og der blev herefter arbejdet videre med denne. Alle senere forsøg er blevet udført med dette blandingsforhold. Da det først senere, blev gjort klart, at flydesætmålet var for lavt, jf. [DS/EN 450-1, 2012] skulle der tilsættes yderligere vand. Det vurderes dog, at tilsætning af mere vand kun ville forringe mørtelblandings styrke- samt afbindingsegenskaber.

5 % CO overholder heller ikke [DS/EN 450-1, 2012]. For at kunne sammeligne 5 % CD og 5 % CO er den samme mængde vand blevet tilsat. Det ses, at der er stor forskel på flydemålene for 5 % CD og 5 % CO. Dette viser, at der er forskel på, om asken har ligget på depot eller er taget direkte fra ovnen. Det vurderes, på trods af at askerne kommer fra samme forbrændingsanlæg, at askerne ikke er sammenlignelige.

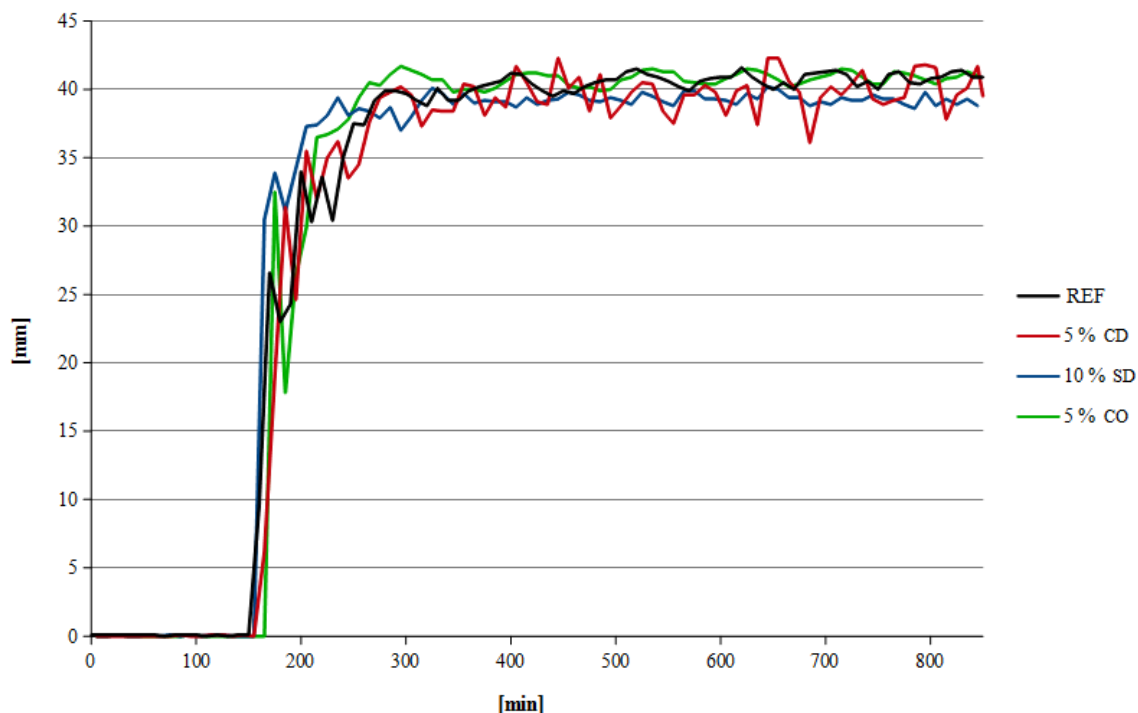
For at få en 100 % cementerstatning, der overholder kravene i [DS/EN 450-1, 2012], skal der tilsættes 50 g ekstra vand, hvilket tyder på, at aske har en højere porøsitet end cement.

Det kan dermed konkluderes at en vurdering af konsistensen på øjemål ikke er tilstrækkelig.

4.1.4 Afbindingsforløb

Mørtlernes afbindingsforløb er målt i henhold til [DS/EN 196-3, 2009]. Der er blevet målt afbindingsforløb for REF, 5 % CD, 10 % SD og 5 % CO.

Rådata findes i bilag E.1.



Figur 4.8: Afbindingstid for REF, 5 % CD, 10 % SD og 5 % CO

Figur 4.8 viser afbindingsforløbet for de fire typer af mørtelblandinger. Som det fremgår er afbindingsforløbene meget ens, og det ses, at asken derfor ikke har nævneværdig indflydelse på afbindingsforløbet i forhold til referenceprøven. Dette skyldes at der enten ikke er nok Ca^{2+} -ioner til at der kan dannes mere gips, eller at træasken indeholder en komponent, der modarbejder gipsens påvirkning på afbindingen.

Da prøvens overflade ikke er fuldstændig glat, vil der være udsving i målingerne, som det ses på figur 4.8, og dermed også usikkerhed i resultaterne i den endelige afbindingstid.

Tabel 4.7: Indledende afbindingstid

	Indledende afbindingstid [min]	Afvigelse fra REF [%]
REF	160	-
5 % CD	165	3,1
10 % SD	165	3,1
5 % CO	175	9,4

Tabel 4.8: Endelig afbindingstid

	Endelige afbindingstid [min]	Afvigelse fra REF [%]
REF	410	-
5 % CD	405	-1,2
10 % SD	325	-20,7
5 % CO	265	-35,4

I tabel 4.7 ses det, at der er meget lidt variation i den indledende afbindingstid. I forhold til REF har 5 % CO den største afvigelse. Dog er den tidsmæssige afvigelse i indledende afbindingstid kun 15 min, og da der måles med 10 min interval, kan dette give en forklaring på, hvorfor afvigelsen er større på 5 % CO.

Tabel 4.8 viser, at der er større spredning på målingerne for endelig afbindingstid i forhold til den indledende afbindingstid. Dette kan skyldes ujævnheder i prøvens overflade, og at det ikke er muligt at fylde præcis lige meget mørtel i formene. Den største afvigelse findes, som ved den indledende afbindingstid, ved 5 % CO.

5 % CO afbinder hurtigst, men har også den største afvigelse fra REF. Dette stemmer overens med, at SO_4^{2-} øger afbindingstiden. Træasken fra ovn, som er brugt til 5 % CO, har et lavere indhold af SO_4^{2-} end træaske fra depot, som er brugt til de øvrige blandinger.

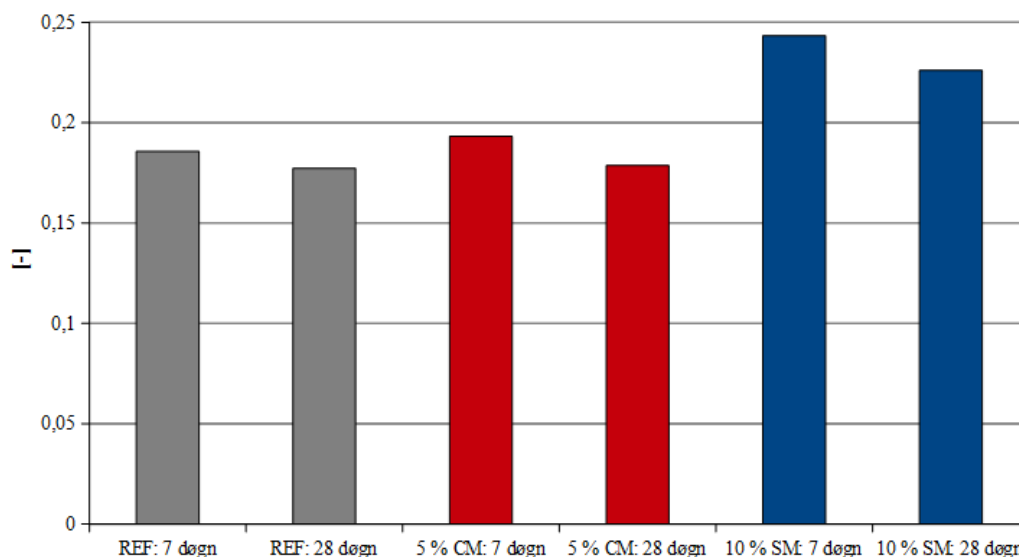
For alle mørtelprøverne betragtes afbindingsforløbet som ens, dog ligger 5 % CD styrkemæssigt tættest på REF, og dermed er denne den mest relevante mørtelblanding at arbejde videre med.

4.1.5 Porøsitet og densitet

Der er blevet udført en række porøsitet og densitetsforsøg på REF, 5 % CD og 10 % SD for 7 og 28 døgn. Rådata for både porøsitet og densitetsmålingerne findes i bilag F.

På figur 4.9 og 4.10 er der ikke anført interval for resultatet, da der kun er udført et forsøg pr. prøve.

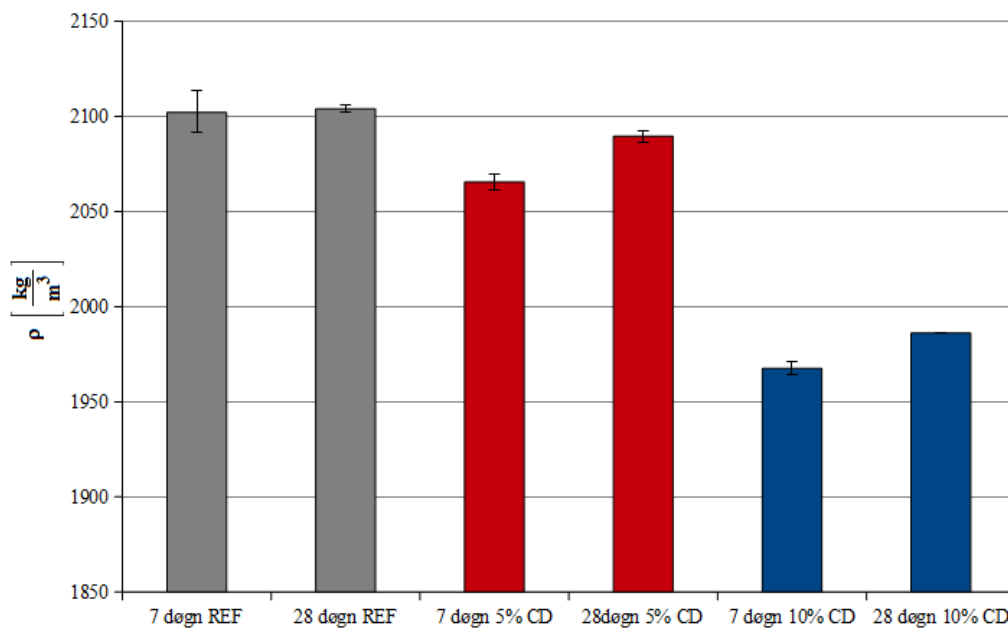
På figur 4.9 ses resultaterne for porøsitet.



Figur 4.9: Porøsitet for REF, 5 % CD og 10 % SD på 7 og 28 døgn

På figur 4.9 ses en tendens til en stigning i porøsitet jo mere aske, der tilsættes. Materialer med høj porøsitet kan indeholde mere vand end materialer med lav porøsitet. Dette stemmer over ens med resultatet for flydesætmål for 100 % cementserstatning i tabel 4.6 i afsnit 4.1.3, da det her ses, at jo mere aske, der tilsættes, des mere vand skal der tilsættes.

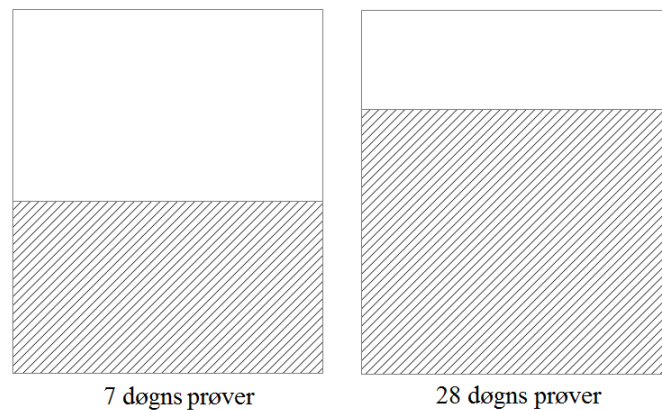
Porøsiteten falder over tid, hvilket passer med teorien, se figur 2.2 kapitel 2, afsnit 2.1.



Figur 4.10: Densitet for REF, 5 % CD og 10 % SD på 7 og 28 døgner

På figur 4.10 ses det, at densiteten falder jo mere aske, der tilsættes. Da densiteten falder både for 5 % CD og endnu mere for 10 % SD antyder det at asken har en lavere densitet end sand og cement. Ved sammenligning med figur 4.9, ses det at porøsiteten og densitet stemmer over ens. Når porøsiteten stiger, falder densiteten.

Det ses yderligere, at densiteten stiger over tid, dvs. mængden af faststof i prøverne stiger, som illustreret på figur 4.11.



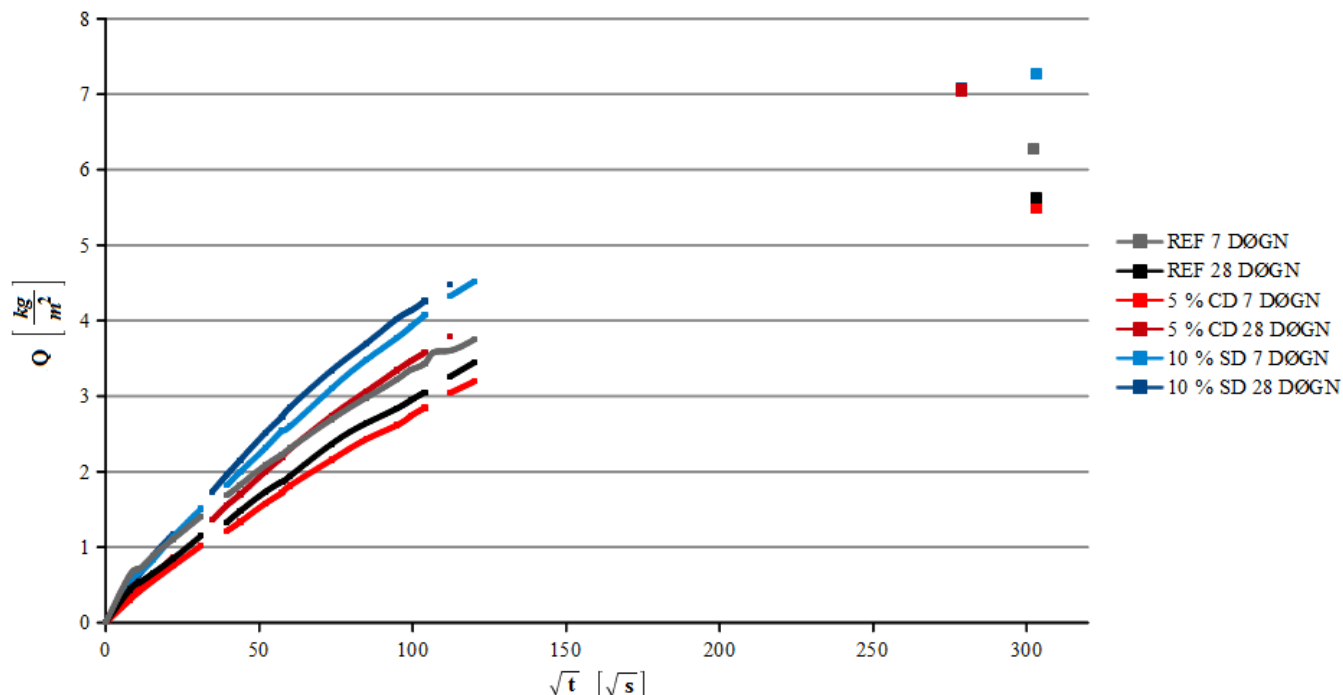
Figur 4.11: Illustration af densitets- og porøsitetsforholdene

Den stigende densitet, som funktion af tiden hænger naturligt sammen med, at porøsiteten falder over tid.

4.1.6 Kapillarsugning

På figur 4.12 ses kapillarsugningen som funktion af kvadratroden af tiden. Rådata kan ses i bilag G. Prøverne er målt kontinuert over en periode på 4 timer, hvorefter de har stået til dagen efter. Da prøverne ikke har opnået fuld vandmætning efter et døgn i vand, tyder det på, at vandsøjlen i porerne har opnået ligevægt, og dermed opnår de ikke den teoretiske ligevægt jf. figur 2.3 i afsnit 2.6.

Der er kun udført ét forsøg for hver prøve. Derfor kan der ikke opstilles en endelig konklusion for kapillarsugning.



Figur 4.12: Kapillarsugning for REF, 5 % CD og 10 % SD på 7 og 28 døgn

Det ses på figur 4.12 at 10 % SD har den højeste kapillarsugningsevne, hvilket stemmer overens med tidligere resultater for porøsitet. Dette underbygger, at asken er mere porøs end cement og sand. Der ud over, ses der ingen klar tendens for REF og 5 % CD, hvilket kan skyldes, at der kun er udført få forsøg. Tendensen viser, at der ikke er nogen effekt for kapillarsugeevnen ved tilsætning af små mængder aske.

En høj kapillarsugeevne hænger sammen med en lille poreradius, og tilsætning af aske som erstatning for sand, giver et materiale med flere små porer, og dermed en højere kapillarsugeevne, som det ses for 10 % SD. Det er ikke en fordel at have en høj kapillarsugeevne, da det kan fremme fugtskader, korrosion og svampevækst.

4.2 Delkonklusion for undersøgelse af træaske fra depot og fra ovn

Askekarakteristikken viser, at træasken fra depot har et glødetab på 2,89 %, hvilket overholder [DS/EN 450-1, 2012]. Yderligere har den en høj pH-værdi, hvilket en positiv egenskab i forhold til betonens korrosionsmiljø. Ledningsevnen er høj, og asken har dermed nemt ved at skabe reaktioner, hvilket er en parameter, der skal tages hensyn til, hvis asken skal anvendes til betonfremstilling. Træasken fra depot har en høj vandopløselighed, hvilket kan medføre, at de opløselige komponenter kan reagere med vandet i mørtlen. Vandindholdet i træasken fra depot er på 0,2 %, hvilket er lavt og medfører at v/c-forholdet er nemt at styre.

Indholdet af tungmetaller i træasken fra depot er meget lavere end de fire andre asker fra parallelprojekterne, se figur 4.3. Indholdet af kalium er dog højere. Kalium har nemt ved at gå i forbindelse med klorid, og kan danne en korrosionsfremkaldende salt.

Saltindholdet i træasken fra depot er markant højere end de tre slamasker, som stort set ikke indeholder salt. Sammenlignet med samfyringsasken er klorid- og nitratinholdet det samme, og indholdet af sulfat er væsentlig højere, se figur 4.4, 4.5 og 4.6. Træasken fra ovn har det højeste indhold af klorid og nitrat, men et lavere indhold af sulfat end træasken fra depot. Samlet set har træasken fra depot det højeste indhold af salte på 8,9 %.

Kornstørrelsesfordelingen af træaske fra depot overholder [DS/EN 450-1, 2012], se figur 4.2.

Ved iblanding af træaske i mørtel opnås ingen styrkemæssig fordel. Jo mere aske der tilsættes, des lavere bliver styrken, se figur 4.7.

Resultaterne fra flydesætmål i tabel 4.6 viser, at det er nødvendigt med tilsætning af ekstra vand ved iblanding af større mængder træaske. Flydemålet skal overholde [DS/EN 450-1, 2012], og konsistensen kan ikke kun vurderes på baggrund af øjemål.

Ud fra figur 4.8 ses det, at iblanding af træaske ikke har indflydelse på afbindingsforløbet.

Porøsiteten stiger ved tilsætning af træaske fra depot, og det ses, at træasken er mere porøs end sand. Når porøsiteten er høj, er densiteten lav. Desuden stiger densiteten over tid, hvilket betyder, at mængden af faststof udbygges. Se figur 4.9 og 4.10.

Resultaterne for kapillarsugning, som ses på figur 4.12, viser tendens til, at kapillarsugningsevnen stiger, jo mere aske der tilsættes. Ved tilsætning af en lille mængde aske er der ingen effekt.

Resultaterne for porøsitet og densitet samt kapillarsugning viser en forringelse af mørtlen når der tilsættes aske. Dette gør dog ikke mørtlen ubrugelig, da den stadig har en vis styrke. Anvendelsesmulighederne bliver mere og mere begrænsede des mere aske der tilsættes.

Det er muligt for 100 % cementerstatning at hærde, men den opnår ingen målbar trykstyrke. Ved forsøg med flydesætmål ses det, at en 100 % cementerstatning kræver mere vand end REF for at opnå samme flydesætmål. Derfor må asken være mere porøs end cement.

4.2.1 Trin 2: Forslag til videre undersøgelser

Ud fra de indledende forsøg har følgende resultater vist sig at være interessante i forbindelse med videre undersøgelser af bearbejdélighed og afbindingsforløb:

- **Lavt indhold af tungmetaller:** Ved tilsætning af et enkelt tungmetal af gangen kan deres indflydelse på mørtelen fastlægges. Alternativt kan kalium fjernes og effekten af en tungmetalfri aske kan testes.
- **Høj ledningsevne:** De spontane processer, som forløber ved en høj ledningsevne, kan fastlægges, og deres indflydelse på bearbejdélighed og afbindingsforløb vurderes.

- **Høj vandopløselighed:** Det kan undersøges, hvilke andre stoffer end salte, der kan udvaskes af asken, som evt. kan have en indflydelse på bearbejdelighed og afbindingsforløb.
- **Faldende densitet ved stigende mængde aske:** Der kan udføres flere forsøg, for at underbygge tendensen. Dette er interessant, men faldende densitet har ikke påvirkning på bearbejdelighed og afbindingsforløb. Derfor vil dette være relevant at undersøge i et andet projekt.
- **Lav trykstyrke:** Der kunne udføres forsøg med andre erstatninger, og det kunne undersøges om tendensen til, at trykstyrken falder, des mere aske der tilsættes, holder.
- **Undersøge træaske fra ovn:** Samtlige forsøg, som er udført på træaske fra depot kan også udføres på træaske fra ovn, og disse kunne sammenlignes for at finde forskellen på aske taget fra ovn og fra depot fra samme Køge Kraftvarmeværk.
- **Effekten af højt indhold af kalium:** Det kan undersøges, hvilken effekt det høje indhold af kalium, der findes i træaske fra depot, har, og hvordan kalium kan reagere med saltene.
- **Højt saltindhold:** Det høje indhold af salte kan undersøges, da salt kan have indflydelse på afbindingsforløb og bearbejdelighed. Asken kan vaskes fri for salte. Ved tilsætning af et enkelt salt kan dens indflydelse på mørtlens egenskaber bestemmes.

4.2.2 Trin 3: Valg af videre undersøgelse

For at begrænse de videre undersøgelser, vælges én aske, ét erstatningsforhold og ét af de i trin 2 nævne muligheder for videre arbejde.

Valg af aske

Der er stor forskel på 5 % CD og 5 % CO i flydesætmål. 5 % CO ligger langt fra REF og overholder ikke [DS/EN 450-1, 2012]. Hvis asken fremover skal bruges til produktion af beton, er det sandsynligt, at asken kommer til at ligge på depot før brug. Derfor er det relevant at se på egenskaberne for træaske fra depot, og derfor vælges der at arbejde videre med denne.

Valg af erstatningsforhold

En 10 % SD skal tilsættes ekstra vand for at kunne opnå samme konsistens som REF. Det ekstra vand svækker mørtlens styrke og giver 10 % SD en lavere trykstyrke end 5 % CD. Ud fra et økonomisk og miljømæssigt synspunkt er der flere fordele i at erstatte cement end sand. Derfor foretages der kun videre undersøgelser med 5 % CD.

Valg af videre undersøgelser

Indholdet af salt i træaske fra depot er markant højere end indholdet af salt i alle de andre asker. I følge teorien kan det forventes, at salten har en indflydelse på bearbejdelighed og afbindingsforløb. I forbindelse med projektets overordnede emne, vurderes det, at saltindholdet er det mest relevante at se nærmere på.

4.3 Trin 4: Tilsætning af NaCl i mørtel

For at undersøge salts indflydelse i forhold til bearbejdelighed og afbindingsforløb undersøges en udvasket træaske fra depot, samt en udvasket aske tilsat hhv. 1,13g NaCl og 5,65g NaCl. Disse sammenholdes med 5 % CD. Undersøgelserne foretages med NaCl, da det er denne af de tre salte, som asken indeholder, der har størst betydning for korrosion af armering. Undersøgelserne foretages derfor isoleret på NaCl, da der ikke ønskes indflydelse fra hverken nitrat eller sulfat.

Det antages, at natrium ikke har en indflydelse på bearbejdeligheden og afbindingstiden, og at disse kun påvirkes af klorid.

4.3.1 Udvaske af træaske fra depot og tilsætning af NaCl

For at kunne se på klorids indflydelse på bearbejdeligheden og afbindingstiden vaskes træaske fra depot fri for alle salte. I tabel 4.9 ses indholdet af salte i den udvaskede aske. Det ses, at indholdet af salte i træasken fra depot er gået fra 8,90 % til $0,039 \approx 0$ % ved udvaskning. Det vil sige at indholdet af salt i den udvaskede træaske fra depot er så tæt på 0, at asken betragtes som fuldstændig fri for salte. Rådata findes i bilag B.7 og B.8.

Tabel 4.9: Udvaske af salte fra træaske fra depot

	Træaske fra depot	Udvasket træaske fra depot
<i>Cl</i> [mg/kg]	6580,33	116,95
<i>NO₃</i> [mg/kg]	542,29	32,77
<i>SO₄</i> [mg/kg]	81903,86	240,06
Indhold af salte [%]	8,90	$0,039 \approx 0$

Molindholdet af klorid, nitrat og sulfat er beregnet og derefter omregnet til en ækvivalent mængde klorid. Det er beregnet, at der skal tilsættes 1,13g klorid, hvilket procentvis ikke er 8,9 %, men molindholdet er ens, jf. B.8.

For at se virkningen af kloridindholdet, og for bedre at kunne fastlægge tendenser, udføres der også forsøg med et ekstra højt indhold af klorid. Der vælges et kloridindhold på $5 \cdot 1,13g = 5,65g$.

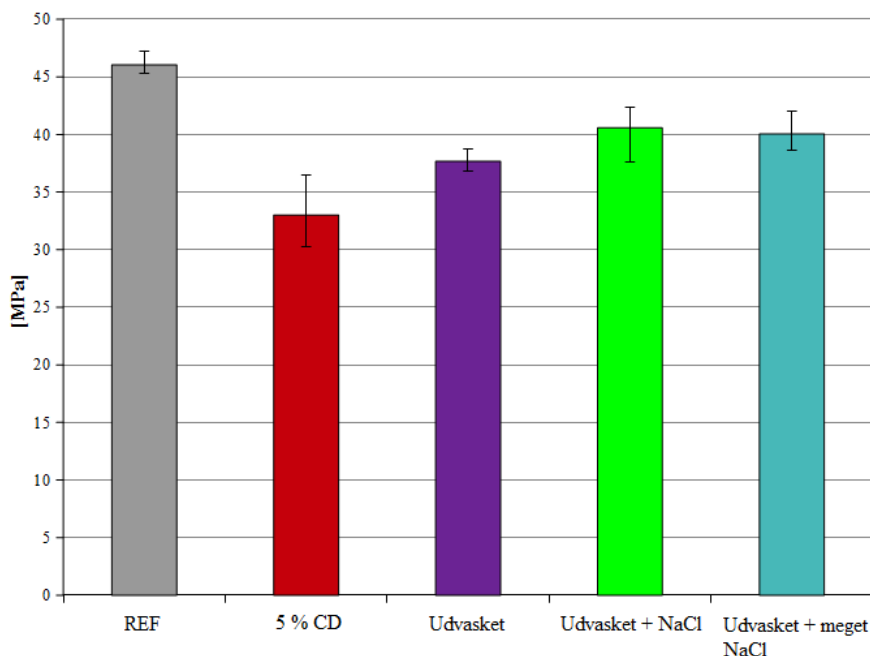
I projektets forsøg ses der på trykstyrke, flydesætmål og afbindingstid for følgende:

- 5 % cementerstatning med udvasket aske
- 5 % cementerstatning med udvasket aske + NaCl (1,13g)
- 5 % cementerstatning med udvasket aske + 5 x NaCl (5,65g)

Alle prøverne med NaCl sammenholdes med 5 % CD. REF er i tabeller og figurer angivet til orientering.

4.3.2 Trykstyrke

For at få et indblik i hvorvidt mørtel med træaske og klorid kan anvendes i praksis, udføres en stikprøve på trykstyrken. Denne er målt for 5 døgnsprøver, da der primært er fokus på det tidlige forløb, se figur 4.13. Data findes i bilag C.



Figur 4.13: 5 døgn trykstyrker

5 % CD viser sig at have den laveste trykstyrke af alle prøverne. Den udvaskede aske ligger lidt højere, og dermed kan det antages at der må være vasket styrkesvækkende stoffer ud af asken. Ved tilsætning af klorid stiger styrken, dog kun til en vis grænse. Tilsætning af meget klorid har ikke en yderligere positiv effekt på styrken. Ud fra disse undersøgelser tyder det på, at SO_4^{2-} og/eller NO_3^- er nogle af de styrkesvækkende stoffer, som asken indeholder før udvaskning. Ingen prøver tilsat aske når op på REF's styrke.

Der er en tendens til, at tilsætning af klorid har en positiv indvirkning på trykstyrken. Der er kun udført 5 døgnsprøver, og en endelig konklusion skal baseres på et større empirisk grundlag. Dette vil bl.a. kræve, at der udføres flere styrketests med længere hærdetid.

Dermed kan det konkluderes, at udvasket aske med klorid har de samme anvendelsesmuligheder, som 5 % CD.

4.3.3 Flydesætmål

I forbindelse med test af mørtel tilsat NaCl udføres flydesætmål for at se på kloridens indvirkning på bearbejdigheden.

For at kunne sammenholde resultaterne med 5 % CD tilsættes ikke ekstra vand eller sand til prøverne. Dermed er indholdet af aske og NaCl den eneste forskel på prøverne, jf. 4.10.

Rådata for flydemål findes i bilag D.

Tabel 4.10: Flydesætmål for mørtel tilsat NaCl

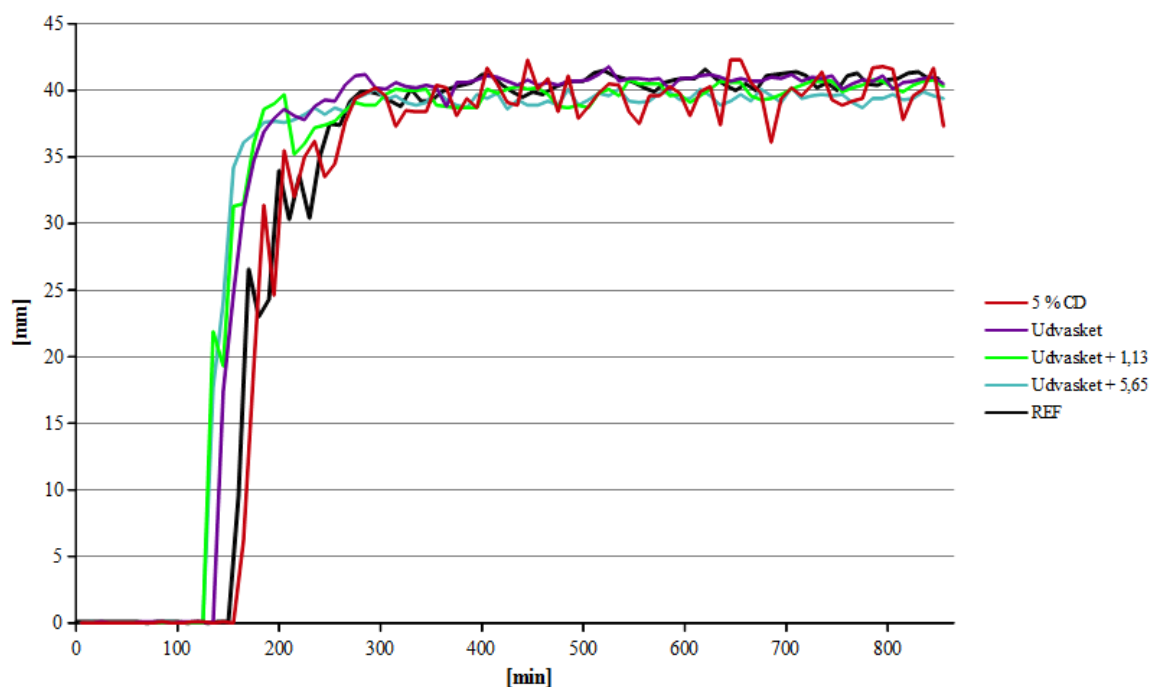
	Aske [g]	Tilsat NaCl [g]	Sætmål [%]	Afgivelse [%]
5 % CD	22,5	-	155,0	-
5 % Udvasket	22,5	-	162,3	4,7
5 % Udvasket + NaCl	21,37	1,13	163,6	5,5
5 % Udvasket + 5 x NaCl	16,85	5,65	169,3	9,2
REF	-	-	154,0	-

Det ses i tabel 4.10, at mængden af tilsat NaCl ændrer flydesætmålet. Mørtlen bliver mere flydende jo mere NaCl der tilsættes, og dermed øges bearbejdigheden. Dette skyldes at klorid-ionerne forbliver frie anioner i blandingen.

Desuden medfører tilsætningen af NaCl, at flydemålet ikke overholder [DS/EN 450-1, 2012].

4.3.4 Afbindingsforløb

Kloridens indflydelse på afbindingsforløbet testes for de tre nye blandinger og sammenholdes med 5 % CD. Rådata findes i bilag E.2.



Figur 4.14: Afbindingstid for 5 % cementerstatning med udvasket, udvasket + 1,13g NaCl og udvasket + 5,65g NaCl

Der ses en tendens til, at den udvaskede aske og udvaskede aske med klorid afbindes hurtigere en 5 % CD, men der ses ingen klar forskel i afbindingstid, alt efter hvor meget klorid der tilsættes.

Tabel 4.11: Indledende afbindingstid for 5 % cementerstatning

	Indledende afbindingstid [min]	Afvigelse fra 5 % CD [%]
5 % CD	165	-
Udvasket	145	-12,1
Udvasket + NaCl	135	-18,2
Udvasket + 5 x NaCl	135	-18,2

I tabel 4.11 ses det, at den indledende afbindingstid for prøverne med udvasket aske og udvasket aske med NaCl, er kortere end 5 % CD. På baggrund af resultaterne, vurderes alle prøverne med udvasket aske, at have samme indledende afbindingstid, da målingerne foretages med 10 minutters interval.

Tabel 4.12: Endelig afbindingstid for 5 % cementerstatning

	Endelige afbindingstid [min]	Afvigelse fra 5 % CD [%]
5 % CD	405	-
Udvasket	525	29,6
Udvasket + NaCl	435	7,4
Udvasket + 5 x NaCl	395	-2,5

I tabel 4.12 ses, at der er stor spredning på resultaterne for den udvaskede aske. Der kan ikke konkluderes endeligt på den endelige afbindingstid, da usikkerheden på målingerne er for stor. Der skal derfor udføres flere målinger for at få et brugbart konklusionsgrundlag.

Klorid har ikke nogen påvirkning på afbindingsforløbet, da det ses, at tilsætningen af 5 x NaCl ikke ændrer afbindingsforløbet i forhold til den udvaskede aske. Da prøverne indeholdende den udvaskede træaske alle afbindes ens og hurtigere end 5 % CD kan det konkluderes, at træasken må indeholde et ikke-vandopløseligt stof som får afbindingstiden til at forløbe hurtigere, f.eks. C_3A . Dette stof vil reagere med enten NO_3^- eller SO_4^{2-} , og modvirke det hurtige afbindingsforløb, som det ses med 5 % CD.

4.3.5 Tilsætning af NaCl til mørtel med træakse fra depot og REF

Ovenstående forsøg er udført på udvasket aske, da det var forsøgenes formål at fastlægge kloridens indflydelse på bearbejdigheden og afbindingsforløbet. Hvis træasken fra depot reelt skal anvendes i betonproduktion, er det ikke nødvendigvis hensigtsmæssigt at skulle udvaske asken før brug, alt efter træaskens formål. Træasken kan desuden opbevares på depot udendørs, hvor den vil blive udsat for regn og dermed blive udvasket naturligt. Dette vil spare omkostninger, og vil kun kræve opbevaringsplads over en længere periode.

Nedenstående er påvirkningen, der kan forventes, hvis NaCl tilsættes en mørtelblanding med træaske fra depot, der ikke er udvasket eller direkte i en referenceblanding.

- Ved tilsætning af NaCl til disse blandinger vil der ses en lille forøgelse af trykstyrken, uanset mængden af NaCl der tilsættes.
- Hvis der ønskes en mere flydende konsistens, kan der tilsættes NaCl til blandingen. Blandingens flydesætmål forøges jo mere NaCl der tilsættes.
- Blandingens afbindingstid forbliver den samme ved tilsætning NaCl, uanset mængde.

4.4 Delkonklusion for tilsætning af NaCl i mørtel

Efter at have testet mørtel med udvasket træaske, udvasket aske + 1,13g NaCl og udvasket aske + 5,65g NaCl, ses det, at det naturlige saltindhold er styrkeforringende, figur 4.13. Det kan dog konkluderes, at klorid ikke svækker mørtlens styrke, og dermed må det være SO_4^{2-} og/eller NO_3^- , der reducerer mørtelens trykstyrke.

Det fremgår tydeligt af tabel 4.10, at flydesætmålet øges ved tilsætning af NaCl. Bearbejdeligheden øges ved stigende sætmål, og gør mørtlen nemmere at arbejde med.

Afbindingsforløbet for mørtlerne, som indeholder udvasket aske, er alle ens, se figur 4.14. Dog afbindes de hurtigere end REF og 5 % CD. Det konkluderes, at tilsætning af klorid ikke har nogen effekt på afbindingsforløbet. Da mørtlen med udvasket aske afbinder hurtigere end REF og 5 % CD, må asken indeholde et ikke-vandopløseligt stof, som får mørtlen til at afbinde hurtigere. Ved 5 % CD vil NO_3^- og/eller SO_4^{2-} reagere med dette stof. I mørtelblandingerne med den udvaskede aske er dette ikke muligt, da NO_3^- og SO_4^{2-} ikke er til stede. Dermed afbinder mørtlen hurtigere.

Mørtelblandingen med udvasket aske og mørtelblandingerne med udvasket aske tilsat NaCl har samme anvendelsesmuligheder som 5 % CD. Anvendelsen afhænger dog af, hvor flydende man vil have sin blanding, og hvor hurtigt mørtlen skal afbinde. Styrken påvirkes ikke negativt.

NaCl kan tilsættes en mørtelblanding med træaske fra depot, en referenceblanding eller en anden blanding med en ikke-udvasket aske. Det vurderes, at det er sandsynligt NaCl har samme effekt på trykstyrke, flydesætmål og afbindingsforløb for de nævnte blandinger, som NaCl har på disse parametre for en udvasket aske.

[Blank side]

5 | Konklusion

Træasken fra depot og træasken fra ovn viser sig at have meget forskellige sammensætninger. Kloridindholdet er højest i træasken fra depot, sandsynligvis pga. saltindholdet i luften. Det samlede saltindhold for træasken fra depot er på 8,9 % og saltindholdet for træasken fra ovn er på 6,76 %. Disse procenter er højere end de tilsvarende for parallelprojekternes aske.

I følge [DS/EN 450-1, 2012] tilhører kornstørrelsesfordelingen, se figur 4.2, for træaske fra depot kategori S. Det betyder at træasken fra depot er sammenlignelig med [DS/EN 450-1, 2012]'s værdier for andre parametre i askekarakteristikken.

Glødetabet for træaske fra depot er på 2,9 %. I følge [DS/EN 450-1, 2012] må en flyveaske, der skal anvendes i betonproduktion, højst have et glødetab på 5 %, hvilket træasken fra depot således overholder. Træasken fra depot har et pH-værdi på 13,0. Dette er positivt, da betonens basiske miljø vil blive bevaret ved sammenblanding med træaske fra depot. Der kan forekomme uønskede reaktioner, da træasken fra depot har en høj ledningsevne. Da vandopløseligheden for træaske fra depot er høj, 52,27 %, betyder det, at der er mange kemiske forbindelser, der nemt kan brydes ved tilstedeværelsen af vand. Dette stemmer godt over ens med træaskens høje indhold af salt. Vandindholdet i træasken fra depot er 0,2 % efter udtørring. Dette bekræfter, at asken er fuldstændig udtørret, hvilket gør forholdet mellem vand og cement i betonen nemt at styre.

Træasken fra depot har et lavt indhold af tungmetaller i forhold til parallelprojekternes aske, se figur 4.3. Det lave tungmetalindhold hænger sammen med det lave glødetab for asken. Dog har træasken fra depot det højeste indhold af kalium, hvilket giver mulighed for dannelsen af KCl, som er korrosionsfremkaldende. I følge [BEK nr. 1662, 2010] tilhører træaske fra depot kategori 2, som betyder, at den kan anvendes i 'visse' anlægsarbejder, uden at der på forhånd skal søges om tilladelse hertil.

Ved tryktest af mørtelprismer med træaske fra depot og ovn opnås ingen styrkemæssig fordel jf. figur 4.7. Dette har som konsekvens, at mørtel med aske ikke vil have de samme anvendelsesmuligheder, som referenceprøven. Mørtlen med træaske er dog stadig brugbar, men primært til andre formål.

Flydesætmålet viser, at det er nødvendigt at tilsætte ekstra vand, når der bruges større mængder træaske. Desuden er det nødvendigt at vurdere flydesætmålet ud fra [DS/EN 450-1, 2012], og ikke kun ud fra øjemål.

For mørtelprismer med træaske fra depot opnås en stigende porøsitet, jo mere aske der tilsættes, jf. figur 4.9. Den stigende porøsitet viser, at asken må være mere porøs end cementen. Dette underbygges af den øgede mængde vand, der skal tilsættes, for at opnå samme flydesætmål som referenceprøven.

Det konstateres, at densiteten stiger over tid, se figur 4.10. Dette stemmer over ens med udviklingen i porøsiteten.

Kapillarsugningsevnen stiger jo mere aske der tilsættes mørtlen, jf. figur 4.12. Dette stemmer godt over ens med den høje porøsitet, selvom det afgørende for kapillarsugningsevnen er porernes størrelse. Det ses, at resultaterne for kapillarsugning ikke viser en tydelig tendens når mørtlen har et lille indhold af træaske fra depot. På baggrund af resultaterne for porøsitet, densitet og kapillarsugning ses en forringelse af mørtlen ved tilsætning af træaske fra depot.

Det ses, at afbindingsforløbene er ens for 5 % CD, 5 % CO, 10 % SD og REF, jf. figur 4.8. Derfor har iblanding af træaske fra depot og ovn ingen indflydelse på afbindingsforløbet. Det kan konstateres, at træasken i sig selv besidder en egenskab, der medfører, at en 100 % cementerstatning kan hærde. Dog opnår denne ingen målbar styrke uden cement.

Der kan være en indflydelse fra olieindholdet i træasken fra depot, men det kan ikke klart konstateres, hvilken påvirkning henholdsvis olien og opbevaringsforholdene har.

Ved sammenligning af udvasket træaske, 5 % CD og REF konkluderes det, at mørtlens styrke forringes ved et naturligt højt indhold af salte. Desuden ses det, at tilsætning af NaCl til udvasket aske forbedrer styrken. Dermed kan det konkluderes, at enten SO_4^{2-} eller NO_3^- er en styrkesvækkende faktor, se figur 4.13.

Flydesæt målet forøges ved tilsætning af NaCl til en udvasket aske, men afbindingsforløbet påvirkes ikke, som det ses af figur 4.14. En øget mængde tilsat NaCl vil øge flydesæt målet, men ikke ændre afbindingsforløbet. Mørtel tilsat NaCl har en fordel i forhold til 5 % CD, idet den har en bedre bearbejdighed. Ellers vil der være samme anvendelsesmuligheder for mørtel med NaCl som for 5 % CD.

Ud fra undersøgelser med tilsætning af NaCl til udvasket træaske, tyder det på, at NaCl kan tilsættes en ikke-udvasket træaske og opnå de samme egenskaber som NaCl har på udvasket aske.

Den samlede rapport over undersøgelserne viser, at træaske fra Køge Kraftvarmeværk har begrænsende anvendelsesmuligheder, når det blandes i mørtel eller beton. Da træasken medfører en høj porøsitet samt kapillarsugningsevne, vil betonen skulle anvendes i et passivt miljø, for at undgå organisk vækst og indtrængning af uønskede salte. Desuden får beton eller mørtel med træaske en lavere trykstyrke, hvilket har som konsekvens, at den ikke skal anvendes til større bærende konstruktioner.

6 | Videre forskning

Delkonklusionen på tilsætning af NaCl til den udvaskede træaske viser resultater, som giver anledning til en række nye spørgsmål.

Nye undersøgelser kan foretages isoleret med NaCl. Der kan testes, om der er en øvre grænse for flydesætmålet, og der kan udføres strykeprøver for prismen med længere og kortere hærdetid end 5 døgn. Hermed kan den fulde styrkeudvikling afdækkes. Det kan testes om en større mængde NaCl har indflydelse på afbindingsforløbet (det forventes dog ikke at have en påvirkning).

Det kan undersøges, hvorvidt tilsætning af NaCl kan erstatte en del af vandet i mørtlen, således at det samme flydesætmål opnås, men tilgængæld fås en større styrke.

Det ønskes undersøgt, hvilken komponent asken indeholder, som får mørtelen til at afbinde hurtigt, og hvilken af saltene der modvirker denne. Dvs. en grundigere undersøgelse af den kemiske sammensætning af asken kan foretages.

I forlængelse af den kemiske undersøgelse af asken kan det undersøges, hvad der forårsager den øgede trykstyrke ved tilsætning af NaCl.

For at fastlægge tendenserne for hvad der sker ved tilsætning af større mængder aske, kan de indledende forsøg under trin 1 gentages med større askeerstatninger for både sanderstatning og cementerstatning.

I trin 2 er nævnt en række forslag til videre undersøgelser (jf. figur 4.1), som alle kunne være relevante at arbejde videre med.

Eftersom tendenserne for tilsætning af klorid nu er undersøgt, vil det være relevant at teste sulfat og nitrat separat på de samme parametre og fastlægge tendenserne. Disse undersøgelser ville kunne underbygge konklusionerne i denne rapport. Yderligere ville det kunne bestemmes, hvilket af de to salte, der medvirker til et langsommere afbindingsforløb.

For at underbygge konklusionerne i denne rapport kan indflydelsen af NaCl testes på en blanding med træaske fra depot og en referenceblanding. Forsøg med trykstyrke, flydesætmål og afbindingstid kunne udføres. NaCl's indflydelse på den ubehandlede aske kan fastlægges og sammenlignes med en referenceblanding tilsat NaCl.

Ovenstående viser, at der i dette projekt kun er undersøgt en lille del af, hvad der er relevant at undersøge for de forskellige blandinger som indeholder træaske. Denne rapport belyser dermed kun de grundlæggende egenskaber for mørtel med træaske med og uden NaCl.

For at få en fyldestgørende viden om virkningen af forskellige blandinger med træaske i mørtel, kræves der mange flere undersøgelser og efterfølgende bearbejdning.

[Blank side]

Litteratur

- [Andreasen og Jørgensen, 2013] Andreasen, J. S. og Jørgensen, L. (2013). Slamaske i armeret beton - korrosionsrisiko. Specialeafhandling, Danmarks Tekniske Universitet.
- [BEK nr. 1662, 2010] BEK nr. 1662 (2010). Bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter og jord til bygge og anlægsarbejder og om anvendelse af sorteret, uforurenede bygge- og anlægsaffald. <http://retsinformation.dk>. Den gældende bekendtgørelse. Bekendtgørelsen downloadet 07. maj 2014.
- [C1437-07, 2007] C1437-07 (2007). Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. *ASTM International*.
- [Christiansen og Øster, 2014] Christiansen, M. S. og Øster, K. (2014). Anvendelse af alternativ aske i beton - bearbejdelse og hærdeforløb. Specialeafhandling, Danmarks Tekniske Universitet.
- [CM-P, 2009] CM-P (2009). beton (betonskader). <http://www.denstoredanske.dk>. Hentet d. 01.05.2014.
- [DongEnergy, 2008] DongEnergy (2008). Køge kraftvarmeværk: Grønt regnskab 2008. <http://www.dongenergy.com/>. Hentet d. 11.06.2014.
- [DS 259, 2003] DS 259 (2003). Vandundersøgelse - bestemmelse af metaller i vand, jord, slam og sedimenter å almene principper og retningslinjer for bestemmelse ved atomabsorptionsspektrofotometri i. *Dansk Standard*.
- [DS/EN 1015-3, 1999] DS/EN 1015-3 (1999). Prøvningsmetoder til undersøgelse af mørtel til murværk - del 2: Repræsentativ prøveudtagning af mørtel og fremstilling af prøvningsmørtler. *Dansk Standard*.
- [DS/EN 196-1, 2005] DS/EN 196-1 (2005). Metoder til prøvning af cement - del 1: Styrkebestemmelse. *Dansk Standard*.
- [DS/EN 196-2, 2005] DS/EN 196-2 (2005). Metoder til prøvning af cement - del 2: Kemisk analyse af cement. *Dansk Standard*.
- [DS/EN 196-3, 2009] DS/EN 196-3 (2009). Metoder til prøvning af cement - del 3: Bestemmelse af afbindingstid og volumenbetændighed. *Dansk Standard*.
- [DS/EN 206-1, 2002] DS/EN 206-1 (2002). Beton - del 1: Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse. *Dansk Standard*.
- [DS/EN 450-1, 2012] DS/EN 450-1 (2012). Flyveaske til beton - del 1: Definition, specifikationer og overensstemmelseskriterier. *Dansk Standard*.
- [Gottfredsen og Nielsen, 2010] Gottfredsen, F. R. og Nielsen, A. (2010). *Bygningsmaterialer: Grundlæggende egenskaber*. 6. Polyteknisk Forlag, 1. udgave.
- [Hansen, 1995] Hansen, P. F. (1995). *Materialfysik for bygningsingeniører - beregningsgrundlag*. Statens Byggeforskningsinstitut.
- [HJSP, 2009] HJSP (2009). Cement (portlandcement). <http://www.denstoredanske.dk>. Hentet d. 01.05.2014.
- [Højteknologifonden, 2014] Højteknologifonden (2014). Forskning skal udvikle miljøvenlig cement. <http://hoejteknologifonden.dk/>. Hentet d. 11.06.2014.

- [Hoyer, 2013] Hoyer, S. B. (10.05.2013). Co2-koncentrationen i atmosfæren slår rekord. [http : //politiken.dk/](http://politiken.dk/). Hentet d. 11.06.2014.
- [Huntley, 2014] Huntley, A. K. (2014). Anvendelse af alternativ aske i beton - bearbejdelighed og hærdeforløb. Specialeafhandling, Danmarks Tekniske Universitet.
- [Jensen et al., 2008] Jensen, O. M., Nielsen, A. og Hansen, K. K. (2008). *Bygningsingeniørernes materialer - uddrag af Materialebogen*. 1. Polyteknisk Forlag, 1. udgave.
- [Knudsen og Larsen, 2013] Knudsen, A. G. og Larsen, T. S. (2013). Brug af aske i beton - nye problemer og nye muligheder. anvendelse af brundaske fra halm og træ i beton. Specialeafhandling, Danmarks Tekniske Universitet.
- [Mathiasen, 2014] Mathiasen, R. K. (2014). Anvendelse af alternativ aske i beton - bearbejdelighed og hærdeforløb. Specialeafhandling, Danmarks Tekniske Universitet.
- [Rasmussen og Andersen, 2014] Rasmussen, S. L. og Andersen, D. V. (2014). Anvendelse af alternativ aske i beton - bearbejdelighed og hærdeforløb. Specialeafhandling, Danmarks Tekniske Universitet.
- [Schnell og Ottosen, 2010a] Schnell, E. og Ottosen, L. (2010a). Metode 11a: Oplukning af jordprøve efter ds 259. *Øvelsesvejledning til kemiske og fysiske analyser af tungmetalforurennet jord*.
- [Schnell og Ottosen, 2010b] Schnell, E. og Ottosen, L. (2010b). Metode 16: Glødetab i jord. *Øvelsesvejledning til kemiske og fysiske analyser af tungmetalforurennet jord*.
- [Schnell og Ottosen, 2010c] Schnell, E. og Ottosen, L. (2010c). Metode 17: Måling af ledningsevne i jord. *Øvelsesvejledning til kemiske og fysiske analyser af tungmetalforurennet jord*.
- [Schnell og Ottosen, 2010d] Schnell, E. og Ottosen, L. (2010d). Metode 4: ph i 1 m kcl opslemning. jord-væske forhold 1:2,5. *Øvelsesvejledning til kemiske og fysiske analyser af tungmetalforurennet jord*.
- [Schnell og Ottosen, 2010e] Schnell, E. og Ottosen, L. (2010e). Metode 9: Vandindhold i jord. *Øvelsesvejledning til kemiske og fysiske analyser af tungmetalforurennet jord*.

Bilag

A	Forsøgsvejledninger	51
A.1	Vandopløselighed	51
A.2	Vandopløselige anioner	53
A.3	Vicatronic Manual	55
A.4	Porøsitet og densitet	61
A.5	Kapillarsugning	65
B	Data for askekarakteristik	79
B.1	Data for glødetab, pH, ledningsevne, vandopløselighed og vandindhold	80
B.2	Tørring af uknust træaske fra depot	82
B.3	Rådata for ICP-målinger	84
B.4	Tungmetalindhold i aske	86
B.5	Rådata for IC-målinger for alle gruppers aske	88
B.6	Rådata for IC-målinger for træaske fra ovn	90
B.7	Rådata for IC-målinger for udvasket træaske fra depot	92
B.8	Saltindhold i aske	94
B.9	Maksimalt indhold af Cl i beton i fht. cementvægten	95
B.10	Rådata for kornstørrelsefordelingen	96
B.11	Kornstørrelsefordeling	103
C	Data for trykstyrke	107
C.1	Samlet skema over trykstyrker	109
C.2	Oversigt over målinger i trykstyrkeforsøg	111
C.3	Oversigt over målinger i trykstyrkeforsøg udført af Louise Birkemose	123
D	Data for flydesætmål	127
E	Data for afbindingstid	131
E.1	Data for afbindingstid for REF, 5 % CD, 10 % SD og 5 % CO	132
E.2	Data for afbindingstid for Udvaske, Udvaske + NaCl og Udvaske + meget NaCl	135
F	Data for porøsitet og densitetsforsøg	139
G	Data for kapillarforsøg	141
H	Poster fra midtvejspræsentation	143

[Blank side]

A | Forsøgsvejledninger

A.1 Vandopløselighed

Vandopløselighed

Analyse:

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

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

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

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

Hele prøven hældes over i filteret og stilles til afdrypning.

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

Asken og filteret vejes og vægten noteres.

A.2 Vandopløselige anioner

Vandopløselige anioner

Analyse:

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

Prøven stilles på rystebord natten over.

Prøven filtreres med sprøjtefilter og prøven gemmes til ionchromotograf og AAS

A.3 Vicatronic Manual

Vicatronic manual

Apparatet benyttes til at bestemme afbindingstiden af en cementmørtel. Vicatronic er udstyret med en nål og en føler som registrerer dybden af hvert nedstik i en mørtel i forhold til et kalibreret nulpunkt. Herved gives brugeren en nem og præcis måde at fastlægge afbindingens start- og sluttidspunkt. Testene udføres automatisk, så der opnås absolut præcision og validitet over resultaterne, da man undgår typiske fejl som er forekommende ved manuelt arbejde.

Denne instruktionsmanual giver en kort gennemgang af de test som er mulige at udføre med Vicatronic. Der gives en beskrivelse af de operatørmæssige funktioner samt en gennemgang af kalibreringsmetoden. Endeligt gennemgås et eksempel på en test igennem en beskrivelse af en "standardprocedure" som vil give selv uerfarne operatører mulighed for at udføre en test.

Vicatronic har følgende operatørfunktioner som er beskrevet kort i det nedenstående. På Figur 2 er de forskellige funktionernes placering afbildet.

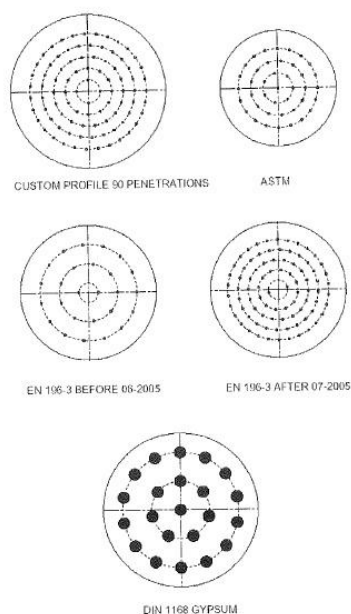
TABEL 1. OPERATØR FUNKTIONER PÅ VICATRONIC.

Element	Funktion	Beskrivelse
A1	Kontrolpanel	Indstillinger og data indtastes.
A2	Nål	Nålen som udfører nedstikket.
A3	Glasplade	Kan anbringes på roterpladen.
A4	Ramme	Den ydre ramme om apparatet.
A5	Kalibreret vægt (Ikke vist i dokumentet)	Bruges til at præcisere kalibreringen.
A6	Føler	Nålen er fastgjort herpå. Føleren bevæger sig vertikalt ved hvert nedstik.
A7	Roterplade	Holder prøven under tests.
A8	Hovedafbryder	Tænder og slukker apparatet.
A9	Strømindgang	Strømmen tilsluttes
B1	ESC-KNAP	Ved at trykke på 'ESCAPE KNAPPEN', da forlades enhver menu.
B2	Manøvreringsknap	Knappen kan drejes og benyttes til at manøvrere rundt i de forskellige menuer samt til at indtaste testdata. Ved tryk på manøvreringsknappen opnås 'ENTER FUNKTIONEN'. Herved åbnes menuer og valg bekræftes.

01 Test programmer

Det er muligt at udføre programtests iht. fem standarder og tests med brugerdefinerede indstillinger (FREE1:FREE5). Test udført iht. standarder fremgår af nedenstående og tilhørende testprofiler for hver programtests fremgår af Figur 1.

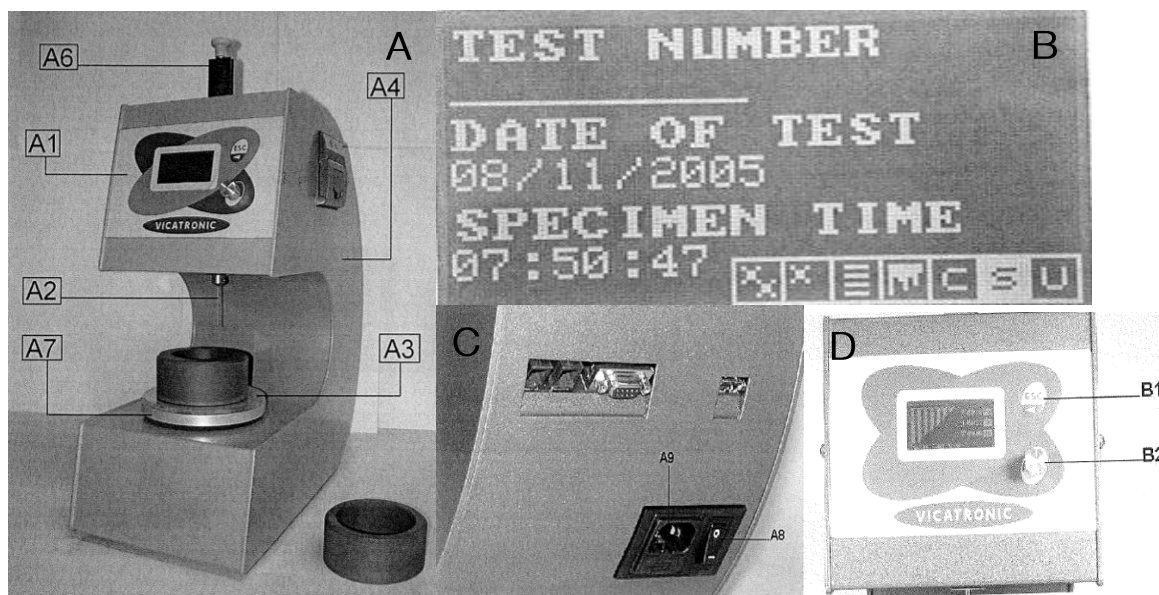
STANDARD	EN196-3:2005 (EN 196-3 BEFORE 06-2005)
Total number of penetrations	26
Conical mould	70 / 80 / 40 mm
Min. distance between two penetrations	10 mm
STANDARD	EN (EN 196-3 AFTER 07-2005)
Total number of penetrations	86
Conical mould	70 / 80 / 40 mm
Min. distance between two penetrations	10 mm
STANDARD	ASTM (ASTM C 191)
Total number of penetrations	41
Conical mould	60 / 70 / 40 mm
Min. distance between two penetrations	6.4 mm
STANDARD	DIN1168 GYPSUM (DIN 1168 GYPSUM)
Total number of penetrations	22
Conical mould	100 g.
Min. distance between two penetrations	08 mm / Length 50 mm
STANDARD	90 DROP (CUSTOM PROFILE 90 PENETRATIONS)
Total number of penetrations	90
Conical mould	80 / 90 / 40 mm
Min. distance between two penetrations	6 mm



FIGUR 1. TEST-PROFILER.

02 Test fremgangsmåde

1. Tænd apparatet ved at trykke på hovedafbryderen (A8) bag på apparatet.
2. Ved opstart vil der være en kort forsinkelse på 8-10 sekunder, mens nålen stiller sig i den korrekte position, før apparatet kan tages i brug.
3. Brug manøvreringsknappen (B2) til at vælge og styre igennem de forskellige menuer.
4. Brug ESC-KNAP (B1) til at forlade enhver menu.
5. Indstil manuelt maskinens tid og dato ved at gå ind i menuen OPTIONS fra hovedmenuen.
6. Fra menuen INSTRUMENTS vælges NEEDLE CALIBRATION for at kalibrere apparatet før en test jf. 03 KALIBRERING.
7. Efter endt kalibrering bekræftes kalibreringen ved tryk på manøvreringsknappen (B2). Føleren vil nu positionere sig i det højeste punkt før en test.
8. Placer prøven på bundpladen. Gå ind i menuen TEST EXECUTION fra hovedmenuen. De nødvendige test data indtastes jf. 04 TEST DATA EKSEMPEL. Testen kan efterfølgende påbegyndes ved tryk på manøvreringsknappen (B2).
9. Under hele testen er det muligt at følge dataene og hente information om hvert nedstik ved brug af manøvreringsknappen (B2).
10. Testen stopper automatisk. I menuen FILE TESTS vælges printerfunktionen "S" for at printe forsøgsdataene i et komplet print eller i en papirbesparende udgave.

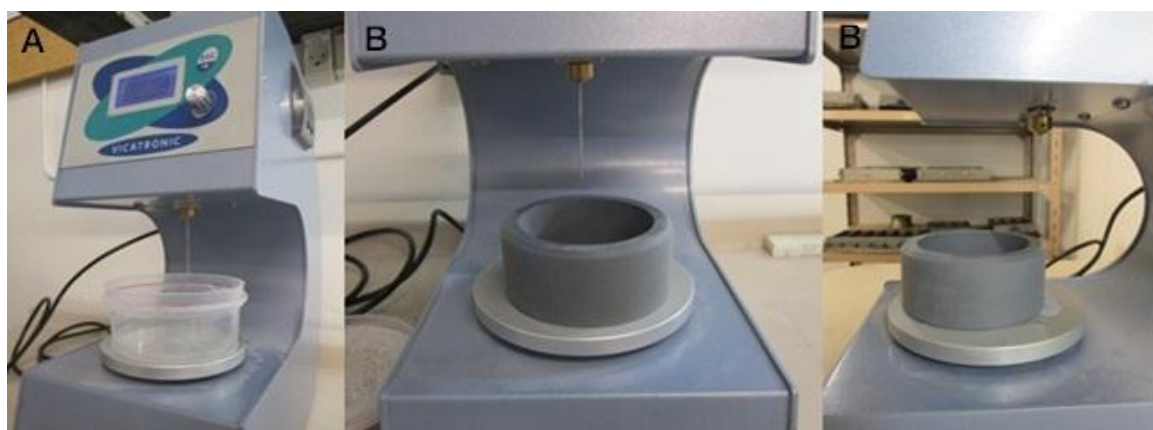


FIGUR 2. A: VICATRONIC APPARAT. B: PRINTERKNAP. C: HOVEDAFBRYDER. D: ESC-KNAP OG MANØVRERINGSKNAP.

03 Kalibrering før test

For at sikre brugbare resultater, kan det være nødvendigt at kalibrere Vicatronic før en test påbegyndes. Apparatet skal kalibreres for et nulpunkt og et øvre punkt som benyttes som referencepunkter for målingerne. I dette eksempel på en kalibrering, vælges det at benytte et øvre punkt på 40 mm.

1. Tænd apparatet ved at trykke på hovedafbryderen (A8) bag på apparatet.
2. Brug manøvreringsknappen (B2) til at vælge menuen INSTRUMENTS fra hovedmenuen og igen til at vælge undermenuen NEEDLE CALIBRATION.
3. Placer beholder på roterpladen (A7). Apparatet måler først nulpunktet (0,0 mm). Dette punkt skal korrespondere til bunden af din prøveblanding. Benyt derfor samme beholder som prøveblandingen fyldes i for at undgå fejl ved en bundtykkelse. Eventuelt kan et tomt XL rejebeager fra COOP benyttes, se Figur 3.A.
4. Bekræft, at kalibreringen er klar til at foretages ved tryk på manøvreringsknappen (B2). Nålen vil falde indtil den møder modstand. Ved tryk på manøvreringsknappen (B2) bekræftes, at nålen har ramt bunden i beholderen og nulpunktet lagres i Vicatronics hukommelse. Nålen vil efterfølgende positionere sig i udgangsposition. Rør **IKKE** ved beholderen eller nålen endnu.
5. Umiddelbart efter vil nålen falde endnu engang og ramme beholderens bund. Vicatronic vil nu have bekræftet, at toppunktet er ramt. Hæv nålen ved at løfte i føleren (A6) og indsæt en referenceblok som har den ønskede højde, i dette tilfælde 40 mm, se Figur 3.B.
6. Nålen skal hvile på referenceblokkens kant. Herefter bekræftes toppunktet ved tryk på manøvreringsknappen (B2). Nålen vil indstille sig i udgangsposition og kalibreringen er nu udført.



FIGUR 3. A: KALIBRERING AF NULPUNKT (0,0 MM). B: KALIBRERING AF TOPPUNKT (40,0 MM).

04 Test data eksempel

Fra hovedmenuen gå ind i TEST EXECUTION for at starte en test. Et eksempel på testdata med en tilhørende billedinstruktion, **Figur 4**, er vist i det nedenstående i henhold til testen 90 DROP (CUSTOM PROFILE 90 PENETRATIONS):

TEST NUMBER	: ABC123	(Test identifikationskode)
KIND OF TEST	: 90 DROP	(Profil test type)
OPERATOR CODE	: VS14	(Operatørens identifikations kode)
COSTUMER CODE	: MIA14	(Modtagerens identifikations kode)
TEST OF DATE	: 10/01/14	(Dato for test)
SPECIMEN TIME	: 11:30:00	(Indtast start tidspunkt for hydratisering)
1ST PENETR TIME [hh.mm.ss]	: --:--:--	(Starttid af test)
START DELAY [m]	: 7 min	(Udskydning af start)
<i>BEMÆRK!</i> Ved valg af START DELAY fravælges automatisk 1ST PENETR TIME.		
SPECIMEN TYPE	: MORTAR1	(Identifikation af prøvens type)
WATER CONT. [%]	: 0.0	(Procent af prøvens vandindhold)
TEMPERATURE [°C]	: 24.5	(Temperaturen i rummet, stuetemperatur)
HUMIDITY [%]	: 60.0	(Fugtigheden i rummet)
FALL TYPE	: FREE	(Vælg mellem GUIDED og FREE FALL)
TIME TYPE	: FIXED	(Tidsinterval type mellem hvert nedstik)
FINAL SETTING	: NO	(Tidsinterval type mellem hvert nedstik)
FIXED TIME [m]	: 10 min	(Tidsinterval i minutter mellem hvert nedstik)



FIGUR 4. BILLEDEINSTRUKTION AF TESTINDSTILLINGER FOR TEST TYPE "90 DROP".

A.4 Porøsitet og densitet

	FUGTPARAMETRE, PORØSITET OG DENSITET LBM-Prøvemethode 2.	6108/14 s. 1
		290390 CBN: sl

Anvendelsesområde

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

Metoden kan eventuelt kombineres med LBM-prøvemethode 1.

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 Matériaux et Constructions Vol. 10, nr. 58.

Definitioner, begreber og symboler

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

m_o	(kg)	Masse af prøvelegemet før forsøget
m_{105}	(kg)	Masse af prøvelegeme efter tørring ved 105°C
m_{ssd}	(kg)	Masse i luft af vakuumvandmættet prøvelegeme i overfladetør tilstand
m_{sw}	(kg)	Masse af vakuumvandmættet prøvelegeme vejet i vand
V	(m ³)	Prøvelegemets volumen
$V_{p\bar{a}}$	(m ³)	Volumen af åbne porer
ρ_f	(kg/m ³)	Faststofdensitet
ρ_d	(kg/m ³)	Tørdensitet
ρ_{ssd}	(kg/m ³)	Densitet af prøvelegeme i vakuumvandmættet overfladetør tilstand
p_a	(m ³ /m ³)	Prøvelegemets åbne porøsitet
u_{ssd}	(kg/kg)	Vandtørstofforhold i vakuumvandmættet overfladetør tilstand

Prøveudtagning

Antallet af prøver bestemmes ud fra en 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 af cementbaserede materialer skal opbevares i længere tid før prøvningen, må de beskyttes mod kemiske forandringer såsom karbonatisering.

	FUGTPARAMETRE, PORØSITET OG DENSITET LBM-Prøvemethode 2.	6108/14 s. 2
		290390 CBN:sl

Apparatur

- Varmeskab til udtørring ved $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Ekssikkator med silicagel til opbevaring af prøvelegemerne under afkølingen
- Vægt, hvor prøvelegemernes masse kan bestemmes med en nøjagtighed på 0,1 % - vægtkontrollod
- 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
- Ekssikkator 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 vægtkonstans. Tørring ved 105°C kan for nogle materialer medføre ændringer i porestrukturen. Disse materialer bør tørres ved en lavere temperatur. Derefter afkøling i ekssikkator til stuetemperatur. Prøvelegemet vejes (vægt m_{105}) (Skema 1).

Det udtørrede prøvelegeme evakueres ^{kontinuerligt} i ekssikkator i mindst 3 timer ved tryk på ($\sim$ torr).

Demineraliseret vand med rumtemperatur ledes ind i ekssikkatoren. 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}) (Skema 1). Efter af-tørring af overfladen med en hårdt opvreden klud vejes prøvelegemer i luft (vægt m_{ssd}) (Skema 1).

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

Parametrene bestemmes som vist med formlerne i skema 1.

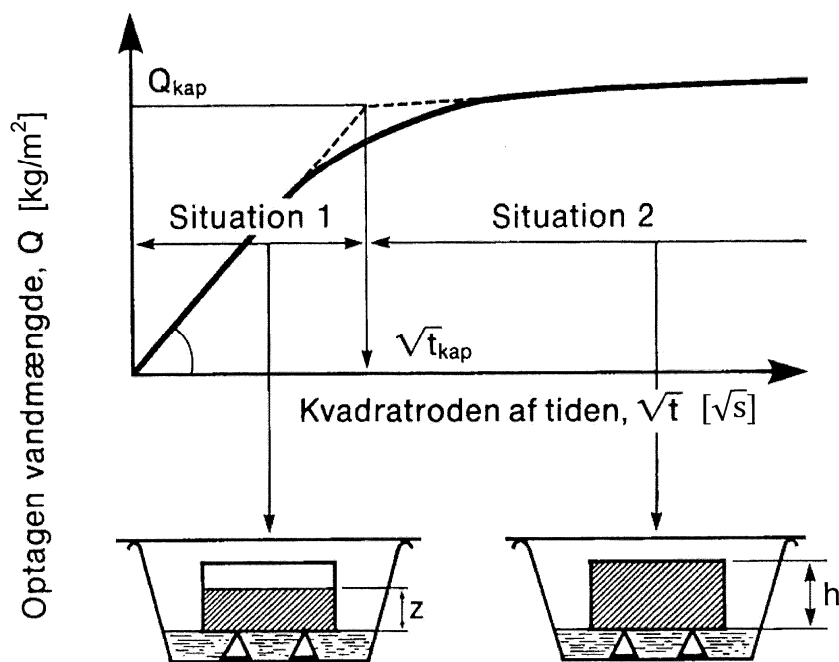
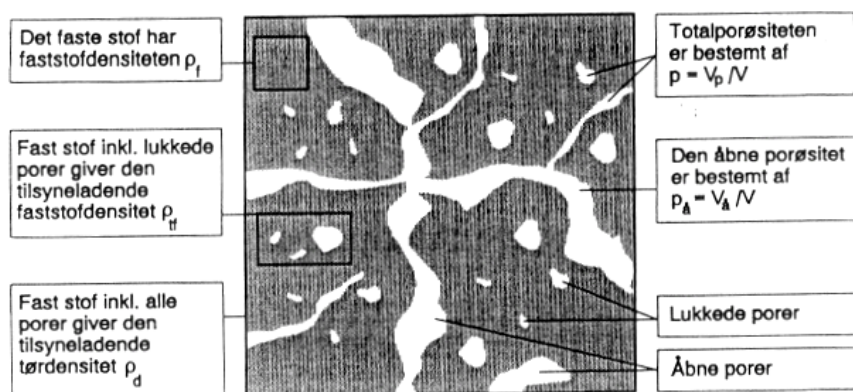
	PORØSITET OG DENSITET, SKEMA 1	Hold:
	Sag:	Dato:
		Initialer:

Rum: T = °C	Vand: T = °C	Vanddensitet $\rho_w =$ kg/m ³			
Vægtkontrollod	Før:	Kg,g	Efter:	Kg,g	
Prøvelegeme nr.					
m_{105} kg					
m_{ssd} kg					
m_{sw} kg					
$V = (m_{ssd} - m_{sw}) / \rho_w$ m ³					
$V_{p\hat{a}} = (m_{ssd} - m_{105}) / \rho_w$ m ³					
$\rho_{\hat{a}} = V_{p\hat{a}} / V$ m ³ /m ³					
$\rho_d = m_{105} / V$ kg/m ³					
$\rho_f = m_{105} / (V - V_{p\hat{a}})$ kg/m ³					
$\rho_{ssd} = m_{ssd} / V$ kg/m ³					
$u_{ssd} = (m_{ssd} - m_{105}) / m_{105}$ kg/kg					

Bemærkninger:				
---------------	--	--	--	--

A.5 Kapillarsugning

PORØSITET, DENSITET OG KAPILLARSUGNING



Indholdsfortegnelse

1. FORMÅL	3
2. OMFANG	3
3. BAGGRUND	4
3.1. GENERELT	4
3.2. PORØSITET OG DENSITET	4
3.3. KAPILLARSUGNING	5
4. EKSPERIMENTER	8
4.1. PORØSITET OG DENSITET	8
4.2. KAPILLARSUGNING I MURSTEN	8
5. RAPPORTERING	9
6. LITTERATUR	9
BILAG 1: SKEMA 1 – PORØSITET OG DENSITET	10
BILAG 2: SKEMA 2 – KAPILLARSUGNING I	11
BILAG 3: SKEMA 3 – KAPILLARSUGNING II	12

Forside:

Øverst: Skitse af et porøst materiale med forskellige materialeparametre defineret.
 Nederst: Illustration af opsugningsforsøg.

1. Formål

Øvelsens formål er dels at måle porøsitet og densitet for et eller flere byggematerialer, dels at måle et eller flere byggematerialers kapillarsugningsevne. De anvendte byggematerialer oplyses på forsøgsdagen.

2. Omfang

Indledning: Øvelsen indledes med en fælles orientering om det apparatur, der skal anvendes.

Gruppearbejde: Herefter arbejder grupperne med hver deres prøvelegemer.

Afslutning: Øvelsen slttes med, at

**alle grupper indtaster måleresultater på Campusnet til brug ved rapporteringen.
Manglende resultater fra en gruppe medfører nedsat karakter i den endelige bedømmelse!**

3. Baggrund

3.1. Generelt

En bygningskonstruktions egenskaber afhænger af hvilket materiale den bygges af. Disse egenskaber kan fx være bæreevnen eller isolansen. Mange af byggematerialernes egenskaber påvirkes af hvor våde de er. Det gælder fx træ som vil angribes af svamp hvis der er et højt fugtindhold i det. Anbringes træet tæt sammen med våd beton vil svamp således angribe træet, ligesom styrken af træet vil mindskes med et øget fugtindhold.

3.2. Porøsitet og densitet

Et materiales porøsitet er afgørende for mange af dets egenskaber. En generel regel er at jo mindre porøst et materiale er, jo stærkere er det, og jo mere porøst det er, jo bedre isolerer det. Et materiales *densitet kan bestemmes som massen divideret med rumfanget*. Dog kan materialet indeholde en ukendt mængde vand, og den bestemte densitet er derfor en dårligt anvendelig størrelse, hvis masseandelen som vand udgør er ukendt. Derfor arbejdes ofte med følgende fire densitetsbegreber:

<i>faststofdensitet</i>	ρ_f
<i>tilsyneladende faststofdensitet</i>	ρ_{tf}
<i>tørdensitet</i>	ρ_d
<i>densitet i vandmættet, overfladetør tilstand</i>	ρ_{ssd}

og de dermed sammenhørende parametre til karakterisering af porøsitetsforholdene

<i>total porøsitet</i>	p
<i>åben porøsitet</i>	p_a
<i>absorption</i>	w_a

Størrelserne ρ_f og ρ_{tf} anvendes dog temmelig sjældent. Fig. 1 illustrerer de tre rumfangsdefinitioner.

I det følgende gives en mere udførlig forklaring på anvendte begreber til karakterisering af porøse eller kornede materialer.

Faststofdensiteten defineres som materialets masse i tør tilstand divideret med faststofrumfanget, der er vist på figur 1. Faststofrumfanget er selve det faste materiale uden nogen form for porer. Faststofdensiteten kan bestemmes ved pulverisering af prøven.

Den tilsyneladende faststofdensitet defineres som materialets masse i tør tilstand divideret med det tilsyneladende faststofrumfang. Det

tilsyneladende faststofrumfang betegner rumfanget af det der set udefra fremtræder som faststof, dvs. faststof inklusiv lukkede porer.

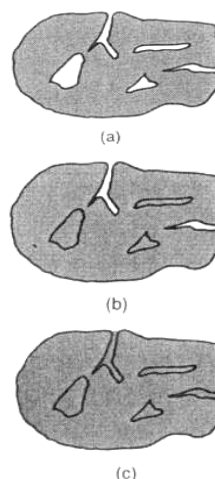


Fig. 1. Rumfangsdefinitioner. (a) absolut faststofrumfang (faststof), (b) tilsyneladende faststofrumfang (faststof + lukkede porer), (c) kornrumfang (faststof + lukkede porer + åbne porer).

Tørdensiteten defineres som materialets masse i tør tilstand divideret med prøvelegemets rumfang. Prøvelegemets rumfang betegner det rumfang, faststoffet beslaglægger hvor alle typer porer medtages. Det er altså det ydre rumfang.

Densiteten i vandmættet, overfladetør tilstand, v.o.t. (engelsk: saturated surface dry, s.s.d.) defineres som prøvelegemets masse i s.s.d.-tilstanden divideret med prøvelegemets ydre rumfang. Vandmættet tilstand kan opnås ved vakuumvandmætning af prøvelegemet.

Lukkede porer betegner porer der ikke er tilgængelige for vand fra materialets overflade.

Åbne porer betegner porer der er tilgængelige for vand fra materialets overflade.

Totalporøsiteten er forholdet mellem porerumfang (lukkede + åbne porer) og prøvelegemets ydre rumfang. Udtrykt ved de tidligere definerede densiteter haves porøsiteten som

$$p = p_a = \frac{\rho_f - \rho_d}{\rho_f} \quad (1)$$

Porøsitet, densitet og kapillarsugning

DTU Byg

I de fleste porøse materialer er poresystemet åbent, og derfor vil den åbne porøsitet være lig med totalporøsiteten.

Absorptionen er betegnelsen for massen af det vand der kan optages i de åbne porer via kapillarsugning divideret med massen af det tørre materiale. Den hænger sammen med de to tidligere omtalte densiteter ved følgende ligning.

$$w_a = \frac{\rho_{ssd} - \rho_d}{\rho_d} \quad (2)$$

Vandindholdet er vand-tørstofforholdet defineres som massetabet af en prøve der tørres ved 105 °C, udtrykt i % af prøvens masse efter tørringen.

Fugtoptagelsen der foregår i de åbne porer, vil være afhængig af porøsiteten. Hvis der ingen hulrum er, dvs. porøsiteten er nul, vil der ikke kunne optages vand. Hvis der derimod haves en stor porøsitet i et materiale, samtidig med poreradius er mellem $10^{-7}\text{ m} < r < 10^{-4}\text{ m}$, er der mulighed for at binde meget vand i det givne materiale. Dette er fx tilfældet med teglsten.

3.2.1. Bestemmelse af porøsitet og densitet

Ved den såkaldte veje-dyppe-veje metode kan densiteten og porøsiteten for et materiale findes. Metoden udnytter Archimedes lov der siger at opdriften på et legeme i en væske er lig tyngdekraften på det fortrængte væskevolumen. Dette betyder altså at vægten af prøvelegemet under vand m_u har en opdrift som gør, at prøvelegemet ikke vejer lige så meget under vand, som det gør over vand. Forskellen på vægten under vand og vægten over vand er lig vægten af den væske som prøvelegemet fortrænger.

Volumen af prøvelegemet nedsænket i vand kan bestemmes ud fra nedenstående formel.

$$V = \frac{m_{ov} - m_u}{\rho_w} \quad (3)$$

hvor

V er prøvelegemets volumen [m^3]
 m_{ov} er massen i luft af prøvelegemet i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand [kg]
 m_u er det målte masse af prøvelegemet neddyppet i vand [kg]
 ρ_w er vands densitet [kg/m^3]

Massen m_{ov} angiver hvor meget prøvelegemet vejer, når det er fyldt med vand i de åbne porer. Massen af prøvelegemet under vand, m_u er mindre end m_{ov} som følge af opdriften beskrevet ved Archimedes Lov.

Voluminet af de åbne porer i prøvelegemet findes efter formelen:

$$V_a = \frac{m_{ov} - m_0}{\rho_w} \quad (4)$$

hvor

V_a er voluminet af de åbne porer [m^3]
 m_0 er tørmassen af prøvelegemet [kg]

Tørmassen er den målte masse efter ovntørring ved 105 °C, hvorved alt vand i det åbne poresystem fordampes. Ud fra det åbne porevolumen kan den åbne porøsitet beregnes ved (5).

$$p_a = \frac{V_a}{V} = \frac{m_{ov} - m_0}{m_{ov} - m_u} \quad (5)$$

hvor

p_a er den åbne porøsitet [-]

Endvidere kan tørdensiteten af materialet bestemmes ved (6) ud fra den fundne tørmasse og det totale volumen.

$$\rho_d = \frac{m_0}{V} \quad (6)$$

hvor

ρ_d er materialets tørdensitet [kg/m^3]

Som tidligere nævnt har de fleste porøse materialer et åbent poresystem. Derfor vil faststofdensiteten være lig med den tilsyneladende faststofdensitet, der bestemmes af sammenhængen

$$\rho_f = \rho_{tf} = \frac{m_0}{m_0 - m_u} \cdot \rho_w \quad (7)$$

hvor

ρ_f er materialets faststofdensitet [kg/m^3]

Densiteten af prøvelegemet i vandmættet, overfladetør tilstand bestemmes ved (8).

$$\rho_{ssd} = \frac{m_{ov}}{V} \quad (8)$$

hvor

ρ_{ssd} er materialets densitet i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand [kg/m^3]

3.3. Kapillarsugning

En vandoverflade i en delvis vandfyldt pore – en menisk – vil altid være krum. I små porer

med lille diameter kan denne krumning være betydelig, hvorimod den for meget store diametre – fx i en kop – er uden praktisk relevans. Det hydrostatiske undertryk i vandet umiddelbart under menisken er afgørende for et af de vigtigste transportfænomener i mange porøse materialer – kapillarsugning.

Figur 2 viser stighøjden i et kapillarrør, der ækvivalerer en delvis vandfyldt pore. Som det ses danner meniskens kontakt til kapillarrørets inderside en vinkel med overfladen af kapillarrøret, kaldet kontaktvinklen. Desuden virker en overfladespænding i vandet som vist.

I tilfældet med små diametre er overfladespændingen afgørende for vandtransporten, idet den resulterer i en opadrettet kraft der overstiger tyngdekraften og friktionen med rørvæggen og trækker vandet op i røret.

Hastigheden hvormed vandet bevæger sig op i røret vil aftage med tiden, idet friktionen mellem væg og vand vil stige når vandet dækker et større indre areal i røret. Endvidere øges tyngdekraften med vægten af vandet i røret.

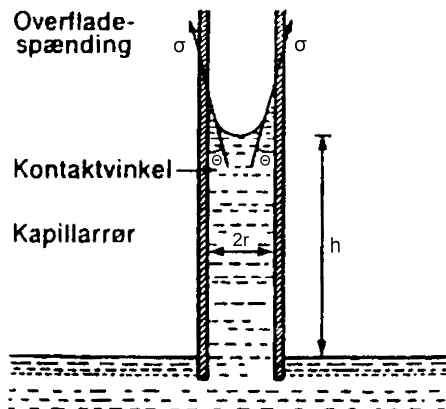


Fig. 2. Stighøjde i et kapillarrør.

Hvis porene er meget små, vil der være en betydelig modstand mod vandtransporten, der derfor vil foregå meget langsomt. Samtidig vil der være en meget stor kraft idet krumningen på menisken er stor. En væskesøjle kan således i teorien blive flere kilometer høj i meget tynde rør. Dette vil dog tage lang tid at opbygge, samtidig med at det kræver at der ikke er nogen luftbobler i væskesøjlen, idet disse vil bryde kapillarvirkningen. Det kan nævnes, at kapillartransport indgår, når et træ får transporteret vand fra rødderne og op til bladene.

Af nedenstående formel (9) ses hvor stort det hydrostatiske undertryk under menisken bliver:

$$p_h = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (9)$$

hvor

p_h er det hydrostatiske undertryk [Pa]

σ er overfladespændingen [N/m]

θ er kontaktvinklen [°]

r er radius i menisken [m]

Som det fremgår af (9) bliver undertrykket stort når radius mindskes. I porer over en vis størrelse vil der ikke forekomme kapillartransport, idet det hydrostatiske undertryk ikke vil resultere i en tilstrækkelig stor kraft til at flytte vandet. Derfor er det ikke alle åbne hulrum som kan fyldes ved kapillartransport af vand.

Når et materiale anbringes i kontakt med vand, vil der ved kapillarsugning transporteres vand op igennem materialet. Dette vil foregå ved aftagende hastighed når vandoverfladen har nået toppen af prøvelegemet, eller der er ligevægt mellem kapillarkræfterne fra vandet og de modsatte kræfter hidrørende fra friktion og tyngdekraft. Ved et kapillarsugningsforsøg anbringes et materiale med kendt overfladeareal i kontakt med en fri vandoverflade, og der foretages en vejning af prøven til forskellige tidspunkter. Resultaterne fra et sådan forsøg ses i figur 3.

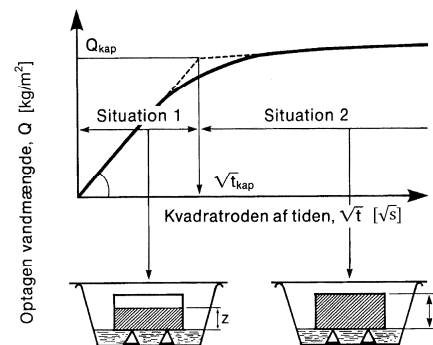


Fig. 3. Illustration af kapillarsugningsforsøg.

Den stiplede linje viser det ideelle forhold, hvor den optagne vandmængde pr. areal, Q som funktion af $t^{1/2}$ afbilder en ret linje, indtil vandmængden svarende til Q_{kap} er opsuget jf. situation 1 i figur 3. Herefter optages teoretisk set ikke mere vand, og hældningen af kurven er derfor nul, jf. situation 2 i figur 3. I virkeligheden vil en kurve se ud som vist ved den fuldt optrukne linje, fordi alle porene ikke fyldes lige hurtigt. Ligeledes vil der for nogle materialer være en svagt stigende tendens efter vandoverfladen har nået toppen af prøvelegemet; dette skyldes at fyldningen af de mindste porer i materialet tager lang tid.

På figur 3 ses skæringspunktet mellem de to stiplede linjer. Dette skæringspunkt ($t_{kap}^{1/2}$, Q_{kap}) findes ud fra tangenter til den krumme kurve. Ud fra koordinaterne til punktet kan

Porøsitet, densitet og kapillarsugning

DTU Byg

kapillaritetstallet, k ($kg/(m^2 \cdot s^{1/2})$) udregnes. Denne parameter angiver hældningen af den første kurve som vist i (10).

$$k = \frac{Q_{kap}}{\sqrt{t_{kap}}} \quad (10)$$

Det skal bemærkes, at det ikke er nødvendigt at finde skæringspunktet for at beregne kapillaritetstallet; det er tilstrækkeligt at kende hældningen på den første del af kurven.

Et stort kapillaritetstal betyder at opsugningen foregår hurtigt, mens et lavt omvendt angiver at opsugningen foregår langsomt. Dette har fx betydning for hvor meget vand en mursten når at opsuge i regnvejr, og hvor meget vand en mursten når at opsuge fra mørtelfugen under opmuring.

3.3.1. Bestemmelse af opsugningsparametre

Ved et opsugningsforsøg kan en række materialeegenskaber bestemmes. I første omgang skal den opsugede masse pr. areal bestemmes ud fra (11).

$$Q = \frac{m_t - m_0}{A} \quad (11)$$

hvor

Q er den opsugede masse pr. opsugningsareal [kg/m^2]
 m_t er massen af prøvelegemet til tiden t [kg]
 m_0 er tørmassen af prøvelegemet [kg]
 A er opsugningsarealet [m^2]

Massen af det forkonditionerede prøvelegeme, m_0 henviser til en vedtagen standardtilstand som prøvelegemet skal være i ved forsøgets start. Prøvelegemet har ved denne øvelse været udtørret ved en temperatur på 105 °C i to døgn og efterfølgende afkølet til rumtemperatur inden forsøgets start.

Når t_{kap} er bestemt som tidligere beskrevet kan modstandstallet M beregnes af (12). Dette siger noget om den indre modstand i materialet der påvirker opsugningshastigheden.

$$M = \frac{t_{kap}}{h^2} \quad (12)$$

hvor

M er modstandstallet [s/m^2]
 h er højden på prøvelegemet [m]

Som tidligere beskrevet kunne den åbne porøsitet bestemmes ud fra veje-dyppe-veje metoden, der benytter sig af Archimedes lov. Ved opsugningsforsøg kan denne porøsitet ligeledes bestemmes ved (13).

$$p_a = \frac{(m_{slut} - m_0)}{h \cdot A \cdot \rho_w} \quad (13)$$

hvor

p_a er den åbne porøsitet [-]
 m_{slut} er massen af prøvelegemet til tiden t_{slut} [kg]

4. Eksperimenter

4.1. Porøsitet og densitet

4.1.1. Apparatur og materialer

- 1 stk. ¼ mursten
- Ekssikkator til opbevaring af prøvelegeme under vakuumvandmætning
- Vægt med nøjagtighed på 0,1 %
- Kontrollod
- Udstyr til vejning af prøvelegeme under vand
- Demineraliseret, afluftet vand
- Termometer med inddeling på 0,1 °C
- Vakuumpumpe
- Klude til aftørring af prøvelegeme
- Varmeskab til forkonditionering af prøvelegeme

4.1.2. Fremgangsmåde

Først foretages en kontrolvejning vha. et kontrollod, og den målte masse noteres. Prøvelegemerne skal i udgangssituationen være udtørret i en ovn ved 105 °C og efterfølgende afkølet til rumtemperatur. Pga. tidsnød er dette gjort i forvejen, og den målte masse udleveres af vejlederen og noteres i skema 1, bilag 1. Det udtørrede prøvelegeme evakueres tørt i ekssikkator i mindst 3 timer. Pga. tidsnød befinder prøverne sig allerede i ekssikkator, hvor de har været evakueret i ovennævnte tidsrum.

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

Hanen på ekssikkatoren åbnes, og der ledes luft ind i ekssikkatoren. Prøverne henstår i vandet ved atmosfæretryk i 5 min. De vakuumvandmættede prøver vejes (m_u) under vandet, og værdien noteres. Hvorledes der vejes under vand vises af vejlederen. Prøvelegemerne aftørres med en hårdt opvredet klud, og vejes (m_{ov}) i luft. Alle omtalte værdier noteres i skema 1, se bilag 1.

4.2. Kapillarsugning i mursten

4.2.1. Apparatur og materialer

- 1 stk. ¼ mursten

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

4.2.2. Fremgangsmåde

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

Ekssikkatoren er en lufttæt plast- eller glasbeholder. Silicagelen er et tørremiddel som sørger for, at der ikke er fugt i luften inde i ekssikkatoren. Der benyttes kontrollod til sikring af at vægten vejer korrekt både før og efter forsøget. Prøvelegemet vejes i modtagelsessituationen (m_0), og dets dimensioner opmåles; højde (h) og sugefladdens længde (l) og bredde (b) noteres i skema 2, se bilag 2.

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

Temperaturen i lokalet måles (θ_{rum}) og noteres, mens temperaturen af vandet i fotobakken skal være 20 °C $\pm$ 2 °C, hvilket måles (θ_{vand}). Ved forsøg over længere tid bør fotobakken overdækkes for at udgå fordampning. Med passende tidsintervaller regnet fra starttidspunktet tages prøvelegemet op, aftørres med en hårdt opvredet klud og vejes (m_t). Stopuret stoppes ikke når prøvelegemet ikke er i kontakt med vandet i fotobakken. Der foretages målinger efter 1, 2, 4, 8, 16, 32, 60, 120, evt. 240 minutter fra starttidspunktet. Til sidst kontrolles vægten ved en kontrolvejning og værdien noteres. Vejerresultaterne noteres i skema 3, se bilag 3.

Når målearbejdet er færdigt, indtastes måleresultater i et resultatskema der ligger under fildeling på Campusnet. Husk at gemme det indtastede regneark på egen PC og 'uploade' det indtastede regneark på Campusnet.

5. Rapportering

På rapportform sammenfattes fremgangsmåde, forsøgsresultater, diskussion og konklusion i et omfang af **max. 4 sider**. Dersom sideantallet overskrides, trækker det ned i bedømmelsen!

Da modtageren regnes bekendt med teorien, opstilles kun de vigtigste formler anvendt i beregningen af forsøgsresultater, og der refereres til øvelsesvejledningen. Fremgangsmåden ved forsøgene beskrives særdeles kortfattet, og de vigtigste forsøgsresultater trækkes frem!

Hvad skal rapporten indeholde af resultater?

Porøsitet og densitet

- Søjlediagram over porøsiteter for samtlige gruppers materialeprøver. Angiv materialet ud for hver enkelt søjle.
- Søjlediagram indeholdende tørdensitet, faststofdensitet og densitet i s.s.d.-tilstand for samtlige gruppers materialeprøver. Inddel diagrammet således at de tre densiteter for hver materialeprøve sammenstilles.

Kapillarsugning

- Egen graf over opsugningsforsøget.
- Tabel over Q_{kap} og t_{kap} for alle gruppers resultater. Anfør endvidere porøsiteten for hver enkelt prøvelegeme.
- Tabel over kapillaritetstal og modstandstal for alle gruppers resultater.
- Grafisk afbildning af sammenhæng mellem målte porøsiteter og tilhørende kapillaritetstal.

Alle disse resultater diskuteres i videst muligt omfang inden for det anførte maksimale sideantal.

6. Litteratur

- [1] Gottfredsen F.R. og Nielsen A. (2006): *Bygningsmaterialer: Grundlæggende egenskaber*. Polyteknisk Forlag.

Bilag 1: Skema 1 – Porøsitet og densitet

Materiale:					
Målinger					
Temperatur	$\theta_{rum} =$	°C	$\theta_{vand} =$	°C	$\rho_w =$ 998 kg/m ³
Kontrollod	$m_{for} =$	kg			
Prøvelegeme Masse	$m_0 =$	kg	$m_u =$	kg	$m_{ov} =$ kg
Beregninger					
Volumen	$V =$	m ³	$V_{\bar{a}} =$	m ³	$p_{\bar{a}} =$
og densitet	$\rho_d =$	kg/m ³	$\rho_f =$	kg/m ³	$\rho_{ssd} =$ kg/m ³
Bemærkninger:					
Gruppenr. Dato					

Bilag 2: Skema 2 – Kapillarsugning I

Materiale					
Målinger					
Temperatur	$\theta_{rum} =$	°C	$\theta_{vand} =$	°C	$\rho_w =$ 998 kg/m ³
Prøvelegeme Dimensioner	$h =$	m	$l =$	m	$A =$ m ²
			$b =$	m	
Masse	$m_0 =$	kg			$m_{slut} =$ kg
Beregninger					
Opsugnings- parametre	$Q_{kap} =$	kg/m ²	$t_{kap} =$	s ^{1/2}	$k =$ kg/(m ² · s ^{1/2})
	$M =$	s/m ²	$p_{\dot{a}} =$		
Bemærkninger:					
Gruppenr. Dato					

Bilag 3: Skema 3 – Kapillarsugning II

Materiale				
Kontrollod	$m_{\text{før}} =$	kg	$m_{\text{efter}} =$	kg
Prøvelegeme	$t^{1/2}$ [s ^{1/2}]	m_t [kg]	Q [kg/m ²]	Bemærkninger
t [min]				
0				
1				
2				
4				
8				
16				
32				
60				
120				
240				
Bemærkninger: Gruppenr. Dato				

[Blank side]

B | Data for askekarakteristik

B.1 Data for glødetab, pH, ledningsevne, vandopløselighed og vandindhold

Vandindhold i træaske fra depot:

Tabel B.1: Data for forsøg med vandindhold

	Før tørring		Efter tørring		Resultater	
Forsøg [nr]	Glas [g]	Aske + glas [g]	Aske + glas [g]	Aske [g]	Vand [g]	Vandindhold [%]
1	20,26	28,55	28,48	8,22	0,07	0,2
2	18,8	27,96	27,9	9,1	0,06	0,2
3	22,51	32,78	32,71	10,2	0,07	0,2

Ledningsevne i træasken:

Tabel B.2: Data for ledningsevne i træaske fra depot

Forsøg [nr]	Aske [g]	Vand [ml]	Ledningsevne [mS/cm]
1	5,0	12,5	49,9
2	5,0	12,5	50,1
3	5,0	12,5	49,1

pH-værdi for træaske fra depot:

Tabel B.3: pH-værdien for hver af de 3 målinger

Forsøg [nr]	pH-værdi
1	12,96
2	12,96
3	12,97

Glødetab:

Tabel B.4: Data for forsøg med glødetab

	Før varme		Efter varme	
Forsøg [nr]	Digel [g]	Aske + digel [g]	Aske + digel [g]	Glødetab [%]
1	13,63	16,21	16,14	2,85
2	14,52	18,19	18,08	3,00
3	13,53	17,30	17,19	2,85

Vandopløselighed af salte i træaske fra depot:

Tabel B.5: Data for vandopløselighed

Forsøg [nr]	Før varme		Efter varme		
	Filter [g]	Aske [g]	Filter + aske [g]	Aske - filter [g]	Tab [%]
1	10,11	100,13	85,21	75,10	24,9

B.2 Tørring af uknust træaske fra depot

Tørres i oven på 105 °C						
Skål nr	Vægt af skål [g]	Aske + skål før tørring [g]	Aske før tørring [g]	Aske + skål efter tørring [g]	Aske efter tørring [g]	Askens vægttab [g]
						Vandindhold [%]
1	108,61	235,66	127,05	210,69	102,08	24,97
2	96,15	224,44	128,29	199,77	103,62	24,67
3	102,00	221,82	119,82	198,71	96,71	23,11
4	402,70	705,44	302,74	645,95	243,25	59,49
1	108,61	244,57	135,96	216,88	108,27	27,69
2	96,15	214,46	118,31	191,94	95,79	22,52
3	102,00	245,59	143,59	216,56	114,56	29,03
4	402,70	844,74	442,04	755,78	353,08	88,96
1	108,61	284,72	176,11	249,32	140,71	35,40
2	96,15	282,24	186,09	244,37	148,22	37,87
3	102,00	289,23	187,23	251,90	149,90	37,33
4	402,70	841,49	438,79	751,80	349,10	89,69
1	108,61	228,02	119,41	203,37	94,76	24,65
2	96,15	220,64	124,49	194,42	98,27	26,22
3	102,00	230,43	128,43	203,79	101,79	26,64
4	402,70	667,20	264,500	612,030	209,33	55,17
Gennemsnit						20,11

B.3 Rådata for ICP-målinger

Prøve	mg/kg Al	mg/kg As	mg/kg Cd	mg/kg Cr	mg/kg Cu	mg/kg Ni	mg/kg Pb	mg/kg Zn	mg/kg Na	mg/kg K	mg/kg P	mg/kg Mg
Samfyringsaske												
opl A	10329,60	5,64	11,61	106,86	154,00	0,00	37,38	1795,31	2622,26	77383,60	10587,90	30137,00
Samfyringsaske												
opl B	20868,30	8,95	22,90	216,49	300,06	1,03	75,63	1833,36	5267,97	82582,00	21392,80	30834,20
Samfyringsaske												
opl C	20492,60	7,78	21,99	211,99	295,44	1,53	74,90	1768,55	5149,15	76507,40	20707,00	29369,70
Træaske opl A	4548,87	0,00	4,96	33,74	110,26	0,54	41,63	495,92	4143,87	91437,50	8022,31	22097,40
Træaske opl B	4561,17	1,39	4,88	33,83	110,50	1,73	40,41	492,63	4137,24	90592,50	7991,49	22212,30
Træaske opl C	4672,74	0,00	5,14	34,94	113,38	1,46	43,02	512,27	4237,80	92636,70	8200,88	22710,10
Slamaske fra												
Avedøre fra												
depot opl A	29702,10	0,00	2,61	63,22	774,26	1,95	111,67	2687,71	2395,81	5338,84	99662,50	11819,60
Slamaske fra												
Avedøre fra												
depot opl B	44183,80	0,00	3,90	90,09	1105,04	1,22	160,79	4008,82	3329,51	7598,97	165843,00	19922,10
Slamaske fra												
Avedøre fra												
depot opl C	29599,10	0,00	3,24	64,78	785,15	15,63	115,54	2704,35	2431,43	5352,80	97973,80	12097,50
Slamaske fra												
Lynetten opl A	19577,10	0,00	2,81	53,44	634,27	20,63	131,32	3557,60	4833,07	10889,30	95062,20	18327,40
Slamaske fra												
Lynetten opl B	19770,40	1,83	2,71	52,63	631,54	17,28	130,11	3588,85	4775,38	10262,30	94920,70	18186,80
Slamaske fra												
Lynetten opl C	19196,70	0,00	2,57	52,23	620,32	17,76	129,94	3508,84	4754,54	10305,50	91398,50	18054,20
Slamaske fra												
Avedøre fra ovn												
opl A	28718,60	0,45	3,07	55,91	644,20	16,79	119,04	2516,75	3476,83	5682,64	92848,40	11641,60
Slamaske fra												
Avedøre fra ovn												
opl B	30134,70	0,53	3,45	57,87	676,40	6,18	121,59	2645,97	3564,23	5879,95	99229,00	11739,20
Slamaske fra												
Avedøre fra ovn												
opl C	30568,20	0,00	3,59	58,97	679,23	5,95	126,87	2697,06	3643,45	5976,89	100022,00	12443,40

B.4 Tungmetalindhold i aske

Tabel B.6: Sammenligning af tungmetalindhold

Metal	Træaske fra depot [mg/kg]	Samfyringsaske [mg/kg]	Slamaske Advedøre, fra depot [mg/kg]	Slamaske Advedøre, fra ovn [mg/kg]	Slamaske Lynetten [mg/kg]
Al	4594,26	17230,17	34495	29807,17	19514,73
As	0,46	7,46	0	0,33	0,6
Cd	4,99	18,84	3,25	3,37	2,69
Cr	34,17	178,45	72,69	57,58	52,76
Cu	111,38	249,83	888,15	666,61	628,71
Ni	1,24	0,85	6,26	9,64	18,56
Pb	41,69	62,64	129,33	122,5	130,46
Zn	500,27	1799,07	3133,63	2619,93	3551,76
Na	4172,97	4346,46	2718,02	3561,5	4787,66
K	91555,57	78824,33	6096,87	5846,49	10485,7
P	8071,56	17562,57	121159,77	97366,47	93793,8
Mg	22339,93	30137	14613,07	11941,4	18189,47

Data for tungmetalindhold i askerne i tabel B.6 er fundet i [Christiansen og Øster, 2014], [Mathiasen, 2014], [Huntley, 2014] og [Rasmussen og Andersen, 2014], jf. kapitel 1.2.1.

B.5 Rådata for IC-målinger for alle grupperes aske

Ionchromotograf på alle holds aske

Prøve	mg/kg Cl	mg/kg NO3	mg/kg SO4
Samfyringsaske opl A	6755,01	559,90	48028,15
Samfyringsaske opl B	6679,03	507,27	46678,56
Samfyringsaske opl C	6779,58	470,78	47644,01
Træaske opl A	6653,71	559,63	81795,71
Træaske opl B	6555,17	542,18	82045,04
Træaske opl C	6532,11	525,06	81870,84
Slamaske fra Avedøre fra depot opl A	26,40	33,38	8392,83
Slamaske fra Avedøre fra depot opl B	25,99	33,10	8528,86
Slamaske fra Avedøre fra depot opl C	25,96	34,08	8202,48
Slamaske fra Lynetten opl A	155,06	4,01	12753,75
Slamaske fra Lynetten opl B	159,80	7,85	12780,00
Slamaske fra Lynetten opl C	162,12	8,48	12572,34
Slamaske fra Avedøre fra ovn opl A	2071,37	10,29	9022,53
Slamaske fra Avedøre fra ovn opl B	2155,69	7,69	9503,94
Slamaske fra Avedøre fra ovn opl C	2075,48	7,94	9789,19

B.6 Rådata for IC-målinger for træaske fra ovn

Ionchromotograf på aske fra ovn

Prøve	mg/kg Cl	mg/kg NO3	mg/kg SO4
Træaske vand 1	7918,28	1061,16	54583,33
Træaske vand 2	9632,15	1254,42	66081,83
Træaske vand 3	7792,78	1079,65	53510,34

B.7 Rådata for IC-målinger for udvasket træaske fra depot

Ionchromotograf på aske udvasket

Prøve	mg/kg Cl	mg/kg NO3	mg/kg SO4
Træ aske vand 1	116,97	31,69	241,90
Træ aske vand 2	116,68	33,48	237,06
Træ aske vand 3	117,21	33,15	241,20

B.8 Saltindhold i aske

Alle grupperes saltindhold er målt ved metoden "Vandopløselige anioner", bilag A.2. Resultaterne er listet i tabellen herunder:

Tabel B.7: Saltindhold i projektgruppens aske

Salt	Træaske fra depot	Træaske fra ovn	Samfyrings- aske	Slamaske (Avedøre, depot)	Slamaske (Avedøre, fra ovn)	Slamaske (Lynetten)
Cl [mg/kg]	6580,33	8447,74	6737,87	26,12	2100,84	158,99
NO_3 [mg/kg]	542,29	1131,75	512,65	33,52	8,64	6,78
SO_4 [mg/kg]	81903,86	58058,50	47450,24	8374,72	9438,55	12702,03
Totalt indhold [%]	8,90	6,76	5,47	0,84	1,15	1,29

Data for saltindhold i askerne i tabel B.7 er fundet i [Christiansen og Øster, 2014], [Mathiasen, 2014], [Huntley, 2014] og [Rasmussen og Andersen, 2014], jf. kapitel 1.2.1.

Beregning af totalt saltindhold ved tilsætning af klorid

Ved at beregne antal mol af NO_3 og SO_4 i det totale saltindhold, findes den tilsvarende vægt af Cl (ud fra saltenes molære masse), som skal tilsættes asken.

Molær masse af SO_4 , NO_3 og Cl, jf. [Hansen, 1995].

$$Cl = 58,44 \frac{g}{mol}$$

$$NO_3 = 62,00 \frac{g}{mol}$$

$$SO_4 = 96,06 \frac{g}{mol}$$

Mol salt i asken

$$Cl = 6,58033 \frac{g}{kg}$$

$$NO_3 = 0,54229 \frac{g}{kg} = \frac{0,54229 \frac{g}{kg}}{62,00 \frac{g}{mol}} = 0,0087 \frac{mol}{kg}$$

$$SO_4 = 81,90386 \frac{g}{kg} = \frac{81,90386 \frac{g}{kg}}{96,06 \frac{g}{mol}} = 0,8526 \frac{mol}{kg}$$

Omregning af mol til gram klorid

$$Cl = 6,58033 \frac{g}{kg}$$

$$NO_3 \rightarrow Cl : 0,0087 \frac{mol}{kg} \cdot 58,44 \frac{g}{mol} = 0,5084 \frac{g}{kg}$$

$$SO_4 \rightarrow Cl : 0,8526 \frac{mol}{kg} \cdot 58,44 \frac{g}{mol} = 49,8259 \frac{g}{kg}$$

I alt klorid $[\frac{g}{kg}] = 50,3344 \frac{g}{kg}$

Mængde klorid, der i alt skal tilsættes ved 5% CM (22,5 g aske):

$$50,3344 \frac{g}{kg} \cdot 0,0225 kg = 1,1325 g$$

Vægten som anvendes til afmåling af salt har en præcision på 2 decimaler. Mængden af tilsat salt bliver da: 1,13 g salt.

B.9 Maksimalt indhold af Cl i beton i fht. cementvægten

Jf.[DS/EN 206-1, 2002] er der en maksimal værdi for, hvor meget klorid en beton m[indeholde i forhold til, hvordan betonen skal armeres. Grænsen for indholdet udtrykkes som en andel af mængden af cement. Grænseværdierne er som følger:

Tabel B.8: Grænseværdier for indhold af klorid jf. [DS/EN 206-1, 2002]

Uden armeringsstål eller andet metal	1,0 %
Med armeringsstål el. andet metal	0,2 - 0,4 %
Med spændarmering af stål	0,1 - 0,2 %

Indholdet af cement er for 5 % CM 427,5 g og aske 22,5 g. Forholdet mellem klorid og cement findes da ved informationer fra blig B.5

5 % CM

$$6580,33 \frac{mg}{kg} = 0,00658033 \frac{g}{g}$$

$$0,00658033 \frac{g}{g} \cdot 22,5g = 0,148057g$$

$$\frac{0,148057g}{427,5g} \cdot 100\% = 0,034 \%$$

5 % CU

$$0,008447737 \frac{g}{g} \cdot 22,5g = 0,19g$$

$$\frac{0,190074g}{427,5g} \cdot 100\% = 0,044\%$$

Først udregnes den totale mængde klorid for hhv. 5 % CM og 5 % CU hvorefter den relative mængde udregnes i forhold til indholdet af cement.

B.10 Rådata for kornstørrelsefordelingen

Nedenstående tabeller viser gennemfaldet i procent som funktion af maskevidden.

Apparatet anvendt til kornstørrelsesfordelingen laver en tripel bestemmelse for hver prøve. De følgende to bilag viser en gennemsnitlig kornstørrelsesfordeling af de tre prøver for henholdsvis uknust og knust aske.

Knust træaske				
Maskevidde (µm)	Træaske_gr.A	Træaske_gr.A	Træaske_gr.A	Træaske_gr.A - Average
0,02	0	0	0	0
0,02244	0	0	0	0
0,025179	0	0	0	0
0,028251	0	0	0	0
0,031698	0	0	0	0
0,035566	0	0	0	0
0,039905	0	0	0	0
0,044774	0	0	0	0
0,050238	0	0	0	0
0,056368	0	0	0	0
0,063246	0	0	0	0
0,070963	0	0	0	0
0,079621	0	0	0	0
0,089337	0	0	0	0
0,100237	0	0	0	0
0,112468	0	0	0	0
0,126191	0	0	0	0
0,141589	0	0	0	0
0,158866	0	0	0	0
0,17825	0	0	0	0
0,2	0	0	0	0
0,224404	0	0	0	0
0,251785	0	0	0	0
0,282508	0	0	0	0
0,316979	0	0	0	0
0,355656	0	0	0	0
0,399052	0	0	0	0
0,447744	0	0	0	0
0,502377	0	0	0	0
0,563677	0	0	0	0
0,632456	0	0	0	0
0,709627	0	0	0	0
0,796214	0	0	0	0
0,893367	0	0	0	0
1,002374	0	0	0	0
1,124683	0	0	0	0
1,261915	0	0	0,009307	0
1,415892	0,187793	0,15953	0,141089	0,159307
1,588656	0,493521	0,462014	0,400247	0,46428
1,782502	0,8317	0,802878	0,813986	0,80846
2	1,185555	1,154652	1,143771	1,163601
2,244037	1,528172	1,498032	1,506434	1,510693
2,517851	1,839415	1,809831	1,829896	1,826165
2,825075	2,11094	2,081795	2,111745	2,101632
3,169786	2,332381	2,303608	2,343717	2,326524
3,556559	2,515627	2,487097	2,535194	2,512646
3,990525	2,663002	2,634788	2,689328	2,662375

4,477442	2,790381	2,762642	2,822296	2,79177
5,023773	2,903563	2,876497	2,939895	2,906653
5,636766	3,010841	2,984711	3,050709	3,01542
6,324555	3,120399	3,095573	3,16328	3,126417
7,096268	3,238916	3,215832	3,284789	3,246513
7,962143	3,375632	3,354739	3,424883	3,385085
8,933672	3,527841	3,509399	3,580855	3,539365
10,023745	3,699932	3,684115	3,757134	3,713727
11,246826	3,881004	3,867598	3,942257	3,896953
12,619147	4,062459	4,050936	4,127026	4,08014
14,158916	4,228761	4,218238	4,295135	4,247378
15,886565	4,36313	4,352428	4,429054	4,381538
17,825019	4,450011	4,437645	4,512376	4,466677
20	4,472061	4,45643	4,527262	4,485251
22,440369	4,418038	4,397358	4,461823	4,42574
25,178508	4,283121	4,255913	4,311648	4,283561
28,250751	4,064083	4,029104	4,073652	4,055613
31,697864	3,769947	3,726865	3,758297	3,751703
35,565588	3,412682	3,362332	3,379199	3,384737
39,905246	3,0053	2,950048	2,951323	2,968891
44,774423	2,575415	2,519466	2,504941	2,533277
50,237729	2,129903	2,079214	2,048741	2,085941
56,367659	1,705319	1,66661	1,621034	1,664343
63,245553	1,304137	1,284537	1,225019	1,271226
70,962678	0,952506	0,957493	0,886315	0,93196
79,621434	0,655283	0,687867	0,605042	0,650011
89,336718	0,419673	0,479979	0,394133	0,429881
100,237447	0,248865	0,332198	0,234748	0,272723
112,468265	0,13629	0,235257	0,134287	0,169638
126,191469	0,074743	0,181395	0,028134	0,097712
141,589157	0,03166	0,154809	0	0,059808
158,865647	0	0,145349	0	0,046817
178,250188	0	0,136716	0	0,044616
200	0	0,110044	0	0,039175
224,403691	0	0,046434	0	0,014055
251,785082	0	0	0	0
282,507509	0	0	0	0
316,978638	0	0	0	0
355,655882	0	0	0	0
399,052463	0	0	0	0
447,744228	0	0	0	0
502,377286	0	0	0	0
563,676586	0	0	0	0
632,455532	0	0	0	0
709,626778	0	0	0	0
796,214341	0	0	0	0
893,367184	0	0	0	0
1002,374467	0	0	0	0
1124,68265	0	0	0	0
1261,914689	0	0	0	0

1415,891569	0	0	0	0
1588,656469	0	0	0	0
1782,501876	0	0	0	0
2000	0	0	0	0

Uknust træske				
Maskevidde (µm)	Træske_grA_våd	Træske_grA_våd	Træske_grA_våd	Træske_grA_våd - Average
0,02	0	0	0	0
0,02244	0	0	0	0
0,025179	0	0	0	0
0,028251	0	0	0	0
0,031698	0	0	0	0
0,035566	0	0	0	0
0,039905	0	0	0	0
0,044774	0	0	0	0
0,050238	0	0	0	0
0,056368	0	0	0	0
0,063246	0	0	0	0
0,070963	0	0	0	0
0,079621	0	0	0	0
0,089337	0	0	0	0
0,100237	0	0	0	0
0,112468	0	0	0	0
0,126191	0	0	0	0
0,141589	0	0	0	0
0,158866	0	0	0	0
0,17825	0	0	0	0
0,2	0	0	0	0
0,224404	0	0	0	0
0,251785	0	0	0	0
0,282508	0	0	0	0
0,316979	0	0	0	0
0,355656	0	0	0	0
0,399052	0	0	0	0
0,447744	0	0	0	0
0,502377	0	0	0	0
0,563677	0	0	0	0
0,632456	0	0	0	0
0,709627	0	0	0	0
0,796214	0	0	0	0
0,893367	0	0	0	0
1,002374	0	0	0	0
1,124683	0	0	0	0
1,261915	0	0	0	0
1,415892	0	0	0	0
1,588656	0	0	0	0
1,782502	0,022054	0,0226	0,022012	0,022222
2	0,074191	0,07606	0,074257	0,074836
2,244037	0,156465	0,160631	0,158062	0,158386
2,517851	0,224713	0,230843	0,227644	0,227733
2,825075	0,284338	0,292211	0,288562	0,28837
3,169786	0,341789	0,3513	0,347346	0,346811
3,556559	0,390822	0,401631	0,397586	0,39668
3,990525	0,433415	0,445183	0,441232	0,439943

4,477442	0,472097	0,484517	0,480817	0,479143
5,023773	0,507454	0,520228	0,516887	0,514857
5,636766	0,541317	0,554198	0,551268	0,548928
6,324555	0,575474	0,588288	0,58575	0,58317
7,096268	0,611781	0,624495	0,622208	0,619494
7,962143	0,654295	0,66707	0,664731	0,662032
8,933672	0,704361	0,717552	0,714692	0,712202
10,023745	0,766828	0,781004	0,776957	0,774929
11,246826	0,843474	0,859393	0,853329	0,852065
12,619147	0,939127	0,957742	0,94864	0,948503
14,158916	1,057367	1,079744	1,066473	1,067861
15,886565	1,20112	1,228314	1,209743	1,213059
17,825019	1,37787	1,41094	1,385889	1,391566
20	1,586477	1,626046	1,593732	1,602085
22,440369	1,838555	1,885072	1,844782	1,856136
25,178508	2,127878	2,181011	2,132769	2,147219
28,250751	2,463321	2,522288	2,466452	2,48402
31,697864	2,837754	2,900997	2,838673	2,859142
35,565588	3,246172	3,311608	3,244395	3,267392
39,905246	3,681152	3,746285	3,67617	3,701202
44,774423	4,117681	4,179943	4,109085	4,13557
50,237729	4,547045	4,604034	4,534388	4,561822
56,367659	4,926999	4,977198	4,910143	4,938113
63,245553	5,243651	5,286341	5,222582	5,250858
70,962678	5,460448	5,496378	5,435678	5,464168
79,621434	5,558997	5,590131	5,531526	5,560218
89,336718	5,522412	5,551779	5,493862	5,522684
100,237447	5,348081	5,37912	5,320561	5,349254
112,468265	5,036606	5,072488	5,012566	5,040553
126,191469	4,616441	4,65883	4,598068	4,624447
141,589157	4,099628	4,148263	4,08871	4,1122
158,865647	3,535851	3,587824	3,533033	3,552237
178,250188	2,945259	2,995582	2,950411	2,963753
200	2,369511	2,411972	2,381642	2,387695
224,403691	1,834597	1,863116	1,852444	1,85009
251,785082	1,357636	1,367962	1,379995	1,368483
282,507509	0,962356	0,952419	0,988047	0,967514
316,978638	0,642947	0,610355	0,670763	0,642045
355,655882	0,41077	0,368061	0,438869	0,403766
399,052463	0,249337	0,179002	0,275268	0,237513
447,744228	0,152062	0,08387	0,172961	0,135617
502,377286	0,101808	0,008083	0,114852	0,075639
563,676586	0,084516	0	0,087737	0,055427
632,455532	0,086833	0	0,079788	0,056166
709,626778	0,098052	0	0,081727	0,059853
796,214341	0,110025	0	0,087247	0,065694
893,367184	0,118197	0	0,092557	0,070341
1002,374467	0,11916	0	0,094616	0,071133
1124,68265	0,112854	0	0,092348	0,068441
1261,914689	0,100136	0	0,085052	0,061511

1415,891569	0,078818	0	0,070188	0,050537
1588,656469	0,05712	0	0,051817	0,035529
1782,501876	0,032504	0	0,030415	0,021141
2000	0,032504	0	0,030415	0,021141

B.11 Kornstørrelsesfordeling



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
Træske_grA_våd - Average

Sample Source & type:
Paris

Sample bulk lot ref:
123-ABC

SOP Name:
Flyveaskeaske våd

Measured by:
f-user

Result Source:
Averaged

Measured:
27. februar 2014 10:32:34

Analysed:
27. februar 2014 10:32:35

Particle Name:
aske

Particle RI:
1.500

Dispersant Name:
Water

Accessory Name:
Hydro 2000SM (A)

Absorption:
0

Dispersant RI:
1.330

Analysis model:
General purpose

Size range:
0.020 to 2000.000 μm

Weighted Residual:
0.384 %

Sensitivity:
Enhanced

Obscuration:
18.44 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0876 %Vol

Specific Surface Area:
0.179 m^2/g

Span :
2.395

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

Uniformity:
0.812

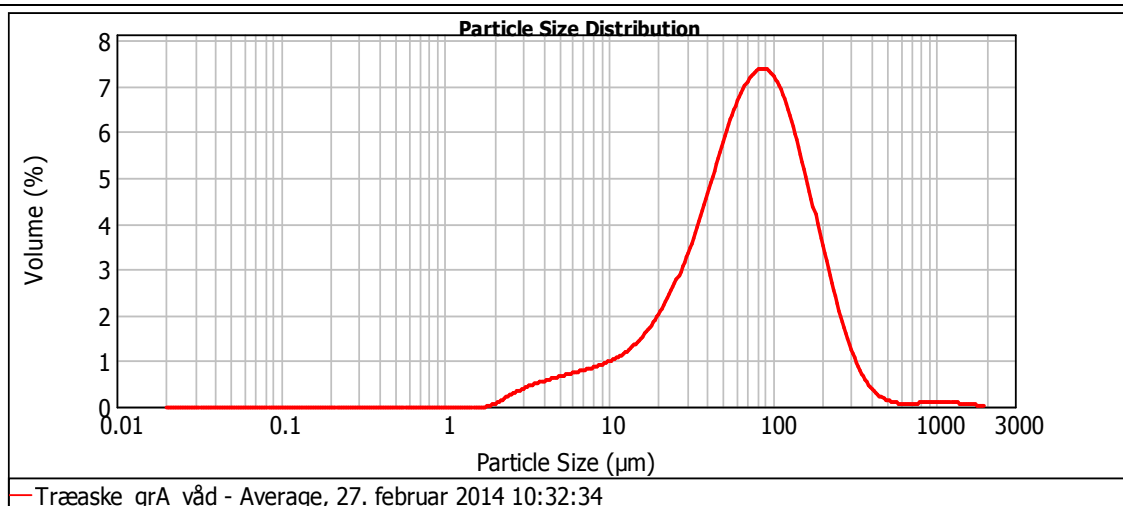
Vol. Weighted Mean D[4,3]:
95.916 μm

Result units:
Volume

d(0.1): 16.340 μm

d(0.5): 72.299 μm

d(0.9): 189.503 μm



Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.00	7.096	0.62	50.238	4.56	355.656	0.40
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.00	7.962	0.66	56.368	4.94	399.052	0.24
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.00	8.934	0.71	63.246	5.25	447.744	0.14
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.00	10.024	0.77	70.963	5.46	502.377	0.08
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.00	11.247	0.85	79.621	5.56	563.677	0.06
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.02	12.619	0.95	89.337	5.52	632.456	0.06
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.02	14.159	1.07	100.237	5.35	709.627	0.06
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	0.07	15.887	1.21	112.468	5.04	796.214	0.06
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	0.16	17.825	1.39	126.191	4.62	893.367	0.07
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	0.23	20.000	1.60	141.589	4.11	1002.374	0.07
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	0.29	22.440	1.86	158.866	3.55	1124.683	0.07
0.071	0.00	0.502	0.00	3.557	0.35	25.179	2.15	178.250	2.96	1261.915	0.06
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	0.40	28.251	2.48	200.000	2.39	1415.892	0.05
0.089	0.00	0.632	0.00	4.477	0.44	31.698	2.86	224.404	1.85	1588.656	0.04
0.100	0.00	0.710	0.00	5.024	0.48	35.566	3.27	251.785	1.37	1782.502	0.02
0.112	0.00	0.796	0.00	5.637	0.51	39.905	3.70	282.508	0.97	2000.000	
0.126	0.00	0.893	0.00	6.325	0.55	44.774	4.14	316.979	0.64		
0.142	0.00	1.002	0.00	7.096	0.58	50.238		355.656			

Operator notes:



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
Træske_gr.A - Average

Sample Source & type:
Paris

Sample bulk lot ref:
123-ABC

SOP Name:
Flyveaskeaske våd

Measured by:
f-user

Result Source:
Averaged

Measured:
27. februar 2014 10:18:38

Analysed:
27. februar 2014 10:18:39

Particle Name:
aske

Particle RI:
1.500

Dispersant Name:
Water

Accessory Name:
Hydro 2000SM (A)

Absorption:
0

Dispersant RI:
1.330

Analysis model:
General purpose

Size range:
0.020 to 2000.000 µm

Weighted Residual:
0.824 %

Sensitivity:
Enhanced

Obscuration:
13.95 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0149 %Vol

Specific Surface Area:
0.695 m²/g

Span :
2.896

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

Uniformity:
0.935

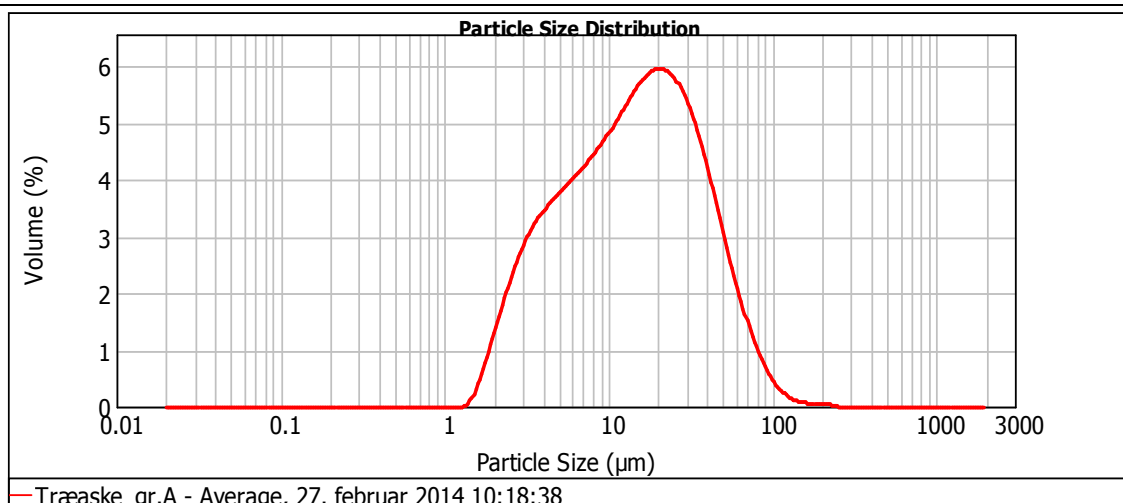
Vol. Weighted Mean D[4,3]:
20.604 µm

Result units:
Volume

d(0.1): 3.496 µm

d(0.5): 14.459 µm

d(0.9): 45.363 µm



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.00	7.096	3.25	50.238	2.09	355.656	0.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.00	7.962	3.39	56.368	1.66	399.052	0.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.00	8.934	3.54	63.246	1.27	447.744	0.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.16	10.024	3.71	70.963	0.93	502.377	0.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.46	11.247	3.90	79.621	0.65	563.677	0.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.81	12.619	4.08	89.337	0.43	632.456	0.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	1.16	14.159	4.25	100.237	0.27	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	1.51	15.887	4.38	112.468	0.17	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	1.83	17.825	4.47	126.191	0.10	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	2.10	20.000	4.49	141.589	0.06	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	2.33	22.440	4.43	158.866	0.05	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.00	3.557	2.51	25.179	4.28	178.250	0.04	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	2.66	28.251	4.06	200.000	0.04	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.00	4.477	2.79	31.698	3.75	224.404	0.01	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.00	5.024	2.91	35.566	3.38	251.785	0.00	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.00	5.637	3.02	39.905	2.97	282.508	0.00	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.00	6.325	3.13	44.774	2.53	316.979	0.00		
0.142	0.00	1.002	0.00	7.096		50.238		355.656	0.00		

Operator notes:

[Blank side]

C | Data for trykstyrke

Jf. [DS/EN 196-1, 2005] findes trykstyrken som gennemsnittet af de 6 målinger af trykstyrker. Herefter tages $\pm 10\%$ og de værdier der ligger uden for dette interval sorteres fra. Der tages gennemsnittet af de resterende værdier. Hvis der skal sorteres mere end to målinger fra, skal forsøget laves om, da usikkerheden da vil blive for stor.

Beregningseksempel

Der er foretaget følgende målinger for 5 % CM med en hærdetid på 28 døgn:

Tabel C.1: Målinger af trykstyrke

	1 tryk [kN]	2 Tryk [kN]
Bar 1	92	73
Bar 2	85	83
Bar 3	70	74

Ved hjælp af formel 2.3 findes trykstyrken:

For nemheds skyld antages det, i dette eksempel, at tværsnittet hvor der trykkes over er $A = 1600\text{mm}^2$.

Tabel C.2: Beregning af trykstyrke

	1 tryk [MPa]	2 Tryk [MPa]
Bar 1	$\frac{92 \cdot 1000}{1600} = 57,50$	$\frac{73 \cdot 1000}{1600} = 45,63$
Bar 2	$\frac{85 \cdot 1000}{1600} = 53,13$	$\frac{83 \cdot 1000}{1600} = 51,88$
Bar 3	$\frac{70 \cdot 1000}{1600} = 43,75$	$\frac{74 \cdot 1000}{1600} = 46,25$

Gennemsnittet beregnes:

$$\frac{57,50+45,63+53,13+51,88+43,75+46,25}{6} = 49,68\text{MPa}$$

Intervalleret $\pm 10\%$ beregnes:

$$49,68 \cdot 0,1 = 4,97\text{MPa}$$

$$[49,68 - 4,97; 49,68 + 4,97] = [44,72; 54,65]\text{MPa}$$

Ud fra dette interval bestemmes det, at værdierne 57,50MPa og 43,75MPa sorteres fra. Dermed

beregnes et nyt gennemsnit for de fire tilbageværende værdier, og dette er den endelige trykspænding:

$$\frac{45,63+53,13+51,88+46,25}{4} = 49,21\text{MPa}$$

C.1 Samlet skema over trykstyrker

Døgn	REF	5 % CD	10 % SD	5 % CO	Udvasket	Udvasket + NaCl	Udvasket + meget NaCl
1	19,97	20,01	15,23				
2	28,35	26,55	21,2				
3	39,96	33,2	27,17				
4	36,5	32,76	26,13				
5	46,05	32,32	25,09	37,93	37,67	40,57	40,05
7	66,8	54,7	36,5				
14	86	44,59	47,64				
21	83	55,6	43,02				
28	96,5	73,6	50,04				
35	93,6	70,4	51,7				
42	101,7	70,01	53,01				

C.2 Oversigt over målinger i trykstyrkeforsøg

TRYKTEST, side 1 af 11

				Geometri						Forsøgsresultater						
Prøvenr. * [nr.]	Blandingstype	Hærdetid [døgn]	Prøvedag [dato]	Bredde [mm]	Snit [mm]	Højde [mm]	Snit [mm]	Længde [mm]	Snit [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Ultralyd [ms]	Tryk 1 [kN] [Mpa]		Tryk 2 [kN] [Mpa]	
2A	REF	1	07-02-2014	40,47	40,47	40,46	40,46	162	162	567	2137513,969		4	2,44287	17	10,3822
				40,47		40,46		162								
				40,47		40,46										
2B	REF	1	07-02-2014	39,37	39,37	40,37	40,37	161	161	566	2211904,596		15	9,43772	10	6,29181
				39,37		40,37		161								
				39,37		40,37										
2C	REF	1	07-02-2014	40,94	40,94	41,25	41,25	162	162	578	2112715,569		14	8,29003	11	6,5136
				40,94		41,25		162								
				40,94		41,25										
4A	5 % CD	1	14-02-2014	40,98	40,46	39,94	40,03	161	161	572	2193606,297		32	19,7578	33	20,3752
				40,37		40,1		161								
				40,03		40,05										
4B	5 % CD	1	14-02-2014	39,82	39,76	39,98	39,9967	160	160,25	572	2244542,413		33	20,7512	34	21,3801
				39,81		40,01		160,5								
				39,65		40										
4C	5 % CD	1	14-02-2014	40,39	43,5067	40,07	40,12	160,5	160,25	567	2027067,851		37	21,1975	29	16,6143
				40,49		40,12		160								
				49,64		40,17										

*Blandingsstyper: REF = Referenceprøve 5 % CD = 5% cementerstatning fra depot 10 % SD= 10% sanderstatning fra depot 5 % CO = 5% cementerstatning fra oven

TRYKTEST, side 2 af 11

				Geometri						Forsøgsresultater						
Prøvenr. * [nr.]	Blandingsstype	Hærdetid [døgn]	Prøvedag [dato]	Bredde [mm]	Snit [mm]	Højde [mm]	Snit [mm]	Længde [mm]	Snit [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Ultralyd [ms]	Tryk 1 [kN] [Mpa]		Tryk 2 [kN] [Mpa]	
5A	10 % SD	1	14-02-2014	40,26	40,36	40,47	40,2867	160,5	160,75	547	2092781,329		27	16,6055	24	14,7604
				40,44		40,24		161								
				40,38		40,15										
5B	10 % SD	1	14-02-2014	39,71	39,9	40,23	40,25	161	161	537	2076871,512		26	16,1895	25	15,5669
				40,29		40,19		161								
				39,7		40,33										
5C	10 % SD	1	14-02-2014	39,99	40,2333	40,37	40,49	160	160,25	545	2087683,563		25	15,3464	24	14,7325
				40,37		40,47		160,5								
				40,34		40,63										
10A	5 % CD	3	07-03-2014	39,69	39,36	40,2	40,3033	162,5	161,75	580,81	2263569,011		44	27,7368	60	37,8229
				39,05		40,25		161								
				39,34		40,46										
10B	5 % CD	3	07-03-2014	40,73	41,01	39,91	40,2967	161,5	161	580,49	2181775,067		49	29,6509	45	27,2304
				40,99		40,27		160,5								
				41,31		40,71										
10C	5 % CD	3	07-03-2014	40,08	40,1367	40,17	40,3733	161,5	161	578,45	2217195,764		45	27,77	61	37,6438
				40,22		40,39		160,5								
				40,11		40,56										

*Blandingsstyper: REF = Referenceprøve 5 % CD = 5% cementerstatning fra depot 10 % SD= 10% sanderstatning fra depot 5 % CO = 5% cementerstatning fra oven

TRYKTEST, side 3 af 11

				Geometri						Forsøgsresultater						
Prøvent. * [nr.]	Blandingsstype	Hærdetid [døgn]	Prøvedag [dato]	Bredde [mm]	Snit [mm]	Højde [mm]	Snit [mm]	Længde [mm]	Snit [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Ultralyd [ms]	Tryk 1 [kN] [Mpa]		Tryk 2 [kN] [Mpa]	
11A	10 % SD	3	07-03-2014	40,7	40,9333	40,17	40,3	160	160	558,62	2116480,832		46	27,8853	43	26,0667
				41,27		40,35		160								
				40,83		40,38										
11B	10 % SD	3	07-03-2014	40,47	40,7633	40,31	40,3867	161	160,75	559,76	2115159,777		46	27,9415	45	27,3341
				40,83		40,26		160,5								
				40,99		40,59										
11C	10 % SD	3	07-03-2014	40,32	40,51	40,2	40,37	161	161,25	561,9	2130778,55		45	27,5164	43	26,2934
				40,88		40,29		161,5								
				40,33		40,62										
12A	5 % CD	5	10-03-2014	40,4	40,17	40,11	40,26	161,5	161,25	573,76	2200163,433		54	33,3901	49	30,2985
				40,13		40,32		161								
				39,98		40,35										
12B	5 % CD	5	10-03-2014	39,79	40,2233	40,07	40,28	160	160,25	572,21	2203889,852		59	36,4154	54	33,3293
				40,43		40,28		160,5								
				40,45		40,49										
12C	5 % CD	5	10-03-2014	40,22	40,0133	40,25	40,2467	161	160,75	571,97	2209467,512		52	32,29	52	32,29
				39,81		40,23		160,5								
				40,01		40,26										

*Blandingsstyper: REF = Referenceprøve 5 % CD = 5% cementerstatning fra depot 10 % SD= 10% sanderstatning fra depot 5 % CO = 5% cementerstatning fra oven

TRYKTEST, side 4 af 11

				Geometri						Forsøgsresultater						
Prøvenr. * [nr.]	Blandingstype	Hærdetid [døgn]	Prøvedag [dato]	Bredde [mm]	Snit [mm]	Højde [mm]	Snit [mm]	Længde [mm]	Snit [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Ultralyd [ms]	Tryk 1		Tryk 2	
13A	10 % SD	5	10-03-2014	40,29	40,53	39,93	40,2233	161,5	161,5	564,05	2142349,957		41	25,1495	43	26,3763
				40,74		40,32		161,5								
				40,56		40,42										
				40,46		40,41		161								
13B	10 % SD	5	10-03-2014	40,7	40,5567	40,48	40,44	161	161	560,39	2122223,408		39	23,7789	42	25,608
				40,51		40,43										
				40,74		40,44		161								
				41,2		40,34		160,5								
13C	10 % SD	5	10-03-2014	41,09	41,01	40,05	40,2767	160,5	160,75	566,67	2134204,099		40	24,2168	42	25,4276
			__ / __ - 2014		0		0		0		#DIV/0!					
			__ / __ - 2014		0		0		0		#DIV/0!					
			__ / __ - 2014		0		0		0		#DIV/0!					

*Blandingsstyper: REF = Referenceprøve 5 % CD = 5% cementerstatning fra depot 10 % SD= 10% sanderstatning fra depot 5 % CO = 5% cementerstatning fra oven

TRYKTEST, side 5 af 11

				Geometri						Forsøgsresultater						
Prøvent. * [nr.]	Blandingsstype	Hærdetid [døgn]	Prøvedag [dato]	Bredde [mm]	Snit [mm]	Højde [mm]	Snit [mm]	Længde [mm]	Snit [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Ultralyd [ms]	Tryk 1 [kN] [Mpa]	Tryk 2 [kN] [Mpa]		
x2A	REF	2	20-03-2014	41,5	41,5	40,1	40,1	160,6	160,6	590,7	2210186,697		47	28,2426	53	31,8481
				41,5		40,1		160,6								
				41,5		40,1										
x2B	REF	2	20-03-2014	40,7	40,7	39,9	39,9	160,4	160,4	589,95	2264871,342		44	27,0948	46	28,3263
				40,7		39,9		160,4								
				40,7		39,9										
x2C	REF	2	20-03-2014	41,1	41,1	40,1	40,1	160,9	160,9	588,25	2218297,027		41	24,877	49	29,731
				41,1		40,1		160,9								
				41,1		40,1										
x4A	REF	4	20-03-2014	40	40	40,07	40,07	160,7	160,7	586,34	2276430,062		55	34,3149	60	37,4345
				40		40,07		160,7								
				40		40,07										
x4B	REF	4	20-03-2014	40,1	40,1	40,6	40,6	160,6	160,6	587,21	2245833,19		59	36,2395	62	38,0821
				40,1		40,6		160,6								
				40,1		40,6										
x4C	REF	4	20-03-2014	39,9	39,9	40,05	40,05	160,7	160,7	586,47	2283781,278		55	34,4181	59	36,9213
				39,9		40,05		160,7								
				39,9		40,05										

*Blandningstyper: REF = Referenceprøve 5 % CD = 5% cementerstatning fra depot 10 % SD= 10% sanderstatning fra depot 5 % CO = 5% cementerstatning fra oven

1 Gennem 36,2351
-10% 32,6116
10% 39,8586

2 Gennem 36,2351

TRYKTEST, side 6 af 11

				Geometri						Forsøgsresultater						
Prøvent. * [nr.]	Blandingstype	Hærdetid [døgn]	Prøvedag [dato]	Bredde [mm]	Snit [mm]	Højde [mm]	Snit [mm]	Længde [mm]	Snit [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Ultralyd [ms]	Tryk 1 [kN] [Mpa]		Tryk 2 [kN] [Mpa]	
x5A	REF	5	10-03-2014	40,01	40,01	40,2	40,2	160,9	160,9	577	2229590,805		73	45,3867	76	47,2519
				40,01		40,2		160,9								
				40,01		40,2										
				40		39,7		160,8								
x5B	REF	5	10-03-2014	40	40	39,7	39,7	160,8	160,8	574	2247891,525		72	45,3401	72	45,3401
				40		39,7		160,8								
				40		39,7										
				40		39,7										
x5C	REF	5	10-03-2014	40	40	39,8	39,8	160,6	160,6	573	2241124,677		75	47,1106	73	45,8543
				40		39,8		160,6								
				40		39,8										
				40		39,8										
x3A	REF	3	10-03-2014	40	40	40	40	161	161	586	2274844,72		39	24,375	67	41,875
				40		40		161								
				40		40		161								
				40		40										
x3B	REF	3	10-03-2014	40	40	40	40	161	161	585	2270962,733		64	40	65	40,625
				40		40		161								
				40		40										
				40		40										
x3C	REF	3	10-03-2014	40	40	40	40	161	161	580	2251552,795		58	36,25	66	41,25
				40		40		161								
				40		40		161								
				40		40										

*Blandningstyper: REF = Referenceprøve 5 % CD = 5% cementerstatning fra depot 10 % SD= 10% sanderstatning fra depot 5 % CO = 5% cementerstatning fra oven

1 Gennem 46,0472
-10% 41,4425
10% 50,652

2 Gennem 46,0472

1 Gennem 37,3958
-10% 33,6563
10% 41,1354

2 Gennem 37,3958

TRYKTEST, side 7 af 11

				Geometri						Forsøgsresultater						
Prøvent. * [nr.]	Blandingstype	Hærdetid [døgn]	Prøvedag [dato]	Bredde [mm]	Snit [mm]	Højde [mm]	Snit [mm]	Længde [mm]	Snit [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Ultralyd [ms]	Tryk 1 [kN] [Mpa]		Tryk 2 [kN] [Mpa]	
ny2A	REF	1	26-03-2014	41,5	41,25	40,5	40,3333	160,5	160,75	575,7	2152569,485		34	20,4358	31	18,6326
				41,25		40,5		161								
				41		40										
ny2B	REF	1	26-03-2014	41,25	41	40,5	40,1667	160,5	160,75	572,31	2161875,62		35	21,2529	30	18,2168
				41,25		40		161								
				40,5		40										
ny2B	REF	1	26-03-2014	39	39	40	40	160	160	564,2	2260416,667		30	19,2308	34	21,7949
				39		40		160								
				39		40										
ny10A	5% CD	3	28-03-2014	41	40,8667	40,7	40,4	162	161,5	595,82	2234559,741		43	26,0446	56	33,9186
				40,6		40,25		161								
				41		40,25										
ny10B	5% CD	3	28-03-2014	41	40,75	40,2	40,2333	160,5	160,5	583,6	2217821,647		56	34,1566	52	31,7168
				40,75		40,2		160,5								
				40,5		40,3										
ny10C	5% CD	3	28-03-2014	41,55	41,5167	40	40	161,5	160,75	588,34	2203915,433		55	33,1192	55	33,1192
				41,5		40		160								
				41,5		40										

*Blandingsstyper: REF = Referenceprøve 5 % CD = 5% cementerstatning fra depot 10 % SD= 10% sanderstatning fra depot 5 % CO = 5% cementerstatning fra oven

TRYKTEST, side 8 af 11

				Geometri						Forsøgsresultater						
Prøvent. * [nr.]	Blandingsstype	Hærdetid [døgn]	Prøvedag [dato]	Bredde [mm]	Snit [mm]	Højde [mm]	Snit [mm]	Længde [mm]	Snit [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Ultralyd [ms]	Tryk 1		Tryk 2	
nyx3A	REF	3	05-05-2014	41,1	41,1	40,1	40,1	160,8	160,8	586,31	2212356,255		65	39,4391	65	39,4391
				41,1		40,1		160,8								
				41,1		40,1										
				40,5		40		160,1								
nyx3B	REF	3	05-05-2014	40,5	40,5	40	40	160,1	160,1	592,57	2284721,74		64	39,5062	64	39,5062
				40,5		40										
				40,5		40		160,1								
				40,6		40		160,3								
nyx3C	REF	3	05-05-2014	40,6	40,6	40	40	160,3	160,3	581,18	2232498,179		67	41,2562	66	40,6404
				40,6		40		160,3								
				40,6		40										
				40		40		160								
16A	5 % CO	5	13-05-2014	39,2	39,6667	40	40,0667	160	160	560,82	2205436,667		61	38,3814	60	37,7522
				39,8		40,2										
				40,3		40,1		160								
				40		40,4		160,5								
16B	5 % CO	5	13-05-2014	40,2	40,1667	40,3	40,2667	160,5	160,25	572,52	2208925,927		62	38,3337	60	37,0971
				39,8		40,1		160								
				39,5		40		159,5								
				39,8		40,2										
16C	5 % CO	5	13-05-2014	39,8	39,7	40,2	40,1	159,5	159,75	563,64	2216287,311		62	38,9455	59	37,061
				39,5		40		159,5								
				39,8		40,2										
				39,8		40,2										

*Blandingsstyper: REF = Referenceprøve 5 % CD = 5% cementerslætning fra depot 10 % SD= 10% sanderstatning fra depot 5 % CO = 5% cementerslætning fra oven

1 Gennem 39,9645
-10% 35,9681
10% 43,961

2 Gennem 39,9645

1 Gennem 37,9285
-10% 34,1356
10% 41,7213

2 Gennem 37,9285

TRYKTEST, side 9 af 11

				Geometri						Forsøgsresultater						
Prøvenr. * [nr.]	Blandingsstype	Hærdetid [døgn]	Prøvedag [dato]	Bredde [mm]	Snit [mm]	Højde [mm]	Snit [mm]	Længde [mm]	Snit [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Ultralyd [ms]	Tryk 1 [kN] [Mpa]		Tryk 2 [kN] [Mpa]	
17A	5 % Udvasket	5	13-05-2014	40,3	40,3	40	40	160	160	573,6	2223945,409		56	34,7395	61	37,8412
				40,3		40		160								
				40,3		40										
				39,8		40,1		160								
17B	5 % Udvasket	5	13-05-2014	39,7	39,8333	40	40,0333	160	160	570,09	2234369,72		61	38,2526	61	38,2526
				40		40										
				39,9		40		160								
				40		40		160								
17C	5 % Udvasket	5	13-05-2014	40	39,9667	40	40	160	160	567,25	2217668,369		63	39,4078	60	37,5313
				40		40										
				40		40		160								
				40		40		160								
18A	5 % Udvasket + salt	5	13-05-2014	40	39,7667	40,1	40,2	159,5	159,75	567,35	2221595,312		66	41,2856	68	42,5367
				39,7		40,3		160								
				39,6		40,2										
				41		40,2		160								
18B	5 % Udvasket + salt	5	13-05-2014	40,5	40,8333	40,8	40,4	160	160	581,43	2202831,38		66	40,0081	68	41,2204
				41		40,2										
				40,6		40		160								
				40,8		40		160								
18C	5 % Udvasket + salt	5	13-05-2014	40,8	40,7333	40,3	40,1	160	160	579,43	2217107,089		64	39,1819	64	39,1819
				40,8		40		160								
				40,8		40		160								
				40,8		40,3		160								

*Blandingsstyper: REF = Referenceprøve 5 % CD = 5% cementerstatning fra depot 10 % SD= 10% sanderstatning fra depot 5 % CO = 5% cementerstatning fra oven

TRYKTEST, side 10 af 11

				Geometri						Forsøgsresultater						
Prøvenr. * [nr.]	Blandingsstype	Hærdetid [døgn]	Prøvedag [dato]	Bredde [mm]	Snit [mm]	Højde [mm]	Snit [mm]	Længde [mm]	Snit [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Ultralyd [ms]	Tryk 1 [kN]	Tryk 1 [Mpa]	Tryk 2 [kN]	Tryk 2 [Mpa]
19A	5 % Udvasket + MEGET salt	5	13-05-2014	40,7	40,9	40,1	40,0333	160	159,75	583,18	2229547,319		68	41,5302	63	38,4765
				41		40		159,5								
				41		40										
19B	5 % Udvasket + MEGET salt	5	13-05-2014	40,8	40,6667	40	40	160,5	160,25	576,39	2211158,282		67	41,1885	66	40,5738
				40,6		40		160								
				40,6		40										
19C	5 % Udvasket + MEGET salt	5	13-05-2014	40,4	40,0333	40,1	40,0667	160	160	570,65	2223539,625		64	39,9002	62	38,6533
				40		40		160								
				39,7		40,1										
14A	5 % CD	14	20-05-2014	40,02	40,0067	40,02	40,01	160,1	160,15	577,26	2251871,492		73	45,606	70	43,7318
				40		40,01		160,2								
				40		40										
14B	5 % CD	14	20-05-2014	40,06	40,0767	40,03	40,01	160,1	160,1	581,38	2264689,215		71	44,279	70	43,6554
				40,09		40		160,1								
				40,08		40										
14C	5 % CD	14	20-05-2014	40,1	40,1	40	40,0133	160,2	160,2	586,7	2282466,814		75	46,7425	45	28,0455
				40,07		40,03		160,2								
				40,13		40,01										

*Blandingsstyper: REF = Referenceprøve 5 % CD = 5% cementerstatning fra depot 10 % SD= 10% sanderstatning fra depot 5 % CO = 5% cementerstatning fra oven

1 Gennem 40,0537
-10% 36,0484
10% 44,0591

2 Gennem 40,0537

1 Gennem 42,01
-10% 37,809
10% 46,211

2 Gennem 41,681

TRYKTEST, side 11 af 11

				Geometri						Forsøgsresultater						
Prøvenr. * [nr.]	Blandingsstype	Hærdetid [døgn]	Prøvedag [dato]	Bredde [mm]	Snit [mm]	Højde [mm]	Snit [mm]	Længde [mm]	Snit [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Ultralyd [ms]	Tryk 1 [kN] [Mpa]	Tryk 2 [kN] [Mpa]		
15A	5 % CD	14	20-05-2014	40,06	40,0567	40	40	160,1	160,15	573,8	2236139,036		56	34,9505	71	44,3122
				40,05		40		160,2								
				40,06		40										
				40,04		40		160,2								
15B	5 % CD	14	20-05-2014	40,1	40,0633	40,01	40,0033	160,2	160,2	568,13	2212798,913		63	39,3095	70	43,6772
				40,01		40		160,2								
				40,01		40,01		160,3								
				40,03		40,01		160,2								
15C	5 % CD	14	20-05-2014	40,02	40,02	40	40,0067	160,2	160,25	567,92	2213500,747		70	43,7208	65	40,5979
					0		0		0		#DIV/0!		#DIV/0!		#DIV/0!	
					0		0		0		#DIV/0!		#DIV/0!		#DIV/0!	
					0		0		0		#DIV/0!		#DIV/0!		#DIV/0!	
					0		0		0		#DIV/0!		#DIV/0!		#DIV/0!	

*Blandningstyper: REF = Referenceprøve 5 % CD = 5% cementerstatning fra depot 10 % SD= 10% sanderstatning fra depot 5 % CO = 5% cementerstatning fra oven

C.3 Oversigt over målinger i trykstyrkeforsøg udført af Louise Birke- mose

TRYKTEST

			Geometri						Prøvsresultater						
Prøvenr. * [nr.]	Hærdetid [døgn]	Prøvedag [dato]	Bredde [mm]	Snit [mm]	Højde [mm]	Snit [mm]	Længde [mm]	Snit [mm]	Vægt [g]	Densitet [kg/m³]	Ultralyd [mS]	Tryk 1 [kN]	[Mpa]	Tryk 2 [kN]	[Mpa]
5% CD 21 A	21	14-04-2014	38	38	39	38,33	158	158	585,64	2544564,4932		92	63,15789	73	50,11442
			38		38										
			38		38										
5% CD 21 B	21	14-04-2014	37	37	37	37	158	158	577,49	2669831,9942		85	62,08912	83	60,6282
			37		37										
			37		37										
5% CD 21 C	21	14-04-2014	37	37	37	37	158	158	583,51	2697663,452		70	51,13221	74	54,05405
			37		37										
			37		37										
10% SD 21 A	21	14-04-2014	37	37	37	37	158	158	564,11	2607974,0363		66	48,21037	69	50,40175
			37		37										
			37		37										
10% SD 21 B	21	14-04-2014	37	37	37	37	158	158	573,35	2650692,0879		51	37,25347	57	41,63623
			37		37										
			37		37										
10% SD 21 C	21	14-04-2014	37	37	37	36,67	158	158	561,84	2621092,8996		61	44,96314	50	36,85504
			37		37										
			37		36										
5% CD 28 A	28	16-04-2014	37	37	37	37,33	157	157	586	2702087,8932		104	75,28958	100	72,39382
			37		37										
			37		38										
5% CD 28 B	28	16-04-2014	37	37	38	34	158	158	587	2953251,0917		93	73,92687	101	80,28617
			37		38										
			37		27										
5% CD 28 C	28	16-04-2014	37	37	37	37	157	157	586	2726431,0273		93	67,9328	98	71,5851
			37		37										
			37		37										
10% SD 28 A	28	16-04-2014	37	37	37	37	157	157	560	2605463,0978		71	51,86267	68	49,67129
			37		37										
			37		37										
10% SD 28 B	28	16-04-2014	37	37	37	37	158	158	564	2607465,4881		66	48,21037	70	51,13221
			37		37										
			37		37										
10% SD 28 C	28	16-04-2014	37	37	37	37	158	158	568	2625958,1511		66	48,21037	70	51,13221
			37		37										
			37		37										
5% CD 7 A	7	22-04-2014	37	37	38	38	157	157	580	2627501,7894		81	57,61024	73	51,92034
			37		38										
			37		38										
5% CD 7 B	7	22-04-2014	37	37	39	38,67	157	157	586	2608912,4486		73	51,02516	79	55,21901
			37		39										
			37		39										
5% CD 7 C	7	22-04-2014	37	37	37	37,33	157	157	585	2697476,8217		74	53,57143	81	58,639
			37		37										
			37		38										
10% SD 7 A	7	22-04-2014	37	37	37,5	37,67	157	157	557	2545637,91		50	35,87658	54	38,74671
			37		37,5										
			37		38										
10% SD 7 B	7	22-04-2014	37	37	37,5	37,5	157	157	559	2566133,012		50	36,03604	53	38,1982
			37		37,5										
			37		37,5										
10% SD 7 C	7	22-04-2014	37	37	37	36,83	157	157	552	2579863,2018		50	36,68827	46	33,75321
			37		37										
			37		36,5										
5% CD 14 A	14	23-04-2014	37	37	37,5	37,5	158	158	581	2650245,1819		44	31,71171	58	41,8018
			37		37,5										
			37		37,5										
5% CD 14 B	14	23-04-2014	37	37	38	38,5	159	159	596	2631398,8578		72	50,54405	80	56,16006
			37		38,5										
			37		39										
5% CD 14 C	14	23-04-2014	37	37	38	38,33	158	158	595	2655104,1961		59	41,59812	63	44,41833
			37		38,5										
			37		38,5										
10% SD 14 A	14	23-04-2014	37	37	37	37	157	157	564	2624073,5485		66	48,21037	63	46,01899
			37		37										
			37		37										
10% SD 14 B	14	23-04-2014	37	37	38	38	157	157	564	2555018,9814		65	46,23044	66	46,94168
			37		38										
			37		38										
10% SD 14 C	14	23-04-2014	37	37	37	37,33	157	157	565	2605755,3919		68	49,2278	68	49,2278
			37		37										
			37		37,5										

1 Gennem	56,86265	Mpa
-10%	51,17638	Mpa
10%	62,54891	Mpa
2 Gennem	55,6036	Mpa
1 Gennem	43,22	Mpa
-10%	38,898	Mpa
10%	47,542	Mpa
2 Gennem	43,0158	Mpa
1 Gennem	73,56906	Mpa
-10%	66,21215	Mpa
10		

10/8 SD 42 C	42	23-04-2014	37	37	37,5	37,33	158	583,31	2672660,7937	95	68,77413	74,56564	1 Gennem	68,32629	Mpa
5% CD 42 A	42	23-04-2014	37	37	37	158	158	583,31	2672660,7937	95	68,77413	74,56564	-10%	61,49366	Mpa
			37	37	37,5	158						103	10%	75,15892	Mpa
			37	37	37,5	158									
5% CD 42 B	42	29-04-2014	37	37	37	158,5	158,5	588,24	2710952,0638	88	64,2805	70,85464	2 Gennem	70,012	Mpa
			37	37	37	158,5						97			
			37	37	37	158									
5% CD 42 C	42	29-04-2014	37	37	37	158	158	582,41	2692577,9697	82	59,89774	71,5851			
			37	37	37	158						98			
			37	37	37	158									
10% SD 42 A	42	29-04-2014	37	37	37,5	158	79	570,26	5202508,838	61	43,96396	52,61261	1 Gennem	53,00702	Mpa
			37	37	37,5	158						73	-10%	47,70632	Mpa
			37	37	37,5	158							10%	58,30772	Mpa
10% SD 42 B	42	29-04-2014	37	37	37	158	158	569,42	2585929,7182	74	53,09735	58,8376	2 Gennem	53,00702	Mpa
			37	37	38	158						82			
			37	37	38	158									
10% SD 42 C	42	29-04-2014	37	37	38	158	158	573,49	2581567,2435	80	56,899	52,63158			
			37	37	38	158						74			
			37	37	38	158									
5% CD 35 A	35	26-04-2014	37	37	37	158,5	158,5	589,69	2717634,5072	107	78,15924	77,42878	1 Gennem	69,69739	Mpa
			37	37	37	158,5						106	-10%	62,72765	Mpa
			37	37	37	160							10%	76,66713	Mpa
5% CD 35 B	35	26-04-2014	37	37	37,5	160	160	604,3	2698089,0582	85	60,72151	72,86582	2 Gennem	70,41169	Mpa
			37	37	38	160						102			
			37	37	38	160									
5% CD 35 C	35	26-04-2014	37	37	37,5	160	160	592,75	2670045,045	81	58,37838	70,63063			
			37	37	37,5	160						98			
			37	37	37,5	160									
10% SD 35 A	35	29-04-2014	37	37	37	158	158	574,66	2644834,7649	76	55,26603	54,53884	1 Gennem	49,26512	Mpa
			37	37	37	158						75	-10%	44,33861	Mpa
			37	37	37,5	158							10%	54,19163	Mpa
10% SD 35 B	35	29-04-2014	37	37	37	158	158	569,51	2632939,1314	51	37,25347	41,63623	2 Gennem	51,66745	Mpa
			37	37	37	158						57			
			37	37	37	158									
10% SD 35 C	35	29-04-2014	37	37	37	158	158	571,2	2628910,3431	71	51,63011	55,26603			
			37	37	37	158						76			
			37	37	37,5	158									

[Blank side]

D | Data for flydesætmål

FLYDESÆTMÅL

D_[inside]=

100 mm

FLYDEMÅL FOR REF (d. 11.02.2014)

	1 måling [mm]	2 måling [mm]	Gennemsnit [mm]	
Forsøg 1	157	158		157,5
Forsøg 2	155	153		154
Forsøg 3	151	150		150,5
	Flydemål [%]=			154

Forsøg 1: FLYDEMÅL FOR 10 % SD, (d. 13.02.2014)

	1 måling [mm]	2 måling [mm]	Gennemsnit [mm]	
Forsøg 1	141	145		143
Forsøg 2	151	150		150,5
Forsøg 3	150	147		148,5
	Flydemål [%]=			147,33

Forsøg 2: FLYDEMÅL FOR 5 % CD, (d. 13.02.2014)

	1 måling [mm]	2 måling [mm]	Gennemsnit [mm]	
Forsøg 1	160	154		157
Forsøg 2	155	155		155
Forsøg 3	153	153		153
	Flydemål [%]=			155

Forsøg 3: FLYDEMÅL FOR 5 % CD UDVASKET, (d. 06.05.2014) 22,5g aske

	1 måling [mm]	2 måling [mm]	Gennemsnit [mm]	
Forsøg 1	162	159		160,5
Forsøg 2	163	164		163,5
Forsøg 3	162	164		163
	Flydemål [%]=			162,33

Forsøg 4: FLYDEMÅL FOR 5 % CD UDVASKET+NaCl, (d. 08.05.2014) 21,37g aske + 1,13g salt

	1 måling [mm]	2 måling [mm]	Gennemsnit [mm]	
Forsøg 1 (kasseres)	155,9	154,5		155,2
Forsøg 2	164	164		164
Forsøg 3	163	163,4		163,2
	Flydemål [%]=			163,6

Forsøg 5: FLYDEMÅL FOR 5 % CD UDVASKET+MEGET NaCl, (d. 08.05.2014) 16,85g aske + 5,65g salt

	1 måling [mm]	2 måling [mm]	Gennemsnit [mm]	
Forsøg 1	166	166,5		166,25
Forsøg 2	173,9	170,3		172,1
Forsøg 3	165	174,2		169,6
	Flydemål [%]=			169,32

Forsøg 6: FLYDEMÅL FOR 5 % CU ASKE UDEN OLIE, (d. 06.05.2014) 22,5g aske

	1 måling [mm]	2 måling [mm]	Gennemsnit [mm]
Forsøg 1	159	161	160
Forsøg 2	163,5	168	165,75
Forsøg 3	168	165	166,5
	Flydemål [%]=		164,08

Sætmål for blanding uden cement (vand+aske+sand - original opskrift)

Forsøg 1: Blanding uden cement + 30 g vand

	1 måling [mm]	2 måling [mm]	Gennemsnit [mm]
Forsøg 1	132,3	132,6	132,45
	Flydemål [%]=		132,45

Forsøg 2: Blanding uden cement + 75 g vand

	1 måling [mm]	2 måling [mm]	Gennemsnit [mm]
Forsøg 1	167,8	167	167,4
	Flydemål [%]=		167,4

Forsøg 3: Blanding uden cement + 50 g vand

	1 måling [mm]	2 måling [mm]	Gennemsnit [mm]
Forsøg 1	155,3	156,6	155,95
Forsøg 2	150,8	155,6	153,2
	Flydemål [%]=		154,58

[Blank side]

E | Data for afbindingstid

E.1 Data for afbindingstid for REF, 5 % CD, 10 % SD og 5 % CO

Sheet1

REF		5 % CD		10 % SD		5 % CO	
tid [min]	mm	mm	tid [min]	mm	tid [min]	mm	tid [min]
0	0,1	0	5	0	5	0	5
10	0,1	0	15	0	15	0	15
20	0,1	0	25	0,1	25	0,1	25
30	0,1	0	35	0	35	0	35
40	0,1	0	45	0	45	0	45
50	0,1	0	55	0,1	55	0	55
60	0,1	0	65	0	65	0	65
70	0	0	75	0,1	75	0	75
80	0,1	0,1	85	0	85	0	85
90	0,1	0	95	0,1	95	0,1	95
100	0,1	0	105	0	105	0	105
110	0	0,1	115	0,1	115	0	115
120	0,1	0,1	125	0,1	125	0	125
130	0	0	135	0	135	0	135
140	0,1	0,1	145	0	145	0	145
150	0,1	0	155	0	155	0	155
160	9,5	6,2	165	30,5	165	0	165
170	26,6	19,1	175	33,9	175	32,5	175
180	23	31,4	185	31,1	185	17,8	185
190	24,3	24,6	195	34,2	195	26,4	195
200	34	35,5	205	37,3	205	29,9	205
210	30,3	32	215	37,4	215	36,5	215
220	33,6	35	225	38,1	225	36,7	225
230	30,4	36,2	235	39,4	235	37,1	235
240	35	33,5	245	38,1	245	37,8	245
250	37,5	34,5	255	38,6	255	39,4	255
260	37,4	37,6	265	38,4	265	40,5	265
270	39,2	39,4	275	37,9	275	40,3	275
280	39,9	39,8	285	38,7	285	41,1	285
290	39,9	40,2	295	37	295	41,7	295
300	39,7	39,6	305	38	305	41,4	305
310	39,2	37,3	315	39,2	315	41,1	315
320	38,8	38,5	325	40,1	325	40,7	325
330	40,1	38,4	335	39,7	335	40,7	335
340	39,2	38,4	345	38,9	345	39,8	345
350	39,2	40,4	355	39,7	355	40	355
360	39,9	40,2	365	39	365	40	365
370	40,2	38,1	375	39,2	375	39,8	375
380	40,4	39,4	385	39,1	385	40,1	385
390	40,6	38,7	395	39,1	395	40,6	395
400	41,2	41,7	405	38,7	405	41,1	405
410	41,1	40,5	415	39,4	415	41,2	415
420	40,4	39,1	425	38,9	425	41,2	425
430	39,9	38,9	435	39,2	435	41	435
440	39,5	42,3	445	39,3	445	41	445
450	39,9	40,1	455	39,8	455	40,3	455
460	39,7	40,9	465	39,6	465	40,1	465
470	40,2	38,4	475	39,2	475	40,2	475
480	40,5	41,1	485	39,1	485	39,9	485
490	40,7	37,9	495	39,4	495	40	495
500	40,7	38,8	505	39,2	505	40,7	505
510	41,3	39,8	515	38,9	515	40,9	515
520	41,5	40,5	525	39,8	525	41,4	525

Sheet1

530	41,1	40,4	535	39,5	535	41,5	535
540	40,9	38,4	545	39,1	545	41,3	545
550	40,6	37,5	555	38,8	555	41,3	555
560	40,2	39,6	565	39,9	565	40,6	565
570	39,9	39,6	575	39,9	575	40,5	575
580	40,6	40,3	585	39,3	585	40,4	585
590	40,8	39,8	595	39,3	595	40,4	595
600	40,9	38,1	605	39,2	605	40,8	605
610	40,9	39,9	615	38,9	615	41,1	615
620	41,6	40,3	625	39,7	625	41,5	625
630	40,9	37,4	635	39,3	635	41,4	635
640	40,4	42,3	645	40,2	645	41,1	645
650	40	42,3	655	40	655	40,7	655
660	40,5	40,6	665	39,4	665	40,2	665
670	40	39,8	675	39,4	675	40,4	675
680	41,1	36,1	685	38,8	685	40,7	685
690	41,2	39,4	695	39,1	695	40,9	695
700	41,3	40,2	705	38,9	705	41,1	705
710	41,4	39,6	715	39,4	715	41,5	715
720	41,1	40,4	725	39,2	725	41,4	725
730	40,2	41,4	735	39,2	735	40,9	735
740	40,6	39,3	745	39,6	745	40,4	745
750	40	38,9	755	39,3	755	40,4	755
760	41,1	39,2	765	39,3	765	41,3	765
770	41,3	39,4	775	38,9	775	41,2	775
780	40,5	41,7	785	38,6	785	41	785
790	40,4	41,8	795	39,8	795	40,7	795
800	40,8	41,6	805	38,8	805	40,4	805
810	40,9	37,8	815	39,3	815	40,8	815
820	41,3	39,6	825	38,9	825	40,9	825
830	41,4	40,1	835	39,3	835	41,3	835
840	40,9	41,7	845	38,8	845	41	845
850	40,9	37,3	855				

E.2 Data for afbindingstid for Udvasket, Udvasket + NaCl og Udvasket + meget NaCl

Making med grå viser den indledende og endelige afbindingstid.

Sheet1

Udvasket + 1,13		Udvasket + 5,65		Udvasket	
tid [min]	[mm]	tid [min]	[mm]	tid [min]	[mm]
5	0	5	0	5	0
15	0	15	0,1	15	0
25	0	25	0	25	0,1
35	0	35	0	35	0
45	0	45	0	45	0
55	0	55	0	55	0
65	0	65	0	65	0,1
75	0	75	0	75	0,1
85	0	85	0,1	85	0,1
95	0	95	0,1	95	0
105	0	105	0	105	0,1
115	0	115	0,1	115	0,1
125	0	125	0	125	0,1
135	21,9	135	17,7	135	0
145	19,3	145	24,1	145	17,4
155	31,3	155	34,2	155	24,7
165	31,5	165	36,1	165	31,1
175	36	175	36,7	175	34,7
185	38,6	185	37,6	185	36,9
195	39	195	37,7	195	37,9
205	39,7	205	37,6	205	38,6
215	35,2	215	37,8	215	38,1
225	36	225	38,2	225	37,8
235	37,2	235	38,7	235	38,8
245	37,4	245	38,2	245	39,3
255	37,7	255	38,7	255	39,2
265	38,5	265	38,4	265	40,4
275	39,1	275	39,4	275	41,1
285	38,9	285	39,7	285	41,2
295	38,9	295	40,1	295	40,2
305	39,7	305	39,3	305	40,1
315	40,1	315	39,6	315	40,6
325	40	325	39,1	325	40,3
335	40	335	38,9	335	40,2
345	40,1	345	39,1	345	40,4
355	38,9	355	40,1	355	40,2
365	38,8	365	39,3	365	38,8
375	38,7	375	38,9	375	40,6
385	38,7	385	38,7	385	40,6
395	38,7	395	39,7	395	40,8
405	40,1	405	39,4	405	41,1
415	39,8	415	39,8	415	41
425	40,1	425	38,6	425	40,7
435	40,3	435	39,3	435	40,4
445	40,1	445	38,9	445	40,8
455	40,2	455	38,9	455	40,4
465	39,7	465	39,2	465	40,6
475	38,8	475	38,9	475	40,4
485	38,7	485	40,1	485	40,7
495	38,9	495	38,9	495	40,7
505	38,7	505	39,3	505	40,8
515	39,8	515	39,8	515	41,2
525	40,1	525	39,6	525	41,8

Sheet1

535	39,6	535	40,1	535	40,7
545	40,8	545	39,2	545	40,9
555	40,5	555	39,1	555	40,9
565	40,5	565	39,2	565	40,8
575	40,5	575	39,8	575	40,9
585	39,6	585	39,9	585	40,1
595	39,7	595	39,3	595	40,9
605	39,1	605	39,4	605	40,9
615	39,6	615	40,1	615	41,1
625	40,1	625	39,6	625	41,2
635	40,7	635	38,9	635	41
645	40,6	645	39,2	645	40,7
655	40,6	655	39,7	655	40,9
665	39,6	665	39,2	665	40,7
675	39,3	675	40,1	675	40,7
685	39,4	685	39,6	685	41
695	39,7	695	39,1	695	40,9
705	40,1	705	40,2	705	41,2
715	40,4	715	39,4	715	40,7
725	40,7	725	39,6	725	41
735	40,7	735	39,7	735	40,9
745	40,7	745	39,6	745	41,1
755	39,9	755	39,7	755	40,1
765	40,2	765	39,1	765	40,5
775	40,4	775	38,7	775	40,8
785	40,8	785	39,4	785	40,7
795	40,7	795	39,4	795	41,1
805	40,2	805	39,7	805	40,1
815	39,9	815	39,3	815	40,6
825	40,4	825	39,4	825	40,7
835	40,7	835	39,9	835	40,9
845	40,8	845	39,6	845	41
855	40,3	855	39,4	855	40,5

[Blank side]

F | Data for porøsitet og densitetsforsøg

Porøsitet og densitet

Blandingsstype*		REF	REF	REF	5 % CD	5 % CD	REF	REF	10 % SD	10 % SD	5 % CD	5 % CD	10 % SD	10 % SD
Døgn	[dage]	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	28,00	28,00	7,00	7,00	28,00	28,00	28,00	28,00
Provenr.	[nr]	3A	3B	3C	8A	8B	1A	1B	9A	9B	6A	6B	7A	7B
h	[m]	39,15	39,02	39,32	40,02	40,70	40,75	40,00	40,42	40,22	40,00	40,00	41,00	40,50
b	[m]	40,18	40,18	40,32	40,00	40,39	40,70	40,75	39,48	40,06	40,00	40,00	39,54	40,00
l	[m]	161,00	161,00	160,50	160,00	160,50	161,30	161,10	160,50	160,00	161,00	161,00	160,00	160,00
Areal	[m²]	1573,0	1567,8	1585,4	1600,8	1643,9	1658,5	1630,0	1595,8	1611,2	1600,0	1600,0	1621,1	1620,0
p_w	[kg/m³]	998,00	998,00	998,00	998,00	998,00	998,00	998,00	998,00	998,00	998,00	998,00	998,00	998,00
Tørvægt	[g]	519,02	517,65	526,76	517,46	526,59	539,13	541,30	499,23	499,45	528,41	521,54	500,36	505,13
Vægt under vand	[g]	318,06	317,30	323,64	315,85	321,20	328,60	330,19	308,33	307,06	321,26	316,78	305,78	308,68
Vægt over vand	[g]	563,15	564,28	573,86	565,38	576,12	584,57	586,70	561,14	560,84	573,27	566,24	557,23	562,49
Vægt af fortrængt væske	[g]	245,09	246,98	250,22	249,53	254,92	255,97	256,51	252,81	253,78	252,01	249,46	251,45	253,81
Volumen	[m³]	0,0002	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002	0,0003	0,0003
Vægt af porevand	[g]	44,13	46,63	47,10	47,92	49,53	45,44	45,40	61,91	61,39	44,86	44,70	56,87	57,36
Åbent porevolum	[m³]	0,00004	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005	0,00006	0,00006	0,00004	0,00004	0,00006	0,00006
Porøsitet	[-]	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,24	0,24	0,18	0,18	0,23	0,23
Densitet	[kg/m³]	2113,44	2091,73	2100,98	2069,59	2061,58	2102,01	2106,03	1970,77	1964,11	2092,59	2086,49	1985,92	1986,21

* Blandings typer:
REF = Referenceprøve
10 % SD= 10% sanderstatning fra depot
5 % CD = 5% cementerstatning fra depot

G | Data for kapillarforsøg

Kapillarsugning

Tid	Tid	REF 7 DØGN	REF 28 DØGN	5 % CD 7 DØGN	10 % SD 7 DØGN	5 % CD 28 DØGN	10 % SD 28 DØGN
t [min]	$t\sqrt{(1/2)}$ [$s\sqrt{(1/2)}$]	Q [kg/m ²]	Q [kg/m ²]	Q [kg/m ²]	Q [kg/m ²]	Q [kg/m ²]	Q [kg/m ²]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	7,7460	0,6251	0,4361	0,2982	0,5346	0,3938	0,5123
2	10,9545	0,7160	0,5344	0,4163	0,6621	0,5062	0,6420
4	15,4919	0,8917	0,6572	0,5591	0,8383	0,6312	0,8889
8	21,9089	1,1075	0,8477	0,7517	1,1360	0,8688	1,1728
16	30,9839	1,4058	1,1486	1,0189	1,5065		
20	34,6410					1,3563	1,7346
26	39,4968	1,6873	1,3329	1,2177	1,8163	1,5563	1,9630
32	43,8178	1,8249	1,4803	1,3357	1,9986	1,7000	2,1543
45	51,9615	2,0852	1,7322	1,5780	2,3144	2,0000	2,5123
55	57,4456	2,2247	1,8673	1,7209	2,5453	2,1938	2,7284
60	60,0000	2,3094	1,9410	1,8141	2,5999	2,3000	2,8519
90	73,4847	2,6925	2,3649	2,1558	3,0981	2,7375	3,3395
120	84,8528	2,9802	2,6413	2,4292	3,4808	3,0625	3,6975
150	94,8683	3,2235	2,8378	2,6156	3,7723	3,3437	4,0247
165	99,4987	3,3526	2,9484	2,7398	3,9242	3,4687	4,1358
180	103,9230	3,4351	3,0528	2,8454	4,0700	3,5750	4,2593
190	106,7708	3,5790					
210	112,2497	3,6042	3,2617	3,0442	4,3251	3,7875	4,4753
240	120,0000	3,7503	3,4459	3,1933	4,5195		
1295	278,7472					7,0500	7,0802
1522	302,1920	6,2778					
1530	302,9851		5,6327	5,4920	7,2653		

H | Poster fra midtvejspræsentation

Anvendelse af alternativ aske i beton – bearbejdelighed og hærdeforløb

Denne planche er en del af et DiplomByg afgangsprojekt omhandlende træaske som delvis erstatning af henholdsvis sand og cement i mørtel. Der lægges i projektet specielt vægt på træaskens påvirkning af mørtelens bearbejdelighed og hærdeforløb.

Hvorfor anvende træaske i mørtel?

Fremstilling af beton og mørtel ønskes så billig som mulig. Da træaske er et affaldsprodukt fra fremstilling af varme, kan dette anskaffes billigt, måske endda gratis. Kan træasken erstatte en del af den dyre cement, eller det tunge sand, kan asken gøre fremstilling af beton billigere, eller tilføre betonen andre egenskaber i forhold til konventionel betonfremstilling. Afbrænding af træ er CO_2 -neutralt, der gør anvendelse af træaske i beton attraktivt – også i et miljømæssigt perspektiv.



Figur 1: Træaske fra Køge Kraftvarmeværk

Træaske fra Køge Kraftvarmeværk

Ved fremstilling af varme på Køge Kraftvarmeværk (VEKS) afbrændes biomasse. En del af denne biomasse er træ. Træet er et restprodukt fra Juncker Industrier, som fremstiller parketgulve, bordplader o.a.. Restproduktet består derfor hovedsagligt af savsmuld, høvlspåner og træflis. Træasken har et lille, men ukendt indhold af olie, som er tilsat i forbindelse med afbrænding af træet. Senere forsøg med træaske uden olie vil vise, om dette indhold har en indflydelse på den blandede mørtels egenskaber.

Blandeforhold

Forsøgene er udført med to typer af mørtel:

- 1: Mørtel, hvor 5% af cementen er erstattet med træaske (senere benævnt "5% C").
- 2: Mørtel, hvor 10% af sandet er erstattet med træaske (senere benævnt "10% S").

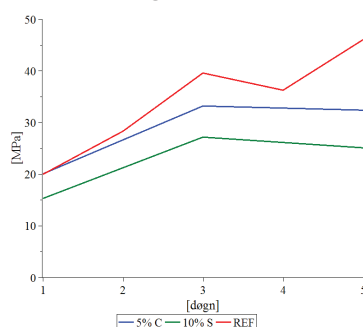
Blanding af mørtlen er udført i hht. [1].

Resultater

I projektet undersøges flere forhold omkring mørtelens egenskaber. De forhold, der har vist sig interessante i forhold til videre arbejde, samt forhold der beskriver bearbejdelighed og hærdeforløb, er præsenteret i de følgende afsnit.

Trykstyrke

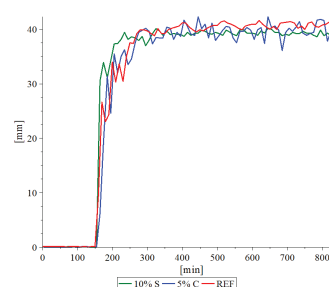
Trykstyrketest er udført i hht. [2]. Resultater vist i figur 2. Det ses, at trykstyrken falder ved tilsætning af træaske.



Figur 2: Trykstyrketest

Afbindingsforløb

Afbindingsforløbet er målt i hht. [3]. Resultater vist i figur 3. Det ses, at tilsætning træaske ikke har indflydelse på mørtelens afbindingsforløb.

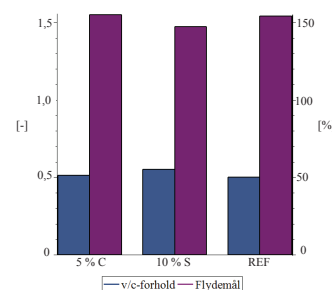


Figur 3: Afbindingsforløb

v/c-forhold og flydemål

v/c-forholdet er beregnet i hht. [4], og måling af flydemål er udført i hht. [5].

Det ses, på figur 4, at 5% C og REF har samme v/c-forhold og flydemål. Derimod ses det, at 10% S har et højere v/c-forhold, da der her blev tilsat ekstra vand, men et lavere flydemålet 5% C og REF.



Figur 4: v/c-forhold og flydemål

Konklusion og videre arbejde

På trods af at trykstyrken med aske viser sig at være lavere, kan mørtlen stadig have anvendelsesmuligheder, specielt set i lys af at afbindingsforløbet ikke ændrer sig.

Det ses, at træasken har indirekte indflydelse på v/c-forholdet, samt flydemålet. Tendensen i forsøgene viser modsiger den forudantagte teori for sammenhæng mellem v/c-forhold og flydemål. Videre forsøg vil vise, om tendensen er et tilfælde eller om der er en sammenhæng.

Yderligere vil der blive undersøgt porøsitet-, densitet- og karpilarsugningsegenskaber, samt udarbejdet en askekaraktistik.



Amanda Helena Bonnerup s100150
s100150@student.dtu.dk
Nina Marie Sigvardsen s102893
s102893@student.dtu.dk

[1] DS/EN 1015-2

[2] DS/EN 196-1

[3] DS/EN 196-3

[4] Aalborg Portland (2007). Beton og Cement, 18. udgave

[5] DS/EN 1015-3

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