

# Anvendelse af nedknuste betonaggregater i ny beton

Undersøgelse af styrkeegenskaber for nedknust beton



**Dani F. Hassan – s143892**

**Bachelorprojekt**

Department of Civil  
Engineering  
2017

DTU Civil Engineering  
Juni 2017

## Forord

Denne rapport er udarbejdet som et afsluttende bachelorprojekt på 20 ECTS point for Institut for Byggeri og Anlæg ved Danmarks Tekniske Universitet. Rapporten, samt forsøg er udarbejdet i perioden fra d. 30. januar 2017 til d. 22. juni 2017.

I forbindelse med projektet skal en særlig tak rettes mod vejlederne Lisbeth M. Ottosen og Gunvor Marie Kirkelund for deres gode vejledning gennem hele forløbet.

En anden stor tak skal rettes mod Laboratoriekoordinator Ebba Cederberg Schnell for hendes hjælp til udførelse af forsøg.

Rapporten er udarbejdet af Dani Fadi Hassan.

Danmarks Tekniske Universitet

Kongens Lyngby

22. juli 2017

---

Dani Fadi Hassan

## Abstract

This is a bachelor project, which will be the last project for the student. There is in this project made investigations of recycled concrete aggregates properties and how it affects w/c ratio, to see if it's possible to keep the same amount of cement, while adding recycled concrete aggregates. Recycled aggregates have been tested, and has shown that a low value of 30 % recycled aggregates will give the concrete proper workability. Some greater values on 50% and 90% has shown that the compressive strength increases with the amount of recycled concrete aggregate, but that the workability decreases with an increase of recycled concrete aggregates. A lot of experimental work has been done, to see if there is a connection between the amount of recycled concrete aggregates and porosity, absorption rate, density, workability and strength development. Furthermore, there has been made some comparisons to other studies, and what environment recycled concrete aggregates can be used for. The study shows that it is possible to use it in buildings instead of using it as underlay at a road.

# Indholdsfortegnelse

1. Indledning og formål .....	1
2. Teori.....	2
2.1 Generelt om beton .....	2
2.2 Nedknuste Betonaggregater .....	3
2.3 Bindemiddel .....	3
2.4 Miljøklasser .....	4
2.5 v/c forhold.....	4
2.6 Tilslag.....	5
2.6.1 Geometriske parametre .....	6
2.6.2 Fysiske parametre .....	7
2.7 Porøsitet og permeabilitet .....	7
2.8 Trykstyrke .....	8
2.8.1 Bolomeys formel.....	8
3. Metode og eksperimentelt arbejde.....	9
3.1 Genbrugsaggregater .....	10
3.2 Absorption.....	12
3.3 Sigteanalyse.....	12
3.3.1 Laserdiffraktion .....	14
3.4 Syreoplukning .....	14
3.5 Proportionering .....	16
3.6 Blanding af beton .....	17
3.7 Sætmål .....	19
3.8 Luftindhold.....	20
3.9 Støbning.....	21
3.10 Densitet og porøsitet.....	21
3.11 Trykprøvning.....	24
4. Resultater og Diskussion .....	25
4.1 Absorption og Sætmål .....	25
4.2 Luftindhold.....	27
4.3 Syreoplukning.....	28
4.4 Porøsitet og densitet.....	28
4.5 Sigteanalyse.....	30

4.6 Trykstyrke .....	31
4.7 Samlet diskussion .....	33
5. Konklusion.....	35
6. Videre forskning.....	36
7. Litteraturliste .....	37
8. Bilag.....	38
8.1 Bilag 1 Syreoplukning af beton.....	
8.2 Bilag 2 Klorid ved titrering .....	
8.3 Bilag 3 Porøsitet og densitet.....	
8.4 Bilag 4 Posterpræsentation .....	
8.5 Bilag 5 Udregning for absorptionen .....	
8.6 Bilag 6 Syreoplukning beregninger .....	
8.7 Bilag 7 Porøsitet og densitet beregninger .....	
8.8 Bilag 8 Sigteanalyse beregninger .....	
8.9 Bilag 9 Laser diffraktion diagram .....	
8.10 Bilag 10 Trykstyrke beregninger .....	
8.11 Bilag 11 Udregning for Bolomeys formel.....	

## 1. Indledning og formål

Beton er det mest anvendte materiale i verden (Dansk Betonforening, 3013). Materialerne til at kunne støbe beton er let tilgængelige overalt i verden. Dog vil resurserne til beton slippe op en dag, ligesom de fleste andre resurser til vigtige materialer som vi anvender i dag. Derfor er det vigtigt at kunne genbruge betonen. I dag bliver nedknust beton i Danmark hovedsageligt brugt som grusbærelag i stedet for traditionelt stabilt grus af grusgravsmaterialer (Vejdirektoratet, 2011). Projektet vil undersøge om potentialet for nedknust beton er udnyttet optimalt på denne måde eller om nedknust beton kan anvendes til flere alsidige formål som for eksempel bygninger. Der er en masse nedknust beton med høj styrke som kan bruges anderledes. Beton udgør den største del af bygge- og anlægsaffald, med hele 1.067.000 tons i 2014 (Miljøstyrelsen, 2016). I Danmark burde der være mere fokus på effektivisering af tilgængelige ressourcer inden for dette område. Det er derfor relevant at undersøge, om der findes måder, hvorpå beton kan genbruges, som kan supplere den praksis vi har i dag og derved hjælpe til at vi kan gå fra *genanvendelse* til *genbrug*, og herved reducere behovet for at anvende jomfruelige aggregater.

Tidligere studier har vist at anvendelse af genbrugsbeton øger cementforbruget og dermed omkostningerne (Henriksen, et al., 2015). Den problemstilling vil undersøges nærmere i denne rapport.

Der vil undersøges for styrken, samt hvilken indflydelse genbrugsbeton har for nye betonblandingers egenskaber. Der vil lægges vægt på hvilken indflydelse mængden af genbrugte betonaggregater har på nye betonblandinger, med henhold til hvilken styrkeklasse og miljøklasse den kan bruges i. Forsøg vil foretages, hvor betonens egenskaber beskrives for normale støbninger, samt støbninger med genbrugsaggregater. Blandinger med forskellige mængder af betonaggregater vil undersøges, hvor der vil komme en vurdering af hvilke blandinger der er bedst anvendelige.

## 2. Teori

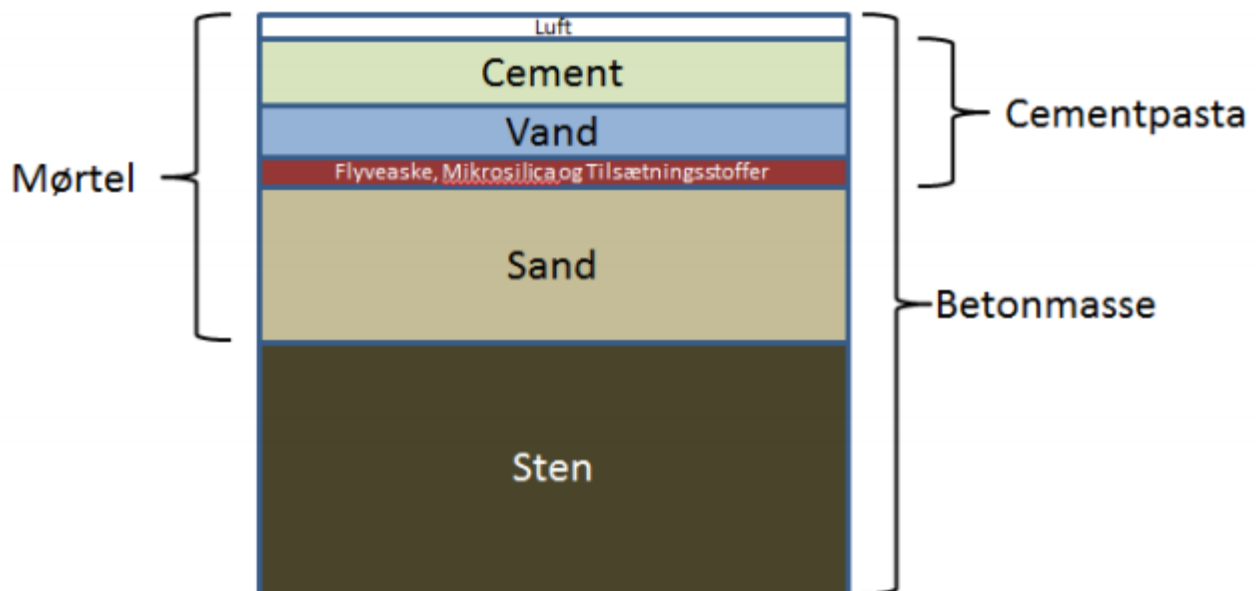
I teoriafsnittet vil der gennemgås en detaljeret forklaring af alle relevante egenskaber for beton, og hvordan man kan regne på det teoretisk.

### 2.1 Generelt om beton

Det mest anvendte materiale i verden er beton. Dette skyldes hovedsageligt tilgængeligheden, samt prisen af komponenterne anvendt i beton. Beton kan anvendes i stort set alle byggerier, hvis ellers det beton der benyttes, opfylder de specifikke krav til det enkelte formål. Beton består i sin enkleste form af:

- Cement
- Vand
- Fine aggregater (sand, partikelstørrelse op til 4 mm)
- Grove aggregater (sten, partikler større end 4 mm)

Men der er også nogle komponenter som hører indenunder bestemte betegnelser. Beton kan deles op i cementpasta, mørtel og betonmasse, som illustreret på figur 1.



Figur 1. (Dansk Betonforening, 2013) Betonsammensætning, samt begreber til bestanddele

I dag indeholder beton ofte også kemiske additiver, for at opnå visse egenskaber ved den friske og hærde beton. Cement er måske ikke det eneste pulver. En del af cementen kan

erstattes af såkaldte supplerende cementmaterialer. Dette er et kollektivt navn, der dækker f.eks. Kalksten, flyveaske, silica og granuleret højovne slagge (Aalborg Portland, 2007).

## 2.2 Nedknuste Betonaggater

Betonaggater, er aggrater, som er nedknust fra gamle betonkonstruktioner. Grundet nedknusning, er aggratet meget kantet, og har dermed en ru overflade. Der er stor forskel på kvaliteten af nedknust beton, alt afhængig af oprindelsen, samt renheden. Styrken kan derfor variere meget.

## 2.3 Bindemiddel

En af de vigtigste bestanddele i beton er cement. Cement er ligesom "limen" i betonen. Et af de hyppigst anvendte bindemidler er Portlandcement. Portlandcement er et hydraulisk bindemiddel, altså vil det afbinde og hærde ved tilstedeværelse af vand. Ved at kende cementens klinkermineralsammensætning kan dets egenskaber beskrives. Der er beskrivelser til styrkeudvikling af forskellige cementtyper, som f.eks. BASIS AALBORG CEMENT, hvor dette er en portlandkalkstencement, med styrkeklasse 52,5 N, som er mærket med: CEM II/A-LL 52,5 N (IS/LA/≤2) (Dansk Betonforening, 3013).

Portland cementklinker er et hydraulisk materiale, hvor massen mindst består af 2/3 calciumsilikater ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  og  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), resten består af aluminium og jern indeholdende klinkerfaser og andre forbindelser. Forholdet af masse (CaO) / (SiO<sub>2</sub>) må ikke være mindre end 2,0. Indholdet af magnesiumoxid (MgO) må ikke overstige 5,0 vægtprocent. Disse krav er fra DS/EN 197-1 (197-1 EN, 2000).



## 2.4 Miljøklasser

Der produceres forskellige former for beton, alt afhængig af hvordan betonen påvirkes i det miljø det skal bruges til. Der findes 4 forskellige miljøklasser for beton. De 4 miljøklasser er:

- **Passiv miljøklasse (P):** et miljø med tørre omgivelser, som f.eks. en ikke bærende indendørs væg. Der er ikke så høje krav til betonstyrken. En trykstyrke på 20 MPa er påkrævet.
- **Moderat miljøklasse (M):** et miljø hvor fugt gerne må forekomme, dog ikke være konstant vandmættet. Frost må ikke forekomme. Dette vil typisk være vådrum eller vægge og facader. Her stilles højere krav til betonstyrken. En trykstyrke på 25 MPa er påkrævet. Det maksimale v/c-forhold må ikke overstige 0,55.
- **Aggressiv miljøklasse (A):** et miljø hvor der godt må være konstant vandmættet, samt frost. Betonen må godt påvirkes af salte og syre. Dette vil typisk være en støttemur eller udvendige trapper. Der stilles høje krav til betonstyrken. En trykstyrke på 35 MPa er påkrævet. Det maksimale v/c-forhold må ikke overstige 0,45.
- **Ekstra aggressiv miljøklasse (E):** et fugtigt miljø hvor tilstedeværelse af klorider og alkalier kan forekomme. Dette vil typisk være svømmehaller eller havnekonstruktioner. Der stilles ekstra høje krav til betonstyrken. En trykstyrke på 40 MPa er påkrævet. Det maksimale v/c-forhold må ikke overstige 0,40.

(Aalborg Portland, 2007)

## 2.5 v/c forhold

Forholdet mellem vand og cement kaldes vandcement-forholdet, også betegnet v/c-forholdet. v/c-forholdet er en betegnelse for hvor meget vand der skal bruges til en del cement målt i vægt. Det optimale v/c forhold er 0,4, eftersom cementen reagerer fuldstændig med vandet ved dette forhold, og der herved opnås optimal styrke. For en moderat miljøklasse kan v/c-forholdet dog godt være 0,55 eftersom der ikke stilles store krav til styrken. Et større v/c forhold end 0,4 vil danne gelporer, som mindsker styrken (Gottfredsen & Nielsen, 2008).

## 2.6 Tilslag

Tilslag udgør den største del af betonen, som normalt ligger mellem 65-75% af det samlede volumen. Traditionelt tilslag består af naturlige sand- og stenmaterialer. Densiteten af beton kan derfor komme over 2000 kg/m<sup>3</sup>. De mest anvendte tilslagsmaterialer, stammer enten fra grusgrave eller fra søbunden. Tilslag fra grusgrave benævnes bakkesten, bakkegrus og bakkesand. Tilslag fra søbunden benævnes søsten, søgrus og søsand (Dansk Betonforening, 3013). Betegnelser for størrelse af tilslaget kan ses i tabel 1.

**Tabel 1.** (Dansk Betonforening, 3013) **Betegnelser for forskellige kornstørrelser.**

<b>BETEGNELSE</b>	<b>STØRRELSE</b>
BETONGRUS	Mellem 0-16 mm
FILER	Under 0,25 mm
BETONSAND	Mellem 0-4 mm
PERLESTEN	Mellem 4-8 mm
ÆRTESTEN	Mellem 8-16 mm
NØDDESTEN	Mellem 16-32 mm
SINGELS	Mellem 32-64 mm

Aggregater til betonen bør være:

- Egnet til det miljø, som betonen skal udsættes for. For eksempel skal aggregaterne være frostbestandige, hvis betonen anvendes til udendørs konstruktioner i lande, hvor der kan forekomme temperaturer under 0 grader celsius.
- Ren. Hvis den samlede overflade er dækket af støv, vil adhærens mellem aggregat og hærdet cementpasta være dårlig, hvilket resulterer i svage zoner langs den samlede overflade.

Sand- og stenmateriale kan variere med type og kvalitet. Det er derfor nødvendigt at kende type og kvalitet af tilslaget. Kvaliteten af tilslaget kan bestemmes ud fra 2 parametre, som er følgende:

- Geometriske parametre
- Fysiske parametre

### 2.6.1 Geometriske parametre

De geometriske parametre omhandler kornstørrelse og kornform.

- Kornformen kan være afrundede eller kantede. Normalt er sømaterialer afrundede og glatte. Knuste materialer er mere kantede og har en mere ru overflade. Kornformen kan også forekomme som kubiske, aflange eller flade former. Kornformen har betydning for betonens egenskaber. Kantede korn, også kaldet skærver, kan være en fordel i en frisk beton, eftersom det kan gøre den mere stabil ved udstøbning. Afrundede korn kan give en besparelse i cement, og vil dermed være mindre omkostningsrigt.
- Tilslaget er en blanding af korn i forskellige størrelser. Den helt rigtige blanding af tilslag vil give den optimale styrke i betonen. Det er derfor vigtigt at kende kornstørrelserne der anvendes og mængden af hver kornstørrelse. Der er standarder for kornstørrelsen, som er 0, 1, 2, 4, 8, 16 og 31,5mm. Kornstørrelsen kan bestemmes ved hjælp af en såkaldt sigteanalyse.

## 2.6.2 Fysiske parametre

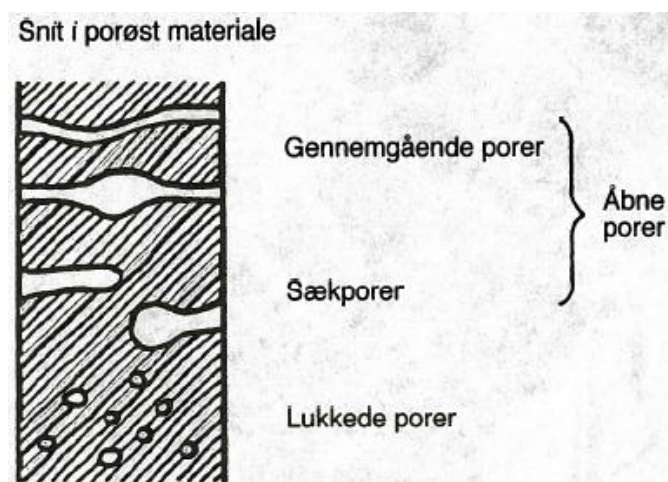
De fysisk vigtigste parametre er korndensiteten, absorptionsniveau og kornstyrke.

- Korndensiteten er meget vigtig, eftersom det har en betydning for styrken. Typiske danske tilslag af god kvalitet har en korndensitet på ca. 2.400 – 2.700 kg/m<sup>3</sup> tæt, sort flint og granit ligger over 2.500 kg/m<sup>3</sup> Med sådanne tilslag får betonen en densitet på ca. 2.300 kg/m<sup>3</sup>
- Tilslagets absorption er et vigtigt fysik parameter, fordi det fortæller noget om hvor meget vand tilslaget kan absorbere, og dermed have betydning for v/c-forholdet.
- Kornstyrken er meget vigtig under høj belastning. Store korn skal være stærke, så de ikke revner under stor belastning. I de danske materialer er sorte flinter, de langt stærkeste. Granit er noget svagere, og kalksten er meget bløde.

(Dansk Betonforening, 3013)

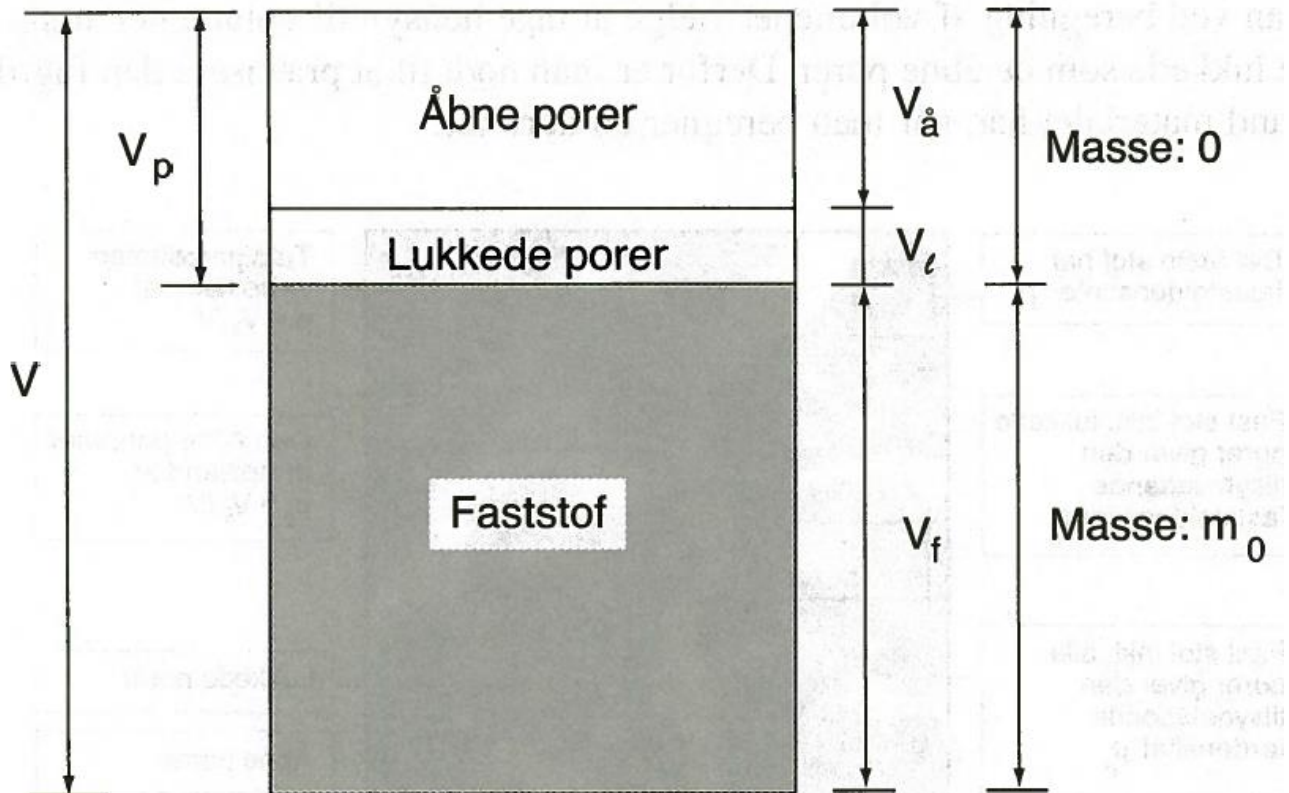
## 2.7 Porøsitet og permeabilitet

Hulrum i en hvis størrelse betegnes efter materialelæren som porer. Porer kan være fyldt med luft eller vand. Der findes porer som kan være gennemgående eller går en hvis længde ind i materialet, hvor de har adgang til omgivelserne. Disse porer kaldes *åbne porer*. Porer som ikke er i kontakt med omgivelser rundt om materialet kaldes *lukkede porer* (Gottfredsen & Nielsen, 2008). En beskrivelse af porøsiteten kan ses på figur 2



Figur 2. (Gottfredsen & Nielsen, 2008) Illustration af forskellige porer

Ved mange åbne porer i materialet, vil gennemgang af væsker være stor, altså er der en stor permeabilitet. Ved få åbne porer vil materialet have en lav permeabilitet. Volumenstørrelsen af porerne i forhold til totalvolumen angiver hvor porøst et materiale er. I denne forbindelse, kan et materiale deles op, som på figur 3.



Figur 3. (Gottfredsen & Nielsen, 2008) Opdeling af faste stoffer og porer, samt betegnelser

Altså består beton af faststof, lukkede porer, og åbne porer. Et højt porevolumen giver en lav styrke, hvor en lav porevolumen giver en høj styrke.

## 2.8 Trykstyrke

Trykstyrken er den maksimale sammenpresning, betonen kan tåle uden at bryde. Beton skal kunne holde til en hel del tryk, alt afhængig af miljøklasse. Når beton udsættes for tryk, vil der opstå aksiale tøjninger og spændinger. Ved rent aksialt tryk, vil der opstå et glidningsbrud. Trykstyrken kan bestemmes ud fra Bolomeys formel.

### 2.8.1 Bolomeys formel

Ud fra et empiribaseret synspunkt kan den regningsmæssige styrke bestemmes ud fra Bolomeys formel. De vigtigste faktorer i Bolomeys formel er  $v/c$ -forholdet, cementtype og

hærdningsgraden, som har en stor betydning for den endelige styrke. Bolomeys formel ser således ud (Dansk Betonforening, 3013) :

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

Hvor  $f_c$  er betonens trykstyrke

$K$  er en konstant, som afhænger af cementtype

$v/c$  er masseforholdet mellem vand og cement

$\alpha$  er en konstant som afhænger af cementtype

Det naturlige luftindhold skal ligge mellem 1-2%. For  $v/c$ -forholdet skal følgende krav være opfyldt (Dansk Betonforening, 3013):

$$0,45 < v/c < 1,25$$

For Basis Portlandcement anbefales følgende konstanter, som vist i tabel 2:

**Tabel 2.** (Aalborg Portland, 2007) **Konstanter for basis portlandcement.**

Basis Portlandcement		
Døgn for hærdning (t)	$K$	$\alpha$
1	17	0,9
7	26	0,6
28	30	0,5

Bolomeys formel kan give et teoretisk bud på hvad den forventede styrke vil være. I praksis kan styrken dog variere fra formlen, eftersom blandingsforholdene ikke altid passer i praksis.

### 3. Metode og eksperimentelt arbejde

I dette afsnit redegøres for den anvendte metode til fremstilling af beton, hvor en hvis procentdel af aggregaterne består af genanvendt nedknust beton. Derudover beskrives hvilke forsøg der gennemføres for at måle betonens egenskaber før, under og efter støbning. For alle

betonblandinger er det gældende at både blandingsproceduren og forsøgsproceduren er ens, således at resultaterne er sammenlignelige.

### 3.1 Genbrugsaggregater

Der findes mange forskellige typer betonaggregater, og det er derfor vigtigt at kende oprindelsen af den nedknuste beton. De nedknuste betonaggregater er hentet fra Kastrup Lufthavn, hvor en gammel hangar er nedrevet. Hangaren er bygget i 1948 (Københavns Lufthavne A/S, 2015). Betonen er *formentlig* højstyrkebeton, som vil sige at den har en styrke som skal holde til miljøklasse E.

Den nedknuste beton blev hentet i spande, hvorefter det blev sigtet. Der blev benyttet 3 forskellige sigter til at sortere den nedknuste beton. Sigterne havde en maskevidde på hhv. 4, 8, og 16 mm. Den nedknuste beton blev tilsat lidt af gangen, imens sigten rystedes, så det kun var den ønskede størrelse der blev i sigten. På figur 4 og 5 kan udførelsen ses, samt stenene efter sortering.



Figur 4. Spand med sigte monteret på toppen



Figur 5. Sorteret tilslag med 4-8 mm og 8-16 mm sten

Efter sigtningen, er de ønskede stenstørrelser sorteret. De nedknuste betonaggregater har nu en størrelse på 4-8 mm og 8-16 mm. Det resterende smides til affaldssortering.



Under sigtningen blev der fundet urenheder i betonen, som kan have indflydelse på resultaterne. De fundne urenheder kan ses på figur 6.



*Figur 6. Urenheder fra sigtningen. Der er glas, tegl, plastik, blade og metal*

Efter sigtningen vaskes betonaggregaterne for at fjerne støv fra overfladen på stenene. Dette vil give en bedre binding mellem cementpasta og aggregater. Efter afvaskningen, sættes aggregaterne i en ovn for at fjerne alt overfladevand, samt vand fra åbne porer. Ovnens indstilles til 50°C hvor aggregaterne tørrer i 4 dage. Ovnens kan ses på figur 7.



*Figur 7. Ovnens med sten indsat*

Aggregatet kan nu bruges til støbning, og det færdige produkt kan ses på figur 8 og 9.





Figur 8. Tilslag med størrelsen 8-16 mm



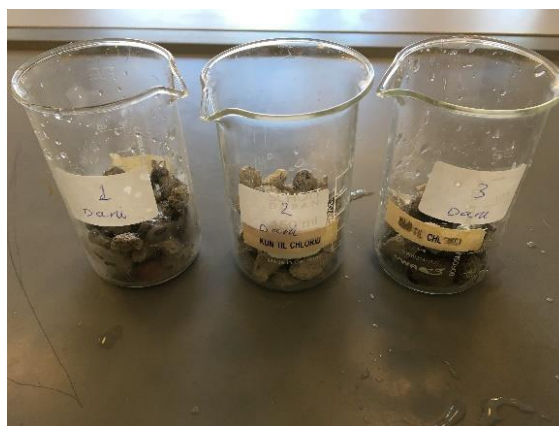
Figur 9. Tilslag med 4-8 mm

Som det kan ses ud fra figurerne, så er det en meget ren genbrugsbeton.

### 3.2 Absorption

Det er vigtigt at kende absorptionen af tilslaget, eftersom det kan have indflydelse på v/c-forholdet.

Først vejes ca. 60 g overfladetør, vandmættet aggregat. Herefter bruges 3 reagensglas, hvor de alle afvejes. Aggregatet fordeles nu i de 3 glas, hvorefter vægten noteres. Aggregaterne sættes til tørre i et varmeskab med 105 °C i 1 døgn. Efter de er fuldstændig tørre vejes glassene igen, og vægten fra den våde prøve og tørre prøve trækkes fra hinanden, hvorved det er muligt at kende vandindholdet. På figur 10 kan glassene ses med aggregater i.



Figur 10. Reagensglas med overfladetør, vandmættet betonaggregat

### 3.3 Sigteanalyse

Sigteanalysen er udført efter DS/EN 933-1 (DS/EN 933-1, 2012). Sigteanalysen fortæller noget om kornfordelingen, hvilket kan hjælpe med at give den bedste proportionering af en

betonblanding. Det kan også fortælle noget om hvor stor en procentdel af den nedknuste beton der kan genanvendes.

Ca. 10 kg af den usorteret beton afvejes og overføres til en sigtesøjle. Der er i forsøget benyttet 5 sigter med maskevidde 31,5, 16, 8, 4 og 2 mm. Under 2 mm benyttes laserdiffraktion. Efter manuel sigtning er den tilbageholdte fraktion på hver sigte afvejet. Efterfølgende er gennemfaldet på hver sigte beregnet som procentdelen af den samlede prøve. På figur 11 kan sigtningsforløbet ses.



*Figur 11. Sigtning af kornfraktionen igennem alle sigterne*

På figur 12 kan slutresultatet ses.



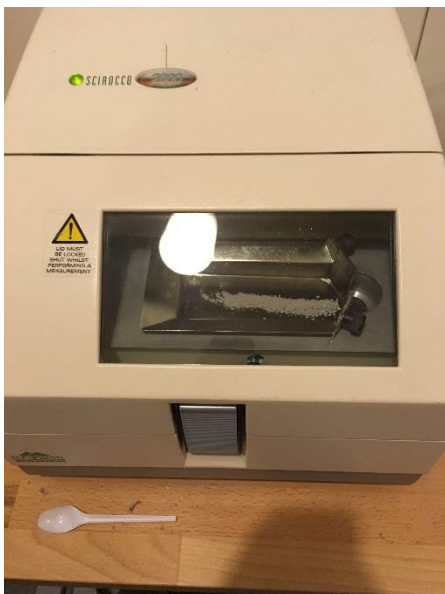
*Figur 12. En fordeling med kornstørrelserne efter sigtning*

Efter sigteanalysen er gennemført, tages en prøve af 5g fra kornstørrelsen på 0-2 mm til brug ved laserdiffraktionsanalysen.

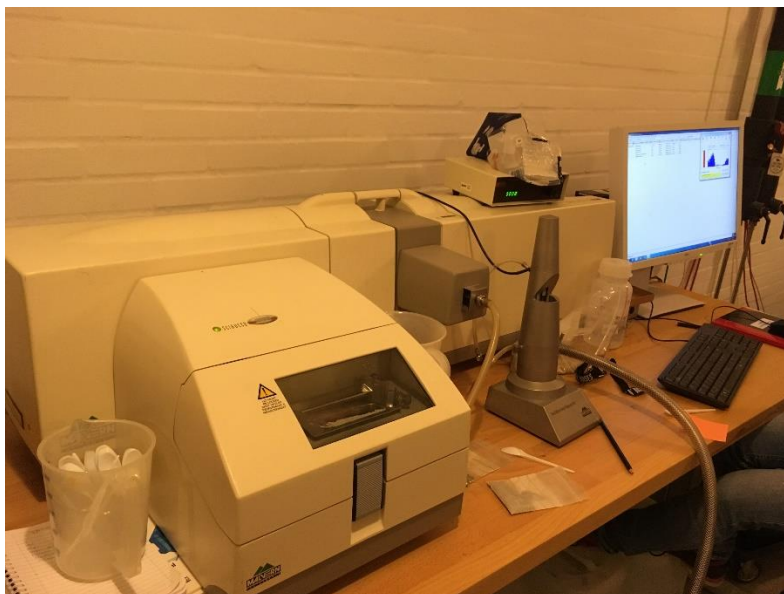
### 3.3.1 Laserdiffraktion

Forsøget er udført efter DS/ISO 13320 (DS/ISO 13320, 2009). En prøve på ca. 5 g testes. Låget åbnes for maskinen, og en tynd stribe af partiklerne placeres i midten af metalboksen.

Opsætningen kan ses på figur 13 og 14.



Figur 13. De tilførte korn kan ses i maskinen



Figur 14. Visning af hele maskinen

Efter placeringen af partiklerne, startes testen ved hjælp af en computer. Testresultaterne gemmes, og processen gentages 3 gange i alt. Herefter tages gennemsnittet af testresultaterne, som vil være det endelige resultat til videre analyse.

### 3.4 Syreoplukning

Syreoplukningen giver et indblik i, hvor meget cementpasta der stadig sidder på aggregaterne efter nedknusning af gammel beton. 20 g tørret knust prøve afvejes på teknisk vægt til en konisk kolbe. Der tilsættes ca. 50 ml varmt destilleret vand og det blandes. Derefter tilsættes der langsomt 10 ml koncentreret HNO<sub>3</sub> til opløsningen som derefter blandes godt og stilles til afkøling til stuetemperatur. Der tilsættes ca. 1 mL koncentreret HNO<sub>3</sub> for at kontrollere at alt materiale er opløst (luftudvikling). På figur 15 kan reaktionen ses.



*Figur 15. Cementen som reagere med salpetersyre*

Efter prøven ikke bobler mere, filtreres opløsningen gennem et alm filter ned i et bægerglas. Herefter skyldes filtreret med destilleret vand. Filterne med det afvaskede aggregat sættes nu i varmeskab ved 105 grader i 1 døgn, hvorefter den afvejes. På bilag 1 og 2 kan forsøgsvejledningerne ses.

### 3.5 Proportionering

Proportioneringen er bestemt ud fra et v/c-forhold på 0,5 og 0,6. Blandingerne er vist i tabel 3.

**Tabel 3. recepter for de forskellige blandinger.**

Prøvenavne	Antal prøvelegemer	CEM II (Kg/m <sup>3</sup> )	Vand (Kg/m <sup>3</sup> )	Sand (Kg/m <sup>3</sup> )	Jomfruelige aggregater		Genbrugsaggregater	
					Grus-fin 4-8 mm (Kg/m <sup>3</sup> )	Grus-grov 8-16 mm (Kg/m <sup>3</sup> )	Grus-fin 4-8 mm 50 % (Kg/m <sup>3</sup> )	Grus-grov 8-16 mm 50 % (Kg/m <sup>3</sup> )
<b>Ref-tør (v/c=0,5)</b>	4	344	172	742	554	554	-	-
<b>Ref-tør (v/c=0,6)</b>	4	287	172	762	554	554	-	-
<b>A1,50 (v/c=0,5)</b>	4	344	172	742	554	277	-	277
<b>A2,50 (v/c=0,5)</b>	4	344	172	742	277	554	277	-
<b>B1,50 (v/c=0,6)</b>	4	287	172	762	554	277	-	277
<b>B2,50 (v/c=0,6)</b>	4	287	172	762	277	544	277	-

Samme blandinger udføres med vandmættede aggregater.

Blandingerne er foretaget på denne måde for at finde ud af hvilke blandinger der er de stærkeste, og der vil dermed arbejdes videre med de stærke blandinger.

Efter analysen af alle blandinger, er der arbejdet videre med blandingerne i tabel 4, hvor blandinger med v/c-forhold på 0,6 samt vandmættet blandinger er udelukket. I Disse blandinger erstattes enten ærtesten eller perlesten med hhv. 30, 60 og 90 % genbrugsaggregater.



**Tabel 4. Recepter for nye blandinger.**

Prøvenavne	Antal prøvelegemer	CEM II (Kg/m <sup>3</sup> )	Vand (Kg/m <sup>3</sup> )	Sand (Kg/m <sup>3</sup> )	Jomfruelige aggregater		Genbrugsaggregater	
					Grus-fin 4-8 mm (Kg/m <sup>3</sup> )	Grus-grov 8-16 mm (Kg/m <sup>3</sup> )	Grus-fin 4-8 mm (Kg/m <sup>3</sup> )	Grus-grov 8-16 mm (Kg/m <sup>3</sup> )
<b>A1,30 (v/c=0,5)</b>	5	344	172	742	554	387,8	-	166,2
<b>A2,30 (v/c=0,5)</b>	5	344	172	742	387,8	554	166,2	-
<b>A1,60 (v/c=0,5)</b>	5	344	172	742	554	221,6	-	332,4
<b>A2,60 (v/c=0,5)</b>	5	344	172	742	221,6	554	332,4	-
<b>A1,90 (v/c=0,5)</b>	5	344	172	742	554	55,4	-	498,6
<b>A2,90 (v/c=0,5)</b>	5	344	172	742	54,4	554	498,6	-

### 3.6 Blanding af beton

Blandingerne foretages med en orange 80 L betonblander, se figur 16. Alle delkomponenterne afvejes og tilsættes i betonblanderen. Først tilsættes ærtesten, perlesten, sand og Basis Portlandcement i betonblanderen, se figur 17. Betonblanderen skal køre i 1 min, for at sikre at alt er blandet optimalt sammen. Herefter tilsættes vand, hvor blanderen skal køre i 3 min. Efter blandingsproceduren er afsluttet inspiceres den friske betonblanding, for at sikre at alt er blandet optimalt. Hvis den visuelle inspektion godkendes, bruges blandingen til videre forarbejdning.



*Figur 16. Orange betonblender på 80 L*



*Figur 17. Blanding af tilslag*

For de vandmættede genbugsaggregater er der stadig overskydende vand på overfladen, som ikke kan fjernes helt. De vandmættede aggregater hældes over i en si og rystes, indtil det ikke dryper mere, og de kan herefter benyttes i blandingen. I praksis vil det heller ikke være hensigtsmæssigt at fjerne alt overskydende overfladevand.

### 3.7 Sætmål

Bestemmelse af sætmål er udført i forhold til DS/EN 12350-2 (DS/EN 12350-2, 2009). En god måde til at bestemme bearbejdeligheden, er ved at finde sætmålet fra den friske betonblanding. En metalkegle bruges til sætmålet. Keglen skylles med vand, for at gøre overfladen som betonblandingen kommer i kontakt med mere glat, så blandingen ikke sidder fast. De indvendige mål for sætmålskeglen er:

- For neden: 200 mm
- For oven: 100 mm
- Højden: 300 mm

Sætmålskeglen er forsynet med 2 håndtag og fastspændingsordninger for neden. Keglen spændes fast, hvorefter den fyldes 1/3 op med beton, og der stemples med en rund metalstang 25 gange. Dette gentages 2 gange til, indtil keglen er fyldt 3/3. Efter den sidste stampning toppes keglen med beton, hvorefter en flad metalstang bruges til at jævne toppen, så betonen er i niveau med keglens højde. Herefter udløses fastspændingen i bunden, hvorefter keglen roteres imens den hives op. Fremgangsmåden kan ses på figur 18, 19 og 20.



Figur 18. keglen fyldes 1/3 med beton.



Figur 19. betonen stemples 25 gange.



Figur 20. Keglen fjernes, hvorefter sætmålet noteres.

Efter betonen har sat sig, noteres sætningen med en målestok.



### 3.8 Luftindhold

Luftindholdet bestemmes for at se om det empirisk baseret luftindhold på 1-2% passer overens med det målte. Ifølge DS/EN 12350-7 (DS/EN 12350-7, 2002) er der 2 metoder til bestemmelse af luftindholdet. Prøvningsmetoderne er hhv. vandsøjlemetoden og manometermetoden. I denne rapport anvendes manometermetoden.

Der benyttes et trykmeter til bestemmelse af luftindhold med manometermetoden. trykmeteret kan ses på figur 21 og 22.



Figur 21. trykmeteret uden låg er monteret



Figur 22. Trykmeter hvor den grønne knap er for kalibrering og den sorte er for det endelige luf indhold

Beholderen fyldes 1/3, hvorefter den vibreres med et vibratorbor med minimum 40Hz.

Herefter vibreres betonen indtil der ikke er store synlige luftbobler. Dette gøres 3 gange i alt, indtil beholderen er fyldt. Efter fyldning, renses kanten på beholderen for at sikre en helt tæt forsegling når låget skal på.

Låget sættes på, hvor der sikres en helt tæt forsegling. Ventilerne på låget åbnes, hvor der sprøjtes vand ind gennem den ene ventil indtil der kommer klart vand ud af den anden ventil. Herefter lukkes ventilen som der kommer vand ud fra. Den anden ventil lukkes samtidig med at der holdes et konstant vandtryk. Luft pumpes ud ved hjælp af pumpen i midten. Der pumpes indtil luftniveauet kommer under den røde streg. Derefter kalibreres måleren med

den grønne knap, så viseren står på den røde streg. Der trykkes på den sorte knap i et par sekunder, indtil viseren står stabil. Luftindholdet kan herefter aflæses, og dette noteres.

### 3.9 Støbning

Støbningerne er foretaget efter DS/EN 12390-1 (DS/EN 12390-1, 2013). Der støbes 4 prøvelegemer af hver blanding for at sikre nøjagtige måleresultater. Prøvelegemerne er cylinderformede med en diameter på 100 mm og en højde på 200 mm. På figur 23 kan støbformerne ses. På figur 24 er en færdigstøbt cylinder.



Figur 23. Forme til støbning af cylindrerne



Figur 24. Færdigstøbt cylinder på 100x200 mm

Formene fyldes 1/3, imens de står på vibrationsboret. Vibrationsboret startes, og der vibreres i 30 s med en frekvens mellem 60-70 Hz. Dette gentages 3 gange, indtil cylinderen er fyldt. Der vurderes om luftindholdet er tilfredsstillende ved visuel inspektion. Toppen af cylinderen rettes herefter med en flad metalstang imens vibrationsbordet er tændt. Låg påføres, hvor ingen mellemrum må forekomme mellem låg og cylinder. Betonen får nu lov at hærde i minimum 16 timer ved 20 °C, hvorefter prøvelegemerne afformes. Afformningen foretages efter DS/EN 12390-2 (DS/EN 12390-2, 2012). Efter afformningen lagres prøvelegemerne i et vandbassin ved 20 °C indtil prøverne skal tryktestes. Prøverne lagres i vand for at forhindre udtørring, og reducere af styrken.

### 3.10 Densitet og porøsitet

Når betonen er hærdet, bestemmes densiteten. Densiteten er bestemt ved cylinderens vægt og volumen. Først vejes cylinderen. Efter vejningen bestemmes diameteren af cylinderen, ved at tage 3 målinger forskellige steder på cylinderen, i både top og bund. Middelværdien af

målingerne bruges. Herefter måles højden på 3 forskellige steder, hvor middelværdien bruges. Volumen bestemmes ved følgende formel:

$$V = \pi \cdot h \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

Densiteten vil dermed være  $\rho = \frac{m}{V}$ .

Det er kun de første prøvelegemer hvor volumen er bestemt, eftersom det viser sig at spredningen i diameter og højde er minimale. Det er derfor antaget at cylindrerne har dimensionerne 100x200 mm.

Bestemmelse af densiteten er foretaget efter DS/EN 12390-3 (DS/EN 12390-3, 2009).

Densiteten kan også bestemmes på en anden måde. Der bruges 1 prøvelegeme af hver blanding til bestemmelse af densitet og porøsitet. Først skæres 2 skiver ud fra prøvelegemet. Den første skive skæres 1 cm fra toppen på 1,5 cm, samt en skive cirka i midten på 1,5 cm. På figur 25 kan en betonskive ses, samt strukturen af en genbrugt betonsten på figur 26.



Figur 25. Udskåret betonskive



Figur 26. Et betonaggregat, hvor porøsiteten kan ses

Efter udskæring af betonen, tørres betonskiverne i 3 uger ved 50 °C. Dette er for at være sikker på at alt vandet i porerne er fuldstændig fordampet.

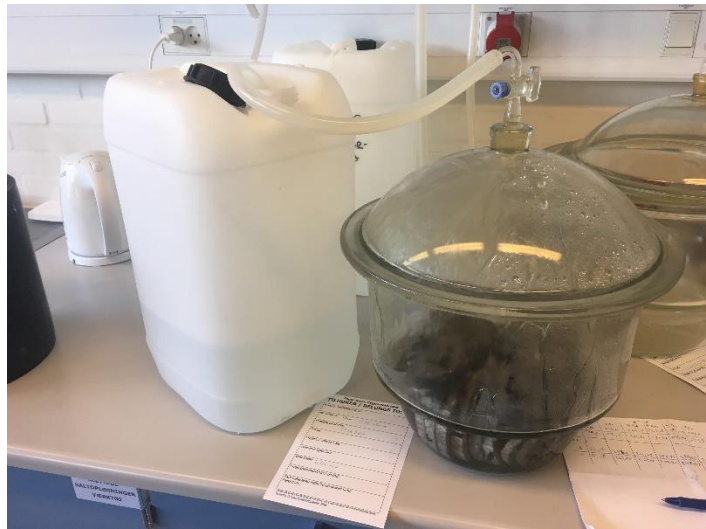
Efter tørringen vejes alle betonskiverne, hvorefter de indsættes i en eksikator med låg. Eksikatoren tilsluttes en vakuumpumpe og pumpen skal køre i minimum 3 timer. Herefter ledes destilleret vand med rumtemperatur ind i eksikatoren. Eksikatoren skal stå lukket i 1



time, hvorefter luft lukkes ind, og prøverne skal hermed stå under vand i 1 døgn. Opstillingen kan ses på figur 27 og 28.



Figur 27. Eksikator tilsluttet vakuumpumpe med prøvelegemer i.



Figur 28. Eksikator tilføres demineraliseret vand.

Efter 1 døgn, er alle porer vandmættet og der foretages en vejning under vand og over vand, hvorefter densitet og porøsitet kan findes. På figur 29 og 30 kan vejningen ses.



Figur 29. Vejning under vand



Figur 30. Vejning over vand med overfladetør vandmættet tilstand.

Vejledningen kan ses på bilag 3.

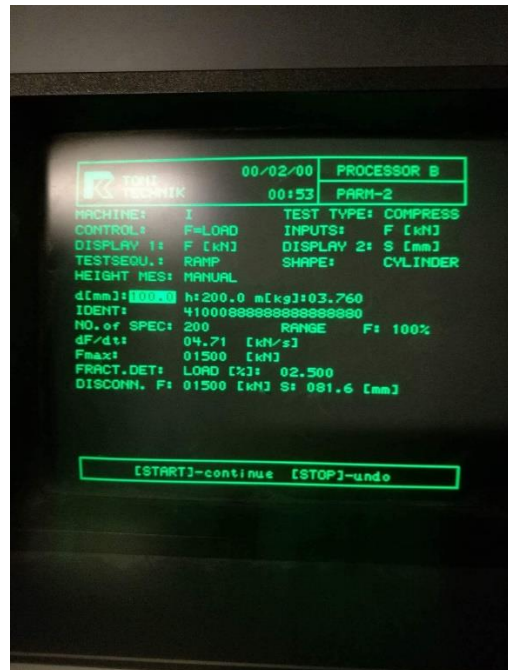
### 3.11 Trykprøvning

Trykprøvningen foretages for alle 4 cylindere hørende til hver betonblanding.

Trykprøvningen foretages efter 7 dages hærdning. Trykprøvemaskinen der er anvendt er af typen TONI 3000. Maskinen består af en presse og et kontrolpanel. Ved alle trykprøverne er belastningen fra maskinen sat til  $4,71 \frac{kN}{s}$ , se figur 32. Når trykprøvningen foretages, plahjceres cylinderen i midten af prøvemaskinen. Herefter startes maskinen, hvor cylinderen belastes indtil den maksimale brudlast opnås, se figur 31. Efter brud aflæses brudlasten i kN, og brudspændingen kan derefter beregnes.



Figur 31. Toni 3000 med belastning af cylinder



Figur 32. Styreenhed af maskinen, med værdier indtastet

Trykstyrken er givet med følgende ligning:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Hvor  $f_c$  er styrken i MPa

$F$  Er brudlasten

$A_c$  Er tværsnitsarealet

Bestemmelse af trykstyrken er foretaget efter DS/EN 12390-3 (DS/EN 12390-3, 2009).

Maskinen der er brugt overholder DS/EN 12390-4 (DS/EN 12390, 2000)

## 4. Resultater og Diskussion

I dette afsnit vil resultater fra forsøg og udregninger gennemgås. Denne gennemgang af resultater vil opfølges af en diskussion undervejs. En diskussion til anvendelse i praksis, samt en refleksion over perspektivering vil blive fremlagt.

Alle prøver er testet efter 7 hærdedøgn. I første fase blev der udført karakteristik af betonen og lavet referenceprøver, samt betonblandinger med forskellige v/c-forhold. Efter test af de første prøvelegemer, blev der fremlagt en posterpræsentation. Poster præsentationen blev udarbejdet med Hussein Awad. Posterens kan ses på Bilag 4. Efter posterpræsentationen blev der diskuteret, hvad der kunne være interessant at arbejde videre med. På baggrund af det, blev genbrugsbetonen undersøgt nærmere, samt nye recepter dannet. Disse recepter er beskrevet i metodeafsnittet.

### 4.1 Absorption og Sætmål

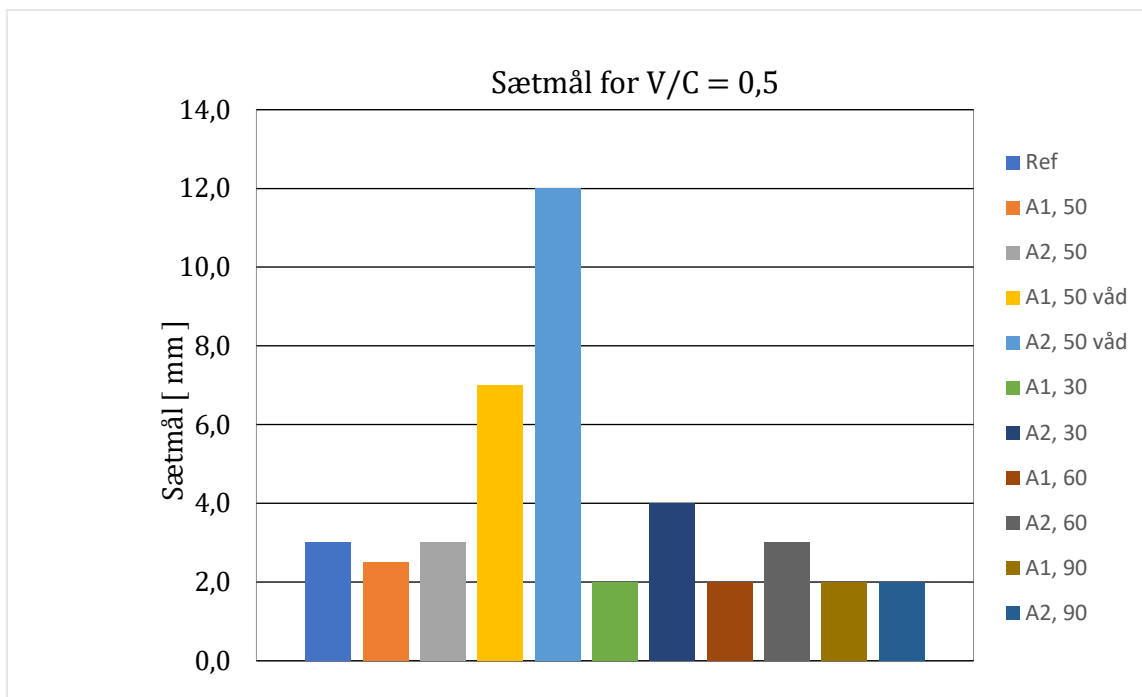
Absorptionen for henholdsvis jomfruelige aggregater og genbrugsaggregater varierer meget. Variationen kan ses i tabel 5.

**Tabel 5. Absorptionsniveau for 2 forskellige aggregater**

<b>Aggregater</b>	<b>Absorptionsprocent [%]</b>
Jomfruelige søsten	2,1
Genanvendte	12,97

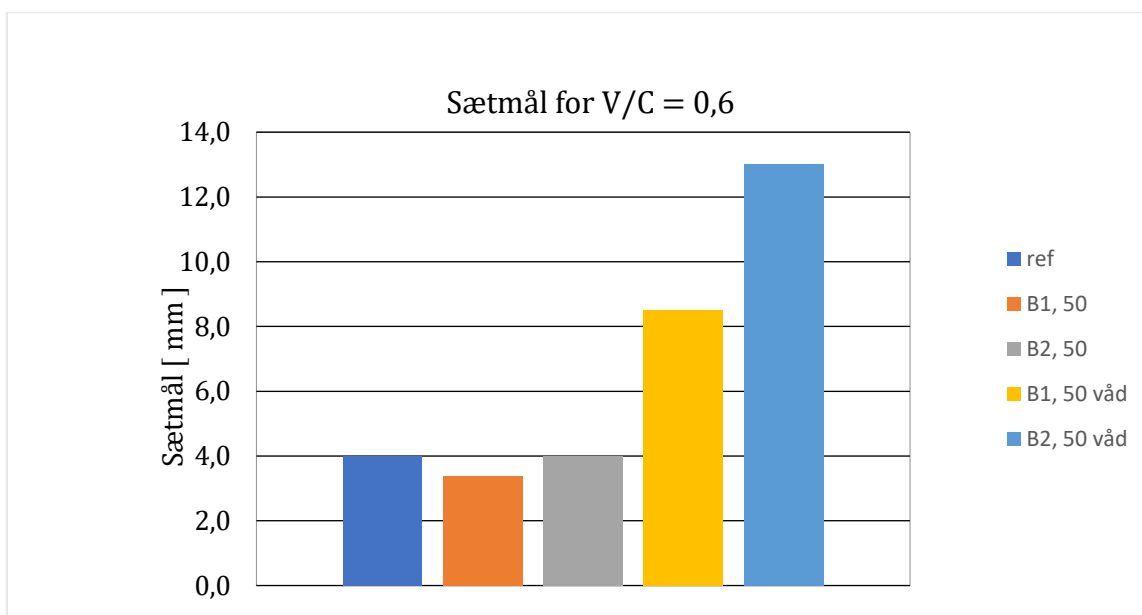
Altså er der en forskel på 10,87%. Den høje absorption i det genanvendte betonaggregat skyldes den cement, som sidder på stenene i den nedknuste beton. Absorptionen har stor indflydelse på hvor meget vand der skal tilsættes. Udregninger kan ses i Bilag 5.

Sætmål er bestemt ud fra hver blanding, for at undersøge blandings konsistens. Sætmålene sammenlignes med hinanden, samt med referenceblandingen. Det ses ud fra figur 33 og 34 at sætmålene varierer, alt afhængig af om aggregaterne i blandingen er vandmættet eller tørre. Det ses at sætmålene for de våde blandinger er meget høje, hvilket gør at blandingen er mere bearbejdelig. Derimod er sætmålene meget lave for de tørrer blandinger, eftersom genbrugsaggregaterne absorberer meget af vandet. Referenceblandingen er højere i forhold til mange af de andre blandinger med genbrugsaggregat i.



Figur 33. Sætmål af alle blandinger med v/c-forhold på 0,5

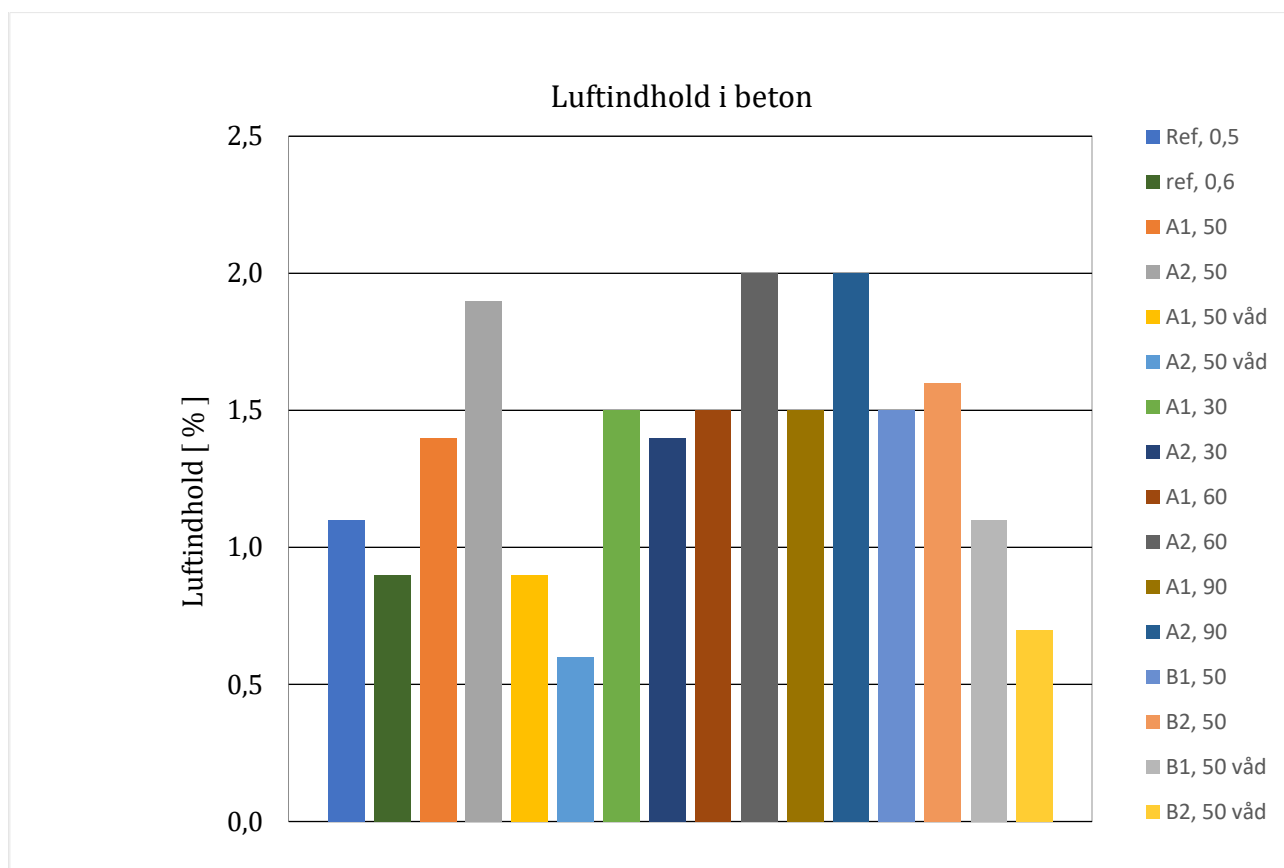
Blandingerne med et v/c-forhold på 0,5 har lavere sætmål i gennemsnit i forhold til sætmålene med et v/c-forhold på 0,6. Dette giver meget god mening, eftersom der er tilført mere vand i forhold til cementen.



Figur 34. Sætmål for alle blandinger med et v/c-forhold på 0,6

## 4.2 Luftindhold

Luftindholdet er en vigtig faktor eftersom det kan have en indflydelse på styrken. Hvis luftindholdet er højt, vil der opstå flere porer i betonen, og det vil herved forringe styrken. Et naturligt luftindhold ligger normalt mellem 1-2%. Det naturlige luftindhold kan ses på figur 35.



Figur 35. det naturlige luftindhold for alle blandinger

Det kan ses at, vandindholdet har en indflydelse på luftindholdet. Et højt vandindhold giver et lavt luftindhold, eftersom det er nemmere for luften at slippe ud, når betonen vibreres under støbning. Det giver dog en værdi som er under 1%. Dette kan være farligt for beton, som skal kunne modstå frost.



### 4.3 Syreoplukning

Syreoplukningen fortæller noget om hvor meget cement der sidder på aggregaterne. Der er undersøgt for genbrugsaggregater, for både store og små sten, i knust tilstand, samt normal størrelse. Mængden af cement kan ses i tabel 6.

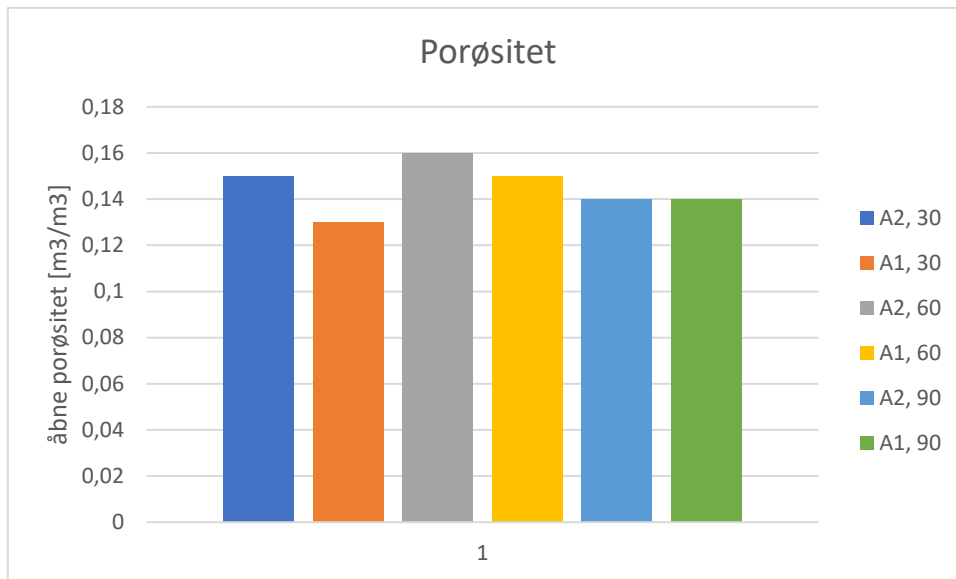
**Tabel 6. Massen af cementmørtel som sidder fast på aggregatpartiklerne**

Betegnelse	Masse af cement [%]
<b>Perlesten knust</b>	26,82
<b>Ærtesten knust</b>	25,48
<b>Perlesten</b>	21,07
<b>Ærtesten</b>	21,37

Det kan ses at op til 26,82 % af genbrugsaggregaterne består af cement. Cementen har en stor indflydelse på betonen egenskaber, eftersom det kan give flere pore, højere absorptionsniveau, samt en ændring i styrken. Det ses også at det knuste materiale giver en bedre indikation af hvor meget af genbrugsaggregaterne der faktisk er cement, eftersom det giver et større overfladeareal, som salpetersyren kan reagere med. Der er omkring samme mængde cement procentmæssigt, på store og små sten. Udregningerne kan ses i Bilag 5.

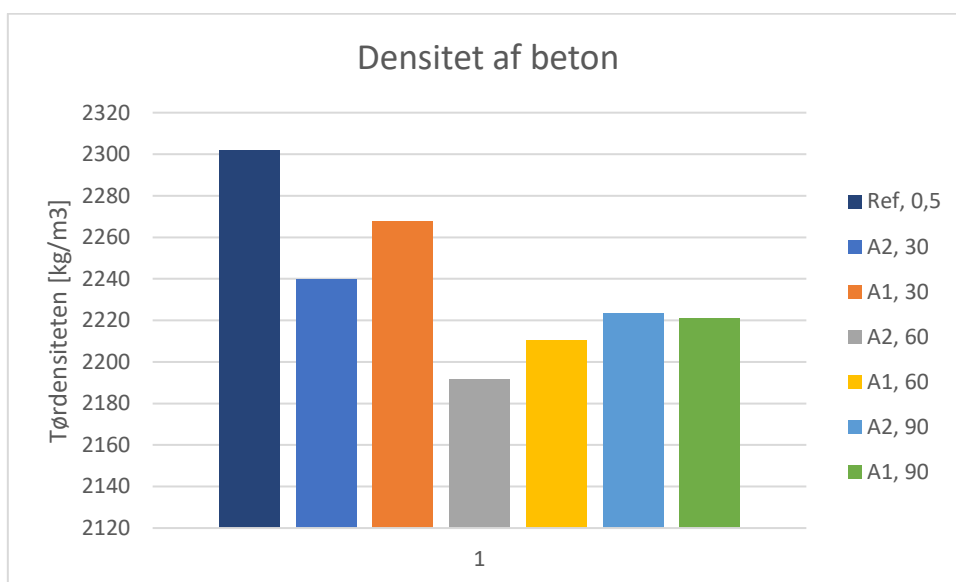
### 4.4 Porøsitet og densitet

Porøsitets- og densitetsundersøgelsen er kun foretaget for de viderearbejdede prøver, med hhv. 30, 60 og 90% nedknust betonaggregat. Ud fra forsøgets fundne data, er prøvelegemernes åbne porøsitet, og densiteter fundet. Der er taget prøver fra toppen og midten af hver cylinder, hvor gennemsnittet er benyttet. På figur 36 kan den åbne porøsitet ses.



Figur 36. Porøsiteten af blandinger med 30, 60 og 90% genbrugsbeton

På figuren ses en tendens til en større porøsitet ved genbrugsaggregater på 8-16 mm. Dette kan skyldes de store cementklumper, som indeholder mange porer. Porerne har en indflydelse på styrken. Jo større porevolumen, jo lavere styrke får betonen. Den lavere porøsitet for genbrugsaggregater på 4-8 mm kan også skyldes en bedre velgradering af stenene, som gør at den kan pakke sig bedre.



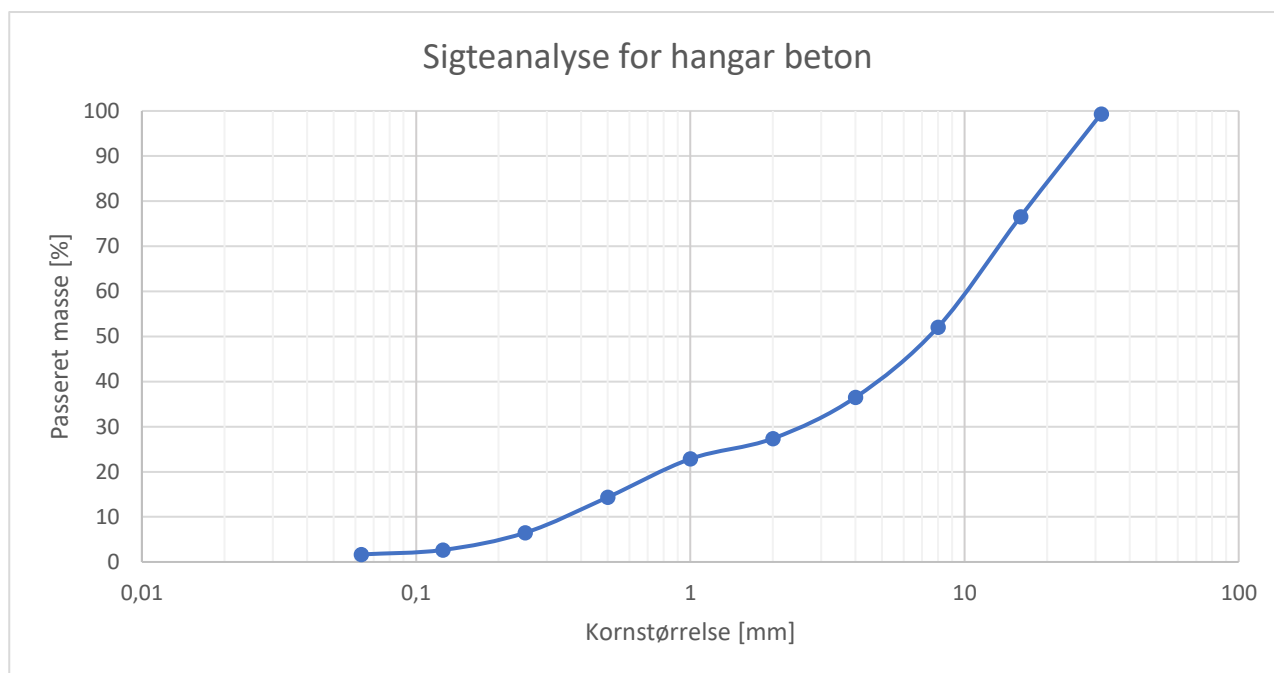
Figur 37. Densitet for referenceprøven samt for blandinger med genbrugsbeton på 30, 60 og 90 %

Det ses ud fra figur 37 at densiteten falder med tilførslen af genbrugsaggregater. Det ses også at genbrugsaggregater på 8-16 mm har en lavere densitet end dem med 4-8 mm

genbrugsaggregater. Referenceprøven har en højere densitet i forhold til blandinger med genbrugsaggregater, dette kan skyldes porerne i den gamle cementmørtel. Udregninger kan ses i Bilag 7

#### 4.5 Sigteanalyse

Sigteanalysen har stor betydning, eftersom den kan fortælle noget om hvordan kornene i blandingen kan pakke sig. Kornkurven for den nedknuste beton fra hangaren har en kornkurve, som kan ses på figur 38.



Figur 38. Kornkurve, som spænder fra 0-32 mm.

Jo bedre materialet kan pakke sig, jo mindre cementpasta skal der anvendes, og jo billigere bliver betonen. Ud fra kornkurven kan det ses at kornkurven ikke er så stejl. Den har en karakteristik som en velgraderet kornkurve, fordi den er meget flad. Altså indeholder den korn af mange forskellige størrelser.

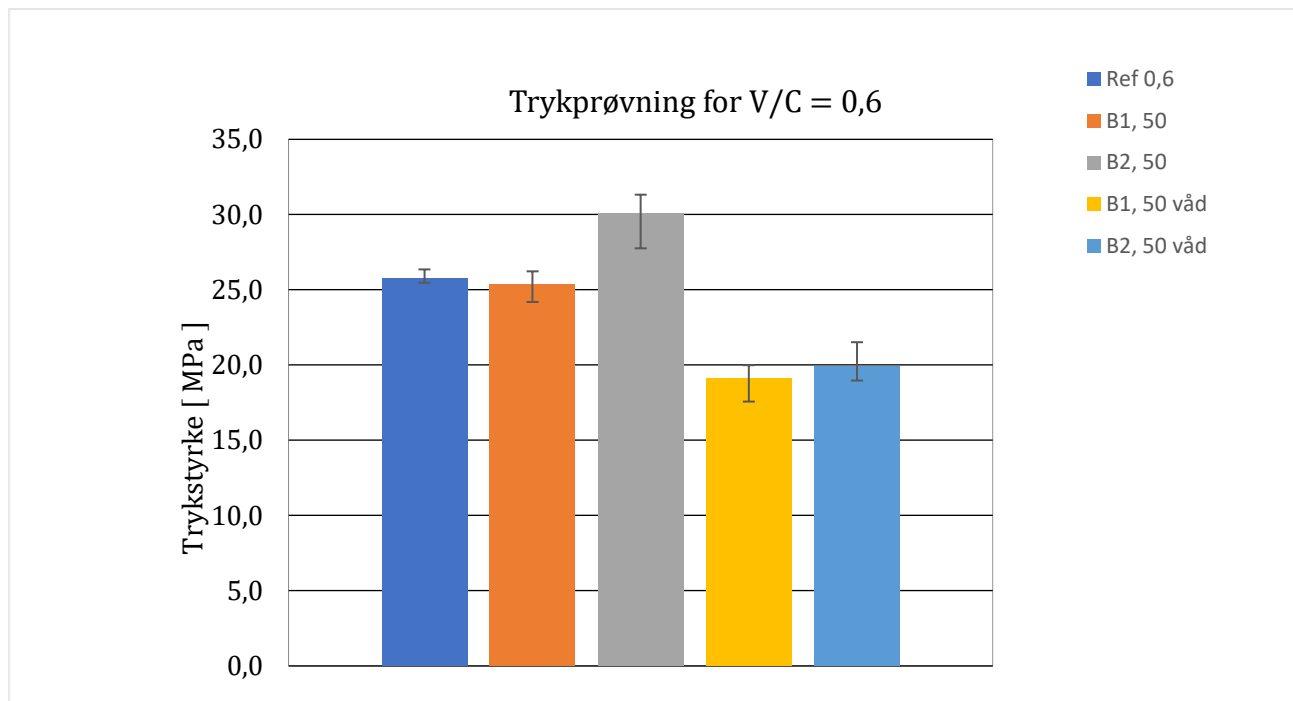
Uensformighedstallet fortæller om den er velsorteret eller velgraderet. Uensformighedstallet er:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{10 \text{ mm}}{0,35 \text{ mm}} = 28,57$$

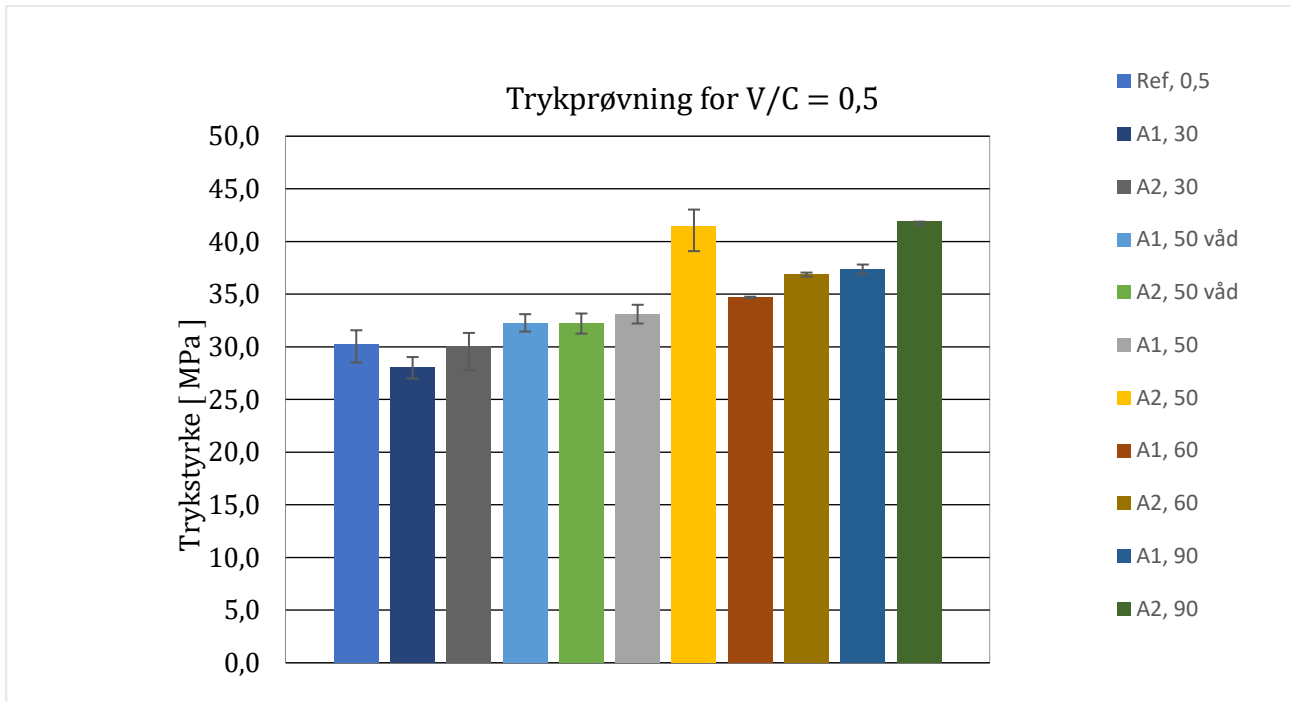
Det er altså en meget velgraderet kornfordeling, eftersom uensformighedstallet er over 5 (Oversen, et al., 2014). Blandingen er altså meget egnet til betonstøbning. Ud fra erfaringsmæssige kornkurver er det de velgraderet kornkurver som anvendes (Aalborg Portland, 2007). Udregninger kan ses på Bilag 8 og 9.

#### 4.6 Trykstyrke

Den endelige trykstyrke påvirkes af en masse faktorer, som er vist i de tidligere resultater. Den maksimale trykstyrke er vist på figur 39 og 40.



Figur 39. Trykstyrken for blandinger med et v/c-forhold på 0,6



Figur 40. Trykstyrken for blandinger med et v/c-forhold på 0,5

Det kan ses at der er en sammenhæng mellem mængden af genbrugsaggregater i betonen og trykstyrken. For et v/c-forhold på 0,6, som kan ses på figur 39, er der kun 1 prøve som ligger over referenceprøven. Ud fra figur 40, med et v/c-forhold på 0,5 kan det ses at der for blandinger med 50% og 90 % genbrugsaggregater er en væsentlig højere styrke i forhold til referenceprøven. Referenceprøven ligger på 30 MPa, mens A2, 50 og A2, 90 ligger helt oppe på 42 MPa. Dette kan indikere at der er tale om gammelt højstyrkebeton som genbrugsaggregater. Næsten alle prøver med genbrugsaggregat har en højere styrke end referenceprøven, bortset fra prøverne A1, 30 og A2, 30. De ligger dog meget tæt på referenceprøven, hvilket kunne indikere at der ikke er en stor påvirkning ved anvendelse af 30% genbrugsbeton. Udregninger kan ses på Bilag 10.

Den teoretiske styrke er ifølge Bolomeys formel vist i tabel 7.

**Tabel 7. Trykstyrken for beton regnet teoretisk efter 7 hærdedøgn**

v/c-forhold	hærdedøgn	Trykstyrke [MPa]
0,6	7	<b>27,7</b>
0,5	7	<b>36,4</b>

Altså opfylder referenceprøverne ikke Bolomeys formel. Der er en afvigelse på 7% med v/c-forhold på 0,6 og en afvigelse på 17 % med v/c-forhold på 0,5. Blanding B2, 50 har en trykstyrke på 30 MPa, som er over den teoretiske. Blanding A2, 50; A2, 60; A1, 60 og A2, 90 er over den teoretiske styrke. Udregningen for den teoretiske styrke kan ses på Bilag 11.

#### 4.7 Samlet diskussion

Eksperimenterne viser at genbrugsaggregater har en højere vandabsorption end jomfruelige aggregater. Dette hænger sammen med en større volumenfraktion af gammel cementmørtel, som klæber sig til aggregatpartiklerne, samt skarpere kanter end søsten. En større volumen af gammel cementmørtel, medvirker til en øget porøsitet, eftersom der er mange små porer i den gamle cementmørtel. En større mængde af porer medfører en lavere trykstyrke. Dog er betonaggregaterne formentlig blevet støbt med højstyrkebeton, som har gjort det muligt at opnå højere styrker end referenceprøven. Sammenlignet med resultater fra artiklen "Use of recycled concrete aggregate in concrete" (Johnson, et al., 2012), efterfølgende nævnt ved betegnelsen "RCA", understøtter den indsamlede empiri i de foretagne eksperimenter observationerne i artiklen.

Resultaterne viser at når mængden af genbrugsaggregater stiger, så falder bearbejdeligheden, hvilket ikke er godt i praksis, eftersom det bliver svært at arbejde med. Dette kan medføre at det er nødvendigt at tilføje mere vand i blandingen, som vil forringe styrken. Dog er der ikke den store forskel på bearbejdeligheden med et indhold af genbrugsaggregater på 30%, hvilket kan gøre det muligt at anvende i praksis.

Trykstyrken af betonen stiger med en forøgelse af betonaggregat. Dog er styrken højere for brugen af genbrugsaggregater med størrelser på 4-8 mm i forhold til genbrugsaggregater med 8-16 mm. Styrkerne er dog ret ens med 30 % genbrugsaggregater, hvilket kan gøre det muligt at bruge i en moderat miljøklasse (M). Styrken for blandinger med 50, 60 og 90 % genbrugsaggregater har dog styrker helt op til 40 MPa hvilket kan gøre det anvendeligt i aggressiv (A) og ekstra aggressiv miljøklasse (E), hvis styrken kun tages i betragtning. I artiklen RCA (Johnson, et al., 2012), nævnes der at betonen kan opnå høje styrker med genbrugsbeton, men at bearbejdeligheden er dårlig, hvor dette kan afhjælpes ved at tilføje microsilica, for at gøre den friske beton mere bearbejdelig.

Absorptionen af vand i genbrugsaggregaterne har i realiteten givet et lavere v/c-forhold, end det der egentlig er blevet beregnet for. Dette kan være årsagen til en øget styrke i blandinger med genbrugsaggregater i forhold til referenceprøven. I artiklen "A novel mix design methodology for Recycled Aggregate Concrete" (Pepe, et al., 2016) viser det sig, at der er en sammenhæng mellem mængden af genbrugsaggregater og v/c-forholdet. En større mængde genbrugsaggregater vil give et mindre v/c-forhold.

Tørdensiteten af betonen for blandinger med genbrugsaggregater er lavere end referenceprøven, hvilket kan skyldes den gamle cementmørtel, som sidder på aggregatpartiklerne. Dette skyldes sandsynligvis at den gamle cementmørtel har porer, hvor de lukkede porer ikke kan udfyldes med frisk cementmørtel. Altså vil der være luft inde i porerne, som ikke kan måles på normal vis. Sammenlignet med artiklen RCA (Johnson, et al., 2012), er de samme observationer foretaget.

Resultaterne for sigteanalyse og trykstyrke viser at genbrugsaggregaterne har haft en indflydelse på hvor kompakt betonen er. Dog stemmer dette ikke overens med densiteten, eftersom densiteten normalt ville være højere, hvis styrken skulle være højere end referenceprøven. Ud fra "Cement og Beton håndbogen" (Aalborg Portland, 2007), understøtter resultaterne ikke denne rapport's observationer. Her beskrives at et velgraderet tilslag bestående af afrundede korn vil kunne pakkes bedre end et tilslag bestående af kantede korn. Dette gælder dog ikke i dette tilfælde, eftersom kornene er kantede for genbrugsbetonen.

Der er mange faktorer, som kunne påvirke resultaterne. Renheden af genbrugsbetonen har en stor indflydelse på trykstyrken, eftersom glas eller plastik kan reducere styrken. Søsandet, som er blevet anvendt har ikke været tørret inden brug, derfor kan det have haft en indflydelse på v/c-forholdet, som så har haft en indflydelse på de endelige resultater. Blandingerne kan aldrig blandes helt ens, på grund af vejusikkerhed, samt spild under vejs i forløbet indtil støbning. Nogle af cylinderne har ikke haft en helt flad overflade under trykprøvning, og kan derfor have fordelt trykket anderledes.

## 5. Konklusion

Det kan konkluderes ud fra de udførte eksperimenter at der ikke er et behov for ekstra cement ved blandinger med 30 % genanvendt nedknust beton, eftersom forarbejdeligheden er rimelig, samt en endnu højere styrke end referenceprøven. Dog er forarbejdeligheden ikke særlig god ved 50, 60 og 90% genbrugsbeton, som kan betyde en tilførsel af vand, og dermed cement. Ydermere kan det fastslås at der er en højere styrke ved anvendelse af det specifikke genbrugsaggregat, som kan gøre det mere attraktivt at bruge. Genbrugsbetonen vil kunne bruges i Miljøklasse M, eftersom alle specifikke krav er overholdt. Blandingerne med mere end 50 % genanvendt beton og en kornstørrelse på 4-8 mm overholder styrkeklassen for Miljøklasse A og E, og vil dermed være en potentiel kandidat til videre arbejde.



## 6. Videre forskning

Der er i dette projekt kun undersøgt for hvilken indflydelse genbrugsaggregater fra nedknust beton har på trykstyrken af ny beton. I fremtiden vil man kunne undersøge hvilken indflydelse genbrugsaggregater fra nedknust beton har på andre essentielle parametre, herunder temperaturforskelle, elasticitetsmodulet, nyttige tilføjelsesmaterialer for at opnå en anden konsistens.

- Med temperaturforskelle kunne man undersøge hvordan en betonblanding opfører sig under frysepunktet og ved meget høje temperaturer. Det kunne have en indflydelse på porer strukturen.
- Der er mulighed for at undersøge om betonen bliver mindre fleksibelt.
- En af de vigtigste faktorer er bearbejdeligheden. En undersøgelse af hvad microsilica gør ved betonblandinger med et meget højt niveau af genbrugsbeton kunne være interessant.
- Ydermere kan der også undersøges præcis hvor meget de økonomiske omkostninger kan nedsættes, samt hvor meget energiforbrug der kan reduceres ved genanvendelsen.
- Det kunne også være interessant at kigge på hvordan betonen reagerer i forhold til kemiske reaktioner.
- En anden mulighed kunne være at kigge på hvordan man kan lave et system, som fjerner urenheder i genbrugsbetonen, så den bliver mere anvendelig.

## 7. Litteraturliste

197-1 EN, 2000. *Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity*. s.l.:EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.

Dansk Betonforening, 2013. *Betonhåndbogen*. s.l.:Dansk Betonforening.

DS/EN 12350-2, 2009. *Prøvning af frisk beton - Del 2: Sætmål*. s.l.:Dansk standard.

DS/EN 12350-7, 2002. *Betonstøbning - prøvning af frisk beton - Del 7: Luftindhold - Trykmeter*. s.l.:Dansk standard.

DS/EN 12390-1, 2013. *Prøvning af hærdnet beton - Del 1: Form, dimensioner og andre krav til prøvelegemer og form*. s.l.:Dansk standard.

DS/EN 12390, 2000. *Betonprøvning - Prøvning af hærdnet beton - Del 4: Trykstyrke - Specifikation for prøvelegemer*. s.l.:Dansk standard.

DS/EN 12390-2, 2012. *Prøvning af hærdnet beton - Del 2: Tilvirkning og lagring af prøvelegemer til styrkeprøvning*. s.l.:Dansk standard.

DS/EN 12390-3, 2009. *Prøvning af hærdnet beton - Del 3: Prøvelegemers trykstyrke*. s.l.:Dansk standard.

DS/EN 933-1, 2012. *metoder til prøvning af tilslags geometriske egenskaber - Del 1: Bestemmelse af kornstørrelses-fordelingen - sigteanalyse*. s.l.:Dansk Standard.

DS/ISO 13320, 2009. *Analayse af partikelstørrelse - Laserdiffraktion*. s.l.:Dansk standard.

Gottfredsen & Nielsen, 2008. *Bygningsingeniørernes materialer*. København V: Nyt Teknisk Forlag.

Henriksen, Juel\_Hansen & Mahiesen, 2015. *Udredning af teknologiske muligheder for at genbruge og genanvende beton*, København K: Miljøstyrelsen.

Johnson, et al., 2012. USE OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE IN CONCRETE: A REVIEW. 1 Januar.

Københavns Lufthavne A/S, 2015. <http://www.licitationen.dk>. [Online]  
Available at: [http://www.licitationen.dk/procurement/view/16309/nedrivning\\_af\\_hangar\\_1](http://www.licitationen.dk/procurement/view/16309/nedrivning_af_hangar_1)  
[Accessed Maj 2017].

Miljøstyrelsen , 2016. *Affaldsstatistik 2014*, s.l.: Miljøstyrelsen.

Oversen, et al., 2014. *Geoteknik*. 2. udgave ed. Lyngby: Polyteknisk forlag.

Pepe, Filho, Koenders & Marinelli, 2016. A novel mix design methodology for Recycled Aggregate Concrete. 14 Juni.

Vejdirektoratet, 2011. *ubunde bærelag af knust beton og tegl*, s.l.: s.n.

Aalborg Portland, 2007. *Cement og Beton*. Aalborg: AALBORG PORTLAND.

## 8. Bilag

### 8.1 Bilag 1 Syreoplukning af beton

Arktisk Teknologi og Bæredygtige Løsninger, F 2016

---

#### Syreoplukning af beton

##### **A** Princip

Betonprøven knuses og cementpastaen opløses i salpetersyre. Alle chlorider vil herefter være opløst. Uopløselige dele filtreres fra, og mængden af chlorid i væskefasen bestemmes ved titrering med sølvnitrat.

Metoden bestemmer ikke på hvilken form chloriden findes i betonprøven. Den siger ikke, om chloriden findes som natriumchlorid (almindelig salt), calciumchlorid eller andre chlorider.

##### **B** Specielt apparatur

Titrator 716 DMS Titrimo

##### **C** Kemikalie sikkerhed

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

**Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.**

##### **D** Reagenser

###### **1) Salpetersyre 1% HNO<sub>3</sub>:**

17 mL koncentreret HNO<sub>3</sub> overføres med måleglas til en 1000,00 mL målekolbe som er 1/2 fyldt med destilleret vand. Der blandes godt og tilsættes vand til mærket. Efter blanding overføres opløsningen til en plastikflaske og mærkes.

##### **E** Analysens udførelse

5 g tørret knust prøve afvejes på teknisk vægt til en konisk kolbe. Der tilsættes ca. 50 mL varmt destilleret vand og det blandes.

Derefter tilsættes der langsomt 10 mL konc. HNO<sub>3</sub> til opslæmningen som derefter

blandes godt og stilles til afkøling til stuetemperatur (skal foregå i stinkskaab).

Der tilsættes ca. 1 mL konc.  $\text{HNO}_3$  for at kontrollere at alt materiale er opløst (luftudvikling). Fortsæt med at tilsætte  $\text{HNO}_3$  indtil der ikke er mere luftudvikling.

Filtrer opløsningen gennem alm filter ned i et bægerglas. Skyl filtreret med 1%  $\text{HNO}_3$  Tilsæt destilleret vand til ca. 150 mL volumen.

Titreer prøven – se vejledning for chlorid titrering

#### **F Affaldshåndtering**

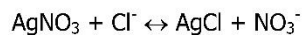
Ekstrakterne hældes i affaldsdunk mærket X 4.41 (tungmetaller).

Filterpapiret bortkastes i skraldespanden i stinkskaabet.

### Chlorid ved titrering

#### A **Baggrund:**

Sølvnitrat titreres med den chloridholdige væske og udfælder som sølvchlorid (hvidt) efter reaktionen:



Metoden kan bruges på vandprøver, oplukkede prøver eller prøver som er udrystet med vand (husk L/S forhold ved udregning).

#### B **Specielt apparatur**

Titratør 716 DMS Titrimo

#### C **Kemikalie sikkerhed**

**Salpetersyre** – Brandnærende; Ætsende; Brandfarlig ved kontakt med brandbare stoffer. Alvorlig ætsningsfare. Brug syrehandsker, plastikforklæde, sikkerhedsbriller og stinkskab ved afmåling.

**Sølvnitrat** – Ætsende; Miljøfarlig; Alvorlig ætsningsfare. Brug syrehandsker, plastikforklæde, sikkerhedsbriller og stinkskab ved overførelse af væsken. Undgå indånding. Må ikke udledes til miljøet.

**Natriumchlorid** – Der foreligger ikke information, der gør det muligt at klassificere stoffet.

**Læs kemikaliebrugsanvisningen før arbejdet begynder.**

#### D **Reagenser**

##### 1) **Sølvnitrat 0,1N:**

Købt færdigblandet hos VWR (Varenr: 30472.322)

##### 2) **Natriumchlorid: 0,1M:**

5,844g tørret NaCl afvejes på analysevægt til en 1000 mL målekolbe. Der blandes godt og tilsættes vand til mærket.

**3) Salpetersyre 1,0 M:**

70 mL koncentreret  $\text{HNO}_3$  overføres med måleglas til en 1000,00 mL målekolbe som er  $\frac{1}{2}$  fyldt med destilleret vand. Der blandes godt og tilsættes vand til mærket.

**E Opstart af apparat**

1. Tjek at  $\text{AgNO}_3$  elektroden (6.0430.100) sidder i input 1
2. Tryk på ON bag på titratoren (den røde)
3. Tænd for printeren bag på.
4. Sæt elektroden og buretteslangen i holderen ved magnetomrøreren
5. Sæt et spildglas under elektroden og buretteslangen
6. Hold **DOS** inde for at tømme buretten, samtidig med at der forsigtig slås på slangen for at løsne bobler.
7. Tryk på **Stop/Fill** for at fylde buretten.
8. Pkt. 6 og 7 gentages 3 gange
9. Indstil højde på elektroden og buretteslangen i forhold til højden på glassene med prøve

**F Kontrol af  $\text{AgNO}_3$  koncentrationen**

1,00 mL 0,1M NaCl afpipetteres til et 100 mL bægerglas. Tilsæt 50 mL dest.vand og 1,00 mL 1M  $\text{HNO}_3$ . Magneten lægges forsigtig i bægerglasset.

1. Stil bægerglasset med prøven på omrøreren
2. Kør holden ned eller op således at omrøreren starter
3. Sæt fuld drøn på omrøringen
4. Tryk på **Start**
5. Når titreringen er færdig, printes resultatet automatisk
6. Resultatet beregnes efter formlen og den rigtige konc af  $\text{AgNO}_3$  anvendes til beregning af prøvens koncentration.

**G** Beregning af AgNO<sub>3</sub>

$$\text{mol/L AgNO}_3 = \frac{\text{mL}(\text{NaCl}) \times 0,1 \text{ mol/L}(\text{NaCl})}{\text{mL}(\text{AgNO}_3)}$$

**H** Måling af ekstraheret prøver

Afmål 1-5 mL prøve til et 100 mL bægerglas. Tilsæt 50 mL dest.vand og 1,00 mL 1M HNO<sub>3</sub>. Læg forsigtig magnet i bægerglasset.

1. Stil bægerglasset med prøven på omrøreren
2. Kør holden ned eller op således at omrøreren starter
3. Sæt fuld drøn på omrøringen
4. Tryk på **Start**
5. Når titreringen er færdig printes resultatet automatisk

**I** Beregning af prøver i mg/kg

$$\text{mg/kg}(\text{Cl}) = \frac{\text{mL}(\text{AgNO}_3) \times \text{mol/L}(\text{AgNO}_3) \times 1000 \text{ mg/g} \times \text{g/mol}(\text{Cl}) \times \text{L}(\text{prøve}) \times 1000 \text{ g/kg}}{\text{mL}(\text{udtaget prøve}) \times \text{g}(\text{prøve})}$$

mL AgNO<sub>3</sub> = den mængde der er brugt til titreringen

mol/L (AgNO<sub>3</sub>) = den beregnet koncentration af AgNO<sub>3</sub>

g/mol Cl = 35,45



**J** Måling af syreoplukket prøver

Prøven syreoplukkes efter forskriften. Bægerglasset med de 150 mL prøve anvendes direkte.

1. Stil bægerglasset med prøven på omrøreren
2. Kør holden ned eller op således at omrøreren starter
3. Sæt fuld drøn på omrøringen
4. Tryk på **Start**
5. Når titreringen er færdig printes resultatet automatisk

**K** Beregning af prøver i %

$$\%Cl = \frac{mL(AgNO_3) \times mol/L(AgNO_3) \times g/mol(Cl) \times 100}{g(prøve) \times 1000 mL/L}$$

mL AgNO<sub>3</sub> = den mængde der er brugt til titreringen  
mol/L AgNO<sub>3</sub> = den beregnet koncentration af AgNO<sub>3</sub>  
g/mol Cl = 35,45  
g prøve (den afvejede mængde prøve til syreoplukning)

**L** Fit til at gøre det hurtigere

1 mL 0,1M NaCl = 1mL 0,1M AgNO<sub>3</sub> = 90-120 mV

**Mindre end 90mV**

Prøve mindre end 90 mV bør komme med et resultat inden 2 mL AgNO<sub>3</sub>. Ellers kan der trykkes på stop, da maskinen bliver med at tilsætte AgNO<sub>3</sub> indtil 5mL er brugt hvilket er spild af AgNO<sub>3</sub>.

Det anbefales at tilsætte 1,00mL 0,1N NaCl til prøven hvis mV er meget lav og trække værdien for AgNO<sub>3</sub> fra resultatet.

**Større end 120mV**

Hvis prøven viser over 120 mV kan det godt svare sig at bruge mindre mængde prøve.

**M Affaldshåndtering**

Sølvnitrat hældes i affaldsdunk mærket X 04.16 (sølvnitrat)

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

#### **A Princip**

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

#### **B Specielt apparatur**

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

#### **C Analysens udførelse**

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

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

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

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

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

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

Den vandmættede prøve vejes først under vand på en teknisk vægt med ophæng under. Vandet i karret skal have rumtemperatur. Vægten noteres som ( $m_{sv}$ ).

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

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

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

Rumtemp:	°C	Vandtemp:	°C	Vanddensitet $\rho_w$ =	kg/m <sup>3</sup>
Kontrollod:					
Før:	kg				
Efter:	kg				
Prøvelegeme nr:					
$m_{105}$	Kg				
$m_{ssd}$	Kg				
$m_{sw}$	Kg				
$V = (m_{ssd} - m_{sw}) / \rho_w$	m <sup>3</sup>				
$V_{p\grave{a}} = (m_{ssd} - m_{105}) / \rho_w$	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>				
$P_{\grave{a}} = V_{p\grave{a}} / V$	Kg/m <sup>3</sup>				
$\rho_d = m_{105} / V$	Kg/m <sup>3</sup>				
$\rho_f = m_{105} / (V - V_{p\grave{a}})$	Kg/m <sup>3</sup>				
$\rho_{ssd} = m_{ssd} / V$	Kg/m <sup>3</sup>				
$u_{ssd} = (m_{ssd} - m_{105}) / m_{105}$	Kg/kg				

#### Definitioner, begreber og symboler

- $m_{105}$  Masse af prøvelegemet efter tørring ved 105°C (kg)  
 $m_{ssd}$  Masse af prøvelegemet over vand efter vakuumvandmætning (kg)  
 $m_{sw}$  Masse af vakuumvandmættet prøvelegeme vejet i vand (kg)  
 $V$  Prøvelegemets volumen (m<sup>3</sup>)  
 $V_{p\grave{a}}$  Volumen af åbne porer (m<sup>3</sup>)  
 $\rho_f$  Faststoffdensitet (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_d$  Tørdensitet (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_{ssd}$  Densitet af prøvelegeme i vakuumvandmættet overfladetør tilstand (kg/m<sup>3</sup>)  
 $p_{\grave{a}}$  Prøvelegemets åbne porøsitet (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)  
 $u_{ssd}$  Vandtørstofforhold i vakuumvandmættet overfladetør tilstand (kg/kg)

# Nedknuste betonaggregater i ny beton

## Afgangsprojekt

Skrevet af:



Dani Fadi Hassan, s143892  
s143892@student.dtu.dk



Hussein Faissal Awad, s113967  
s113967@student.dtu.dk

## Introduktion

Der bliver i stigende grad større efterspørgsel af Byggematerialer. En masse beton bliver smidt ud, og dette påvirker miljøet. Genanvendelse af nedknust beton som aggragate i ny beton kan mindske behovet for bortskaffelse ved hjælp af lettere tilgængelighed til en aggregats kilde. Det der primært adskiller nedknust beton fra naturlige tilslagsmaterialer er, at det er sammensat af to forskellige materialer: naturligt aggregat og cementmørtel. En undersøgelse af styrkeklassen og hvilke parametre der spiller ind ved at erstatte naturlige aggregater med nedknuste betonaggregater, vil blive undersøgt i dette projekt. Projektet forløber fra d. 1. februar 2017 til d. 22. juni 2017.

## Eksperimentelt arbejde

I dette projekt laves 8 forskellige betonblandinger. Der laves 4 forskellige med  $v/c=0,5$  og 4 med  $v/c=0,6$ . En erstatning af tilslagsmaterialer af 4-8mm sten samt 8-16mm sten undersøges. Kun halvdelen af de 4-8mm sten erstattes i 4 blandinger, hvor tilsvarende gøres for sten med 8-16mm. Der bliver undersøgt for tørre og vandmættet sten.



Billed 1: Nedknust beton, som er tørret ved 50 grader i 4 dage.



Billed 2: Opvejet materialer som benyttes i betonblandingen.



Billed 3: Aflæsning af sættnål i våd blanding.

Efter blandingsprocessen er afsluttet foretages sættnål, hvorefter blandingen støbes, og luftindhold måles. Blandingerne med mættet sten er meget mere bearbejdelige end dem med de tørre sten. 4 cylinder støbes af hver blanding. Dimensionerne på cylinderne er 100x200mm. Efter 7 dages hærdning foretages en trykprøve, som viser hvor stærke prøverne er.

## Resultater

Efter trykprøvningen kan det ses at der kommer klare brud ved urenheder i betonen. Der er et hyppigt brud i mange af trykprøvningerne, hvor bruddet går skråt ned igennem cylinderen.

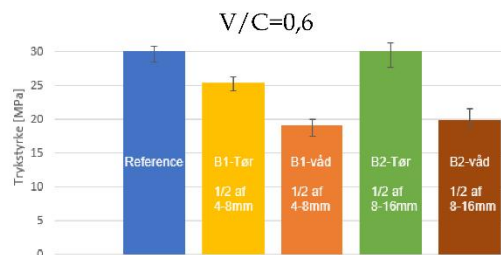


Billed 4: Brud skråt ned igennem, som forekommer hyppigst.



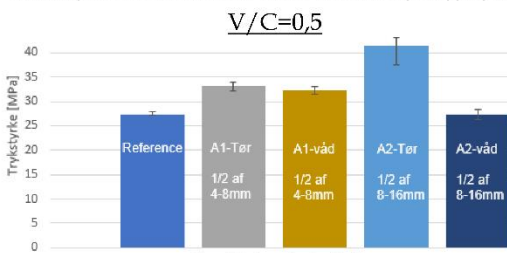
Billed 5: Brud gennem urenheder. I dette tilfælde en asfaltklump.

Den gennemsnitlige målte trykstyrke er omregnet fra  $KN/m^2$  til MPa, hvorefter disse er plottet i et diagram.



Figur 1: Trykprøvning for  $v/c=0,6$ .

Det ses at 1 af blandingerne har samme styrke som referenceblandingen, som dermed ville kunne erstatte noget aggregat.



Figur 2: Trykprøvning for  $v/c=0,5$ .

Det ses at mange af blandingerne har en væsentlig højere styrke end referenceprøven. A2-tør har en styrke på 42MPa.

## Konklusion

Det kan konkluderes at blandinger med et mættet vandindhold i sten har en lavere styrke end dem med tørre sten. Blandingerne med  $v/c=0,6$  har ikke den store styrke, hvorimod blandinger med  $v/c=0,5$  har en meget høj styrke. Nedknust betonaggregat kan give en højere styrke i beton end normale blandinger, og vild dermed være ideelt at bruge.

## 8.5 Bilag 5 Udregning for absorptionen

<b>Lufthavn</b>				
Prøvenummer	Glas vægt [g]	Våd vægt[g]	Tør vægt [g]	Vandabsorption [%]
1	67,75	101,15	89,26	13,32063634
2	63,17	108,23	96,7	11,92347466
3	61,29	107,87	94,89	13,67899673
<b>Gennemsnit</b>				12,97436925
<b>Asfalt</b>				
Prøvenummer	Glas vægt [g]	Våd vægt[g]	Tør vægt [g]	Vandabsorption [%]
1	64,24	105,53	98,99	6,606727952
2	61,3	92,7	86,84	6,748042377
3	83,7	98,38	91,77	7,202789583
<b>Gennemsnit</b>				6,852519971
<b>Jomfruelige aggregater</b>				
Prøvenummer	Glas vægt [g]	Våd vægt[g]	Tør vægt [g]	Vandabsorption [%]
1	67,24	96,46	95,99	0,489634337
2	71,3	80,1	76,84	4,242581989
3	85,7	91,2	89,77	1,592959786
<b>Gennemsnit</b>				2,108392037

## 8.6 Bilag 6 Syreoplukning beregninger

Syreroplukning						
Lufthavn	Betegnelse	Vægt (skål)	Vægt (tragt)	Vægt efter (skål)	Vægt før (masse)	Vægt efter (masse)
	Små pulver	71,86	1,91	77,59	20,88	15,28
	Store pulver	134,38	1,89	140,13	20,72	15,44
	Små sten	124,1	1,91	129,98	20,12	15,88
	Store sten	120,16	1,91	126,08	20,4	16,04

Betegnelse	Differense i %
Små pulver	26,82
store pulver	25,48
Små sten	21,07
Store sten	21,37



## 8.7 Bilag 7 Porøsitet og densitet beregninger

Lufthavn							
Del	Vægt	30 mm (små)	30 mm (stor)	60 mm (små)	60 mm (stor)	90 mm (små)	90 mm (stor)
Top	Før	251,74	246	259,75	261,75	250,62	257,66
	Efter	267,26	260,39	279,18	278,3	265,06	272,69
	Under vand	156,31	151,53	160,56	161,4	152,86	157,33
Midt	Før	243,8	263,13	260,47	238,01	248,07	261,5
	Efter	261,51	277,95	280,03	255,28	263,34	278,15
	Under vand	151,2	162,3	161,26	146,17	151,26	159,72

1000								
Del	Vanddensitet $\rho_w = 1000 \text{ Kg/m}^3$	30 mm (små)	30 mm (stor)	60 mm (små)	60 mm (stor)	90 mm (små)	90 mm (stor)	Enhed
Top	$V = (\text{Efter} - \text{Under vand}) / \rho_w$	0,11	0,11	0,12	0,12	0,11	0,12	m <sup>3</sup>
	$V_{p\ddot{a}} = (\text{Efter} - \text{Før}) / \rho_w$	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	m <sup>3</sup>
	$P_{\ddot{a}} = V_{p\ddot{a}} / V$	0,14	0,13	0,16	0,14	0,13	0,13	Kg/m <sup>3</sup>
	$\rho_d = \text{Før} / V$	2268,95	2259,78	2189,77	2239,09	2233,69	2233,53	Kg/m <sup>3</sup>
	$\rho_f = \text{Før} / (V - V_{p\ddot{a}})$	2637,95	2604,00	2618,71	2608,37	2563,63	2568,13	Kg/m <sup>3</sup>
	$\rho_{ssd} = \text{Efter} / V$	2408,83	2391,97	2353,57	2380,67	2362,39	2363,82	Kg/m <sup>3</sup>
	$U_{ssd} = (\text{Efter} - \text{Før}) / \text{Før}$	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	Kg/kg
Midt	$V = (\text{Efter} - \text{Under vand}) / \rho_w$	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	m <sup>3</sup>
	$V_{p\ddot{a}} = (\text{Efter} - \text{Før}) / \rho_w$	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	m <sup>3</sup>
	$P_{\ddot{a}} = V_{p\ddot{a}} / V$	0,16	0,13	0,16	0,16	0,14	0,14	Kg/m <sup>3</sup>
	$\rho_d = \text{Før} / V$	2210,14	2275,23	2193,06	2181,38	2213,33	2208,06	Kg/m <sup>3</sup>
	$\rho_f = \text{Før} / (V - V_{p\ddot{a}})$	2632,83	2609,64	2625,44	2591,57	2562,44	2569,27	Kg/m <sup>3</sup>
	$\rho_{ssd} = \text{Efter} / V$	2370,68	2403,37	2357,75	2339,66	2349,57	2348,64	Kg/m <sup>3</sup>
	$U_{ssd} = (\text{Efter} - \text{Før}) / \text{Før}$	0,07	0,06	0,08	0,07	0,06	0,06	Kg/kg

## 8.8 Bilag 8 Sigteanalyse beregninger

Sigtekurve lufthavn				
Sigte	Masse	Passeret masse		
mm	g	g	%	
31,5	65	9934	99,349935	
16	2278	7656	76,5676568	
8	2450	5206	52,0652065	
4	1558	3648	36,4836484	
2	912	2736	27,3627363	
1	451,44	2284,56	22,8478848	
0,5	848,7072	1435,853	14,359964	
0,25	787,4208	648,432	6,4849685	
0,125	383,04	265,392	2,65418542	
0,063	98,2224	167,1696	1,67186319	
Bund	167,1696	0	0	
I alt	9999			

## 8.9 Bilag 9 Laser diffraktion diagram



### Result: Sieve ASTM E11:61 Report

**Sample Name:**  
Iufthavn- Averaged Result

**Sample Source & type:**  
Paris

**Sample bulk lot ref:**  
123-ABC

**SOP Name:**  
Beton

**Measured by:**  
malm

**Result Source:**  
Averaged

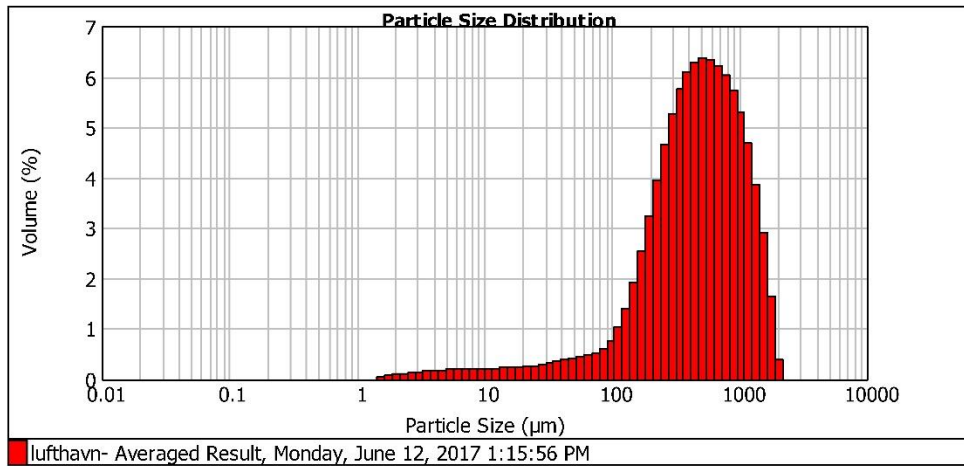
**Measured:**  
Monday, June 12, 2017 1:15:56 PM

**Analysed:**  
Monday, June 12, 2017 1:15:58 PM

<b>Particle Name:</b> Beton	<b>Accessory Name:</b> Scirocco 2000	<b>Analysis model:</b> General purpose	<b>Sensitivity:</b> Enhanced
<b>Particle Rf:</b> 1.500	<b>Absorption:</b> 0	<b>Size range:</b> 0.020 to 2000.000 um	<b>Obscuration:</b> 2.15 %
<b>Dispersant Name:</b>	<b>Dispersant Rf:</b> 1.000	<b>Weighted Residual:</b> 0.297 %	<b>Result Emulation:</b> Off
<b>Concentration:</b> 0.0070 %Vol	<b>Span :</b> 2.287	<b>Uniformity:</b> 0.695	<b>Result units:</b> Volume
<b>Specific Surface Area:</b> 0.0568 m <sup>2</sup> /g	<b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b> 105.681 um	<b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b> 580.976 um	<b>Density:</b> 1.000 g/cm <sup>3</sup>

**d(0.1): 128.913 um                      d(0.5): 473.746 um                      d(0.9): 1212.349 um**

Mesh No	Aperture µm	Volume In %	Vol Below %	Mesh No	Aperture µm	Volume In %	Vol Below %	Mesh No	Aperture µm	Volume In %	Vol Below %
10	2000	1.67	100.00	35	500	7.44	52.48	120	125	1.30	9.70
12	1700	4.08	98.33	40	425	7.94	45.04	140	106	0.91	8.40
14	1400	5.15	94.25	45	355	6.87	37.10	170	90	0.77	7.49
16	1180	6.05	89.10	50	300	6.53	30.23	200	75	0.61	6.72
18	1000	6.64	83.05	60	250	4.90	23.70	230	63	0.61	6.11
20	850	7.87	76.41	70	212	3.83	18.79	270	53	0.56	5.55
25	710	7.65	68.54	80	180	3.13	14.96	325	45	0.49	5.06
30	600	8.41	60.89	100	150	2.13	11.83	400	38	0.47	4.59
35	500		52.48	120	125		9.70				



**Operator notes:** Average of 3 measurements from 170612Hussein



# MASTERSIZER 2000

## Result Analysis Report

**Sample Name:**  
lufthavn- Averaged Result

**Sample Source & type:**  
Paris

**Sample bulk lot ref:**  
123-ABC

**SOP Name:**  
Beton

**Measured by:**  
malm

**Result Source:**  
Averaged

**Measured:**  
Monday, June 12, 2017 1:15:56 PM

**Analysed:**  
Monday, June 12, 2017 1:15:58 PM

**Particle Name:** Beton  
**Accessory Name:** Scirocco 2000  
**Analysis model:** General purpose  
**Sensitivity:** Enhanced

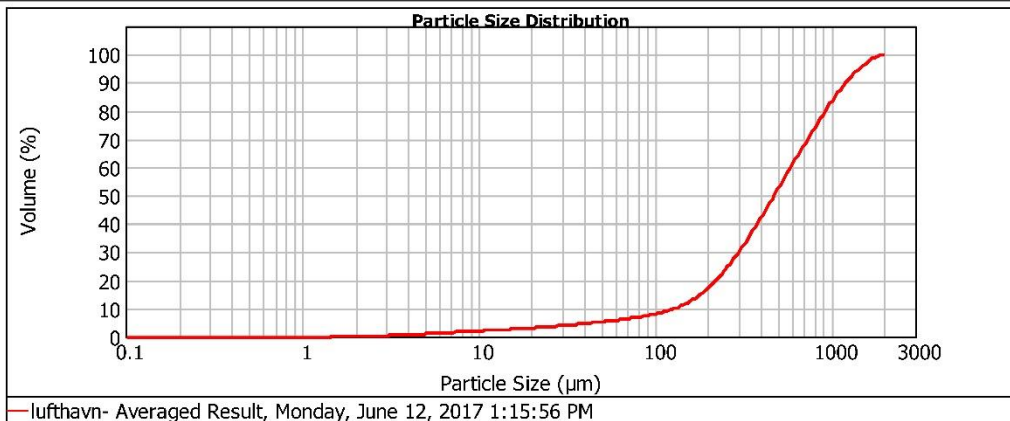
**Particle RI:** 1.500  
**Absorption:** 0  
**Size range:** 0.020 to 2000.000 um  
**Obscuration:** 2.15 %

**Dispersant Name:**  
**Dispersant RI:** 1.000  
**Weighted Residual:** 0.297 %  
**Result Emulation:** Off

**Concentration:** 0.0070 %Vol  
**Span :** 2.287  
**Uniformity:** 0.695  
**Result units:** Volume

**Specific Surface Area:** 0.0568 m<sup>2</sup>/g  
**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 105.681 um  
**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 580.976 um

**d(0.1):** 128.913 um      **d(0.5):** 473.746 um      **d(0.9):** 1212.349 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.21	120.226	1.40	1258.925	3.86
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	0.22	138.038	1.91	1445.440	2.89
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.00	15.136	0.22	158.489	2.52	1659.587	1.65
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.05	17.378	0.23	181.970	3.23	1905.461	0.39
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.10	19.953	0.25	208.930	3.96	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.11	22.909	0.27	239.883	4.68	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.11	26.303	0.27	275.423	5.27	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.13	30.200	0.30	316.228	5.76	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.14	34.674	0.33	363.078	6.10	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.16	39.811	0.36	416.869	6.30	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.17	45.709	0.39	478.630	6.37	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.18	52.481	0.42	549.541	6.35	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.19	60.256	0.44	630.957	6.24	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.19	69.183	0.47	724.436	6.05	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.20	79.433	0.52	831.764	5.74	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.20	91.201	0.61	954.993	5.30	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.21	104.713	0.77	1096.478	4.68		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.21	120.226	1.03	1258.925			

**Operator notes:** Average of 3 measurements from 170612Hussein

## 8.10 Bilag 10 Trykstyrke beregninger

Areal					Spredning		
7853,981634							
7 dage					Gennemsnit	Min	max
D.01-03-17	nr.	1	2	3	4		
Ref, 0,5^7	Vægt(kg):	3,75	3,74	3,74	3,74		
	Tryk (kN):	235	243	248	224		
	Mpa	29,92113	30,93972094	31,57634	28,52057	30,23943919	1,7188734 1,336902
D.01-03-17	nr.	1	2	3	4		
Ref, 0,6^7	Vægt(kg):	3,735	3,735	3,72	3,75		
	Tryk (kN):	198	200	205	207		
	Mpa	25,21014	25,46479089	26,10141	26,35606	25,78310078	0,3183099 0,572958
D.08-03-17	nr.	1	2	3	4		
A1, 50, tør^7	Vægt(kg):	3,7	3,71	3,7	3,69		
	Tryk (kN):	253	263	257	267		
	Mpa	32,21296	33,48620003	32,72226	33,9955	33,10422816	0,8912677 0,891268
B1, 50, tør^7	Vægt(kg):	3,69	3,675	3,675	3,685		
	Tryk (kN):	205	190	196	206		
	Mpa	26,10141	24,19155135	24,9555	26,22873	25,36929793	1,1777466 0,859437
D.14-03-17	nr.	1	2	3	4		
A2, 50, tør^7	Vægt(kg):	3,695	3,73	3,74	3,72		
	Tryk (kN):	294	336	333	338		
	Mpa	37,43324	42,7808487	42,39888	43,0355	41,41211619	3,9788736 1,62338
B2, 50, tør^7	Vægt(kg):	3,69	3,69	3,705	3,705		
	Tryk (kN):	246	218	239	242		
	Mpa	31,32169	27,75662208	30,43043	30,8124	30,08028424	2,3236622 1,241409
D.01-03-17	nr.	1	2	3	4		
A1, 50, våd^7	Vægt(kg):	3,67	3,69	3,69	3,68		
	Tryk (kN):	260	247	255	251		
	Mpa	33,10423	31,44901675	32,46761	31,95831	32,24479147	0,7957747 0,859437
B1, 50, våd^7	Vægt(kg):	3,66	3,66	3,65	3,64		
	Tryk (kN):	157	155	151	138		
	Mpa	19,98986	19,73521294	19,22592	17,57071	19,13042416	1,5597184 0,859437
D.15-03-17	nr.	1	2	3	4		
A2, 50, våd^7	Vægt(kg):	3,67	3,67	3,68	3,69		
	Tryk (kN):	213	217	222	207		
	Mpa	27,12	27,62929812	28,26592	26,35606	27,34281922	0,9867606 0,923099
B2, 50, våd^7	Vægt(kg):	3,65	3,65	3,66	3,64		
	Tryk (kN):	157	150	149	169		
	Mpa	19,98986	19,09859317	18,97127	21,51775	19,89436789	0,9230987 1,62338

D.16-05-17	nr.	1	2	3	4			
A1, 30, tør^7	Vægt(kg):	3,71	3,73	3,74	3,72			
	Tryk (kN):	228	212	220	222			
	Mpa	29,02986	26,99267835	28,01127	28,26592	28,07493196	1,0822536	0,95493
A2, 30, tør^7	Vægt(kg):	3,69	3,69	3,705	3,705			
	Tryk (kN):	246	218	239	242			
	Mpa	31,32169	27,75662208	30,43043	30,8124	30,08028424	2,3236622	1,241409
D.16-05-17	nr.	1	2	3	4			
A1, 60, tør^7	Vægt(kg):	3,695	3,73	3,74	3,72			
	Tryk (kN):	272	272	272	273			
	Mpa	34,63212	34,63211562	34,63212	34,75944	34,66394661	0,031831	0,095493
A2, 60, tør^7	Vægt(kg):	3,69	3,7	3,71	3,705			
	Tryk (kN):	291	288	289	292			
	Mpa	37,05127	36,66929889	36,79662	37,17859	36,9239468	0,2546479	0,127324
D.16-05-17	nr.	1	2	3	4			
A1, 90, tør^7	Vægt(kg):	3,64	3,66	3,63	3,67			
	Tryk (kN):	291	290	297	295			
	Mpa	37,05127	36,9239468	37,81521	37,56057	37,33774965	0,4138029	0,477465
A2, 90, tør^7	Vægt(kg):	3,63	3,63	3,63	3,62			
	Tryk (kN):	329	329	326	332			
	Mpa	41,88958	41,88958102	41,50761	42,27155	41,88958102	0,3819719	0

### 8.11 Bilag 11 Udregning for Bolomeys formel

Bolomeys formel					
v/c-forhold	K	alpha	hærdedøgn	Trykstyrke [MPa]	
0,5	26	0,6	7	36,4	
0,6	26	0,6	7	27,73	
					gennemsnit
D.01-03-17	nr.	1	2	3	4
Ref, 0,5^7	Vægt(kg):	3,75	3,74	3,74	3,74
	Tryk (kN):	235	220	214	219
	Mpa	27,6293	28,01126998	27,24732626	27,88395
					30,23
D.01-03-17	nr.	1	2	3	4
Ref, 0,6^7	Vægt(kg):	3,735	3,735	3,72	3,75
	Tryk (kN):	198	200	205	207
	Mpa	25,21014	25,46479089	26,10141067	26,35606
					25,78
Afvigelse					
v/c-forhold					
0,5	16,95054945				
0,6	7,03208853				