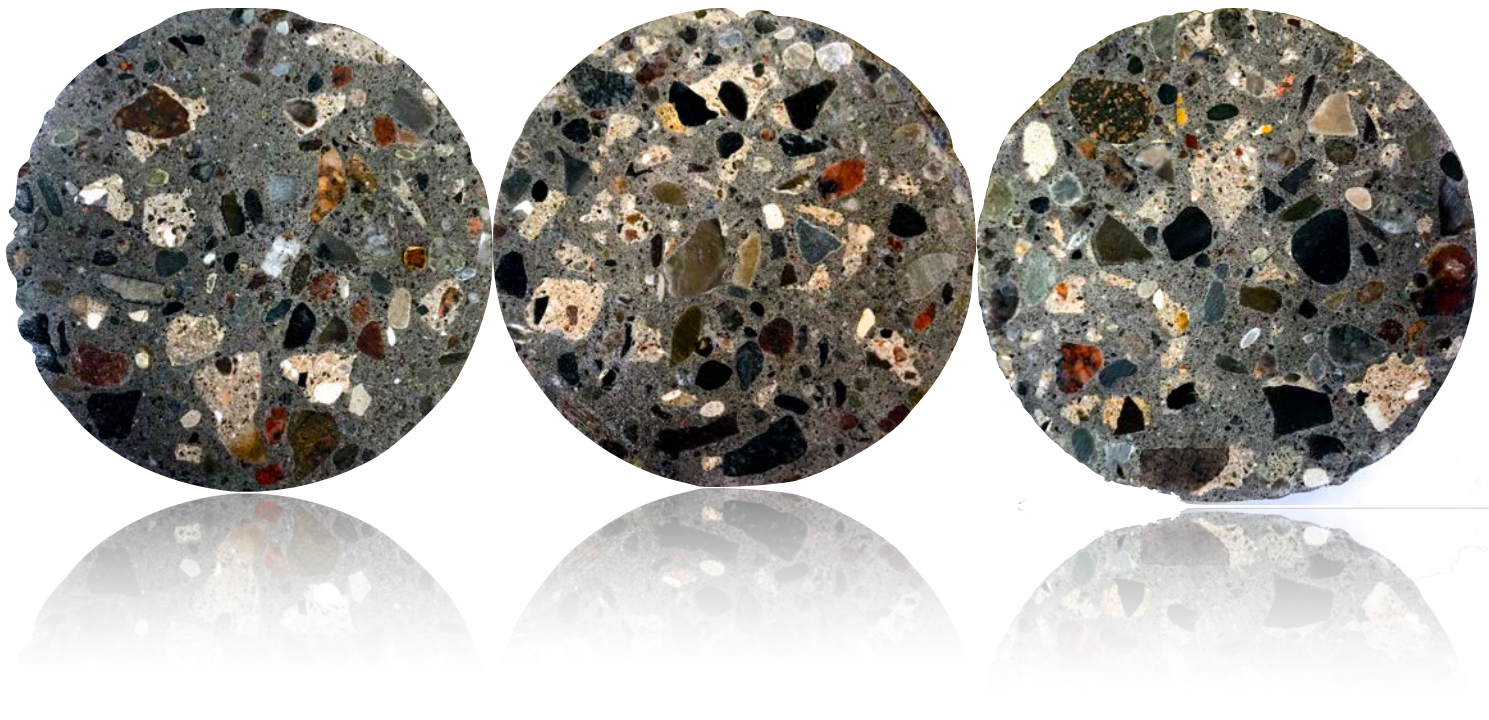


# Genanvendelse af knust beton i ny beton

*Department of Civil Engineering 2018*



Signe Harvig Bjerrum  
s141886

Bachelor Projekt  
Januar - 2018

## Forord

Denne rapport præsenterer bachelor projektet, som udgør den afsluttende opgave for min bacheloruddannelse, Bygningsdesign, ved Danmarks Tekniske Universitet. Projektet tæller 15 ECTS points og strækker sig over perioden fra 4. september 2017 til 5. januar 2018.

Det eksperimentelle arbejde er udført parallelt med Tanya Vargas, som har benyttet de samme genbrugsaggregater. De forsøg og undersøgelser som er udført i samarbejde med Tanya er angivet i opgaven. Alle forsøg er udført ved DTU Byg og projektet er udarbejdet under vejledning af Professor Lisbeth M. Ottosen og lektor Gunver M. Kirkelund.

Lyngby, 5. januar 2018



Signe Harvig Bjerrum, s141886

## Abstract

The demand for new natural resources in concrete production is increasing in the current time of expanding global urbanization. In order to prevent a situation where a shortage of natural resources for concrete will occur, good alternatives to new natural resources are important. Recycled concrete aggregates (RCA) from demolition waste is an alternative to new natural aggregates (NA) for concrete. Because RCA contains attached mortar, the properties of RCA in relation to new concrete is different from NA. It is hypothesized that RCA in the large fraction (8-16 mm) is better suited for concrete production because studies have indicated that this fraction contains less AM (attached mortar).

This project investigates the geometric and physical properties of RCA. This is done in order to optimize the mix design of the concrete containing RCA, so an acceptable workability can be guaranteed and the chance of a change in the water/cement-ratio is reduced.

Workability, compressive strength, density and porosity is measured for concrete containing RCA in the small fraction (4-8 mm), the large fraction (8-16 mm) and a mix of both in replacement ratios of 15 %, 30 % and 50%. This project emphasizes using RCA in the current state, and therefore use of admixtures or pre-soaking has been avoided.

RCA has higher water absorption and lower density than NA. The density of the concrete cured for 28 days however is not affected by the lower density of RCA with the replacement ratios used. There is a tendency that higher content of RCA results in a higher compressive strength. However, this increased strength is only apparent as it seems to be associated with a lower W/c ratio as indicated by the workability measurements. Making a simple correction for the w/c ratio based on workability, there is a reduction in strength of concrete with RCA relative to the reference with NA. For the number of samples analyzed here there is only a weak tendency that the strength of concrete with RCA in the in the 8-16 mm fraction is marginally stronger than concrete with RCA in the 4-8 mm fraction with a replacement ratio of 30 % RCA.

## Indholdsfortegnelse

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Forord .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>Abstract .....</b>                                      | <b>2</b>  |
| <b>1. Introduktion .....</b>                               | <b>5</b>  |
| <b>2. Teori .....</b>                                      | <b>7</b>  |
| <b>2.1 Beton .....</b>                                     | <b>7</b>  |
| 2.1.1 Trykstyrke og vand/cement forhold .....              | 7         |
| 2.1.2 Porøsitet og densitet .....                          | 8         |
| 2.1.3 Genbrugsbeton .....                                  | 10        |
| <b>2.2 Betontilslag .....</b>                              | <b>11</b> |
| <b>2.3 Betontilslag – geometriske karakteristika .....</b> | <b>11</b> |
| 2.3.1 Udseende og oprindelse .....                         | 11        |
| 2.3.2 Kornstørrelser og kornstørrelsesfordeling .....      | 12        |
| <b>2.4 Betontilslag – fysiske karakteristika .....</b>     | <b>13</b> |
| 2.4.1 Vandindhold og absorption .....                      | 13        |
| 2.4.2 Densitet .....                                       | 15        |
| 2.4.3 Cementindhold (AM) .....                             | 15        |
| 2.4.4 Los Angeles koefficienten .....                      | 16        |
| <b>2.4 Betonrecepten .....</b>                             | <b>16</b> |
| <b>3. Materialer .....</b>                                 | <b>18</b> |
| <b>3.1 Naturlige aggregater (NA) .....</b>                 | <b>18</b> |
| <b>3.2 Genbrugsaggregater (RCA) .....</b>                  | <b>18</b> |
| <b>3.3 Cement .....</b>                                    | <b>19</b> |
| <b>4. Metode .....</b>                                     | <b>20</b> |
| <b>4.1 Nedknusning og sortering af RCA .....</b>           | <b>22</b> |
| <b>4.2 Karakteristik af tilslag .....</b>                  | <b>23</b> |
| 4.2.1 Sigte analyse .....                                  | 23        |
| 4.2.2 Aktuelt vandindhold .....                            | 23        |
| 4.2.3 Densitet og absorption for RCA .....                 | 24        |
| 4.2.4 Absorption af sand .....                             | 24        |
| 4.2.5 Cementindhold (AM) i RCA .....                       | 25        |
| 4.2.6 Los Angeles test .....                               | 26        |
| <b>4.3 Betonrecepten .....</b>                             | <b>27</b> |
| <b>4.4 Støbning af prøvecylindre .....</b>                 | <b>28</b> |
| <b>4.5 Prøvning af hærdebeton .....</b>                    | <b>30</b> |
| 4.5.1 Trykprøvning af cylindre .....                       | 30        |
| 4.5.2 Densitet og porøsitet af den hærdebeton .....        | 30        |
| <b>5. Resultater og diskussion .....</b>                   | <b>32</b> |
| <b>5.1 Geometriske karakteristika ved RCA .....</b>        | <b>32</b> |
| 5.1.2 Udseende .....                                       | 32        |
| 5.1.3 Sigtekurve .....                                     | 33        |
| <b>5.2 Fysiske karakteristika ved RCA og NA .....</b>      | <b>35</b> |
| 5.2.1 Densitet af RCA .....                                | 35        |
| 5.2.2 Vandindhold i RCA og NA .....                        | 36        |
| 5.2.3 Absorptionsevnen .....                               | 37        |

|   |           |
|---|-----------|
| 5.2.4 Cementindhold for RCA .....   | 38        |
| 5.2.5 Los Angeles koefficient for RCA og NA .....   | 39        |
| <b>5.3 Betonrecepten.....</b>   | <b>40</b> |
| <b>5.4 Sætmål og luftindhold .....</b>  | <b>41</b> |
| <b>5.5 Målte trykstyrker.....</b>   | <b>43</b> |
| <b>5.6 Porøsitet og densitet af den hærdede beton.....</b>  | <b>46</b> |
| <b>5.7 Sammenfattende diskussion .....</b>  | <b>48</b> |
| <b>Konklusion .....</b>   | <b>52</b> |
| <b>Referencer .....</b>   | <b>53</b> |
| <b>Bilag 1 – Rådata.....</b>  | <b>55</b> |
| Sigtekurver.....  | 55        |
| Vandindhold .....   | 56        |
| Absorption .....  | 57        |
| Densitet af RCA .....   | 57        |
| Cementindhold (AM) i RCA.....   | 58        |
| LA-koefficienter.....   | 59        |
| Dimensioner og trykstyrker af prøvecylindre.....  | 59        |
| Porøsitet og densitet af hærdet beton.....  | 62        |
| <b>Bilag 2 – Tabeller benyttet i betonrecepten .....</b>  | <b>66</b> |
| Dimensionerende vandbehov.....  | 66        |
| Sandprocent.....  | 66        |
| <b>Bilag 3 – Varedeklarationer for NA .....</b>   | <b>67</b> |
| Søsand 0-4 mm.....  | 67        |
| Søsten 4-8 mm .....   | 68        |
| Søsten 8-16 mm .....  | 69        |
| <b>Bilag 4 – Øvelsesvejledning til bestemmelse af cementindhold (AM) i RCA.....</b>               | <b>70</b> |
| <b>Bilag 5 – Øvelsesvejledning til Los Angeles test.....</b>                                      | <b>72</b> |
| <b>Bilag 6 – Øvelsesvejledning til bestemmelse af densitet og porøsitet af hærdet beton .....</b> | <b>74</b> |
| <b>Bilag 7 – Tekniske tegninger for DTU tunnel .....</b>  | <b>76</b> |

## 1. Introduktion

Beton er et af verdens mest benyttede byggematerialer. Det er et stærkt, alsidigt materiale bestående af cement, sand og sten. De to mest omtalte miljøbelastninger ved beton er CO<sub>2</sub> udledningen i forbindelse med cementproduktionen og de store mængde sand og sten (råstoffer), som benyttes. Som med alle andre råstoffer i verden, er der ikke uendelige mængder til rådighed. Der er derfor behov for at genanvende de ressourcer, som tages i brug, bedst muligt. Et vigtigt led i en bæredygtig tankegang er derfor at bruge de affaldsprodukter, vi mennesker skaber, på en måde, hvor affald ikke længere ses som affald men i stedet en ressource, der skal udnyttes.

Studier har undersøgt brugbarheden af betonaffald, som nedknuste genbrugsaggregater (RCA, recycled concrete aggregates) i ny beton, med det mål at reducere brugen af naturlige råstoffer uden at øge cementmængden i betonen. Omkring 60-75% af betonens volumen består af sand og sten. I Danmark blev der i løbet af 2016 indvundet ikke mindre end 33.935 mio. m<sup>3</sup> sand og sten, hvoraf den næststørste anvendelseskategori af disse råstoffer er betontilslag (www.dst.dk, 2016). På nuværende tidspunkt er sand og sten til byggeri ikke en mangelfuld ressource i Danmark. Anderledes ser det ud i lande, som Holland og flere mellemøstlige og asiatiske lande, der ikke har den ønskede kvalitet af råstoffer til rådighed i undergrunden. Mangel på ressourcer fører til konflikter og ulovlig indvinding, som udgør en trussel for miljøet. Sandindvinding langs flodbrinker og kystlinjer resulterer i oversvømmelser og vandhuller med stillestående vand bidrager til udbredelsen af sygdomme. Manglen på kvalitetsråstoffer medfører stigende priser, og det er derfor ved at blive en attraktiv forretning for kriminelle miljøer at indvinde råstofferne ulovligt (Torres et al., 2017).

Det er ikke nyt at eksperimentere med betonaffald som aggregater i ny beton. I 1990'erne opsummerede Hansen (1992) den daværende viden om brugen af RCA. Brugen af RCA i ny beton er dog ikke særlig udbredt, da der stadig mangler basal viden om de mekaniske egenskaber af beton støbt med RCA og sammenhængen mellem kvaliteten af RCA og den støbte beton. I studier med brug af RCA nævnes ofte en reduceret bearbejdelighed af betonen på grund af genbrugsaggregaternes høje porøsitet. Den høje porøsitet giver en højere vandabsorptionsevne end de naturlige aggregater (NA, natural aggregates). Det kan derfor være vanskeligt at styre den frie vandmængde i betonblandingen, og derved kan styrken af betonen være svær at forudsige (Montero and Laserna, 2017). Studier viser, at den høje porøsitet for RCA, sammenlignet med naturlige tilslag bl.a. skyldes cementrester (AM) fra den originale beton. I den vedhæftede cement opstår der under nedknusningsprocessen

mikrorevner, som bidrager til højere porøsitet og optræder som et svagt led når RCA indgår i ny beton (Pepe et al., 2016, Pepe et al., 2014). Studier af Hansen (1992) viser at andelen af AM er størst for 4-8 mm fraktionen af RCA sammenlignet med 8-16 mm fraktionen.

Fokus i denne rapport ligger i at undersøge de geometriske og fysiske egenskaber ved RCA i fraktionerne 4-8 mm og 8-16 mm i forhold til betonstøbning. Disse egenskaber er undersøgt for at kunne optimere betonrecepten i forhold til den frie vandmængde og sikre bearbejdigheden af betonen uden at benytte plastificerende midler. Der er i denne rapport lagt vægt på at benytte genbrugsaggregaterne i deres aktuelle tilstand. De er derfor hverken vandmættede eller vaskede og tørrede inden støbning.

Baseret på resultater fra ovennævnte studier er hypotesen derfor, at det vil være bedre at benytte RCA i 8-16 mm fraktionen frem for 4-8 mm fraktionen. For at vurdere om der er forskel på at benytte de to fraktioner, sammenlignes trykstyrker, porøsitet og bearbejdighed af beton støbt med RCA i hhv. 4-8 mm fraktionen, 8-16 mm fraktionen samt en blanding af begge.

## 2. Teori

### 2.1 Beton

Den friske beton består som sagt af tre elementer: Cement, vand og tilslag. De mest almindelige tilslag er sand og sten. Når cementen hydratiserer i reaktion med vand dannes en hård masse, som binder sand og sten sammen. Afhængigt af betonens ønskede egenskaber kan en del af tilslagsvolumen erstattes af andre tilslagsmaterialer såsom letklinker, fibre eller forskellige typer af genbrugsaggregater (Munch-Petersen, 2013a). Den hærdede betons egenskaber afhænger af de anvendte materialer og den valgte sammensætning, samt af støbe- og hærdeforhold (Cement og Beton, 2012). Det er almindelig kendt, at beton har en høj trykstyrke, men en lav trækstyrke. Kombinerer man beton med armeringsjern af stål får man et materiale, som også kan optage trækkræfter. Trykstyrken er altså den primære fordel ved beton som byggemateriale (Jensen, 2012).

#### 2.1.1 Trykstyrke og vand/cement forhold

Betons trykstyrke  $f_c$  [MPa] er defineret som:

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

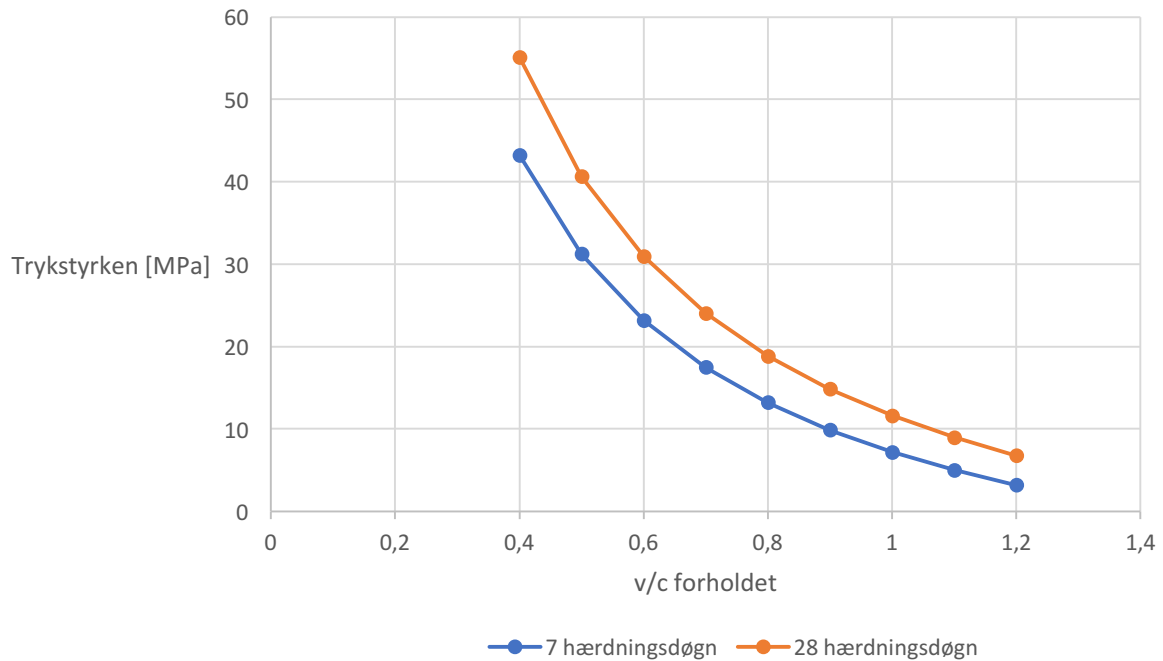
Hvor  $P$  [N] er brudlasten og  $A$  [m<sup>2</sup>] er prøveemnets tværsnitsareal målt vinkelret på belastningsretningen (Hansen, 2017).

Styrken af den støbte beton, afhænger af det svageste led, som enten er cementpastaen eller tilslagsmaterialet. Hvis der anvendes tilslagsmaterialer af god kvalitet, vil disse normalt have en højere styrke end cementpastaen. Styrken er derfor ofte bestemt af cementpastaens styrke, som afhænger af forholdet mellem vand og cement (v/c forholdet), samt hærdningsgraden (Cement og Beton, 2012). Den teoretiske styrke for betonen kan findes ved Bolomeys formel, som beskriver sammenhængen mellem v/c forholdet og trykstyrken:

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



Hvor  $K$  [-] og  $\alpha$  [-] er konstanter der afhænger af cementtypen og hærdningsgraden. Bolomeys formel (2) forudsætter 1% luftindhold i betonen. Hvis der måles et højere luftindhold i betonen medfører dette en reduktion i styrken på grund af højere porøsitet (Cement og Beton, 2012).

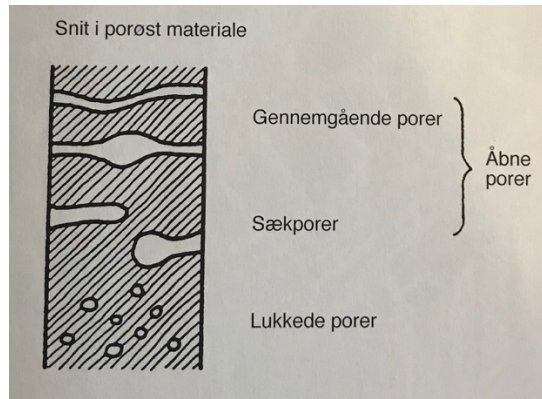


Figur 1 – Sammenhængen mellem den teoretiske styrke (2) og v/c forholdet plottet for hhv. 7 og 28 dage for BASIS AALBORG CEMENT.

Bolomeys formel (2) viser at forholdet mellem vand og cement en vigtig faktor, når betonsammensætningen skal designes (figur 1). Et lavt v/c forhold giver en høj styrke, mens et højere v/c forhold giver en lavere styrke

### 2.1.2 Porøsitet og densitet

For at kunne bestemme rumfanget af den beton man blander, er det nødvendigt at kende densiteten af de forskellige materialer.



Figur 2 - Illustration af poretyper i porøst materiale (Gottfredsen and Nielsen, 2006).

Porøsiteten af et materiale fortæller hvor stor en del af materialet, der består af luft. Luften i materialet kan enten være i lukkede eller åbne porer (figur 2). Et materiales åbne porøsitet  $p_a$  [-] er defineret som:

$$p_a = \frac{V_a}{V} \quad (4)$$

Hvor  $V_a$  er volumen af åbne pore [ $m^3$ ] og  $V$  er den totale volumen [ $m^3$ ] af materialet. Materialer med en høj porøsitet har en lav densitet (Gottfredsen and Nielsen, 2006). Åbne porer kan optage vand, og massen af det porøse materiale kan således være tørmassen, eller massen hvor vand i de åbne pore er inkluderet. Det samme gør sig gældende for volumenet af materialet. Den tilsyneladende tørdensitet  $\rho_d$  [ $kg/m^3$ ] er således defineret som massen af det tørre materiale inklusiv eventuelle lukkede og åbne porer delt med den totale volumen:

$$\rho_d = \frac{m_0}{V} \quad (5)$$

Hvor  $m_0$  er massen af tørt materiale [ $kg$ ] og  $V$  er den totale volumen af det tørre materiale [ $m^3$ ]. Materialets tilsyneladende faststoffdensitet  $\rho_f$  er densiteten [ $kg/m^3$ ] af det tørre materiale inklusiv lukkede porer men uden de åbne:

$$\rho_f = \frac{m_0}{V - V_a} \quad (6)$$

Ved metoden som er beskrevet i afsnit 4.5.2 kan densiteten og porøsiteten af den hærdede beton findes. Metoden bygger på Archimedes lov, som siger at et legeme ved nedsænkning i væske taber

lige så meget i vægt som den fortrængte væskemængde vejer. Prøvens totale volumen  $V$  [ $m^3$ ] kan således findes ved:

$$V = \frac{m_{vot} - m_{sw}}{\rho_w} \quad (7)$$

Hvor  $m_{vot}$  er massen af prøven i vandmættet overfladetør tilstand over vand [kg],  $m_{sw}$  er massen af prøven vejlet under vand [kg], og  $\rho_w$  er densiteten af vand (20 °C). Volumen af de åbne porer [ $m^3$ ] kan beregnes som:

$$V_a = \frac{m_{vot} - m_0}{\rho_w} \quad (8)$$

Den støbte betons densitet og porøsitet afhænger af de benyttede tilslagsmaterialer og cementpastaen. Hvis betonen har en høj porøsitet består en del af volumen af luft frem for tilslag og cement, og det vil påvirke styrken (Gottfredsen and Nielsen, 2006). Benytter man tilslagsmaterialer med høj porøsitet vil betonen tilsvarende også have en høj porøsitet (Omary et al., 2016).

### 2.1.3 Genbrugsbeton

Genbrugsbeton er betegnelsen for beton støbt med genbrugsaggregater eller en blanding af genbrugsaggregater og naturlige aggregater. Genbrugsaggregater er betegnelsen for aggregater, som er fremkommet ved at nedknuse tidligere støbt beton og har i det følgende forkortelsen RCA (recycled concrete aggregates). RCA kan inden nedknusning have tjent som bygninger eller beton, som er fejlstøbninger i forbindelse med fremstillingen for eksempel hos betonproducenter. Brugen af genbrugsbeton, er endnu ikke særlig udbredt i Danmark, men andre lande som Holland og Japan er langt i forhold til at genanvende deres betonaffald i ny beton (Miljøstyrelsen, 2015).

Kvaliteten af genbrugsbetonen afhænger af flere parametre. Flere nævner at bearbejdigheden af den friske beton nedsættes når NA erstattes af RCA udtrykt ved lave sætmål (Pepe et al., 2016, Pedersen, 2017). Pepe et al. (2016) peger på, at dette skyldes en højere porøsitet på grund af AM, som medfører øget vandabsorptionen for RCA. Nedknusningsprocessen af genbrugsaggregaterne medfører også, at der opstår mikrorevner i aggregaterne, som bidrager til øget porøsitet og optræder som et svagt led i genbrugsbetonen. Mikrorevner og AM har således indflydelse på den såkaldte Los Angeles koefficient, som igen har indflydelse på trykstyrken for betonen med RCA (Omary et al., 2016).

I standarder er anført regler for beton og de anvendte tilslagsmaterialer. I det følgende er der taget udgangspunkt i DS/EN206-DK-NA (2017), som er den standard, der i 2018 vil erstatte DS/EN 206-1. I DS/EN206-DK-NA (2017) er det angivet, at beton støbt med RCA kun må anvendes i eksponeringsklasse X0 og XC1 svarende til passiv miljøklasse. DS/EN206-DK-NA (2017) angiver ligeledes grænseværdier for den maksimale mængde af genbrugsaggregater, som må anvendes. Maksimalt 10 % af mængden af det fine tilslag må være RCA og 20% for det grove tilslag. Kan elasticitetsmodul, krybning og udtørringssvind dokumenteres, må RCA erstatte op til 30% af det grove tilslag. I byggeri må man kun benytte beton med genbrugstilslag op til styrkeklasse C30/37.

I det følgende vil egenskaberne ved genbrugsbeton undersøges for betonblandinger hvor hhv. 15 %, 30 % og 50% af den grove fraktion af stentilslaget er erstattet med RCA. Der er valgt disse erstatningsprocenter da 15% RCA erstatning holder sig inde for de angivne mængder i DS/EN206-DK-NA (2017), mens at 30 % ligger lige på grænsen af det tilladte og 50 % ligger over det tilladte.

## 2.2 Betontilslag

Som beskrevet i det følgende vil betonens egenskaber i høj grad afhænge af tilslaget. Tilslaget kan være af varierende kvalitet alt efter udvindingsmetode, oprindelsessted og kornform. Når kvaliteten af tilslaget skal vurderes, undersøges både geometriske –og fysiske egenskaber af tilslaget og disse informationer benyttes når betonrecepten skal sammensættes (Herholdt et al., 1985).

## 2.3 Betontilslag – geometriske karakteristika

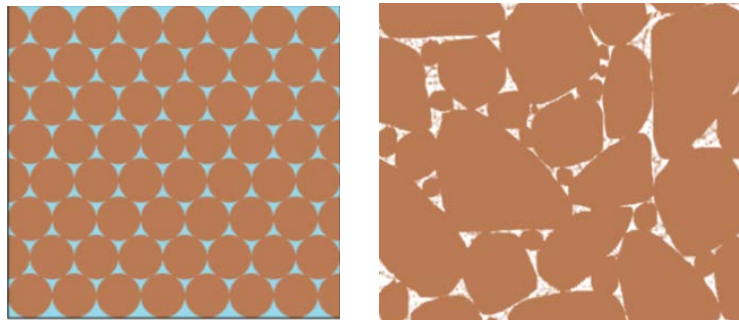
### 2.3.1 Udseende og oprindelse

Udvindingsmetoden og oprindelsesstedet er ofte bestemmende for udseendet af de enkelte korn i tilslaget. For de naturlige tilslagsmaterialer skelnes generelt mellem bakkematerialer, sømaterialer og skærver. Bakkematerialerne er udvundet fra grusgrave, sømaterialerne stammer fra havet og skærverne er nedknust klippe. Mange års slid af bølger og strøm har afrundet sømaterialerne og naturligt fjernet svage korn (Munch-Petersen, 2013a). Bakkematerialer og skærver er ofte mere kantede. Kantede korn kan, hvis de har skarpe kanter, gribe fat i hinanden og nedsætte betones bearbejdelighed. Den bedste bearbejdelighed fås ved at benytte korn med lige stor længde, bredde og højde. Lange og flade korn kan give problemer under støbningen, da vandet i betonblandingen under

komprimeringen søger mod overfladen og kan blive fanget under vandret liggende flade korn. Dette resulterer i en mere inhomogen beton (Herholdt et al., 1985).

### 2.3.2 Kornstørrelser og kornstørrelsesfordeling

Ved betonstøbning er man ofte interesseret i at benytte så lidt cement som muligt, da dette bl.a. nedsætter prisen på betonen. For at kunne reducere mængden af cement, er det vigtigt at tilslaget kan pakkes tæt. I figur 3 er forskellen på pakning af partikler af samme størrelse til venstre og pakning af partikler i forskellige størrelse til højre vist.



Figur 3 - Pakning af partikler. Venstre: Partikler med samme størrelse. Højre: Partikler af forskellige størrelser (Munch-Petersen, 2013b).

Betontilslag består ofte af en blanding af flere kornstørrelser for at opnå den bedste pakning, hvor hulrummene mellem de større sten kan udfyldes med mindre sten i stedet for cement (figur 3 til højre).

Normalt inddeles stentilslaget til betonstøbning i 3 forskellige fraktioner. Inddelingen foregår ved en sigteanalyse (afsnit 4.2.1). Betegnelsen sand bruges om partikler, der passerer en sigte med maskevidde på 4 mm. Sand er således fraktionen 0-4 mm. Partikler som tilbageholdes af en sådan sigte betegnes sten eller groft tilslag. Stenene inddeles yderligere i 3 fraktioner: Perlesten (4-8 mm), ærtsten (8-16 mm) og nøddesten (16-32 mm). På grund af bearbejdigheden af betonen bruger man sjældent sten større end 16-32 fraktionen (Cement og Beton, 2012).

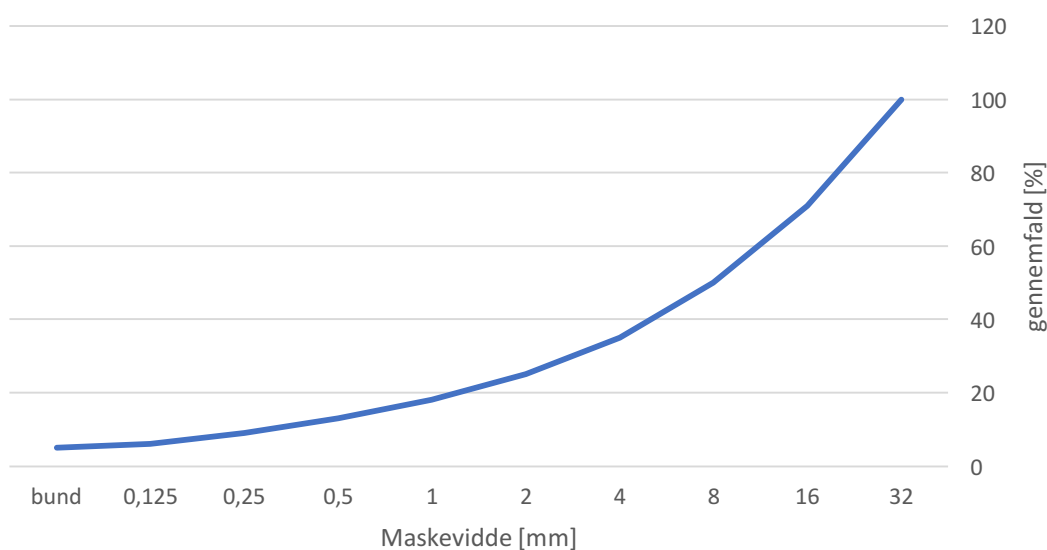
Tilslagets kornstørrelsesfordeling kan optegnes i en sigtekurve på baggrund af sigteanalysen, ved gennemfaldsprocenten som funktion af sigtestørrelsen. For at få den mest optimale beton kan man bestemme blandingsforholdet mellem de forskellige fraktioner af tilslag ud fra den sammensatte sigtekurve og Fullerkurven. Fullerkurven er en idealkurve som er udarbejdet af Fuller i 1907.

Fullerkurven beskriver den ideelle sammensætning af kornstørrelser i tilslaget (figur 4).

Fullerkurven er defineret ved udtrykket:

$$p = 100 \cdot \sqrt{\frac{d}{d_{max}}} \quad (9)$$

Hvor  $d$  er maskevidden og  $d_{max}$  er den maksimale maskevidde. Ved brug af standardmaskevidderne fra DS/EN933-1 (2007) fås kurven i figur 4.



Figur 4 - Fullerkurve optegnet ved brug af standardmaskevidder (DS/EN933-1, 2007).

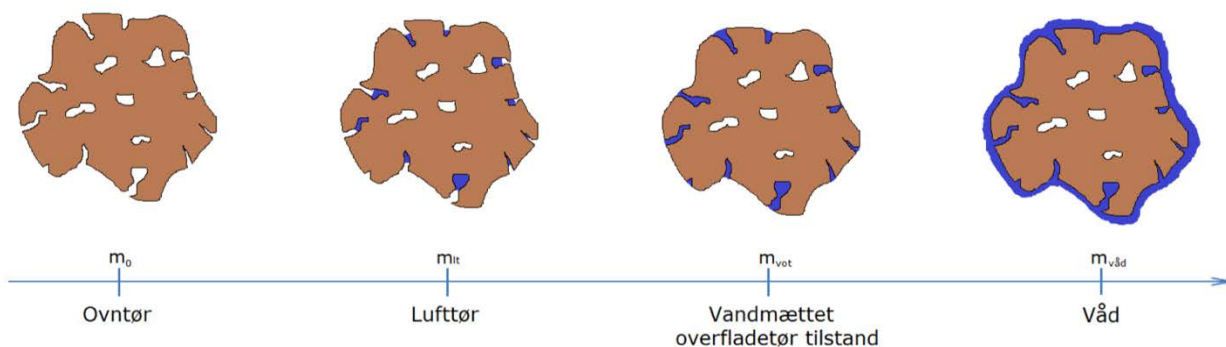
Det primære formål med den sammensatte sigtekurve er at sikre bearbejdigheden af betonen, samt optimal pakning (Munch-Petersen, 2013b).

## 2.4 Betontilslag – fysiske karakteristika

### 2.4.1 Vandindhold og absorption

Tilslagsmaterialernes porøsitet har stor betydning for deres absorptionsevne og vandindhold. En høj porøsitet betyder en høj absorptionsvne. Det er derfor vigtigt at kende absorptionsevnen af de anvendte materialer og det aktuelle vandindhold, når man skal støbe beton, da dette er afgørende for konsistensen, bearbejdigheden og v/c forholdet (Montero and Laserna, 2017). Tørre

tilslagsmaterialer med høj porøsitet vil absorbere en del af det tilsatte blandevand og omvendt vil meget fugtige materialer tilføre vand til blandingen.



Figur 5 - Tilslagets 4 forskellige tilstande: Ovntør, lufttør, vandmættet overfladetør tilstand og våd (Munch-Petersen, 2013b).

Den ideelle tilstand for tilslagene til betonstøbning vil være den vandmættede overfladetør tilstand (vot-tilstand, figur 5). I denne tilstand er porerne fyldt op med vand, så kornene ikke kan absorbere vand fra betonblandingen, men samtidig er kornene overfladetørre, så de ikke afgiver vand til betonblandingen. Det er dog vanskeligt at have tilslagsmaterialerne i denne tilstand altid. Man kan derfor forsøge at korrigere for tilslagernes aktuelle vandindhold og absorptionsevne når man laver sin blanderecept. Ofte vil tilslagene have en tilstand der minder om den lufttørre tilstand (figur 5).

Absorptionsevnen  $w_a$  [%] fortæller, hvor meget vand de enkelte korn er i stand til at optage, og findes ved:

$$w_a = \frac{m_{vot} - m_0}{m_0} \cdot 100\% \quad (10)$$

Hvor  $m_{vot}$  er massen af prøven i vot-tilstand [g] og  $m_0$  er massen af prøven i ovntør tilstand [g] (Hansen, 2017). Metoden til bestemmelse af absorptionsevne er beskrevet i afsnit 4.2.3 og 4.2.4

Tilslagets aktuelle vandindhold  $u$  [%] angiver hvor meget vand der rent faktisk er i porerne og bestemmes ved:

$$u = \frac{m_{akt} - m_0}{m_0} \cdot 100\% \quad (11)$$

Hvor  $m_{akt}$  er massen af prøven i den aktuelle opbevaringstilstand [g] og  $m_0$  er massen af prøven i ovntør tilstand [g] (Hansen, 2017). Metoden til at bestemme det aktuelle vandindhold er beskrevet i afsnit 4.2.2 efter DS/EN1097-5 (2008).

#### 2.4.2 Densitet

Densiteten af tilslagsmaterialerne oplyses normalt af producenten, men for alternative tilslagsmaterialer som fx RCA kan det være nødvendigt at bestemme den selv. Ud fra pyknometeret (afsnit 4.2.3) kan den tilsyneladende faststofdensitet [ $\text{kg/m}^3$ ] af genbrugsaggregaterne findes ved:

$$\rho_f = \frac{m_0}{(V - V_a)} = \frac{m_0}{(m_1 - m_4) - (m_3 - m_2)} \cdot \rho_w \quad (12)$$

Hvor  $m_0$  er massen af den ovntørre prøve [kg],  $\rho_w$  er vandets densitet [ $\text{kg/m}^3$ ] ved den pågældende temperatur (antages 20 °C),  $m_1$  er massen af pyknometer+prop+vand [kg],  $m_2$  er massen af pyknometer+prop+prøve [kg],  $m_3$  er vægten af pyknometer+prop+vand+prøve [kg],  $m_4$  er vægten af pyknometer+prop [kg] (Gottfredsen and Nielsen, 2006).

#### 2.4.3 Cementindhold (AM)

RCA indeholder, på grund af deres fortid, som støbt beton, cementrester på de naturlige stenpartikler. Hansen (1992) finder et cementindhold på omkring 60 % for 4-8 mm fraktionen, mens det er omkring 40 % for 8-16 mm fraktionen. Cementindholdet ses at have betydning for absorptionsevnen. Hansen (1992) beskriver, at den højeste absorptionsevne findes for RCA i 4-8 mm fraktionen. For 4-8 mm fraktionen ses en absorptionsevne på omkring 8 %, hvor absorptionsevnen er omkring 3-4 % for 8-16 mm fraktionen. Til sammenligning finder han en absorptionsevne på 0,8 % for de naturlige aggregater. Lignende resultater præsenteres i Pepe et al. (2016).

Indholdet af cement kan findes eksperimentelt ved syreoplukning af RCA idet koncentreret salpetersyre reagerer med calciumhydroxid i cementen og derved opløser den (afsnit 4.2.5).

Cementindholdet [%] kan udregnes som:

$$AM = \frac{m_{\text{før}} - m_{\text{efter}}}{m_{\text{efter}}} \cdot 100\% \quad (13)$$



Hvor  $m_{\text{før}}$  er massen af prøven før syreoplukning [g] og  $m_{\text{efter}}$  er massen efter syreoplukning [g].

#### 2.4.4 Los Angeles koefficienten

Los Angeles koefficienten, siger noget om aggregaternes modstandsevne mod knusning. Los Angeles koefficienten er den procentdel af prøven som passerer en sigte med en maskevidde på 1,7 mm efter at prøven rulles med stålkugler (afsnit 4.2.6). Los Angeles koefficienten [%] udregnes ved:

$$LA = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100\% \quad (14)$$

Hvor  $m_0$  er massen af prøven før LA-test og  $m_1$  er massen tilbageholdt af en sigte med maskevidde 1,7 mm. En høj LA-koefficient er således et resultat af meget knust materiale, og derved ikke så modstandsdygtigt et materiale. Tidligere forsøg med LA-test af genbrugsaggregater giver en LA-værdi mellem 30-41 % for 4-8 fraktionen mens den er 26-37 % for 8-16 fraktionen. De højeste værdier for LA-koefficienten findes for genbrugsaggregater fra original lavstyrkebeton (Hansen, 1992).

#### 2.4 Betonrecepten

Alt efter hvad betonen skal bruges til og hvilken miljøklasse betonen skal kunne udsættes for, kan man sammensætte beton på mange måder. Typiske krav til betonen vil være:

- Styrke
- Holdbarhed
- Konsistens
- Maksimal stenstørrelse
- Pris

Cementen, er den dyreste og mest CO<sub>2</sub> forurenende komponent og ved betonproportionering går man ofte efter at anvende så lidt cement som muligt. I det følgende er teorien bag sammensætningen af en recept til en klassisk sætmålsbeton beskrevet, med udgangspunkt i betonhåndbogens kapitel 6 (Munch-Petersen, 2013b). Her bestemmes vandmængden ud fra sætmål, tilslagstype og

sammensætning samt maksimal stenstørrelse. Styrkekrav og krav til v/c forhold er bestemmende for cementmængden.

Sammensætningen af tilslaget, kan findes ud fra sammensatte sigtekurver, men det er også muligt at bestemme mængden af sand i tilslaget ud fra sandprocenten, som afhænger af cementindholdet og den maksimale stenstørrelse (tabel 11 bilag 2). Ønsket sætmål, største stenstørrelse, samt tilslagstype er bestemmende for vandbehovet. Som udgangspunkt for at bestemme vandbehovet kan man benytte tabel 10 i bilag 2. Der bør altid vælges den størst mulige stenstørrelse, da det giver det mindste overfladeareal af tilslaget og dermed mindre vandbehov. Derudover har den ønskede styrke også indflydelse på vandbehovet (jf. afsnit 2.1.1).

Ofte startes med at lave en teoretisk sammensætning af 1 m<sup>3</sup> beton, hvor tilslaget antages at være i vot-tilstand. Herefter korrigeres for tilslagets aktuelle vandindhold og absorptionsevne (afsnit 2.4.1). Korrektionen foregår ved at udregne følgende for de forskellige fraktioner af tilslag som benyttes (udregningerne kan med fordel opstilles i et regneark):

Først findes mængden af frit vand  $u_f$  i den enkelte tilslagsfraktion [%]:

$$u_f = (w_a - u) \quad (15)$$

Hvor  $w_a$  er absorptionsevnen af tilslaget [%] og  $u$  er det aktuelle vandindhold i tilslaget [%].

Hvis  $u_f$  er positiv absorberer tilslaget fugt fra betonblandingen, og hvis  $u_f$  er negativ afgives vand til betonen.

Betonens indhold af tilslag [kg] justeret for fugt bliver nu:

$$m_{v\ddot{a}d} = \left( \frac{100 + u}{100 + w_a} \right) \cdot m_{vot} \quad (16)$$

Hvor  $m_{vot}$  er massen af tilslag i vot-tilstand [kg].

Nu kan blandevandet [kg] til betonen justeres ud fra indholdet af fugt i tilslaget, hvis det antages at densiteten af vand er 1000 kg/m<sup>3</sup>:

$$m_w = \left( \frac{u_f}{100 + w_a} \right) \cdot m_{vot} \quad (17)$$

Samlet justering af blandevand er summen af  $m_w$  [kg] for de forskellige tilslagsfraktionerne:

$$\sum m_w \quad (18)$$

Hvis summen er positiv skal der tilføjes ekstra støbevand, og hvis summen er negativ skal mængden af blandevand reduceres.

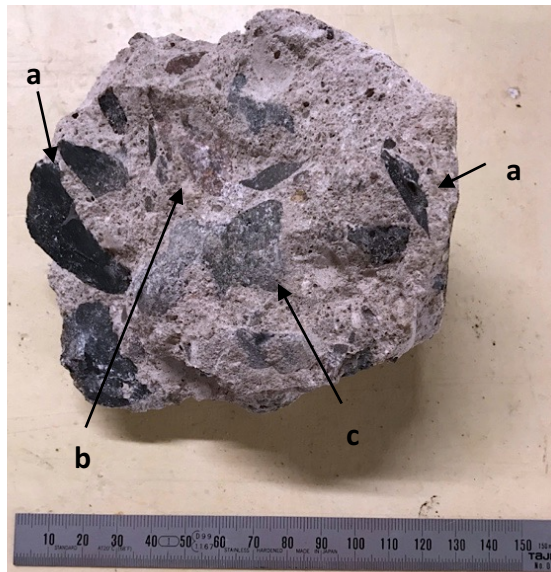
### 3. Materialer

#### 3.1 Naturlige aggregater (NA)

De naturlige aggregater som benyttes er sømaterialer i fraktionerne 0-4 mm, 4-8 mm og 8-16 mm. I bilag 3 findes varedeklARATIONER for de 3 fraktioner. Sandet er klasse E, mens stenene i 4-8 mm og 8-16 mm er klasse M. Ifølge DS/EN12390 (2013) skal diameteren af prøvecylindrene være mindst 3,5 gange større end største stenstørrelse. Det giver med en cylinderdiameter på 100 mm en maksimal stenstørrelse på 16 mm.

#### 3.2 Genbrugsaggregater (RCA)

Det betonaffald som benyttes stammer fra indersiden af den nu nedrevne tunnel mellem bygning 118 og 119 i første kvadrant på DTU. Ifølge tekniske tegninger er byggeriet af tunnelen igangsat i 1970 (bilag 7). Betonaffaldet var meget rent, da det blev modtaget og indeholdt ikke fremmedlegemer såsom glas eller asfalt. Af de tekniske tegninger fremgår det, at den benyttede grovbeton er i forholdet 1:5:8 hvilket vil sige 1 del cement, 5 dele sand og 8 dele sten. De hyppigt forekommende stentyper er flint (markerte med a), rød granit (markeret med b) og grøn granit (markeret med c) (figur 6). Den største stenstørrelse der er benyttet er at 16-32 mm (figur 6).



Figur 6 – RCA Betonblok inden knusning hvor de hyppigst forekommende stentyper er vist. Flint er markeret med a, rød granit b og grøn granit c.

Der ses også eksempler på muslingskaller i betonblokkene inden knusning (figur 7). Det tyder på, at noget af betones tilslag kunne stamme fra enten strand eller hav. Betonaffaldet var i blokke af omkring 1-1,5 kg da det blev modtaget i spændelågsfæde. Efter nedknusningsprocessen, som er beskrevet i afsnit 4.1, blev aggregaterne opbevaret i plastikspande med tætsluttende låg.



Figur 7 – RCA Betonblok inden knusning indeholdende muslingskal.

### 3.3 Cement

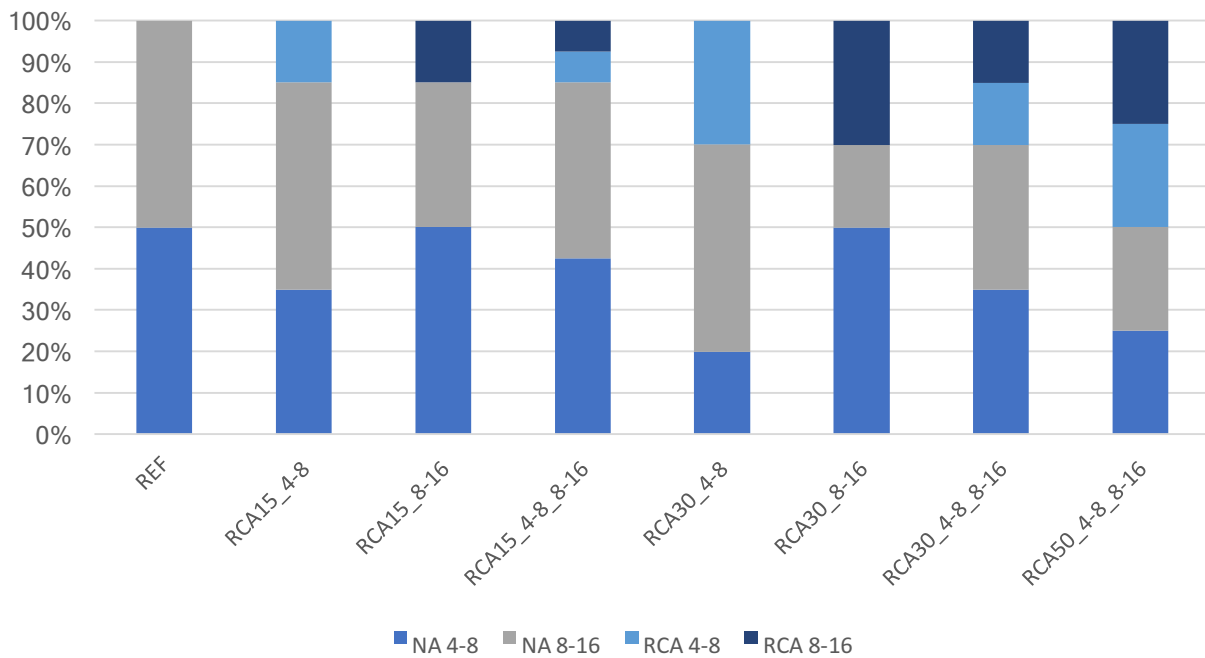
Den cement som benyttes til det eksperimentelle arbejde er BASIS AALBORG CEMENT med følgende mærkning: CEM II/A-LL 52,5 N (IS/AL/≤2). BASIS AALBORG CEMENT er en Portland kalkstenscement med en styrkeklasse 52,5 N. Den absolutte densitet for denne type cement er 3100 kg/m<sup>3</sup>. Ifølge producenten må BASIS AALBORG CEMENT anvendes til alle formål og

miljøklasser, dog ikke marine konstruktioner og særligt kemisk aggressive miljøer svarende til eksponeringsklasse XA3 (Cement og Beton, 2012).

## 4. Metode

Til at besvare hypotesen var første trin at nedknuse betonblokkene til aggregater, som kunne bruges til betonstøbning. Herefter blev aggregaterne sorteret, og kornstørrelsesfordelingen blev bestemt. De geometriske og fysiske egenskaber ved RCA blev undersøgt. Særligt det aktuelle vandindhold og absorptionsevnen for RCA og NA var vigtig at kende i forhold til betonreceptens udarbejdelse. Betonrecepten er udarbejdet ud fra et ønske om at sammensætte en beton med v/c forhold på 0,6 samt et sætmål på 100-150 mm. Dette er valgt ud fra tidligere studier med RCA udført ved DTU, som viser at betonen nemt bliver meget tør, når der benyttes RCA som tilslag (Pedersen, 2017). Det var målet at kunne sammensætte og støbe beton med genbrugsaggregaterne, som de er efter knusning, uden at skulle forbehandle i form af vaskning og tørring eller ved vandmætning. Betonrecepten er i første omgang udarbejdet som en teoretisk sammensætning af 1 m<sup>3</sup> beton, hvor det antages at alle tilslag er i vot-tilstand. Herefter er opskriften korrigeret for de forskellige tilslags aktuelle vandindhold og absorptionsevne. Vandindholdet i sandet har varieret meget gennem hele projektperioden, og der er derfor målt vandindhold i sandet inden støbningerne er foretaget.

Der er i alt blandet 7 forskellige betoner med RCA og en referenceblanding (REF) med 100 % NA, hvor 50 % af stenstilslaget består af 4-8 fraktionen og 50 % består af 8-16 mm fraktionen (figur 8).



Figur 8 - Sammensætningen af groft tilslag for de 8 forskellige betonblandinger

For at kunne sammenligne de to fraktioner af RCA, er der støbt 3 betoner hvor 15 % af stentilslagsvolumen er erstattet med RCA (figur 8). Den ene indeholder kun RCA i 4-8 mm fraktionen (RCA15\_4-8), den anden indeholder kun 8-16 mm fraktionen (RCA15\_8-16) og den tredje indeholder 7,5 % af hver fraktion (RCA15\_4-8\_8-16). Det samme gælder for prøverne støbt med 30 % RCA. Derudover er der også støbt en enkelt prøve med 50 % RCA, hvor stentilslagsvolumen er erstattet af 25 % RCA af hver fraktion.

Til hver støbning er der blandet 25 l beton, som bruges til at støbe 8 cylindre med en diameter på 100 mm og en højde på 200 mm. Den resterende beton benyttes til luftindholdsmåling. Der støbes 8 cylindre da 4 af dem skal hærde i 7 dage og 4 af dem i 28 dage. De støbte cylindre afformes efter 1 døgn og vandlagres i vandbad i hhv. 7 og 28 dage.

Efter 7 hæringsdøgn trykprøves 4 af cylindrene fra den pågældende blanding og efter 28 dage trykprøves yderligere 3 cylindre. Den sidste cylinder skæres op i 10 mm tykke skraver efter 28 hæringsdøgn og disse lægges til tørre i varmeskab ved 50 °C i 2 uger (til konstant masse er opnået), hvorefter porøsiteten af betonen findes. De detaljerede metodebeskrivelser findes i de kommende afsnit.

#### 4.1 Nedknusning og sortering af RCA

En nedknusningsproces, var nødvendig før genbrugsaggregaterne kunne benyttes til støbning. Før knusning var aggregaterne af varierende størrelse de fleste omkring 120 mm i diameter. Første step, var derfor en neddelingsproces, hvor aggregaterne deles ned til en mindre størrelse (max 60 mm i diameter) for at de kunne knuses yderligere med en kæbeknuser. Neddelingsprocessen blev udført med en speciallavet skruetvinge, med trekantede kæber, hvorved betonstykkerne ”klippes” over i mindre stykker (figur 9 venstre).



Figur 9 - Venstre: Speciallavet skruetvinge. Midten: Kæbeknuseren. Højre: Manuel sigtesøjle til sortering

Herefter blev de mindre stykker knust i kæbeknuseren (figur 9 midten) på den største indstilling 5, som gav en største stenstørrelse på 32 mm. Det skal her siges at kæbeknuseren giver en største stenstørrelse på 32 mm, men det meste ligger i mindre fraktioner.

Efter første knusning blev genbrugsbetonen sorteret i fraktionerne: 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm og 16-32 mm ved hjælp af fire sigter (4 mm, 8 mm, 16 mm og 32 mm). Sigterne blev placeret over en stor hvid plastikspand i en sigtesøjle (figur 9 højre). Den knuste beton blev nu sigtet lidt af gangen, ved at placere spanden med sigtesøjlen på et vibrationsbord, som vibrerede med omkring 45 Hz, samtidig med at søjlen også blev rystet manuelt. Fraktionerne 0-4, 4-8 mm og 8-16 mm blev gemt hver for sig i spande mens fraktionen 16-32 mm blev knust igen i kæbeknuseren på indstilling 3,5 som gav en største stenstørrelse på 16 mm. Det knuste materiale fra anden knusning blev igen sorteret gennem sigtesøjlen som beskrevet ovenfor.

*(Knusning og sortering af aggregaterne er udført i samarbejde med Tanya Vargas)*



## 4.2 Karakteristik af tilslag

### 4.2.1 Sigte analyse

Sigteanalyse efter DS/EN933-1 (2007) er foretaget for de usorterede genbrugsaggregater, som fremkommer efter første knusning med kæbeknuseren som beskrevet i afsnit 4.1. Ifølge DS/EN933-1 (2007) afhænger prøvestørrelsen af største stenstørrelse. For de usorterede genbrugsaggregater giver det en prøvestørrelse på minimum 10 kg. De udtagende prøver tørres ved  $110 \pm 5$  °C til konstant masse. Tilslaget er ikke vasket, da rapportens formål er, at bestemme RCA's egnethed til betonstøbning med så lidt forbehandling som muligt. Der benyttes et standard sigtesæt efter DS/EN933-1 (2007) med følgende maskevidder: 0 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 32 mm og 63 mm. Sigternes vægt noteres.

Der afvejes en prøve af det tørrede materiale på ca. 10 kg og det hældes i sigtesøjlen lidt ad gangen for at undgå overfyldning af sigterne. Søjlen rystes mekanisk i ca. 2 min hvorefter sigterne med tilbageholdt masse vejes og vægten noteres. Dette gentages indtil hele prøven har været igennem søjlen.

*(Sigteanalysen er udført sammen Tanya Vargas)*

### 4.2.2 Aktuelt vandindhold

Til bestemmelse af vandindhold i tilslag (både NA og RCA) tages udgangspunkt i DS/EN1097-5 (2008). Foliebakker vejes og vægten noteres og derefter udtages 3 prøver af 200 g for hvert tilslag, som placeres i foliebakker. Prøverne spredes ud i bakkerne og sættes i varmeskab ved  $110 \pm 5$  °C til massen er konstant. Når masseændringen er mindre end 0,1 % noteres slutvægten af prøven og vandindholdet i prøven findes (afsnit 2.4.1). I DS/EN1097-5 (2008) er det angivet, at prøvestørrelsen bestemmes ud fra formlen:

$$M_1 = 0,2 \cdot D \quad (19)$$

Hvor D er den største stenstørrelse. Dette har dog været lidt problematisk, da der for de største tilslag (D=16) skulle benyttes en prøvestørrelse på  $M_1=3200$  g. Det er derfor valgt at benytte 200 g uanset D, da der haves en begrænset mængde genbrugsaggregater at støbe med og der støbes med ubehandlede tilslag. De ovntørre sten kan derfor ikke bruges til støbning efterfølgende.

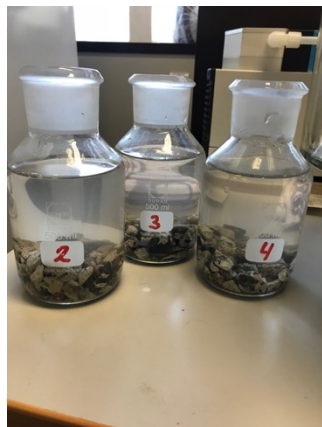
*(Måling af vandindhold er delvist udført sammen med Tanya Vargas)*



#### 4.2.3 Densitet og absorption for RCA

Densiteten og absorptionen for RCA måles ved pyknometer test på baggrund af Gottfredsen and Nielsen (2006). Der udføres test for 4-8 fraktionen af RCA og en for 8-16 fraktionen. Da der kun er 3 pyknometre til rådighed udføres de to test over to forskellige dage. Som forberedelse tørres lidt mere end 500 g, af den fraktion der ønskes testet, i varmeskab ved  $110 \pm 5$  °C til konstant masse er opnået. Den tørrede prøve deles nu op i 3 prøver af 150 g, som kommes i hver deres pyknometer af 500 ml (figur 10). Pyknometrene fyldes med destilleret vand, proppen sættes i og vægten noteres. Pyknometrene holdes i vaccum i en eksikator i 24 timer uden låg (figur 11). Efter 24 timer overfyldes pyknometrene med destilleret vand uden luft og vejes igen. Densiteten af prøverne kan nu findes ud fra teorien beskrevet i afsnit 2.4.2.

For at finde absorptionsevnen tages aggregaterne ud af pyknometrene og tørres på overfladen for at opnå vot-tilstanden. Når vot-tilstanden er opnået vejes aggregaterne og absorptionsevnen findes (afsnit 2.4.1).



Figur 11 - Pyknometre med prøver



Figur 10 - Eksikator hvori pyknometrene uden låg placeres

*(Måling af densitet og absorption er udført sammen med Tanya Vargas)*

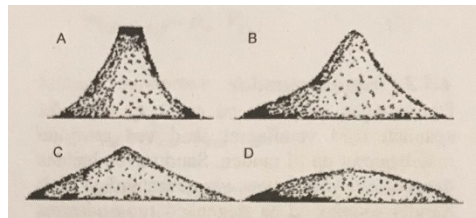
#### 4.2.4 Absorption af sand

Metoden fra Hansen (2017) benyttes til at fastlægge sandets absorptionsevne. En prøve på ca. 1 kg sand udtages og vandmættes. Det vandmættede sand overføres til en stegepande hvor det, under konstant omrøring, udtørres ved svag varme. Tørringen afbrydes, inden det tidspunkt hvor sandkornene ikke klæber sammen længere. Sandet afkøles under omrøring i en bakke, og fyldes løst i kegleformen, toppen stryges langs overkanten og der stemples nu let 25 gange (figur 12).

Kegleformen løftes forsigtigt af. Hvis sandet falder sammen og danner tilstand C (figur 13) er sandets vot-tilstand opnået. Hvis sandkeglen ikke falder sammen som A eller B (figur 13), er der stadig overfladevand tilbage og udtørringen på panden genoptages, hvorefter fyldningen af kegleformen gentages.



Figur 12 - Sandkegleform (Cylinder udført som kegle indvendigt)



Figur 13 - Sandkegle i fire forskellige tilstande, hvor (A) er meget fugtig sand, (B) er fugtig sand, (C) er sand i vot-tilstanden og (D) er tørt sand (Hansen, 2017)

Når sandets vot-tilstand er opnået, opdeles sandet i 3 prøver af 200 g i hver sin foliebakke. Prøverne udtørres i varmeskab ved  $110 \pm 5$  °C til en konstant masse er opnået og absorptionsevnen kan findes (afsnit 2.4.1).

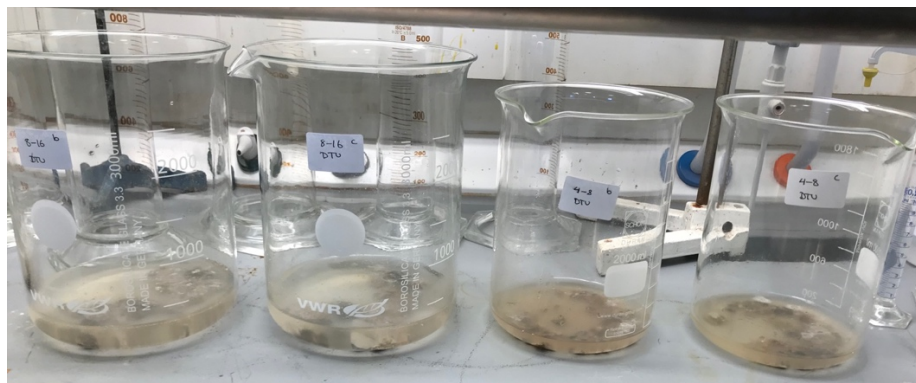
(Udført i samarbejde med Tanya Vargas)

#### 4.2.5 Cementindhold (AM) i RCA

Til at bestemme hvor stor en procentdel af RCA der består af cementrester fra den originale beton tages udgangspunkt i vejledningen i bilag 4. Vejledningen er udarbejdet mht. at bestemme chloridindholdet i en knust betonprøve, og der er derfor lavet en del ændringer. Princippet bag forsøget, er at bruge syre til at fjerne den cement som sidder på aggregaterne.

Der udtages 3 prøver af 20 g for 4-8 fraktionen og 3 prøver af 50 g for 8-16 fraktionen. Prøverne tørres i varmeskab ved  $110 \pm 5$  °C til konstant masse. Prøverne placeres nu i stinkskab i hver deres bægerglas af 2000 mL, for at undgå, at syren bruser over kanten. 1 L destilleret vand koges og blandes med 1 L destilleret koldt vand. Vandet skal nu køle til det er ca. 50 °C. 250 mL af det ca. 50 °C varme

vand hældes i hver af bæreglassene med 8-16 fraktionen og der tilsættes 50 mL konc.  $\text{HNO}_3$  (1 % salpetersyre). Der hældes 100 mL ca. 50 °C varmt vand i hver af glassene med 4-8 fraktionen og der tilsættes 20 mL konc.  $\text{HNO}_3$ . Stenene skal være dækkede (figur 14).



Figur 14 - RCA prøver overhældt med  $\text{HNO}_3$  og vand

Der haves således et liquid/solid forhold på 1 for syren og 5 for vand. Når det stopper med at bruse tilsættes yderligere 5 mL  $\text{HNO}_3$  til hvert glas med 4-8 fraktionen og 10 mL til hvert glas med 8-16 fraktionen. Dette gentages til det stopper med at bruse, når der tilsættes mere syre. Når det stopper med at bruse, hældes prøverne over i hver deres tragt med filtrerpapir til afdrypning, hvor vægten af det tørre filtrerpapir er noteret. Når prøverne er dryppet af placeres de i petriskåle, og sættes i varmeskab ved  $110 \pm 5$  °C til konstant masse er opnået. Den tabe masse, som kan findes efter konstant masse er opnået i varmeskab, er således cementindholdet af prøven og kan udregnes som beskrevet i afsnit 2.4.3.

*(Udført sammen med Tanya Vargas)*

#### 4.2.6 Los Angeles test

Udførelsen af Los Angeles test på aggregaterne tager udgangspunkt i vejledningen udarbejdet af Center for Arktisk teknologi (bilag 5).

Der er udført LA test på genbrugsaggregaterne i fraktionen 4-8 mm og 8-16 og tilsvarende for de naturlige aggregater. To prøver af 1500 g udtages for hver af de pågældende tilslag. Prøverne tørres i varmeskab ved  $110 \pm 5$  °C til en konstant masse er opnået. Da tilslagene allerede er sorteret i fraktionerne 4-8 mm og 8-16 mm bruges tabellen i vejledningen i bilag 5 til direkte at bestemme antallet af stålklugler. Der benyttes 8 klugler til at teste 4-8 fraktionerne og 12 klugler til at teste 8-16

fraktionen. 8-16 mm fraktionen ligger mellem 11 og 12 kugler, så her er valgt 12 for at være sikker på, ikke at undervurderer LA-koefficienten.

Den enkelte prøve påfyldes nu Los Angeles maskinen, og maskinen kører nu en test på 500 omdrejninger, med en hastighed på 30 rpm. Herefter sigtes prøven igennem en sigte med en maskevidde på 1,4 mm. Ifølge DS/EN1097-2 (2010) skulle der være brugt en sigte med maskevidde på 1,7, men denne var ikke tilgængelig ved DTU byg.

*(Udført i samarbejde med Tanya Vargas)*

### 4.3 Betonrecepten

Første trin er at lave en teoretisk sammensætning for 1 m<sup>3</sup> beton, hvor det antages, at alle tilslag er i vot-tilstand. I det følgende tages udgangspunkt i kravet om et v/c forhold på 0,6. Vandmængden bestemmes nu ud fra største stenstørrelse og ønsket sætmål i tabel 10 i bilag 2. Der er i denne opgave dimensioneret efter et sætmål på 100-150 mm. De naturlige sten som benyttes er søsten med en største stenstørrelse på 16 mm og det dimensionerende vandbehov bliver nu 183 l. Når det dimensionerende vandbehov er fundet, kan cementmængden findes ud fra v/c forholdet.

$$0,6 = \frac{v}{c} \tag{20}$$

Cementmængden findes til 305 kg cement og en samlet volumen for cementpastaen + luft udregnes. Det antages at der er 1% naturlig luft i betonen, som ikke kan vibreres. På baggrund af volumen af cementpastaen + luft, kan volumen af tilslaget findes. Ud fra tabel 11 i bilag 2 findes sandprocenten ud fra mængden af cement. Sandprocenten er den del af tilslagsvolumen som skal bestå af sand. Ud fra tabel 11 i bilag 2 fås en sandprocent på 47 %. Det betyder at de tilbageværende 53 % af tilslagsvolumen skal bestå af sten i fraktionen 4-8 mm og 8-16 mm. I denne opgave er det valgt at dele stenvolumen lige mellem 4-8 mm fraktionen og 8-16 mm fraktionen for bedre at kunne sammenligne de to fraktioner når der støbes med RCA.

Andet trin er nu at omregnes til det antal liter man ønsker at blande ud fra densiteten af materialerne. De benyttede densiteter er i det følgende data for NA som findes i bilag 3 og for RCA er det de eksperimentelt fundne densiteter præsenteret i afsnit 5.2.1. Som beskrevet i afsnit 2.4 bygger metoden til sammensætningen af recepten på at tilslagene er i vot-tilstand, og derfor skal de benyttede

densiteter for tilslagene også være densiteten i vot-tilstand ( $\rho_{\text{vot}}$ ). I betonrecepten præsenteret i afsnit 5.3 er det dog den tilsyneladende faststofdensitet ( $\rho_f$ ), der er benyttet. Da denne fejl først blev opdaget efter de første støbninger, er det besluttet at benytte den tilsyneladende faststofdensitet for RCA fremadrettet for at resultaterne forsat er sammenlignelige.

Tredje trin består nu i at korrigerer for tilslagernes absorptionsevne og aktuelle vandindhold som bekrævet i afsnit 4.3. De benyttede værdier for det aktuelle vandindhold er målt eksperimentelt og kan findes i afsnit 5.2.2. Værdierne for absorptionsevnen for sand, samt RCA kan findes i afsnit 5.2.3 og absorptionsevnen for NA kan findes i bilag 3, hvor det er den kritiske absorption der er benyttet. Igen var det først efter de første støbninger det blev opdaget, at det var den maksimale absorption fra bilag 3 som nok skulle have været benyttet. For fortsat at kunne sammenligne resultaterne, er det den kritiske absorption for NA der er benyttet gennem hele projektet.

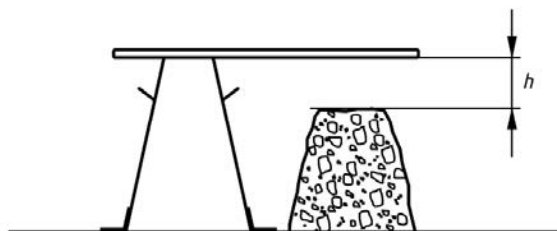
*(Udgangspunktet for betonrecepten er lavet med Tanya Vargas)*

#### 4.4 Støbning af prøvecylindre

Til projektet blandes 8 forskellige betoner af 25 l, 7 med RCA som tilslag i forskellige mængder og en referenceblanding med NA uden RCA. I afsnit 5.3 ses de forskellige recepter for blandingerne. Metoden hvorpå de forskellige blandingerne støbes er den samme.

De korrekte mængder af cement, vand og tilslag afvejes under udsug. Herefter hældes de tørre materialer i blandemaskinen og blandemaskinen køres i 2 minutter med låg. Efter 2 minutters tørblanding tilsættes vandet og maskinen kører i 5 minutter med låg.

Konsistensen af betonen vurderes nu ud fra sætmålsprøvning i henhold til DS/EN12350-2 (2012). Sætmålskeglen fastspændes til bordet og fyldes op af 3 omgange. Først fyldes keglen 1/3 op og stemples 25 gange. Herefter fyldes keglen yderligere 1/3 op og der stemples igen 25 gange uden at komme ned i det første lag. Den sidste 1/3 af keglen fyldes, der må gerne være top på, og der stemples igen 25 gange uden at ramme ned i laget under. Hvis stampningen medfører at betonen synker sammen efterfyldes keglen og det overskydende stryges af toppen i en savende bevægelse. Keglen spændes op og løftes af i et lodret træk. Sætmålet måles nu som højden mellem kanten af sætmålskeglen og betonen og noteres (figur 15).



Figur 15 – Princip for måling af sætmål for den friske beton (DS/EN12350-2, 2012)

Der støbes 8 cylindre med dimensionerne  $d=100$  mm og  $h=2*d$  mm for hver 25 l i henhold til DS/EN12390-2 (2002). Formene fyldes 1/3 op og vibreres ved ca. 50 Hz på vibrationsbord, til der ikke længere ses store bobler. Dette gentages yderligere 2 gange til formene er fyldte. Formene må gerne overfyldes en smule. Låget påføres nu ved at køre i zigzag bevægelser hen over kanten af cylinderen for at fjerne overskydende beton og så en helt jævn overflade opnås. Låget fastspændes med en skruetvinge.



Figur 16 - Apparat til måling af luftindhold i den friske beton

Når cylindrene er støbt bruges det overskydende beton til at måle luftindholdet ved brug af et luftmåleapparat (figur 16). Beton flydes i luftmåleapparatets spand af 3 omgange under vibration ved ca. 50 Hz på vibrationsbordet. Kanten af spanden tørres og låget sættes på. Måleuret nulstilles og vand fyldes på af den ene ventil til der kommer vand ud af den anden og begge ventiler lukkes. Luftindholdet kan nu måles og noteres.

De støbte cylindre lægges til hældning i ca. 1 døgn under plastik for at undgå fordampning. Efter ca. 1 døgn afformes de og cylindrene mærkes. Cylindrene vandlagres nu i hhv. 7 og 28 dage ved 20 °C i vandbad som anvist i DS/EN12390-2 (2002).

(REF og betonen indeholdende 15 % RCA er støbt i samarbejde med Tanya Vargas)

## 4.5 Prøvning af hærdet beton

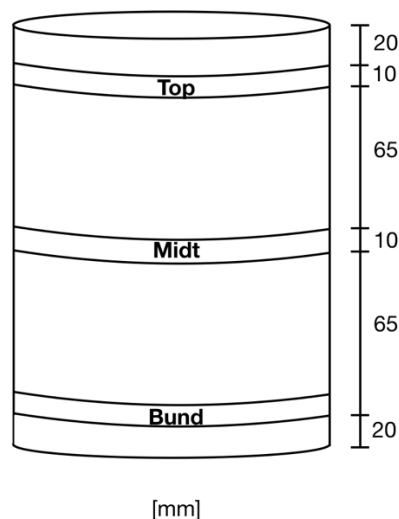
### 4.5.1 Trykprøvning af cylindre

Ud fra hver af betonblandingerne er støbt 8 prøvecylindre, hvoraf 4 trykprøves efter 7 døgn og 3 trykprøves efter 28 døgn, hvor den 4. cylinder bruges til at teste porøsitet og densitet af den hærde beton som beskrevet i afsnit 4.5.2.

Metoden for trykprøvning efter hhv. 7 og 28 dage er den samme. Prøverne vejes og dimensionerne kontrolleres. Højden måles 3 steder og diameteren måles 3 steder, hvor et gennemsnit benyttes. Til trykprøvningen benyttes en TONI TECHNIK prøvemaskine, og der anvendes ikke nogen fiberplade mellem toppen af cylinderen og maskinens stempel (da nogle af prøverne blev testet for e-modul til Tanyas opgave, og der kunne pladen ikke benyttes). Prøvecylinderen belastes efter DS/EN12390-3 (2012) med en hastighed på 4,71 KN/s og brudlasten noteres.

### 4.5.2 Densitet og porøsitet af den hærde beton

Densiteten og porøsiteten måles for de 8 forskellige betonblandinger på en af de 4 cylindre, som har hærdet i 28 dage. Til at finde porøsiteten og densiteten, tages udgangspunkt i forsøgsvejledningen i bilag 6. Der skæres 3 skiver med en tykkelse på ca. 10 mm af cylinderen, en skive fra toppen, en fra midten og en fra bunden, hvor en skive på 20 mm i hver ende skæres af inden prøverne skæres ud (figur 17).



Figur 17 - Princip for udskæring af betonskiver til bestemmelse af densitet og porøsitet



Skiverne mærkes og lægges i varmeskab ved 50 °C i ca. 2 uger eller til konstant masse er nået. Når konstant masse er opnået vejes skriverne og massen noteres. Skiverne placeres nu i en eksikator med låg og tilsluttes vakuumpumpen og pumpes ned i minimum 3 timer. Efter 3 timer ledes destilleret vand ind i eksikatoren ved hjælp af en slange og undertrykket i eksikatoren. Eksikatoren skal nu stå lukket i en time, hvorefter der lukkes luft ind, og prøven skal nu stå natten over ved atmosfærisk tryk.

Prøven er nu vandmættet og vejes først under vand på en teknisk vægt, og vægten noteres som  $m_{sw}$ . Vandet som prøven vejes i skal have rumtemperatur. Prøven duppes herefter med en hårdt opvredet klud og vejes igen på en vægt over vand. Denne vægt noteres som  $m_{vot}$ . I øvelsesvejledningen er det angivet at prøverne skal kontrolleres for udvaskning ved at tørre prøverne igen og veje dem efterfølgende. Dette er kun gjort for prøverne REF, RCA15\_4-8 og RCA15\_8-16, hvor der ikke ses tegn på udvaskning, og det er derfor antaget, at der heller ikke er sket en udvaskning for de øvrige prøver for at spare tid.



## 5. Resultater og diskussion

### 5.1 Geometriske karakteristika ved RCA

#### 5.1.2 Udseende

De knuste genbrugsaggregater er mere kantede end søsten i begge fraktioner og minder mest om de knuste granitskærver (figur 18, 19). RCA har også en mere ru overfladestruktur, i forhold til de afrundede søsten. Derudover ses specielt ved genbrugsaggregaterne i 4-8 mm fraktionen i figur 19, at de har tendens til at have en aflang og spids kornform, som er meget flad sammenlignet med de naturlige tilslag. Denne observation er ikke lige så tydelig for genbrugsaggregaterne i 8-16 mm fraktionen (figur 18).



Figur 18 - Stentilslag i 8-16 mm fraktionen. Fra venstre: Søsten, RCA, granitskærver



Figur 19 - Stentilslag i 4-8 mm fraktionen. Fra venstre: Søsten, RCA, granitskærver

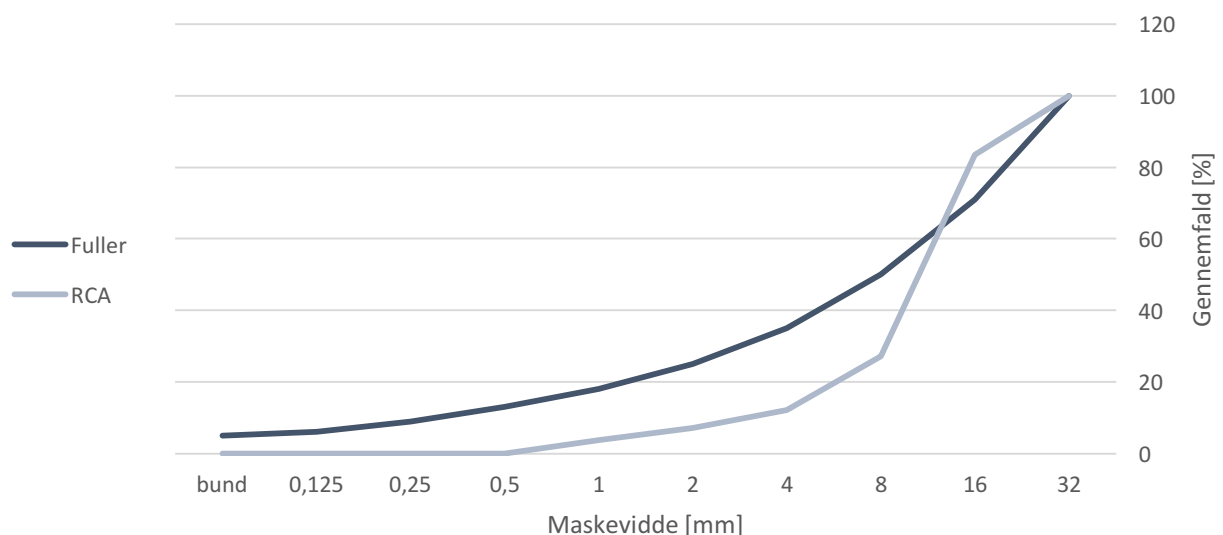
Under støbningen blev det observeret, hvordan bearbejdigheden af blandingerne med RCA blev nedsat som konsekvens af øget mængde RCA. Under komprimeringen af betonen med 50 % RCA (RCA50\_4-8\_8-16) blev RCA ved med at arbejde sig op til overfladen. Det var nærmest umuligt at få en jævn overflade på betonen (figur 20). Denne observation var tydeligst for blandingen med 50% RCA. Det tyder altså på, at RCA ikke pakkes lige så nemt som afrundede søsten og dette må primært tilskrives den kantede kornform for RCA som er observeret. Derudover kan den sammensatte sigtekurve også have en indflydelse på pakningen.



Figur 20 - Komprimering af blandingen RCA50\_4-8\_8-16, hvor RCA ses søge mod overfladen.

### 5.1.3 Sigtekurve

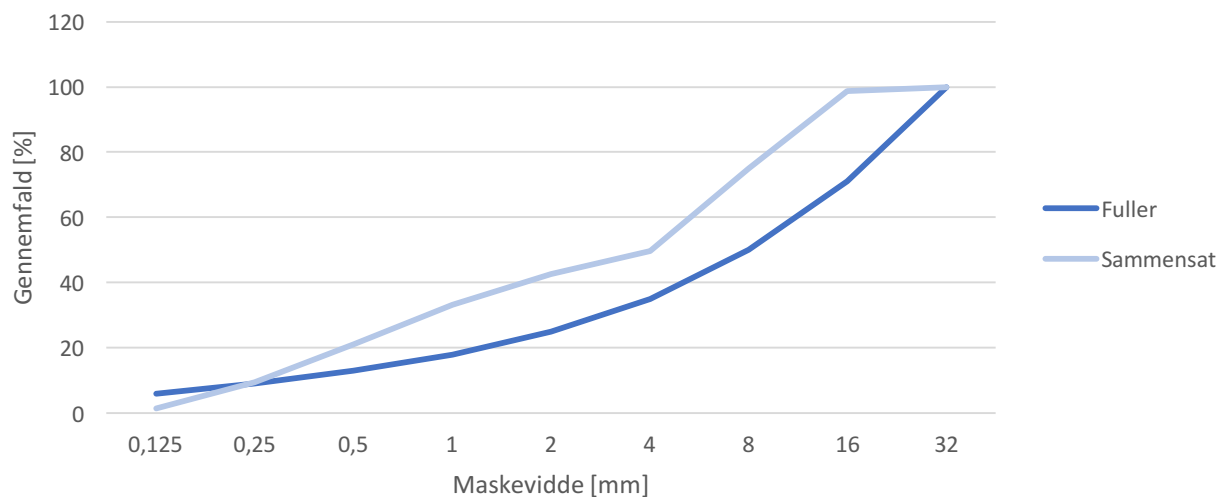
De knuste usorterede genbrugsaggregater har en mindre kornmængde under 8-16 mm og en større mængde korn over 8-16 mm end Fullers idealkurve (figur 21).



Figur 21 - Sigtekurven over kornstørrelsesfordelingen for usorteret RCA sammenlignet med Fullers idealkurve

Sigtekurven for RCA er lavet for sigter ned til 1 mm og derfor er der 0 % gennemfald for sigterne med maskevidde under 1 mm. Derudover ses kurven for RCA at være meget stejl på stykket fra 8-16 mm hvilket fortæller, at der er en stor andel af den samlede masse som består af denne fraktion. Ved udregning fås at 56,3 % af prøvestørrelsen består af 8-16 fraktionen, mens kun 14,5 % består af 4-8 mm fraktionen, hvilket er i overensstemmelse med, at kurven mindre stejl på stykket for 4-8 fraktionen. Andelen af fint materiale (0-4 mm) er 12,7 % og denne fraktion ligger under Fullerkurven.

Den sammensatte sigtekurve for referencestøbningens sammensætning af tilslag er konstrueret ud fra data i bilag 3 (figur 22).



Figur 22 - Sammensat sigtekurve for REF blandingen sammenlignet med fullers idealkurve

Som beskrevet i afsnit 4 er der valgt følgende sammensætning af tilslag: 47 % sand, 26,5 % 4-8 mm sten og 26,5 % 8-16 mm sten. Det er valgt at anvende en lige stor del 4-8 mm sten og 8-16 mm sten, da det på den måde bliver nemmere at sammenligne fraktionerne når en procentdel af disse fraktioners volumen erstattes med RCA. Sammenlignet med Fullers idealkurve viser figur 22, at dette valg ikke resulterer i den bedste sigtekurve ud fra de anvendte data, da gennemfaldet af den sammensatte kurve ses at være for stort. Det vil sige at der er for meget fint materiale i det sammensatte tilslag.

For at opnå en mere ideel sammensætning, og derved mere ideel pakning af tilslaget skulle der have været brugt en større andel af 8-16 mm fraktionen og en mindre andel af 4-8 mm fraktionen. Dette kan blandt andet være forklaringen på den påviste variation i densiteten ned igennem cylinderen.

## 5.2 Fysiske karakteristika ved RCA og NA

### 5.2.1 Densitet af RCA

RCA i fraktionen 4-8 mm har en højere tilsyneladende faststofdensitet end RCA i 8-16 mm fraktionen (tabel 1). Det ses samtidig at standardafvigelsen for 4-8 mm fraktionen er betydeligt højere end for 8-16 mm fraktionen. De benyttede densiteterne for NA er densiteten i vot-tilstanden (bilag 3). Samlet set er den gennemsnitlige tilsyneladende faststofdensitet for RCA 2,8 % lavere end densitet for NA, hvilket dog skal ses i lyset af, at densiteten for RCA er den tilsyneladende faststofdensitet og densiteten for NA er densiteten i vot-tilstand.

**Tabel 1 – Gennemsnitlig densitet for groft tilslag**

| <b>Fraktion</b>       | <b>Densitet<br/>[kg/m<sup>3</sup>]</b> | <b>Std. afvigelse<br/>[kg/m<sup>3</sup>]</b> |
|-----------------------|--|--|
| NA 0-4*               | 2620,00                                | -  |
| NA 4-8*               | 2610,00                                | -  |
| RCA 4-8 <sup>†</sup>  | 2566,90                                | ±130,52                                      |
| NA 8-16*              | 2610,00                                | -  |
| RCA 8-16 <sup>†</sup> | 2506,70                                | ±29,55                                       |

\*Tabelværdi for densiteten i vot-tilstand (bilag 3)

<sup>†</sup>Gennemsnitlige tilsyneladende faststofdensitet fundet eksperimentelt for n=3 (afsnit 4.2.3)

Da det er to forskellige densiteter for RCA og NA kan disse ikke sammenlignes fuldstændigt. Generelt vil densitet for vot-tilstanden være lavere end den tilsyneladende faststofdensitet. Det vil sige, at den tilsyneladende faststofdensitet for NA også vil være højere end den tilsyneladende faststofdensitet for RCA. Årsagen til en lavere densitet hos RCA tilskrives indholdet af AM (de Juan and Gutierrez, 2009). Interessant er det, at den tilsyneladende faststofdensitet er højest for RCA i 4-8 mm fraktionen når denne fraktion indeholder størst mængde AM (tabel 5 afsnit 5.2.4). Statistisk set, er der ingen forskel i middelværdierne for den tilsyneladende faststofdensitet for RCA i de to fraktioner på et 95 % signifikansniveau udregnet på baggrund af ”two sided t-test” (Brockhoff et al., 2017).

Resultatet fra tabel 1 er benyttet til sammensætningen af betonrecepterne anført i tabel 7. Fordi det er den tilsyneladende faststofdensitet som er benyttet, er volumen af RCA undervurderet en smule, og derfor er den nødvendige masse af RCA tilsvarende overvurderet.

## 5.2.2 Vandindhold i RCA og NA

Det gennemsnitlige vandindhold i stentilslaget er for at RCA i begge fraktioner større end NA (tabel 2). Derudover indeholder RCA i 4-8 mm fraktionen lidt mere vand end RCA i 8-16 mm fraktionen.

**Tabel 2 – Gennemsnitlige vandindhold i groft tilslag**

| <b>Fraktion</b> | <b>Vandindhold*</b> | <b>Std. afvigelse</b> |
|-----------------|---------------------|-----------------------|
|                 | <b>[%]</b>          | <b>[%]</b>            |
| NA 4-8          | 0,20                | ±0,29                 |
| RCA 4-8         | 2,74                | ±0,31                 |
| NA 8-16         | 0,3                 | ±0,29                 |
| RCA 8-16        | 2,04                | ±0                    |

\*Fundet eksperimentelt for n=3 (afsnit 4.2.2)

De målte værdier i tabel 2 er benyttet til betonrecepten. Det er antaget at disse værdier ikke har ændret sig gennem projektperioden da forholdene for NA ikke så ud til at ændre sig undervejs, og genbrugsaggregaterne blev opbevaret i spande med låg.

Vandindholdet i sandet har derimod varieret meget gennem projektperioden, alt efter hvor længe det har ligget i beholderne, og hvornår beholderne blev fyldt op. I tabel 3 nedenfor ses variationen over vandindholdet i sandet.

**Tabel 3 – Gennemsnitlige vandindhold i sandfraktionen (NA 0-4 mm)**

| <b>Dato</b> | <b>Vandindhold*</b> | <b>Std. afvigelse</b> |
|-------------|---------------------|-----------------------|
|             | <b>[%]</b>          | <b>[%]</b>            |
| 31.10.17    | 0,80                | ±0,29                 |
| 03.10.17    | 1,52                | ±0,00                 |
| 15.11.17    | 2,20                | ±0,80                 |
| 21.11.17    | 1,52                | ±0,52                 |

\*Fundet eksperimentelt for n=3 (afsnit 4.2.2)

Vandindholdet i sandet svinger mellem 0,8 % og 2,2 %, som der er taget højde for i betonrecepten (tabel 7 afsnit 5.3).

### 5.2.3 Absorptionsevnen

**Tabel 4 – Gennemsnitlig absorptionsevne for RCA og sand**

| Fraktion                 | Absorptionsevne | Std. Afvigelse | (Hansen, 1992) | (Pepe et al., 2016) |
|--------------------------|-----------------|----------------|----------------|---------------------|
|                          | [%]             | [%]            | [%]            | [%]                 |
| Sand 0-4 mm <sup>*</sup> | 0,21            | ± 0,04         | -              |                     |
| RCA 4-8 mm <sup>*</sup>  | 2,33            | ± 0,18         | 8,00           | 8,00-12,00          |
| RCA 8-16 mm <sup>†</sup> | 3,87            | ± 0,47         | 3,00-4,00      | 4,00-8,00           |

<sup>\*</sup>Fundet eksperimentelt for n=3 (afsnit 4.2.4)

<sup>†</sup>Fundet eksperimentelt for n=3, men taget som gennemsnit af 2 prøver, da den tredje vurderes at være en outlier og er ikke medtaget i gennemsnittet (afsnit 4.2.3)

Den fundne absorptionsevne for RCA i 4-8 mm fraktionen er mindre end absorptionsevnen for RCA i 8-16 mm fraktionen (tabel 4). Resultaterne for absorptionsevnen af RCA i tabel 4 benyttes til betonrecepterne (tabel 7 afsnit 5.3).

Den fundne absorptionsevne for RCA i 4-8 mm fraktionen ses at er lavere end, hvad andre finder for denne fraktion (Pepe et al., 2016, Hansen, 1992). Dette resultat er også i modstrid med resultatet for AM indholdet i RCA (tabel 5 afsnit 5.2.4). Generelt ses absorptionsevnen at være højest for 4-8 mm fraktionen, som tilskrives et højere indhold af AM som bidrager til højere porøsitet og derved højere absorptionsevne (Pepe et al., 2016, Hansen, 1992). Dette tyder på, at der har været en fejl i målingen af absorptionsevnen for 4-8 mm fraktionen af RCA.

En forklaring på det afvigende resultat, kan skyldes metoden til måling af absorptionsevnen, hvor papirservietter blev benyttet til at opnå vot-tilstand af aggregaterne (afsnit 4.2.3). Anvendelse af en fugtig hårdt opvredet klud af stof, havde været at foretrække, da papir højst sandsynligt kan have suget vand ud af porerne. Det er muligt, at 4-8 mm fraktionen har været tørret mere end 8-16 mm fraktionen da de enkelte korn er mindre, og det er en meget subjektiv vurdering af, hvornår vot-tilstand er opnået.

Antaget, at absorptionsevnen for 4-8 mm fraktionen af RCA er undervurderet vil dette betyde, at denne fraktion absorberer mere vand fra betonblandingen, end der er dimensioneret efter, og derved vil sætmålet af blandingerne indeholdende 4-8 mm RCA blive mindre. Dette vil samtidig resultere i et lavere v/c forhold og en højere trykstyrke for betoner med 4-8 mm RCA.

#### 5.2.4 Cementindhold for RCA

RCA i fraktionen 4-8 mm indeholder næsten dobbelt så meget cement som RCA i fraktion 8-16 mm (tabel 5). Ydemere er standardafvigelsen er størst for RCA i 4-8 mm fraktionen.

**Tabel 5 – Gennemsnitligt cementindhold (AM) I RCA**

| <b>Fraktion</b> | <b>Gennemsnitligt cementindhold*</b><br>[%] | <b>Std. Afvigelse</b><br>[%] | <b>Hansen (1992)</b><br>[%] |
|-----------------|---|------------------------------|-----------------------------|
| RCA 4-8 mm      | 27,83                                       | ± 6,43                       | 60,00                       |
| RCA 8-16 mm     | 16,00                                       | ± 4,76                       | 40,00                       |

\*Fundet eksperimentelt for n=3 (afsnit 4.2.5)

Indholdet af AM i RCA er fundet til 16% for 8-16 mm fraktionen, og næsten 28 % for 4-8 fraktionen. Dette stemmer overens med forholdet mellem de to fraktioner fundet i studier af Hansen (1992), der fandt hhv. 40 % og 60 % AM indhold. Det absolutte indhold af AM i RCA fra DTU tunnelen ligger dog lavere end AM indholdet fundet i studierne af Hansen (1992). Dette kan skyldes, at v/c forholdet af den originale beton har været forskelligt. RCA fra original beton med højt v/c forhold vil indeholde større mængde AM, da styrken af cementen her er lavere (Zega et al., 2010). Det har ikke været muligt at finde noget litteratur, der kan forklare hvorfor, 4-8 mm fraktionen af RCA indeholder mest AM. Men det kan tænkes, at AM indholdet både afhænger af knusemetode og af styrken af den originale beton. De naturlige aggregater som benyttes i den originale beton vil som regel være stærkere end cementen (afsnit 2.1.1). Det er derfor nærliggende at forestille sig at cementen knuses nemmere end stenene i betonen og derved bryder i flere mindre stykker og dermed vil mere af 4-8 mm fraktionen bestå af AM.



## 5.2.5 Los Angeles koefficient for RCA og NA

**Tabel 6 – Gennemsnitlige LA-koefficienter for RCA og NA**

| Fraktion | LA-Koefficient*<br>[%] | Std. Afvigelse<br>[%] | Hansen (1992)<br>[%] | Omary et al.<br>(2016)<br>[%] |
|----------|------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------|
| NA 4-8   | 27,37                  | ±0,73                 | 25                   | 17-19                         |
| RCA 4-8  | 35,78                  | ±0,98                 | 30-40                | 32                            |
| NA 8-16  | 35,40                  | ±0,71                 | 22                   | 16-20                         |
| RCA 8-16 | 55,13                  | ±1,29                 | 26-37                | 30-32                         |

\*Fundet eksperimentelt for n=2 (afsnit 4.2.6)

NA har en større modstandskraft overfor knusning end RCA. Dette gælder både 4-8 fraktionen og 8-16 fraktionen (tabel 6). Derudover er det bemærkelsesværdigt, at resultaterne viser at, 4-8 fraktionen har en højere modstandskraft overfor knusning end 8-16 fraktionen, både for NA og RCA.

Som forventet har NA, en større modstandskraft overfor knusning end RCA, hvilket formodentligt kan forklares med at RCA har en lavere densitet og den angiveligt højere porøsitet på grund af AM (Omary et al., 2016). I forhold til de fundne resultater for AM indholdet (tabel 5 afsnit 5.2.4) ses dette at være i modstrid med LA-koefficienterne for RCA da 4-8 mm fraktionen burde have den højeste LA-værdi, da denne har det højeste indhold af AM. Omvendt kan man sige, at der statistisk set ikke ses nogen forskel i densiteten for RCA og derfor burde LA-koefficienten være ens for både 4-8 mm fraktionen og 8-16 mm fraktionen som det også burde være tilfældet for NA.

At der ses en højere LA-koefficient for 8-16 mm fraktionen for både NA og RCA er uventet. NA har samme densitet og burde derfor have samme modstand over for knusning i forhold til ovennævnte (Omary et al., 2016).

En forklaring på de modstridende resultater kan være, at det blev valgt at benytte 12 stålkugler i stedet for 11 stålkugler ved testning af 8-16 mm fraktionen. Ved at benytte 12 stålkugler, kan LA-koefficienten for 8-16 mm fraktionen være blevet overvurderet en smule, hvilket kan forklare, at LA-koefficienten er højere både for NA og RCA i 8-16 mm fraktionen. Valget af sigte, har også gjort at LA-koefficienten for begge fraktioner er undervurderet en smule da 1.4 sigten tilbageholder mere materiale end 1,7 sigten.



### 5.3 Betonrecepten

De 8 forskellige betonrecepter er udarbejdet på baggrund af de fundne resultater i afsnit 5.2 (tabel 7). Kolonne 4 angiver den teoretiske vandmængde, og kolonne 5 angiver den korrigerede vandmængde, som er udregnet på baggrund af resultaterne for tilslagets aktuelle vandindhold og absorptionsevne (tabel 2, 3 og 4). Denne vandmængde ses at være højere end den teoretiske vandmængde, da det er målt at tilslagsmaterialerne absorberer, hvad der svarer til differencen mellem den korrigerede vandmængde og den teoretiske vandmængde, således at v/c forholdet forbliver 0,6. Derudover ses små variationer i mængden af sand, som også er et resultat af det varierende aktuelle vandindhold.

**Tabel 7 — Betonrecepter af 25 l**

| Blanding       | v/c  | Cement | Teoretisk vandmængde | Korrigeret vandmængde | Sand 0-4 mm | NA 4-8 mm | RCA 4-8 mm | NA 8-16 mm | RCA 4-8 mm |
|----------------|------|--------|----------------------|-----------------------|-------------|-----------|------------|------------|------------|
|                | [-]  | [kg]   | [kg]                 | [kg]                  | [kg]        | [kg]      | [kg]       | [kg]       | [kg]       |
| REF            | 0,60 | 7,63   | 4,58                 | 4,83                  | 21,10       | 11,98     | -          | 11,99      | -          |
| RCA15_4-8*     | 0,60 | 7,63   | 4,58                 | 4,89                  | 21,94       | 8,38      | 3,63       | 11,99      | -          |
| RCA15_8-16     | 0,60 | 7,63   | 4,58                 | 4,97                  | 22,94       | 11,98     | -          | 8,39       | 3,47       |
| RCA15_4-8_8-16 | 0,60 | 7,63   | 4,58                 | 4,78                  | 22,10       | 10,18     | 1,81       | 10,19      | 1,73       |
| RCA30_4-8      | 0,60 | 7,63   | 4,58                 | 4,49                  | 22,25       | 4,79      | 7,26       | 11,99      | -          |
| RCA30_8-16     | 0,60 | 7,63   | 4,58                 | 4,65                  | 22,25       | 11,98     | -          | 4,80       | 6,94       |
| RCA30_4-8_8-16 | 0,60 | 7,63   | 4,58                 | 4,57                  | 22,25       | 8,38      | 3,63       | 8,39       | 3,47       |
| RCA50_4-8_8-16 | 0,60 | 7,63   | 4,58                 | 4,64                  | 22,10       | 5,99      | 6,05       | 5,99       | 5,78       |

\*Blandingen RCA15\_4-8 er dimensioneret efter et aktuelt vandindhold for sandet på 0,8 %, dog

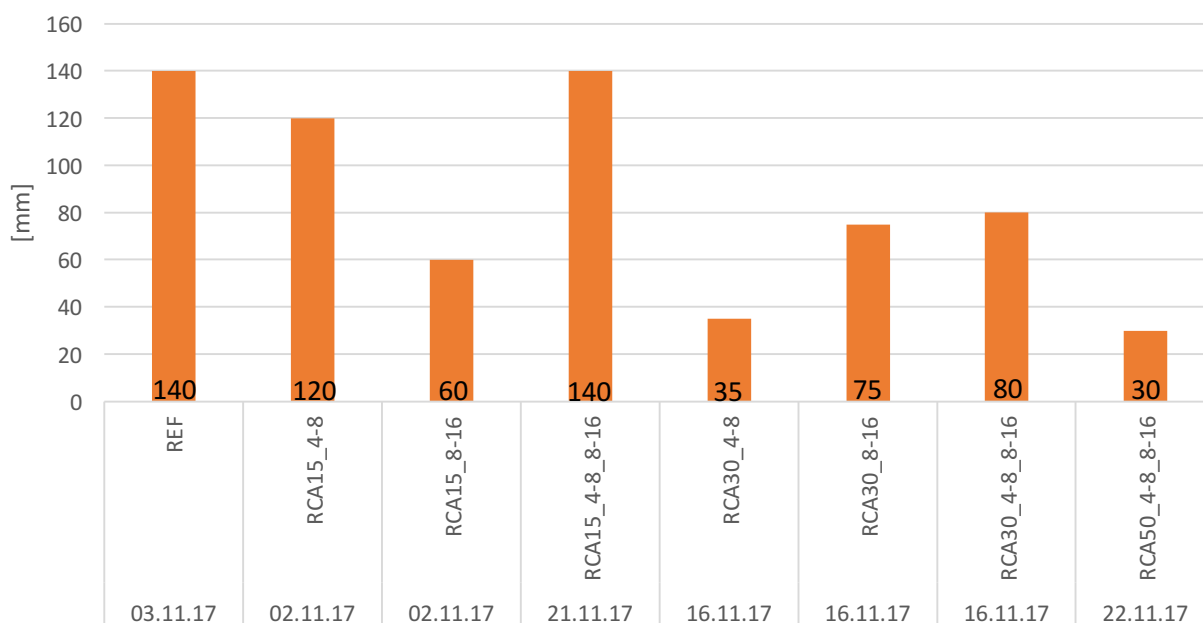
var det aktuelle vandindhold for sandet højt højere, da det var nødvendigt at supplere med sand fra en anden beholder, som var tydeligt vådere. Konsekvensen af dette, er et for højt vandindhold i blandingen. Det aktuelle vandindhold i det benyttede sand har højest sandsynligt ligget tættere på 1,5 % som er den målte værdi 02.22.17. Hvis den værdi for det aktuelle vandindhold havde været benyttet havde den korrigerede vandmængde været 4,74 kg og ikke 4,89 kg.

Den højeste værdi for vandindholdet i sandet, er målt til 2,2 % som er den værdi, der er benyttet for sandets vandindhold i recepterne for blandingerne med 30 % RCA. Dette kommer til udtryk ved en lav korrigeret vandmængde, da det det forudsattes, at en del af sandets vandindhold går til betonblandingen. Hvis det antages at absorptionsevnen for RCA i 4-8 mm fraktionen er undervurderet, vil denne fejl blive mere udtalt, jo mere RCA i 4-8 mm fraktionen der benyttes, da den målte absorption for RCA er lavere end den benyttede absorption for NA. Dette ses bl.a. for

RCA30\_4-8 som indeholder 4,49 kg vand mens RCA30\_8-16 indeholder 4,56 kg vand med samme vandindhold for sandet (tabel 7).

#### 5.4 Sætmål og luftindhold

I figur 23 er vist de målte sætmål for de 8 forskellige betonblandinger. Der er, som beskrevet i afsnit 4, dimensioneret efter et sætmål på 100-150 mm. De 3 blandinger REF, RCA15\_4-8 og RCA15\_4-8\_8-16 ligger således indenfor det dimensionerede, mens de øvrige blandinger har et sætmål mindre end de 100 mm (figur 23). Det laveste sætmål ses for blandingen RCA50\_4-8\_8-16 som indeholder den højeste procent RCA.



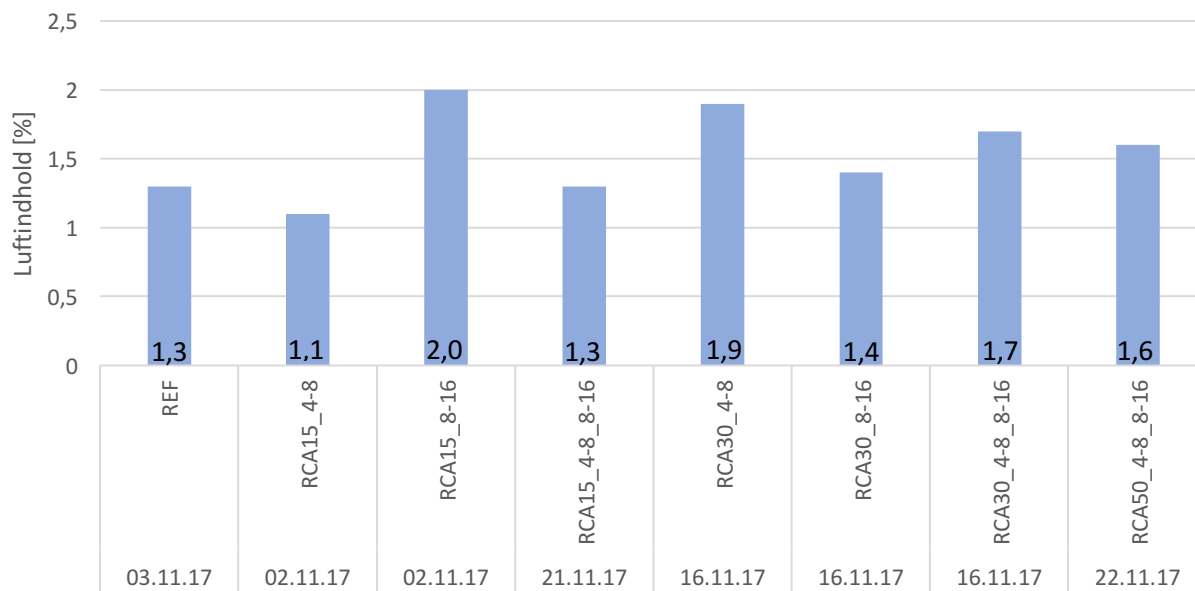
Figur 23 - Målte sætmål for betonblandinger (afsnit 4.4)

Til at vurdere, hvorvidt det er lykkedes at korrigerer korrekt for absorption og vandindhold kan vandmængderne i recepterne (tabel 7) sammenlignes med resultaterne for de målte sætmål (figur 23). De 4 højeste korrigerede vandmængder ses for blandingerne REF, RCA15\_4-8, RCA15\_8-16 og RCA\_4-8\_8-16 og dette giver også de højeste sætmål med undtagelse af RCA15\_8-16 som ligger under det dimensionerede. Havde RCA15\_4-8 været støbt med sand, med et aktuelt vandindhold på 0,8 som der var dimensioneret efter, havde sætmålet for denne højst sandsynligt ligget lavere, og mere på højde med det fundne sætmål for RCA15\_8-16. Det er dog interessant at RCA15\_4-8\_8-16 har et sætmål på højde med REF.

Ud fra recepterne ses at blandingerne med den laveste korrigerede vandmængde er blandingerne RCA30\_4-8, RCA30\_8-16 og RCA50\_4-8\_8-16 og det er ligeledes de blandinger med de laveste sætmål. Sætmålet for blandingerne med 30 % og 50 % RCA ligger alle under det dimensionerede. Arbejdes videre med teorien om, at absorptionsevnen for RCA i 4-8 mm fraktionen er undervurderet vil denne fejl blive mere udtalt, jo mere RCA i 4-8 mm fraktionen som benyttes. Dette kan forklare de lave sætmål for RCA30\_4-8 og RCA50\_4-8\_8-16.

Sætmål er dog ikke kun et udtryk for betonens frie vandmængde, men også bearbejdigheden, som i høj grad også skyldes kornform og tilslagetets sammensætning (jf. afsnit 2.3). Som tidligere beskrevet, var RCA tydeligt mere kantet end NA, og denne indvirkning på sætmålet vil blive mere tydelig jo mere RCA som benyttes. Dette kan udover vandindholdet forklare, hvorfor de laveste målte sætmål ses for blandingerne med 30 % og 50 % RCA.

Det målte luftindhold i betonblandingerne ses at variere mellem 1-2 % (figur 24). Det lavest målte luftindhold ses at være for blandingen RCA15\_4-8 mens det højest målte er for blandingen RCA15\_8-16.



Figur 24 - Luftindhold målt for de 8 forskellige betonblandinger (afsnit 4.4)

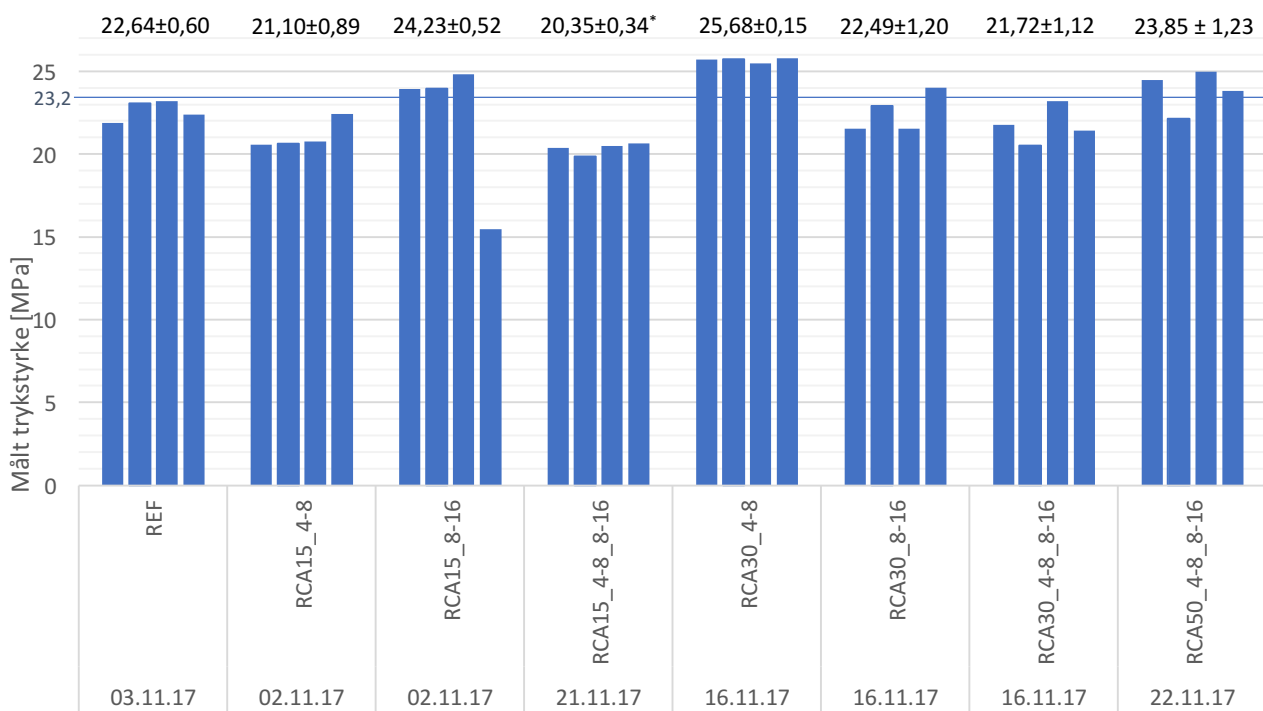
Betonrecepterne er dimensioneret ud fra et teoretisk luftindhold på 1 % i betonen (tabel 7 afsnit 5.3). Overordnet er der mere end 1 % luft i blandingerne (figur 24). De 3 blandinger som ligger tættest på

1 % er RCA15\_4-8 med et luftindhold på 1,1 % og RCA15\_4-8\_8-16 og REF som begge har et luftindhold på 1,3 %. De øvrige blandinger har et højere luftindhold, som kan bidrage til højere porøsitet og derved lavere trykstyrke (afsnit 2.1.1).

I afsnit 5.7 er luftindholdet sammenlignes med fundne resultater for porøsitet og densitet.

### 5.5 Målte trykstyrker

Der er målt trykstyrker for de 8 forskellige blandinger for hhv. 7 og 28 døgns hærdning (figur 25, 26) Den teoretiske værdi for trykstyrken for beton støbt med AALBORG BASIS CEMENT er 23,20 MPa for 7 døgn og 30,90 MPa for 28 døgn (afsnit 2.1.1).

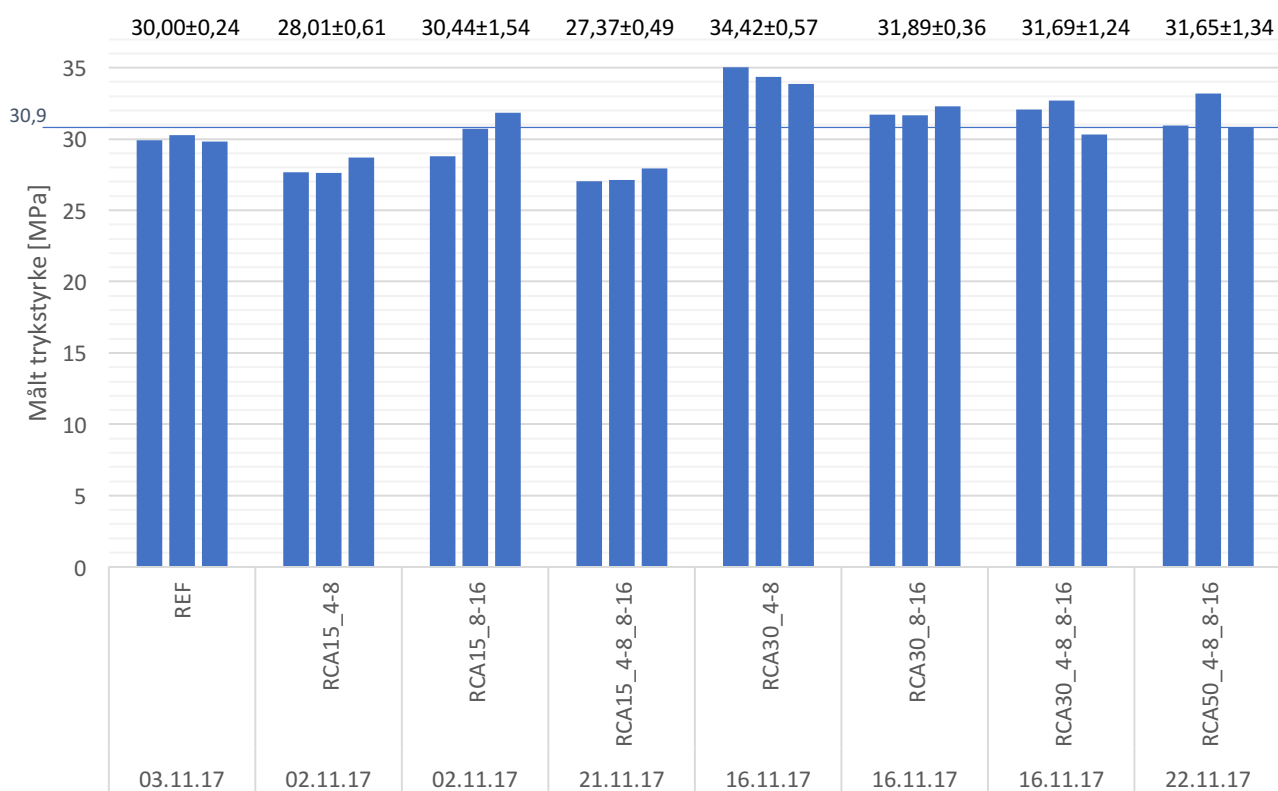


Figur 25 - Diagram over målte 7 dages trykstyrker for 4 prøver fra de 8 forskellige betonblandinger støbt på de angivne datoer. Middelværdien og standardafvigelse er listet for hver blanding [MPa]. Den blå linje på 23,3 MPa er den teoretiske styrke for beton med v/c forhold 0,6. \* Den gennemsnitlige målte trykstyrke for RCA15\_8-6 udregnet på baggrund af 3 prøver da den fjerde prøve vurderes at være en outlier

Blandingerne RCA15\_8-16, RCA30\_4-8 og RCA50\_4-8\_8-16 har en gennemsnitlig målt trykstyrke, der ligger over den teoretiske styrke på 23,2 MPa (figur 25). RCA30\_4-8 har den højeste målte

trykstyrke på 25,68 mens RCA15\_4-8 og RCA15\_4-8\_8-16 har de laveste styrker. Spredningen for de målte trykstyrkerne ses at stige med øget indhold af RCA.

Det er ikke muligt, at konkludere generelt, om RCA gør blandingerne svagere, samt om der er forskel på at benytte RCA i 4-8 mm fraktionen eller 8-26 mm fraktionen på basis af figur 25. Forskellene i de målte trykstyrker må antages primært at skyldes, at det faktiske v/c forhold for blandingerne nok er forskelligt, som udtrykt via de forskellige sætmål (afsnit 5.4). Montero and Laserna (2017) konkluderer også, at man kun kan sammenligne de mekaniske egenskaber af beton med RCA, hvis v/c forholdet er det samme. Det skal hertil siges, at sætmålet ikke kun er et udtryk for blandings frie vandmængde, men også kornform og tilslags sammensætningen.



Figur 26 - Diagram over den målte 28 dages trykstyrker for 3 prøver fra de 8 forskellige betonblandinger støbt på de angivne datoer. Middelværdien og standardafvigelse er listet for hver blanding [MPa]. Den blå linje på 30,9 MPa er den teoretiske styrke med v/c forhold 0,6.

Resultatet for trykprøvning af prøverne efter 28 dages hærkning, viser at den gennemsnitlige målte trykstyrke er højere for blandingerne indeholdende 30 % og 50 % RCA end REF (figur 26). Prøverne indeholdende 30 % og 50 % RCA er også højere end den teoretiske værdi på 30,9 MPa. De laveste

styrker ses igen for RCA15\_4-8 samt RCA15\_4-8\_8-16, som også viste de laveste trykstyrker for 7 dage. Referenceprøverne (REF) ses at ligge lige på grænsen i forhold til den teoretiske styrke på 30,9 MPa for 28 dage. En interessant observation ses for RCA30\_8-16 og RCA30\_4-8\_8-16, som viste en målt 7 dages styrke under den teoretiske styrke, men ligger over den teoretiske styrke for 28 dage.

Sammenlignes alle prøverne overordnet for 28 dage er der en tendens til at blandingerne indeholdende større erstatning af tilslag med RCA viser en højere målt trykstyrke (figur 26). Den mest åbenlyse forklaring på dette må tilskrives en ændring i v/c forholdet. Trykstyrkerne set i forhold til sætmålene i figur 23 viser, at sætmålene er lavere for blandingerne indeholdende 30 % og 50 % RCA. Denne observation følges op i afsnit 5.7.

Det er også væsentligt at nævne at de interne afvigelse i trykstyrken for de forskellige blandinger, kan skyldes støbefejl, som vil nedsætte trykstyrken for den pågældende cylinder. Dette vil være gældende for både 7 og 28 dages styrkerne.

## 5.6 Porøsitet og densitet af den hærdede beton

Den højeste tørdensitet findes for RCA30\_4-8, RCA15\_4-8 og REF (tabel 8). Den laveste tørdensitet findes for RCA50\_4-8\_8-16. RCA30\_8-16. Tørdensiteten for RCA15\_4-8 skiller sig ud ved at have højere densitet end REF. De øvrige betoner har en lavere densitet end REF som forventet, da densiteten for RCA er fundet at være lavere end densiteten for NA.

**Tabel 8 – Gennemsnitlig tilsyneladende tørdensitet og åben porøsitet**

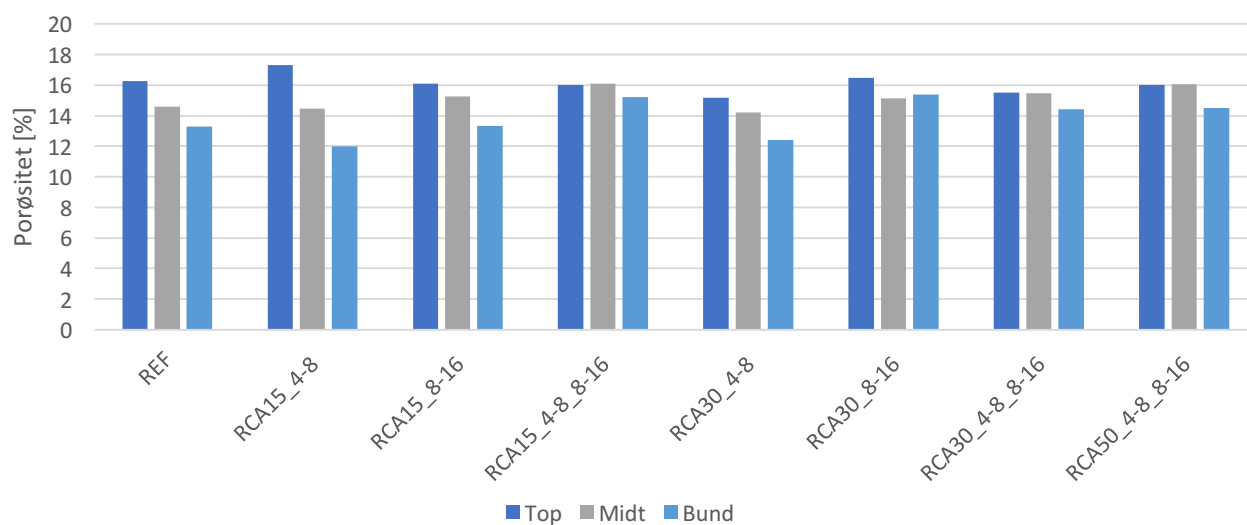
| <b>Prøve</b>            | <b>Tilsyneladende tørdensitet*</b><br><b>[Kg/m<sup>3</sup>]</b> | <b>Åben porøsitet*</b><br><b>[%]</b> |
|-------------------------|---|--------------------------------------|
| Tabelværdi <sup>†</sup> | 2250 – 2350   | 10 – 20                              |
| REF                     | 2221,34 ± 47,55   | 14,71 ± 0,01                         |
| RCA15_4-8               | 2226,21 ± 79,58   | 14,58 ± 0,03                         |
| RCA15_8-16              | 2210,31 ± 49,72   | 14,90 ± 0,01                         |
| RCA15_4-8_8-16          | 2190,28 ± 15,08   | 15,78 ± 0,00                         |
| RCA30_4-8               | 2239,33 ± 39,49   | 13,94 ± 0,01                         |
| RCA30_8-16              | 2191,01 ± 25,81   | 15,66 ± 0,01                         |
| RCA30_4-8_8-16          | 2206,92 ± 20,42   | 15,13 ± 0,01                         |
| RCA50_4-8_8-16          | 2182,93 ± 36,21   | 15,52 ± 0,01                         |

\*Målt som gennemsnit af 3 prøver af prøvecylinderen (28 dages hærkning) fra hhv. toppen, midten og bunden (afsnit 4.5.2)

<sup>†</sup>Tabelværdi for beton med v/c = 0,6 til sammenligning (Gottfredsen and Nielsen, 2006)

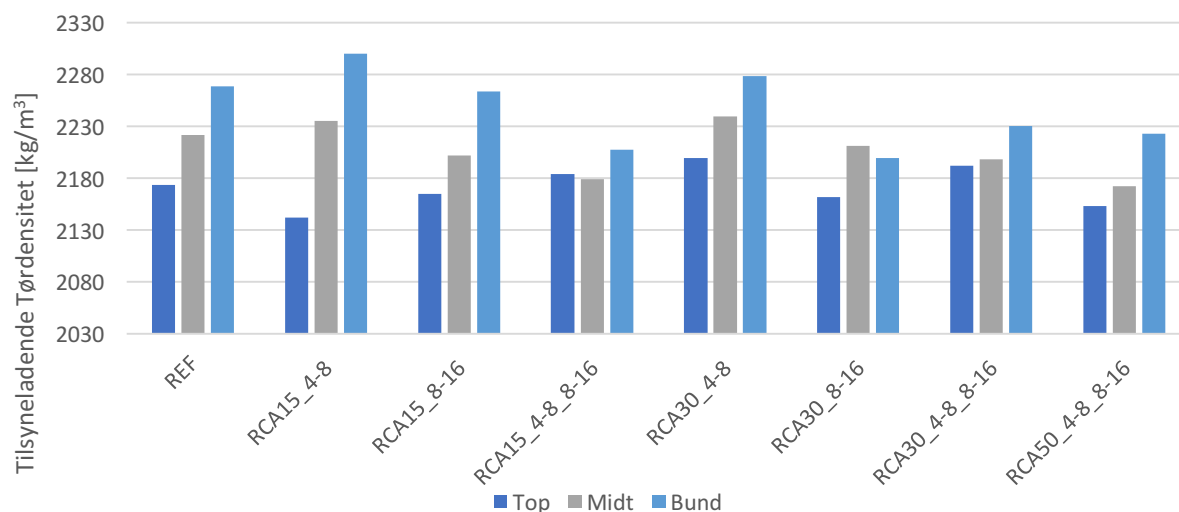
Sammenlignes betonernes densitet med tabelværdien, ligger alle betonerne inkl. REF under tabelværdien. Den tidligere omtalte fejl i densiteten af RCA benyttet i betonrecepten vil betyde at densiteterne, for beton med RCA i tabel 8, muligvis havde været lidt højere, hvis densiteten af RCA i vot-tilstand havde været benyttet i recepten.

Porøsiteten af betonen med RCA ligger på mellem 13,94 % og 15,78 % og afviger ikke meget fra referencen og alle målte porøsiteter ligger inde for tabelværdien. Der er en svag tendens til, at de højeste porøsiteter findes for betonerne indeholdende 30 % og 50 % RCA.



Figur 27 – Den målte porøsitets variation fra toppen af cylinderen til bunden (afsnit 4.5.2)

Den tilsyneladende tørdensitet er højest i bunden af prøvecylinderen og lavest i toppen (figur 28). Dette er det generelle billede for alle betonene. Standardafvigelsen ligger på mellem  $79,58 \text{ kg/m}^3$  og  $20,42 \text{ kg/m}^3$ , og fortæller, at betonen ikke er fuldstændig homogen. Porøsiteten af betonen varierer ligeledes, generelt haves den største porøsitet i toppen af cylinderen, mens den laveste porøsitet findes i bunden, hvilket stemmer overens med resultaterne for densiteten (figur 27).



Figur 28 - Den tilsyneladende tørdensitets variation fra top til bund (afsnit 4.5.2)

Ser man på billeder af kornfordeling i tværsnit viser dette, at tilslaget i betonen fordeler sig en smule ujævnt (figur 29). Der er færre sten, og generelt få store sten i tværsnittet fra toppen af cylinderen



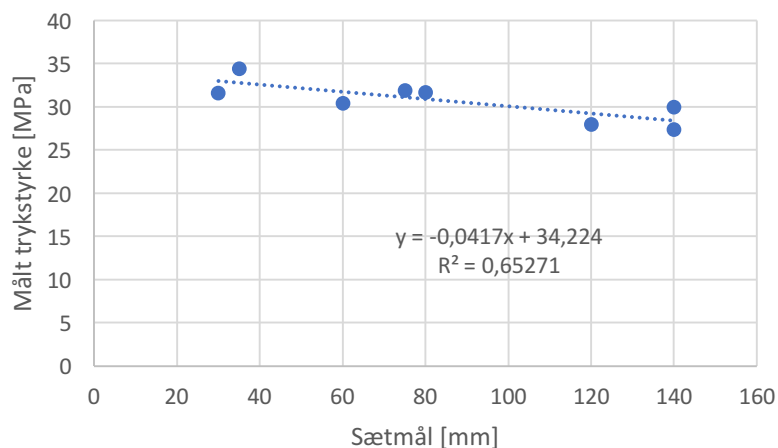
mens der er flere sten og flere større sten i tværsnittet for bunden. Derudover er der er en tendens til at RCA lægger sig i toppen af prøven, mens de naturlige sten ligger i bunden af cylinderen. RCA kan genkendes på at den AM som sidder på RCA har en lysere farve end den nye cement (markeret med rød cirkel i figur 29).



Figur 29 - Tværsnit af prøven RCA15\_8-16 fra venstre: Top, midt og bund. Eksempel på udseendet af RCA markeret med rød cirkel, hvor A viser RCA kun bestående af cement og sand, mens B viser RCA som en sten med AM.

## 5.7 Sammenfattende diskussion

Det er ikke muligt umiddelbart at konkludere om, den hærdede beton indeholdende RCA er tilsyneladende stærkere eller svagere end referencestøbningen, samt om der er forskel på at benytte RCA i 4-8 mm fraktionen eller 8-16 mm fraktionen (figur 26). Dette skyldes bl.a. de tidligere nævnte usikkerheder i forhold til den målte absorption, som har indflydelse på den frie vandmængde i betonen. En lav fri vandmængde vil give et lavere v/c forhold, som bl.a. vil komme til udtryk i et lavere sætmål og en højere styrke af betonen. I det følgende vil særligt 28 dages prøverne behandles, da de giver det bedste billede af betones endelige styrke.



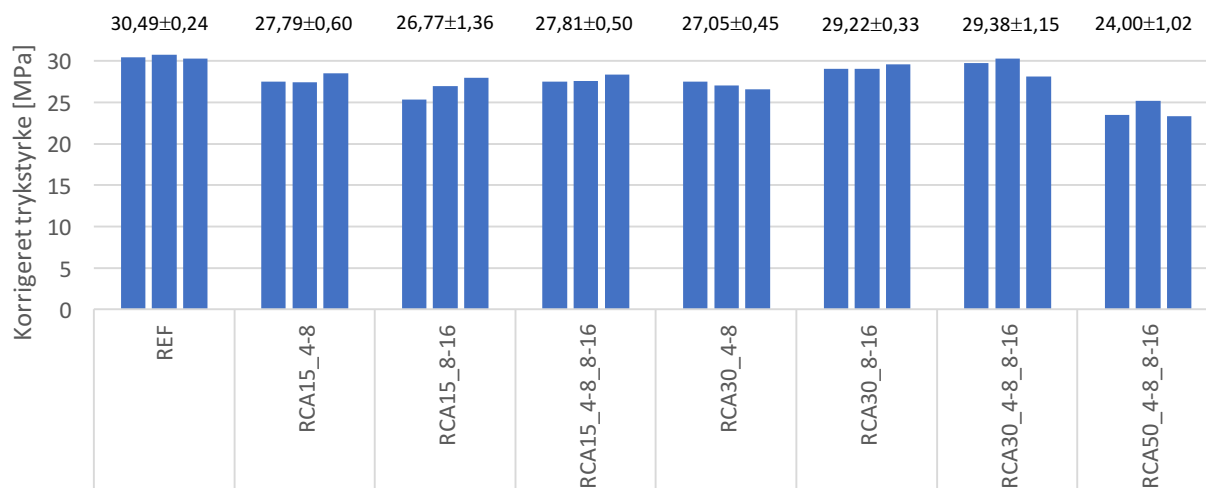
Figur 30 - Målt trykstyrke for 28 dage som funktion af sætmål

Kombineres de målte sætmål i figur 23 med de målte trykstyrker for 28 dage i figur 26 ses at de højest målte trykstyrker forekommer for prøverne med de laveste sætmål (RCA30\_4-8, RCA30\_8-16, RCA30\_4-8\_8-16 og RCA50\_4-8\_8-16) (figur 30). Dette indikerer, at prøverne med lavere sætmål, har lavere v/c forhold, hvis man ser bort fra kornegeometriens betydning for sætmål. Ud fra tabel 10 i bilag 2 kan der opstilles en model med teoretisk vandmængde som funktion af sætmål, hvis der ses bort fra kornform. Ud fra denne meget simplificerede model kan den faktiske vandmængde i betonen approksimeres og dermed kan det faktiske v/c forhold estimeres for de forskellige blandinger (tabel 9). På baggrund af disse faktiske v/c forhold kan den teoretiske trykstyrke beregnes fra Bolomeys formel (2) og den procentvise ændring i den teoretiske værdi for trykstyrken bestemmes. Ud fra den procentvise ændring kan den målte trykstyrke omregnes til en estimeret korrigeret trykstyrke (figur 31)

**Tabel 9 – Trykstyrken korrigeret for forskelle i sætmål**

| Prøve          | Faktisk vandmængde*<br>ud fra målt sætmål<br>[Kg/m <sup>3</sup> ] | Faktisk v/c<br>forhold<br>[-] | Teoretisk trykstyrke<br>For faktisk v/c<br>[MPa] | Ændring i<br>trykstyrke<br>[%] |
|----------------|---|-------------------------------|--|--------------------------------|
| REF            | 185,06  | 0,61                          | 30,04  | -1,63                          |
| RCA15_4-8      | 182,22  | 0,60                          | 31,14  | 0,77                           |
| RCA15_8-16     | 170,00  | 0,56                          | 34,63  | 12,07                          |
| RCA15_4-8_8-16 | 185,06  | 0,61                          | 30,40  | -1,63                          |
| RCA30_4-8      | 161,06  | 0,53                          | 37,52  | 21,42                          |
| RCA30_8-16     | 173,84  | 0,57                          | 33,48  | 8,35                           |
| RCA30_4-8_8-16 | 174,97  | 0,57                          | 33,15  | 7,29                           |
| RCA50_4-8_8-16 | 158,59  | 0,52                          | 38,37  | 24,18                          |

Det faktiske v/c forhold for blandingerne ses at variere mellem 0,52 og 0,61. Resultatet for det faktiske v/c forhold for blandingerne med 30 % underbygger hypotesen om, at absorptionsevnen for RCA i 4-8 mm fraktionen er undervurderet. Det ses at RCA30\_4-8 har et lavere v/c forhold end RCA30\_8-16. På grund af usikkerheden omkring sandets vandindhold kan det samme ikke ses for blandingerne med 15 % RCA.



Figur 31 – Korrigerede trykstyrker til sammenligning af RCA's påvirkning af trykstyrken

Den korrigerede styrke kan nu bruges til at vurdere RCA's indflydelse på trykstyrken, da der ved korrektionen ses bort fra forskelle i den målte trykstyrke som skyldes forskellige v/c forhold (figur 31).

På baggrund af et 95 % signifikansniveau findes nu, at de gennemsnitlige trykstyrker for hver blanding med RCA er tilsyneladende signifikant lavere end REF på nær RCA30\_4-8\_8-16 ved brug af "two sample t-test" (Brockhoff et al., 2017). Det vil sige, at ved en simplificeret korrektion for prøvernes faktiske v/c forhold er det nu muligt at estimere, hvilken indflydelse RCA har på trykstyrken. Af figur 31 ses det, kombineret med t-test, at betonen bliver svagere ved brug af RCA. Der er dog ikke nogen betydelig forskel på, om der bruges 15 % eller 30 % RCA, men prøverne med 50% RCA bliver tydeligt svagere.

Ved sammenligning af resultaterne fra figur 31, er ikke nogen tydelig forskel i brugen af 4-8 mm fraktionen af RCA og 8-16 mm fraktionen. Den korrigerede trykstyrke for RCA15\_4-8 med 15 % RCA er højere end RCA15\_8-16, mens den korrigerede trykstyrke for RCA30\_8-16 er højere end RCA30\_4-8 for 30 % RCA. Den indbyrdes forskel er dog meget lille, og kombineret med forbehold for at dette er en estimeret trykstyrke, er det ikke muligt at konkludere at 4-8 mm fraktionen af RCA resultere i en svagere trykstyrke end 8-16 mm fraktionen. Havde der været benyttet et større datasæt, havde man måske kunne se en forskel.

Det er fundet, at tilslaget ikke pakkes jævnt i betonen, eftersom det er en generel tendens, at densiteten for bundskiven af cylinderen er højere end densiteten for topskiven (figur 28). Dette gælder både 100 % NA og RCA erstatningerne. En tilsvarende tendens blev fundet for porøsiteten af betonen, som viste, at porøsiteten af betonen er højest i toppen af cylinderen og lavest i bunden, hvilket stemmer overens med de fundne resultater for densiteten af betonen (figur 27). Disse resultater bevirker at betonen får en inhomogen struktur, når det fine, og lettere materialer søger mod toppen af cylinderen under komprimeringen. Dette kan skyldes den valgte sammensætning af tilslaget. Den sammensatte sigtekurve i figur 22 viste, at der var for meget fint materiale i den valgte sammensætning i forhold til Fullers idealkurve. Sætmålet vurderes ikke at have indflydelse på afvigelserne i densiteten for den enkelte cylinder. RCA15\_4-8 har de største afvigelser i densiteten, men har et mindre sætmål end RCA15\_4-8\_8-16 som har den mindste afvigelse i densiteten.

Alle værdierne for det målte luftindhold ses at ligge på maksimalt 2 % for den våde beton og der er kun en meget lille forskel i de målte luftindhold blandingerne imellem (figur 24). Dette kan være forklaringen på, at det ikke er muligt at se en klar tendens til at øget luftindhold i den våde beton giver en øget porøsitet af den hærdede beton og derved en lavere densitet. Da alle prøvernes porøsitet ligger inde for tabelværdien, må det formodes, at RCA i de benyttede mængder ikke påvirker betones gennemsnitlige porøsitet. Det er heller ikke muligt at konkludere at betonen bliver mere porøs med større indhold af RCA som Omary et al. (2016) finder. Dette kan skyldes, at porøsiteten af det benyttede RCA ikke er stor nok til, at der ses en forskel fra NA.

## Konklusion

Resultaterne af dette projekt viser overordnet, at det er muligt at erstatte NA op til 50% RCA i deres aktuelle tilstand i fraktionerne 4-8 mm og 8-16 mm, uden vandmætning og stadig opnå en acceptabel bearbejdelighed, hvis der tages højde for det aktuelle vandindhold og absorption af tilslaget. Der er dog behov for en mere sikker og standardiseret metode til bestemmelse af absorptionsevne, da der er mange usikkerheder forbundet med metoden benyttet i dette projekt. I forhold til RCA's geometriske egenskaber, ses den kantede kornform at få mere indflydelse jo større mængde NA der erstattes med RCA.

Det kan konkluderes, at den højere absorptionsevne for RCA som bl.a. kommer til udtryk i lavere sætmål må skyldes indholdet af AM. På grund af usikkerheder i målingerne for absorptionsevnen af RCA, er det svært at konkludere hvor stor betydning AM har for 4-8 mm fraktionen og 8-16 mm fraktionen hver især. Der ses ikke nogen signifikant forskel i densiteten af de to fraktioner og det kan konkluderes at RCA ikke bidrager til en øget porøsitet i betonen ved 15 %, 30% og 50% erstatning af NA.

Resultaterne viser, at den øgede trykstyrke, som ses for beton støbt med RCA, er et udtryk for et lavere v/c forhold i betonen og ikke en indikation af at RCA gør betonen stærkere. I forlængelse af dette ses en svag tendens til at den korrigerede trykstyrke, for beton med 30 % RCA, er lavere for betonen støbt med 4-8 mm fraktionen sammenlignet med den korrigerede trykstyrke for betonen støbt 8-16 mm fraktionen. Overordnet må det konkluderes at det højere AM indhold i 4-8 mm fraktionen af RCA ikke påvirker de fysiske egenskaber af RCA nævneværdigt i en negativ retning.

## Referencer

2012. Cement og Beton. 20 ed. Aalborg: AALBORG PORTLAND A/S.
- BROCKHOFF, P., MØLLER, J., ANDERSEN, E., BACHER, P. & CHRISTIANSEN, L. 2017. *Introduction to Statistics at DTU*, Lyngby, DTU Compute.
- DE JUAN, M. S. & GUTIERREZ, P. A. 2009. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23, 872-877.
- DS/EN206-DK-NA 2017. Beton - Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse. Regler for anvendelse af EN 206 i Danmark.
- DS/EN933-1 2007. Metoder til prøvning af tilslags geometriske egenskaber – Del 1 : Bestemmelse af kornstørrelsesfordeling – Sigteanalyse.
- DS/EN1097-2 2010. Metoder til prøvning af tilslags mekaniske og fysiske egenskaber. Del 5: Bestemmelse af vandindhold ved tørring i ventileret ovn.
- DS/EN1097-5 2008. Metoder til prøvning af tilslags mekaniske og fysiske egenskaber. Del 5: Bestemmelse af vandindhold ved tørring i ventileret ovn.
- DS/EN12350-2 2012. Prøvning af frisk beton. Del 2: Sætmål.
- DS/EN12390 2013. Prøvning af hærdnet beton – Del 1 : Form , dimensioner og andre krav til prøvelegemer og forme.
- DS/EN12390-2 2002. Prøvning af hærdnet beton – Del 2 : Tilvirkning og lagring af prøvelegemer for styrkeprøvning.
- DS/EN12390-3 2012. Prøvning af hærdnet beton - Del 3: Prøvelegemers trykstyrke.
- GOTTFREDSSEN, F. R. & NIELSEN, A. 2006. *Bygningsmaterialer. Grundlæggende egenskaber*, Danmark, Polyteknisk Forlag.
- HANSEN, K. K. 2017. *Øvelser i byggematerialer*, Lyngby, DTU Byg.
- HANSEN, T. C. 1992. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete. Third state-of-the-art report developments 1945-1989. In: HANSEN, T. C. (ed.) *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*. First ed. London: Chapman & Hall.
- HERHOLDT, A. D., JUSTESEN, C. F. P., NEPPER-CHRISTENSEN, P. & NIELSEN, A. 1985. *Beton-Bogen*, AALBORG PORTLAND A/S.
- JENSEN, B. 2012. *Betonkonstruktioner efter DS/EN 1992-1-1*, Valby, Nyt Teknisk Forlag.
- MILJØSTYRELSEN 2015. Udredning af teknologiske muligheder for at genbruge og genanvende beton København: Miljøstyrelsen.
- MONTERO, J. & LASERNA, S. 2017. Influence of effective mixing water in recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 132, 343-352.
- MUNCH-PETERSEN, C. 2013a. 3.2 Tilslag. *Betonhåndbogen*. København: Dansk Betonforening.
- MUNCH-PETERSEN, G. 2013b. 6 Proportionering. *Betonhåndbogen*. København: Dansk Betonforening.
- OMARY, S., GHORBEL, E. & WARDEH, G. 2016. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Construction and Building Materials*, 108, 163-174.
- PEDERSEN, L. G. 2017. *Recycle of Concrete Aggregates Processing. Procedures of Recycled Aggregates*. MSc Thesis, DTU.
- PEPE, M., TOLEDO FILHO, R. D., KOENDERS, E. A. B. & MARTINELLI, E. 2016. A novel mix design methodology for Recycled Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, 122, 362-372.

- PEPE, M., TOLEDO, R. D., KOENDERS, E. A. B. & MARTINELLI, E. 2014. Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. *Construction and Building Materials*, 69, 124-132.
- TORRES, A., BRANDT, J., LEAR, K. & LIU, J. 2017. A looming tragedy of the sand commons. *Science*, 357, 970-971.
- [WWW.DST.DK](http://WWW.DST.DK). 2016. *Stigende indvinding af råstoffer* [Online]. Danmarks Statistik. Available: <https://www.dst.dk/da/Statistik/nyt/NytHtml?cid=24243> [Accessed 21.11 17].
- ZEGA, C. J., VILLAGRÁN-ZACCARDI, Y. A. & DI MAIO, A. A. 2010. Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates. *Materials and Structures*, 43, 195-202.



## Bilag 1 – Rådata

### Sigtekurver

| Sigtestørrelse | Tilbageholdt | Gennemfald | Gennemfald |
|----------------|--------------|------------|------------|
| [mm]           | [kg]         | [kg]       | [%]        |
| 32             | 0            | 9,98       | 100        |
| 16             | 1,65         | 8,33       | 83,51      |
| 8              | 5,62         | 2,72       | 27,22      |
| 4              | 1,45         | 1,27       | 12,73      |
| 2              | 0,57         | 0,71       | 7,07       |
| 1              | 0,33         | 0,38       | 3,81       |
| 0              | 0,38         | 0          | 0          |

| Tilslag       |                         | 0,125 | 0,25 | 0,5   | 1     | 2     | 4     | 8     | 16    | 32    |
|---------------|-------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NA 0-4<br>mm  | Gennemfald              | 3     | 20   | 45    | 70    | 90    | 99    | 100   | 100   | 100   |
|               | %                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |
|               | Gennemfald<br>% * andel | 1,41  | 9,40 | 21,15 | 32,90 | 42,30 | 46,53 | 47    | 47    | 47    |
| NA 4-8<br>mm  | Gennemfald              | 0     | 0    | 0     | 1     | 1     | 12    | 98    | 100   | 100   |
|               | %                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |
|               | Gennemfald<br>% * andel | 0     | 0    | 0     | 0,27  | 0,27  | 3,18  | 25,97 | 26,50 | 26,65 |
| NA 8-16<br>mm | Gennemfald              | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     | 8     | 95    | 100   |
|               | %                       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |
|               | Gennemfald<br>% * andel | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     | 2,12  | 95    | 100   |
| Sammensat     |                         | 1,41  | 9,40 | 21,15 | 33,17 | 45,57 | 49,71 | 75,09 | 98,68 | 100   |
| Fuller        |                         | 6     | 9    | 13    | 18    | 25    | 35    | 50    | 71    | 100   |

## Vandindhold

| <b>Tabel 14 - Vandindhold i RCA</b> |          |                  |                    |                   |                    |
|-------------------------------------|----------|------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
|                                     | Fraktion | Prøve før<br>[g] | Prøve efter<br>[g] | Vanindhold<br>[g] | Vandindhold<br>[%] |
| a                                   | 4-8 mm   | 200              | 195                | 5                 | 2,56               |
| b                                   | 4-8 mm   | 200              | 194                | 6                 | 3,09               |
| c                                   | 4-8 mm   | 200              | 195                | 5                 | 2,56               |
| a                                   | 8-16 mm  | 200              | 196                | 4                 | 2,04               |
| b                                   | 8-16 mm  | 200              | 196                | 4                 | 2,04               |
| c                                   | 8-16 mm  | 200              | 196                |                   | 2,04               |

| <b>Tabel 15 - Vandindhold i NA</b> |          |                  |                    |                   |                    |
|------------------------------------|----------|------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
|                                    | Fraktion | Prøve før<br>[g] | Prøve efter<br>[g] | Vanindhold<br>[g] | Vandindhold<br>[%] |
| a                                  | 4-8 mm   | 200              | 200                | 0                 | 0                  |
| b                                  | 4-8 mm   | 200              | 200                | 0                 | 0                  |
| c                                  | 4-8 mm   | 200              | 199                | 1                 | 0,50               |
| a                                  | 8-16 mm  | 200              | 199                | 1                 | 0,50               |
| b                                  | 8-16 mm  | 200              | 199                | 1                 | 0,50               |
| c                                  | 8-16 mm  | 200              | 200                | 0                 | 0                  |

| <b>Tabel 16 - Vandindhold i sand</b> |   |                  |                    |                   |                    |
|--------------------------------------|---|------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| Dato                                 |   | Prøve før<br>[g] | Prøve efter<br>[g] | Vanindhold<br>[g] | Vandindhold<br>[%] |
| 31.10.17                             | a | 200              | 198                | 2                 | 1,01               |
|                                      | b | 200              | 198                | 2                 | 1,01               |
|                                      | c | 200              | 199                | 1                 | 0,50               |
| 03.10.17                             | a | 200              | 197                | 3                 | 1,52               |
|                                      | b | 200              | 197                | 3                 | 1,52               |
|                                      | c | 200              | 207                | 3                 | 1,52               |
| 15.11.17                             | a | 200              | 194                | 6                 | 3,09               |
|                                      | b | 200              | 197                | 3                 | 1,52               |
|                                      | c | 200              | 196                | 4                 | 2,04               |
| 21.11.17                             | a | 200              | 196                | 4                 | 2,04               |

|  |   |     |     |   |      |
|--|---|-----|-----|---|------|
|  | b | 200 | 198 | 2 | 1,01 |
|  | c | 200 | 197 | 3 | 1,52 |

## Absorption

| Tabel 17 – Absorptionsevne for RCA og sand |    |                   |                  |                   |                   |
|--|----|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Fraktion                                   |    | Prøve vot.<br>[g] | Prøve tør<br>[g] | Absorption<br>[g] | Absorption<br>[%] |
| Sand (NA)                                  | a  | 200,07            | 199,60           | 0,46              | 0,23              |
|  | b  | 200,15            | 197,68           | 0,47              | 0,24              |
|  | c  | 200,01            | 199,68           | 0,33              | 0,17              |
| 4-8 mm<br>(RCA)                            | a  | 153,30            | 150              | 3,3               | 1,52              |
|  | b  | 153,40            | 150              | 3,4               | 1,52              |
|  | c  | 153,80            | 150              | 3,8               | 1,52              |
| 8-16 mm<br>(RCA)                           | a  | 156,30            | 150              | 4,20              | 3,09              |
|  | b* | -                 | -                | -                 | -                 |
|  | c  | 155,80            | 150              | 3,53              | 2,04              |

\*Prøveresultat mangler. Dette resultat var en outlier, og er af uforklarlige årsager ikke blevet noteret.

## Densitet af RCA

**Tabel 18 – Densitet for RCA 4-8 mm**

|                                       |                  |                  |                   | 1           | 2           | 3           |
|---------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Fra kalibrering af pyknometer</b>  |                  |                  |                   |             |             |             |
| Pyknometer nummer                     |                  |                  |                   | 40          | 20          | 30          |
| Pykn. + prop (tomt)                   |                  | m <sub>0</sub>   | g                 | 363,67      | 365,14      | 363,19      |
| Pykn. + prop (vandfyldt)              | W <sub>2</sub>   | m <sub>1</sub>   | g                 | 944,15      | 946,1       | 943,06      |
| Temperatur ved kalibrering            | T <sub>k</sub>   | T <sub>1</sub>   | °C                | 22          | 22          | 22          |
| Densitet af vand ved T <sub>k</sub> * | ρ <sub>w,k</sub> | ρ <sub>w,1</sub> | g/cm <sup>3</sup> | 0,9978      | 0,9978      | 0,9978      |
| <b>Måling</b>                         |                  |                  |                   |             |             |             |
| Pykn.+ prop + jord                    |                  | m <sub>2</sub>   | g                 | 513,6       | 515,3000    | 512,7       |
| Pykn.+ prop + jord + vand             | W <sub>1</sub>   | m <sub>3</sub>   | g                 | 1038        | 1034,5      | 1036        |
| Temperatur                            | T                | T <sub>3</sub>   | °C                | 20          | 20          | 20          |
| Densitet af vand ved T *              | ρ <sub>w,t</sub> | ρ <sub>w,3</sub> | g/cm <sup>3</sup> | 0,99823     | 0,99823     | 0,99823     |
| Jord - masse                          | W <sub>s</sub>   | m <sub>4</sub>   | g                 | 149,93      | 150,16      | 149,51      |
| Jord - volumen                        | V <sub>s</sub>   |                  | cm <sup>3</sup>   | 56,43003791 | 62,12031656 | 56,92064341 |
| Korndensitet                          | ρ <sub>s</sub>   | ρ <sub>s</sub>   | g/cm <sup>3</sup> | 2,656918293 | 2,417244604 | 2,626639318 |
| Resultat - middel                     | ρ <sub>s</sub>   | ρ <sub>s</sub>   | g/cm <sup>3</sup> | 2,5669      |             |             |

**Tabel 19- Densitet for RCA 8-16 mm**

|                                      |              |              |                   | 1             | 2           | 3           |
|--------------------------------------|--------------|--------------|-------------------|---------------|-------------|-------------|
| <b>Fra kalibrering af pyknometer</b> |              |              |                   |               |             |             |
| Pyknometer nummer                    |              |              |                   | 40            | 20          | 30          |
| Pykn. + prop (tomt)                  |              | $m_0$        | g                 | 363,67        | 365,14      | 363,19      |
| Pykn. + prop (vandfyldt)             | $W_2$        | $m_1$        | g                 | 944,15        | 946,1       | 943,06      |
| Temperatur ved kalibrering           | $T_k$        | $T_1$        | °C                | 22            | 22          | 22          |
| Densitet af vand ved $T_k$ *         | $\rho_{w,k}$ | $\rho_{w,1}$ | g/cm <sup>3</sup> | 0,9978        | 0,9978      | 0,9978      |
| <b>Måling</b>                        |              |              |                   |               |             |             |
| Pykn.+ prop + jord                   |              | $m_2$        | g                 | 513,6         | 515,3000    | 512,7       |
| Pykn.+ prop + jord + vand            | $W_1$        | $m_3$        | g                 | 1033,8        | 1037,1      | 1033,7      |
| Temperatur                           | $T$          | $T_3$        | °C                | 20            | 20          | 20          |
| Densitet af vand ved $T$ *           | $\rho_{w,t}$ | $\rho_{w,3}$ | g/cm <sup>3</sup> | 0,99823       | 0,99823     | 0,99823     |
| Jord - masse                         | $W_s$        | $m_4$        | g                 | 149,93        | 150,16      | 149,51      |
| Jord - volumen                       | $V_s$        |              | cm <sup>3</sup>   | 60,63748509   | 59,5157064  | 59,22472162 |
| Korndensitet                         | $\rho_s$     | $\rho_s$     | g/cm <sup>3</sup> | 2,472562966   | 2,523031467 | 2,524452558 |
| Resultat - middel                    | $\rho_s$     | $\rho_s$     | g/cm <sup>3</sup> | <b>2,5067</b> |             |             |

Cementindhold (AM) i RCA

| <b>Tabel 20 – Cementindhold (AM) i RCA</b> |   |                    |                     |                      |                      |
|--|---|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Fraktion                                   |   | Prøve ubeh.<br>[g] | Tørvægt beh.<br>[g] | Cementindhold<br>[g] | Cementindhold<br>[%] |
| 4-8 mm                                     | a | 20,04              | 14,84               | 5,20                 | 35,00                |
|  | b | 20,06              | 15,95               | 4,11                 | 25,77                |
|  | c | 20,07              | 16,36               | 3,71                 | 22,68                |
| 8-16 mm                                    | a | 50,00              | 41,17               | 8,83                 | 21,45                |
|  | b | 50,06              | 44,14               | 5,92                 | 13,41                |
|  | c | 50,08              | 44,31               | 5,77                 | 13,02                |

## LA-koefficienter

| <b>Tabel 21 – LA-koefficienter</b> |   |                  |                           |                     |                 |
|------------------------------------|---|------------------|---------------------------|---------------------|-----------------|
| Fraktion                           |   | Prøve før<br>[g] | Prøve tilbageholdt<br>[g] | Prøve mistet<br>[g] | LA-koeff<br>[-] |
| NA 4-8 mm                          | a | 1500             | 1097,23                   | 402,77              | 26,85           |
|                                    | b | 1500             | 1082,75                   | 418,25              | 27,88           |
| NA 8-16 mm                         | a | 1500             | 961,53                    | 538,47              | 35,90           |
|                                    | b | 1500             | 976,50                    | 523,50              | 34,90           |
| RCA 4-8 mm                         | a | 1500             | 952,95                    | 547,05              | 36,47           |
|                                    | b | 1500             | 973,65                    | 526,35              | 35,09           |
| RCA 8-16 mm                        | a | 1500             | 659,36                    | 840,65              | 56,04           |
|                                    | b | 1500             | 686,81                    | 813,19              | 54,21           |

## Dimensioner og trykstyrker af prøvecylindre

H og D er den gennemsnitlige højde og diameter målt 3 steder.

| <b>Tabel 22 – REF, dimensioner og trykstyrker</b> |           |           |                                      |                  |                     |              |
|---|-----------|-----------|--------------------------------------|------------------|---------------------|--------------|
| <b>7 dage</b>                                     |           |           |                                      |                  |                     |              |
| Prøve   | H<br>[mm] | D<br>[mm] | Tværsnitsareal<br>[mm <sup>2</sup> ] | Brudlast<br>[KN] | Trykstyrke<br>[MPa] | Vægt<br>[kg] |
| a   | 200,33    | 100,00    | 7853,98                              | 172              | 21,90               | 3,69         |
| b   | 200,00    | 100,00    | 7853,98                              | 181              | 23,05               | 3,68         |
| c   | 200,00    | 99,66     | 7801,71                              | 181              | 23,20               | 3,69         |
| d   | 199,00    | 100,00    | 7906,43                              | 177              | 22,39               | 3,68         |
| <b>28 dage</b>                                    |           |           |                                      |                  |                     |              |
| a   | 199,33    | 100,00    | 7853,98                              | 235              | 29,92               | 3,69         |
| b   | 200,00    | 99,00     | 7697,69                              | 233              | 30,27               | 3,68         |
| c   | 200,00    | 99,33     | 7749,61                              | 231              | 29,81               | 3,68         |

| <b>Tabel 22 – RCA15_4-8, dimensioner og trykstyrker</b> |           |           |                                      |                  |                     |              |
|---|-----------|-----------|--------------------------------------|------------------|---------------------|--------------|
| <b>7 dage</b>   |           |           |                                      |                  |                     |              |
| Prøve   | H<br>[mm] | D<br>[mm] | Tværsnitsareal<br>[mm <sup>2</sup> ] | Brudlast<br>[KN] | Trykstyrke<br>[MPa] | Vægt<br>[kg] |

|                |        |        |         |     |       |      |
|----------------|--------|--------|---------|-----|-------|------|
| a              | 199,83 | 99,80  | 7827,82 | 161 | 20,57 | 3,65 |
| b              | 199,00 | 99,66  | 7801,71 | 161 | 20,64 | 3,66 |
| c              | 200,00 | 100,00 | 7853,99 | 163 | 20,75 | 3,66 |
| d              | 200,00 | 100,00 | 7801,71 | 175 | 22,43 | 3,66 |
| <b>28 dage</b> |        |        |         |     |       |      |
| a              | 200,00 | 99,67  | 7801,71 | 216 | 27,69 | 3,66 |
| b              | 200,00 | 100,00 | 7853,98 | 217 | 27,63 | 3,67 |
| c              | 199,33 | 99,00  | 7697,69 | 221 | 28,71 | 3,67 |

| <b>Tabel 23 – RCA15_8-16, dimensioner og trykstyrker</b> |           |           |                                      |                  |                     |              |
|--|-----------|-----------|--------------------------------------|------------------|---------------------|--------------|
| <b>7 dage</b>  |           |           |                                      |                  |                     |              |
| Prøve  | H<br>[mm] | D<br>[mm] | Tværsnitsareal<br>[mm <sup>2</sup> ] | Brudlast<br>[KN] | Trykstyrke<br>[MPa] | Vægt<br>[kg] |
| a  | 199,83    | 99,55     | 7775,64                              | 186              | 23,92               | 3,66         |
| b  | 199,17    | 100,00    | 7853,98                              | 188              | 23,94               | 3,64         |
| c  | 200,00    | 100,00    | 7853,98                              | 195              | 24,83               | 3,65         |
| d  | 199,67    | 99,33     | 7749,61                              | 120              | 15,48               | 3,68         |
| <b>28 dage</b>   |           |           |                                      |                  |                     |              |
| a  | 200,66    | 99,33     | 7749,61                              | 223              | 28,78               | 3,65         |
| b  | 200,00    | 99,33     | 7749,61                              | 238              | 30,71               | 3,68         |
| c  | 200,00    | 100,00    | 7853,98                              | 250              | 31,83               | 3,66         |

| <b>Tabel 24 – RCA15_4-8_8-16, dimensioner og trykstyrker</b> |           |           |                                      |                  |                     |              |
|--|-----------|-----------|--------------------------------------|------------------|---------------------|--------------|
| <b>7 dage</b>  |           |           |                                      |                  |                     |              |
| Prøve  | H<br>[mm] | D<br>[mm] | Tværsnitsareal<br>[mm <sup>2</sup> ] | Brudlast<br>[KN] | Trykstyrke<br>[MPa] | Vægt<br>[kg] |
| a  | 199,00    | 99,33     | 7749,61                              | 158              | 20,39               | 3,61         |
| b  | 201,00    | 100,00    | 7853,98                              | 156              | 19,86               | 3,61         |
| c  | 199,66    | 99,66     | 7801,71                              | 160              | 20,51               | 3,61         |
| d  | 200,00    | 99,66     | 7801,71                              | 161              | 20,64               | 3,62         |
| <b>28 dage</b>   |           |           |                                      |                  |                     |              |
| a  | 200,00    | 99,66     | 7801,71                              | 211              | 27,05               | 3,64         |
| b  | 200,00    | 100,00    | 7853,98                              | 213              | 27,12               | 3,63         |
| c  | 200,00    | 99,00     | 7697,69                              | 215              | 27,93               | 3,61         |

| <b>Tabel 25 – RCA30_4-8, dimensioner og trykstyrker</b> |           |           |                                      |                  |                     |              |
|---|-----------|-----------|--------------------------------------|------------------|---------------------|--------------|
| <b>7 dage</b>   |           |           |                                      |                  |                     |              |
| Prøve   | H<br>[mm] | D<br>[mm] | Tværsnitsareal<br>[mm <sup>2</sup> ] | Brudlast<br>[KN] | Trykstyrke<br>[MPa] | Vægt<br>[kg] |
| a   | 200,00    | 100,00    | 7853,98                              | 202              | 25,72               | 3,63         |
| b   | 200,33    | 100,00    | 7853,98                              | 202              | 25,72               | 3,64         |
| c   | 200,00    | 100,00    | 7853,98                              | 200              | 25,46               | 3,63         |
| d   | 200,00    | 100,33    | 7906,43                              | 204              | 25,80               | 3,64         |
| <b>28 dage</b>  |           |           |                                      |                  |                     |              |
| a   | 200,00    | 100,00    | 7853,98                              | 275              | 35,01               | 3,65         |
| b   | 200,00    | 100,00    | 7853,98                              | 270              | 34,38               | 3,65         |
| c   | 200,00    | 100,00    | 7853,98                              | 266              | 33,87               | 3,64         |

| <b>Tabel 26 – RCA30_8-16, dimensioner og trykstyrker</b> |           |           |                                      |                  |                     |              |
|--|-----------|-----------|--------------------------------------|------------------|---------------------|--------------|
| <b>7 dage</b>  |           |           |                                      |                  |                     |              |
| Prøve  | H<br>[mm] | D<br>[mm] | Tværsnitsareal<br>[mm <sup>2</sup> ] | Brudlast<br>[KN] | Trykstyrke<br>[MPa] | Vægt<br>[kg] |
| a  | 199,00    | 100,00    | 7853,98                              | 169              | 21,52               | 3,63         |
| b  | 201,00    | 100,00    | 7853,98                              | 180              | 22,92               | 3,65         |
| c  | 199,33    | 100,00    | 7853,98                              | 169              | 21,52               | 3,61         |
| d  | 200,00    | 99,33     | 7749,61                              | 186              | 24,00               | 3,64         |
| <b>28 dage</b>   |           |           |                                      |                  |                     |              |
| a  | 200,00    | 100,00    | 7853,98                              | 249              | 31,70               | 3,65         |
| b  | 199,33    | 99,66     | 7801,71                              | 247              | 31,66               | 3,61         |
| c  | 199,66    | 99,66     | 7801,71                              | 252              | 32,30               | 3,63         |

| <b>Tabel 27 – RCA30_4-8_8-16, dimensioner og trykstyrker</b> |           |           |                                      |                  |                     |              |
|--|-----------|-----------|--------------------------------------|------------------|---------------------|--------------|
| <b>7 dage</b>  |           |           |                                      |                  |                     |              |
| Prøve  | H<br>[mm] | D<br>[mm] | Tværsnitsareal<br>[mm <sup>2</sup> ] | Brudlast<br>[KN] | Trykstyrke<br>[MPa] | Vægt<br>[kg] |
| a  | 200,00    | 100,00    | 7853,98                              | 171              | 21,77               | 3,63         |
| b  | 200,70    | 100,00    | 7853,98                              | 161              | 20,50               | 3,61         |
| c  | 200,00    | 99,66     | 7801,71                              | 181              | 23,20               | 3,62         |

|                |        |        |         |     |       |      |
|----------------|--------|--------|---------|-----|-------|------|
| d              | 200,33 | 99,66  | 7801,71 | 167 | 21,41 | 3,63 |
| <b>28 dage</b> |        |        |         |     |       |      |
| a              | 200,33 | 100,00 | 7853,98 | 252 | 32,09 | 3,63 |
| b              | 199,00 | 100,00 | 7853,98 | 241 | 30,69 | 3,61 |
| c              | 200,06 | 100,00 | 7853,98 | 238 | 30,30 | 3,64 |

| <b>Tabel 28 – RCA50_4-8_8-16, dimensioner og trykstyrker</b> |           |           |                                      |                  |                     |              |
|--|-----------|-----------|--------------------------------------|------------------|---------------------|--------------|
| <b>7 dage</b>  |           |           |                                      |                  |                     |              |
| Prøve  | H<br>[mm] | D<br>[mm] | Tværsnitsareal<br>[mm <sup>2</sup> ] | Brudlast<br>[KN] | Trykstyrke<br>[MPa] | Vægt<br>[kg] |
| a  | 200,00    | 99,66     | 7801,71                              | 191              | 24,48               | 3,61         |
| b  | 199,00    | 100,00    | 7853,98                              | 174              | 22,15               | 3,59         |
| c  | 200,00    | 100,00    | 7853,98                              | 196              | 24,96               | 3,61         |
| d  | 200,00    | 100,00    | 7853,98                              | 187              | 23,81               | 3,62         |
| <b>28 dage</b>   |           |           |                                      |                  |                     |              |
| a  | 200,00    | 100,00    | 7853,98                              | 243              | 30,94               | 3,60         |
| b  | 199,00    | 99,66     | 7801,71                              | 259              | 33,20               | 3,60         |
| c  | 199,33    | 100,00    | 7853,98                              | 242              | 30,81               | 3,59         |

#### Porøsitet og densitet af hærdet beton

| <b>Tabel 29 – REF, porøsitet og densitet af hærdet beton</b> |         |             |          |             |
|--|---------|-------------|----------|-------------|
|  |         | T           | M        | B           |
| m50  | [kg]    | 0,1714      | 0,18116  | 0,13731     |
| mssd   | [kg]    | 0,1842      | 0,19303  | 0,14533     |
| msw  | [kg]    | 0,10548     | 0,11165  | 0,08491     |
| V  | [m3]    | 7,8862E-05  | 8,2E-05  | 6,0529E-05  |
| Vpå  | [m3/m3] | 1,28231E-05 | 1,2E-05  | 8,03446E-06 |
| på   | [m3/m3] | 0,162601626 | 1,46E-01 | 0,132737504 |
| pd   | [kg/m3] | 2173,418191 | 2222,09  | 2268,501192 |
| pf   | [kg/m3] | 2595,441141 | 2601,55  | 2615,703092 |



| <b>Tabel 30 - RCA15_4-8, porøsitet og densitet</b> |         |             |             |             |
|--|---------|-------------|-------------|-------------|
|  |         | T           | M           | B           |
| m50  | [kg]    | 0,14815     | 0,13976     | 0,23868     |
| mssd   | [kg]    | 0,16009     | 0,14879     | 0,25109     |
| msw  | [kg]    | 0,09106     | 0,08639     | 0,14753     |
| V  | [m3]    | 6,91545E-05 | 6,25125E-05 | 0,000103747 |
| Vpå  | [m3/m3] | 1,19615E-05 | 9,04628E-06 | 1,24324E-05 |
| På   | [m3/m3] | 0,172968275 | 0,144711538 | 0,119833913 |
| pd   | [kg/m3] | 2142,30523  | 2235,712051 | 2300,602317 |
| pf   | [kg/m3] | 2590,35     | 2613,99     | 2613,83     |
|  |         |             |             |             |

| <b>Tabel 31 - RCA15_8-16, porøsitet og densitet</b> |         |             |             |             |
|---|---------|-------------|-------------|-------------|
|   |         | T           | M           | B           |
| m50   | [kg]    | 0,17472     | 0,16184     | 0,17722     |
| mssd  | [kg]    | 0,18769     | 0,17302     | 0,18765     |
| msw   | [kg]    | 0,10714     | 0,09966     | 0,1095      |
| V   | [m3]    | 8,06953E-05 | 7,34923E-05 | 7,82909E-05 |
| Vpå   | [m3/m3] | 1,29934E-05 | 1,12002E-05 | 1,04488E-05 |
| På  | [m3/m3] | 0,161018001 | 0,152399128 | 0,133461292 |
| pd  | [kg/m3] | 2165,183166 | 2202,135878 | 2263,608496 |
| pf  | [kg/m3] | 2580,73     | 2598,08     | 2612,24     |

| <b>Tabel 32 - RCA15_4-8_8-16, porøsitet og densitet</b> |         |             |             |             |
|---|---------|-------------|-------------|-------------|
|   |         | T           | M           | B           |
| m50   | [kg]    | 0,17285     | 0,18656     | 0,21993     |
| mssd  | [kg]    | 0,18551     | 0,20031     | 0,23506     |
| msw   | [kg]    | 0,10651     | 0,11486     | 0,13561     |
| V   | [m3]    | 7,91425E-05 | 8,56041E-05 | 9,96293E-05 |
| Vpå   | [m3/m3] | 1,26828E-05 | 1,37748E-05 | 1,51573E-05 |
| på  | [m3/m3] | 0,160253165 | 0,160912815 | 0,152136752 |
| pd  | [kg/m3] | 2184,036329 | 2179,33519  | 2207,482413 |
| pf  | [kg/m3] | 2600,83     | 2597,27     | 2603,58     |

| <b>Tabel 33 - RCA30_4-8, porøsitet og densitet</b> |                                   |             |             |             |
|--|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|  |                                   | T           | M           | B           |
| m50  | [kg]                              | 0,20334     | 0,22713     | 0,28367     |
| mssd   | [kg]                              | 0,21735     | 0,24153     | 0,2991      |
| m <sub>sw</sub>                                    | [kg]                              | 0,12508     | 0,14029     | 0,17484     |
| V  | [m <sup>3</sup> ]                 | 9,24364E-05 | 0,000101423 | 0,000124484 |
| V <sub>på</sub>                                    | [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] | 1,40353E-05 | 1,4426E-05  | 1,54578E-05 |
| p <sub>på</sub>                                    | [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] | 0,151837    | 0,14223627  | 0,124175117 |
| p <sub>d</sub>                                     | [kg/m <sup>3</sup> ]              | 2199,783115 | 2239,442572 | 2278,765443 |
| p <sub>f</sub>                                     | [kg/m <sup>3</sup> ]              | 2593,59     | 2610,79     | 2601,85     |

| <b>Tabel 34 - RCA30_8-16, porøsitet og densitet</b> |                                   |             |             |             |
|---|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|   |                                   | T           | M           | B           |
| m50   | [kg]                              | 0,1844      | 0,25358     | 0,26278     |
| mssd  | [kg]                              | 0,19842     | 0,2709      | 0,28112     |
| m <sub>sw</sub>                                     | [kg]                              | 0,11328     | 0,15643     | 0,16188     |
| V   | [m <sup>3</sup> ]                 | 8,52935E-05 | 0,000114676 | 0,000119455 |
| V <sub>på</sub>                                     | [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] | 1,40453E-05 | 1,73512E-05 | 1,83731E-05 |
| p <sub>på</sub>                                     | [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] | 0,164669955 | 0,151306019 | 0,153807447 |
| p <sub>d</sub>                                      | [kg/m <sup>3</sup> ]              | 2161,945971 | 2211,265449 | 2199,823851 |
| p <sub>f</sub>                                      | [kg/m <sup>3</sup> ]              | 2588,13     | 2605,49     | 2599,67     |

| <b>Tabel 35 - RCA30_4-8_8-16, porøsitet og densitet</b> |                                   |             |             |             |
|---|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|   |                                   | T           | M           | B           |
| m50   | [kg]                              | 0,22673     | 0,22556     | 0,14545     |
| mssd  | [kg]                              | 0,24273     | 0,24142     | 0,15483     |
| m <sub>sw</sub>   | [kg]                              | 0,13949     | 0,139       | 0,08973     |
| V   | [m <sup>3</sup> ]                 | 0,000103426 | 0,000102605 | 6,52174E-05 |
| V <sub>på</sub>   | [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] | 1,60289E-05 | 1,58886E-05 | 9,39691E-06 |
| p <sub>på</sub>   | [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] | 0,15497869  | 0,154852568 | 0,144086022 |
| p <sub>d</sub>  | [kg/m <sup>3</sup> ]              | 2192,191844 | 2198,34009  | 2230,233333 |
| p <sub>f</sub>  | [kg/m <sup>3</sup> ]              | 2594,24     | 2601,13     | 2605,67     |

| <b>Tabel 35 - RCA50_4-8_8-16, porøsitet og densitet</b> |                                   |             |             |             |
|---|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|   |                                   | T           | M           | B           |
| m50   | [kg]                              | 0,21836     | 0,22040     | 0,23568     |
| mssd  | [kg]                              | 0,23518     | 0,23666     | 0,25101     |
| msw   | [kg]                              | 0,13394     | 0,1354      | 0,14519     |
| V   | [m <sup>3</sup> ]                 | 0,000101423 | 0,000101443 | 0,000106011 |
| Vpå   | [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] | 1,68503E-05 | 1,62893E-05 | 1,53576E-05 |
| på  | [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] | 0,166139866 | 0,160576733 | 0,144868645 |
| pd  | [kg/m <sup>3</sup> ]              | 2152,972659 | 2172,657318 | 2223,169306 |
| pf  | [kg/m <sup>3</sup> ]              | 2581,93     | 2588,27     | 2599,80     |

## Bilag 2 – Tabeller benyttet i betonrecepten

### Dimensionerende vandbehov

Tabel 10 – Dimensioneret vandbehov ud fra stentype, maksimal stenstørrelse samt ønsket sætmål (Munch-Petersen, 2013b)

| Tilslag                          |                 | Vandbehov [ $l/m^3$ ] |                       |                 |                       |                 |                       |
|----------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|
|                                  |                 | Sætmål [mm]           |                       |                 |                       |                 |                       |
|                                  |                 | 0-30                  | 30-60                 |                 | 60-100                |                 | 100-150               |
| $d_{max}$                        | Type            | Naturligt luftindhold | Naturligt luftindhold | Indblandet luft | Naturligt luftindhold | Indblandet luft | Naturligt luftindhold |
| 16 mm<br>(Indblandet luft ~ 6 %) | Sømaterialer    | 148                   | 165                   | 160             | 175                   | 170             | 183                   |
|                                  | Bakkematerialer | 152                   | 170                   | 165             | 180                   | 175             | 188                   |
|                                  | Skærver         | 166                   | 186                   | 180             | 197                   | 191             | 206                   |
| 32 mm<br>(Indblandet luft ~ 4 %) | Sømaterialer    | 137                   | 153                   | 151             | 162                   | 160             | 169                   |
|                                  | Bakkematerialer | 141                   | 158                   | 156             | 167                   | 164             | 175                   |
|                                  | Skærver         | 154                   | 173                   | 170             | 183                   | 180             | 192                   |
| 64 mm<br>(Indblandet luft ~ 3 %) | Sømaterialer    | 130                   | 145                   | 145             | 154                   | 154             | 161                   |
|                                  | Bakkematerialer | 135                   | 151                   | 151             | 160                   | 160             | 167                   |
|                                  | Skærver         | 148                   | 165                   | 165             | 175                   | 175             | 183                   |

Vandbehovet er beregnet under forudsætning af, at tilslagene er i vandmættet, overfladetør tilstand. Hvis sand og sten er af forskellig type, bestemmes vandbehovet som et vægtet gennemsnit, idet vandbehovet svarende til sandtypen vægtes med  $\frac{2}{3}$ , vandbehovet svarende til stentypen med  $\frac{1}{3}$ .

### Sandprocent

Tabel 11 – Sandprocenten ud fra cementindhold og største stenstørrelse (Munch-Petersen, 2013b)

| Cementindhold [ $Kg/m^3$ ] | Sandprocent                |    |    |    |    |
|----------------------------|----------------------------|----|----|----|----|
|                            | Største kornstørrelse [mm] |    |    |    |    |
|                            | 8                          | 12 | 16 | 32 | 64 |
| 150                        | 69                         | 56 | 51 | 42 | 40 |
| 200                        | 68                         | 55 | 50 | 41 | 39 |
| 250                        | 67                         | 54 | 49 | 40 | 38 |
| 300                        | 66                         | 53 | 47 | 38 | 36 |
| 350                        | 65                         | 51 | 45 | 36 | 34 |
| 400                        | 63                         | 49 | 43 | 34 | 32 |
| 450                        | 61                         | 47 | 41 | 32 | 30 |

# Bilag 3 – Varedeklarationer for NA

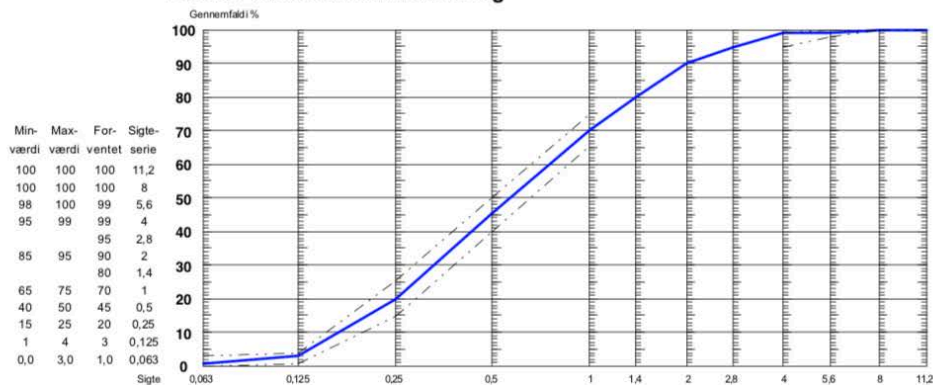
Søsand 0-4 mm



## VAREDEKLARATION - BETON

| Leverandør<br><b>NCC Roads A/S, Råstoffer</b><br>RN Sten & Grus<br>Stamholmen 225 | Deklaration nr<br><b>14013-22-3 - BETON</b>         | Gyldig fra<br><b>13-04-11</b>       | Erstatter<br><b>01-12-08</b> |
|---|---|-------------------------------------|------------------------------|
| Produktionssted<br><b>RN Sten &amp; Grus</b><br>Stamholmen 225<br>2650 Hvidovre   | Produktbetegnelse<br><b>0/4 mm betonsand, kl. E</b> | Produktbeskrivelse<br><b>Søsand</b> |                              |
| Attesteringsmetode<br><b>Princip 2: Rullende kontrol</b>                          |   |                                     |                              |
| Egenskab/prøvningsmetode  | Forventet værdi                                     | Min værdi                           | Max værdi                    |
| EN 1097-6 Korndensitet - VOT (Mg/m <sup>3</sup> )                                 | 2,62  | 2,58                                | 2,66                         |
| EN 1097-6 Absorbtion (%)  | 0,2   | 0,1                                 | 0,4                          |
| DS/EN 1744 Chloridindhold (%) (Quantab)   | 0,014   |                                     | 0,020                        |
| Ækvivalent alkalinhold (%)  | 0,012   |                                     | 0,020                        |
| DS/EN 1744 Humusindhold   | Lysere  |                                     | Lysere                       |
| TK-84 Kemisk svind (ml/kg)  | 0,08  |                                     | 0,20                         |

### EN 933-1 Kornstørrelsesfordeling



*Ulla Hansen*

Ulla Hansen, Laborant

Bemærkninger  
Kategori Gr85, f3

CE-mærkning: www.tilslag.dk



FPC er Certificeret af Dancert under notificeringsnr. 1073 (2+).  
Produktet opfylder krav i overensstemmelse med DS/EN 12620 og DS 2426.

NCC Roads A/S, Råstoffer  
Laboratorie: Avedøre  
Stamholmen 225  
2650 Hvidovre

Telefon nr  
36780500  
Fax nummer  
36780200

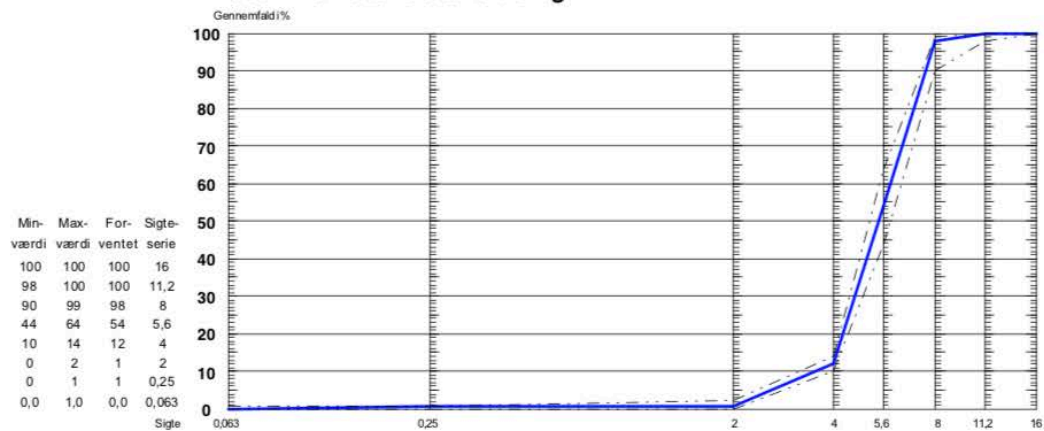
Søsten 4-8 mm



VAREDEKLARATION - BETON

|  |  |                               |                              |
|--|--|-------------------------------|------------------------------|
| Leverandør<br><b>NCC Roads A/S, Råstoffer</b><br><b>RN Sten &amp; Grus</b><br><b>Stamholmen 225</b><br>Produktionssted<br><b>RN Sten &amp; Grus</b><br><b>Stamholmen 225</b><br><b>2650 Hvidovre</b> | Deklaration nr<br><b>14021-22-3 - BETON</b>  | Gyldig fra<br><b>01-05-11</b> | Erstatter<br><b>15-04-10</b> |
|  | Produktbetegnelse<br><b>4/8 mm perlesten kl. M.</b><br>Produktbeskrivelse<br><b>Jiggede søsten</b><br>Attesteringsmetode<br><b>Princip 2: Rullende kontrol</b> |                               |                              |
| Egenskab/prøvningsmetode   | Forventet værdi  | Min værdi                     | Max værdi                    |
| EN 1097-6 Korndensitet - VOT (Mg/m <sup>3</sup> )  | 2,61   | 2,57                          | 2,65                         |
| EN 1097-6 Absorbtion (%)   | 0,8  | 0,6                           | 1,0                          |
| DS/EN 1744 Chloridindhold (%) ( Quantab )  | 0,003  |                               | 0,014                        |
| Ækvivalent alkaliindhold (%)   | 0,003  |                               | 0,012                        |
| DS/EN 933-5 Totalt knust, >90% o.f.knust(%)  | 24   |                               | 25                           |
| DS/EN 933-4 Formindex (%)  | 9  |                               | 20                           |
| DS 405.4 Indhold af lette korn - < 2400 (%)  | 2,0  |                               | 5,0                          |
| DS 405.4 Indhold af lette korn - < 2200 (%)  | 0,9  |                               | 1,0                          |
| TI-B 75 Kritisk absorption (%)   | 0,9  |                               | 2,5                          |

EN 933-1 Kornstørrelsesfordeling



*Ulla Hansen*

Ulla Hansen, Laborant

Bemærkninger

Kategori G<sub>c</sub>85/20, G<sub>T</sub>15, f<sub>i</sub>5

CE-mærkning: www.tilslag.dk



FPC er Certificeret af Dancert under notificeringsnr. 1073 (2+).  
 Produktet opfylder krav i overensstemmelse med DS/EN 12620 og DS 2426.

NCC Roads A/S, Råstoffer  
 Laboratorie: Avedøre  
 Stamholmen 225  
 2650 Hvidovre

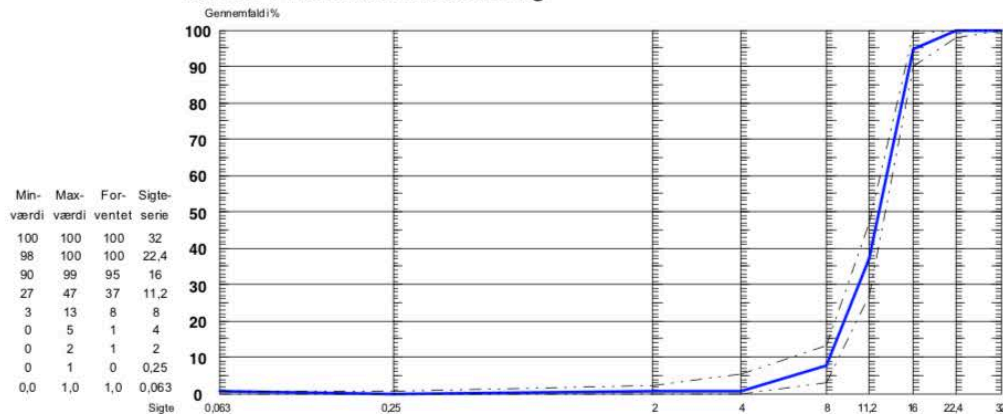
Telefon nr  
 36780500  
 Fax nummer  
 36780200



VAREDEKLARATION - BETON

|   |   |   |  |
|---|---|---|--|
| Leverandør<br><b>NCC Roads A/S, Råstoffer</b><br><b>RN Sten &amp; Grus</b><br><b>Stamholmen 225</b> | Deklaration nr<br><b>14031-22-3 - BETON</b>         | Gyldig fra<br><b>01-05-11</b>               | Erstatter<br><b>15-04-10</b>                             |
| Produktionssted<br><b>RN Sten &amp; Grus</b><br><b>Stamholmen 225</b><br><b>2650 Hvidovre</b>       | Produktbetegnelse<br><b>8/16 mm ærtesten, kl. M</b> | Produktbeskrivelse<br><b>Jiggede søsten</b> | Attesteringsmetode<br><b>Princip 2: Rullende kontrol</b> |
| Egenskab/prøvningsmetode  | Forventet værdi                                     | Min værdi                                   | Max værdi  |
| EN 1097-6 Korndensitet - VOT (Mg/m <sup>3</sup> )   | 2,61  | 2,57  | 2,65   |
| EN 1097-6 Absorption (%)  | 0,8   | 0,6   | 1,0  |
| DS/EN 1744 Chloridindhold (%) (Quantab)   | 0,002   |   | 0,020  |
| Ækvivalent alkaliindhold (%)  | 0,002   |   | 0,020  |
| DS/EN 933-5 Totalt knust, >90% o.f.knust(%)   | 11  |   | 25   |
| DS/EN 933-4 Formindex (%)   | 10  |   | 20   |
| DS 405.4 Indhold af lette korn - < 2400 (%)   | 0,9   |   | 5,0  |
| DS 405.4 Indhold af lette korn - < 2200 (%)   | 0,9   |   | 1,0  |
| TI-B 75 Kritisk absorption (%)  | 0,6   |   | 2,5  |

EN 933-1 Kornstørrelsesfordeling



*Ulla Hansen*

Ulla Hansen, Laborant

Bemærkninger

Kategori G<sub>c</sub>85/20, G<sub>T</sub>15, f<sub>i</sub>1,5

CE-mærkning: www.tilslag.dk



FPC er Certificeret af Dancert under notificeringsnr. 1073 (2+).  
Produktet opfylder krav i overensstemmelse med DS/EN 12620 og DS 2426.

NCC Roads A/S, Råstoffer  
Laboratorie: Avedøre  
Stamholmen 225  
2650 Hvidovre

Telefon nr  
36780500  
Fax nummer  
36780200

## Bilag 4 – Øvelsesvejledning til bestemmelse af cementindhold (AM) i RCA

### 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**

Titratør 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 ½ fyldt med destilleret vand. Der blandes godt og tilsættes vand til mærket. Efter blanding overføres opløsningen til en plastikflaske og mærkes.

#### E **Analysens udførelse**

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.

## Bilag 5 – Øvelsesvejledning til Los Angeles test

Center for ARKTISK TEKNOLOGI  
Marts 2007

### Bestemmelse af modstandsevne mod knusning (Los Angeles metoden)

#### Indhold

Bestemme modstandsevne mod knusning ved at beregne Los Angeles koefficienten.

#### Princip

En tilslagsprøve rulles med stålklugler i en roterende tromle. Derefter bestemmes mængden af materialet, som bliver tilbage på en 1,7mm sigte.

#### Definitioner

Los Angeles koefficient: procentdel af en prøve, som passerer 1,7mm sigte efter endt test

Konstant masse: på hinanden følgende vejninger efter tørring med mindst 1 times mellemrum, hvor resultatet ikke afviger med mere end 0,1 %

#### Apparatur

Varmeskab

Messingsigter (efter ASTM C131 anvendes messingsigter med maskevidder i mm: 37,5 – 25,0 – 19,0 – 12,5 – 6,3 – 4,75 – 2,36 – 1,7 med bunden og låg) (efter DS/EN 1097-2: 1998 bruges følgende sigter: 1,6 – 10 – 11,2 (eller 12,5) og 14)

Teknisk vægt

Sigtesøjle

LA maskine

#### Fremgangsmåde

Prøven oplødes i vand og vadsigtes gennem en messingsigte med maskevidde 1,7mm. Prøven ~~overføres~~ i varmeskab (105 °C) til konstant masse. Alle sigterne vejes hver for sig på teknisk vægt. Anbring sigterne i aftagende rækkefølge – den største maskevidde øverst – oven på hinanden. Anbring bunden under den sidste sigte. Overfør prøven på den øverste sigte. Sæt låget på og placer det hele på rysteren og start sigtning. Sigtningsprocessen betragtes som færdig, når sigterestten ikke ændrer sig mere end 1,0 % inden for 1 min ved denne sigtning. Derefter vejes hver sigte med prøven og prøvens mængde på hver sigte beregnes. Der beregnes nu "grading" ved følgende skema:

| Sieve Size (Square Openings) |                   | Weight of Indicated Sizes, g |           |           |           |
|------------------------------|-------------------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Passing                      | Retained on       | Grading                      |           |           |           |
|                              |                   | A                            | B         | C         | D         |
| 37.5 mm (1-1/2 in.)          | 25.0 mm (1 in.)   | 1250+/-25                    |           |           |           |
| 25.0 mm (1 in.)              | 19.0 mm (3/4 in.) | 1250+/-25                    |           |           |           |
| 19.0 mm (3/4 in.)            | 12.5 mm (1/2 in.) | 1250+/-25                    | 2500+/-10 |           |           |
| 12.5 mm (1/2 in.)            | 9.5 mm (3/8 in.)  | 1250+/-25                    | 2500+/-10 |           |           |
| 9.5 mm (3/8 in.)             | 6.3 mm (1/4 in.)  |                              |           | 2500+/-10 |           |
| 6.3 mm (1/4 in.)             | 4.75 mm (No. 4)   |                              |           | 2500+/-10 |           |
| 4.75 mm (No. 4)              | 2.36 mm (No. 8)   |                              |           |           | 5000+/-10 |
| Total                        |                   | 5000+/-10                    | 5000+/-10 | 5000+/-10 | 5000+/-10 |

Grading angiver, hvor mange stålklugler der skal bruges: ~~grading~~ A: 12 kugler, B: 11 kugler, C: 8 kugler, D: 6 kugler.

Prøven påfyldes Los Angeles ~~testing machine~~ og der opstartes efter vejledning. Maskinen skal rotere ved en hastighed af 30-33 ~~rpm~~ og antal af omdrejninger skal være 500. Derefter sigtes prøven gennem en 1,7mm sigte. Prøve som tilbagebliver på sigten vejes (endelige vægt) og sigtes gennem de samme sigter, der blev brugt før. Sigterne samt prøven vejes igen.

#### **Beregning af resultat**

$$\text{L.A Abrasions loss (\%)} = \frac{(\text{udgangs vægt} - \text{endelige vægt}) * 100}{\text{udgangsvægt}}$$

## Bilag 6 – Øvelsesvejledning til bestemmelse af densitet og porøsitet af hærdet beton

### A Princip

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

### B Specielt apparatur

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

### C Analysens udførelse

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

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

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

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

Destilleret vand med rumtemperatur ledes ind i eksikatorens vha en slange og undertrykket i eksikatorens hane 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 ( $m_{sw}$ ).

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:<br>°C                            | Vandtemp:<br>°C                | Vanddensitet $\rho_w =$ | kg/m <sup>3</sup> |
| Kontrollod:                               |                                |                         |                   |
| Før:                                      | kg                             |                         |                   |
| Efter:                                    | kg                             |                         |                   |
| Prøvelegement nr:                         |                                |                         |                   |
| $m_{105}$                                 | Kg                             |                         |                   |
| $m_{ssd}$                                 | Kg                             |                         |                   |
| $m_{sw}$                                  | Kg                             |                         |                   |
| $V = (m_{ssd} - m_{sw}) / \rho_w$         | m <sup>3</sup>                 |                         |                   |
| $V_{på} = (m_{ssd} - m_{105}) / \rho_w$   | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |                         |                   |
| $P_{å} = V_{på} / V$                      | Kg/m <sup>3</sup>              |                         |                   |
| $\rho_d = m_{105} / V$                    | Kg/m <sup>3</sup>              |                         |                   |
| $\rho_f = m_{105} / (V - V_{på})$         | 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>)

$V_{på}$  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>)  $p_a$

Prøvelegemets åbne porøsitet (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

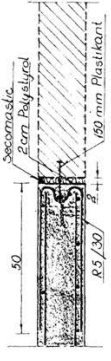
$u_{ssd}$  Vandtørstofforhold i vakuumvandmættet overfladetør tilstand (kg/kg)



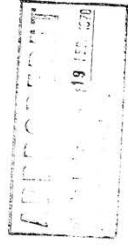
# Bilag 7 – Tekniske tegninger for DTU tunnel

Byggesag Journal nr. 28.983  
Vedr.: beregninger

70



Msk.  
Bælt  
Grovbeton 1:5 θ  
Jernbeton  $\sigma_c \approx 240 \text{ kg/cm}^2$   
Armering  
Rundjern  $\sigma_s \approx 3700 \text{ kg/cm}^2$  for  $d \approx 10 \text{ mm}$   
Tentor  $\sigma_{t,2} \approx 5200 \text{ kg/cm}^2$  for  $d = 8$   
Løst afdekkes med bjørrepap  
Ultrarene mdl. er an  
L. I. K. Tekn. Forv.  
Mast: 42. JULL. 1953



|     |        |                    |
|-----|--------|--------------------|
| REV | DNO    | Stedjern indtegnel |
| A   | 1.2.59 | VEDR               |

**DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE**  
Normalhus 3,0 m  
Tunneltislutning

B. J. Rambøll, Rambøll & Hennemann, Dr. Techn.  
D. I. K. Tekn. Forv., 6011  
DK-1 København Ø, Lyngbyvej 100, Lyngby, 880388.  
Sag 5916. Dato: 1/11 58  
R 3007 A

