

De optimale vervangingsgraad van schelpen in beton bij waterdoorlatende funderingen

Sara Verhasselt, Arnaud Vanmaercke

Studentennummers: 01508287, 01501306

Promotoren: ir. Hilde Witters, prof. dr. ir. Veerle Boel

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Academiejaar 2019-2020

De optimale vervangingsgraad van schelpen in beton bij waterdoorlatende funderingen

Sara Verhasselt, Arnaud Vanmaercke

Studentennummers: 01508287, 01501306

Promotoren: ir. Hilde Witters, prof. dr. ir. Veerle Boel

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Academiejaar 2019-2020

Toelating tot bruikleen

De auteurs geven de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de bepalingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.

Voorwoord

Verschillende mensen hebben bijgedragen aan de succesvolle afronding van deze masterproef. Hierbij willen wij graag deze kans grijpen om hen oprecht te bedanken voor de hulp en ondersteuning gedurende het academiejaar.

Allereerst gaat onze oprechte dank uit naar onze promotoren dr. ir. Veerle Boel en ir. Hilde Witters. Dr. Ir. Boel was ons voornaamste aanspreekpunt omtrent de theoretische achtergrond en de aanpak voor het onderzoek. Haar uitgebreide kennis en tips zorgden ervoor dat we in de juiste richting uitgingen en het tweede semester met een gerust hard konden starten aan de proeven. Ir. Witters stond ons gedurende het hele onderzoek bij, voor al onze vragen omtrent de modaliteiten van deze masterproef en het wijzigen van het onderzoek door COVID-19 konden we bij haar terecht. Maar eveneens voor het wijzen op het gebruik van de juiste typografie, het correct structureren van dit onderzoeksrapport alsook het controleren op schrijffouten konden we steeds terecht bij onze promotoren.

Daarnaast willen we ook ing. Ignaas Vandenbruwane bedanken voor het opvolgen van onze vorderingen en het beantwoorden van onze praktische vragen tijdens de uitvoeringen. Eveneens willen we onze dank uitbrengen aan Dieter Hillewaere die ons bijstond bij de praktische uitwerkingen in labo Magnel en samen met ing. Ignaas Vandenbruwane ons zou voorzien hebben van de nodige hulp bij het beproeven van onze proefstukken in Labo Schoonmeersen. Telkens er iets nodig was in het labo wist Dieter het wel te vinden voor ons.

Dit onderzoek werd bedoeld als een duo thesis, waardoor de samenwerking van groot belang was. De combinatie van zelfstandig werken en de nauwe samenwerking in het labo bleek al snel vlot te verlopen. Daarom willen wij graag elkaar bedanken voor deze onverwachte, maar wel succesvolle samenwerking.

Tenslotte willen we onze families bedanken voor de steun tijdens dit hele onderzoek. De hulp voor het leveren van het benodigde materiaal en de onvermijdelijke verplaatsing van het labo naar de nieuwe werklocatie waar het praktische deel van dit onderzoek hervat kon worden, werd heel erg op prijs gesteld! Bovendien willen we ze ook bedanken voor het grondig en kritisch nalezen van onze masterproef.

Vanwege de ingrijpende beslissingen die genomen zijn, willen wij graag iedereen bedanken die zijn steentje heeft bijgedragen om onze masterproef verder te kunnen zetten.

15 juni 2020, Gent

COVID-19-preambule

Deze preambule werd in overleg tussen de student en promotor opgesteld en door beiden goedgekeurd.

In deze masterproef wordt aan de hand van fysische en mechanische eigenschappen van betonnen proefstukken het nut van schelpen in beton voor (onder)funderingen aangetoond. Hierbij wordt een bepaald percentage natuurlijke fijne granulaten vervangen door zeeschelpen. Dit moet resulteren in een waterdoorlatend beton dat ook nog voldoende druksterkte bevat.

Enkele eigenschappen van het beton konden beproefd worden aan de hand van proeven op het verse beton. De belangrijkste eigenschappen moesten bepaald worden na 28 dagen uitharding van de betonnen proefstukken. Het gaat hier over testen om de druksterkte, de waterdoorlatendheid en de open porositeit te berekenen. Door een goed uitgedachte planning zouden deze testen starten net voor de paasvakantie en beëindigd worden aan het einde van de paasvakantie. Op deze manier bleef er nog genoeg tijd over om een goede analyse van de resultaten door te voeren en een passende conclusie te schrijven.

Door de coronacrisis kon deze planning echter niet meer aangehouden worden. Drie weken voor de paasvakantie werd beslist dat geen enkele activiteit nog kon doorgaan op de campussen. In diezelfde week dienden de twee laatste betonmengsels nog gemaakt te worden. Deze besloten we thuis af te werken in de hoop dat er eventueel op een latere datum nog beproefd kon worden. Iets later kwam echter het bericht dat de universiteit tot het einde van het academiejaar dicht zou blijven. Hierdoor werd duidelijk dat de noodzakelijke proeven niet meer uitgevoerd zouden kunnen worden. Desondanks kunnen de proefstukken in een latere fase wel nog getest worden. Alle stukken zijn vervaardigd en op een conforme manier bewaard.

De coronacrisis heeft voor deze masterproef dus tot gevolg gehad dat er geen resultaten en conclusies uit de verschillende proefstukken gehaald konden worden. Enkel de resultaten over het verse beton en de informatie over de granulaten konden verwerkt worden. De oorspronkelijke doelstelling van deze masterproef kon dus niet behaald worden en de onderzoeksvragen bleven onbeantwoord. Desondanks het gebrek aan resultaten voor de druksterkte, de waterdoorlatendheid en de porositeit, werd getracht een voorspelling te maken van de resultaten op basis van de literatuur.

Abstract

Als gevolg van de verstedelijking en de continue toenemende vraag naar beton wordt op zoek gegaan naar verschillende manieren om waterinfiltratie te stimuleren in de bodem. Een van de mogelijkheden hierbij is het vervangen van granulaten in beton door afvalmateriaal zoals schelpen. Door deze vervanging wordt niet enkel het infiltratieprobleem aangepakt, maar wordt eveneens een oplossing aangereikt voor de globale afvalproblematiek inzake schelpmateriaal. Daarnaast zal deze vervanging zorgen voor een reductie in de ontginning van natuurlijke granulaten.

In dit onderzoek wordt nagegaan wat de invloed is op de eigenschappen van beton na vervanging van fijn granulaat door kokkelschelpen. Concreet wordt onderzocht wat de optimale vervangingsgraad is van schelpen in beton bij waterdoorlatende funderingen voor waterdoorlatende oppervlakken. Voor de verschillende vervangingspercentages van 0, 5, 10, 15 en 20% worden de druksterkte, de waterdoorlatendheid, de porositeit, de zetmaat en schokmaat nader onderzocht. De methode die wordt uitgevoerd als voorbehandeling van de granulaten blijft dezelfde gedurende het volledige onderzoek.

Op basis van voorspellingen uit de literatuur wordt geconcludeerd dat de druksterkte op korte termijn zal toenemen tot het optimale vervangingspercentage bereikt wordt. Vervolgens zal de druksterkte afnemen naarmate het vervangingspercentage deze waarde overschrijdt. Dit optimale percentage ligt hoogstwaarschijnlijk tussen 5 % en 10 % vervanging van fijn granulaat. De resultaten op lange termijn zijn onbesproken en kunnen in de toekomst verder onderzocht worden. De waterdoorlatendheid en open porositeit zullen beide stijgen naarmate het vervangingspercentage aan schelpen toeneemt. Er bestaat een lineair verband tussen deze twee eigenschappen.

Bijkomend onderzoek naar de eigenschappen op lange termijn is noodzakelijk om een beeld te krijgen van de praktische toepasbaarheid van kokkelschelpen als granulaatvervanging in waterdoorlatend beton. Hieruit kan in de toekomst een kostenanalyse en een haalbaarheidsstudie opgesteld. Vandaag de dag is hier immers nog veel onduidelijkheid in de literatuur.

Sleutelwoorden: Beton, kokkelschelpen, waterdoorlatendheid, optimale vervangingsgraad, fijn granulaat, fundering

The optimal degree of replacement of shells in concrete for water-permeable foundations

Arnaud Vanmaercke and Sara Verhasselt

Supervisors: prof. dr. ir. Veerle Boel and ir. Hilde Witters

Abstract Due to urbanization and the continuous increasing demand for concrete, we are looking for different ways to stimulate water infiltration into the soil. One of the possibilities is to replace granulates with waste material such as shells. This replacement not only addresses the infiltration problem, but also resolves the global waste problem with shell material. In addition, this replacement will ensure a reduction in the extraction of natural granulates. This study examines the influence of concrete after replacing fine granulate with cockle shells. Especially the optimal degree of replacement of shells in concrete with water-permeable foundations for water-permeable surfaces is being investigated. For the different replacement rates of 0, 5, 10, 15 and 20 %, the compressive strength, the porosity, the slump and flow measures are further investigated. The pretreatment of the granules is kept the same throughout the entire study. Based on literature predictions, it is concluded that compressive strength will increase in the short term until the optimal replacement rate is reached. Then, compressive strength will decrease as the replacement rate exceeds this value. This optimal degree of replacement is most likely between 5 % and 10 % for a replacement of fine granulate. The long-term results are not discussed and will be further investigated in the future. The water permeability and open porosity will both increase as the replacement rate of shells increases. There is a linear relationship between these two properties. Additional research into the long-term properties is necessary to gain an idea of the practical applicability of cockle shells as a granulate replacement in water-permeable concrete.

Keywords: concrete, cockle shells, water-permeability, optimal degree of replacement, fine granulate, foundation

I. INTRODUCTION

A. Introduction

Concrete is the second most used material in the world. The demand for concrete has increased significantly over the past century and is expected to rise in the future (Nguyen, Boutouil, Sebaibi, Leleyter, & Baraud, 2013). The traditional production process of concrete has a negative impact on the environment. Significant amounts of greenhouse gasses are emitted during the production of cement. Excessive mining, dredging and processing of natural aggregates will disrupt local ecosystems and lead to landscape damage (Chen, Zhang, Pan, Liao, & Zhao, 2019). This provides the incentive for a more sustainable concrete production.

One of the options for this is to replace natural granules with alternative materials such as shells. Every year, thousands of tons of seashell by-products are generated which are discharged because they are regarded as waste (Nguyen et al., 2013). The environmental impact of dumping the shells as

waste cannot be underestimated. Untreated shell waste leads to microbial degradation of salts in gases such as hydrogen sulfide and ammonia resulting in serious environmental and public health problems (Eziefula, Ezech, & Eziefula, 2018). Therefore the replacement of natural aggregates with shells can solve various social and environmental problems. In this paper, fine granulate is replaced by the same fraction of broken cockle shells. The mechanical properties are investigated and the influences of this replacement are investigated. The optimal degree of replacement for cockle shells in concrete is determined based on the mixtures with different replacement percentages. The physical properties of the concrete are also determined and compared between the different mixtures.

B. Literature review

Many studies have already been conducted on replacing shells in concrete. The replacement of fine granulate, coarse granulate and cement has already been carried out several times by different researchers. When replacing fine granulate as used in this research, the studies from the literature show different results. Most studies agree that from a 10 % replacement rate, compressive strength decreases. In addition, both a further decrease as more shells are present in the concrete (Kuo, Wang, Shu, & Su, 2013) and no specific connection with the amount of shells occurs (Varhen, Carrillo, & Ruiz, 2017). The cause of this decrease is due to an increase in porosity and a decrease of the fineness modulus (Kuo et al., 2013).

An increase in porosity as more shells are added, is generally accepted in the various studies. The flat shape of the shells creates more cavities in the concrete, which increases the porosity (Nguyen et al., 2013). Insufficient washing of the shells with organic residues also results in an increase of the porosity (Cuadrado-Rica, Sebaibi, Boutouil, & Boudart, 2016).

The water-permeability associated with this, increases according to the numerous studies as a result of the increase of the porosity. The angular shape of the shells hereby reduces the compactness of the concrete. When only small shells are used, studies show that water permeability can decrease because they refill the pores (Khankhaje, Salim, Mirza, Hussin, & Rafieizonooz, 2016). The water permeability therefore mainly depends on the size of the shells.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Research approach

The research approach for examining the optimal degree of replacement of shells in concrete starts with the reference paper by Varhen et al., 2017. By applying the same preconditions, the results can subsequently be compared. The fractions of the different granulates and additives used in the research are therefore taken the same as in the reference paper with a difference in the coarse granulate. In order to make the research applicable to practical implementations, the provisions of the SB250 are taken into account. The degrees of replacement vary between 0 % and 20 % in steps of 5 %. The 0 % substitution mixture is called the base mix. Consequently, the names of the mixtures will be M1a, M1b, M2, M3, M4 and M5, respectively. In addition, the w/c-factor with a value of 0,50 will be kept constant throughout the study.

The concrete mixtures will be used to carry out the tests on the fresh concrete, as well as to prepare the test pieces. Both self-made and existing prefabricated steel and plastic molds will be used to manufacture these test pieces. After filling these molds, they are either vibrated on a vibrating table (in mixture M1a, M1b, M2 and M3) or vibrated using a poker vibrator (in M4 and M5). The vibrating process is carried out for 45 seconds each time.

Finally, the molds are dried in a room with a humidity of ± 95 % for 24 hours. After drying, the test pieces are stored under water at a temperature of 20 ± 2 °C until the date of testing.

B. Materials

1) Cement

Like the study by Varhen et. al., Portland cement type CEM I 52,5 is used for this study. Although Varhen et al. uses type CEM I 52,5 R, this high strength is not necessary in the short term. The composition consists of 95 to 100 % Portland cement clinker and 0 to 5 % by-product. The Portland cement clinker consists of 66,67 % of the mass of calcium silicates, while the rest consists of aluminum and iron. The amount of C_3A and MgO are 0 % and less than 5 %, respectively.

2) Coarse granulate

The coarse granulate is crushed gravel (CG) with a fraction 6,3/20 mm. The aggregate is pre-treated by washing, sieving and air drying. In this process, the granulate is wet sieved with sieves 5 mm and 6,3 mm. They are then dried for 48 hours and sieved again with a 6,3 mm sieve to eliminate the fraction between 5 mm and 6,3 mm. The CG has a density of 1847,68 kg/m^3 .

3) Fine granulate

The sand used in this research is river sand (RS) with a fraction of 0/5 mm. The pretreatment of the sand consists of air drying for 48 hours. The research shows that after air drying and oven drying, the sand contains 3,21 % and 3,4 % less water, respectively, than in the delivered condition.

The density of the RS is according to this research 1772,16 kg/m^3 . The reference paper on the other hand obtained a value of 1410 kg/m^3 which is 25,6 % lower (Varhen et al., 2017). This difference can be due to the different origin of the sand.

4) Shells

The shells are cockle shells from the North Sea, the Wadden Sea and the Zeeland waters. When the shells are supplied, they are washed and sieved with fresh water, removing the organic material, salts and impurities. The fraction of the shells is 3/15 mm with a deviation in the smallest fraction of 10 %. However, the research uses shells with a fraction of 1/5 mm. Therefore, the shells are crushed and sieved until they obtain the desired fraction. This process takes place in three steps. First, the shells are crushed using a vibration plate for 3 minutes. Thereafter the shells are sieved using a 5 mm sieve to remove the biggest fraction, larger than 5 mm. Finally, the shells are sieved using a 1 mm sieve to remove the smallest fraction below 1 mm. Before the crushed shells (CS) are used in the concrete mixture, they are air dried for 48 hours.

The density of the CS with a fraction of 1/5 mm has a value of 1599,30 kg/m^3 . The density for the CS from the reference paper by Varhen et al., on the other hand, had a value of 1015 kg/m^3 (Varhen et al., 2017). The reason for this deviation can be found in the compaction of the shells when weighing and different origins of the used shells in both studies.

5) Grain size distribution

The sieve curve is determined according to the standards NBN EN 933-1, NBN EN 933-2 and PVT 411. The actual curve as performed in the research is shown in Figure 1. The distribution of the grain sizes is similar to the reference study whose curve is shown in Figure 2. A deviation can be observed in the grain distribution of the coarse granulate, since both studies use a different fraction for the CG. The deviation of the RS and the CS shows little to no deviation from each other. A possible irregularity in the grain size distribution between these two may be due to the duration of the breaking process which is not specified in the reference paper.

A logical assumption from these two graphs is that fine granulate has the finest distribution and gravel the largest. Therefore, the value of the distribution of shells lies between these two.

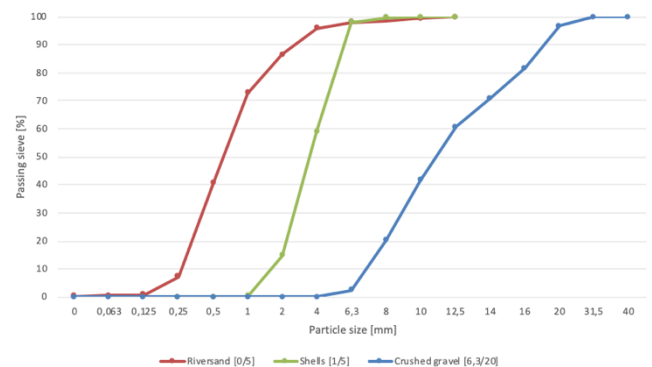


Figure 1: Grain size distribution of natural aggregates (RS and CG) and crushed shells (CS).

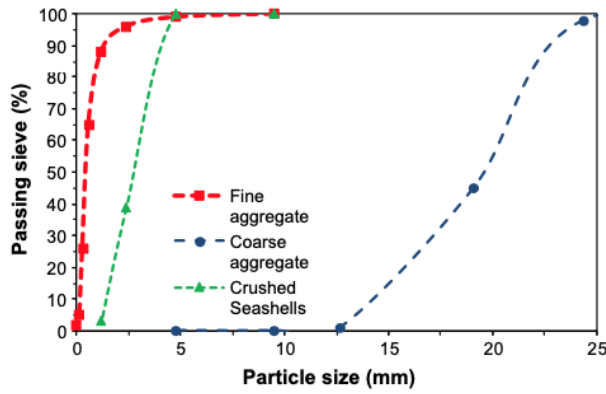


Figure 2: Grain size distribution of natural aggregates (RS and CG) and crushed shells (CS) according to the reference paper (Varhen et al., 2017).

C. Executed tests

1) Slump

The slump is measured using an Abrams cone, according to NBN EN 12350-2 (2019). The cone is filled with three layers, each layer is compacted with a compacting rod with an area of 2,5 x 2,5 cm. Once the cone is filled, the cone has to be removed carefully. Then the slump can be measured from the top of the cone to the top of the concrete.

2) Flow

Another way to characterize the workability of concretes is the flow. The measurement of flow is standardized in NBN EN 12350-5(2019). A hollow cone with a height of 200 mm and a flow table are necessary for this test. The cone is filled in two layers and compacted with a rod. Once the cone is removed, 15 drops are performed with the table. The maximum spread in two direction parallel to the table edges is then measured, so the flow value can be determined.

3) Air content

The air content in each concrete mixture is determined according to NBN EN 12350-7 (2019). The entrapped air of the fresh mixes was tested with an 8.l pressure gauge meter that is filled in three layers and compacted with a rod of 2,5 x 2,5 cm.

4) Density of fresh concrete

The density of each fresh mixture can easily be calculated after defining the mass of the concrete in a chosen volume. The test is normalized in NBN EN 123-6 (2019).

The used bucket in this research is filled in three layers, which are compacted with a compacting rod. Then the mass of the filled bucket is determined so the density can be calculated with formula 1.

$$D = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (1)$$

With D the density in kg/m³ and rounded on 10 kg/m³, M₁ the mass of the empty container in kg, M₂ the mass of the container filled with concrete in kg and V the volume of the used container in m³.

5) Compressive strength test

The compressive strength is measured on cubic specimens with a dimension of 150 mm and cylindrical specimens with a diameter of 100 mm and a height of 300 mm according to the standard NBN EN 12390-3 (2019). Each mixture provides three cubes and three cylinders. All the samples should be

tested at the age of 28 days. The tests are performed using a constant rate loading of 0,06 MPa/s.

6) Falling Head Test

The Falling Head Test, FHT, is used to determine the water-permeability coefficient k of each concrete mixture. Concrete with higher values then 0,4 mm/s can be classified as pervious concrete. During the test, the sample is subjected to a hydraulic gradient. The times the water requires to drop from 260 mm to 60 mm is measured so the coefficient k can be calculated with formula 2.

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$

Where k (mm/s) is the water permeability coefficient, a and A the area of the cross-section of the tube and the test specimen (mm²), h (mm) is the length of the sample and t (s) is the time it takes the water to drop from an initial water level, h₁, tot the final water level, h₂.

The test setup is reused from the prior master thesis, based on the research of Khankhaje (Khankhaje et al., 2016). Three cylinders with dimensions of 100 x 200 mm of each mixture are tested to ensure accuracy of the reported results.



Figure 3: FHT setup of the prior thesis (Decrock & Van Reybrouck, 2019)

7) Open porosity

The open porosity is tested with the method proposed by Nguyen (Nguyen, Boutouil, Sebaibi, Baraud, & Leleyter, 2017). The cylindrical specimens of 100 x 200 mm are kept dry for 5 days at room temperature. Subsequently the sample is immersed in water for 30 minutes. The mass of the dry sample as well as the mass of the dry sample underwater is determined. The open porosity of the specimen is calculated with formula 3.

$$P_o = \left[1 - \left(\frac{M_{dry} - M_{sub}}{\rho_w \cdot V} \right) \right] \times 100\% \quad (3)$$

With P_o the open porosity of the specimen (%), M_{dry} the mass of the dry specimen (kg), M_{sub} the mass of the specimen under water (kg), ρ_w the density of water (998,56 kg/m³) an V the volume of the specimen (m³).

III. RESULTS

Due to the Covid19-crisis, the planned tests on the hardened concrete could not be executed. Therefore, the results of the hardened concrete are estimated with the knowledge from the literature.

A. Slump

The slump in this research shows a linear downward trend. Here, the value at mixture M4 shows a deviating value as a result of the changed environmental parameters and different measuring equipment. The used mixer and scales differed at M4 and M5 compared to the other mixtures. The value for M1a is not taken into account due to a different w/c-factor.

Mixture M1a is assigned to consistency class S4, while mixtures M1b and M2 are class S3. As a result of the descending trend in workability, mixtures M3 and M5 are therefore assigned to class S2. Figure 4 shows this descending trend in which the results are shown for the slump in this research. The results are consistent with the reference paper showing a similar descending trend in the workability (Varhen et al., 2017).

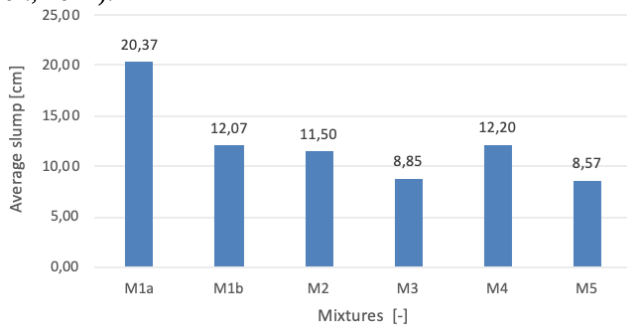


Figure 4: The declining course of the slump as the replacement degree increases from 0 % to 20 %.

B. Flow

The flow shows a less unambiguous linear trend than the slump according to the results shown in Figure 5. Here again, the value of M1a is disregarded due to the excessive humidity of the sand.

A descending trend can be seen between the values of M4 and M5, which is in line with the expected results. A decline is also expected between M1b, M2 and M3, with an unexpected outlier of M2. The flow that can be assigned to the different mixtures is expressed in F-classes. Mixture M1b and M3 are class F2, while M2, M4 and M5 can be assigned to class F4. Since the flow is not discussed in the reference paper, the consistency data will only be compared using the data on the slump.

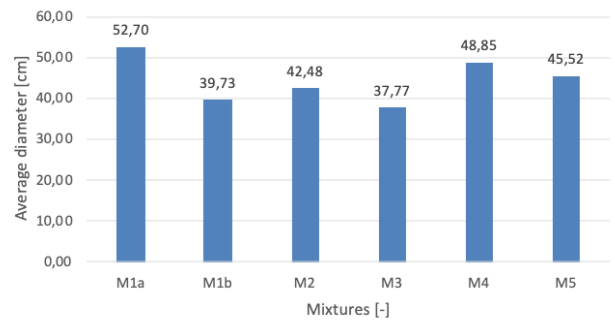


Figure 5: Results on the flow as a function of the mixtures according to the research

C. Air content

Due to the Covid19-crisis, only air content of the mixtures M1b, M2 and M3 could be determined. The other mixtures were produced in a home environment where the necessary equipment was not available. The value of these results, especially of M1b, is questionable because of a leakage between the bucket and the lid. Nevertheless, the results of M2 and M3 are realistic. The concrete is designed with the requirement of 4 % air content and with 4,3 and 4,2 % for the mixtures M2 and M3, the air content remains more or less the same. The air content does not change significantly with the presence of cockleshells.

This trend in the results is comparable with the results of the reference paper where all the concretes had an air content of 1,5 %, with a small variation (Varhen et al., 2017). The research of Yang et al. concludes the same, but observed a greater variation in the results (Yang, Yi, & Leem, 2005). Less variation of the air content is due to the absence of the small particles, less than 1 mm. Furthermore, the used shells contain no organic matter due to the cleaning process of the supplier. This organic matter would significantly increase the air content. (Cuadrado-Rica et al., 2016)

D. Density fresh concrete

Research shows that the minimum and maximum calculated value for the density of the fresh concrete has a value between 2480 kg/m³ and 2430 kg/m³ assuming that the value of M1a is disregarded. The general trend that can be seen in Figure 6 is a decrease as the replacement percentage of the shells in concrete increases. The value for M3 shows a slight deviation according to this course. Since the density of the concrete is mainly dependent on the density of the fine granulate, the coarse granulate and the cement, the results on the density of the fresh concrete is within the expectations. Due to the lower density of the shells compared to the coarse granulate, the fine granulate and the cement, the density of the concrete will decrease as the degree of replacement increases. The reference paper by Varhen et al. however, shows that for similar w/c-factors, the density decreases as the degree of replacement increases, as shown in Figure 7. The density of the particle packing is influenced by the presence of the broken shells. This reduces the granular skeleton which requires a larger amount of cement paste in the concrete (Varhen et al., 2017).

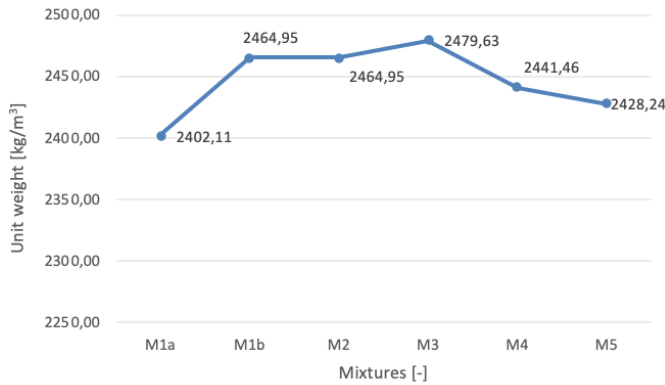


Figure 6: Graph of the density as a function of the mixture

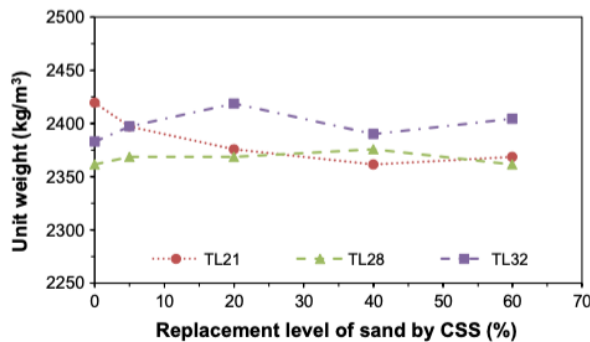


Figure 7: Graph of the density of the fresh concrete from the reference study [5]

E. Compressive strength

The reference paper finds a slight increment of compressive strength at the age of 28 days for replacements of 5 %. For higher replacements, starting from 20 %, the compressive strength stays around the strength of the reference mixture or knows a small decrease.

The research of Kuo et al. finds the same increase with a replacement of 5 %. With a replacement of 5 % the pores can be filled, which lead to a better compressive strength. However, for replacement rates of 10, 15 and 20 % the shells cause a significant decrease, because the pore-filling function is lost. (Kuo et al., 2013) The difference between the reference paper and these results is due to the use of the small particles of the shells. Kuo et al. uses the fraction 0-4 mm, where Varhen et al. uses 1,19-4,75 mm. The lack of the small particles makes the particles of the CS coarser and angular, which ensures the interlocking of particles (Varhen et al., 2017).

There can be concluded that the compressive strength of this research will know a slight increase with replacements of 5 % and even 10 %. The replacement rates of 15 and 20 % will cause stabilization or a slight decrease of the strength.

F. Falling Head Test

Research where sand is replaced by oyster shells with 10 and 20 % concludes that the presence of shells leads to a decrease of the water-permeability. This is due to the smallest particles of the shells. (Yang, Kim, Park, & Yi, 2010) Exactly these small particles are not used in this research. So an increase of the permeability can be expected as more shells are processed in the mixture.

The two reference mixtures, M1a and M1b, will also give great differences. Mixture M1a is produced with wet sand that

causes a higher w/c-factor and a decrease of the total mass of the sand. Due to the lack of sand, the pores will not be filled up as in mixture M1b which will cause a higher water-permeability coefficient k .

G. Open porosity

The more shells are used, the more porous the concrete becomes. This tendency will also be recognized in the results of this research. An estimation of the results can be composed with similar researches, as the reference paper didn't investigate the physical properties of the hardened concrete.

Kuo et al. (2013) used the same replacement rates for sand by oyster shells as this research. It found an increase from 0,4 to 5,5 % of porosity when the quantity of used shells increased. (Kuo et al., 2013) However, Kuo et al. (2013) used a w/c-factor of 1,3, on the contrary of the w/c-factor of 0,5 in this research. Nguyen et al. (2013) found that a lower w/c-factor leads to lower porosity.

It can be concluded that the open porosity will slightly increase when more shells are present in the concrete mixture. This increase on the voids can also be seen in the descending trend of the density.

IV. CONCLUSION

This research has been executed to examine the influence of the cockle shells on the properties of fresh and hardened concrete. Due to unforeseen circumstances, only the fresh properties were measured. With the help of the literature, the results of the hardened concrete are predicted. The following conclusions can be made:

- As more shells are present in the mixture, the concrete becomes less workable. However, all the concrete mixtures have a good workability.
- The air content will remain the same in all the mixtures because the fraction smaller than 1 mm of the CS isn't used.
- The density knows a slight decrease as more shells are processed in the concrete. Shells provide a lighter packing density with their angular shape and have a smaller density than sand.
- The compressive strength after 28 days will slightly decline as more cockle shells are added to the mixture. However, the mixtures with the smallest replacement rates of 5 and 10 % will possibly maintain the strength of the 0 % - mixture. Therefore, it can be concluded that the optimal degree of replacement will be 5 or 10 %.
- The porosity and the water-permeability will show a linear relationship. The higher the replacement, the higher the porosity and water-permeability will be.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the superintendents prof. dr. ir. Boel and ir. Witters for their supervision on this research. Thanks to their dedication to this research, we were able to complete this research successfully. Our sincere gratitude go to the University of Ghent for the use of their infrastructure and equipment.

REFERENCES

- [1] D. H. Nguyen, M. Boutouil, N. Sebaibi, L. Leleyter, and F. Baraud, "Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers," (in English), *Construction and Building Materials*, Article vol. 49, pp. 151-160, Dec 2013
- [2] D. Chen, P. C. Zhang, T. Pan, Y. D. Liao, and H. Zhao, "Evaluation of the eco-friendly crushed waste oyster shell mortars containing supplementary cementitious materials," (in English), *Journal of Cleaner Production*, Article vol. 237, p. 15, Nov 2019, Art no. Unsp 117811
- [3] U. G. Eziefula, J. C. Ezeh, and B. I. Eziefula, "Properties of seashell aggregate concrete: A review," (in English), *Construction and Building Materials*, Review vol. 192, pp. 287-300, Dec 2018
- [4] W. T. Kuo, H. Y. Wang, C. Y. Shu, and D. S. Su, "Engineering properties of controlled low-strength materials containing waste oyster shells," *Construction and Building Materials*, vol. 46, pp. 128-133, Sep 2013
- [5] C. Varhen, S. Carrillo, and G. Ruiz, "Experimental investigation of Peruvian scallop used as fine aggregate in concrete," (in English), *Construction and Building Materials*, Article vol. 136, pp. 533-540, Apr 2017
- [6] H. Cuadrado-Rica, N. Sebaibi, M. Boutouil, and B. Boudart, "Properties of ordinary concretes incorporating crushed queen scallop shells," *Materials and Structures*, vol. 49, no. 5, pp. 1805-1816, May 2016
- [7] E. Khankhaje, M. R. Salim, J. Mirza, M. W. Hussin, and M. Rafieizonooz, "Properties of sustainable lightweight pervious concrete containing oil palm kernel shell as coarse aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 126, pp. 1054-1065, Nov 2016
- [8] A. Decrock and J. Van Reybrouck, "Toepasbaarheid van schelpen bij waterdoorlatende funderingen voor waterdoorlatende oppervlakken," Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde, Universiteit Gent, 2019.
- [9] D. H. Nguyen, M. Boutouil, N. Sebaibi, F. Baraud, and L. Leleyter, "Durability of pervious concrete using crushed seashells," *Construction and Building Materials*, vol. 135, pp. 137-150, Mar 2017
- [10] E. I. Yang, S. T. Yi, and Y. M. Leem, "Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics: Part 1. Fundamental properties," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 11, pp. 2175-2182, Nov 2005
- [11] E. I. Yang, M. Y. Kim, H. G. Park, and S. T. Yi, "Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 5, pp. 758-765, May 2010

Inhoudsopgave

Toelating tot bruikleen	4
Voorwoord.....	5
COVID-19-preambule	6
Abstract	7
Extended Abstract	8
Lijst van figuren.....	18
Lijst van tabellen.....	20
Lijst met afkortingen	21
Inleiding.....	22
1. Verkennende literatuurstudie.....	23
1.1. De grondstoffen van (groen) beton	23
1.2. Schelpen: afvalstof of nieuwe grondstof?	23
1.3. De herkomst van schelpen	24
1.4. Schelpen in beton.....	25
1.4.1. Schelpen als cementvervanging.....	25
1.4.2. Schelpen als granulaatvervanging.....	26
1.4.2.1. Vervanging fijn granulaat	27
1.4.2.2. Vervanging grof granulaat	27
1.5. Chemische eigenschappen van schelpen	28
1.6. Fysische eigenschappen van schelpen.....	29
1.7. Voorbehandeling van schelpen.....	30
1.8. De vervangingsgraad van schelpen in beton.....	31
1.9. Drainerend beton.....	32
1.10. Normen.....	34

1.10.1.	Zetmaat – NBN EN 12350-2 (2019).....	34
1.10.2.	Schokmaat – NBN EN 12350-5 (2019)	35
1.10.3.	Luchtgehalte – NBN EN 12350-7 (2019).....	36
1.10.4.	Volumemassa vers beton – NBN EN 12350-6 (2019).....	36
1.10.5.	Druksterkte – NBN EN 12390-3 (2019).....	37
1.10.6.	Volumemassa van verhard beton – NBN EN 12390-7 (2019)	38
1.10.7.	Falling Head Test – EN 17892-11 (2004).....	38
1.11.	<i>Literatuurresultaten van schelpen in beton</i>	39
1.11.1.	Vers beton.....	40
1.11.1.1.	Zetmaat – kegel van Abrams	40
1.11.1.2.	Volumieke massa vers beton	42
1.11.1.3.	Luchtgehalte.....	42
1.11.1.4.	De uithardingstijd	43
1.11.2.	Mechanische eigenschappen beton	44
1.11.2.1.	De druksterkte.....	44
1.11.2.2.	De treksterkte.....	46
1.11.3.	Fysische eigenschappen	46
1.11.3.1.	Dichtheid.....	46
1.11.3.2.	Porositeit	47
1.11.3.3.	Waterpermeabiliteit.....	48
2.	Probleemstelling	50
3.	Afbakening van onderzoeksveld - Doelstellingen	51
4.	Onderzoeksaanpak en - methodologie	52
5.	Materialen en methodes	55
5.1.	<i>Betonmengsels</i>	55
5.2.	<i>Gebruikte materialen</i>	55
5.2.1.	Cement.....	56

5.2.2.	Fijn granulaat	56
5.2.3.	Grof granulaat	58
5.2.4.	Schelpen.....	59
5.3.	<i>Bepaling eigenschappen granulaten</i>	61
5.3.1.	Zeefkromme	61
5.3.2.	Schijnbare en werkelijke volumemassa	64
5.3.3.	Waterabsorptie van schelpen	64
5.4.	<i>Voorbereiding mallen</i>	65
5.5.	<i>Maken van de proefstukken</i>	68
5.6.	<i>Proeven op vers beton</i>	72
5.6.1.	Zetmaat	72
5.6.2.	Schokmaat.....	74
5.6.3.	Volumemassa.....	75
5.7.	<i>Proeven op uitgehard beton</i>	76
5.7.1.	Druksterkte.....	76
5.7.2.	Dichtheid.....	77
5.7.3.	Falling Head Test.....	78
5.7.4.	Open porositeit.....	79
5.7.5.	MIP	79
6.	Onderzoeksresultaten	81
6.1.	<i>Uitgevoerde proeven</i>	81
6.1.1.	Schijnbare en werkelijke volumemassa van de granulaten.....	81
6.1.2.	Zeefkromme	82
6.1.3.	Zetmaat	84
6.1.4.	Schokmaat.....	86
6.1.5.	Volumieke massa vers beton	88
6.1.6.	Luchtgehalte.....	90
6.2.	<i>Verwachte resultaten onuitgevoerde proeven</i>	92

6.2.1.	Druksterkte.....	92
6.2.2.	Dichtheid beton.....	93
6.2.3.	Porositeit	94
6.2.4.	Waterdoorlaatbaarheid.....	94
6.3.	<i>Toekomstvisie</i>	94
6.4.	<i>Discussie</i>	95
7.	Conclusie	97
8.	Referentielijst	99
9.	Bijlagen	102
9.1.	<i>Duurzaamheidseisen voor beton</i>	102
9.2.	<i>Betonsamenstellingen voor een kubieke meter</i>	103
9.3.	<i>Algemene planning</i>	104
9.4.	<i>Gedetailleerde planning</i>	105
9.5.	<i>Werkelijke en schijnbare volumemassa van de granulaten</i>	106
9.6.	<i>Zeefproeven</i>	107
9.7.	<i>Bepaling dichtheid vers beton</i>	114

Lijst van figuren

Figuur 1: Cementpasta die zich rond het granulaat bevindt, heeft geen invloed op de holtes (Nguyen et al., 2014)	33
Figuur 2: Voorbeeld van een samenstelling voor poreus schraal beton	33
Figuur 3: Korrelverdeling van de grove granulaten bij schraal beton	34
Figuur 4: Het gebruikte portlandcement CEM I 52,5	56
Figuur 5: Openspreiding van het natte zand	57
Figuur 6: Droging van de natte grove granulaten	59
Figuur 7: Zeven van de gewassen grove granulaten	59
Figuur 8: Breken van de schelpen met de trilplaat	60
Figuur 9: De uitgezeefde fractie van de schelpen kleiner dan 1 mm	60
Figuur 10: Basissets van zeven volgens de norm NBN EN 12620	61
Figuur 11: De stalen mallen voor kubussen van 150 x 150 mm	66
Figuur 12: Axiale naad in de pvc-mal	67
Figuur 13: Op maat gesneden pvc-mal	67
Figuur 14: Afplakken van de axiale naad	67
Figuur 15: Afgewerkte cilindrische mal	68
Figuur 16: Bevestiging van de pvc-buis aan betonplex met siliconenvoeg	68
Figuur 18: Basismengsel M1a	69
Figuur 17: Benodigde granulaten voor het basismengsel M1a	69
Figuur 19: Trilnaald	70
Figuur 20: Trillen van een cilindrisch proefstuk met de trilnaald	70
Figuur 21: Benoemde proefstukken worden onder water bewaard	72
Figuur 22: Het verschil tussen een goede en een slechte uitvoering van de zetmaat	73
Figuur 23: Meten van de inzakking voor de bepaling van de zetmaat	73
Figuur 24: Symmetrisch ingevallen betonspecie bij bepaling van de zetmaat	73
Figuur 25: Betonspecie na het verwijderen van de conus	74
Figuur 26: Betontaart na het toedienen van 15 schokken	74

Figuur 27: Indeling van beton in F-klassen	75
Figuur 28: Gelijke breukvlakken bij kubusvormige proefstukken	76
Figuur 29: Goede breukvlakken bij cilindrische proefstukken	77
Figuur 30: Opstelling Falling Head Test van voorgaande masterproef (Decrock & Van Reybrouck, 2019).....	78
Figuur 36: Grafiek van de werkelijke en schijnbare volumemassa van de granulaten	81
Figuur 37: De zeefkrommes van de gebruikte granulaten	83
Figuur 38: De zeefkrommes van de gebruikte granulaten in het referentieonderzoek (Varhen et al., 2017).....	83
Figuur 31: Zetmaat in functie van het mengseltype.....	84
Figuur 32: Grafiek van de schokmaat in functie van het mengseltype	87
Figuur 33: Grafiek van de volumieke massa in functie van het mengseltype	89
Figuur 34: Grafiek van de dichtheid van het vers beton uit het referentieonderzoek (Varhen et al., 2017).....	89
Figuur 35: Grafiek van het luchtgehalte in functie van het mengseltype	91
Figuur 39: Druksterkte bij mengsel met w/c-factor 0,55 (boven) en 0,45 (onder). (Varhen et al., 2017).....	92
Figuur 40: De dichtheid van beton bij de verschillende vervangingsgraden volgens het referentieonderzoek (Varhen et al., 2017)	93

Lijst van tabellen

Tabel 1: Chemische samenstelling van materialen (Soltanzadeh et al., 2018)	26
Tabel 2: Chemische samenstelling van schelpen (Tayeh et al., 2019)	28
Tabel 3: Chemische samenstelling van schelpen na verhitting (Tayeh et al., 2019)	29
Tabel 4: Lijst van literatuur met de soort vervanging die toegepast wordt.....	32
Tabel 5: De belangrijkste literatuur met de belangrijkste onderzoeksfactoren.....	39
Tabel 6: Basissamenstelling uit het referentieonderzoek met w/c-factor 0,45 (Varhen et al., 2017) .	52
Tabel 7: Basissamenstelling uit het referentieonderzoek met w/c-factor 0,55 (Varhen et al., 2017) .	53
Tabel 8: Basissamenstelling van het eigen onderzoek met w/c-factor 0,50	53
Tabel 9: Mengseltypes met de corresponderende vervangingsgraad van fijn granulaat	55
Tabel 10: Bepaling van het gewichtspercentage water in het geleverde zand.....	57
Tabel 11: De theoretische en beschikbare zeven voor de zeefproeven van alle granulaten	63
Tabel 12: Bepaling van de waterabsorptie en het aanwezige water in schelpen	65
Tabel 13: Watertemperatuur bij de mengsels M1a, M1b, M2 en M3.....	71
Tabel 14: Watertemperatuur bij de mengsels M4 en M5	71
Tabel 15: Indeling in S-klasse aan de hand van de zakking van het beton.....	73
Tabel 16: Schijnbare en werkelijke volumemassa van de granulaten	81
Tabel 17: Metingen van de gemiddelde zakking in functie van het mengseltype	84
Tabel 18: Metingen van de schokmaat in functie van het mengseltype	87
Tabel 19: Volumieke massa van de verschillende mengseltypes	88
Tabel 20: Luchtgehalte van de verschillende betonmengsels.....	90

Lijst met afkortingen

Al ₂ O ₃ :	Scheikundige formule voor aluminiumoxide
CaCO ₃ :	Scheikundige formule voor calciumcarbonaat
CaO:	Scheikundige formule voor calcium oxide
CO ₂ :	Scheikundige formule voor koolstofdioxide
F.M.:	Fijnheidsmodulus
H ₂ S:	Scheikundige formule voor waterstofsulfide
MIP:	Mercury Intrusion Porosimetry
NBN:	Het Bureau voor Normalisatie
NH ₃ :	Scheikundige formule voor ammoniak
OPC:	Ordinary Portland Cement
PD:	Pakkingsdichtheid
PVC:	Polyvinylchloride
SB250:	Standaardbestek 250 voor de wegenbouw
W/C:	Water/Cement-factor

Inleiding

Beton is het op één na meest gebruikte materiaal ter wereld. Elk mens gebruikt naar schatting zes ton beton per jaar. Opmerkelijk is dat de vraag naar beton in de afgelopen eeuw significant gestegen is en deze naar verwachting zal blijven stijgen in de toekomst (Nguyen et al., 2013; Varhen et al., 2017). Voor de productie van beton is een grote hoeveelheid aan natuurlijke aggregaten, zoals zand en steenslag, nodig. Naar schatting bedraagt het wereldwijde verbruik van natuurlijke aggregaten 40 miljard ton per jaar waarvan tussen de 64% en 75% gebruikt wordt voor de productie van beton (Eziefula et al., 2018). Het traditionele productieproces van beton heeft echter een negatieve invloed op het milieu. Aanzienlijke hoeveelheden broeikasgassen worden uitgestoten tijdens de cementproductie. Overmatig ontginnen, baggeren en verwerken van natuurlijke aggregaten zorgt voor een verstoring van lokale ecosystemen tot gevolg en leidt tot landschapsschade (Chen et al., 2019). Deze problematiek geeft de aanzet tot het onderzoek naar een duurzamere betonproductie. Een van de mogelijke oplossingen is de vervanging van natuurlijke granulaten door alternatieve materialen zoals schelpen.

Elk jaar ontstaan in Europa duizenden tonnen zeeschelpbijproducten die geloosd worden omdat ze aanzien worden als afval. Verschillende pogingen zijn reeds ondernomen om deze schelpen te recyclen maar geen van deze pogingen gaf tot nu toe een afdoend resultaat (Nguyen et al., 2013). De milieu-impact die deze afvaldumping tot gevolg heeft is evenmin te onderschatten. Het onbehandelde afval van schelpen kan leiden tot microbiële afbraak van zouten en resulteert in gassen zoals waterstofsulfide, ammoniak en amines die ernstige milieu- en volksgezondheidsproblemen tot gevolg kunnen hebben (Eziefula et al., 2018).

De vervanging van natuurlijke granulaten door schelpen kan een oplossing bieden voor verschillende maatschappelijke- en milieuproblemen. Binnen dit onderzoek wordt fijn granulaat vervangen door eenzelfde fractie aan gebroken kokkelschelpen. De mechanische eigenschappen worden onderzocht waarbij nagegaan wordt wat de invloeden zijn van deze vervanging. Aan de hand van mengsels met verschillende vervangingspercentages wordt bepaald wat de optimale vervangingsgraad is voor kokkelschelpen in beton. Eveneens worden de fysische eigenschappen van het beton bepaald en wordt de vergelijking gemaakt tussen de verschillende mengsels. Verder worden de voorbereidingen getroffen om de druksterkte te bepalen op lange termijn.

1. Verkennende literatuurstudie

1.1. De grondstoffen van (groen) beton

Traditioneel bestaat beton uit drie hoofdbestanddelen namelijk granulaat, cement en water. Het cement verhardt onder invloed van het water en vormt het bindmiddel voor de fijne en grove granulaten. Naast traditioneel beton is er in wegebouwkundige toepassingen vandaag de dag meer sprake van waterdoorlatend beton. Voor de productie van waterdoorlaatbaar beton worden dezelfde materialen gebruikt als van traditioneel beton. Het verschil tussen de twee types beton is de verhouding van de materialen. Bij een waterdoorlatend beton wordt het fijne toeslagmateriaal geminimaliseerd of zelfs volledig verwijderd. Daarnaast wordt de korrelverdeling van het grove granulaat klein gehouden waardoor een lage pakingsdichtheid ontstaat. Het beton zal 15 % tot 35 % holtes bevatten waardoor het waterdoorlatend wordt (Nguyen et al., 2013).

Doorlaatbaar beton is een milieuvriendelijk materiaal en een effectief middel om te voldoen aan de groeiende milieueisen. De problematiek van zowel overstromingen als watertekorten vraagt immers om een beter doorlatend oppervlak. In Vlaanderen is maar liefst 14% van de bodem bedekt met ondoordringbare materialen, in steden kan dit percentage oplopen tot 30%. Tussen 2005 en 2015 bedroeg de betoninname 6 hectare/dag waardoor veel open ruimte verloren ging. Deze toename in oppervlakte van de verharde bodem zorgt ervoor dat het regenwater niet langer in de grond kan indringen wat in de neerslagperiodes tot overstromingen kan leiden. Door het gebrek aan insijpeling van water in de bodem zakt de grondwaterstand elk jaar verder, waardoor ook in droge periodes problemen ontstaan onder de vorm van watertekorten. Een waterdoorlatend beton kan deel uitmaken van de oplossing. Het poreuze beton laat immers infiltratie van regenwater toe waardoor de kans op overstromingen bij hevige regenval mogelijks te voorkomen is en de grondwaterstand aangevuld kan worden. (Grietens, 2018; Mollen, 2018)

1.2. Schelpen: afvalstof of nieuwe grondstof?

Schelpen zijn kalkhoudende skeletten die afkomstig zijn van weekdieren. Deze skeletten zijn afvalstoffen in gebieden waar visvangst en schelpdierenteelt een grote bron van inkomsten zijn. In deze gebieden treedt vaak overbevissing op met een grote hoeveelheid aan schelpen tot gevolg. Twee mogelijke bestemmingen zijn mogelijk voor deze afvalstroom. De meest gebruikte methode voor het beheer van dit afval is het storten ervan, waardoor de milieu-impact toeneemt. Het storten van de schelpen gebeurt zowel op land als in de zee. Door microbiële activiteit komen verschillende stoffen vrij waaronder H_2S , NH_3 en amines die een schadelijke impact hebben op het milieu en het plaatselijke ecosysteem (Mo et al., 2018). Bijkomende problemen die ontstaan door het storten van schelpen, zijn het beheer van de stortplaats, het landgebruik en de grondwaterverontreiniging die op lange termijn ontstaat. Wanneer zeeschelpafval in de zee gestort wordt, infecteert het de marine

populatie. Dit heeft gevolgen voor de levenskwaliteit van mensen in de directe omgeving (Tayeh, Hasaniyah, Zeyad, & Yusuf, 2019).

Een andere optie om van deze afvalstroom af te raken, is de opwerking van het schelpmateriaal waardoor het een andere bestemming krijgt als nieuwe grondstof en niet langer meer beschouwd wordt als afvalstof. Verschillende landen waaronder Frankrijk treffen hierin maatregelen. Schelpen worden in dit geval hergebruikt als bodemverbeteraar, diervoeding en isolatie (Nguyen et al., 2017).

Vanwege de hoge beschikbaarheid aan schelpmateriaal in bepaalde gebieden heeft het milieu er dus baat bij om deze afvalstof te herwerken als bijproduct. Wereldwijd wordt 16 Mton schelpen per jaar geproduceerd. Deze afvalproductie bestaat uit 33 % kokkels, 31,3 % oesters en 12,2 % mossels. Er kan aangenomen worden dat schelpen een belangrijk secundair aggregaat zijn voor beton op plaatsen waar deze schelpen gevonden kunnen worden (Mo et al., 2018).

1.3. De herkomst van schelpen

Binnen Europa heeft Frankrijk een grote bedrijvigheid in de visvangst en schelpdierenteelt. Jaarlijks wordt er 200 kton schelpen ten gevolge van de schelpdierenteelt en 50 kton schelpen afkomstig van de visvangst gegenereerd. Specifiek in Noordwest-Frankrijk (Normandië), is er een jaarlijks overschot van 15,7 kton sint-jakobsschelpen die niet opnieuw gebruikt wordt en dus als afvalstof aanzien wordt (Cuadrado-Rica et al., 2016). Daarnaast wordt in Frankrijk jaarlijks bijna 400 Mton aan aggregaten gebruikt voor industriële toepassingen waaronder ook de productie van beton. Per inwoner komt dit neer op 6 ton aggregaten per jaar. Het meeste van deze hoeveelheid bestaat echter hoofdzakelijk uit natuurlijke aggregaten waaronder grof en fijn granulaat (Nguyen et al., 2013).

Ook andere landen zoals Spanje en Italië dragen aardig hun steentje bij tot deze problematiek. De streek Galicia in Noord-Spanje is de tweede grootste producent van mossels na China. Hier bedraagt de jaarlijkse hoeveelheid schelpafval van mossels 25 kton (Mo et al., 2018).

Buiten Europa geldt dezelfde problematiek, maar op grotere schaal. Uit de literatuur blijkt dat Aziatische landen het grootste aandeel hebben bij deze afvalproductie. China is de grootste producent van schelpdieren met een jaarlijkse productie van 10 Mton. Deze hoeveelheid zeeschelpafval bestaat hoofdzakelijk uit oester-, clam-, sint-jakobs- en mosselschelpen (Tayeh et al., 2019). Japan is de tweede grootste producent met een productie van ongeveer 0,9 Mton gevolgd door de VS, Zuid-Korea en Thailand (Martinez-Garcia et al., 2017). In het afgelopen decennium bedroegen beenderen en zeeschelpen 0,9 % van het mondiale afval. Dit komt neer op 15 Mton dat jaarlijks geproduceerd wordt. Tussen 1950 en 2011 bedroeg de vangst van weekdieren in Indonesië 236,5 kton waarvan 47 % bestond uit kokkels en clams. Daarnaast zorgde de schelpdierenteelt in Indonesië tussen 1950 en 2011 voor ongeveer 206,6 kton aan weekdieren waarvan 99,78 % bestond

uit oesters. Hiertegenover produceert Indonesië vandaag de dag jaarlijks 65,2 kton aan oesters, mossels en kokkels (Tayeh et al., 2019).

Over de laatste jaren kan dus een aanzienlijke stijging waargenomen worden in de productie van schelpafval. Meer specifiek wordt in China, Zuid-Korea en Taiwan voor elke kilogram oesters 370 gram tot 700 gram schelpenafval geproduceerd. De totale hoeveelheid oesterschelpen in China en Taiwan bedraagt jaarlijks respectievelijk 300 kton en 160 kton. In Korea bedraagt deze jaarlijkse productie 300 kton. Hiervan wordt door zowel China, Taiwan als Korea slechts 30 % hergebruikt. Uit onderzoek blijkt dus dat 70 % van de totale oesterschelpen als afval vrijkomt (Mo et al., 2018).

1.4. Schelpen in beton

Door een voortdurend toenemende vraag naar beton, stijgt eveneens de vraag naar natuurlijke aggregaten. Uit een onderzoek is gebleken dat jaarlijks ongeveer 3 ton beton per persoon geproduceerd wordt (Gagg, 2014). Het aanbod aan natuurlijke grondstoffen ten gevolge van deze betontoename daalt met milieuschade als gevolg door de ontginning ervan. Een mogelijke oplossing om de vraag naar natuurlijke granulaten te doen afnemen is de vervanging ervan door alternatieve materialen (Chen et al., 2019). Materialen die voordien als afvalstof aanzien werden, kunnen nader onderzocht worden om deze toe te passen in beton ter vervanging van natuurlijke aggregaten (Nguyen et al., 2013).

Het grote voordeel om schelpen te gebruiken in betonspecie, is voornamelijk het drukken van de kostprijs. In kustregio's ontstaat dus een nieuwe opportuniteit. Dit geldt echter enkel indien de transportkosten voor het ter plaatse brengen van het schelpmateriaal kleiner zijn dan de kostprijs van de gereduceerde natuurlijke aggregaten (Cuadrado-Rica et al., 2016). Zowel de grove als fijne granulaten of een combinatie hiervan kunnen vervangen worden door schelpen, maar ook substitutie van cement is mogelijk. Verschillende manieren om schelpen te gebruiken in beton dienen zich dus aan.

1.4.1. Schelpen als cementvervanging

Alvorens schelpen gebruikt kunnen worden als cementvervanging, vindt een voorbehandeling plaats. Hierbij wordt het schelpmateriaal gereinigd, tot poeder vermalen en in de oven geplaatst om te calcineren. Hierdoor wordt het aanwezige CaCO_3 omgezet in CaO . Omwille van het hoge gehalte aan calciumoxide in verhitte schelpen, kunnen deze toegepast worden als cementvervanging. In Tabel 1 wordt de vergelijking gemaakt met het massapercentage aan CaO voor zowel schelpen als kalksteen, wat terug te vinden is in het traditionele portlandcement (Soltanzadeh, Emam-Jomeh, Edalat-Behbahani, & Soltan-Zadeh, 2018).

Tabel 1: Chemische samenstelling van materialen (Soltanzadeh et al., 2018)

Compound	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Cl	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI ^{**}
Seashell (%)	52.34	3.65	1.15	0.20	0.47	0.35	0.13	0.42	0.038	–	–	41.252
Limestone (%)	53.08	4.27	0.73	0.26	0.01	0.03	0.13	0.25	–	0.09	0.02	41.13
Pozzolan (%)	7.22	60.109	19.87	4.43	0.16	1.60	1.82	2.59	0.121	–	–	2.08

^{*} The chemical composition of limestone is reported by Safi et al. [15].

^{**} Loss of ignition.

Onderzoek heeft uitgewezen dat een vervanging van cement door schelpenpoeder (vermalen schelpen) een daling teweegbrengt van de druksterkte. Deze vervanging wordt daarom zelden toegepast bij structureel beton. Toevoeging van schelpenpoeder aan beton leidt tot een verminderde vroege sterkte van beton (Soltanzadeh et al., 2018). De reden van deze vermindering valt te verklaren door de aanwezigheid van CaO in schelpenpoeder die zou reageren met Al₂O₃ en gips in cement waardoor deze reactie de vroegtijdige hydratatie vermindert. Door de uithardingstijd echter te verlengen, vindt een verhoging van de druksterkte plaats hoewel deze nog steeds lager is dan het controlemonster waarbij enkel cement gebruikt werd. Onderzoek van Olivia & Oktaviani uit 2017 toont aan dat sommige soorten schelpen zoals de clam schelpen een hogere druksterkte vertonen dan andere soorten, zoals kokkelschelpen, na eenzelfde tijdsverloop. Een mogelijke verklaring hiervoor is de vorming van kalksteen door CO₂ in schelpen die een hoger percentage CaO bevatten (Tayeh et al., 2019). Tabel 3 uit onderzoek van Tayeh et al. uit 2019 toont inderdaad aan dat clams een hoger massapercentage aan CaO hebben dan kokkels. Hoge gehalten aan CaO in schelpen leiden dus tot een hoge sterkte-toename van het beton. Zo toont onderzoek aan dat een betonmengsel met 5 % en 10 % kokkels een sterkte-toename heeft van 47 % tussen 7 en 90 dagen, terwijl normaal beton zonder vervanging een toename heeft van slechts 26 % binnen dezelfde tijdsperiode (Othman, Bakar, Don, & Johari, 2013).

Ondanks de sterkte-toename van het beton binnen een bepaalde tijd, blijft de druksterkte van het beton met vervanging van cement door schelpenpoeder, lager dan bij een klassieke betonsamenstelling zonder vervanging van cement door schelpenpoeder. De optimale vervangingsgraad voor cement door schelpenpoeder zou daarom volgens Tayeh et al. (2019) liggen tussen 5 % tot 10 %. De studie van Mo et al. (2018) zegt echter dat een vervanging tot 20 % wel toepasbaar zou zijn voor beton met lage sterkte. Het verschil tussen de twee studies is te wijten aan de functie die het beton nadien moet invullen. Aangezien in eigen onderzoek waterdoorlatend beton voor waterdoorlatende funderingen nader onderzocht wordt, zal volgens de literatuur het optimale vervangingspercentage voor cement tussen 5 % en 20 % liggen.

1.4.2. Schelpen als granulaatvervanging

De review van Eziefula et al. (2018) geeft een overzicht van recente studies over de eigenschappen van beton waarbij telkens het fijne granulaat, het grove granulaat of een combinatie hiervan gedeeltelijk of volledig vervangen werd. De afzonderlijke studies uit

Tabel 5 tonen aan dat een vervanging van grof granulaat door schelpaggregaat een vermindering veroorzaakt van de sterkte-eigenschappen van beton naarmate de vervangingsgraad stijgt. Omwille hiervan wordt, indien er vervanging plaatsvindt, voorkeur gegeven aan een vervanging van fijn granulaat (Eziefula et al., 2018).

1.4.2.1. Vervanging fijn granulaat

Schelpen die gebruikt worden als fijn granulaat, hebben een fractie die kleiner is dan 5 mm. Hierbij worden de schelpen gebroken en vervolgens gezeefd tot de gewenste fractie. Verschillende studies werden uitgevoerd waarbij schelpen gebruikt werden als vervanging voor fijn granulaat. In Tabel 4 is een korte lijst weergegeven van studies die vervanging van fijn granulaat toepassen.

De conclusie die uit deze studies gehaald kan worden is dat betonmengels met vervanging van fijn granulaat door schelpen een hogere druksterkte verkrijgen. De studie van Yusof et al. uit 2015 toont aan dat bij een vervanging van 30 % schelpenpoeder (clams) met een maximale fractie van 500 μm een hogere druksterkte verkregen wordt. Het schelpenpoeder werkt als vulstof in beton waardoor de holten verminderen en de druksterkte wordt bevorderd. (Yusof, James Ujai, Sahari, Taib, & Noor Mohamed, 2011)

1.4.2.2. Vervanging grof granulaat

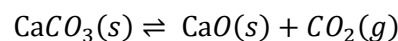
De grootte van de schelpen die gebruikt worden als vervanging voor grof granulaat, verschilt naargelang de studie. De review van Eziefula et al. (2018) beschrijft samenvattend welke fracties aan schelpen de verschillende studies gebruiken voor de vervanging van grof granulaat. Sommige studies gebruiken de schelpen zonder deze te breken tot kleinere fracties. Zo gebruikt bijvoorbeeld Falade uit 1995 periwinkle schelpen (zeeslakken) met een lengte tussen 20 mm en 60 mm en een maximale diameter van 10 mm tot 20 mm zonder deze tot kleinere fracties te breken. De studie toont aan dat na 28 dagen de druksterkte voor het mengsel met 20 % vervanging met 60,34 % gereduceerd was ten opzichte van het referentiemengsel met 0 % vervanging. Bovendien dient het gebruik van schelpen in zijn volledige vorm, zonder deze te breken, vermeden te worden. Dit kan leiden tot holtevorming in beton waardoor de druksterkte verlaagt (Nguyen et al., 2013).

De meeste studies die ongebroken schelpen gebruiken als granulaatvervanging, zoals besproken in de review van Eziefula et al. uit 2018, gebruiken een fractie die lager ligt dan 25 mm. Studies waarbij de schelpen echter wel gebroken worden tot kleinere fracties met als functie de vervanging van grof granulaat, hebben een grootte tussen 10 mm en 20 mm. Studies zoals Cuadrado-Rica uit 2015 gebruiken schelpen met een maximale fractie van 10 mm ter vervanging van grof granulaat. Dit resulteert in een daling van de druksterkte met 9,9 % bij een vervanging van 20 %, een daling van 21,1 % bij 40 % vervanging en een daling van 26,6 % bij een vervanging van 60 % na 28 dagen ten opzichte van het referentiemengsel met 0 % vervanging.

1.5. Chemische eigenschappen van schelpen

De exacte chemische samenstelling van schelpen is afhankelijk van het type schelp en de voorbehandeling. Tabel 2 uit de studie van Tayeh et al. (2019) geeft weer wat de chemische samenstelling is per type schelp na wassen en voor verhitting. Dit toont aan dat schelpen, met uitzondering van zee-oesters, voor 95,60 % tot 97,13 % uit CaCO_3 bestaan. Hierbij is calciumcarbonaat het hoofdbestanddeel van schelpen wat ook in de kalksteenslag uit het cement terug te vinden is. Overige bestanddelen zoals SiO_2 , MgO en Al_2O_3 komen slechts in zeer lage massapercentages voor die minder dan 1 % bedragen met uitzondering van de zee-oesters. Een hoge concentratie aan zwavel in de chemische samenstelling duidt op de aanwezigheid van resterend organisch materiaal in de schelpen (Tayeh et al., 2019).

Tabel 3 uit de studie van Tayeh et. al (2019) geeft eveneens de chemische samenstelling weer voor zeven types schelpen na wassen en verhitting. Het verschil tussen de resultaten van Tabel 2 en Tabel 3 is dus het voorbehandelingsproces. Bij Tabel 3 dus na verhitting van de schelpen is CaO het hoofdbestanddeel. Het percentage aan CaO in de schelpen is afhankelijk van de temperatuur die ingesteld wordt bij het verwarmen alsook het type schelpen. De temperatuur voor het verhitten ligt tussen 500 °C en 1000 °C (Tayeh et al., 2019). Calciumoxide ontstaat uit de endotherme reactie van CaCO_3 met toevoeging van warmte waarbij CaO en CO_2 ontstaan. Deze chemische reactie heet calcinatie. Het percentage aan CaO die terug te vinden is in de schelpen na calcinatie bedraagt tussen 52 % en 57 %. De verschillen die in Tabel 3 te zien zijn in het calciumoxide-gehalte zijn te wijten aan de verschillende verhittingstemperaturen die in de onderzoeken toegepast zijn. Hoe hoger de verhittingstemperatuur, hoe meer calciumoxide er ontstaat (Tayeh et al., 2019).



Het belang van de aanwezigheid van CaO is reeds besproken in ‘1.4.. Schelpen als cementvervanging’ waarin de schelpen als vervanging voor cement in beton besproken worden. Calciumoxide heeft voornamelijk invloed op de sterkte van het beton alsook de resulterende uithardingstijd van het cement (Soltanzadeh et al., 2018).

Tabel 2: Chemische samenstelling van schelpen (Tayeh et al., 2019)

Composition	Abinaya and Venkatesh (2016)		Lertwattanaruk et al. (2012)			
	River oyster	Sea oyster	Short-necked clam shell	Green mussel shell	Oyster shell	Cockle shell
CaCO_3	95.994	89.56	96.8	95.6	96.8	97.13
SiO_2	1.283	4.04	0.84	0.73	1.01	0.98
MgO	0.68	0.649	0.08	0.03	0.46	0.02
Al_2O_3	0.40	0.419	0.14	0.13	0.14	0.17
SrO	0.35	0.33	—	—	—	—
P_2O_5	0.206	0.204	—	—	—	—
Na_2O	0.98	0.98	0.39	0.44	0.23	0.37
SO_3	0.724	0.724	0.16	0.34	0.75	0.13
SO_4	—	—	0.06	0.11	0.43	0.07
K_2O	—	—	0.03	0.02	0.02	0.03

Tabel 3: Chemische samenstelling van schelpen na verhitting (Tayeh et al., 2019)

Type	OPC	Cockle		Marsh Clam	Periwinkle			Oyster		Snail Shell		Mussel
Oxide (%)	Zeyad et al. (2019)	Olivia et al. (2015)	Olivia and Oktaviani (2017)	Lertwattanaruk et al. (2012)	Etuk et al. (2012)	(Umoh and Ujene, 2015a)	Umoh and Ujene (2015a)	(Etuk et al., 2012), (Kuo et al., 2013)	Li et al. (2015)	Etuk et al. (2012)	Syed Talha Zaid (2014)	Felipe-Sesé et al. (2011)
SiO ₂	19.01	1.60	0.38	0.39	26.26	27.2	27.20	10.20	4.6	13.41	0.60	0.55
Al ₂ O ₃	4.68	0.92	0.65	0.28	8.79	6.42	6.42	4.81	1.1	4.95	0.51	0.03
CaO	66.89	51.56	51.91	67.7	55.53	52.10	52.10	61.95	86.8	57.95	51.09	87.21
MgO	0.81	1.43	—	—	0.4	0.82	0.82	0.18	—	0.19	0.69	0.49
Na ₂ O	0.09	0.08	—	—	0.25	0.26	0.26	0.04	—	0.22	1.20	0.50
K ₂ O	1.17	0.06	—	—	0.20	0.25	0.25	0.05	—	0.02	0.12	0.04
Fe ₂ O ₃	3.20	—	0.05	0.02	4.82	4.64	4.64	3.15	—	3.80	0.56	0.05
SO ₃	3.66	—	—	—	0.18	0.26	0.26	0.03	—	0.12	0.19	—
P ₂ O ₅	0.08	—	—	—	0.05	—	—	0.01	—	0.01	0.21	0.09
MnO ₃	0.19	—	—	—	0.07	0.14	0.14	0.01	—	0.01	0.02	—
LOI	2.48	41.84	41.8	42.7	—	—	—	43	—	—	40.54	—

Naast de aanwezigheid van calciumoxide is de aanwezigheid van chloride-ionen van belang. Uit onderzoek blijkt dat de aanwezigheid van chloride-ionen in schelpen de maximaal toelaatbare limiet voor aggregaten volgens de Europese standaard overschrijdt (Mo et al., 2018). Het gehalte aan chloride-ionen en organisch materiaal in sint-jakobsschelpen bedraagt respectievelijk 0,055 % tot 0,096 % en 1,01 % tot 1,87 % waarmee de limiet voor chloride-ionen van 0,06 % tot 0,08 % (volgens ACI 222R) overschreden wordt (Nguyen et al., 2017). Het chloridegehalte kan verminderd worden door calcinatie waarbij onderzoek aantoont dat oesterschelpen met 3,7 % massaprocent aan chloride-ionen na verhitting van 650 °C vervolgens een chloride-ion gehalte hebben van slechts 1,34 % (Chiou, Chen, & Li, 2014). Een hoog chloride-gehalte in beton heeft tot gevolg dat corrosie sneller optreedt in gewapend beton. Daarom wordt het aangeraden dat de vervanging van granulaten door schelpen in beton de waarde van 10 % niet overschrijdt (Mo et al., 2018). Voor de toepassing van ongewapende funderingen en onderfunderingen heeft het chloridegehalte minder invloed aangezien hier geen wapening in terug te vinden is.

Tot slot valt te bemerken dat de geografische afkomst van eenzelfde type schelpen een invloed heeft op de chemische samenstelling van de schelpen. Zo is te zien in Tabel 3 dat de kokkelschelpen uit de twee verschillende studies van Olivia et. al in 2015 en Olivia en Oktaviani in 2017 een lichte afwijking vertonen in het gehalte aan SiO_2 , Al_2O_3 en CaO . (Tayeh et al., 2019)

1.6. Fysische eigenschappen van schelpen

[illegible]

2018)(Cuadrado-Rica, Sebaibi, Boutouil, & Boudart, 2016; Mo et al., 2018)(Cuadrado-Rica, Sebaibi, Boutouil, & Boudart, 2016; Mo et al., 2018)(Cuadrado-Rica, Sebaibi, Boutouil, & Boudart, 2016; Mo et al., 2018)(Cuadrado-Rica, Sebaibi, Boutouil, & Boudart, 2016; Mo et al., 2018)(Cuadrado-Rica et al., 2016; Mo et al., 2018) . Daarnaast toont de studie van Varhen et al. (2017) aan dat wanneer het gehalte aan fijne deeltjes van het aggregaat verlaagd wordt en een minimale korrelgrootte van 1 mm gebruikt wordt, de fijnheidsmodulus een waarde van 4,0 benaderd wat grover is dan normaal zand van dezelfde fractie.

Het soortelijk gewicht van schelpen is ongeveer gelijk voor de verschillende types schelpen. Het soortelijk gewicht van een voorwerp is de verhouding tussen de dichtheid van het voorwerp en de dichtheid van water. Het is een factor die weergeeft of een voorwerp meer of minder weegt dan water. Zowel oesters, sint-jakobsschelpen, mossels als kokkels hebben een soortelijk gewicht tussen 2,09 en 2,73 gr/cm³. Deze waarde is gelijkaardig aan het soortelijk gewicht van natuurlijke aggregaten. Hoe kleiner de fractie van de schelpen, hoe dichter het soortelijk gewicht van calciumcarbonaat benaderd wordt vanwege het hoge percentage aan CaCO₃ in de schelpen (Mo et al., 2018).

Naast de fijnheidsmodulus en het soortelijk gewicht is eveneens de dichtheid van belang. De dichtheid van verschillende schelpen waaronder oesters, kokkels en sint-jakobsschelpen, ligt tussen 1015 kg/m³ en 1420 kg/m³. Deze dichtheid ligt lager dan die van de natuurlijke granulaten zoals droog zand met een dichtheid van 1500 kg/m³ (Khankhaje et al., 2017).

1.7. Voorbehandeling van schelpen

Alvorens schelpmateriaal verwerkt kan worden in de betonspecie ter vervanging van het fijne of grove granulaat, worden verschillende voorbehandelingen toegepast. Het gebruik van gehele schelpen, zonder deze te breken tot kleinere fracties, is niet aangewezen. Hierdoor ontstaan grote holten in het beton ten gevolge van de holle geometrie van de schelpen (Nguyen et al., 2013). Omwille hiervan worden de schelpen gebroken tot de gewenste fractie die nadien nader gespecificeerd kunnen worden door deze te zeven zoals beschreven wordt in de norm NBN EN 933-1:2012. De voorbereidingen die getroffen worden, hebben een invloed op de vochtigheid van het schelpmateriaal dat nadien verwerkt wordt in de betonspecie.

Eerst worden de schelpen gewassen met water en ontdaan van het organisch materiaal. Tijdens het wassen worden de onzuiverheden en zouten (chlorides en sulfaten) op de schelpen verwijderd (Chen et al., 2019). Vervolgens zijn er verschillende mogelijkheden om de schelpen te drogen, elk met een verschillend resterend watergehalte. Dit watergehalte heeft een invloed op de water/cement-factor aangezien dit water deel uitmaakt van het werkzame water in het beton. De voorbehandelingsmethoden die in de literatuur beschouwd worden betreffen ovendrogen, zondrogen of luchtdrogen (Varhen et al., 2017). Het nadeel van ovendrogen is het hoge energieverbruik dat

nodig is om de warmte te creëren en het water te doen verdampen. Het voordeel van ovens drogen is dat de schelpen gedesinfecteerd worden door ze te verwarmen aan verschillende temperaturen. Zoals het onderzoek van Chen uit 2019 beschrijft, gebeurt het ovens drogen bij een temperatuur van 110 °C gedurende 24 uur. In andere studies zoals deze van Eziefula uit 2018 voorschrijft worden de schelpen oven-gedroogd aan 105 °C gedurende 24 uur of aan 50 °C gedurende 30 minuten. Een energetisch interessanter alternatief hierop is gebruik maken van luchtdrogen of zondrogen (Varhen et al., 2017). De droogtijd hiervan wordt niet beschreven in de literatuur. In het vervolg van het onderzoek binnen deze thesis zal er gebruik gemaakt worden van luchtdrogen om de meest reële situatie te benaderen in een praktische uitvoering.

Na het drogen van de schelpen op een van de voorgeschreven manieren, worden de schelpen gebroken. Het breekproces van de schelpen is afhankelijk van de uiteindelijke toepassing ervan. Indien de schelpen gebruikt worden als cementvervanging zal het materiaal een kleine fractie moeten hebben de fractie van cement te evenaren. Bij dit proces wordt gebruik gemaakt van een wals (Cuadrado-Rica et al., 2016). Bij het gebruik van schelpen als cementvervanging is het noodzakelijk dat het calcinatiëproces plaatsvindt bij de voorbehandeling van de schelpen. In dit geval worden de schelpen gewassen, vervolgens gedroogd en nadien gebroken aan de hand van een wals tot de gewenste fractie van 75 µm om tot slot in de oven geplaatst te worden om te branden. Door de schelpen eerst te breken en pas nadien in de oven te plaatsen, zal er een reductie zijn van de benodigde tijd en temperatuur. Deze temperatuur varieert tussen 500 °C en 1000 °C om het calcinatiëproces door te voeren. (Tayeh et al., 2019) De tijd en temperatuur van het ovenproces varieert in verschillende studies. Bij Olivia et al. (2015) worden de kokkelschelpen gedurende drie dagen in de oven op 500 °C gebrand worden. De studie van Othman et al. uit 2013 daarentegen plaatst de schelpen gedurende één uur in de oven op 1000 °C nadat ze gewassen, ovengedroogd zijn aan 105 °C gedurende 24 h en nadien gezeefd zijn. Hoe lager de brandtemperatuur is bij het calcinatiëproces, hoe langer de schelpen in de oven moeten blijven. Het calcinatiëproces is enkel nodig wanneer de schelpen zullen fungeren als cementvervanging. Indien de schelpen gebruikt worden als granulaatvervanging worden ze na het wassen en drogen enkel nog gebroken (door middel van een trilplaat, een hamer of een wals) en gezeefd volgens de gewenste fractie.

1.8. De vervangingsgraad van schelpen in beton

Het vervangingspercentage dat toegepast kan worden op de betonspecie, is afhankelijk van een aantal factoren o.a.: het type granulaten, het type schelpen, de fractie, het gebruikte cement, de w/c-factor etc. Bij een vervanging van natuurlijke granulaten door schelpmateriaal, zal een vermindering van de verwerkbaarheid en de sterkte optreden. Hierdoor wordt gesuggereerd dat de vervangingsgraad typisch lager gehouden wordt dan 20 % in beton voor niet structurele doeleinden (Mo et al., 2018). Een hogere vervangingsgraad zou leiden tot een bijkomende hoeveelheid cement die nodig is om dezelfde sterkte te behouden, wat niet rendabel is (Tayeh et al., 2019). Verschillende

studies zijn reeds uitgevoerd, van welke een beperkte lijst wordt weergegeven in Tabel 4 waarin fijn en/of grof granulaat vervangen werden.

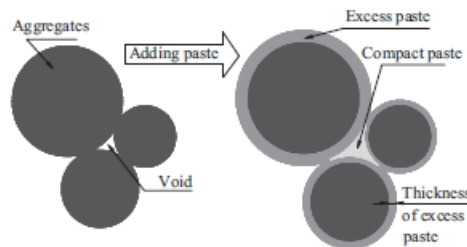
Tabel 4: Lijst van literatuur met de soort vervanging die toegepast wordt

Referentie	Type schelp	Type vervanging	Vervangingspercentage [%]
Khankhaje et al.	Kokkelschelpen	Grof granulaat	25, 50, 75
Muthusamy & Sabri	Kokkelschelpen	Grof granulaat	5, 10, 15, 20, 25, 30
Muthusamy et al.	Kokkelschelpen	Fijn granulaat	5, 10, 15, 20, 25
Ponnada et al.	Kokkelschelpen	Grof granulaat	5, 10, 15, 20, 25
Varhen et al.	sint-jakobsschelpen	Fijn granulaat	5, 20, 40, 60
Cuadrado-Rica et al.	sint-jakobsschelpen	Fijn en grof granulaat	20, 40, 60
Nguyen et al.	sint-jakobsschelpen	Grof granulaat	20, 40, 60
Yang et al.	Oester	Fijn granulaat	10, 20
Yang et al.	Oester	Fijn granulaat	5, 10, 20
Martinez-Garcia et al.	Mossel	Fijn en grof granulaat	20, 50, 65
Yusof et al.	Clam	Fijn granulaat	10, 20, 30

1.9. Drainerend beton

Omwillen van de verschillende voordelen van doorlatend beton op vlak van milieu, wordt alsmaar meer onderzoek naar drainerend beton uitgevoerd. Momenteel worden de verhoudingen van de betonmengsels echter op experimentele wijze bepaald. Nochtans kan volgens het onderzoek van Nguyen et al. (2014) de samenstelling op een gecontroleerde manier vastgelegd worden. Het onderzoek maakt de veronderstelling dat het cement enkel als coating van de aggregaten zal dienen om een goede sterkte te voorzien. Het zal zich bijgevolg niet in de holtes nestelen. Wanneer het cement zich enkel rond het aggregaat vastzet, zal het volume van de openingen niet af- of toenemen zoals in Figuur 1 wordt weergegeven. Bovendien zal de dikte van de cementlaag rond de korrel

verschillen afhankelijk van de grootte van de korrels. Aan de hand van het volume van de granulaten kan dus de benodigde hoeveelheid cement bepaald worden. (Nguyen, Sebaibi, Boutouil, Leleyter, & Baraud, 2014)



Figuur 1: Cementpasta die zich rond het granulaat bevindt, heeft geen invloed op de holtes (Nguyen et al., 2014)

Naast deze eigenschappen, is tevens de w/c-factor van groot belang. Een doorlaatbaar beton heeft een w/c-factor tussen 0,27 en 0,40. De correcte hoeveelheid water heeft een grote impact op de sterkte-eigenschappen, zonder de doorlaatbaarheidskarakteristieken te benadelen. Bij een poreus beton is het belangrijk dat de cementpasta niet te vloeibaar wordt zodat deze niet van de granulaten al aflijden (Nguyen et al., 2014).

In het standaardbestek 250 voor de wegenbouw, of kortweg SB 250, worden verschillende soorten (onder)funderingen besproken. Zowel funderingen met losse granulaten als funderingen uit beton. Deze laatste komen voor onder de benaming schraal beton. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen een gewone en een poreuze fundering uit schraal beton.

Volgens het SB 250 voor de wegenbouw is een poreus schraal beton een beton waarin geen zand wordt gebruikt. Het gaat hier om een beton dat zeer sterk waterdoorlatend is en dat gemaakt wordt op basis van een skelet met een discontinue korrelverdeling. Deze korrelverdeling zorgt ervoor dat water niet in het beton ingesloten raakt. De holtes zijn met elkaar verbonden door kanalen waardoor een goede doorlaatbaarheid van het water gegarandeerd wordt.

Het standaardbestek 250 stelt hierbij een samenstelling voor zoals te zien in Figuur 2, die aangepast kan worden naargelang de toepassing. De materialen die hiervoor gebruikt worden zijn identiek aan deze van gewoon schraal beton, maar de maximale diameter wordt beperkt tot 20 mm en zoals eerder aangehaald ontbreekt de zandfractie.

granulaten 6/20	1130 kg/m ³
granulaten 2/6	565 kg/m ³
cement	200 kg/m ³ minimum
water	ca. 100 l/m ³

Figuur 2: Voorbeeld van een samenstelling voor poreus schraal beton

Een minimaal gehalte van 200 kg/m³ aan cement dient echter gerespecteerd te worden, zodat de mechanische weerstand van het beton te vergelijken valt met dat van een klassiek schraal beton.

Eveneens dient de doorlatendheid gerespecteerd te worden om een goede afvoer van het water te garanderen. Hiervoor wordt een doorlatendheidscoëfficiënt van minimum 4×10^{-4} m/s verwacht.

In dit onderzoek is het echter de bedoeling om een standaard betonmengsel meer doorlaatbaar te maken door toevoeging van schelpen. Daarom is het eveneens interessant om de eisen die het SB 250 aan een standaard schraal beton toekent te bekijken. Een schraal beton kan onder alle types van wegbedekking als fundering gebruikt worden en is erg geschikt voor het overbruggen van ondergronden waarbij zones met een lage draagkracht voorkomen. Het is tevens het enige materiaal dat gebruikt wordt om wegaccessoires zoals goten en stoepranden vast te zetten en te funderen.

Het schraal beton bestaat uit een mix van cement, water, zand en granulaten. Het is met andere woorden vergelijkbaar met een klassiek beton, maar dan met een lager cement- en watergehalte. Het beton bevat een minimum van 100 kg/m^3 cement en het watergehalte mag niet meer dan 8% van de massa van het droge mengsel bedragen. Bovendien worden twee types onderscheiden op basis van de maximale korrelgrootte van de granulaten, ofwel 20 mm ofwel 32 mm. De korrelverdeling van deze types zijn vastgelegd en worden in Figuur 3 weergegeven.

Zeefopening (mm)	Zeefdoorval (%)	
	Schraal beton 0/20	Schraal beton BM 0/32
40	—	100
31,5	—	92 à 100
20	93 à 100	64 à 87
16	84 à 95	56 à 81
8	55 à 77	38 à 64
4	35 à 61	27 à 53
2	24 à 50	0 à 43
1	16 à 39	14 à 34
0,5	10 à 28	8 à 25
0,25	6 à 21	5 à 18
0,125	3 à 13	2 à 12
0,063	0 à 5	0 à 5

Figuur 3: Korrelverdeling van de grove granulaten bij schraal beton

1.10. Normen

In dit deel worden de belangrijkste proeven voor het verdere verloop kort besproken. De normen die gebruikt worden, zijn de Belgische normen die uitgebracht worden door NBN.

1.10.1. Zetmaat – NBN EN 12350-2 (2019)

Deze norm beschrijft hoe de zetmaat van cementgebonden beton opgemeten wordt. De zetmaat of ook wel ‘slump’ genoemd, geeft een maat weer voor de consistentie van het verse beton. De verwerkbaarheid van het beton wordt hierdoor weergegeven.

De zetmaat van de betonspecie wordt bepaald aan de hand van de kegel van Abrams. Dit is een afgeknotte kegel met een basisdiameter van 200 mm, een topopening van 100 mm en een hoogte van

300 mm. Vooraleer de kegel opgevuld wordt met beton, wordt hij op een horizontale basisplaat geplaatst die niet-absorberend is. Zowel de basisplaat als de kegel worden voor gebruik bevochtigd. De bevochtigde kegel wordt vervolgens in drie keer opgevuld met het vers aangemaakte beton. Elke laag wordt verdicht met een genormaliseerde verdichtingsstaaf met een oppervlak van 25x25 mm. Dit gebeurt door 25 keer in elke laag te prikken. Bij de eerste laag mag niet tot op de bodem geprikt worden. In de tweede en derde laag daarentegen wordt steeds tot in de vorige laag geprikt.

Eenmaal de kegel volledig is opgevuld en bovenaan afgestreken is, wordt de conus in één continue beweging verwijderd. Deze verticale beweging gebeurt op een rustige manier en wordt uitgevoerd in 2 à 5 seconden. De zetting van het beton wordt meteen opgemeten na de verwijdering van de kegel. De zetting wordt uitgedrukt in mm en bedraagt het verschil in hoogte tussen de kegelmal en de betonkegel.

Wanneer na het verwijderen van de kegel het beton zou afschuiven of zijdelings invallen wordt de proef gestopt. Deze waarde is onbruikbaar en een nieuwe test met een nieuwe hoeveelheid beton zal uitgevoerd moeten worden.

1.10.2. Schokmaat – NBN EN 12350-5 (2019)

Een tweede methode om de consistentie van vers aangemaakt beton te meten is de schokmaat. Bij deze methode worden verschillende genormaliseerde schokken aan het beton toegediend waardoor het beton uitzakt. De uiteindelijke diameter bepaalt in welke klasse het beton zich bevindt.

De schokmaat wordt bepaald met behulp van een schokplaat en een kegel. De schokplaat heeft een grootte van 700x700 mm. Het centrum is aangeduid op de plaat en ook de plaats van de kegel wordt aangeduid met een cirkel. Het bovenste, beweegbare deel van de plaat heeft een massa van 16 kg. Aan de hand van dit beweegbare deel kan een schok toegediend worden. Het bovenste deel van de plaat wordt omhooggehouden en vervolgens losgelaten. Door deze valbeweging krijgt het beton een schok toegediend. De valhoogte gezien vanuit het centrum van de plaat bedraagt 40 mm.

Het verse beton wordt op de plaat aangebracht in een kegel, beide worden eerst bevochtigd. De kegel heeft een basisdiameter van 200 mm, een topdiameter van 130 mm en een hoogte van 100 mm. De kegel wordt in twee keer opgevuld en elke laag wordt verdicht met behulp van een prikstaaf. Bij het verdichten van de onderste laag mag de bodem niet geraakt worden, bij de tweede laag moet er tot in de eerste laag geprikt worden. Elke laag wordt met 10 prikken verdicht.

Eenmaal de conus is opgevuld en bovenaan glad is afgestreken, mag de conus niet meteen verwijderd worden. Pas na minimum 10 s en maximum 30 s wordt de kegel met een verticale beweging verwijderd. Deze beweging gebeurt gecontroleerd en in een tijdspanne van één tot drie seconden.

Vervolgens worden meteen de schokken toegediend. De tafel wordt omhoog geheven zonder hard tegen de bovenkant te botsen. Eenmaal de tafel omhoog geheven is, wordt deze losgelaten en wordt een schok toegediend. Deze trilcyclus duurt niet langer dan drie seconden en wordt 15 keer herhaald.

Na het trillen wordt de diameter van de verkregen betontaart in twee loodrechte richtingen opgemeten. De consistentie van het beton wordt weergegeven door de stroomwaarde f , het gemiddelde van de twee diameters.

1.10.3. Luchtgehalte – NBN EN 12350-7 (2019)

Het luchtgehalte van het verse beton wordt bepaald aan de hand van de drukmeter-methode. De belangrijkste onderdelen van de drukmeterinstallatie zijn de luchtpomp, de testcontainer, de afdekking en de drukmeter.

De testcontainer wordt voor het vullen met vers beton eerst bevochtigd. Het vullen van de pot moet op een manier gebeuren dat het beton zo weinig mogelijk ingesloten lucht bevat. Afhankelijk van de consistentie en van de verdichtingsmethode wordt het beton in meerdere lagen aangebracht. De meest voor de hand liggende verdichtingsmethode is het handmatig verdichten met een prikstaaf. Per laag wordt 25 keer geprikt in het beton. Hierbij mag de staaf de rand of de bodem van de container niet aanraken. Na het verdichten van een laag wordt zachtjes tegen de zijkant van de pot getikt zodat de ingesloten lucht naar het oppervlak kan komen.

Eenmaal de testcontainer volledig gevuld is en de bovenkant afgestreken is met een truweel, wordt het deksel op de pot geplaatst. Het is belangrijk dat de rand van de pot eerst schoongemaakt wordt zodat het deksel een goede dichting kan verzekeren. Vervolgens worden de kleppen A en B opengezet en kan water geïnjecteerd worden via één van beide kleppen. Het injecteren gaat door totdat alle ingesloten lucht is uitgedreven. Hierna wordt lucht in de luchtkamer gepompt totdat de wijzer van de meter op de initiële druklijn staat. Wanneer dit gebeurd is, worden de kleppen A en B gesloten en wordt de luchtklep geopend. Na zachtjes tikken tegen de container kan het luchtgehalte afgelezen worden op de meter.

1.10.4. Volumemassa vers beton – NBN EN 12350-6 (2019)

Vooraleer de volumemassa van het verse beton bepaald kan worden moet het volume van de container bepaald worden. Dit gebeurt door het wegen van de lege densiteitscontainer samen met de glazen plaat tot op een nauwkeurigheid van 0,01 kg. Vervolgens wordt de container volledig gevuld met water en wordt de glazen plaat over het wateroppervlak geschoven zodat geen luchtbellen meer aanwezig zijn. Dit geheel wordt opnieuw gewogen. Het volume van de container kan afgeleid worden uit de bekomen massa van het water, dit volgens Formule 1.

$$V = \frac{M_{water}}{998 \text{ kg/m}} \quad (1)$$

Het volume van de densiteitscontainer wordt uitgedrukt in kubieke meter met een nauwkeurigheid van $1 \times 10^{-5} \text{ m}^3$.

Vooraleer de container gevuld wordt met beton wordt hij schoongemaakt, bevochtigd en gewogen met een nauwkeurigheid van 0,01 kg. Deze massa wordt M_1 genoemd. Het vullen van de container gebeurt in verschillende lagen, afhankelijk van de consistentie van het beton en de hoogte van de gebruikte volumecontainer. Elke laag wordt manueel met een prikstaaf verdicht. In elke laag wordt 25 keer geprikt. Na de verdichting van een laag wordt lichtjes op de zijkant van de container getikt om ingesloten lucht te verwijderen.

Eenmaal de container volledig gevuld is wordt het geheel gewogen tot op een nauwkeurigheid van 0,01 kg en wordt zo M_2 verkregen. De dichtheid van het beton wordt vervolgens berekend met volgende Formule 2.

$$D = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (2)$$

Het resultaat wordt geschreven in kg/m^3 en afgerond tot op 10 kg/m^3 .

1.10.5. Druksterkte – NBN EN 12390-3 (2019)

Het doel van de drukproef is het nagaan van de maximale druksterkte door de proefstukken te belasten tot falen optreedt in een drukmachine. Vooraleer de teststukken in het toestel geplaatst worden moeten alle oppervlakken proper zijn. Zowel de oppervlakken van de kubussen als de raakvlakken met het toestel.

Wanneer de kubus in het toestel geplaatst wordt, moet erop gelet worden dat de last loodrecht aangebracht wordt. Het is belangrijk dat deze last niet op de afgestreken zijde wordt aangebracht en dat de kubus ook niet op deze zijde rust om spanningsconcentraties te vermijden.

De last wordt aangebracht op constante wijze met een continue snelheid van $0,6 \pm 0,2 \text{ MPa/s}$. Deze last, de initiële last, wordt aangebracht en gradueel verhoogd met $\pm 10 \%$ totdat het proefstuk faalt. De hoogste waarde is de finale last en wordt opgeschreven als F in Newton.

Wanneer het proefstuk breekt, kan het op verschillende manieren breken. Afhankelijk van hoe het proefstuk breekt, kan opgemaakt worden of de test goed werd uitgevoerd. Algemeen wordt aangenomen dat de vier vlakken van de kubus waarop niet gedrukt wordt, op ongeveer dezelfde manier breken. Wanneer het fout gaat kan dit te wijten zijn aan een slechte positie van het proefstuk of een fout met het toestel.

De druksterkte kan bepaald worden met Formule 3:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3)$$

Waarbij:

- F_c gelijk is aan de druksterkte uitgedrukt in MPa (N/mm²)
- F gelijk is aan de maximum kracht bij breken uitgedrukt in N
- A_c de oppervlakte is waarop de kracht aangrijpt, uitgedrukt in mm²

De druksterkte wordt afgerond op 0,5 MPa.

1.10.6. Volumemassa van verhard beton – NBN EN 12390-7 (2019)

Om de volumemassa van het verhard beton te bepalen, moet volgens de norm de massa en het volume van het proefstuk apart bepaald worden.

Allereerst wordt de massa van het verharde beton bepaald. Het proefstuk kan zich in drie verschillende toestanden bevinden: verkregen toestand, verzadigd met water of oven-gedroogd. De proefstukken worden vaak bewaard onder water, net zoals in deze masterproef. Daarom worden enkel proefstukken in verzadigde toestand besproken. De massa van de proefstukken wordt bepaald na het overvullige water aan het oppervlak te verwijderen.

Het volume van het proefstuk kan tevens op drie verschillende manieren bepaald worden. De eerste methode is door de verplaatsing van het water te meten. Bij deze methode moet het proefstuk steeds met water verzadigd zijn. Een gesatureerd proefstuk wordt volgens de norm NBN EN 12390-7 verkregen na minstens 72 uur onder water geplaatst te zijn. Een andere methode is het uitrekenen van het volume aan de hand van de afmetingen. Dit kan door te rekenen met de effectieve afmetingen of door het gebruik van de gecontroleerde, ontworpen afmetingen. Deze laatste manier van berekenen wordt enkel toegepast bij kubussen die vervaardigd zijn in gekalibreerde mallen die overeenstemmen met de norm. Wanneer het volume aan de hand van de afmetingen berekend wordt, wordt het resultaat geschreven met vier beduidende cijfers met de eenheid m³.

Ten slotte kan de volumemassa van het verharde beton bepaald worden volgens Formule 4. Het resultaat wordt afgerond naar de dichtstbijzijnde 10 kg/m³.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

1.10.7. Falling Head Test – EN 17892-11 (2004)

Deze methode wordt gebruikt om de waterdoorlatendheid van verzadigde gronden te bepalen. De hoeveelheid water dat door het proefstuk gaat en de bijhorende drukcondities worden opgemeten. Met deze waarden kan de bepaling van de waterdoorlatendheidscoëfficiënt gebeuren.

Tijdens de metingen blijven zowel de hydraulische als de waterverzadiging constant. Tijdens de beproeving worden de proefstukken onderworpen aan een hydraulische gradiënt, deze kan zelf gekozen worden zolang het in overeenkomst is met de aannames voor laminaire stroming volgens de wet van Darcy.

De temperatuur heeft een belangrijke invloed op de viscositeit. Daarom is het van belang met een zo constant mogelijke temperatuur te werken. Als basis wordt de kamertemperatuur $\pm 2^{\circ}\text{C}$ gekozen.

Ten allen tijde dienen lekken langs de randen van de proefstukken vermeden te worden. Kanaaltjes moeten met gepast materiaal opgevuld worden, of een omhulling wordt rond de buitenomtrek van het monster aangebracht. Het is belangrijk dat geen vermenging in het proefstuk ontstaat.

1.11. Literatuurresultaten van schelpen in beton

In de volgende paragrafen worden de literatuurresultaten van het gebruik van de schelpen besproken. Zowel de veranderingen van de eigenschappen van het verse beton als van het uitgeharde beton worden besproken. Bij de laatste categorie wordt een onderscheid gemaakt tussen mechanische en fysische eigenschappen.

De gebruikte literatuur wordt in

Tabel 5 weergegeven. Hierbij worden de belangrijkste elementen zoals het soort schelpen, het vervangingspercentage en w/c-factor opgelijst.

Tabel 5: De belangrijkste literatuur met de belangrijkste onderzoeksfactoren

Auteur	Type schelpen	Vervanging granulaat	Vervangings- percentage %	Type cement	w/c
Varhen et al.	Scallop [1,19/4,75]	Fijn granulaat [0/4,75]	5, 20, 40 en 60	Portland cement	0,41
				moderate	0,45
				sulfate resistance	0,55
Yang et al. (2005)	Oesterschelpen [0/5]	Fijn granulaat	5, 10, 20	OPC, type I	0,45
Yang et al. (2010)	Oesterschelpen [0/5]	Fijn granulaat	10, 20	OPC , type I	0,45
Kuo et al. (2013)	Oesterschelpen [0/4]	Fijn granulaat	5, 10, 15, 20	OPC, type I	1,3
Martinez- Garcia et al.	Mosselen [4/16] en [0/4]	Fijn granulaat [0/4]	Fijn granulaat: 25, 50, 65	Cem II/A-M (V-L) 42.5 R	0.50
		Grof granulaat	Grof granulaat:		

Auteur	Type schelpen	Vervanging granulaat	Vervangingspercentage %	Type cement	w/c
		[4/16], [10/20]	25, 50, 65 Combinatie: 5, 12.5		
CuadradoRica et al.	Queen scallop [0/5]	Fijn granulaat [0/4] Grof granulaat [4/10], [10/20]	20, 40, 60	CEM I 52,5 R	0.60
Nguyen et al.	Queen scallop [2/4]	Grof granulaat [2/6,3]	20, 40, 60	CEM I 52,5 R	0,30 0,37
Falade	Zeeslakken [6,3/16]	Grof granulaat [6,3/19]	10, 20, 30, 40, 50, 100	OPC, type I	0.50, 0.55, 0.60, 0.80
Khankhaje et al.	Kokkelschelpen [6,3/9,5] en 4,75/6,3]	Grof granulaat [6,3/9,5]	25, 50, 75	OPC, type I	0,32
Monita Olivia et al.	Kokkels en Clam schelpen, in poedervorm	Cement	4	OPC, type I	0,36

1.11.1. Vers beton

1.11.1.1. Zetmaat – kegel van Abrams

Verscheidene onderzoeken zijn het, in het geval van de zetmaat, eens met elkaar. Door het toevoegen van schelpen zal de verwerkbaarheid van het verse beton dalen. Verschillende factoren dragen bij tot deze verandering in verwerkbaarheid. Echter is niet elk onderzoek het eens met deze bevinding zoals hieronder beschreven wordt.

In de meeste gevallen worden granulaten vervangen door schelpen op basis van het gewicht. De korrelverdeling van de vervangende schelpen is echter niet gelijk aan die van de conventionele

granulaten. Bij het onderzoek van Falade worden grove granulaten vervangen door schelpen die een kleinere korrelverdeling hebben. De volumemassa van de alikruikschelpen ligt onder die van de grove granulaten. Een grotere hoeveelheid schelpen zullen gebruikt moeten worden om eenzelfde gewicht te compenseren. Hierdoor ontstaat een grotere specifieke oppervlakte dan origineel aanwezig was. Doordat gewerkt wordt met een constante w/c-factor moet eenzelfde hoeveelheid water meer oppervlak bevochtigen, waardoor de verwerkbaarheid van het beton verlaagt (Falade, 1995).

Recenter onderzoek kwam tot dezelfde constatactie. De fijnheidsmodulus van de oesterschelpen in het onderzoek van Kuo et al. is beduidend kleiner dan die van de fijne granulaten respectievelijk 2,0 mm en 3,2 mm. Wanneer de deeltjes kleiner worden, wordt het specifieke oppervlak groter. Dit grotere oppervlak kan dan meer water absorberen dan gewoonlijk. Verder wordt gebruik gemaakt van droge schelpen die over een grotere waterabsorptie dan zand beschikken. Meer aanmaakwater gaat verloren waardoor het beton minder vloeibaar wordt (Kuo et al., 2013). Bij de constante w/c-factor moet bovendien eenzelfde hoeveelheid cement dit vergrote oppervlak kunnen dekken, wat minder goed zal lukken (Varhen et al., 2017).

Deze bevindingen kunnen doorgetrokken worden naar onderzoek waarbij de vervanging niet op basis van gewicht, maar op basis van pakingsdichtheid gebeurt. Deze resultaten komen overeen wanneer de fijne granulaten vervangen worden door schelpen. De basissamenstelling bij het onderzoek van Cuadrado-Rica et al. (2016) heeft een zetmaat van 11 cm terwijl de samenstelling met 60 % vervanging slechts een zetmaat heeft van 6 cm.

Wanneer de w/c-factor constant gehouden wordt voor alle samenstellingen zal de zetmaat afnemen naarmate meer schelpen toegevoegd worden aan het mengsel. De cement/aggregaat-factor, de hoeveelheid schelpen en de ingesloten lucht worden dan de belangrijkste factoren die de zetmaat beïnvloeden. Hoe meer schelpen in het beton verwerkt worden, hoe groter de cement/aggregaat-verhouding wordt, wat de verwerkbaarheid van het mengsel doet verminderen. Hierbij zal echter ook een groter luchtgehalte optreden, wat de vloeibaarheid van het beton wel ten goede komt (Cuadrado-Rica et al., 2016).

De lage waarde van de zetmaat en in sommige gevallen de nulwaarde of 'zero slump' genoemd, kan echter een voordeel zijn bij specifieke toepassingen. Zo kan dit beton gebruikt worden voor prefab toepassingen zoals straatstenen of kan het beton gebruikt worden voor bestratingsmachines bij bijvoorbeeld de aanleg van boordstenen. (Nguyen et al., 2013)

Het onderzoek van Varhen et al. (2017) levert echter een ander beeld op. Het onderzoek bekijkt zowel betonmengsels met een hoge als een lage w/c-factor. Een duidelijk verschil tussen deze twee soorten is op te merken. Wanneer lage w/c-factoren gebruikt worden bij het vervaardigen van het beton, zal de zetmaat van het verse beton ongeveer gelijk zijn aan dat van de basissamenstelling. Bij

het gebruik van een hoge w/c-factor werd echter een grotere zetmaat opgemeten. (Varhen et al., 2017)

De verklaring van deze tegenovergestelde waarden zit in de vorm en grootte van de deeltjes. Aangezien de cement/aggregaat-verhouding en het luchtgehalte onveranderd blijft bij toevoeging van schelpen, spelen deze twee eigenschappen niet mee bij de verklaring van de zetmaat. Het positieve effect op de verwerkbaarheid heeft te maken met de grovere vorm van de sint-jakobsschelpen. In het onderzoek van Varhen et al. (2017) wordt immers de kleinste fractie, kleiner dan 1,19 mm, niet gebruikt. De granulaten worden globaal gezien dus grover in plaats van fijner zoals bij andere onderzoeken. Minder cement zal dus nodig zijn om alle deeltjes van een cementlaagje te voorzien, aangezien minder specifieke oppervlakte aanwezig is. (Varhen et al., 2017)

1.11.1.2. Volumieke massa vers beton

Algemeen wordt aangenomen dat de vervanging van granulaten door schelpen zorgt voor een vermindering van de volumieke massa van vers beton. Deze afname wordt toegekend aan de lichtere pakking van de schelpen. Bovendien hebben de schelpen zelf een lagere dichtheid dan de conventionele granulaten. Het onderzoek van Nguyen et al. (2013) vervangt grof granulaat met fracties 2/6,3 mm door gebroken sint-jakobsschelpen met de fractie 2/4 mm. De eerst vernoemde heeft een dichtheid van 2716 kg/m³, wat duidelijk hoger ligt dan de dichtheid van de laatstgenoemde, namelijk 2497 kg/m³.

Wanneer fijn granulaat vervangen wordt door schelpen, komt dezelfde verklaring naar boven. Cuadrado-Rica et al (2016) verving zand door sint-jakobsschelpen 0/5 mm. Het natuurlijke aggregaat heeft een dichtheid van 2690 kg/m³ terwijl de schelpen over een dichtheid van 2635 kg/m³ beschikken.

Slechts één onderzoek komt deels verschillende waarden uit. Voor betonspecies met een hoge w/c-factor van 0,55 daalt de volumieke massa naarmate meer schelpen aan het mengsel worden toegevoegd. Dit komt overeen met de algemene tendens. Wanneer echter gebruik gemaakt wordt van een lagere w/c-factor, zijnde 0,41 en 0,45 blijft de dichtheid van het beton ongeveer gelijk ongeacht de hoeveelheid schelpen. Schelpen ordenen zich over het algemeen verschillend dan natuurlijke granulaten. Hierdoor wordt de optimale rangschikking van de deeltjes verstoord en ontstaan meer openingen tussen de granulaten. Een grotere hoeveelheid cementpasta is nodig om deze bijkomende openingen te vullen. Bij grotere w/c-factoren is dit fenomeen sterker aanwezig. (Varhen et al., 2017)

1.11.1.3. Luchtgehalte

Volgens Cuadrado-Rica et al. (2016) zorgt de aanwezigheid van schelpen in het beton voor een verhoging van de hoeveelheid lucht. De stijging van het luchtgehalte valt te verklaren door de vorm

van de schelpen. De platte en naaldvormige schelpen hebben een grotere specifieke oppervlakte dan dat van de vertrouwde granulaten. Het grotere oppervlak zorgt ervoor dat luchtbelletjes zich makkelijker op het oppervlak kunnen hechten. Bij dit onderzoek zorgt echter niet alleen de vorm voor een grotere hoeveelheid aan lucht in het beton. De schelpen werden vooraf niet gereinigd waardoor nog organisch materiaal aan het oppervlak terug te vinden was. Dit organisch materiaal zorgt mee voor een stijging van het luchtgehalte. (Cuadrado-Rica et al., 2016)

Wanneer het organisch materiaal wel verwijderd wordt door een goede voorafgaande reiniging te voorzien, hebben de schelpen geen sterke invloed op het luchtgehalte. De hoeveelheid lucht schommelt nog steeds rond die van het basismengsel. Er kan dus besloten worden dat het luchtgehalte onafhankelijk is van de vervangingsgraad van de schelpen. (Yang et al., 2005)

Wanneer de kleinste deeltjes van de schelpen, namelijk fracties kleiner dan 1 mm, niet gebruikt worden, is nog minder variatie in het luchtgehalte op te merken. (Varhen et al., 2017) De aanwezige lucht in het beton bestaat voornamelijk uit ingesloten lucht die bij het mixen van het beton en bij het vullen van de mallen in de betonspecie wordt gemengd. Het luchtgehalte is dus wel gevoelig aan de manier waarop het beton geproduceerd wordt.

1.11.1.4. De uithardingstijd

De impact van het gebruik van schelpen op de uithardingstijd van het beton werd door enkele studies nader bekeken. Niet alleen de finale uithardingstijd werd onderzocht, maar ook de initiële uithardingstijd werd nader bekeken.

Naarmate meer zeeschelpen aanwezig zijn in het beton, daalt de uithardingstijd wanneer cement vervangen wordt door schelpen. Schelpen bevatten na verhitting veel calciumoxide waardoor de hydratatiereactie van het aanwezige cement sneller doorgaat. Deze eigenschap heeft een groot voordeel bij toepassingen waarbij het beton snel moet uitharden in combinatie met een hoge sterkte. (Olivia, Oktaviani, & Ismeddiyanto, 2017)

Verder speelt de w/c-factor van het beton een grote rol bij de uithardingstijd. Varhen et al. (2017) ondervond dat een grote w/c-factor leidt tot een vertraging van de initiële uitharding. Het omgekeerde effect ontstaat bij het gebruik van een kleine w/c-factor. De aanwezigheid van meer openingen in het beton kan het hydratatieproces van het cement bemoeilijken. Echter zal ook de verhouding van de granulaten tot de hoeveelheid cement een rol spelen. Zoals reeds aangehaald moet eenzelfde cementpasta een groter oppervlak bedekken wanneer schelpen aan het mengsel worden toegevoegd. De mindere aanwezigheid van cement speelt dus zeker een rol bij de initiële uithardingstijd. (Varhen et al., 2017)

Wanneer de finale uithardingstijd wordt bekeken is het duidelijk dat de aanwezigheid van schelpen meestal een daling veroorzaakt, maar soms ook de oorspronkelijke waarde behoudt. Bij Yang et al.

(2005) werd vastgesteld dat de uithardingstijd ongeveer gelijk blijft, ongeacht de hoeveelheid schelpen dat wordt gebruikt. Ze kwamen tot de conclusie dat de vervanging tot 20 % van het fijne aggregaat door schelpen geen significante veranderingen met zich meebrengt waardoor het gebruik van schelpen geen nadeel tot gevolg heeft. (Varhen et al., 2017)

1.11.2. Mechanische eigenschappen beton

1.11.2.1. De druksterkte

De druksterkte wordt gemeten wanneer de proefstukken een ouderdom hebben van 28 dagen. Toch kan deze eveneens op andere tijdstippen gemeten worden. Hierdoor komt de evolutie van de druksterkte aan het licht en kan in veel gevallen vastgesteld worden dat het vervaardigde beton over een vroege hoge sterkte beschikt.

In de bestudeerde papers zijn drie grote groepen op te merken: vervanging van fijn granulaat, grof granulaat en vervanging van cement door schelpen. Per groep wordt hieronder het resultaat van de drukproeven bekeken. Nadien kan makkelijk vergeleken worden of het soort vervanging een belangrijke impact heeft op de drukresultaten.

Allereerst wordt de impact van het vervangen van grof granulaat door schelpen bekeken. Het onderzoek van Nguyen et al. (2013) geeft een duidelijke daling van de druksterkte weer naarmate de vervangingsgraad van de sint-jakobschelpen groter wordt. Vooral bij de percentages 40 % en 60 % is de daling duidelijk te zien. Het 60 %-mengsel met druksterkte van 15,21 MPa voor een hoge w/c-factor, en 22,11 MPa voor een lagere w/c-factor, zorgt voor een daling van respectievelijk 29 % en 21 %.

Deze sterke daling is het gevolg van volgende drie oorzaken (Nguyen et al., 2013):

- Schelpen zijn fragieler dan natuurlijke granulaten zoals zand, ze hebben een lagere weerstand tegen fragmentatie. Deze weerstand kan gemeten worden aan de hand van de Los Angeles test.
- Schelpen zorgen voor een grotere porositeit. Het conventionele granulaat heeft een rondere vorm waardoor het zich volgens de optimale pakingsgraad kan schikken. De platte vorm van de schelpen verstoort deze schikking en zorgt dus voor een mindere compactheid.
- Schelpen scoren op de flakiness-index een veel grotere waarde dan de natuurlijke granulaten, respectievelijk 98,4 en 20,1. Dit zorgt voor een vergroting van het specifiek oppervlak dat nog steeds door dezelfde hoeveelheid cement bedekt dient te worden. De kleinere dikte aan cementpasta waarmee de korrels bedekt zullen worden, zorgt voor een zwakkere binding in de matrix.

Het recentere onderzoek van Kankhaje et al. (2017) toont een gelijkaardig resultaat. Hier treedt een daling van 20, 25 en 38 % op ten opzichte van het basismengsel voor vervangingsgraden van 25, 50

en 75 %. Wanneer de mengsels met kokkelschelpen met een kleinere korrelverdeling vergeleken worden met deze met een grotere korrelverdeling valt op dat de eerstgenoemde steeds een grotere druksterkte vertoont. De kleinere deeltjes kunnen zich immers beter in de ontstane openingen nestelen waardoor het beton compacter wordt.

Daar bij vervanging van grof granulaat een duidelijke daling van de druksterkte gemeten wordt, is dit niet steeds het geval bij de vervanging van fijn granulaat. Vanaf een vervanging van 10 % voor het fijne granulaat wordt de druksterkte kleiner dan deze van het referentiemengsel. Zowel een verdere daling naarmate meer schelpen in het beton aanwezig zijn (Kuo et al., 2013) als geen specifiek verband met de hoeveelheid schelpen komt voor (Varhen et al., 2017). Het onderzoek van Yang et al. (2005) vindt anderzijds druksterktes die rond de sterkte van het basismengsel liggen.

Het resultaat van Kuo et al. (2013) is te verwachten aangezien de porositeit van het proefstuk toeneemt naarmate meer schelpen in het beton aanwezig zijn. Hierop wordt bij de fysische eigenschappen dieper ingegaan. Bovendien is de fijnheidmodulus van schelpen kleiner dan de fijnheidsmodulus van het gewone fijn granulaat. Hoe meer zand vervangen wordt door schelpen, hoe kleiner de totale FM van het fijne granulaat wordt en hoe slechter het resultaat van de druksterkte. (Kuo et al., 2013)

Bij een vervangingsgraad van 5 % zijn de onderzoeken het wel eens: de druksterkte ligt hoger dan de druksterkte van het referentiebeton. De poriën kunnen bij deze vervangingsgraad wel nog gevuld worden wat leidt tot een lager gehalte aan holtes in het beton. De vervangingsgraad leidt met andere woorden tot een dichtere interne structuur ongeacht de w/c-factor. (Kuo et al., 2013; Varhen et al., 2017)

Een ander beeld van de resultaten wordt verkregen wanneer cement vervangen wordt door schelpen. Het onderzoek van Olivia et al. (2017) toont aan dat het type gebruikte schelp een grote invloed heeft. Wanneer het cement vervangen wordt door kokkelschelpen in poedervorm zijn de waarden van de druksterkte op alle ouderdommen lager dan deze van het basismengsel. Wanneer echter de vervanging gebeurt met tweekleppige schelpen, stijgt de druksterkte boven die van het mengsel zonder schelpen. Dit resultaat valt te verklaren door het gehalte aan CaO in de schelpen. Indien weinig CaO in de schelpen aanwezig is, zoals bij de kokkels, zal de hydratatiereactie in mindere mate doorgaan waardoor de druksterkte verlaagt. (Olivia et al., 2017)

Daar het onderzoek van Olivia et al. (2017) enkel een vervangingsgraad onderzoekt van 4 %, maakt ander onderzoek gebruik van de vervangingsgraden 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20 en 30 % voor gemalen kokkelschelpen. Net zoals bij het voorgaande zorgt de vervangingsgraad van 4 % voor een daling in de druksterkte. Voor de vervangingsgraden 7, 8 en 15 % kent de druksterkte echter grotere waarden dan het basismengsel. Een vervanging van 8 % zorgt voor de grootste druksterkte, maar een duidelijke trend kan niet opgemaakt worden uit de resultaten. (Soltanzadeh et al., 2018)

1.11.2.2. *De treksterkte*

Net zoals bij de druksterkte stijgt de treksterkte op vroege leeftijd bij aanwezigheid van schelpen (Nguyen et al., 2013). Deze verhoging blijft echter niet. De treksterkte gemeten na 28 dagen kent een lichte daling wanneer schelpen aan het betonmengsel worden toegevoegd.

Bij de splijttreksterkte is de sterkte van de betonmatrix van groot belang. Aangezien slechts een lichte daling gemeten wordt, hebben de schelpen hier niet zoveel invloed. De schelpen hebben een gelijkaardige adhesie naar cement toe als de conventionele granulaten, ondanks hun gladde zijde (Varhen et al., 2017). Nguyen et al. (2013) beweert echter dat de daling te maken heeft met de lage bindingskracht tussen cement en schelpen. Er werd immers een trend opgemerkt namelijk wanneer meer schelpen verwerkt worden de treksterkte afnam. Ook een lagere w/c-factor, of dus meer cement, zorgt voor een hogere sterkte. Volgens Yang et al. (2005) doen zich tevens spanningsconcentraties voor rondom de schelpen. Dit fenomeen is duidelijker op te merken bij de treksterkte dan de druksterkte.

Net zoals bij traditioneel beton staan de druksterkte en treksterkte in relatie met elkaar. De waarde van de verhouding tussen trek en druk vertonen slechts kleine variaties. Volgens Varhen et al. (2017) wordt hiermee bewezen dat een goede adhesie tussen de schelpen en het cement aanwezig is. Dit staat in contrast met de bewering van Nguyen et al. (2013).

De relatie tussen de druksterkte en de treksterkte wordt voor een normaal beton weergegeven aan de hand van Formule 5.

$$f_t = A (f'_c)^b \quad (5)$$

Zowel het onderzoek van Yang et al. (2005) als Varhen et al. (2017) onderzochten of deze relatie ook toepasbaar was op een waterdoorlatend beton. Door het toepassen van de formule kan de treksterkte van een proefstuk voorspeld worden. Beide beweren dat de relatie aan de hand van deze formule kan weergegeven worden, maar dat meer onderzoek nodig is aangezien ze slechts een kleine hoeveelheid data konden vergelijken.

1.11.3. **Fysische eigenschappen**

1.11.3.1. *Dichtheid*

Zowel bij vervanging van grof als fijn granaat geldt de eigenschap dat het toevoegen van schelpen voor een lagere densiteit zorgt van het uitgeharde beton.

Nguyen et al. (2013) waar schelpen als vervanger van gravel 2/6,3 mm dienen, merkte wel een nuance op. Deze stelling geldt enkel wanneer de vervangingsgraad groter is dan 20 %. Bij een vervangingsgraad van 20 % ligt de densiteit in de buurt van de oorspronkelijke dichtheid. Bij grotere vervangingspercentages treedt de daling wel duidelijk op. Het basismengsel heeft een dichtheid van

1985 kg/m³ terwijl het betonmengsel met 60 % vervangingsgraad slechts een dichtheid van 1760 kg/m³ laat opmeten. Deze daling kan verklaard worden door de manier waarop de schelpen zich ordenen in het beton. Schelpen hebben een plattere vorm dan de gewone granulaten. Hierdoor ontstaat een minder compact beton in vergelijking met het gebruik van conventionele granulaten waardoor meer ingesloten lucht zich in het beton bevindt. (Nguyen et al., 2013)

Tevens hebben de schelpen op zich een lagere schijnbare volumemassa dan de voorhand liggende granulaten. Bij Agbede en Manasseh (2009) werd riviergrind vervangen door zeeskakken. De eerste heeft een schijnbare volumemassa van 1611 kg/m³ terwijl de laatstgenoemde slechts een schijnbare volumemassa heeft van 515 kg/m³. Wanneer de zeeschelpen het oorspronkelijke granulaat volledig vervangen wordt hierbij van lichtgewicht-beton gesproken terwijl de andere vervangingsgraden een normaal beton opleveren zoals het basismengsel. (Agbede & Manasseh, 2009)

Wanneer de schelpen echter het cement vervangen is de soort van groot belang. Kokkelschelpen zorgen in het onderzoek van Olivia et al. (2017) voor een lagere dichtheid, terwijl de clam-zeeschelpen een grotere dichtheid dan het basismengsel als gevolg hebben. De vermindering in dichtheid kan hierbij gekoppeld worden aan een minder volledige hydratatie waardoor de deeltjes niet meer dicht op elkaar gepakt zitten. (Olivia et al., 2017)

1.11.3.2. Porositeit

Zoals te verwachten zorgt de aanwezigheid van schelpen voor een hogere porositeit. Hier zijn alle onderzoeken het over eens. Hoe meer schelpen aanwezig zijn in de betonmix, hoe groter de porositeit zal zijn.

Nguyen et al. (2013) verklaarde het fenomeen door de PD. Wanneer schelpen toegevoegd worden aan een betonmengsel komt dit niet ten goede aan de pakkingsdichtheid. De naaldvorm of schijfvorm van de schelpen zorgen voor een andere soort binding dan de binding die de conventionele ronde vorm van de natuurlijke granulaten aangaat. Bovendien is de porositeit van het proefstuk ook te wijten aan de hogere porositeit van de schelpen zelf (Kuo et al., 2013). Ze zijn opvallend poreuzer dan het conventionele aggregaat zoals zand en grind. (Nguyen et al., 2013)

In het onderzoek van Cuadrado-Rica et al. (2016) hebben de basissamenstelling en de samenstelling met 20 % schelpen ongeveer dezelfde waarde voor open porositeit. Bij de samenstellingen met 40 % en 60 % vervanging is de open porositeit merkbaar vergroot. Ook hier geldt hoe meer schelpen, hoe groter de open porositeit. Verder is een duidelijk verschil op te merken tussen de waarden bekomen na 28 dagen en de waarden na 91 dagen. De open porositeit van het basismengsel verschilt nauwelijks in hoeveelheid bij het vergelijken van de twee testmomenten. Wanneer echter schelpen in het betonmengsel aanwezig zijn, neemt de open porositeit toe naarmate de ouderdom van het beton: + 5,4 %, + 7,5 %, + 11,5 % voor de vervangingsgraden 20, 40 en 60 %. (Cuadrado-Rica et al., 2016)

Belangrijk om op te merken is dat de open porositeit bovenaan het proefstuk hoger is dan onderaan. Dit kan verklaard worden door de manier waarop het proefstuk is gemaakt. De mal wordt in drie lagen opgevuld en na elke laag getrild. De onderste laag verkrijgt dus drie trillingen, terwijl de bovenste laag maar één keer onderworpen wordt aan het trillen. Hoe meer schelpen in het beton verwerkt worden hoe groter de variatie wordt doorheen de hoogte van het proefstuk. De schelpen zullen de doeltreffendheid van het trillen dus beperken. (Cuadrado-Rica et al., 2016)

1.11.3.3. Waterpermeabiliteit

Regenwater zou volledig in het beton moeten kunnen doordringen zodat het via deze weg makkelijk kan infiltreren in de bodem. De waterpermeabiliteit van het beton is dus van groot belang. Het is algemeen aanvaard dat wanneer de porositeit stijgt, ook de waterpermeabiliteit stijgt en de druksterkte van het beton daalt. Deze daling van de druksterkte van het beton kan een kortere levensduur tot gevolg hebben (Nguyen et al., 2013).

Het effect van schelpen op deze waterpermeabiliteit is echter nog onduidelijk. Verschillende onderzoeken merken een stijging op wanneer ook het percentage aan schelpen stijgt. Deze stijging is logisch aangezien de beproefde open porositeit eveneens een stijging vertoont. (Cuadrado-Rica et al., 2016; Nguyen et al., 2017; Nguyen et al., 2013)

In het onderzoek van Martinez-Garcia et al. (2017) daalt daarentegen de doorlaatbaarheid naarmate meer schelpen in het beton verwerkt worden. Dit valt te verklaren aan de hand van de manier waarop de deeltjes zich in het beton oriënteren. De schelpen prefereren om zich horizontaal te plaatsen waardoor ze als een barrière voor het water fungeren. (Martinez-Garcia, Gonzalez-Fonteboa, Martinez-Abella, & Carro-Lopez, 2017) Ander onderzoek wijdt de daling echter toe aan het gebruik van de kleine deeltjes van de schelpen. (Yang et al., 2010)

Een stijging van de doorlaatbaarheid bij de aanwezigheid van schelpen zoals bij Nguyen et al. (2013) doet zich echter nog meer voor. Hoe meer schelpen in beton verwerkt worden, hoe hoger de permeabiliteit doordat deze zorgen voor een hoger poriëngehalte in het beton. De hoekige vorm zorgt immers dat de compactheid van het beton vermindert. Wanneer bovendien kleinere schelpen gebruikt worden, zal de waterpermeabiliteit ook dalen aangezien de poriën weer meer gevuld geraken. (Khankhaje et al., 2016)

In het onderzoek van Nguyen et al. (2013) wordt vastgesteld dat de permeabiliteit een drastische daling kent wanneer de hoeveelheid binder, namelijk cement, verhoogt en dit onafhankelijk van de hoeveelheid schelpen dat gebruikt wordt. Toch hebben alle proefstukken een permeabiliteitscoëfficiënt dat hoger is dan de standaardwaarde van $5.4 \cdot 10^{-2}$ mm/s voor doorlatend beton. Dergelijk hoge waarden voor de permeabiliteit hangen vast aan een regenval die in theorie niet voorkomt in Frankrijk, waar het onderzoek uitgevoerd werd. Aangezien hogere permeabiliteit

een lagere sterkte met zich meebrengt, is het belangrijk dat een goed evenwicht gezocht wordt.
(Nguyen et al., 2013)

2. Probleemstelling

De toekomstmogelijkheden van afvalmateriaal als granulaatvervanging is een gegeven die steeds meer aandacht krijgt binnen de bouwsector. De groeiende afvalproblematiek en uitputting van natuurlijke bronnen zijn twee problemen die in de nabije toekomst aangepakt dienen te worden. Daarom wordt in het kader van deze masterproef onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid van kokkelschelpen in beton als granulaatvervanging. Vanuit de literatuur wordt het duidelijk dat er veel problemen zijn waar in de toekomst een antwoord op geboden kan worden. Enkele van deze problemen zijn:

- Wat is de optimale vervangingsgraad voor (kokkel)schelpen in waterdoorlatend beton voor funderingen van waterdoorlatende verharding?
- Wat zijn de mechanische eigenschappen zoals druksterkte, treksterkte, taaheid en hardheid van het beton met verschillende vervangingspercentages?
- Wat zijn de fysische eigenschappen van de betonspecie?
- Wat is de invloed van het voorbereidingsproces op de eigenschappen van het beton?
- Wat zijn de gevolgen van granulaatvervanging door schelpen op lange termijn voor druksterkte en waterdoorlatendheid?
- Heeft het plaatsen van wapening een invloed op de chemische eigenschappen van de schelpen of het beton in zijn geheel?
- Zijn op basis van de fysische eigenschappen van de verschillende soorten schelpen bepaalde schelpen beter geschikt dan andere als granulaatvervanging?
- In welke mate is het vervangen van granulaat door schelpen praktisch toepasbaar in de bouwsector op industriële schaal?
- Is het rendabel om schelpen te verwerken in beton op basis van de kostprijsanalyse?

Zoals de literatuur aantoont, kan de toevoeging van schelpen zorgen voor een betere waterdoorlaatbaarheid van het beton. Deze vooruitgang in doorlaatbaarheid gaat echter dikwijls ten koste van de druksterkte. Om een compromis te vinden tussen beide eigenschappen zal in deze masterproef onderzoek gedaan worden naar de optimale vervangingsgraad van schelpen in beton bij waterdoorlatende funderingen. Hierdoor zal een antwoord gegeven worden op drie van bovenstaande problemen namelijk het effect op de mechanische en fysische eigenschappen en de optimale vervangingsgraad.

3. Afbakening van onderzoeksveld - Doelstellingen

In deze masterproef wordt onderzoek gedaan naar de optimale vervangingsgraad van kokkelschelpen waarbij zowel de waterdoorlaatbaarheid als de druksterkte aanvaardbare waarden vertonen. Specifiek wordt dit uitgewerkt voor waterdoorlatend beton voor funderingen van waterdoorlatende verhardingen. Om hiertoe te komen zal in de verschillende betonmengsels het fijne granulaat vervangen worden voor 0, 5, 10, 15 en 20 %. Concreet zal deze masterproef een zo volledig mogelijk antwoord trachten te formuleren op de onderzoeksvraag “Wat is de optimale vervangingsgraad van schelpen in beton bij waterdoorlatende funderingen voor waterdoorlatende oppervlakken”. De referentiepapier van Varhen et al. uit 2017 wordt beschouwd als basis van dit onderzoek. In deze referentiepapier werden de randvoorwaarden en de parameters voor de gebruikte granulaten reeds beschreven. Op basis van de resultaten uit deze referentiepapier en de eigen resultaten zal een analyse gemaakt kunnen worden van de gelijkenissen en verschillen die opduiken. Doorheen het onderzoek worden antwoorden geboden op de vragen:

- Wat is de optimale vervangingsgraad voor (kokkel)schelpen in waterdoorlatend beton voor funderingen van waterdoorlatende verharding?
- Wat zijn de mechanische eigenschappen zoals druksterkte, treksterkte, taaiheid en hardheid van het beton met verschillende vervangingspercentages?
- Wat zijn de fysische eigenschappen van de betonspecie?
- Wat zijn de gevolgen van granulaatvervanging door schelpen op lange termijn voor druksterkte en waterdoorlatendheid?

In dit onderzoeksrapport zal niet specifiek ingegaan worden op de kostprijsanalyse, de praktische toepasbaarheid op industriële schaal, de verschillen en gelijkenissen in voorbehandelingen van de granulaten en de invloed van wapening op de chemische en mechanische eigenschappen van het beton.

4. Onderzoeksaanpak en -methodologie

Het vertrekpunt van dit onderzoek is de referentiepaper van Varhen et al. uit 2017. De beslissingen die gemaakt worden in het eigen onderzoek, zijn gebaseerd op de randvoorwaarden uit het onderzoek van dit artikel. Door de condities zo optimaal mogelijk na te bootsen van dit voorgaande onderzoek, zal een vergelijking gemaakt kunnen worden tussen de eigen resultaten en de reeds bestaande resultaten. De betonsamenstelling voor dit onderzoek is daarom gebaseerd op de referentiepaper mits een verschil in het gebruikte grove granulaat. Hiervoor wordt verder verwezen naar onderdeel 5.2.3 *Grof granulaat* waarin dit verder verduidelijkt wordt.

De twee verschillende betonsamenstellingen van het referentieonderzoek zijn in onderstaande Tabel 6 en Tabel 7 weergegeven, er wordt gewerkt met een w/c-factor van respectievelijk 0,45 en 0,55. De basissamenstelling voor het eigen onderzoek is weergegeven in Tabel 8. Aan de hand van de milieu- en omgevingsklassen uit norm NBN B 15-001:2004 wordt bepaald welke water/cement-factor nodig is voor het waterdoorlatende beton. Het gaat hier om een beton bedoeld voor (onder)fundering van wegen of andere weginfrastructuur. Dit beton zit vervat in de omgevingsklasse EE4 en de milieuklasse XF4, wat leidt tot een water-cementfactor van 0,50. De verhoudingen van de overige granulaten worden overgenomen uit de referentiepaper. De gebruikte omgevingsklassen en duurzaamheidseisen voor ongewapend beton volgens de norm NBN B 15-001:2004 zijn weergegeven in Bijlage 9.1.

Tabel 6: Basissamenstelling uit het referentieonderzoek met w/c-factor 0,45 (Varhen et al., 2017)

Materiaal	Verhouding	Kg.m⁻³
Water	0,45	226,00
Cement	1,00	502,22
Grof granulaat [12/25,4]	2,20	1103,50
Fijn granulaat [0/4.76]	1,01	509,35

Tabel 7: Basissamenstelling uit het referentieonderzoek met w/c-factor 0,55 (Varhen et al., 2017)

Materiaal	Verhouding	Kg.m-3
Water	0,55	215,30
Cement	1,00	391,45
Grof granulaat [12/25.4]	2,81	1100,22
Fijn granulaat [0/4.76]	1,61	629,34

Tabel 8: Basissamenstelling van het eigen onderzoek met w/c-factor 0,50

Materiaal	Verhouding	Kg.m⁻³
Water	0,50	160,00
Cement	1,00	320,00
Grof granulaat [6,3/20]	2,81	899,52
Fijn granulaat [0/5]	1,61	514,56

In dit onderzoek worden vijf vervangingspercentages met kokkelschelpen toegepast namelijk 0, 5, 10, 15 en 20 %. De voorbehandeling van het materiaal blijft steeds gelijk voor de vijf verschillende mengseltypes. Deze voorbehandeling wordt verder beschreven in paragraaf 5.2.4 *Schelpen* en wordt identiek gehouden aan de voorbehandeling van het referentieonderzoek om nadien de resultaten vergelijkbaar te maken. De betonsamenstellingen van de vijf mengsels zijn terug te vinden in Bijlage 9.2.

Na het bepalen van de betonsamenstelling, wordt nagegaan welke proeven uitgevoerd zullen worden. Deze proeven hebben betrekking op het droge granulaat, de natte betonspecie en de uitgeharde betonproefstukken. De testen die uitgevoerd worden, worden eveneens gebaseerd op het referentieonderzoek zodat nadien een passende vergelijking kan plaatsvinden. Als aanvulling hierop worden enkele bijkomende proeven voorzien zodat een beter beeld gevormd kan worden over de fysische eigenschappen van het mengsel. Vervolgens wordt aan de hand van het totaal aantal proeven bepaald hoeveel proefstukken vervaardigd dienen te worden en hoeveel materiaal nodig is om de proeven uit te voeren. Hierbij wordt een marge van 25 % gerekend om telkens een minimaal overschot te hebben bij het vervaardigen van een mengsel. Er wordt bij voorkeur één bestelling van

het nodige materiaal geplaatst zodat tijdens het onderzoek steeds hetzelfde materiaal voorhanden is en de variatie tussen de verschillende mengsels te beperken.

Om de druksterkte op korte termijn te bepalen worden per mengseltype drie kubussen van 150x150 mm gemaakt en drie cilinders van 100x300 mm. De bepaling van de druksterkte op lange termijn bestaat uit twee proefstukken per mengseltype met kubussen van 150x150 mm. De Falling Head test wordt uitgevoerd met drie cilindrische proefstukken van 100x200 mm per mengseltype en de open porositeit wordt eveneens uitgevoerd met drie cilindrische proefstukken van 100x200 mm per mengseltype. Wanneer de som van de benodigde proefstukken gemaakt wordt, bedraagt het totaal 70 proefstukken waarvan sommige proefstukken verschillende keren gebruikt zullen worden omdat ze inzetbaar zijn bij verschillende proeven. Zo worden de cilindrische proefstukken van de Falling Head test en de open porositeit na het beproeven gebruikt om bijkomende gegevens over de druksterkte te verkrijgen op korte termijn voor cilindrische proefstukken van 100x200 mm. De Mercury Intrusion Porosity (MIP) wordt tevens uitgevoerd met restanten van bestaande proefstukken na het doorvoeren van de druksterkteproef.

Wanneer dit alles vastgelegd is, kan de planning opgesteld worden. Hierbij dient rekening gehouden te worden dat na 28 dagen heel wat proeven uitgevoerd moeten worden. Daarom worden in één week maximaal twee betonmengsels gemaakt. Op deze manier kunnen de proeven zonder haast uitgevoerd worden en is een goede spreiding van de uit te voeren testen mogelijk. Zo wordt voor elk mengsel twee beproevingsdagen gerekend. De opgestelde planning voor de uitvoering van het volledige onderzoek is toegevoegd in Bijlage 9.3. In Bijlage 9.4 is een meer gedetailleerde planning terug te vinden die de specifieke voorbereidingen, proeven of andere handelingen op een bepaalde dag beschrijft. Zowel bij de algemene planning als de gedetailleerde planning staan verschillende taken in het rood. Dit duidt erop dat deze geplande activiteiten niet konden doorgaan door de coronacrisis.

5. Materialen en methodes

5.1. Betonmengsels

Uit de literatuurstudie wordt duidelijk dat de optimale vervangingsgraad van zand door schelpen lager ligt dan de gebruikelijke onderzoeken (Mo et al., 2018). Daarom wordt gekozen om een maximale vervangingsgraad van 20 % te realiseren in dit onderzoek. In totaal zullen vijf mengsels gemaakt worden, waarbij de vervangingsgraad in stappen van 5 % omhoog gaat. Op deze manier worden mengsels met een vervangingsgraad van 0, 5, 10, 15 en 20 % bekomen.

Het mengsel met 0 % schelpen wordt het basismengsel genoemd. De samenstelling van dit basismengsel wordt gebaseerd op het onderzoek van Varhen et al. (2017). De samenstelling hiervan wordt wel aangepast aan de Belgische normen zoals aan het standaardbestek 250 voor de wegenbouw. De uiteindelijke samenstelling van het basismengsel is terug te vinden in Tabel 8. De vijf mengsels die onderscheiden worden, zijn terug te vinden in Tabel 9.

Tabel 9: Mengseltypes met de corresponderende vervangingsgraad van fijn granulaat

Mengseltype	Vervangingsgraad
Mengsel type 1a – M1a	0 %
Mengsel type 1b – M1b*	0 %
Mengsel type 2 – M2	5 %
Mengsel type 3 – M3	10 %
Mengsel type 4 – M4	15 %
Mengsel type 5 – M5	20 %

(*) M1b werd aangemaakt als basis referentiemengsel aangezien bij de productie van M1a bleek dat er niet voldoende materiaal was om alle proeven uit te kunnen voeren. Deze meetresultaten zijn wel meegenomen in de verdere verwerking van de gegevens.

5.2. Gebruikte materialen

In deze paragraaf worden de gebruikte materialen voor het vervaardigen van het beton toegelicht. Het gaat om de basisbestanddelen zoals cement en granulaat, maar ook het nieuwe toevoegsel, namelijk de kokkelschelpen komen aan bod.

5.2.1. Cement

Net zoals in de voorafgaande masterproeven wordt portlandcement gebruikt, type CEM I 52,5. Verschillende andere onderzoek, zoals dat van Cuadrado-Rica et al. (2016), maken gebruik van CEM I 52,5 R. De hoge beginsterkte die met dit cement bereikt wordt is echter niet meteen nodig voor dit onderzoek aangezien de proeven pas ten vroegste op dag 28 worden uitgevoerd. Daarom wordt gekozen voor het type CEM I 52,5. Het gebruikte cement is in Figuur 4 te zien. De samenstelling van dit cement voldoet aan de Europese cementnorm EN 197-1. De samenstelling bestaat uit 95 – 100 % portlandcementklinker, het hoofdbestanddeel, en 0 – 5 % nevenbestanddeel.

Portlandcementklinker bestaat voor minstens 2/3 van de massa uit calciumsilicaten. Het overige deel bestaat uit aluminium en ijzer. De massaverhouding CaO/SiO_2 mag niet kleiner zijn dan 2,0 en de hoeveelheid magnesiumoxide (MgO) mag niet meer dan 5 % van de totale massa bedragen. Aangezien het hier om een traditioneel cement gaat, bedraagt het percentage van tricalciumaluminaat of kortweg C_3A , 0 %.



Figuur 4: Het gebruikte portlandcement CEM I 52,5

5.2.2. Fijn granulaat

Het zand dat gebruikt wordt in deze masterproef is rivierzand met een korrelverdeling 0/5 mm. Deze maximale diameter komt niet helemaal overeen met het onderzoek van Varhen et al. (2017) waar rivierzand met een maximale diameter 4,75 mm wordt gebruikt. Het gaat om slechts een kleine afwijking die weinig verschil teweeg zal brengen.

Wanneer het zand geleverd wordt, bevindt het zich in een zeer natte toestand. Om steeds een juiste en constante w/c-factor te bekomen, dient het zand op voorhand gedroogd te worden. Net zoals in de paper wordt gekozen om granulaten te gebruiken die aan de lucht gedroogd worden. Daarom wordt het zand uitgespreid zodat het gedurende 48 uur kan drogen, zoals te zien is in Figuur 5.



Figuur 5: Openspreiding van het natte zand

Het fijne granulaat wordt eveneens gedurende 48 uur in een oven geplaatst bij een temperatuur van 110 °C. Het gewicht voor en na het drogen wordt telkens bepaald. Het resultaat van zowel ovensdrogen als luchtdrogen is weergegeven in Tabel 10.

Tabel 10: Bepaling van het gewichtspercentage water in het geleverde zand

	Luchtdrogen	Ovensdrogen
Massa voor drogen [g]	1000,0	1000,0
Massa na drogen [g]	968,9	967,1
Verschil [g]	31,1	32,9
Verschil [%]	3,21	3,4

Uit bovenstaand resultaat blijkt dat de manier waarop het zand op voorhand gedroogd wordt een grote rol speelt. Wanneer het luchtdrogen niet uitgevoerd zou worden zou er immers 3,21 % meer water in het mengsel aanwezig zijn en eveneens 3,21 % minder zand dan voorzien. Op deze manier wordt de w/c-factor sterk beïnvloed en zal de consistentie van het beton hieronder lijden. Dit effect is duidelijk zichtbaar bij het mengsel M1a, waarbij geen gedroogd zand werd gebruikt. In paragraaf 5.5 *Maken van de proefstukken* wordt hier verder op ingegaan.

Verder wordt ook het ovengedroogde zand bekeken. Zoals te verwachten daalt de massa van het granulaat, maar gaat het slechts om een daling van 1,8 gram in vergelijking met luchtdrogen. Het zand droogt in de normale omstandigheden van het labo Bouwkunde dus voldoende uit.

5.2.3. Grof granulaat

Het onderzoek van Varhen et al. (2017) maakt gebruik van “crushed gravel” fractie 16/25,4 mm. Het gaat hier met andere woorden om steenslag met een zeer grote korreldiameter. Deze grote korreldiameters kunnen zorgen voor een lagere verwerkbaarheid. Verder komt deze verdeling ook niet voor in het SB250 voor de wegenbouw. Een fundering uit schraal beton kan opgedeeld worden in twee types: grootste diameter 20 mm of grootste diameter 32 mm. Om hieraan te voldoen wordt voor deze masterproef gebruik gemaakt van grof granulaat met fractie 6,3/20 mm.

De referentiepaper van Varhen et al. (2017) geeft geen informatie over een mogelijke voorbehandeling van het grove granulaat. Daarom wordt aangenomen dat gewerkt wordt met luchtgedroogd granulaat.

Net zoals het zand, wordt het grof granulaat nat geleverd. Deze natte toestand heeft echter een grotere invloed op het grove granulaat. De kleinere fracties plakken aan de grotere fracties, waardoor grote brokken ontstaan. Om dit probleem op te lossen wordt het granulaat uitgespreid om te drogen, zoals in Figuur 6 te zien is. Na 48 uur drogen wordt het steenslag gezeefd om zo enkel de gewenste fractie over te houden. Deze droging blijkt echter geen oplossing te bieden omdat ook na het drogen de brokken te hardnekkig zijn om uit elkaar te halen. De fijne deeltjes klitten tijdens het drogen aan de grotere fracties, waardoor deze niet gescheiden kunnen worden.

De finale oplossing bestaat erin het steenslag te wassen en meteen te zeven in natte toestand met zeven van maaswijdte 5 en 6,3 mm. Hierdoor wordt reeds een groot deel van de kleinste fracties afgescheiden van de nodige fractie. Aangezien de helft van de granulaten met een zeef van 5 mm gewassen zijn, zijn nog steeds te kleine fracties aanwezig in het overblijvende granulaat. Bovendien worden ook met de zeef van 6,3 mm niet alle kleine fracties verwijderd tijdens het wasproces. Daarom wordt het gewassen granulaat na droging aan lucht gedurende 48 uur opnieuw met de zeef van maaswijdte 6,3 mm gezeefd, wat weergegeven wordt in Figuur 7. Dit tweede droge zeefproces is de finale stap van de voorbereiding van het grove granulaat.



Figuur 6: Droging van de natte grove granulaten



Figuur 7: Zeven van de gewassen grove granulaten

5.2.4. Schelpen

De schelpen die in deze masterproef gebruikt worden zijn afkomstig van het bedrijf Ecoverbo. De schelpen worden door het bedrijf opgezogen uit de Noordzee, de Waddenzee en de Zeeuwse wateren. Aan boord van het schip waarin ze worden opgezogen, worden de schelpen reeds gewassen en gezeefd. Eens aan wal krijgen de schelpen nog drie keer een zeef- en wasbeurt, maar deze keer met zoet water. Op deze manier kunnen schelpen zonder organisch materiaal en zonder onzuiverheden geleverd worden.

Bij twee voorafgaande masterproeven werden dezelfde schelpen van Ecoverbo gebruikt als in dit onderzoek. Het gaat om twee big bags met schelpen fractie 3/15 mm. Toch is de kleinste fractie die aanwezig is in een big bag kleiner dan 3 mm. De masterproef van Decrock & Van Reybrouck uit 2019, bepaalde dat 10% van de schelpen een kleinere fractie heeft. Deze kleinere korrelgrootte is te wijten aan het transport dat de schelpen hebben doorgemaakt.

De schelpen die gebruikt worden in de referentiepaper hebben een korrelgrootte tussen 1,19 mm en 5 mm (Varhen et al., 2017). Aangezien in het labo geen zeef ter beschikking is van 1,19 mm, wordt ervoor gekozen om de fractie 1/5 mm te gebruiken, wat slechts een kleine afwijking ten opzichte van het origineel met zich meebrengt. Vooraleer deze fractie gezeefd kan worden, dienen de schelpen gebroken te worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een trilplaat. De schelpen worden uitgespreid op een plastic folie, zoals in Figuur 8 te zien is, en worden vervolgens gebroken. Op deze manier gaat geen enkele fractie verloren wanneer de trilplaat over de schelpen heen beweegt. De schelpen op de folie worden gedurende 3 minuten blootgesteld aan de trilplaat welke heen en weer beweegt. Eenmaal de schelpen gebroken zijn, worden ze tweemaal gezeefd: een keer met zeef 5 mm om de te grote fractie eruit te halen en een keer met zeef 1 mm om de te kleine fractie te

scheiden van het benodigde schelpmateriaal. Deze kleine fractie die niet gebruikt wordt als granulaat in het beton is te zien in Figuur 9.

Vooraleer de schelpen verwerkt worden in een betonmengsel worden ze gedurende 48 uur te drogen gelegd. De schelpen zullen dus luchtdroog verwerkt worden, zoals ook het geval was in de referentiepaper van Varhen et al. (2017). Bovendien toont het onderzoek van de voorafgaande masterproef van Tollenaere & Verniers (2019) aan dat een bijkomende voorbereiding geen beter resultaat met zich meebrengt. Het onderzoek maakt gebruik van vervangingspercentages van 10, 25 en 40 %. Hierbij wordt geconcludeerd dat een vervangingsgraad van 10 % het beste resultaat vertoont bij de druksterkteproef, maar ook het gevoeligste is aan de voorbereidingswijze van de schelpen. Aangezien in dit onderzoek met lage vervangingsgraden gewerkt wordt, dient hiermee rekening gehouden te worden. De schelpen die enkel gebroken en gezeefd worden zorgen voor een betere druksterkte dan schelpen die ook nog eens gewassen en luchtdroogd worden. (Tollenaere & Verniers, 2019)



Figuur 8: Breken van de schelpen met de trilplaat



Figuur 9: De uitgezeefde fractie van de schelpen kleiner dan 1 mm

5.3. Bepaling eigenschappen granulaten

5.3.1. Zeefkromme

Voor alle granulaten wordt de zeefkromme opgesteld. Hierbij dienen de granulaten eerst gedroogd te worden in een oven met temperatuur 110 °C gedurende 48 uur. Eens deze gedroogd zijn, kunnen de granulaten met gepaste zeven gezeefd worden. De hoeveelheid materiaal dat gebruikt wordt tijdens het zeefproces is afhankelijk van de grootte van de grootste korreldiameter. Zowel voor het zand als voor de schelpen wordt 600 gram granulaat gebruikt zoals de norm NBN EN 933-1 voorschrijft. De hoeveelheid grof granulaat daarentegen wordt bepaald met onderstaande Formule 6.

$$m = \left(\frac{D_{max}}{10} \right)^2 \quad (6)$$

De steenslag heeft een maximale diameter van 20 mm, waardoor de hoeveelheid granulaat voor één zeefproef 4 kg bedraagt.

Deze zeven die gebruikt worden zijn afhankelijk van de kleinste en grootste fracties van het granulaat. De zeven die nodig zijn worden bepaald aan de hand van de Belgische normen NBN EN 933-1 en 933-2, NBN EN 12620 en PTV 411. Er wordt gestart met de keuze van de basisset die te zien is in Figuur 10. Vervolgens beschrijft de PVT 441 enkele zeven die zeker moeten gebruikt worden. Indien deze nog niet in de basisset aanwezig zijn, worden deze toegevoegd. Het gaat om de volgende zeven: 2D, 1,4D, D, D/2 of D/4, d en d/2. Hierbij staat D voor de maximale korrelgrootte en d voor kleinste korrelgrootte van het granulaat.

Basic set mm	Basic set plus set 1 mm	Basic set plus set 2 mm
0	0	0
1	1	1
2	2	2
4	4	4
—	5,6 (5)	—
8	8	6,3 (6)
—	—	8
—	11,2 (11)	10
—	—	—
—	—	12,5 (12)
—	—	14
16	16	16
—	—	20
—	22,4 (22)	—
31,5 (32)	31,5 (32)	31,5 (32)
—	—	40
—	45	—
—	56	—
63	63	63
—	—	80
—	90	—

NOTE: Rounded sizes shown in parentheses can be used as simplified descriptions of aggregate sizes.

Figuur 10: Basissets van zeven volgens de norm NBN EN 12620

De theoretische zeven zijn echter niet altijd ter beschikking in het labo. Indien dit het geval is, wordt een zeef gekozen waarvan de maaswijdte het dichtst aansluit bij de theoretische waarde. De theoretische en de praktische zeven die gebruikt worden voor de zeefproef worden weergegeven in Tabel 11. Voor zowel het zand als de schelpen wordt basisset 1 gebruikt, voor het steenslag wordt gekozen voor basisset 2. Ook de zeven met kleinste maaswijdte gaande van 0,063 mm tot 0,50 mm dienen volgens de norm toegepast te worden.

Eenmaal alle zeven bepaald zijn en het gedroogde granulaat precies is afgewogen, kan het zeefproces beginnen. De zeefkolom wordt opgebouwd door de zeven op elkaar te stapelen beginnend met de zeef met kleinste maaswijdte. Voor elk type granulaat werd de proef driemaal uitgevoerd.

Het granulaat dat achterblijft in een zeef, wordt de zeefrest genoemd en wordt uitgedrukt in gram. Met deze waarde en de totale massa granulaat M kan voor elke gebruikte zeef het zeefrestpercentage bepaald worden. Dit gebeurt aan de hand van onderstaande Formule 7.

$$R_i \% = \frac{R_i}{M} * 100 \quad (7)$$

Het doorvalpercentage is het tegenovergestelde van het berekende zeefrestpercentage. Het beschrijft het granulaat dat door de beschouwde zeef is gevallen. Dit percentage kan dus makkelijk berekend worden uit het zeefrestpercentage volgens Formule 8.

$$D_i \% = 100 - R_i \% \quad (8)$$

Tabel 11: De theoretische en beschikbare zeven voor de zeefproeven van alle granulaten

Zand [0/5]		Schelpen [1/5]		Steenslag [6,3/20]	
Theoretisch [mm]	Praktisch [mm]	Theoretisch [mm]	Praktisch [mm]	Theoretisch [mm]	Praktisch [mm]
0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063
0,0125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125
0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
2,50	2,00	2,50	2,00	3,15	4,00
4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
5,00	5,00	5,00	5,00	6,30	6,30
5,60	5,60	5,60	5,60	8,00	8,00
7,00	6,30	7,00	6,30	10,00	10,00
10,00	10,00	10,00	10,00	12,50	12,50
				14,00	14,00
				16,00	16,00
				20,00	20,00
				28,00	31,50
				31,50	31,50
				40,00	40,00

5.3.2. Schijnbare en werkelijke volumemassa

Het bepalen van de volumieke massa's van de granulaten kan gebeuren door een aantal wegingen uit te voeren. Hiervoor worden geen ovengedroogde granulaten gebruikt, maar gewoon luchtgedroogde granulaten. De onderstaande gewichten worden afgewogen:

- M1 = massa van de lege emmer
- M2 = massa van de emmer gevuld met water
- M3 = massa van de emmer gevuld met granulaten
- M4 = massa van de emmer gevuld met granulaten en aangevuld met water

De werkelijke volumemassa wordt als volgt berekend met Formule 9.

$$\rho_w = \frac{M_3 - M_1}{(M_2 - M_1) - (M_4 - M_3)} * 1000 \text{ kg/m}^3 \quad (9)$$

De schijnbare volumemassa wordt op zijn beurt berekend met onderstaande Formule 10.

$$\rho_s = \frac{M_2 - M_1}{(M_3 - M_1)} * 1000 \text{ kg/m}^3 \quad (10)$$

5.3.3. Waterabsorptie van schelpen

In deze masterproef worden enkel luchtgedroogde granulaten gebruikt. Deze bevatten steeds een kleine hoeveelheid opgenomen water uit de omgeving. Het kan dat granulaten nog meer water kunnen absorberen. Hier moet uiteraard rekening mee gehouden worden wanneer betonmengsels gemaakt worden met eenzelfde w/c-factor.

Rond de absorptie van luchtgedroogde schelpen is nog maar weinig geweten. Om een betere kijk te krijgen op deze eigenschap worden luchtgedroogde schelpen met de fractie 1/5 mm gedurende verschillende tijden in water gelegd. Eenmaal de tijd voorbij is, worden de schelpen gewogen. Om ervoor te zorgen dat een beeld gevormd kan worden over het geabsorbeerde water dient het water dat zich aan het oppervlak van de schelpen bevindt, verwijderd te worden. Door de schelpen kortstondig te drogen met een doek wordt het water dat zich gehecht heeft aan het oppervlak opgenomen. De resultaten van deze proef zijn terug te vinden in Tabel 12.

.

Tabel 12: Bepaling van de waterabsorptie en het aanwezige water in schelpen

Tijd in water	Na absorptie [g]	Geabsorbeerd water [g]	Ovengedroogd [g]	Aanwezig water [g]
1 min	517,1	17,1	494,5	5,5
2 min	519,9	19,9	495,1	4,9
5 min	516,2	16,2	495,6	4,4
15 min	518,0	18,0	495,5	4,5
30 min	518,3	18,3	496,0	4,0
60 min	517,3	17,3	495,4	4,6

Hieruit blijkt dat de tijd waarin de schelpen in het water liggen, niet veel invloed heeft op de absorptie van water. Het geabsorbeerde water ligt steeds rond de 18,0 g. Dit wil zeggen dat de schelpen waarschijnlijk niet veel of zelfs geen water meer absorberen en dat het verschil in gewicht te wijten valt aan water dat toch nog aan het oppervlak van de schelpen hangt.

Het water dat standaard aanwezig is in 500 g luchtdroge schelpen bedraagt gemiddeld 4,65 g. Dit wil zeggen dat van de gebruikte hoeveelheid schelpen 0,93 % water zal zijn.

5.4. Voorbereiding mallen

Na het voorbereiden van de granulaten moeten ook de mallen klaargemaakt worden vooraleer gestart kan worden met het maken van de betonmengsels.

Drie soorten mallen worden gebruikt om de proefstukken te maken. Het gaat om kubussen van 150 x 150 mm, cilinders 100 x 300 mm en cilinders 100 x 200 mm. De kubussen zijn reeds voorhanden in het labo. In deze masterproef is gebruik gemaakt van de stalen kubusmallen die in Figuur 11 te zien zijn. De cilinders daarentegen zijn zelf vervaardigd.



Figuur 11: De stalen mallen voor kubussen van 150 x 150 mm

De cilindrische mallen worden zelf gemaakt uit pvc-buizen. Eerst worden de pvc-buizen met buitendiameter 110 mm en binnendiameter 102 mm versneden in stukken van 300 mm en 200 mm met een zaagmachine. Per mengsel zijn 6 kleine cilinders en 3 grote cilinders nodig. Figuur 13 toont zo een op maat gesneden kleine cilinder. Echter wordt gekozen om het aantal mallen te verdubbelen. Op deze manier kunnen steeds mallen voor een volgend mengsel in gereedheid gebracht worden, wanneer het vorige mengsel nog aan het uitharden is.

Eens de 18 mallen gesneden zijn, wordt een naad aangebracht in axiale richting. Dit gebeurt handmatig met een zaag. Deze axiale naad zorgt ervoor dat het ontkisten op een eenvoudigere manier kan gebeuren zonder schade aan het proefstuk en de mal toe te brengen. De mallen worden door het aanbrengen van deze naad dus herbruikbaar. Daarnaast verkleint de binnendiameter van de mal door het handzagen met 2 mm waardoor de gewenste binnendiameter van 100 mm bereikt wordt. Het resultaat is te zien in Figuur 12.

De volgende stap bestaat uit het afplakken van de naad met een plakband op textielbasis die zowel zelfklevend als waterdicht is, zoals in Figuur 14. Zo kan verzekerd worden dat de mal tijdens het betongieten zijn vorm behoudt en dat er geen lekken ontstaan. Hierbij mag de tape zeker niet aan de binnenkant aangebracht worden omdat dit kan zorgen voor oneffenheden in het uiteindelijke proefstuk.



Figuur 13: Op maat gesneden pvc-mal

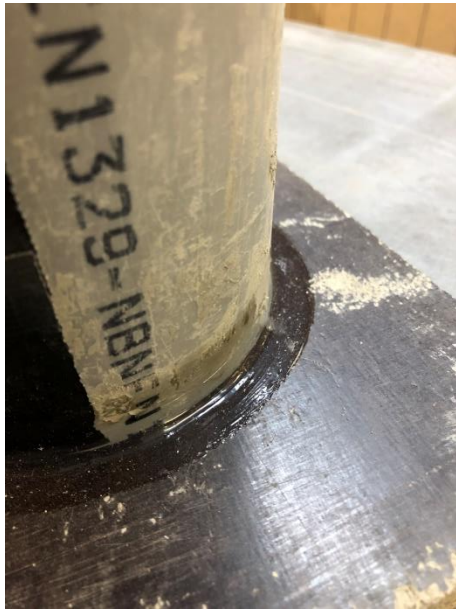


Figuur 12: Axiale naad in de pvc-mal



Figuur 14: Afplakken van de axiale naad

De pvc-buis wordt op zijn beurt aan een op-maat-gezaagd houten plankje bevestigd. Hierbij is het belangrijk dat gekozen wordt voor een houten plank die geen water uit het betonmengsel zal trekken. Indien dit wel het geval zou zijn, kan de w/c-factor van het mengsels wijzigen. Daarom wordt gekozen voor betonplex. De bevestiging van het houten plaatje aan de pvc-buis gebeurt met silicone, meer bepaald een silicone waarmee zowel gelijmd als afgedicht wordt. Hierdoor wordt een goede bevestiging verzekerd tussen het houten plankje en de mal zelf, waardoor het beton niet zal lekken. Een goede uitvoering zoals in Figuur 16 is noodzakelijk. Vooral tijdens het trillen van het beton zal deze hechting op de proef gesteld worden. Het is dan ook belangrijk dat deze verlijming volledig is uitgehard. De mallen worden daarom minstens 24 uur op voorhand geplakt. Het resultaat van een volledig afgewerkte cilindrische mal is te zien in Figuur 15.



Figuur 16: Bevestiging van de pvc-buis aan betonplex met siliconenvoeg



Figuur 15: Afgewerkte cilindrische mal

De laatste stap van de voorbereiding gebeurt net voor het maken van het beton. Op dit moment worden alle mallen, zowel de stalen mallen als degene gemaakt uit pvc, met ontkistingsolie ingestreken zodat de dag na het gieten van het beton een vlotte ontkisting kan gebeuren.

5.5. Maken van de proefstukken

Na de voorbereiding van zowel de mallen als de granulaten kan overgegaan worden op het vervaardigen van de betonmengsels. De mengsels worden vervaardigd in stijgende vervangingspercentage aan schelpen. Hierbij worden twee mengsels per week gemaakt, zoals vermeld in de planning in Bijlage 9.3 en 9.4, met behulp van een betonmenger. De mengsels M1a, M1b, M2 en M3 werden in het labo bouwkunde op campus Schoonmeersen vervaardigd. De overige twee mengsels, namelijk M4 en M5, werden thuis gemaakt. Wegens de coronacrisis was het immers niet langer mogelijk om het labo te betreden. De omgevingsparameters zijn dus niet voor alle mengsels gelijk. Het grootste verschil tussen de twee uitvoeringslocaties is hoofdzakelijk het gebruikte verwerkingsmateriaal. In het labo bouwkunde op campus Schoonmeersen werd gebruik gemaakt van een betonmenger met een inhoud van 100 liter. Thuis daarentegen was dit een menger van slechts 50 liter waardoor het mengsel in twee keer vervaardigd werd. Dit zorgde voor grote verschillen in de uiteindelijke mengtijd per volume-eenheid van de betonspecie. Daarnaast zorgde dit ook voor verschillen in de ouderdom van de betonspecie bij het uitvoeren van de proeven aangezien dit thuis in twee maal uitgevoerd werd. Verder werd in het labo bouwkunde gebruik gemaakt van een triltafel terwijl thuis gebruik gemaakt werd van een trilnaald zoals in Figuur 19 te zien is. Dit verschil heeft een aanzienlijke invloed op de verdichting van de proefstukken. Overigens ligt de

bewaartemperatuur van de proefstukken in het labo gemiddeld 0,77 graden hoger dan de bewaartemperatuur in thuisomstandigheden. Dit is een verwaarloosbaar verschil aangezien de standaardafwijking van de gemeten temperatuur 2 °C bedraagt in beide gevallen. De volgorde van mengen en de mengtijd bleef overigens wel gelijk bij de twee uitvoeringen. Eerst werden het droge zand, het grind en de schelpen in de menger gebracht. Vervolgens werd daar het cement aan toegevoegd waarna de menger kortstondig de verschillende granulaten en bestanddelen mengde gedurende 2 minuten. Tot slot werd het water toegevoegd aan de massa waarna de menger 4 minuten in werking trad.

Het eerste mengsel dat vervaardigd werd (M1a), is het basismengsel dat geen schelpen bevat. Bij dit mengsel werd het zand niet op voorhand opengespreid voor droging. Het zand was reeds langere tijd in het labo aanwezig en werd verondersteld luchtdroog te zijn. Dit bleek echter niet het geval, het zand voelde en zag er vochtig uit. Toch werd beslist het mengsel te maken met dit relatief natte zand. Hierbij bleek al snel dat het beton niet de consistentie had die verwacht werd. Het betonmengsel was een vloeibare samenstelling, waardoor het meteen duidelijk werd dat het nattere zand een grote impact had. Om deze impact in kaart te brengen werd één kilogram vochtig geleverd zand apart opengelegd om 48 uur te drogen zoals besproken in paragraaf 5.2.2 *Fijn granulaat*. Bij het eerste mengsel wordt 21,48 kg zand verwerkt, maar doordat het zand 3,21 % meer water bevatte als het luchtdroge materiaal wordt 0,69 kg meer water in het mengsel vermengd en dus ook 0,69 kg minder zand. Dit resulteert in een w/c-factor van 0,55 en niet 0,50 zoals vooropgesteld werd.

Bij dit eerste mengsel bleek ook dat een marge van 25 % extra beton te weinig bleek, waardoor niet alle proefstukken gevuld konden worden. Dit voordoen in combinatie met het te natte zand zorgde ervoor dat het basismengsel opnieuw gemaakt moest worden. Mengsel M1a uit Figuur 17 kan met andere woorden beschouwd worden als een proefmengsel. Toch kunnen de resultaten hiervan nuttig zijn om te vergelijken met de vastgelegde samenstelling.



Figuur 18: Benodigde granulaten voor het basismengsel M1a



Figuur 17: Basismengsel M1a

Het vullen van de proefstukken gebeurt in twee fasen. Eerst wordt het proefstuk zo goed mogelijk gevuld en dan getrild. Door het trillen zakt het beton, waarna de mal bijgevuld dient te worden. Vervolgens dient een tweede maal kort getrild te worden. Het is van belang dat het proefstuk niet te lang trilt omdat niet alle ingesloten holten mogen verwijderd worden en om ontmenging te vermijden. Dit zou immers een negatief effect kunnen hebben op de doorlatendheid van het beton. Het trillen gebeurt in het labo met een mechanische triltafel gedurende 45 seconden in twee fasen. Eerst wordt het proefstuk getrild gedurende 30 seconden, vervolgens afgestreken of eventueel bijgevuld en nadien nogmaals 15 seconden getrild om de bovenste betonspecie te ontluchten. De samenstellingen die thuis vervaardigd zijn worden niet op deze manier getrild. Dit omdat geen triltafel voorhanden was in de thuisomgeving. De mengsels M4 en M5 worden handmatig getrild met een vibrerende trilnaald. Het trillen gebeurde eveneens gedurende 45 seconden in twee fasen van respectievelijk 30 seconden en 15 seconden. In deze tijdsperiode trad geen ontmenging van de betonspecie op. De trilnaald is te zien in Figuur 19. Het trillen met de trilnaald gebeurt zoals in Figuur 20.



Figuur 19: Trilnaald



Figuur 20: Trillen van een cilindrisch proefstuk met de trilnaald

Vervolgens worden de proefstukken gedurende 24 uur bewaard in een vochtige ruimte met constante temperatuur. De proefstukken worden hierbij afgedekt met een plastic folie zodat geen verdamping plaatsvindt aan het oppervlak. Na deze 24 uur worden proefstukken ontkist. De ontkisting gebeurt voorzichtig zodat zowel de proefstukken als de mallen niet beschadigd worden. Vooral bij de pvc-mallen is dit van belang opdat ze nadien hergebruikt kunnen worden. Eenmaal ontkist worden de proefstukken genummerd en weggezet in een waterbak, zoals in Figuur 21 te zien is. In deze waterbak zullen de proefstukken bewaard worden onder water bij een temperatuur van 20 ± 2 °C tot aan de dag van de beproeving. Op geregelde tijdstippen werd zowel bij de mengsels M1, M2 en M3

als de mengsels M4 en M5 de temperatuur gecontroleerd. Onderstaande Tabel 13 en Tabel 14 geven de gemeten waarden weer voor de temperatuur op de verschillende tijdstippen. Ook in de thuisomgeving blijft de temperatuur van het water binnen de vooropgestelde afwijking uit NBN EN 12390-2.

Tabel 13: Watertemperatuur bij de mengsels M1a, M1b, M2 en M3

Dag	Watertemperatuur [°C]
3/mrt	21
5/mrt	20
10/mrt	19,5
12/mrt	20
17/mrt	20
19/mrt	20,5

Tabel 14: Watertemperatuur bij de mengsels M4 en M5

Dag	Watertemperatuur [°C]
25/mrt	19,5
27/mrt	19
28/mrt	20,5
29/mrt	20
31/mrt	19
2/apr	20
4/apr	19
7/apr	18,5
14/apr	19
21/apr	19,5
28/apr	20
12/mei	20,5
26/mei	20



Figuur 21: Benoemde proefstukken worden onder water bewaard

5.6. Proeven op vers beton

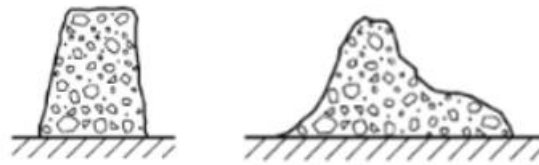
5.6.1. Zetmaat

De zetmaat van het verse beton wordt getest met behulp van een Abramskegel. Vooraleer de kegel opgevuld wordt, vindt de bevochtiging plaats. Ook de plaat waarop de conus geplaatst wordt, wordt bevochtigd. Dit om te vermijden dat de w/c-factor van het vervaardigde beton beïnvloed wordt alsook de wrijving tussen de betonspecie en de kegel vermindert. Een droge kegel zou immers water uit het beton onttrekken. Om het beton op een vlotte en propere manier in de kegel aan te brengen kan gebruik gemaakt worden van een trechter. Uiteraard dient deze ook bevochtigd te worden.

De kegel wordt gevuld in drie lagen. Elke laag wordt verdicht door 25 keer in de laag te prikken. Wanneer de eerste laag verdicht wordt, mag de bodem niet geraakt worden, maar moet wel zo diep mogelijk geprikt worden. De volgende lagen worden verdicht door tot net in de vorige laag te prikken met de verdichtingsstaaf. Wanneer alle lagen aangebracht zijn, wordt het geheel afgestreken. De resten die op de plaat vallen, dienen opgeruimd te worden.

Vervolgens wordt de kegel verwijderd door deze op een gecontroleerde manier naar boven te trekken in een tijdspanne van twee tot vijf seconden. Meteen na het verwijderen van de Abramskegel wordt deze naast het beton gezet. Op deze manier kan gemeten worden hoeveel het beton is ingezakt. Dit resultaat kan echter enkel opgenomen worden indien de betonspecie op een gelijkmatige,

symmetrische manier is ingezakt. Figuur 22 toont het verschil in een goede en slechte uitvoering. Per mengsel wordt de proef met de Abramskegel driemaal uitgevoerd.



Figuur 22: Het verschil tussen een goede en een slechte uitvoering van de zetmaat



Figuur 24: Symmetrisch ingevallen betonspecie bij bepaling van de zetmaat



Figuur 23: Meten van de inzinking voor de bepaling van de zetmaat

De zakking van het beton geeft aanleiding tot een bepaalde S-klasse. Deze S-klassen geven de verwerkbaarheid van het beton aan, gaande van aardvochtig tot vloeibaar beton. Hoe de indeling in klassen gebeurt, is terug te vinden in Tabel 15.

Tabel 15: Indeling in S-klasse aan de hand van de zakking van het beton

Zakking [mm]	Klasse	Verwerkbaarheid
10	S1	Aardvochtig
50	S2	Half-plastisch
100	S3	Plastisch
> 150	S4	Vloeibaar

5.6.2. Schokmaat

De schokmaat wordt bepaald met behulp van een geschikte conus en een schoktafel. Zowel de conus als de tafel worden voor het gebruik bevochtigd om te voorkomen dat ze water uit het betonmengsel zouden onttrekken en om wrijving te minimaliseren. De conus wordt op de schokplaat gezet en gevuld in twee lagen. Elke laag wordt verdicht door tien keer met een geschikte prikstaaf in de laag te prikken. Ook hier dient bij de tweede laag tot net in de eerste laag geprikt te worden. Omdat de conus niet zoveel weegt als de Abramskegel wordt deze tegengehouden en goed aangedrukt om te voorkomen dat de betonspecie tijdens het vullen onderaan weg zou lopen. Wanneer de conus gevuld is, wordt de bovenkant afgestreken en wordt de schoktafel proper gemaakt.

Na het afstrijken mag de conus niet meteen omhoog geheven worden. Hiervoor moet minstens 10 seconden en maximaal 30 seconden gewacht worden. Dit was steeds het geval omdat elke proef vastgelegd wordt op foto net zoals in Figuur 25. Vervolgens wordt de conus op een beheerste manier langs boven verwijderd en worden meteen 15 schokken toegediend. Hierdoor wordt een betontaart gevormd zoals in Figuur 26.



Figuur 25: Betonspecie na het verwijderen van de conus



Figuur 26: Betontaart na het toedienen van 15 schokken

Wanneer de betontaart niet meer verder uitspreidt, wordt de diameter in twee loodrechte richtingen gemeten. Een maat voor de stroomwaarde van het beton wordt bepaald aan de hand van Formule 11.

$$f = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (11)$$

Deze stroomwaarde zorgt ervoor dat het beton kan ingedeeld worden in een F-klasse. De verschillende klassen en hun bijhorende diameter zijn te vinden in Figuur 27.

SCHUDMAAT (FLOW)			
Flowdiameter (mm)		Verhouding diameter vóór de uitspreiding/diameter na de uitspreiding	
F1	≤ 340	F0	≤ 1,19
F2	Van 350 tot 410	F1	Van 1,20 tot 1,49
F3	Van 420 tot 480	F2	Van 1,50 tot 1,79
F4	Van 490 tot 550	F3	Van 1,80 tot 2,09
F5	Van 560 tot 620	F4	≥ 2,10
F6	≥ 630	–	–

Figuur 27: Indeling van beton in F-klassen

5.6.3. Volumemassa

De volumemassa van vers beton wordt net zoals bij de volumemassa van granulaten bepaald door een aantal wegingen uit te voeren. Allereerst dient een gepaste emmer of container gekozen te worden die kan dienen voor het bepalen van de volumieke massa. Hiervan dient het volume bepaald te worden. Dit gebeurt door de container volledig te vullen met water en een glasplaat over de container te schuiven zodat geen luchtbelllen meer aan het oppervlak aanwezig zijn. Dit geheel wordt gewogen. Door ook de bak en de glasplaat afzonderlijk en droog te wegen, wordt de massa van het water bepaald. Het volume van de gebruikte bak wordt dan met Formule 12 bepaald.

$$V_{emmer} = \frac{m_{water}}{998 \text{ kg/m}} \quad (12)$$

Bij elk betonmengsel wordt dezelfde densiteitscontainer gebruikt waardoor de waarde van het volume steeds hetzelfde blijft. Hierbij moet na gebruik de emmer wel steeds goed geïetst worden zodat zeker geen resten beton achterblijven in de container en het gewicht ervan hetzelfde blijft. Het volume van de gebruikte emmer bedraagt bij deze testen $6,81 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$.

Wanneer het verse beton vervaardigd is, wordt met deze emmer de volumieke massa ervan bepaald. De emmer wordt in drie lagen gevuld waarbij elke laag verdicht wordt door 25 keer te prikken met een staaf. Eens deze volledig gevuld is, wordt het geheel afgestreken en gewogen. Aan de hand van deze massa en de massa van de lege emmer kan de volumemassa bepaald worden. Dit gebeurt met Formule 13.

$$D = \frac{m_{beton \text{ in emmer}} - m_{emmer}}{V_{emmer}} \quad (13)$$

Deze waarde wordt uitgedrukt in kg/m^3 en wordt berekend tot op een nauwkeurigheid van 10 kg/m^3 .

5.7. Proeven op uitgehard beton

5.7.1. Druksterkte

Vooraleer een proefstuk in de drukbank geplaatst wordt, worden alle oppervlakken schoongemaakt. Kleine brokstukjes of andere vuiltjes zouden tijdens de proef voor een spanningsconcentratie kunnen zorgen waardoor het resultaat niet correct zal zijn. Ook de raakvlakken van het toestel moeten dus proper gemaakt worden en worden van stof en ander vreemd materiaal ontdaan.

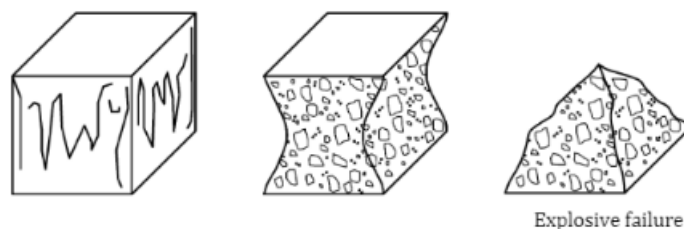
Kubusvormige proefstukken worden in de drukbank geplaatst zodanig dat de belasting loodrecht uitgeoefend wordt op het proefstuk. Bij het plaatsen van het proefstuk is het belangrijk dat de last niet aangebracht wordt op de afgestreken zijde en dat de kubus niet op de afgestreken zijde rust. Wanneer dit wel het geval is, ontstaan spanningsconcentraties die het resultaat sterk kunnen beïnvloeden.

De belastingsnelheid wordt op een constante wijze aangebracht. De snelheid wordt genomen in het gebied $0,6 \pm 0,2$ MPa/s. Eenmaal de belasting op het proefstuk is aangebracht, wordt de belasting opgevoerd met een gekozen snelheid van ± 10 %. Dit gaat door totdat het proefstuk geen grotere belasting meer kan weerstaan en breekt. De maximale waarde van de belasting wordt bijgehouden in kN. Met deze waarde kan de druksterkte uitgedrukt worden volgens onderstaande Formule 14.

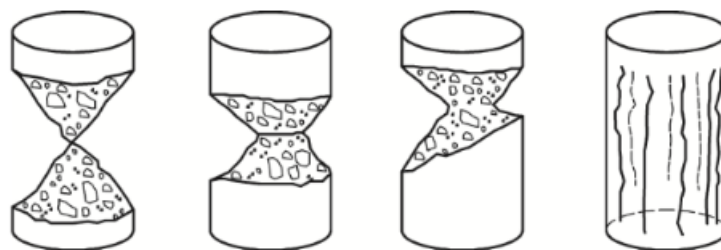
$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (14)$$

Met f_c de druksterkte in MPa, F de maximale belasting in kN en A_c de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het proefstuk in mm². Het resultaat wordt genoteerd met een nauwkeurigheid tot op 0,1 MPa.

De druksterkte mag enkel verwerkt worden wanneer het proefstuk een goed breuktype vertoont. Het proefstuk dient in de vier vrije zijden op een gelijkende manier te breken zoals in Figuur 28. Voor cilindrische proefstukken geldt ook dat de breuk op een éénvormige manier dient te gebeuren. Hierbij scheurt of breekt de mantel op een gelijke manier zoals in Figuur 29.



Figuur 28: Gelijke breukvlakken bij kubusvormige proefstukken



Figuur 29: Goede breukvlakken bij cilindrische proefstukken

Om tot een representatieve waarde te komen wordt de drukproef drie keer per mengsel uitgevoerd. Van elk mengsel worden met andere woorden drie kubussen van 150x150 mm voorzien. In de literatuur wordt echter vaak gebruik gemaakt van cilinders om deze mechanische eigenschap te bepalen. Om een makkelijkere vergelijking te maken met deze onderzoeken, worden naast de kubussen ook cilinders getest. In dit onderzoek gaat het om cilinders van 100x300 mm. Hiervan worden tevens drie exemplaren voorzien. Bovendien kan de invloed van de vorm van het proefstuk nader bekeken worden.

5.7.2. Dichtheid

Om de dichtheid van de proefstukken te bepalen worden deze verschillende keren gewogen. De massa van luchtdroge proefstukken wordt bepaald en M1 genoemd. Vervolgens worden de proefstukken in gesatureerde toestand gewogen. De massa M2 is de massa van een proefstuk dat onder water wordt gewogen met het gepaste toestel. Voor M3 wordt de massa van het gesatureerde proefstuk gemeten met een gewone weegschaal. Tot slot worden de proefstukken gedroogd in een oven van 110 °C voor een periode van 72 uur. De massa die deze gedroogde proefstukken bezit, wordt M4 genoemd.

Volgens de norm wordt de densiteit als volgt berekend met behulp van Formule 15:

$$D = \frac{m}{V} \quad (15)$$

Hierbij kan voor 'm' één van de vier gewogen massa's gekozen worden. Het volume van het proefstuk dient echter nog bepaald te worden. Dit gebeurt aan de hand van de onderstaande Formule 16.

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_w} \quad (16)$$

Hierbij stellen m1 en m2 respectievelijk de luchtdroge massa en de massa onder water voor. ρ_w is de dichtheid van water, namelijk 998,56 kg/m³.

5.7.3. Falling Head Test

De Falling Head Test is een proefmethode die de waterdoorlatendheidscoëfficiënt van proefstukken bepaalt. In de voorafgaande masterproeven werd de benodigde opstelling uit Figuur 30 gebouwd, waardoor deze in dit onderzoek opnieuw gebruikt kan worden. Het gaat om de opstelling die gebaseerd is op voorbeelden uit de literatuur. De opstelling bestaat uit pvc-buizen die verbonden zijn met pvc-lijm, een regelbare kraan, een transparante buis en een eindstuk met regelbare hoogte. Dit geheel wordt bevestigd op een houten frame.



Figuur 30: Opstelling Falling Head Test van voorgaande masterproef (Decrock & Van Reybrouck, 2019)

De waterdoorlatendheidscoëfficiënt wordt bepaald aan de hand van de parameters van de opstelling en de bevindingen tijdens de proef. Deze coëfficiënt k , uitgedrukt in mm/s, wordt berekend met Formule 17.

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot t} * \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (17)$$

Waarbij

- a = Oppervlakte van de buisdoorsnede in mm²
- A = Oppervlakte van de doorsnede van het cilindrische proefstuk in mm²
- L = Lengte van het cilindrische proefstuk in mm
- t = Duur van de proef in s
- h = Waterhoogte aan het begin van de proef bij $t = 0$
- h_2 = Waterhoogte aan het eind van de proef

Zowel h_1 als h_2 zijn twee parameters die op voorhand vastgelegd dienen te worden. De tijd die nodig is om een hoeveelheid water van h_1 naar h_2 te laten zakken, representeert de duurtijd van de hele proef. Deze hoogtes worden vooraf aangeduid op de doorzichtige buis. Aangezien gebruik gemaakt

wordt van een bestaande opstelling worden ook de reeds aangeduide h_1 en h_2 overgenomen. Hierbij bedraagt h_1 260 mm boven het proefstuk en h_2 wordt 60 mm boven het proefstuk aangeduid. Pas wanneer de waterdoorlaatbaarheidscoëfficiënt een waarde heeft van 0,4 mm/s of meer kan gesproken worden over een waterdoorlatend beton.

De proef wordt uitgevoerd met cilindrische proefstukken met een diameter van 100 mm en een hoogte van 200 mm. Om te zorgen dat het water enkel door het proefstuk loopt en niet langs de buitenomtrek een weg zoekt, wordt de speling aan omtrek van de boven- en onderzijde gedicht. Dit gebeurt met siliconen. Elk betonmengsel zal drie keer aan de proef onderworpen worden. Drie cilindrische proefstukken van elk mengsel worden voorzien zodat een representatieve waarde wordt bekomen.

5.7.4. Open porositeit

Niet alle poriën in het beton zijn toegankelijk voor water. De open porositeit beschrijft enkel die poriën waar water van buitenaf zich in kan bevinden. Deze holten hebben de grootste invloed op de waterdoorlaatbaarheid van het beton.

De open porositeit mag dus niet gelijkgesteld worden aan de gehele porositeit van een proefstuk. Het zal steeds een lagere waarde kennen of in sommige gevallen een gelijke waarde aan de totale porositeit aangezien de ingesloten holtes niet meegerekend worden.

De open porositeit van het proefstuk wordt bepaald aan de hand van de onderstaande Formule 18.

$$P_o = \left[1 - \left(\frac{M_{droog} - M_{sub}}{\rho_w \cdot V} \right) \right] \times 100 \% \quad (18)$$

Waarbij

- P_o = open porositeit [%]
- M_{droog} = massa van droog proefstuk [kg]
- M_{sub} = massa van droog proefstuk gewogen onder water [kg]
- ρ_w = de dichtheid van water, 998,56 kg/m³
- V = volume van het proefstuk [m³]

De open porositeit zal bepaald worden op cilindrische proefstukken met diameter 100 mm en een hoogte van 200 mm. Net zoals bij de andere proeven wordt de proef voor elk betonmengsel drie keer herhaald.

5.7.5. MIP

De MIP proef, ook wel kwikporosimetrie genoemd, wordt uitgevoerd om een beter beeld van de porositeit van de verschillende proefstukken te krijgen. Door de intrusie van kwik in het monster wordt informatie verkregen over de porositeit van het proefstuk en meer specifiek over het

porievolume en de poriegroottes. Een hoge druk is nodig om kwik in de kleine aanwezige poriën te krijgen, terwijl de intrusie in grotere poriën reeds bij lage druk plaatsvindt. Door de intrusie van het kwik in het materiaal bij verschillende drukken wordt het bereik van de poriegroottes bepaald.

De MIP test wordt uitgevoerd op de brokstukken die overblijven na de druktest. Hierbij wordt steeds een monster genomen van het middelste, centrale gedeelte van het proefstuk. Alle mengsels worden aan deze proef blootgesteld.

6. Onderzoeksresultaten

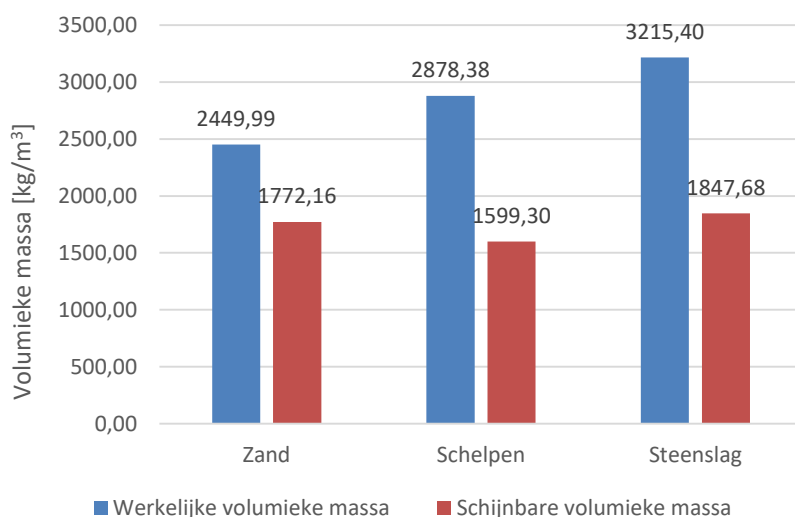
6.1. Uitgevoerde proeven

6.1.1. Schijnbare en werkelijke volumemassa van de granulaten

De praktische bepaling van de schijnbare en werkelijke volumemassa van de granulaten wordt uitgevoerd volgens de NBN EN 12620. De methode met bijhorende parameters staat beschreven in '5.3.2. Schijnbare en werkelijke volumemassa'. De berekende resultaten voor zowel het zand, de schelpen als de steenslag worden weergegeven in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** Figuur 31 geeft deze resultaten grafisch weer. De volledige berekening van deze volumemassa's is terug te vinden in Bijlage 9.5.

Tabel 16: Schijnbare en werkelijke volumemassa van de granulaten

Volumemassa	Zand [0/5]	Schelpen [1/5]	Steenslag [6,3/20]
Werkelijke [kg/m ³]	2449,99	2878,38	3215,40
Schijnbare [kg/m ³]	1772,16	1599,30	1847,68



Figuur 31: Grafiek van de werkelijke en schijnbare volumemassa van de granulaten

Zoals besproken in '5.3.2. Schijnbare en werkelijke volumemassa' geeft de schijnbare volumieke massa de verhouding weer van de natte granulaten. Het beschrijft de massa van 1 m³ granulaat zoals deze op voorraad ligt met inbegrip van de holle ruimtes tussen de granulaten.

Bij de bepaling van de werkelijke volumemassa, wordt rekening gehouden met het volume dat de lucht inneemt. Daaruit is op te maken dat de werkelijke volumemassa van steenslag met een grote fractie [6,3/20] een hogere werkelijke volumemassa heeft ten opzichte van zand [0/5] en schelpen

[1/5]. Door de hoekige structuur van de schelpen zullen alsnog veel holten aanwezig zijn bij het plaatsen in de emmer. Hierdoor is de werkelijke volumemassa van de schelpen groter dan deze van het zand maar kleiner dan het steenslag.

De resultaten van het zand en de schelpen in deze proef kunnen vergeleken worden met de referentiepaper van Varhen et al. Het steenslag daarentegen kan niet vergeleken worden aangezien een andere fractie toegepast werd. De schijnbare volumieke massa voor de schelpen en het zand hebben in het referentieonderzoek van Varhen et al. een waarde van respectievelijk 1015 kg/m^3 en 1410 kg/m^3 . De waarden die bekomen worden tijdens het onderzoek wijken hier enigszins van af. Dit is het gevolg van de geringe afwijking van de fractie van het granulaat. Voor het eigen onderzoek wordt als schelpmateriaal fractie [1/5] gebruikt in tegenstelling tot fractie [1,19/4,75] in het referentieonderzoek en fractie [0/5] voor het zand in tegenstelling tot fractie [0/4,75]. Daarnaast kan deze afwijking ook te wijten zijn aan de korrelverdeling en korrelschikking van het zand en de schelpen. De manier waarop de granulaten in de emmer op elkaar gepakt zijn alvorens deze gewogen worden, heeft een grote impact op de waarde van de schijnbare volumieke massa. Hiervoor wordt verwezen naar de afwijkingen van de zeefkromme uit het onderzoek ten opzichte van de zeefkromme uit het referentieonderzoek. In de studie van Varhen et al. wordt niet gespecificeerd hoe het breekproces van de schelpen uitgevoerd wordt om tot de gewenste schelpenfractie te komen. De verhouding van de verschillende fracties kan bijgevolg verschillen tussen de twee onderzoeken met als resultaat dat een andere pakking kan ontstaan.

Tot slot kan opgemerkt worden dat desondanks het type zand gelijk is, de oorsprong van het zand verschillend is van het referentieonderzoek. Deze is niet gespecificeerd in het referentieonderzoek. De literatuur toont aan dat de oorsprong een grote rol speelt in zowel de chemische als de fysische eigenschappen van het granulaat zoals in '*1.5 Chemische eigenschappen van schelpen*' besproken is. Een afwijkend resultaat van $1772,16 \text{ kg/m}^3$ ten opzichte van 1410 kg/m^3 geeft een verschil van 25,7 %, wat doet vermoeden dat wel degelijk gewerkt wordt met een zand van een andere oorsprong.

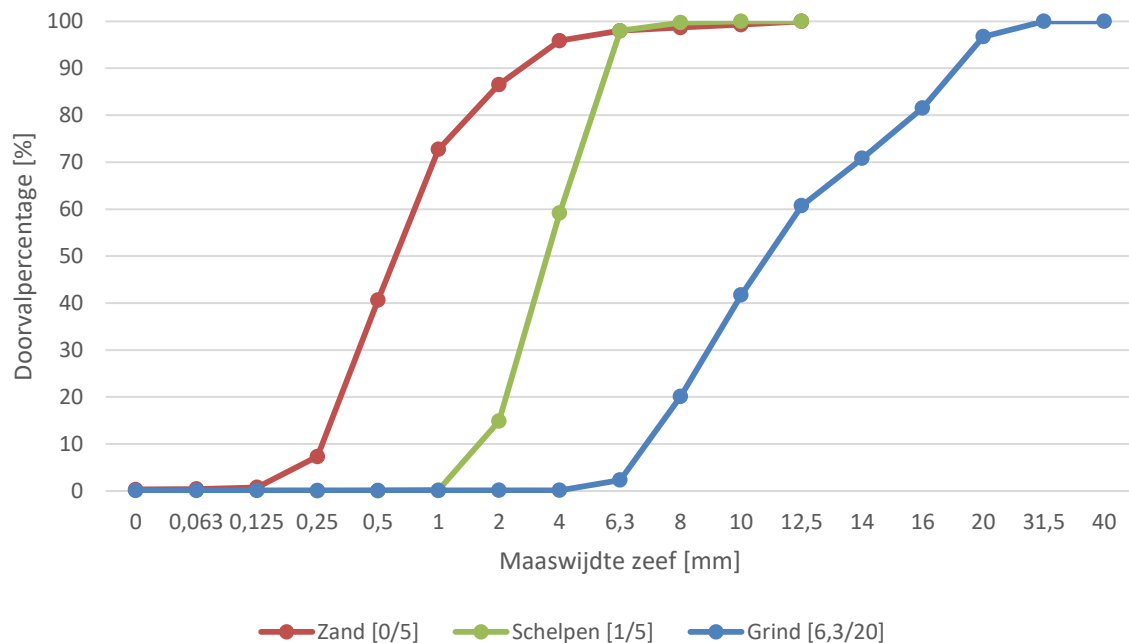
6.1.2. Zeefkromme

De bepaling van de zeefkromme wordt uitgevoerd volgens de normen NBN EN 933-1, NBN EN 933-2 en PTV 411. Voor de bepaling van de theoretische en praktische zeven, alsook de bepaling van de zeefrestpercentage en het doorvalpercentage wordt verwezen naar '*5.3.1. Zeefkromme*'.

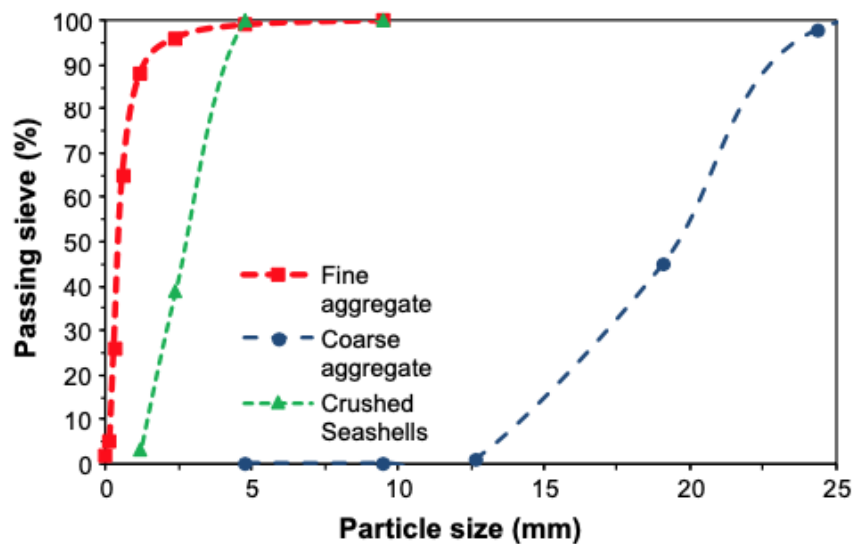
Het zeefproces voor de bepaling van de zeefkromme van zowel het grind, het zand als de schelpen wordt telkens driemaal uitgevoerd om de nauwkeurigheid van de resultaten te optimaliseren. Bijlage 9.6 geeft de meetwaarden en resultaten weer van de zeefproeven.

Figuur 32 geeft een samenvatting weer van de zeefkrommen voor het zand [0/5], de schelpen [1/5] en het grind [6,3/20]. Aan de hand van deze grafiek kan de vergelijking gemaakt worden met Figuur 33. Deze figuur geeft een samenvatting van de zeefkrommen uit de referentiepaper van Varhen et al.

(2017) weer. In het onderzoek van Varhen et al. werden voor het zand en de schelpen, respectievelijk de fracties [0/4,75] en [1,19/4,75] gebruikt. Het grind bestaat uit fractie [12/25,4] en wijkt dus enigszins af van het eigen onderzoek waarin fractie [6,3/20] gebruikt werd.



Figuur 32: De zeefkrommes van de gebruikte granulaten



Figuur 33: De zeefkrommes van de gebruikte granulaten in het referentieonderzoek (Varhen et al., 2017)

Zowel met de literatuur als met eigen onderzoek kan aangetoond worden dat de korrelverdeling van de schelpen na een zeefanalyse tussen het bereik van het fijne- en grove granulaat ligt. Dit zorgt voor een betere pakking van het globale aggregaat. De doorvalpercentages van de schelpen zal variabel zijn voor de verschillende studies aangezien de literatuur niet specificeert hoe lang de schelpen

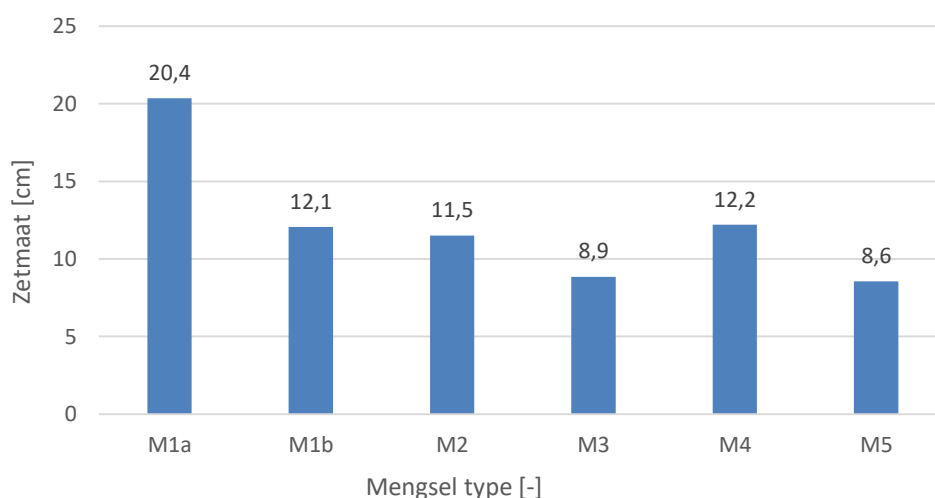
gebroken worden en dit bepaald dat meer of minder deeltjes van dezelfde fractie voorkomen in een mengsel.

6.1.3. Zetmaat

De uitvoering van de zetmaat op verse beton, wordt uitgevoerd zoals voorgeschreven in de norm NBN EN 12350-2 (2019), waarvan de werkwijze beschreven is in paragraaf 5.6.1 *Zetmaat*. De zetmaat geeft de maat weer voor de consistentie van het verse beton. Aan de hand van de consistentie wordt het verse beton opgedeeld in vier klassen zoals in Tabel 15 beschreven staat. De gemeten waarden voor de zakking of ookwel slump genoemd zijn in onderstaande Tabel 17 weergegeven. De proef werd bij elk betonmengsel driemaal uitgevoerd. Mengsel M3 werd echter viermaal uitgevoerd omdat de derde meting een opvallend afwijkend resultaat gaf ten opzichte van de overige twee metingen. Aan de hand van de verschillende metingen wordt het gemiddelde bepaald om een betrouwbaar resultaat te verkrijgen. Figuur 34 geeft deze waarden weer per mengsel.

Tabel 17: Metingen van de gemiddelde zakking in functie van het mengseltype

Zetmaat	M1a [cm]	M1b [cm]	M2 [cm]	M3 [cm]	M4 [cm]	M5 [cm]
1	20,3	11,5	11,4	11,6	10,2	8,0
2	20,4	12,1	13,3	10,6	13,6	8,9
3	20,4	12,6	9,8	6,0	12,8	8,8
4	-	-	-	7,2	-	-
Gemiddelde	20,4	12,1	11,5	8,9	12,2	8,6



Figuur 34: Zetmaat in functie van het mengseltype

Zoals te zien is in Figuur 34 verloopt de zetmaat in lineaire dalende trend naarmate het gehalte aan schelpen toeneemt. De waarde voor M1a wijkt enigszins af van de overige waarden. De reden hiervan is terug te vinden bij de vochtigheid van het zand, waar in eerste instantie geen rekening mee gehouden werd. Om de invloed van het natte zand te kennen, werd praktisch nagegaan hoeveel water het geleverde zand bevatte. Deze bepaling werd reeds in 5.2.2. *Fijn granulaat* besproken. Hierbij werd aangetoond dat het niet-gedroogde zand in vers geleverde toestand uit 3,21 % meer water bestond ten opzichte van het luchtgedroogde zand. Bijgevolg bevatte het mengsel M1a te veel water en te weinig fijn granulaat. De w/c-factor van dit mengsel bedroeg hierdoor 0,55, wat boven de vooropgestelde 0,50 lag.

Deze fout werd in de volgende mengsels bijgewerkt door het fijne granulaat aan de lucht te laten drogen. De wijze waarop het fijne granulaat wordt voorbereid zorgt voor een duidelijk verschil in de resultaten. Wanneer de resultaten van de mengsels M1a en M1b vergeleken worden met elkaar, wordt opgemerkt dat de zetmaat van mengsel M1a 68,77 % hoger ligt dan bij mengsel M1b ondanks dat de mengsels op dezelfde manier werden samengesteld en een vervangingsgraad van 0% werd toegepast.

De waarde voor mengsel M4 geeft ook een afwijkende waarde op de dalende trend. Zowel mengsel M4 als M5 zijn uitgevoerd in verschillende omstandigheden ten opzichte van de mengsels M1a, M1b, M2 en M3. Mengsel M4 was het eerste mengsel dat in deze gewijzigde omstandigheden uitgevoerd werd. In tegenstelling tot de eerste mengsels werd de zetmaat van mengsel M4 thuis bepaald, de fout is hoogstwaarschijnlijk te wijten aan het verschillend mengproces. Bovendien werd ook gebruik gemaakt van ander meetmateriaal waardoor de nauwkeurigheid voor mengsel M4 en M5 kan afwijken van de rest. Zowel de menger, de mengtijd als de weegschalen en uiteraard de omgevingsfactoren zijn verschillend bij de uitvoering in het labo ten opzichte van de uitvoering thuis.

Een andere factor die kan bijdragen aan het verschil in zetmaat is de menger. De menger die thuis gebruikt werd is kleiner dan deze in het labo waardoor het mengsel in twee keer vervaardigd werd. Hierbij werd de helft van alle granulaten, het cement en het water afgewogen waardoor in theorie tweemaal eenzelfde mengsel na elkaar vervaardigd werd. Hier moet opnieuw rekening gehouden worden met nauwkeurigheidfout die gemaakt wordt door het dubbel gebruik van een andere weegschaal. De som van de twee afwegingen bedroeg wel telkens het totaal benodigde materiaal voor het specifieke mengsel. Bovendien moet er ook in rekening gebracht worden dat de helft van het mengsels even lang gemixt werd als het totale mengsel in het labo, dit kan eveneens een invloed hebben op het resultaat.

De consistentieklasse die kan toegewezen worden aan de verschillende mengsels is klasse S4 voor mengsels M1a, M1b, M2 en M4 behoren tot de klasse S3 en de overige mengsels (M3 en M5)

behoren tot de klasse S2. Vermoedelijk valt mengsel M4 ook in de klasse S2 indien de dalende trend gevolgd wordt en geen rekening gehouden wordt met de afwijking. De algemene trend uit de grafiek stelt zich dat er een dalend verloop is van de zetmaat naarmate de vervangingsgraad stijgt van 0 % tot 20 %. Hoe meer schelpen toegevoegd worden aan het mengsel ter vervanging van het fijne granulaat, hoe lager de zakking is. Dit duidt op een lichte daling van de verwerkbaarheid naarmate de vervangingsgraad toeneemt.

In de literatuur komt dit fenomeen eveneens voor, maar veel extremer. Vaak wordt de zetmaat een ‘zero slump’, waardoor het beton quasi niet meer verwerkbaar wordt. Dit is hier duidelijk niet het geval. Wanneer gekeken wordt naar onderzoeken met lage vervangingsgraden van zand, duikt dit fenomeen ook op (Yang et al., 2005). Het onderzoek van Kuo et al. (2013) kent echter niet zo een drastische daling van de verwerkbaarheid bij kleine vervangingsgraden. Ongeveer dezelfde tendens als in het eigen onderzoek wordt waargenomen.

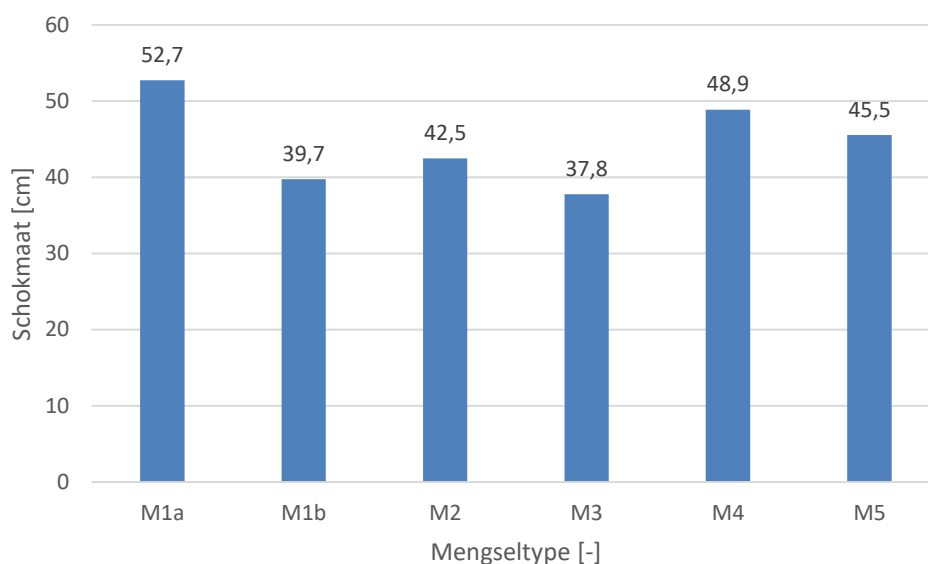
Het referentieonderzoek vindt bij de zetmaat echter een stijging in de verwerkbaarheid naarmate meer schelpen in het mengsel aanwezig zijn. Deze stijging is, bij de hogere w/c-factoren, vooral te zien bij de grotere vervangingsgraden. Bij een vervanging van 5% ligt de waarde echter lager als deze van het basismengsel en bij een vervanging van 20% ligt de zetmaat rond of boven deze van het basismengsel. (Varhen et al., 2017)

6.1.4. Schokmaat

De uitvoering van de schokmaat op het verse beton, gebeurde zoals voorgeschreven is in de norm NBN EN 12350-5 (2019). De schokmaat is een tweede methode voor de bepaling van de consistentie van het verse beton. De proef werd per betonmengsel driemaal uitgevoerd om een representatief resultaat te verkrijgen. Op basis hiervan kon de gemiddelde waarde berekend worden voor de verschillende mengsels. De waarden van (a) en (b) refereren naar de twee loodrechte metingen die per mengsel uitgevoerd werden. In onderstaande Tabel 18 zijn de verschillende metingen weergegeven waaruit het gemiddelde berekend werd. Figuur 35 geeft het verloop van de gemiddelden voor de zes uitgevoerde mengsels weer.

Tabel 18: Metingen van de schokmaat in functie van het mengseltype

Schokmaat	M1a [cm]	M1b [cm]	M2 [cm]	M3 [cm]	M4 [cm]	M5 [cm]
1 (a)	51,6	35,7	42,9	37,7	51,1	46,9
1 (b)	56,2	42	43,3	40	52,4	47,3
2 (a)	51,3	38,6	42,2	37,9	50,7	49,3
2 (b)	53,5	41,9	45,6	36,8	51	44,8
3 (a)	51,6	38,8	38,6	36	43,4	43,6
3 (b)	52	41,4	42,3	38,2	44,5	41,2
Gemiddelde	52,70	39,73	42,48	37,77	48,85	45,52

**Figuur 35: Grafiek van de schokmaat in functie van het mengseltype**

Op basis van de schokmaat is een minder duidelijke trend te onderscheiden dan bij de zetmaat. Net zoals bij paragraaf 6.1.1. *Zetmaat* zal de waarde voor mengsel M1a buiten beschouwing gelaten worden. Mengsel M1b bevat in theorie dezelfde parameters als mengsel M1a maar werd uitgevoerd met een droger fijn granulaat zodat de vooropgestelde w/c-factor behouden bleef. Voor zowel de schokmaat als de zetmaat is de invloed van het vochtige fijne granulaat duidelijk te onderscheiden. In geval van de schokmaat bedraagt het verschil tussen M1a en M1b maar liefst 12,97 cm. Een stijging van slechts 3,21 % aan water in mengsel M1a heeft tot gevolg dat de verwerkbaarheid beduidend hoger ligt dan mengsel M1b. De schokmaat voor M1a ligt hierbij 32,65 % hoger dan de waarde voor M1b.

Mengsels M4 en M5 werden niet in het labo uitgevoerd en gebeurden dus onder andere condities dan de overige mengsels. Ook hier is een afwijkend resultaat voor de mengsels M4 en M5 op te merken. Deze zijn te wijten aan de verschillende mengomstandigheden en het gebruikte materiaal. Daarnaast werden deze twee mengsels zoals in voorgaande paragraaf “6.1.1. *Zetmaat*” in twee keer uitgevoerd doordat het mengvolume van de menger beperkt was. Aangezien de mengtijd hierbij dezelfde gebleven is voor slechts de helft van het mengvolume, is een afwijking vermoedelijk hierdoor te verantwoorden. Daarnaast valt op te merken dat de schokmaat telkens de tweede proef was in de reeks van proeven op het vloeibare beton. Het beton had dus een ouderdom van enkele tientallen minuten bij mengsels M1, M2 en M3 alvorens de schokmaat uitgevoerd werd. Bij mengsels M4 en M5 was de schokmaat telkens de eerste proef van de tweede helft van het mengsel. Het beton had dus een ouderdom van slechts enkele seconden tot enkele minuten. Aangezien het hydratatieproces start op het moment dat water in contact komt met cement is dit proces reeds verder gevorderd bij mengsels M1, M2 en M3 dan mengsels M4 en M5. Doordat de ouderdom van mengsels M1, M2 en M3 hoger ligt dan mengsels M4 en M5 op het moment van beproeven, kan gesteld worden dat de verwerkbaarheid hoger ligt bij mengsels M4 en M5.

Tussen de waarden van M4 en M5 is een dalend verloop te zien wat in lijn ligt met de verwachte resultaten voor de schokmaat. De schudmaat die kan toegekend worden aan de verschillende mengsels, wordt uitgedrukt in F-klassen. Hierbij vallen mengsels M1b en M3 onder klasse F2, mengsels M2, M4 en M5 onder klasse F4.

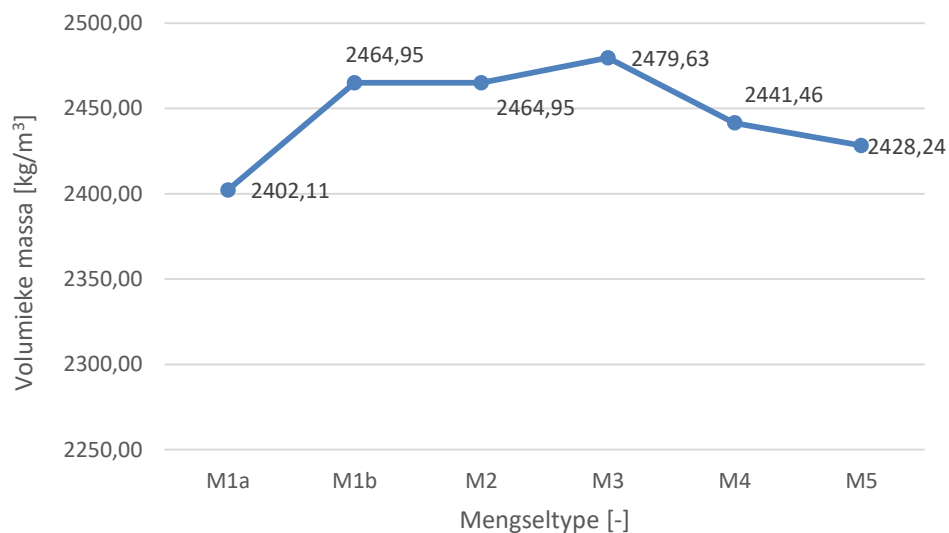
Aangezien de schokmaat in de literatuur niet toegepast wordt voor de bepaling van de consistentie, wordt hiervoor verwezen naar bovenstaande paragraaf ‘6.1.2. *Schokmaat*’ waarin wel literatuurresultaten te vinden zijn over de consistentie van de betonspecie.

6.1.5. Volumieke massa vers beton

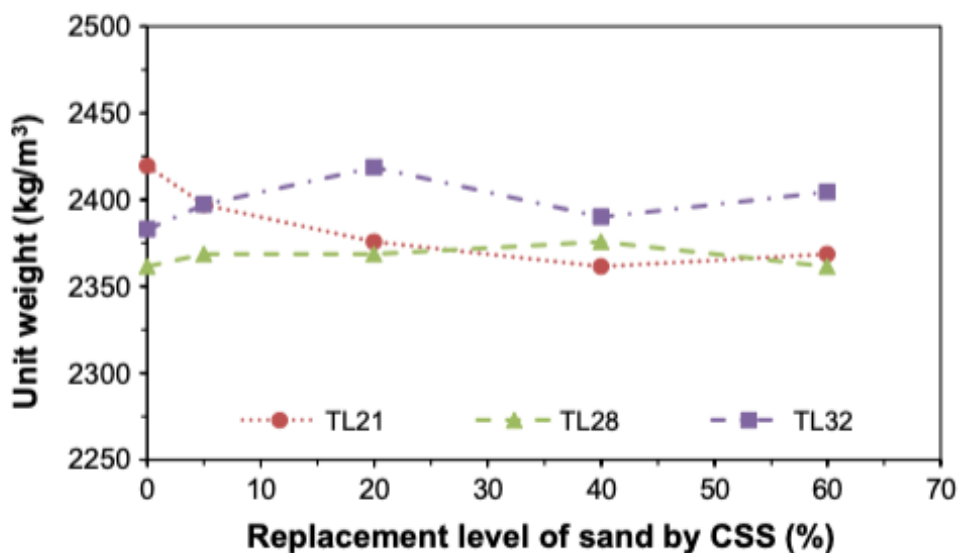
De bepaling van de dichtheid van de betonspecie wordt beschreven aan de hand van de norm NBN EN 12350-6 (2019). De praktische uitvoering van deze proef wordt verduidelijkt in “5.6.3. *Volumemassa*”. Bijlage 9.7 geeft de berekeningstabel weer voor de bepaling van deze dichtheid voor de verschillende betonmengsels. In onderstaande Tabel 19 wordt de volumieke massa van de verschillende mengsels weergegeven als resultaat van de berekeningen. Figuur 36 geeft deze waarden weer voor de betonmengsels naargelang de stijgende vervangingsgraad van de schelpen.

Tabel 19: Volumieke massa van de verschillende mengseltypes

	M1a	M1b	M2	M3	M4	M5
Volumieke massa [kg/m ³]	2400	2460	2460	2480	2440	2430



Figuur 36: Grafiek van de volumieke massa in functie van het mengseltype



Figuur 37: Grafiek van de dichtheid van het vers beton uit het referentieonderzoek (Varhen et al., 2017)

De minimaal en maximaal berekende waarde voor de dichtheid ligt tussen 2480 kg/m^3 en 2430 kg/m^3 in de veronderstelling dat de waarde van M1a opnieuw buiten beschouwing gelaten wordt. De algemene trend die vastgesteld kan worden in deze grafiek, is een dalend verloop naarmate het vervangingspercentage van de schelpen in beton stijgt. Hierbij valt op te merken dat de waarde voor M3 een lichte afwijking vertoont volgens dit verloop.

De waarde voor de dichtheid van het beton komt overeen met de verwachte waarde. De schijnbare volumieke massa van het grove granulaat is $1847,68 \text{ kg/m}^3$ en de schijnbare volumieke massa van het fijne granulaat $1772,16 \text{ kg/m}^3$. De schelpen hebben een schijnbare volumemassa van $1599,30$

kg/m³ en bedraagt dus minder dan het grove en het fijne granulaat. Het cement heeft overigens een schijnbare volumemassa van 3160 kg/m³. Aangezien de dichtheid van de betonspecie voornamelijk afhankelijk is van de volumieke massa van zowel het fijne granulaat, het grove granulaat als het cement, ligt deze dichtheid binnen de verwachtingen. Door de lagere dichtheid van schelpen ten opzichte van het grove granulaat, het fijne granulaat en het cement, zal de volumieke massa van de betonspecie dalen naarmate de vervangingsgraad stijgt.

Uit de referentiestudie van Varhen et al. blijkt echter dat voor grote water/cement-factoren (0,55), de volumieke massa van de betonspecie daalt naarmate de vervangingsgraad toeneemt. De studie toont aan dat de dichtheid van de deeltjespakking wordt beïnvloed door de aanwezigheid van gebroken schelpen. Hierdoor verkleint het granulaire skelet waardoor een grotere hoeveelheid cementpasta in het beton nodig is. Bovenstaande Figuur 37 geeft de resultaten van het referentieonderzoek. Hierbij staan TL21, TL28 en TL32 voor een water/cement-factor van respectievelijk 0,55; 0,45 en 0,41. Eenzelfde trend wordt vastgesteld tussen de referentiepaper en het eigen onderzoek.

6.1.6. Luchtgehalte

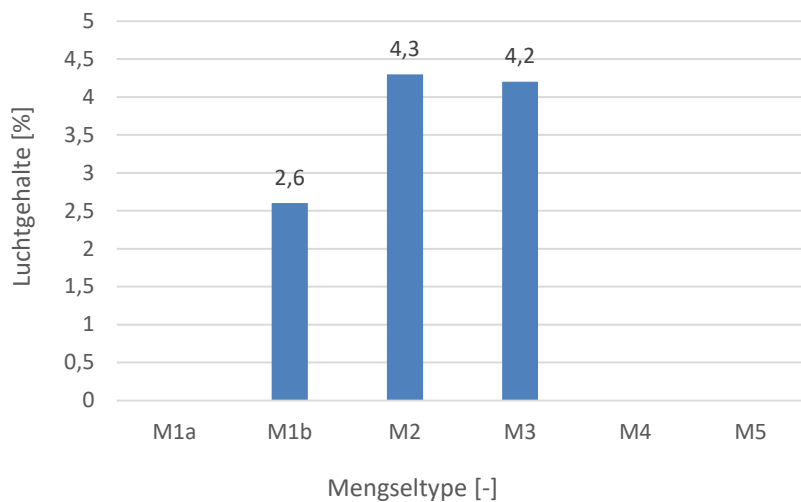
De bepaling van het luchtgehalte werd enkel uitgevoerd voor de mengsels die in het labo werden vervaardigd. Dit was niet mogelijk voor de mengsels M4 en M5 ten gevolge van de coronacrisis. Bijgevolg zijn geen resultaten beschikbaar omtrent het luchtgehalte van deze mengsels.

Tijdens de beproeving van het proefmengsel M1a bleek dat de vooropgestelde marge van 25 % extra betonspecie onvoldoende was om alle proeven uit te voeren. Een deel van deze marge ging verloren bij het vullen van de mallen, bij het uitvoeren van de zet- en schokmaat of ging verloren als residu in de menger. Daarom werd gekozen om de proef voor de bepaling van het luchtgehalte niet uit te voeren, maar wel alle mallen te vullen zodat de gegevens over de druksterkte na 28 dagen beschikbaar zouden zijn. De specie die gebruikt wordt om het luchtgehalte te bepalen kan nadien niet meer gebruikt worden voor het vullen van de mallen aangezien water wordt toegevoegd aan de betonspecie tijdens deze proef.

De bepaling van het luchtgehalte werd uitgevoerd voor de betonmengsels M1b, M2 en M3. De verkregen resultaten zijn weergegeven in Tabel 20. Figuur 38 geeft deze waarden grafisch weer.

Tabel 20: Luchtgehalte van de verschillende betonmengsels

	M1a	M1b	M2	M3	M4	M5
Luchtgehalte [%]	-	2,6	4,3	4,2	-	-



Figuur 38: Grafiek van het luchtgehalte in functie van het mengseltype

Bij de bepaling van het luchtgehalte bleek – zowel bij M1b, M2 als M3 – dat water ontsnapte langs de rand van het deksel. Deze pot wordt in theorie luchtdicht afgesloten door middel van een rubberen ring die zich bevindt tussen het deksel en de pot. Bij een verhoging van de druk in de pot, waarin de betonspecie zich bevindt, mag er geen water langsheen deze rand ontsnappen. Bij alle drie de proeven werd extra aandacht geschonken aan het vullen van de pot. Het beton werd mooi afgestreken zodat zeker niet te veel beton in de pot aanwezig zou zijn. Bovendien werd de rand zorgvuldig gereinigd om te vermijden dat betonspecie tussen de pot en het deksel de luchtdichte afsluiting zou tegenwerken. Ondanks de voorzorgen die genomen werden, bleek alsnog water te ontsnappen bij het uitvoeren van de proef. Een mogelijke verklaring is een kleine scheur in de rubberen ring waardoor de luchtdichtheid niet verzekerd kan worden. De verkregen resultaten voor de mengsels M1b, M2 en M3 kunnen daarom niet als volledig betrouwbaar verondersteld worden.

Ondanks de praktische moeilijkheden leunen de bekomen resultaten voor mengsels M2 en M3 aan bij realistische waarden. De waarde bij M1b wijkt echter sterk af van de verwachtingen en wordt verder buiten beschouwing gelaten. Het basismengsel werd ontworpen met de eis van minimum 4% luchtgehalte in het verse beton. Dit omdat een w/c-factor van 0,50 wordt vastgelegd met een minimaal cementgehalte van 320 kg/m³. (Belgische Beton Groepering, 2015) Zowel M2 als M3 liggen net boven deze waarde. Het referentie-onderzoek streeft slechts naar een waarde van 1,5 % aan lucht in het verse beton. Dit onderzoek concludeert dat het luchtgehalte geen noemenswaardige verandering ondergaat bij de aanwezigheid van schelpen. Het onderzoek van Yang et al. (2005) doet dezelfde vaststelling, maar hier valt wel een grotere variatie op te merken. Dit valt te verklaren doordat het referentieonderzoek en ook het onderzoek van deze masterproef geen gebruik maken van de kleinste fracties van de schelpen, maar een minimale korrelgrootte heeft van ongeveer 1 mm.

Aan de hand van deze bevindingen kan verwacht worden dat de luchtgehaltepercentages van de mengsels M4 en M5 eveneens rond van 4% zullen liggen.

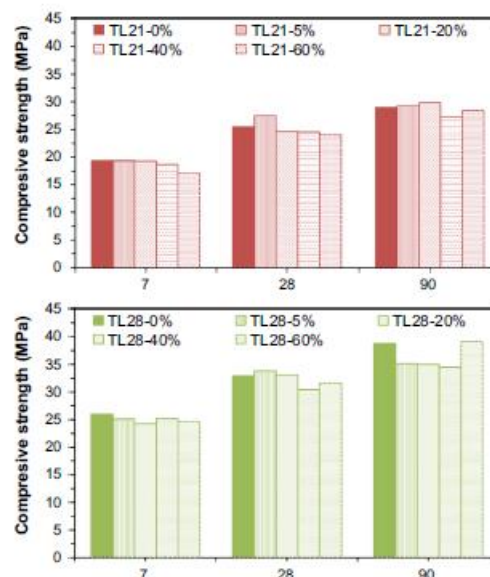
6.2. Verwachte resultaten onuitgevoerde proeven

Door de coronacrisis is het praktische onderzoek zeer plots gestopt moeten worden. Hierdoor konden de geplande proeven op de uitgeharde proefstukken na 28 dagen niet meer uitgevoerd worden. Aan de hand van de literatuur en de opgedane kennis tijdens het onderzoek en de opleiding wordt getracht een voorspelling van de resultaten van de onuitgevoerde proeven te maken. Met bijkomend onderzoek kan nagegaan worden of deze ongemeten resultaten overeenstemmen met de werkelijkheid.

6.2.1. Druksterkte

De verwachting van de druksterkte, 28 dagen na de vervaardiging van het beton, kan ingeschat worden aan de hand van de literatuur. Het is algemeen geweten dat wanneer een beton poreuzer wordt en dus meer doorlaatbaar, de druksterkte zal afnemen. Wanneer fijn granulaat echter vervangen wordt door schelpen komt in de literatuurstudie geen eenduidig beeld naar voor.

Het betonmengsel uit dit onderzoek is gebaseerd op dat van Varhen et al. (2017). Hierbij kent de druksterkte een lichte daling voor vervangingsgraden vanaf 20 % ten opzichte van het basismengsel. De vervangingsgraad van 5 % zorgt echter voor een stijging van de druksterkte op 28 dagen, zoals weergegeven is in Figuur 39.



Figuur 39: Druksterkte bij mengsel met w/c-factor 0,55 (boven) en 0,45 (onder). (Varhen et al., 2017)

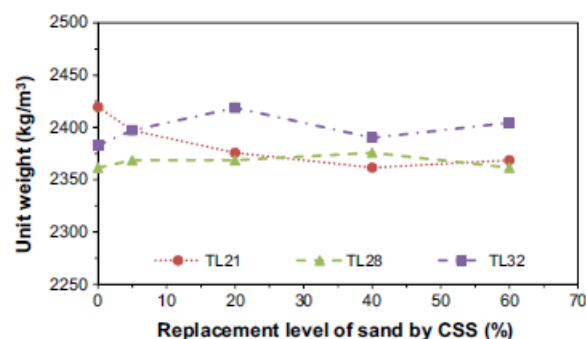
Bij een vervangingsgraad van 5 % kan dus zeker een hogere waarde van de druksterkte verwacht worden. De overige vervangingsgraden zullen waarschijnlijk rond de sterkte van het basismengsel blijven hangen, eventueel met een lichte daling.

Deze prognose kent dus geen significante daling van de druksterkte en wordt bijgestaan door het onderzoek van Kuo et al. (2013). In dit onderzoek treedt wel een duidelijke daling op voor de identieke vervangingsgraden van 5, 10, 15 en 20 %. De oorzaak hiervan zijn de kleine deeltjes van de schelpen. (Kuo et al., 2013) Net deze kleinste fractie die voor de verlaging in druksterkte zorgt, wordt niet in het betonmengsel van dit onderzoek gebruikt.

Daar het effect van schelpen op het beton bij een ouderdom van 28 dagen insignificant zal blijken, zal het effect bij een grotere ouderdom wel duidelijker zijn. Uiteraard zal de sterkte van alle proefstukken verder toenemen, maar hoe groter de vervangingsgraad hoe minder de sterkte zal toenemen. (Yang et al., 2010) Dit wordt ook verwacht bij dit onderzoek

6.2.2. Dichtheid beton

Aangezien de samenstelling gebaseerd is op het onderzoek van Varhen et al. (2017), is dit het vertrekpunt om een schatting van de dichtheid van het uitgeharde beton in dit onderzoek te maken. Het resultaat is terug te vinden in Figuur 40. Voor een w/c-factor van 0,55 is een duidelijke daling van de dichtheid op te merken naarmate meer schelpen in het mengsel verwerkt worden. Bij een w/c-factor van 0,45 is deze trend echter niet langer op te merken. Bij deze waarde blijft de dichtheid ongeveer gelijk en kent de dichtheid zelfs een lichte stijging bij een vervangingsgraad van 20 %.



Figuur 40: De dichtheid van beton bij de verschillende vervangingsgraden volgens het referentieonderzoek (Varhen et al., 2017)

Bij een hoge w/c-factor wordt algemeen aanvaard dat een stijging in het percentage van aanwezige schelpen in het beton leidt tot een mindere schikking van de granulaten wat zorgt voor meer openingen tussen de granulaten en een hogere nood aan hoeveelheid cement om deze op te vullen (Cuadrado-Rica et al., 2016). De w/c-factor van 0,50 die in dit onderzoek bij elke samenstelling gebruikt wordt, behoort tot deze hogere categorie. Hierdoor wordt dus een daling van de lichte dichtheid verwacht.

Bovendien is een groot verschil tussen de specifieke volumemassa's van het zand en de schelpen die in dit onderzoek gebruikt worden, op te merken zoals in paragraaf 6.1.1. *Schijnbare en werkelijke volumemassa van de granulaten* beschreven is. Zand heeft met andere woorden een veel dichtere

pakking dan de schelpen waardoor een grote hoeveelheid aan schelpen zal leiden tot een daling in de densiteit.

6.2.3. Porositeit

Hoe meer schelpen in het beton verwerkt worden, hoe groter de porositeit van het beton wordt. Deze tendens kan ook in de betonmengsels van dit onderzoek teruggevonden worden. Het referentieonderzoek heeft echter geen onderzoek gedaan naar deze fysische eigenschap van het beton. Om een schatting te maken van het verwachte percentage aan open porositeit wordt informatie gehaald uit onderzoeken die aansluiten bij het eigen onderzoek.

Kuo et al. (2013) vervangt zand door oesterschelpen met dezelfde vervangingsgraden als deze masterproef. De porositeit steeg met 0,4 % tot 5,5 % naarmate het vervangingspercentage stijgt. Dit onderzoek maakt echter gebruik van een w/c-factor van 1,3 terwijl het eigen onderzoek een w/c-factor 0,50 gebruikt. Het onderzoek van Nguyen et al (2013) toont aan dat een lagere waarde van de w/c-factor leidt tot een lager gehalte aan open porositeit. Maar algemeen kan gesteld worden dat een hogere porositeit verwacht wordt in de zelfgemaakte mengsels met toevoeging van schelpen.

6.2.4. Waterdoorlaatbaarheid

Onderzoek waarbij zand vervangen wordt door oesterschelpen aan vervangingsgraden van 10 en 20 % in een beton met w/c-factor van 0,45 toont aan dat een daling van de waterdoorlaatbaarheid zich voordoet. De oorzaak hiervan is te wijten aan de kleine deeltjes in de schelpen. (Yang et al., 2010) Net deze kleine deeltjes worden in deze masterproef weggelaten, aangezien gebruik gemaakt wordt van de fractie 1/5 mm, waardoor geen daling verwacht wordt.

Daar in vorige paragraaf geconcludeerd wordt een verhoging in open porositeit te verwachten, is de veronderstelling dat geen daling in de permeabiliteit zal optreden bijgestaan. Andere onderzoeken zijn het er ook over eens dat een hoger schelpenpercentage leidt tot een betere waterdoorlaatbaarheid. (Khankhaje et al., 2016; Nguyen et al., 2017; Nguyen et al., 2013)

Bovendien zal ook hier een duidelijk verschil opgemerkt kunnen worden tussen de twee basismengsels. In het mengsel M1a zit een kleinere hoeveelheid zand verwerkt, waardoor de poriën minder gevuld zullen worden. Dit zal resulteren in een grotere waterdoorlaatbaarheidsfactor k bij M1a dan bij M1b.

6.3. Toekomstvisie

Deze masterproef verzamelde resultaten over de eigenschappen van het verse beton. Daarnaast bracht het de eigenschappen van de gebruikte granulaten reeds in kaart. Aan de hand van de literatuur werd een voorspelling gedaan van de resultaten op de betonnen proefstukken. Vanuit het perspectief van deze studie kan verder onderzoek gevoerd worden naar:

- De literatuur beperkt zich grotendeels tot het bekomen van resultaten over de betonnen proefstukken op korte termijn. Vanuit de onderzoeksaanpak werd in deze studie reeds rekening gehouden met een uitbreiding van de beproeving op lange termijn door bijkomende proefstukken te voorzien. Door de gewijzigde overmachtssituatie kunnen alle voorbereide proefstukken getest worden op lange termijn. De druksterkte, de open porositeit, de waterabsorptie en de MIP kunnen daarom getest worden op een ouderdom van 365 dagen.
- Door het onderzoek een tweede maal uit te voeren met dezelfde parameters en randvoorwaarden kunnen de gegevens op zowel de korte als lange termijn verkregen worden en vergeleken worden met elkaar. Dit creëert een ideaal draagvlak om verdere optimalisaties door te voeren in de toekomst. Daarnaast kunnen andere betoneigenschappen zoals hardheid, weerstand tegen vorst-dooi cycli en taaiheid nader onderzocht worden.
- Na het bepalen van de optimale vervangingsgraad voor kokkelschelpen in waterdoorlatend beton kan nagegaan worden of dit toepasbaar is voor andere schelpen. Uit de literatuur blijkt dat sommige schelpen betere resultaten vertonen voor de druksterkte dan andere schelpen. De optimale vervangingsgraad kan voor deze schelpen eveneens bepaald worden.
- Het onderzoek werd uitgevoerd met betrekking tot ongewapend beton met als functie te dienen als fundering onder waterdoorlatende verharding. Verder onderzoek kan gevoerd worden naar de toepasbaarheid van de schelpen in gewapend en eventueel voorgespannen beton. Hierbij zal de weerstand tegen corrosie een grotere rol spelen dan in dit onderzoek.
- De kostprijsanalyse en praktische toepasbaarheidsanalyse op grote schaal zijn twee aspecten die nog onbelicht zijn in de literatuur. Aan de hand van de resultaten over de optimale vervangingsgraad voor de schelpen in beton kan deze studie doorgevoerd worden. Verder onderzoek kan verricht worden en kan nagegaan worden of dit resulteert in een reductie van de totale kostprijs of net in een stijging.
- De (positieve) milieu-impact ten gevolge van het vervangen van natuurlijk granulaat door schelpen. Welk effect heeft dit op de huidige afvalproblematiek van schelpen en zorgt dit voor een globale reductie in granulaatgebruik voor de bouwsector? Wat is tevens de milieu-impact van de verwerking van de schelpen ten opzichte van de verwerking van het natuurlijke granulaat?

Door dit onderzoek verder te zetten in de nabije toekomst, staat de bouwsector alweer een stap dichterbij het groener maken van deze industrie. Op deze manier kunnen schelpen hun tweede rol vervullen en een vaste waarde worden voor de productie van beton.

6.4. Discussie

Op de onderzoeksvraag “Wat is de optimale vervangingsgraad van schelpen in beton bij waterdoorlatende funderingen voor waterdoorlatende oppervlakken” werd gepoogd een antwoord te formuleren aan de hand van de resultaten die in dit onderzoek verzameld zijn. De resultaten voor de

druksterkte op zowel korte als lange termijn kunnen daarentegen tot op heden niet achterhaald worden voor de aangemaakte proefstukken. Een eenduidig antwoord op bovenstaande vraag is dan ook niet met zekerheid te formuleren. Vanuit de literatuur wordt hier overigens wel een realistische voorspelling voor uitgeschreven waarbij het antwoord luidt dat de optimale vervangingsgraad voor schelpen in beton voor waterdoorlatende funderingen vermoedelijk tussen de 5 en 10 % ligt. Binnen deze percentages werd in het onderzoek aangetoond dat de fysische eigenschappen van het beton overeenstemmen met de resultaten uit de literatuur.

De resultaten zijn daarbij in overeenstemming met de verwachting dat een stijging van het percentage aan schelpen in beton, een verlaging veroorzaakt in de verwerkbaarheid van het beton en een stagnatie tot lichte daling van de druksterkte. Hoewel deze laatste niet praktisch achterhaald zijn, kan deze aanname gestaafd worden op basis van de beschikbare literatuur.

Het luchtgehalte komt eveneens overeen met de voorspelling uit de literatuur waarbij de waarde onveranderlijk is naarmate de vervangingsgraad toeneemt. De uitgevoerde proeven met name de zetmaat, schokmaat en densiteit volgen dezelfde ontwikkeling waarbij de resultaten uit de literatuur een weerspiegeling zijn van het eigen onderzoek.

Op basis van de eigen ondervindingen van de onderzoeksresultaten kan gesteld worden dat een hervatting of herhaling van dit onderzoek in de nabije toekomst bevorderlijk is voor het onderzoek. Hierbij kunnen veel nieuwe inzichten aan het licht komen die verder bouwen op dit onderzoek en samen een breder geheel vormen.

Het vervolg van dit onderzoek legt bij voorkeur de focus op de optimalisatie van de druksterkte van het beton daar waar dit onderzoek en voorgaande onderzoeken de volledige waaier aan proeven onderzocht heeft.

7. Conclusie

In deze masterproef werd onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid van schelpen in beton. Zowel beton als schelpen hebben een grote impact op het milieu. Schelpen worden gezien als afvalproduct en worden verbrand of gestort. De stijgende vraag van beton daarentegen zorgt voor een toenemende ontginning van natuurlijke granulaten, wat een negatieve impact op het plaatselijke milieu heeft, maar ook de productie van cement zorgt voor grote uitstoten. Door zeeschelpen als een vervanging van granulaat of cement te gebruiken, worden beide problemen tegelijk aangepakt.

In dit onderzoek werd gewerkt met het vervangen van het fijne granulaat door kokkelschelpen met als doel een waterdoorlatend beton te creëren dat nog steeds een goede druksterkte heeft. Op deze manier werd getracht om de optimale vervangingsgraad van zand door schelpen te bepalen. De kokkelschelpen fractie 1/5 mm werden met vervangingsgraden van 5, 10, 15 en 20% in het beton verwerkt.

Om een gedetailleerd beeld van de invloed van schelpen te krijgen werden zowel proeven op het vers beton als op het uitgehard beton uitgevoerd. Deze laatste proeven konden echter niet uitgevoerd worden door de coronacrisis. Het gaat om het bepalen van de druksterkte, de waterdoorlaatbaarheid, de open porositeit en de dichtheid van de verschillende betonmengsels.

De uitgevoerde proeven op het verse beton, namelijk de dichtheid, het luchtgehalte, de zetmaat en de schokmaat, geven wel al een eerste indicatie van de eigenschappen. Hierbij valt te concluderen dat de omgevingsparameters en de manier waarop het beton vervaardigd wordt een grote rol speelt op de eigenschappen.

- De zetmaat kent een lichte daling naarmate meer schelpen in het betonmengsel aanwezig zijn. Toch wordt bij de hoogste vervangingsgraden nog een half-plastisch beton verkregen. Ondanks de aanwezigheid van schelpen blijft het beton goed verwerkbaar. Een hogere w/c-factor leidt bovendien duidelijk tot een hogere verwerkbaarheid. Deze bevindingen spreken heel wat literatuur tegen. Vaak wordt beweerd wordt dat schelpen leiden tot een moeilijk verwerkbaar beton.
- Het luchtgehalte van de betonmengsels blijft vermoedelijk ongeveer gelijk aan dat van het basismengsel. De fractie kleiner dan 1 mm van de schelpen zorgt normaal voor een daling van het luchtgehalte, maar deze fractie werd bewust niet gebruikt in het onderzoek.
- De densiteit blijft eveneens rond de waarde van het basismengsel hangen. Naarmate een grotere vervangingsgraad toegepast wordt, wordt wel een lichte daling opgemerkt. De kokkelschelpen hebben immers kleinere schijnbare volumieke massa dan het fijn granulaat.

Aan de hand van de literatuur werden eigenschappen van de verhardde proefstukken voorspeld. Hieruit kan geconcludeerd worden:

- De druksterkte op korte termijn zal hoogstwaarschijnlijk een lichte daling kennen naarmate meer schelpen in het beton verwerkt worden, maar bij de kleinste vervangingsgraden treedt waarschijnlijk een stijging op. De druksterkte op lange termijn, zal echter wel een groter verschil in resultaat opleveren. De daling in de sterkte van het beton zal opvallender en signifikanter zijn dan op korte termijn. Hierdoor wordt de optimale vervangingsgraad van het beton verwacht bij de vervangingsgraad van 5 % of 10 % aangezien de druksterkte hier hoog zal blijven ondanks de toename van de waterdoorlaatbaarheid.
- De open porositeit en de waterdoorlaatbaarheid hangen sterk samen. Naarmate een groter vervangingspercentage wordt gebruikt, zal de open porositeit en de doorlaatbaarheid van het beton toenemen. Deze twee factoren zijn omgekeerd evenredig met de druksterkte. Het mengsel M1a zal bovendien de grootste waterdoorlaatbaarheidsfactor vertonen aangezien hier een kleinere hoeveelheid zand in werd verwerkt.

Verder onderzoek zal moeten uitwijzen of de gemaakte veronderstelling juist blijkt te zijn. Dit verdere onderzoek biedt echter de mogelijkheid om de resultaten op lange termijn grondiger te onderzoeken, een onbekend terrein inzake vervanging van fijn granulaat door schelpen.

8. Referentielijst

- Agbede, O. I., & Manasseh, J. (2009). Suitability of Periwinkle Shell as Partial Replacement for River Gravel in Concrete. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*.
- Briessinck, M., voorzitter. (2019). Standaardbestek 250 voor de wegenbouw, versie 4.1, hoofdstuk 3. Brugge: Die Keure
- Briessinck, M., voorzitter. (2016). Standaardbestek 250 voor de wegenbouw, versie 3.1, hoofdstuk 5. Brugge: Die Keure.
- Chen, D., Zhang, P. C., Pan, T., Liao, Y. D., & Zhao, H. (2019). Evaluation of the eco-friendly crushed waste oyster shell mortars containing supplementary cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 237, 15. doi:10.1016/j.jclepro.2019.117811
- Chiou, I. J., Chen, C. H., & Li, Y. H. (2014). Using oyster-shell foamed bricks to neutralize the acidity of recycled rainwater. *Construction and Building Materials*, 64, 480-487. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.101
- Cuadrado-Rica, H., Sebaibi, N., Boutouil, M., & Boudart, B. (2016). Properties of ordinary concretes incorporating crushed queen scallop shells. *Materials and Structures*, 49(5), 1805-1816. doi:10.1617/s11527-015-0613-7
- De Corte, W. (2018). Wegenbouw [syllabus]. Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur.
- Decrock, A., & Van Reybrouck, J. (2019). *Toepasbaarheid van schelpen bij waterdoorlatende funderingen voor waterdoorlatende oppervlakken*. (Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde). Universiteit Gent,
- Eziefula, U. G., Ezech, J. C., & Eziefula, B. I. (2018). Properties of seashell aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 192, 287-300. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.096
- Falade, F. (1995). AN INVESTIGATION OF PERIWINKLE SHELLS AS COARSE AGGREGATE IN CONCRETE. *Building and Environment*, 30(4), 573-577. doi:10.1016/0360-1323(94)00057-y
- Gagg, C. R. (2014). Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis*, 40, 114-140. doi:10.1016/j.engfailanal.2014.02.004
- Grietens, E. (2018). Operatie perforatie moet verhard Vlaanderen zachter en groener maken. Geraadpleegd op 29 mei 2020 via <https://www.bondbeterleefmilieu.be/artikel/operatie-perforatie-moet-verhard-vlaanderen-zachter-en-groener-maken>
- Hope, B.B., Nmai, C.K., (2001). Protection of Metals in Concrete against Corrosion. Geraadpleegd op 18 mei 2020 via http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/222r_01.pdf
- Khankhaje, E., Salim, M. R., Mirza, J., Hussin, M. W., & Rafieizonooz, M. (2016). Properties of sustainable lightweight pervious concrete containing oil palm kernel shell as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 126, 1054-1065. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.010

- Khankhaje, E., Salim, M. R., Mirza, J., Salmiati, Hussin, M. W., Khan, R., & Rafieizonooz, M. (2017). Properties of quiet pervious concrete containing oil palm kernel shell and cockleshell. *Applied Acoustics*, 122, 113-120. doi:10.1016/j.apacoust.2017.02.014
- Kuo, W. T., Wang, H. Y., Shu, C. Y., & Su, D. S. (2013). Engineering properties of controlled low-strength materials containing waste oyster shells. *Construction and Building Materials*, 46, 128-133. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.04.020
- Martinez-Garcia, C., Gonzalez-Fonteboa, B., Martinez-Abella, F., & Carro-Lopez, D. (2017). Performance of mussel shell as aggregate in plain concrete. *Construction and Building Materials*, 139, 570-583. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.091
- Mo, K. H., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Lee, S. C., Goh, W. I., & Yuen, C. W. (2018). Recycling of seashell waste in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 162, 751-764. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.009
- Mollen, F.H. (2018). Betonrapport van de Vlaamse gemeenten en provincies Natuurpunt. Mechelen.
- Nguyen, D. H., Boutouil, M., Sebaibi, N., Baraud, F., & Leleyter, L. (2017). Durability of pervious concrete using crushed seashells. *Construction and Building Materials*, 135, 137-150. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.219
- Nguyen, D. H., Boutouil, M., Sebaibi, N., Leleyter, L., & Baraud, F. (2013). Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. *Construction and Building Materials*, 49, 151-160. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.017
- Nguyen, D. H., Sebaibi, N., Boutouil, M., Leleyter, L., & Baraud, F. (2014). A modified method for the design of pervious concrete mix. *Construction and Building Materials*, 73, 271-282. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088
- Olivia, M., Oktaviani, R., & Ismeddiyanto. (2017). Properties of concrete containing ground waste cockle and clam seashells. *3rd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials - Sustainable Structures for Future Generations*, 171, 658-663. doi:10.1016/j.proeng.2017.01.404
- Othman, N. H., Bakar, B. H. A., Don, M., & Johari, M. (2013). Cockle shell ash replacement for cement and filler in concrete. *Malasyian Journal of Civil Engineering*, 25, 10.
- Ployaert, C., (2004). Cementgebonden funderingen voor wegen. Geraadpleegd op 17 mei 2020 via https://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-94-08/nl/33nl_fondations.pdf
- Saveyn, H., Eder, P., Garbarino, E., Muchova, L., Hjelmar, O., van der Sloot, H., Comans, R., van Zomeren, A., Hyks, J., Oberender, A. (2014). Study on methodological aspects regarding limit values for pollutants in aggregates in the context of the possible development of end-of-waste criteria under the EU Waste Framework Directive. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Soltanzadeh, F., Emam-Jomeh, M., Edalat-Behbahani, A., & Soltan-Zadeh, Z. (2018). Development and characterization of blended cements containing seashell powder. *Construction and Building Materials*, 161, 292-304. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.111
- Tayeh, B. A., Hasaniyah, M. W., Zeyad, A. M., & Yusuf, M. O. (2019). Properties of concrete containing recycled seashells as cement partial replacement: A review. *Journal of Cleaner Production*, 237, 13. doi:10.1016/j.jclepro.2019.117723
- Tollenaere, T., & Verniers, J. (2019). *Invloed van de voorbereidingswijze van schelpen gebruikt in waterdoorlatende funderingen*. (Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde). Universiteit Gent,

- Varhen, C., Carrillo, S., & Ruiz, G. (2017). Experimental investigation of Peruvian scallop used as fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 136, 533-540. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.01.067
- Yang, E. I., Kim, M. Y., Park, H. G., & Yi, S. T. (2010). Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 758-765. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.10.032
- Yang, E. I., Yi, S. T., & Leem, Y. M. (2005). Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics: Part 1. Fundamental properties. *Cement and Concrete Research*, 35(11), 2175-2182. doi:10.1016/j.cemconres.2005.03.016
- Yusof, M., James Ujai, S. J., Sahari, F., Taib, S. N. L., & Noor Mohamed, N. H. (2011). Application of Clam (lokan) Shell as Beach Retaining Wall.
- WTCB. Geraadpleegd op 18 februari 2020 via <https://www.wtcb.be/homepage/index.cfm>

9. Bijlagen

9.1. Duurzaamheidseisen voor beton

Duurzaamheidseisen voor ongewapend beton (OB), gewapend beton (GB) en voorgespannen beton (VB) volgens de norm NBN B 15-002:2004

OMGEVINGSKLASSEN		DUURZAAMHEIDSEISEN			
KLASSE	OMSCHRIJVING	OB		GB OF VB	
		BETONTYPE	ANDERE EISEN	BETONTYPE	ANDERE EISEN
E0	Niet schadelijk	T(1,00)	(⁹)	–	–
E1	Binnenomgeving	T(1,00)	–	T(0,65)	–
EE	Buitenomgeving				
EE1	Geen vorst	T(1,00)	–	T(0,60)	–
EE2	Vorst, geen contact met regen	T(0,55)	(¹) (²) (⁴)	T(0,55)	(¹) (²) (³) (⁴)
EE3	Vorst, contact met regen	T(0,55)	(¹) (²) (⁴)	T(0,50)	(¹) (²) (³) (⁴)
EE4	Vorst en dooizouten (aanwezigheid van ter plaatse ontdooit of opspattend of aflopend dooizouthoudend water)	T(0,45) of T(0,50)A	(¹) (²) (⁴) (⁷)	T(0,45) of T(0,45)A	(¹) (²) (³) (⁴) (⁷)
ES	Zeeomgeving <i>Geen contact met zeewater, wel contact met zeelucht (tot 3 km van de kust) en/of met brak water</i>				
ES1	Geen vorst	T(0,60)	–	T(0,50)	–
ES2	Vorst	T(0,55)	(¹) (²) (⁴)	T(0,50)	(¹) (²) (³) (⁴)
ES3	Ondergedompeld	T(0,55)	–	T(0,45)	–
ES4	Getijden- en spatzone	T(0,45) of T(0,50)A	(¹) (²) (⁴) (⁷)	T(0,45) of T(0,45)A	(¹) (²) (³) (⁴) (⁷)
EA	Agressieve omgeving				
EA1	Zwak agressieve chemische omgeving volgens tabel 2 van NBN EN 206-1:2001	T(0,55)	(⁹)	T(0,55)	(⁵) (⁶)
EA2	Middelmatig agressieve chemische omgeving volgens tabel 2 van NBN EN 206-1:2001	T(0,50)	(⁹)	T(0,50)	(⁵) (⁶)
EA3	Sterk agressieve chemische omgeving volgens tabel 2 van NBN EN 206-1:2001	T(0,45)	(⁹)	T(0,45)	(⁵) (⁶)

(¹) De granulaten moeten vorstbestendig zijn volgens NBN EN 12620-1:2000 of NBN EN 12620-2:1998.
(²) Bij gebruik van CEM I met toevoeging van meer dan 33 % vliegashoudende cement, is de k-waarde gelijk aan nul. Bij gebruik van CEM III/A met meer dan 25 % vliegashoudende cement, is de k-waarde gelijk aan nul.
(³) Bij toevoeging van vliegashoudende cement met een gloeiverlies tussen 5 en 7 % aan beton geldt als bijkomende eis (ten aanzien van de eisen in artikel 5.2.5.2.2) dat de totale vliegashoudende massa in het beton niet meer mag bedragen dan 25 % van de cementmassa. Aan de hand van voorafgaandelijke geschiktheidsproeven volgens bijlage J van NBN EN 206-1:2001 kan van deze eis afgeweken worden.
(⁴) CEM II/B-V, CEM II/B-M (V-...) en CEM V/A met melding op de zak en/of de leveringsbon dat het daarin verwerkte vliegashoudende cement een gloeiverlies heeft van 7 %, mogen alleen gebruikt worden wanneer de maximale vliegashoudende massa in het cement beperkt wordt tot 25 % van de som van de hoofd- en nevenbestanddelen van het cement (volgens NBN EN 197-1:2000). Aan de hand van voorafgaandelijke geschiktheidsproeven volgens bijlage J van NBN EN 206-1:2001 kan van deze eis afgeweken worden.
(⁵) Cement met hoge bestandheid tegen sulfaten (volgens NBN B 12-108:2002) moet gebruikt worden indien het sulfaatgehalte hoger is dan 500 mg/kg in water en hoger is dan 3000 mg/kg in grond.
(⁶) Enkel voor uitzonderlijke toepassingen in ongewapend beton (zoals bijvoorbeeld zuiverheidsbeton voor funderingen) is betontype T(1,50) mogelijk.
(⁷) Beton zonder toegevoegde lucht, behalve indien opgelegd door de voorschrijver naargelang het risico op vorstschade.
(⁸) Zie paragraaf 6 van tabel 1 en tabel 2 van NBN EN 206-1:2001.

Betontypes volgens de norm NBN B 15-001

AANDUIDING	T(1,50)	T(1,00)	T(0,65)	T(0,60)	T(0,55)	T(0,55)A	T(0,50)	T(0,50)A	T(0,45)	T(0,45)A
Maximale water-cementfactor (¹)	1,50	1,00	0,65	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45
Minimaal cementgehalte (kg/m ³ beton) (²)	–	–	260	280	300	300	320	320	340	340
Minimale druksterkteklasse (³) (⁴)	C8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C20/25	C30/37	C25/30	C35/45	C30/37
Minimum luchtgehalte (⁵) van vers beton in % voor de nominale maximale korrelgrootte van het granulaat										
20 mm ≤ D _{max} ≤ 31,5 mm	–	–	–	–	4 %	4 %	–	4 %	–	4 %
11,2 mm ≤ D _{max} ≤ 16 mm	–	–	–	–	5 %	5 %	–	5 %	–	5 %
5,6 mm ≤ D _{max} ≤ 10 mm	–	–	–	–	6 %	6 %	–	6 %	–	6 %

(¹) Effectief watergehalte; voor het cementgehalte: zie bepalingen van de artikels 5.2.5.2.1, 5.2.5.2.2, 5.2.5.2.3 en 5.2.5.2.4.
(²) Zie bepalingen van de artikels 5.2.5.2.1, 5.2.5.2.2, 5.2.5.2.3 en 5.2.5.2.4.
(³) Aan de hand van voorafgaandelijke geschiktheidsproeven volgens bijlage J van NBN EN 206-1:2001 kan van deze eis afgeweken worden, op voorwaarde dat de betonsamenstelling wel beantwoordt aan de twee basiseisen, namelijk de maximale water-cementfactor en het minimale cementgehalte.
(⁴) Met een afstandsfactor van de ingebrachte luchtbellen kleiner dan 0,200 mm, gemeten op het verharde beton (volgens NBN EN 480-1:1999).
(⁵) Niet van toepassing op licht beton.

- (¹) Toevoegsels voor beton zijn fijn verdeelde minerale materialen die aan het beton kunnen toegevoegd worden om bepaalde eigenschappen te verbeteren of om er bepaalde eigenschappen aan te verlenen. Er bestaan twee types toevoegsels:
- quasi inerte toevoegsels (type I)
 - puzzolanen of toevoegsels met een latent hydraulisch karakter (type II).

9.2. Betonsamenstellingen voor een kubieke meter

	Water [kg/m ³]	Cement [kg/m ³]	Porfier [kg/m ³]	Zand [kg/m ³]	Schelpen [kg/m ³]
M1	160,00	320,00	899,52	514,50	0
M2	160,00	320,00	899,52	486,77	27,73
M3	160,00	320,00	899,52	463,05	51,45
M4	160,00	320,00	899,52	437,32	77,18
M5	160,00	320,00	899,52	411,60	102,90

9.3. Algemene planning

	10/02 – 16/02 WEEK 1	17/02 – 23/02 WEEK 2	24/02 – 30/02 WEEK 3	02/03 – 08/03 WEEK 4	09/03 – 15/03 WEEK 5	16/03 – 22/03 WEEK 6	23/03 – 29/03 WEEK 7	30/03 – 05/04 WEEK 8	06/04 – 12/04 PAASVAKANTIE	13/04 – 19/04 PAASVAKANTIE	20/04 – 26/04 WEEK 9	27/04 – 03/05 WEEK 10	04/05 – 10/05 WEEK 11	11/05 – 17/05 WEEK 12
Volumieke massa	EENMALIGE PROEF	EENMALIGE PROEF												
Ideale zeefkromme	EENMALIGE PROEF	EENMALIGE PROEF												
Waterabsorptie	EENMALIGE PROEF	EENMALIGE PROEF												
HPD	EENMALIGE PROEF	EENMALIGE PROEF												
Zetmaat			UITVOEREN MT1a		UITVOEREN MT1b + MT2	UITVOEREN MT3	UITVOEREN MT4 + MT5							
Schokmaat			UITVOEREN MT1a		UITVOEREN MT1b + MT2	UITVOEREN MT3	UITVOEREN MT4 + MT5							
Dichtheid			UITVOEREN MT1a		UITVOEREN MT1b + MT2	UITVOEREN MT3	UITVOEREN MT4 + MT5							
Luchtgehalte			UITVOEREN MT1a		UITVOEREN MT1b + MT2	UITVOEREN MT3	UITVOEREN MT4 + MT5							
CUB150x150	Druksterkte KT 1		MENGSEL TYPE Ia		MENGSEL TYPE Ib	MENGSEL TYPE III	MENGSEL TYPE V			PROEF MT1b	PROEF MT3	PROEF MT4		
					MENGSEL TYPE II		MENGSEL TYPE IV			PROEF MT2		PROEF MT 5		
CIL100x300	Druksterkte KT 2		MENGSEL TYPE Ia		MENGSEL TYPE Ib	MENGSEL TYPE III	MENGSEL TYPE V			PROEF MT1b	PROEF MT3	PROEF MT4		
					MENGSEL TYPE II		MENGSEL TYPE IV			PROEF MT2		PROEF MT 5		
							PROEF MT1a							
CIL100x200	Druksterkte KT 3						PROEF MT1a			PROEF MT1b	PROEF MT3	PROEF MT4		
										PROEF MT2		PROEF MT 5		
CUB150x150	Druksterkte LT		MENGSEL TYPE Ia		MENGSEL TYPE Ib	MENGSEL TYPE III	MENGSEL TYPE V							
					MENGSEL TYPE II		MENGSEL TYPE IV							
CIL100x200	FHT		MENGSEL TYPE Ia		MENGSEL TYPE Ib	MENGSEL TYPE III	MENGSEL TYPE V			PROEF MT1b	PROEF MT3	PROEF MT4		
					MENGSEL TYPE II		MENGSEL TYPE IV			PROEF MT2		PROEF MT 5		
							PROEF MT1a							
CIL100x200	Open Porositeit		MENGSEL TYPE Ia		MENGSEL TYPE Ib	MENGSEL TYPE III	MENGSEL TYPE V			PROEF MT1b	PROEF MT3	PROEF MT4		
					MENGSEL TYPE II		MENGSEL TYPE IV			PROEF MT2		PROEF MT 5		
							PROEF MT1a							
MIP												UITVOEREN MIP		

9.4. Gedetailleerde planning

WEEK 1	MAANDAG	DINSDAG	WOENSDAG	DONDERDAG	VRIJDAG	ZATERDAG
10/02 – 16/02	Afwegen + Drogen materiaal	Drogen materiaal	Drogen materiaal	Uitvoering Volumieke massa Uitvoering Ideale zeefkromme Uitvoering Waterabsorptie	Verwerking gegevens Totaal materiaal Afwegen + zondrogen	Verwerking gegevens
WEEK 2	MAANDAG	DINSDAG	WOENSDAG	DONDERDAG	VRIJDAG	ZATERDAG
17/02 – 23/02	PVC Mallen CIL100x300 maken	PVC Mallen CIL100x300 maken Voorbereiden Granulaat/Schelpen	Voorbereiden Granulaat/Schelpen	Voorbereiden Granulaat/Schelpen	Voorbereiden Granulaat/Schelpen	
WEEK 3	MAANDAG	DINSDAG	WOENSDAG	DONDERDAG	VRIJDAG	ZATERDAG
24/02 – 30/02	Voorbereiden Granulaat/Schelpen	Voorbereiden Granulaat/Schelpen	Voorbereiden Granulaat/Schelpen Mallen voorbereiden	Afwegen benodigde materiaal Productie mengsel Type Ia Uitvoeren proeven	Ontkisten MT1a	
WEEK 4	MAANDAG	DINSDAG	WOENSDAG	DONDERDAG	VRIJDAG	ZATERDAG
02/03 – 08/03	Voorbereiden granulaten ZEVEN + DROGEN	Voorbereiden granulaten ZEVEN + DROGEN	Voorbereiden granulaten ZEVEN + DROGEN	Voorbereiden granulaten ZEVEN + DROGEN	Voorbereiden granulaten ZEVEN + DROGEN	
WEEK 5	MAANDAG	DINSDAG	WOENSDAG	DONDERDAG	VRIJDAG	ZATERDAG
09/03 – 15/03	Mallen voorbereiden	Afwegen benodigde materiaal Productie mengsel Type Ib Uitvoeren proeven	Ontkisten MT1b	Afwegen benodigde materiaal Productie mengsel Type II Uitvoeren proeven	Ontkisten MT2	
WEEK 6	MAANDAG	DINSDAG	WOENSDAG	DONDERDAG	VRIJDAG	ZATERDAG
16/03 – 22/03	Mallen voorbereiden	Afwegen benodigde materiaal Productie mengsel Type III Uitvoeren proeven	Ontkisten MT3	Start Corona maatregelen Ontruimen labo materiaal	Optellen nieuw labo andere locatie	
WEEK 7	MAANDAG	DINSDAG	WOENSDAG	DONDERDAG	VRIJDAG	ZATERDAG
23/03 -29/03	Mallen voorbereiden	Afwegen benodigde materiaal Productie mengsel Type IV Uitvoeren proeven	Ontkisten MT4	Afwegen benodigde materiaal Productie mengsel Type V Uitvoeren proeven Druksterkte KT1 CUB150x150 MT1a Druksterkte KT2 CIL100x300 MT1a	Ontkisten MT5 Open Poro CIL100x200 MT1a FHT CIL100x200 MT1a Druksterkte KT3 CIL100x200 MT1a	
WEEK 8	MAANDAG	DINSDAG	WOENSDAG	DONDERDAG	VRIJDAG	ZATERDAG
30/03 – 05/04	Verwerking gegevens					
PAASVAKANTIE	MAANDAG	DINSDAG	WOENSDAG	DONDERDAG	VRIJDAG	ZATERDAG
06/04 – 12/04		Druksterkte KT1 CUB150x150 MT1b Druksterkte KT2 CIL100x300 MT1b	Open Poro CIL100x200 MT1b FHT CIL100x200 MT1b Druksterkte KT3 CIL100x200 MT1b	Druksterkte KT1 CUB150x150 MT2 Druksterkte KT2 CIL100x300 MT2	Open Poro CIL100x200 MT2 FHT CIL100x200 MT2 Druksterkte KT3 CIL100x200 MT2	
PAASVAKANTIE	MAANDAG	DINSDAG	WOENSDAG	DONDERDAG	VRIJDAG	ZATERDAG
13/04 – 19/04		Druksterkte KT1 CUB150x150 MT3 Druksterkte KT2 CIL100x300 MT3	Open Poro CIL100x200 MT3 FHT CIL100x200 MT3 Druksterkte KT3 CIL100x200 MT3	Verwerking gegevens		
WEEK 9	MAANDAG	DINSDAG	WOENSDAG	DONDERDAG	VRIJDAG	ZATERDAG
20/04 – 26/04		Druksterkte KT1 CUB150x150 MT4 Druksterkte KT2 CIL100x300 MT4	Open Poro CIL100x200 MT4 FHT CIL100x200 MT4 Druksterkte KT3 CIL100x200 MT4	Druksterkte KT1 CUB150x150 MT5 Druksterkte KT2 CIL100x300 MT5	Open Poro CIL100x200 MT5 FHT CIL100x200 MT5 Druksterkte KT3 CIL100x200 MT5	Verwerking gegevens
WEEK 10	MAANDAG	DINSDAG	WOENSDAG	DONDERDAG	VRIJDAG	ZATERDAG
27/04 – 03/05	Uitvoeren van MIP	Verwerking gegevens				
WEEK 11	MAANDAG	DINSDAG	WOENSDAG	DONDERDAG	VRIJDAG	ZATERDAG
04/05 – 10/05	Verwerking gegevens					
WEEK 12	MAANDAG	DINSDAG	WOENSDAG	DONDERDAG	VRIJDAG	ZATERDAG
11/05 – 17/05	Verwerking gegevens					

9.5. Werkelijke en schijnbare volumemassa van de granulaten

Massa [g]	Zand	Schelpen	Steenslag
M1	208,80	208,80	208,80
M2	1781,80	1781,80	1781,80
M3	2996,40	2724,50	3115,20
M4	3431,60	3423,50	3784,30
Volumieke massa [kg/m³]			
Werkelijk	2449,99	2878,38	3215,40
Schijnbaar	1772,16	1599,30	1847,68

9.6. Zeefproeven

ZAND

PROEF 1

Zeef	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrestpercentage [%]	Gecumuleerd zeefrestpercentage [%]	Doorvalpercentage [%]
10	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
6,3	5,20	5,20	0,87	0,87	99,13
5,6	4,60	9,80	0,77	1,63	98,37
5	4,70	14,50	0,78	2,42	97,58
4	14,40	28,90	2,40	4,82	95,18
2	55,80	84,70	9,30	14,12	85,88
1	82,30	167,00	13,72	27,83	72,17
0,5	189,20	356,20	31,53	59,37	40,63
0,25	198,30	554,50	33,05	92,42	7,58
0,125	39,40	593,90	6,57	98,98	1,02
0,063	2,00	595,90	0,33	99,32	0,68
Rest	0,80	596,70	0,13	99,45	0,55

PROEF 2

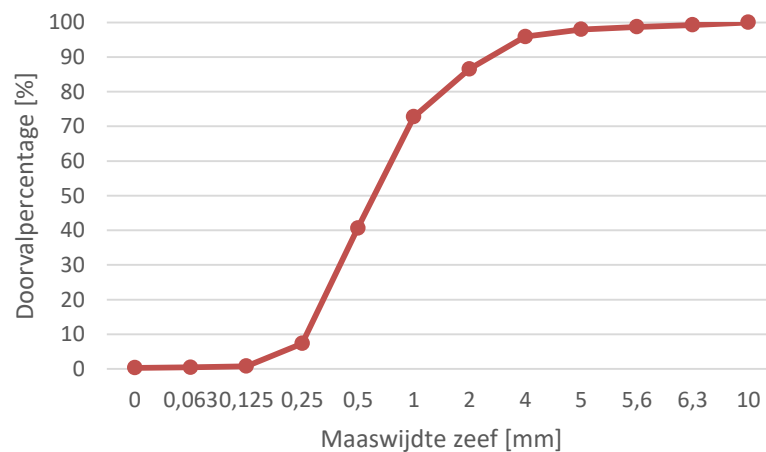
Zeef	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrestpercentage [%]	Gecumuleerd zeefrestpercentage [%]	Doorvalpercentage [%]
10	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
6,3	4,30	4,30	0,72	0,72	99,28
5,6	2,90	7,20	0,48	1,20	98,80
5	3,50	10,70	0,58	1,78	98,22
4	13,30	24,00	2,22	4,00	96,00
2	62,90	86,90	10,48	14,48	85,52
1	88,10	175,00	14,68	29,17	70,83
0,5	189,10	364,10	31,52	60,68	39,32
0,25	194,10	558,20	32,35	93,03	6,97
0,125	38,90	597,10	6,48	99,52	0,48
0,063	2,00	599,10	0,33	99,85	0,15
Rest	0,70	599,80	0,12	99,97	0,03

PROEF 3

Zeef	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrestpercentage [%]	Gecumuleerd zeefrestpercentage [%]	Doorvalpercentage [%]
10	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
6,3	3,60	3,60	0,60	0,60	99,40
5,6	3,20	6,80	0,53	1,13	98,87
5	4,50	11,30	0,75	1,88	98,12
4	10,10	21,40	1,68	3,57	96,43
2	49,40	70,80	8,23	11,80	88,20
1	78,00	148,80	13,00	24,80	75,20
0,5	199,40	348,20	33,23	58,03	41,97
0,25	206,80	555,00	34,47	92,50	7,50
0,125	40,40	595,40	6,73	99,23	0,77
0,063	1,80	597,20	0,30	99,53	0,47
Rest	0,80	598,00	0,13	99,67	0,33

GEMIDDELDE

Zeef	Zeefrest [g]	Zeefrestpercentage [%]	Gecumuleerd zeefrestpercentage [%]	Doorvalpercentage [%]
10	0,00	0,00	0,00	100,00
6,3	4,37	0,73	0,73	99,27
5,6	3,57	0,59	1,32	98,68
5	4,23	0,71	2,03	97,97
4	12,60	2,10	4,13	95,87
2	56,03	9,34	13,47	86,53
1	82,80	13,80	27,27	72,73
0,5	192,57	32,09	59,36	40,64
0,25	199,73	33,29	92,65	7,35
0,125	39,57	6,59	99,24	0,76
0,063	1,93	0,32	99,57	0,43
Rest	0,77	0,13	99,69	0,31



SCHELPEN

PROEF 1

Zeef	Zeefrest [g]	Gecumuleer de zeefrest [g]	Zeefrestpercentag e [%]	Gecumuleerd zeefrestpercentage [%]	Doorvalperce ntage [%]
10	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
6,3	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
5,6	2,00	2,00	0,33	0,33	99,67
5	13,30	15,30	2,22	2,55	97,45
4	224,80	240,10	37,47	40,02	59,98
2	259,80	499,90	43,30	83,32	16,68
1	98,20	598,10	16,37	99,68	0,32
0,5	1,30	599,40	0,22	99,90	0,10
0,25	0,20	599,60	0,03	99,93	0,07
0,125	0,20	599,80	0,03	99,97	0,03
0,063	0,20	600,00	0,03	100,00	0,00
Rest	0,10	600,10	0,02	100,02	-0,02

PROEF 2

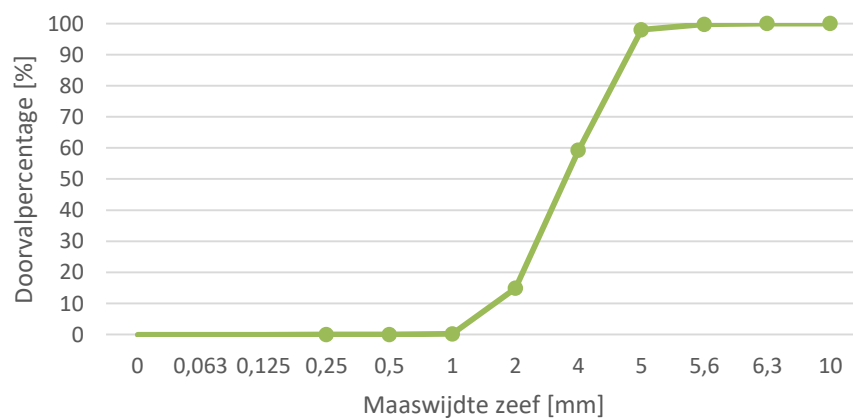
Zeef	Zeefrest [g]	Gecumuleer de zeefrest [g]	Zeefrestpercentag e [%]	Gecumuleerd zeefrestpercentage [%]	Doorvalperce ntage [%]
10	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
6,3	0,40	0,40	0,07	0,07	99,93
5,6	0,80	1,20	0,13	0,20	99,80
5	9,60	10,80	1,60	1,80	98,20
4	282,50	293,30	47,08	48,88	51,12
2	261,50	554,80	43,58	92,47	7,53
1	44,60	599,40	7,43	99,90	0,10
0,5	0,20	599,60	0,03	99,93	0,07
0,25	0,20	599,80	0,03	99,97	0,03
0,125	0,10	599,90	0,02	99,98	0,02
0,063	0,10	600,00	0,02	100,00	0,00
Rest	0,00	600,00	0,00	100,00	0,00

PROEF 3

Zeef	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrestpercentage [%]	Gecumuleerd zeefrestpercentage [%]	Doorvalpercentage [%]
10	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
6,3	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
5,6	1,90	1,90	0,32	0,32	99,68
5	8,20	10,10	1,37	1,68	98,32
4	190,80	200,90	31,80	33,48	66,52
2	276,90	477,80	46,15	79,63	20,37
1	121,20	599,00	20,20	99,83	0,17
0,5	1,50	600,50	0,25	100,08	-0,08
0,25	0,10	600,60	0,02	100,10	-0,10
0,125	0,10	600,70	0,02	100,12	-0,12
0,063	0,10	600,80	0,02	100,13	-0,13
Rest	0,00	600,80	0,00	100,13	-0,13

GEMIDDELDE

Zeef	Zeefrest [g]	Zeefrestpercentage [%]	Gecumuleerd zeefrestpercentage [%]	Doorvalpercentage [%]
10	0,00	0,00	0,00	100,00
6,3	0,13	0,02	0,02	99,98
5,6	1,57	0,26	0,28	99,72
5	10,37	1,73	2,01	97,99
4	232,70	38,78	40,79	59,21
2	266,07	44,34	85,14	14,86
1	88,00	14,67	99,81	0,19
0,5	1,00	0,17	99,97	0,03
0,25	0,17	0,03	100,00	0,00
0,125	0,13	0,02	100,02	-0,02
0,063	0,13	0,02	100,04	-0,04
Rest	0,03	0,01	100,05	-0,05



GRIND

PROEF 1

Zeef	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrestpercent age [%]	Gecumuleerd zeefrestpercentage [%]	Doorvalperc entage [%]
40	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
20	141,10	141,10	3,53	3,53	96,47
16	663,20	804,30	16,58	20,11	79,89
14	441,80	1246,10	11,05	31,15	68,85
12,5	400,00	1646,10	10,00	41,15	58,85
10	771,90	2418,00	19,30	60,45	39,55
8	864,60	3282,60	21,62	82,07	17,94
6,3	644,50	3927,10	16,11	98,18	1,82
4	68,40	3995,50	1,71	99,89	0,11
2	0,00	3995,50	0,00	99,89	0,11
1	0,20	3995,70	0,01	99,89	0,11
0,5	0,20	3995,90	0,01	99,90	0,10
0,25	0,20	3996,10	0,01	99,90	0,10
0,125	0,10	3996,20	0,00	99,91	0,10
0,063	0,70	3996,90	0,02	99,92	0,08
Rest	0,10	3997,00	0,00	99,93	0,08

PROEF 2

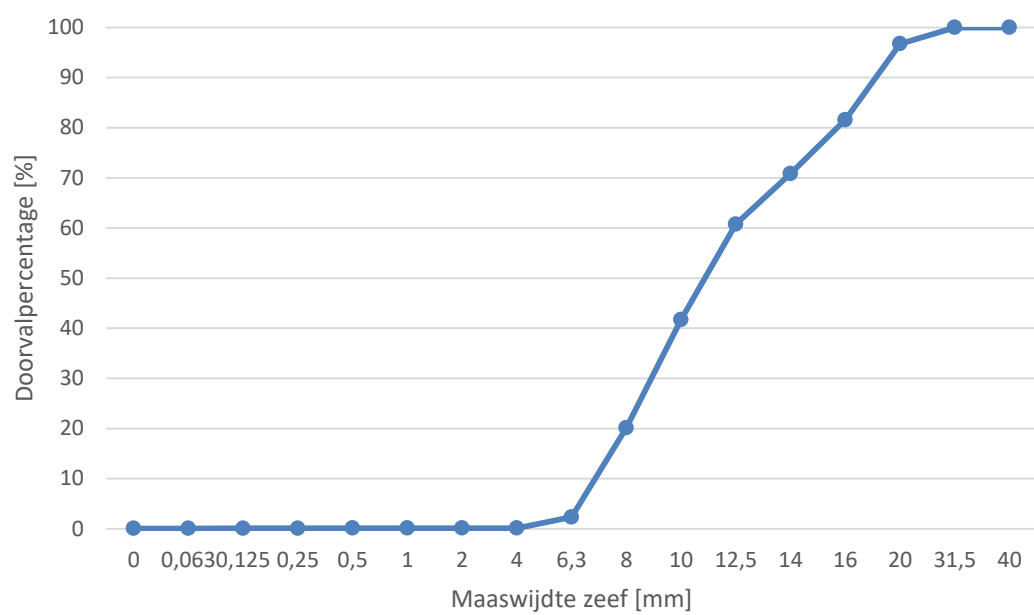
Zeef	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrestpercent age [%]	Gecumuleerd zeefrestpercentage [%]	Doorvalperc entage [%]
40	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
20	187,40	187,40	4,69	4,69	95,32
16	647,00	834,40	16,18	20,86	79,14
14	474,70	1309,10	11,87	32,73	67,27
12,5	418,80	1727,90	10,47	43,20	56,80
10	722,80	2450,70	18,07	61,27	38,73
8	811,50	3262,20	20,29	81,56	18,45
6,3	644,20	3906,40	16,11	97,66	2,34
4	90,10	3996,50	2,25	99,91	0,09
2	0,00	3996,50	0,00	99,91	0,09
1	0,10	3996,60	0,00	99,92	0,08
0,5	0,10	3996,70	0,00	99,92	0,08
0,25	0,30	3997,00	0,01	99,93	0,08
0,125	0,30	3997,30	0,01	99,93	0,07
0,063	0,90	3998,20	0,02	99,96	0,05
Rest	0,20	3998,40	0,01	99,96	0,04

PROEF 3

Zeef	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrestpercentage [%]	Gecumuleerd zeefrestpercentage [%]	Doorvalpercentage [%]
40	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
20	64,20	64,20	1,61	1,61	98,40
16	509,20	573,40	12,73	14,34	85,67
14	370,50	943,90	9,26	23,60	76,40
12,5	392,00	1335,90	9,80	33,40	66,60
10	788,30	2124,20	19,71	53,11	46,90
8	914,20	3038,40	22,86	75,96	24,04
6,3	848,10	3886,50	21,20	97,16	2,84
4	105,20	3991,70	2,63	99,79	0,21
2	0,10	3991,80	0,00	99,80	0,20
1	0,20	3992,00	0,01	99,80	0,20
0,5	0,20	3992,20	0,01	99,81	0,20
0,25	0,60	3992,80	0,02	99,82	0,18
0,125	0,60	3993,40	0,02	99,84	0,17
0,063	1,40	3994,80	0,04	99,87	0,13
Rest	0,40	3995,20	0,01	99,88	0,12

GEMIDDELDE

Zeef	Zeefrest [g]	Zeefrestpercentage [%]	Gecumuleerd zeefrestpercentage [%]	Doorvalpercentage [%]
40	0,00	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	0,00	100,00
20	130,90	3,27	3,27	96,73
16	606,47	15,16	18,43	81,57
14	429,00	10,73	29,16	70,84
12,5	403,60	10,09	39,25	60,75
10	761,00	19,03	58,27	41,73
8	863,43	21,59	79,86	20,14
6,3	712,27	17,81	97,67	2,33
4	87,90	2,20	99,86	0,14
2	0,03	0,00	99,87	0,14
1	0,17	0,00	99,87	0,13
0,5	0,17	0,00	99,87	0,13
0,25	0,37	0,01	99,88	0,12
0,125	0,33	0,01	99,89	0,11
0,063	1,00	0,03	99,92	0,08
Rest	0,23	0,01	99,92	0,08



9.7. Bepaling dichtheid vers beton

	M1a	M1b	M2	M3	M4	M5
Lege emmer [kg]	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210
Emmer water [kg]	7,008	7,008	7,008	7,008	7,008	7,008
Emmer beton [kg]	16,572	17,000	17,000	17,100	16,840	16,750
V container [m ³]	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Densiteit [kg/m ³]	2402,11	2464,95	2464,95	2479,63	2441,46	2428,24

