FACULTEIT INGENIEURSWETENSCHAPPEN
EN ARCHITECTUUR

Gebruik van de fijne fractie van gerecycleerde puingranulaten in dekvloeren

Wout Schelfhout, Bjarne Corryn
Studentennummers: 02110324, 02008782

Promotor: prof. dr. ir. Veerle Boel
Begeleider: dr. Muhammad Arslan Yaqub

Masterproef voorgelegd voor het behalen van de graad Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Academiejaar 2024-2025

UNIVERSITEIT
GENT

Gebruik van de fijne fractie van gerecycleerde puingranulaten in dekvloeren

Bjarne Corryn en Wout Schelfhout

Voorwoord

Deze masterproef werd geschreven aan de Universiteit Gent ter verkrijging van de graad van Master in de Ingenieurswetenschappen: Bouwkunde. Het onderzoek strekte zich uit over een periode van één jaar, waarin we de steun mochten ontvangen van verschillende mensen en organisaties, die we graag willen bedanken.

Allereerst willen we onze promotor, prof. dr. ir. Veerle Boel, oprecht danken voor het aanreiken van het onderwerp en haar waardevolle begeleiding gedurende het hele traject. Onze bijzondere dank gaat ook uit naar onze begeleider, dr. Arslan Yaqub Muhammad, voor zijn hulp bij het vertrouwd raken met het onderzoeksveld en zijn ondersteuning bij het opzetten van de testmethodologie.

We zijn het bedrijf Nivolo dankbaar voor het verschaffen van relevante informatie, het kaderen van de maatschappelijke relevantie en het mee richting geven aan het onderzoek. Ook het bedrijf Resourcefull willen we bedanken voor het aanleveren van de granulaten, evenals VITO (Vlaams Instituut voor Technologisch Onderzoek) voor de vlotte communicatie en het delen van hun expertise.

Tot slot willen we iedereen bedanken die op een directe of indirecte manier heeft bijgedragen aan de totstandkoming van deze masterproef.

Bjarne Corryn en Wout Schelfhout, Gent, 5 juni 2025

Vertrouwelijk tot en met 01/01/2035

Belangrijk

Deze masterproef bevat vertrouwelijke informatie en/of vertrouwelijke onderzoeksresultaten die eigendom zijn van de Universiteit Gent of derden. Het is ten strengste verboden deze masterproef of enig deel ervan te publiceren, te citeren of op welke wijze dan ook openbaar te maken zonder de uitdrukkelijke schriftelijke toestemming van de Universiteit Gent. Onder geen beding mag deze masterproef aan derden worden meegedeeld of ter beschikking worden gesteld. Fotokopiëren of op enige andere wijze dupliceren is ten strengste verboden. Het negeren van het vertrouwelijke karakter van deze masterproef kan onherstelbare schade toebrengen aan de Universiteit Gent. De hierboven vermelde bepalingen blijven van kracht tot de embargo-datum.

Deze masterproef maakt deel uit van een examen. Eventuele opmerkingen geformuleerd door de examencommissie tijdens de mondelinge presentatie van de masterproef zijn niet opgenomen in deze tekst. Deze thesis erkent het gebruik van ChatGPT/Microsoft Copilot als hulpmiddel voor het verzamelen van informatie en voor grammatica- en spellingscontrole. Er zijn echter geen directe antwoorden van de AI opgenomen; alle informatie werd kritisch geanalyseerd, geïnterpreteerd en geïntegreerd door de studenten. De rol van de AI was strikt ondersteunend en gericht op het waarborgen van duidelijkheid en samenhang in de tekst.

De auteurs geven toestemming om deze masterproef ter inzage beschikbaar te stellen en om delen van deze masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. In alle gevallen van ander gebruik moeten de auteursrechtelijke voorwaarden worden gerespecteerd, met name met betrekking tot de verplichting om expliciet de bron te vermelden bij het citeren van resultaten uit deze masterproef.

Bjarne Corryn en Wout Schelfhout
5 juni 2025

Gebruik van de fijne fractie van gerecycleerde puingranulaten in dekvloeren

Bjarne Corryn en Wout Schelfhout
Promotor: prof. dr. ir. Veerle Boel
Begeleider: dr. Muhammad Arslan Yaqub

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master of Science in de industriële wetenschappen: Bouwkunde
Universiteit Gent
Faculteit ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2024-2025

Samenvatting

In deze masterproef wordt onderzocht in welke mate de fijne fractie van gerecycleerde puingranulaten inzetbaar is als grondstof in traditionele cementgebonden dekvloermengsels. Acht zandsoorten, waaronder twee rivierzanden als referentie, werden fysisch en mechanisch geanalyseerd. De belangrijkste eigenschappen zoals zeefverdeling, waterabsorptie, fijnheidsmodulus, volumemassa en inwendige wrijvingshoek werden bepaald, aangevuld met visuele analyse via optische microscopie. Uit deze fysische eigenschappen wordt geconcludeerd dat gerecycleerde granulaten een korrelvorm met scherpe hoeken vertonen tegenover het afgeronde rivierzand. Bijkomstig vertonen de gerecycleerde granulaten een poreus karakter, wat resulteert in een hogere waterabsorptie. Dit staat in contrast met rivierzand dat geen waterabsorptie vertoont.

In een tweede onderzoeksfase worden dekvloermengsels gemaakt met afzonderlijke zandsoorten. Dit biedt inzicht in de verwerkbaarheid, consistentie en mechanische eigenschappen van elk type zand afzonderlijk, evenals in de invloed van de water/cement-factor (W/C). De uitgevoerde consistentietesten leveren echter geen eenduidige conclusie op over welke W/C-factor een optimaal mengsel oplevert. De zandsoort *Recycled mix* vertoont gunstige mechanische eigenschappen, terwijl *Chapyt* resulteert in de slechtste mechanische eigenschappen.

In een laatste fase worden combinaties van zandsoorten samengesteld om tot geoptimaliseerde mengsels te komen met verbeterde eigenschappen. Hierbij wordt getoetst of de gecombineerde granulaten tot betere consistentie, verwerkbaarheid en sterkteprestaties kunnen leiden. Uit de resultaten blijkt dat sommige gerecycleerde granulaten, mits aangepaste mengverhoudingen en korrelverdeling, een functioneel alternatief kunnen vormen voor rivierzand.

Kernwoorden

Dekvloeren, Gerecycleerde granulaten, W/C-factor, Consistentie, Verwerkbaarheid, Mechanische eigenschappen

Use of the fine fraction of recycled rubble aggregates in screeds

Bjarne Corryn en Wout Schelfhout
Supervisor: prof. dr. ir. Veerle Boel
Counsellor: dr. Muhammad Arslan Yaqub

Master's dissertation submitted in order to obtain the degree of Master of Science in Civil Engineering Technology
Ghent University
Faculty of Engineering and Architecture
Academic year 2024-2025

Abstract

This master's thesis investigates the extent to which the fine fraction of recycled rubble aggregates can be used as a raw material in traditional cement-based screed mixtures. Eight sand types from different sources were analysed, including two reference River sands and six recycled or mixed variants. In the first phase, physical and mechanical properties, such as particle size distribution, fineness modulus, water absorption, density, and angle of repose, were determined and supplemented with visual analysis through optical microscopy. Based on these physical properties, it is concluded that recycled aggregates exhibit a more angular particle shape compared to the rounded shape of River sand. Additionally, the recycled aggregates display a porous character, resulting in higher water absorption. This contrasts with River sand, which exhibits nearly zero water absorption.

In the second research phase, screed mixtures were composed using individual sand types. This provided insights into the workability, consistency, and mechanical properties of each sand type, as well as the influence of the water-to-cement ratio (W/C). However, the performed consistency tests did not yield a clear answer on which W/C ratio results in the most optimal mixture. The sand type Recycled Mix demonstrated favourable mechanical properties, whereas Chapyt resulted in the poorest mechanical performance.

In the final phase, combinations of sand types were composed to develop optimised mixtures with improved properties. This phase assessed whether combining aggregates could lead to a better particle size distribution (closer to the ones of natural river sand) and hence a better consistency, workability, and mechanical performance. The results indicate that recycled aggregates, when combined in adjusted proportions and with optimised grading, can serve as a functional alternative to River sand.

Keywords

Screeds, Recycled aggregates, W/C-ratio, Consistency , Workability, Mechanical properties

Use of the fine fraction of recycled rubble aggregates in traditional screeds

Bjarne Corryn and Wout Schelfhout

Supervisor: Prof. dr. ir. Veerle Boel

Counsellor: dr. Muhammad Arslan Yaqub

***Abstract*:**

This master's thesis investigates the extent to which the fine fraction of recycled rubble aggregates can be used as a raw material in traditional cement-based screed mixtures. Eight sand types from different sources were analysed, including two reference River sands and six recycled or mixed variants. In the first phase, physical and mechanical properties, such as particle size distribution, fineness modulus, water absorption, density, and angle of repose, were determined and supplemented with visual analysis through optical microscopy. Based on these physical properties, it is concluded that recycled aggregates exhibit a more angular particle shape compared to the rounded shape of River sand. Additionally, the recycled aggregates display a porous character, resulting in higher water absorption. This contrasts with River sand, which exhibits nearly zero water absorption.

In the second research phase, screed mixtures were composed using individual sand types. This provided insights into the workability, consistency, and mechanical properties of each sand type, as well as the influence of the water-to-cement ratio (W/C). However, the performed consistency tests did not yield a clear answer on which W/C ratio results in the most optimal mixture. The sand type Recycled Mix demonstrated favourable mechanical properties, whereas Chapyt resulted in the poorest mechanical performance.

In the final phase, combinations of sand types were composed to develop optimised mixtures with improved properties. This phase assessed whether combining aggregates could lead to a better particle size distribution (closer to the ones of natural river sand) and hence a better consistency, workability, and mechanical performance. The results indicate that recycled aggregates, when combined in adjusted proportions and with optimised grading, can serve as a functional alternative to River sand.

***Keywords*:**

Screeds, Recycled aggregates, W/C-ratio, Consistency, Workability, Mechanical properties

I. Introduction

Worldwide, there is an increasing focus on the recycling of construction waste, with the aim of using it not only as low-grade fill, but also as a functional construction material. The urgent need for more sustainable solutions in the construction sector is supported in the literature review through a sustainability analysis. This thesis investigates to what extent the fine fraction of recycled aggregates can be used as a raw material in screed mixtures.

II. Research method

The primary objective of this thesis is to develop a suitable traditional cement-based screed mixture using recycled aggregates.

In the first phase, the physical and mechanical properties of the aggregates were characterized. Key parameters such as particle size distribution, fineness modulus, water absorption, density and angle of repose were measured. Additionally, optical microscopy was employed to analyse the particle shape and surface texture, providing detailed insight into the aggregate morphology.

In the second phase, screed mixes for each sand type were prepared with a fixed cement dosage. Effective W/C ratios were estimated by finding water absorption in the recycled aggregates. Workability was assessed using mini-slump and flow table tests, with optimal mixes selected based on cone stability, texture and flow diameter. Mechanical properties were evaluated through density, flexural, and compressive strength tests after 7 and 28 days, following NBN EN 13892-2. This approach enabled a comparative analysis of fresh and hardened screed behaviour.

The third and final phase, the focused lies on optimizing combined mixtures by mixing different recycled aggregate fractions in proportions. This approach aimed to compensate for the limitations of individual fractions and produce a high-performance screed mixture. The optimised screed mixtures were again evaluated for consistency, workability and mechanical properties.

Finally, all mixtures were compared to reference mixtures based on natural River sand. This comparison allowed for an evaluation of technical feasibility and sustainability of using recycled aggregates as an alternative to natural sand in screed mixtures, ensuring that the mixtures meet quality standards required for durable screed floors.

III. Physical properties of the aggregates

A. Description of the aggregates

In this study, the following sand types have been used: Recycled concrete sand 0/4, Chapyt 0/2, Chapyt 0/4, Mengzand 0/4 25/90, Recycled mix 0/2, Recycled mix 0/3,

River sand 0/4 26/90 and River sand 0/4 35/90. These sand types are selected to perform the required tests and analyses within the context of this research. Table 1 shows an overview of the sand types and their codes. The Recycled concrete sand was delivered as RCS 0/6,3 but was used in this study as RCS 0/4. Throughout the rest of the paper, the designation RCS 0/4 is used consistently.

Table 1: Overview of sand types and their code names

Type of sand	Codes	Full name
Natural sands	RS 26/90	River sand 0/4 26/90
	RS 35/90	River sand 0/4 35/90
	MZ 25/90	Mengzand 0/4 25/90
Recycled sands	Chap 0/2	Chapyt sand 0/2
	Chap 0/4	Chapyt sand 0/4
	RMS 0/2	Recycled mix 0/2
	RMS 0/3	Recycled mix 0/2
	RCS 0/4	Recycled concrete sand 0/4

B. *Particle size distribution (PSD) analysis*

1) *The ideal particle size distribution for screeds*

For traditional cement-based screeds, it is recommended that the aggregate grading lies between curve 1 and curve 4, as shown in Figure 1. A particle size distribution between these boundaries ensures optimal compaction, workability and mechanical strength of the screed. [1]

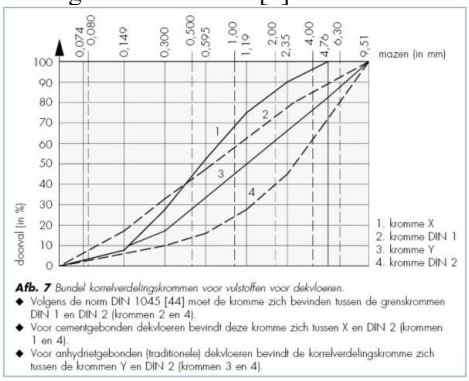


Figure 1: Ideal particle size distribution for screeds [1]

2) *The particle size distribution of the aggregates*

Aggregate properties and grading were evaluated in accordance with NBN EN 12620, which specifies requirements for PSD, bulk density, porosity, water absorption, and mechanical strength. Sieve analyses were performed using ISO- or EN-compliant sieves. The resulting PSD of sands are shown in Figure 2.

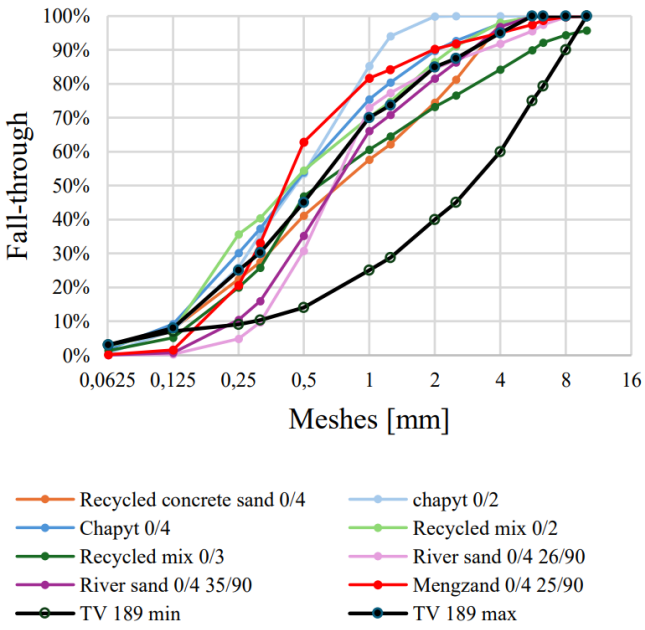


Figure 2: Particle size distribution of sands

Natural River sands (0/4 26/90 and 0/4 35/90) exhibited well-balanced, gradually increasing PSD. Recycled mixes (0/2 and 0/3) contained a higher fine fraction but closely matched the River sands from 1 mm sieve size and onwards. Chapyt 0/2 was predominantly fine, while Chapyt 0/4 showed a coarser grading, approaching the PSD of River sand beyond 1 mm. Mengzand 0/4 25/90 resembled River sand but with slightly more fines. Recycled concrete sand 0/6.3 had a high coarse fraction, whereas recycled concrete sand 0/4 showed a more uniform distribution and fell within the specifications of TV 189 [1]. Figure 2 shows the results of the sieving analysis.

C. *Water absorption and density*

1) *Pycnometer test*

The apparent density and water absorption of aggregates were determined according to NBN EN 1097-6 (2013), which applies to natural, recycled, and manufactured aggregates. This standard (NBN EN 1097) outlines procedures for assessing key physical and mechanical properties of aggregates that influence the performance of concrete, mortars or screeds.

An inverse relationship was observed between apparent density and 24-hour water absorption as shown in Figure 3.

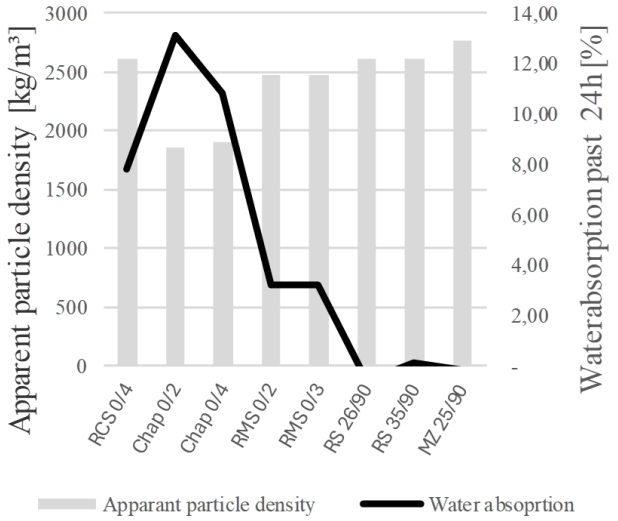


Figure 3: Density and water absorption of sands

Chapyt 0/2 showed the lowest apparent density (1857,48 kg/m³) and the highest water absorption (13,15%), while Mengzand 0/4 25/90 exhibited the highest density (2773,01 kg/m³) and negligible absorption (~0%). Recycled sands such as Recycled mix 0/3 and 0/2 showed moderately high densities (~2468 kg/m³) and low absorption values (3.21% and 3,18%, respectively). Natural River sands had the highest apparent particle densities (up to 2620 kg/m³) and effectively zero absorption, consistent with their non-porous nature. Recycled concrete sand 0/4 showed intermediate characteristics, with a density of 2605,04 kg/m³ and water absorption of 7,81%.

2) Water absorption after 5 minutes

a) Theoretical concept

During the mixing of screed mixture, the water absorption of recycled fine aggregate (RFA) plays an important role. Since RFA is added to the mix in a dry state, it immediately begins to absorb part of the mixing water through its porous structure. This absorption occurs rapidly, especially within the first few minutes of mixing. Therefore, the water absorption is specifically measured (assuming that the mixing process takes 5 minutes), as it most accurately reflects what actually happens during the mixing process.

The water absorbed by the RFA is no longer available for the hydration reaction of the cement, which directly affects the strength and also the workability of the screed. To account for this effect, the amount of water absorbed after five minutes was subtracted from the added water-cement ratio (W/C_{add}). The result is the effective water-cement ratio (W/C_{eff}), which provides a more realistic estimate of the actual amount of water available for cement hydration.

Figure 4 illustrates this concept visually. Before mixing, all water is freely available. After mixing, a part of the water is retained within the pores of the RFA, leaving less water available for the cement reaction. This shift in water distribution highlights the importance of accurately determining water absorption of RCA and estimating effective W/C ratio in screed mixtures.

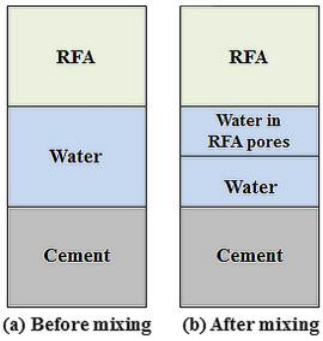


Figure 4: Effect of water absorption of RFA on distribution of water in the fresh screed system [2]

To assess the time-dependent water absorption of recycled fine aggregates (RFA), a fixed amount of oven-dried material is placed in a volumetric flask and filled to a calibrated mark with water. At set intervals (5–60 minutes), additional water is added to restore the initial level. The absorbed volume is recorded as the mass difference. Water absorption is calculated as the relative increase in mass over time. This method simulates water redistribution in fresh mortar [2].

b) Results

Short- and long-term water absorption tests highlight the porous nature of recycled aggregates. The results are graphically shown in Figure 5.

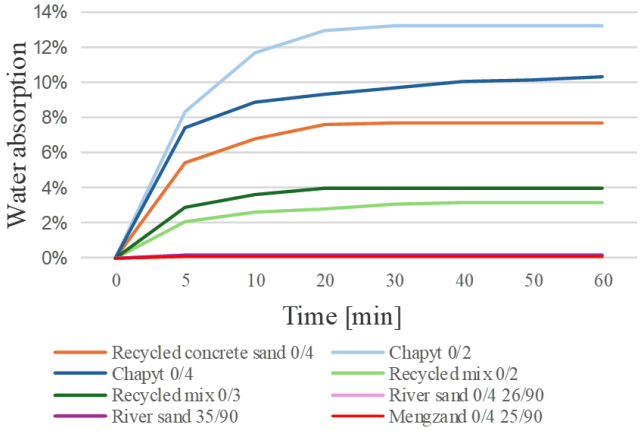


Figure 5: Water absorption at different time intervals

Chapyt 0/2 and 0/4 exhibited the highest water absorption after 5 minutes (8,34% and 7,45%, respectively), followed by Recycled concrete sand 0/4 (5,42%), indicating a highly porous structure. In contrast, Recycled mix sands absorbed significantly less water (2,92% for 0/2 and 2,07% for 0/3), while natural sands such as River sands and Mengzand showed almost zero absorption (≤0.15%), confirming their dense particle structure.

Time-dependent absorption measurements revealed that most water uptake in porous aggregates occurs within the first 5–10 minutes, with the absorption rate decreasing sharply thereafter. A near-asymptotic plateau was observed from approximately 30 minutes onward, suggesting pore saturation [2].

Finally, a comparison of 5-minute and 24-hour absorption values showed a strong correlation. Aggregates with high initial absorption, such as Chapyt 0/2 (13,15%) and Recycled concrete sand (7,81%), also retained high WA_{24} values. This suggests that short-term absorption is a reliable predictor of

mixing-time behaviour, underlining the importance of adapting mix design when using porous or recycled sands.

D. Angle of repose

The angle of repose of the aggregates was measured in accordance with ISO 4324:1977, which defines the method based on the natural angle formed when a material flows freely from a funnel onto a flat surface. This measurement provides insight into the flow behaviour and handling characteristics of granular media. The results are shown in Figure 6.

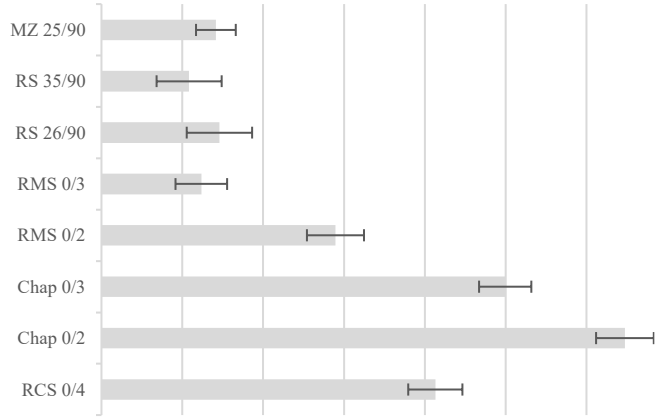


Figure 6: Angle of repose of sands

The angle of repose varied considerably among the tested sands, influenced primarily by particle shape and size distribution.

Chapyt sands (0/2 and 0/4) displayed the highest average angles of repose (38° and 35°), reflecting high internal friction due to their angular particle morphology. Similarly, Recycled concrete sand 0/4 showed a high angle (33°), attributed to irregular grain shapes that enhance interlocking and resistance to flow. In contrast, natural River sands (0/4 26/90, 0/4 35/90) and Mengzand 0/4 (25/90) exhibited lower angles (27°–28°), consistent with their rounded particles, which roll more easily and reduce interparticle friction.

Recycled mixes (0/2 and 0/3) showed intermediate angles (27°–31°), comparable to natural sands. Within each sand type, finer fractions (e.g., 0/2 or 26/90) tended to result in higher angles of repose than their coarser counterparts (0/4 or 35/90), likely due to denser packing and increased grain contact. These findings underscore the importance of both particle shape and gradation in determining the flow and stability behaviour of granular materials.

E. Angle of repose for each fraction

A refined analysis of the internal friction angle was conducted by also determining this property separately for four particle size fractions rather than for the bulk sand as previously obtained. By first sieving the material into four homogeneous size classes, a more detailed understanding of the relationship between grain size and mechanical behaviour was obtained. This fraction-based approach offers a more accurate characterisation of sand properties and enhances insight into the role of granulometry in screed performance. The examined fractions are shown in Table 2.

Table 2: Examined fractions

Sand type	F_1 [mm]	F_2 [mm]	F_3 [mm]	F_4 [mm]
RCS 0/4	0-0,5	0,5-4	**4-6,3**	**6,3-8**
Chap 0/2	0-0,125	0,125-0,5	0,5-1	1-2
Chap 0/4	0-0,125	0,125-0,5	0,5-1	1-4
RMS 0/2	0-0,125	0,125-0,5	0,5-1	1-2
RMS 0/3	0-0,25	0,25-0,5	0,5-1,4	1,4-2,8
RS 26/90	0-0,5	0,5-0,63	0,63-1	1-4
RS 35/90	0-0,315	0,315-0,63	0,63-1,4	1,4-4
MZ 25/90	0-0,25	0,25-0,315	0,315-1	1-4

For each sand fraction, five measurements of the internal friction angle were performed, and their mean in Table 3. For Recycled concrete sand 0/4, only two fractions could be tested due to blockage of the funnel by larger aggregate particles, which impeded the flow.

Table 3: Angle of repose per fraction

Sand type	$\varphi_{av,F1}[°]$	$\varphi_{av,F2}[°]$	$\varphi_{av,F3}[°]$	$\varphi_{av,F4}[°]$
RCS 0/4	37	35	-	-
Chap 0/2	43	34	34	36
Chap 0/4	44	33	35	37
RMS 0/2	28	28	33	35
RMS 0/3	32	31	33	37
RS 26/90	29	29	30	32
RS 35/90	29	29	30	32
MZ 25/90	29	28	28	32

The results reveal significant variation in the angle of repose across the tested sand types. The highest average values were observed in Chapyt 0/2 and 0/4, with exceptionally high values in their finest fraction (F_1: 43° and 44°). This deviates from the general trend of lower friction in finer fractions of the natural sands and may be explained by electrostatic effects in dry, fine particles, which influence the internal structure and increase the resistance [3].

In contrast, Recycled mix 0/2 and 0/3 had lower angles (31° and 27°), possibly due to rounded particle shapes or heterogeneous composition, suggesting limited internal shear resistance, which may negatively affect stability in screed applications. River sands (e.g., 0/4 26/90 and 35/90) exhibited the lowest and most consistent angles of repose (28–30°), attributed to their rounded morphology and limited interlocking. Mengzand 0/4 showed similar behaviour.

F. Optical microscopy

In the analysis of sand grains, roundness and circularity are key parameters used to objectively quantify how regular and well-rounded the grains are. Roundness is calculated using the formula:

$$Roundness = \frac{4 * A}{\pi * d_{max}^2} \; [-]$$

Where A is the area [mm²] and d_{max} is the maximum grain diameter [mm]. A value closer to 1 indicates a more compact and rounded grain.

Circularity measures how much the grain's outline deviates from a perfect circle and is calculated as:

$$Circularity = \frac{4 * \pi * A}{O^2} \; [-]$$

Where O is the grain's perimeter [mm]. Higher circularity values point to smoother, more regular shapes. For each sand fraction, one representative grain was selected for analysis.

Diameter, perimeter, and area were accurately measured using microscope software. Figure 7 shows the relationship between roundness and circularity for all sand types. Due to a limited number of grains analyses, the results provide an indication but not statistically robust view of grain shape.

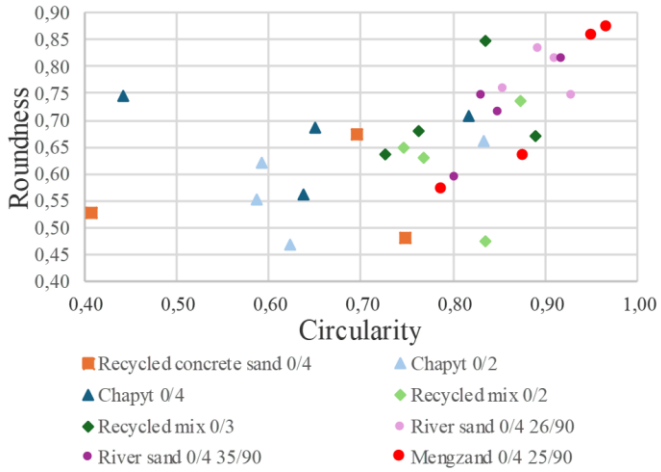


Figure 7: Circularity and Roundness of sand grains

The roundness and circularity data per fraction reveal clear variations between the different sands. River sand generally exhibits the highest values for both roundness and circularity. With a roundness of 0,74 and circularity of 0,93 for fraction F_1. This indicates a very rounded and uniform grain shape.

In contrast, Recycled concrete sand 0/4 shows lower values, with a roundness of 0,53 and a circularity of 0,41 for fraction F_1. This suggests more angular and irregular grains, which can affect workability and potentially result in less optimal compaction and strength. These angular and irregular grains were also observed in the microscopy images, where sharp edges and less rounded shapes were observed.

Chapyt sands also show lower values for both roundness and circularity. For instance, Chapyt 0/2 had a roundness of 0,62 and a circularity of 0,59 for fraction F_1. This indicates that this sand contains more irregular and angular grains than River sands. This observation is supported by the microscopic images, which clearly show grains with sharp edges, irregular shapes, and varying sizes.

The Recycled mix sands show variable results depending on the fraction, such as a roundness of 0,73 and a circularity of 0,87 for fraction F_1 for Recycled mix 0/2.

G. *Conclusions physical properties*

Significant differences were observed in the particle size distribution, density, water absorption, and internal friction of the tested sand types. Natural River sands exhibited well-graded, dense structures with rounded, non-porous particles. As a result, they showed negligible water absorption and low angles of repose, reflecting less internal friction. In contrast, recycled sands, especially Chapyt and Recycled concrete sand, had higher porosity, angular particle shapes, and higher water absorption values (up to 13,15% after 24 h), with angles of repose up to 38°. The increased porosity implies that more water must be added to the screed mixture to achieve comparable workability. These characteristics are critical for predicting mix behaviour and must be carefully considered in screed mix design.

IV. BEHAVIOUR OF SCREED MIXES IN FRESH AND HARDENED STATE

A. *Composition of the screed mixtures*

A standard screed mix was prepared using a cement dosage of 225 kg/m³ of bulk sand volume. For all tests, 2.5 dm³ of sand was used, and the water quantities were calculated based on the added W/C ratio. The actual sand mass varied by type, depending on its bulk density. As a part of the added water is absorbed by the aggregates, especially porous recycled materials, the added W/C_{add} ratio was corrected using 5-minute absorption values (WA_5min) to obtain the effective W/C ratio (W/C_{eff}). For natural sands, which showed negligible absorption, the added and effective W/C ratios were equal. This correction allowed a more accurate estimation of water available for cement hydration, improving the reliability of mechanical strength comparisons between different mixes.

B. *Consistency of screed mixtures*

In this section, standard methods for testing the consistency of cement, mortar or soil were applied to asses if any of these methods can help in defining the consistency of the screed mixes.

1) *Consistency tests with limited applicability to screeds*

The Casagrande test was ineffective because the screed mixture lacked sufficient cohesion; screed material got displaced while forming the groove, and the sample failed to remain stable during tapping. Similarly, the Vebe test did not produce measurable results: even after extended vibration, the disc did not fully make contact with the screed surface, indicating poor applicability to screeds. The V-funnel and inverted Abrams cone tests also failed, as the screed mixes did not flow out of the device without external force, revealing excessive viscosity and poor self-levelling properties under these conditions.

An adapted slump height versus time test, conducted using the Vebe apparatus, also yielded limited differentiation between mixes, making it unsuitable for comparative analysis. These results highlight the of further investigation to define screed-specific consistency methods. Of all the methods, only the mini-slump and flow table tests produced reproducible and interpretable outcomes across a range of W/C ratios and sand types. These two tests are further analysed to select appropriate water-to-cement ratios for each mix.

2) *Mini-slump test*

The mini-slump test is performed in accordance with NBN EN 12350-2. The procedure involves filling a conical mould in three layers, then removing the mould to allow the mixture to slump. The vertical height of the slump is measured relative to the original cone height of 15 cm. A slump of 0 cm indicated relatively a practical consistency for a screed mix, i.e. too wet nor too dry. The test was repeated by increasing W/C ratios until the mixture started to indicate a slump and the cone lost shape due to excessive fluidity. The slump behaviour of screed mixes are shown in Figure 8, starting from very dry mixes that crumble and ending with more fluid mixes showing actual (true) slump.

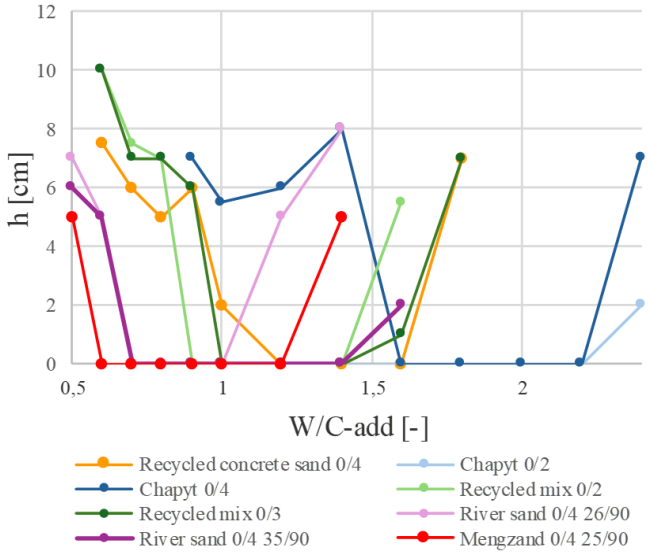


Figure 8: Slump behaviour of screed mixes

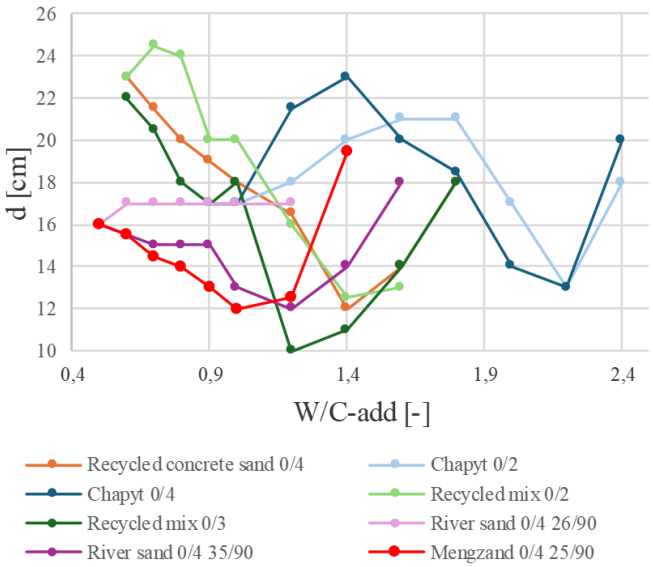


Figure 9: Flow behaviour of screed mixtures

In the mini-slump test, the River sands and Mengzand formed stable cones at significantly lower added W/C_{add} ratios than recycled aggregates, due to their negligible water absorption. Recycled aggregates absorbed part of the mixing water, requiring higher W/C_{add} values to achieve cohesion. Chapyt 0/2 formed a stable cone starting at W/C_{add} = 0,9 and collapses again at a 2,4 W/C_{add}, whereas Chapyt 0/4 required much higher W/C_{add} values, only reaching a stable cone starting from 1,6 W/C_{add} value. The difference between the fine (0/2) and coarse (0/4) Chapyt mixtures highlights the role of granulometry: Chapyt 0/2 formed stable cones over a wider range of W/C_{add} values compared to Chapyt 0/4. This may be explained by the lower angle of repose which was previously observed for Chapyt 0/4. The same conclusion concerning granulometry can be made for the Recycled mixtures. The Recycled concrete sand 0/4 showed a limited range of shape stability, with a self-supporting cone observed for only three added W/C ratios: between 1,2 and 1,6. Compared to River sands, these values are significantly higher, which is attributed to the greater water absorption capacity of the recycled aggregate, caused by residual mortar and internal porosity.

3) Flow test

The flow test is performed as described in NBN EN 12350-5 (2019). To evaluate the deformability of the concrete or mortar mixes. The mortar is placed in a conical mould on a metal plate, which is then lifted to a certain height and dropped 15 times to allow the mixture to spread. After removing the mould, the flow diameter is measured in two perpendicular directions and averaged. This test method when applied to the screed mixtures, exhibited a quantitative indication of consistency and workability as shown in Figure 9.

The River sands showed consistent flow diameters between 12 and 18 cm, largely unaffected by changes in the added W/C_{add} ratio. In contrast, the recycled aggregates exhibited ambiguous behavior. Initially, dry mixtures with high absorption led to larger flow diameters due to the lack of cohesion. As the W/C ratio increased and water became available for cohesion, the flow values stabilised and approached those of natural sands. At very high W/C ratios, excessive fluidity again caused an increase in flow diameter. Finer fractions generally showed higher spread than coarser ones, likely due to stronger capillary forces and particle bridging in coarser sands, as explained by the Young–Laplace equation and particle contact theory. [4]

Initially, the cohesion of the Chapyt mixtures decreases with increasing added water-to-cement ratios, indicating reduced internal friction due to the presence of free water. As the water content continues to rise, the cohesion improves further, and from an added W/C of 1,4 onward, a decreasing trend in flow diameter reappears, similar to that observed in other recycled aggregates. While a similar pattern likely occurs in other mixtures, it was not visible due to the lack of a stable slump cone at lower added W/C values. The Chapyt mixtures did form a cone, which is attributed to their high internal friction. Additionally, the Mengzand showed behaviour comparable to River sand, with less variation across different W/C ratios.

4) Selection of W/C ratios based on consistency tests

The selection of added W/C_{add} ratios is based on a combined interpretation of mini-slump and flow table results. W/C_{add} values producing a mini-slump height of 0 cm, indicated a stable (upright) cone, were considered for further investigation. From this range, only those with a flow spread between 13 and 16 cm, which is the typical range for natural sands, were considered acceptable. This dual criterion allowed the identification of two optimal W/C_{add} values per sand type. These mixes were further evaluated for workability and strength performance. The W/C_{add} values that were obtained by this procedure are listed in Table 4. In the next phase, the assessment of workability of these screed mixes is discussed.

Table 4: Chosen added water-cement ratios (W/C_{add})

Sand type	W/C_{add} 1 [-]	W/C_{add} 2 [-]
RCS 0/4	1,2	1,6
Chap 0/2	1,6	2,2
Chap 0/4	1,6	2
RMS 0/2	1,2	1,4
RMS 0/3	1,2	1,4
RS 26/90	0,7	0,9
RS 35/90	0,7	0,9
MZ 25/90	0,8	1

C. *Workability of screed mixtures*

The workability of each mixture was evaluated using a mould with dimensions 30 x 30 x 3 cm. The ease/difficulty in surface preparation and the surface quality during screeding was assessed. Additionally, the compatibility of the mixture was examined, followed by an evaluation of how smoothly the screed mixture could be placed.

An example of both good and poor workability is presented respectively in Figure 10 and Figure 11.



Figure 10: Good workability; River sand W/C_{add} 0,7



Figure 11: Poor workability; Recycled mix W/C_{add} 1,1

The results indicate that a higher water-to-cement (W/C) ratio generally improves workability of screed mixtures. However, this does not always correlate with a smooth surface or sufficient compactability. Some mixtures showed streaks, indented surfaces, and voids, despite high fluidity, depending on the particle size distribution and particle shape. This highlights the importance of a balanced approach between water content and granulometry. The subjective evaluation offers an initial qualitative assessment of the most suitable mixtures.

D. *Mechanical properties of the screed mixtures*

The standard NBN EN 13892-2 specifies test methods for screed mortars and defines the procedures for determining the flexural and compressive strength of hardened test specimens.

1) *Densities*

The measured density serves as a direct indicator of the homogeneity and compaction of the screed mixture. A density that is significantly lower than expected may indicate air entrapment or insufficient compaction, while an abnormally high density could point to over-compaction. By determining the density prior to the strength tests, errors in the compaction and specimen casting can be detected, and the specimens not meeting quality standards can be excluded from further evaluation.

2) *Flexural and compressive strength*

The influence of both sand type and the water-to-cement ratio (W/C ratio) on the mechanical properties of the screed is investigated. The evaluation is based on measurements of average flexural and compressive strength after 7 and 28 days of curing. As a reference, screed compositions based on natural River sand are used, since it is conventionally used in the screed mixtures. The results for the flexural and compressive strength are shown in Figure 12 and Figure 13 respectively.

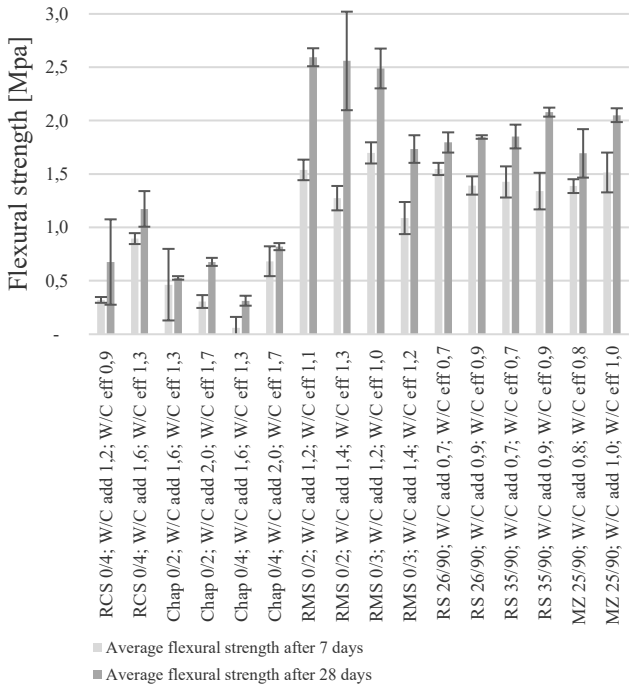


Figure 12: Results flexural strength

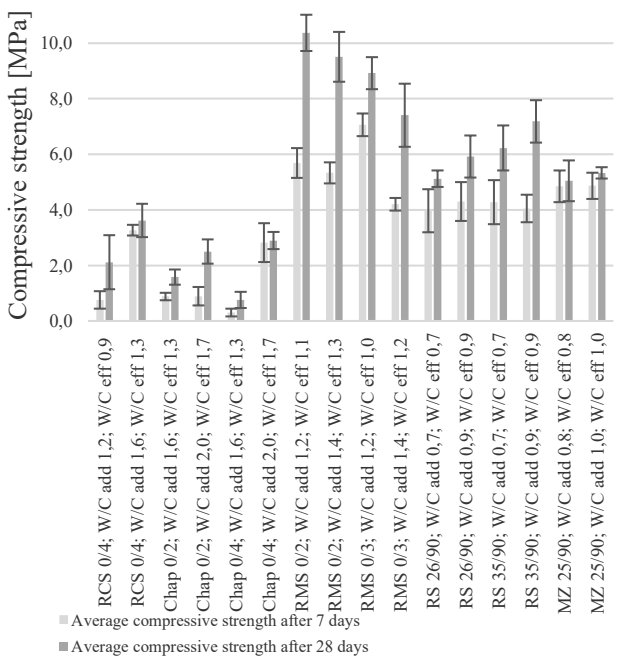


Figure 13: Compressive strength of screeds

a) Influence of sand type

The effect of sand type on the mechanical properties of cement-based screeds was evaluated. River sand-based mixtures (0/4 26/90 and 35/90) were used as references due to their widespread practical application. These mixtures showed consistent performance with balanced strength development over time. Mengzand 0/4 performed very similar to the River sand. Recycled mixes (0/2 and 0/3) demonstrated significantly higher compressive and flexural strengths compared to the River sands references, indicating their high potential in screed mixes. In contrast, mixtures with Chapyt sand and Recycled concrete sand exhibited considerably lower mechanical properties, falling below the standard requirements.

These findings highlight the strong dependency of screed performance on aggregate quality and confirm the viability of certain recycled sand types as substitutes for natural aggregates in screed applications.

b) Relationship of density and compressive strength

As shown in Figure 14 a linear increase can be observed between the average compressive strength and the average density of the test specimens. This trend is evident for both the 7-day and 28-day old samples. For example, the compressive strength of the Recycled mix lies above the linear trend line, whereas the strength of the Recycled concrete sand is significantly lower.

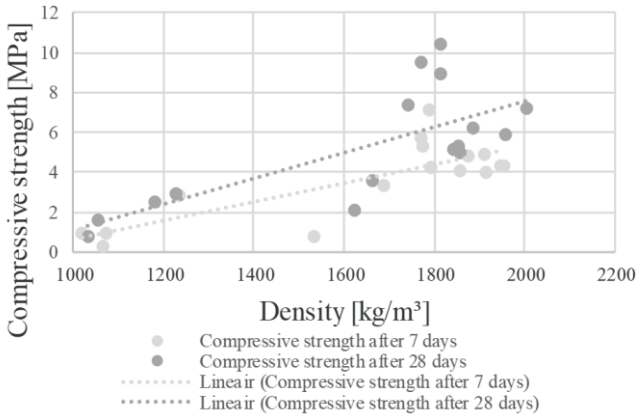


Figure 14: Relationship of density and compressive strength

This deviation can be explained by the internal friction of the materials. Recycled mix has a relatively low angle of repose, comparable to that of River sand, resulting in good compactability of the material. This good compactability leads to a high compressive strength after 28 days. In contrast, Recycled concrete sand has a much higher internal friction, combined with relatively coarse particles. These characteristics make the material difficult to compact effectively, which leads to lower density and consequently lower compressive strength. The same reasoning applies to the Chapyt mixtures. Poor compaction and a sandy surface were also verified in these mixtures. These findings align with the theory that better compaction leads to higher compressive strength, also illustrated by Figure 15. The figure clearly shows that, at equal water-to-cement ratios, a well-compacted mixture (top left dotted line) achieves significantly higher compressive strength than a poorly compacted one (bottom right dotted line).

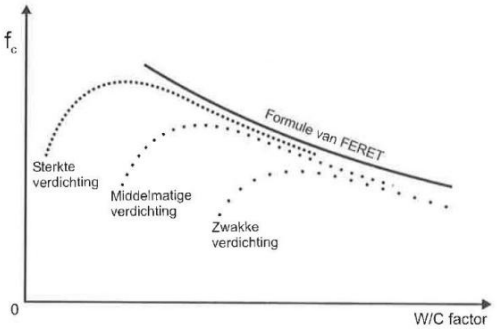


Figure 15: Strength as function of w/c and compaction [5]

c) Influence of compaction method

The compaction method also influences both compressive and flexural strength. Systematic stepwise compaction in moulds results in higher compressive strengths than compaction in two layers, both when the load is applied perpendicular and parallel to the compaction plane [6] In this research, all specimens were compacted in the same way, i.e. in three horizontal layers. Since the specimens are tested with the finished surface facing front, the three horizontal layers are positioned vertically during testing. This compaction method is the least favourable of the three tested approaches: horizontal compaction, vertical compaction, and stepwise compaction [6].

d) Influence of W/C ratio

For Recycled mix 0/2, increasing the effective water-cement ratio (W/C_{eff}) from 1,1 to 1,3 results in a decrease in compressive strength from 10,4 MPa to 9,5 MPa. Flexural strength also decreases, from 5,7 MPa to 5,3 MPa. A similar trend is observed in Recycled mix 0/3, where compressive strength drops from 8,9 MPa to 7,4 MPa as the W/C ratio increases from 1,0 to 1,2, with a corresponding decrease in flexural strength from 7,1 MPa to 4,2 MPa. These results confirm the expected negative impact of excessive mixing water on the microstructure and porosity when using recycled aggregates. However, for River sands 0/4 (35/90 and 26/90), compressive strength increases with a rising W/C ratio. At the corresponding W/C ratio, the River sand appears to be at a critical, and possibly optimal, point. A similar trend is found in the Chapyt mixtures, Mengzand, and Recycled concrete sand, i.e. an increase in both compressive and flexural strength with increasing W/C ratios. This increase at higher W/C ratios can be explained by the poor compactability of these mixtures also indicated Figure 15.

Overall, the results suggest the existence of a critical W/C threshold, i.e. up to this point, higher W/C ratios improve strength, but beyond it, additional water negatively affects mechanical performance, particularly evident in the Recycled mix samples.

E. Conclusions

This section gave insights into the mechanical behaviour of hardened screeds. The flow table test alone proved insufficient for selecting optimal W/C ratios. The flow table test may lead to the exclusion of drier mixtures that, which based on the practical experience, could have offered satisfactory workability despite limited measured flow.

Secondly, this section also demonstrated that both sand type and the water-to-cement (W/C) ratio strongly influence the mechanical properties and workability of cement-based screeds. While River sand provided stable and balanced performance, certain Recycled mixes (0/2 and 0/3) outperformed it in strength, highlighting their high potential as sustainable alternatives. In contrast, Chapyt and Recycled concrete sands showed insufficient mechanical performance. Based on the experience and knowledge gained in this chapter, the screed mixture can now be further optimised.

V. Optimalisation of the screed mixture

A. Determination of the ideal particle size distribution for screed mixtures

For the design of cement-based screeds, a tool was developed, based on the guidelines of TV 189. This guideline defines the limits for cumulative particle size distribution using two boundary curves. The aim of the tool is to create a combined grading curve by mixing two or three existing aggregates in such a way that the resulting curve remains entirely within these limits.

For each aggregate, a sieve analysis was conducted to determine the cumulative passing percentage per sieve size, ranging from 0,063 mm to 10 mm, as previously shown in Figure 2. The influence of each aggregate in the mixture is controlled by using weighting factors X_1, X_2 and X_3, which must satisfy the condition:

$$X_1 + X_2 + X_3 = 1$$

For each sieve size I, the combined cumulative passing D_i is calculated using the following formula:

$$D_i = X_1 * D_{i,1} + X_2 * D_{i,2} + X_3 * D_{i,3}\ [\%]$$

Where $D_{i,1}$, $D_{i,2}$, and $D_{i,3}$ are the cumulative passing percentages of aggregates 1, 2 and 3 respectively.

The resulting combined grading curve is then compared with the boundary values defined in TV 189. For each sieve size, the following condition must be met:

$$TV\ 189\min \leq D_i \leq\ TV\ 189\ max$$

The calculation is repeated for approximately forty combinations of aggregates, each time using different values for the weighting factors. Based on the results, the ten best mixtures are selected

Table 5: Chosen combinations

	Combinations
C1:	75 RCS 0/4 – 25 RMS0/2
C2:	50 RCS 0/4 – 50 RMS 0/2
C3:	75 RCS 0/4 – 25 RMS 0/3
C4:	50 RCS 0/4 – 50 RMS 0/3
C5:	75 RCS 0/4 – 25 MZ 25/90
C6:	50 RCS 0/4 – 50 MZ 25/90
C7:	25 RMS 0/2 – 75 RMS 0/3
C8:	25 RMS 0/3 – 75 MZ 25/90
C9:	50 RMS 0/3 – 50 MZ 25/90
C10:	40 RMS 0/3 – 40 MZ 25/90 – 20 Chap 0/4

B. Composition of the combined screed mixtures

To determine the composition of the combined screed mixtures, a total sand mass of 2000 g is used for each combination. Different types of recycled and natural sands are mixed in varying ratios. The bulk volume of each sand type is calculated by dividing its mass by its measured bulk density. The total sand volume is the sum of the individual sand volumes. Based on this total sand volume, the required cement mass is determined using a cement dosage of 225 g/l of sand. Water is then added according to a set added water-cement ratio, calculated by multiplying the cement mass by the chosen added water-cement ratio. However, part of the water is absorbed by the aggregates and does not contribute to cement hydration. This absorbed water is calculated using the WA_{5min} values and subtracted from the total water amount. The remaining water is considered available for the hydration reaction. The effective water-cement ratio is then calculated as the ratio of reactive water to cement mass.

C. Consistency and workability of the combined screed mixtures

Based on previously acquired knowledge and experience, this chapter aims to achieve good workability at lower water-cement ratios for the different combinations. This is pursued both because of the positive effects on mechanical performance and on workability. Consequently, in contrast to the previous chapter, the optimal added water-cement ratio is determined on the mini-slump test and the workability of the combined mixture. This approach was taken because no suitable consistency test was found for analyzing screed mixtures. In the mini-slump test, the goal is to obtain an upright cone shape. The objective was to find a suitable combination in which the mixture both forms a stable, upright cone and remains workable.

To test the workability, a mould was created with the following dimensions: 10 x 10 x 3 cm. Compared to the

previous test, a new, smaller mould was used because the previous mould required too large a quantity of material to be completely filled. The selected added and effective water-cement ratios can be found in Table 6.

Table 6: Chosen added and effective water-cement ratios

Combination	W/C_{add} [-]	W/C_{eff} [-]
C1	1,0	0,7
C2	1,0	0,8
C3	1,0	0,7
C4	1,0	0,8
C5	0,8	0,6
C6	0,8	0,6
C7	1,0	0,9
C8	0,9	0,8
C9	0,8	0,7
C10	1,0	0,9

D. Mechanical properties of combined screed mixtures

In this study, the NBN EN 13892-2 standard is applied to access hardened screed material. For this part, the same test method as previously used in the project is applied again. The density measurement serves as a control for the mixture's homogeneity and compaction. Subsequently, flexural and compressive strength are determined to evaluate the materials mechanical performance of the combinations.

The results of the flexural and compressive strength are shown in

Figure 16 and

Figure 17.

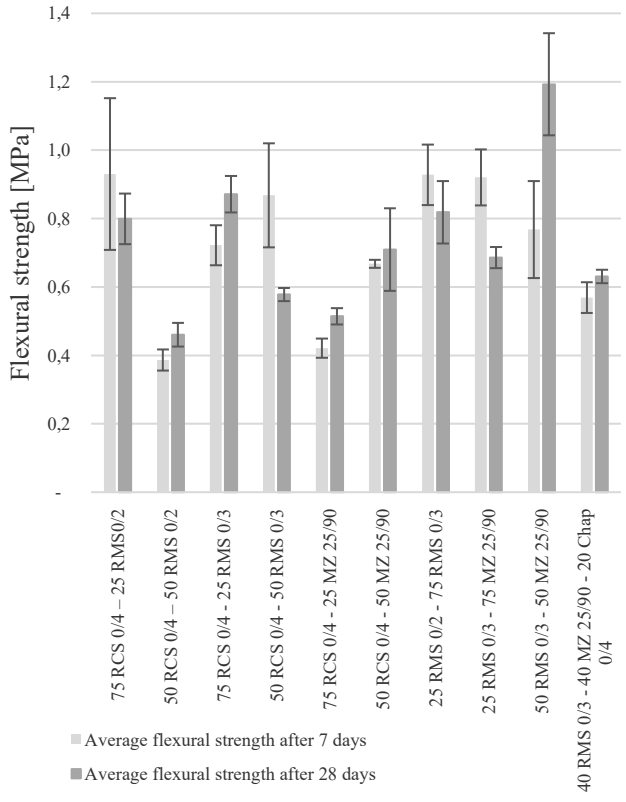


Figure 16: Results flexural strength of combinations

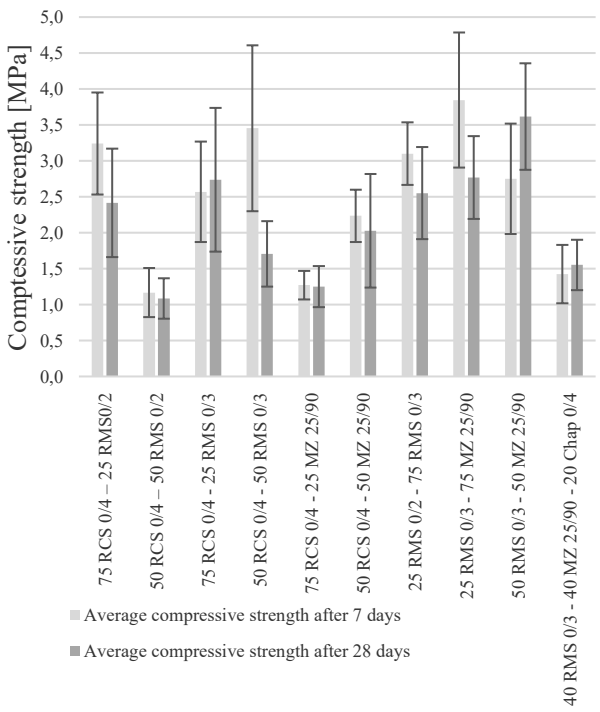


Figure 17: Results compressive strength of combinations

1) Influence of age

Figure 16 and

Figure 17 show an unexpected decrease in compressive strength at 28 days for mixtures 1, 2, 4, 6, 7, and 8, compared to their 7-day strength. This contradicts the typical strength development of cementitious systems, where strength increases over time due to continued hydration. A likely cause is that these mixtures were too dry, which can hinder strength gain. [6] Additionally, insufficient compaction may have negatively affected the mechanical properties.

2) Influence of sand fractions

a) Increase of Recycled mix 0/2: C1 and C2

An increase in the proportion of Recycled mix 0/2 from 25% to 50%, in combination with Recycled concrete sand, leads to a reduction in strength at both 7 and 28 days (from combination 1 to 2). This result deviates from expectations, as the inclusion of Recycled Mix was anticipated to improve strength due to prior findings related to favourable grain shape and lower internal friction. These observations highlight the need for further research into the angle of repose of combined sand mixtures.

b) Increase of Recycled mix 0/3: C3 and C4

For these combinations, the increase in Recycled mix 0/3 from 25% to 50% yields the expected strength gain at 7 days (2,6 to 3,5 MPa). However, at 28 days, combination 4 exhibits a sharp decrease in strength (3,5 to 1,7 MPa), while combination 3 shows a slight increase (2,6 to 2,7 MPa). Due to the irregular behaviour of combination 4, conclusions are limited to the results observed at 7 days.

c) Increase of Mengzand 0/4 25/90: C5 and C6

Mengzand 0/4 25/90 was increased from 25% to 50% between combinations 5 and 6. These mixtures display a more stable strength evolution, albeit at lower strength levels. Combination 5 shows no change over time (1,3 MPa at both ages), while combination 6 shows only a marginal decrease (2,2 to 2,0 MPa). The observed trend suggests that Mengzand contributes to a more stable and compact mixture, likely due to its rounded, dense grain structure, which supports better compaction and a more robust aggregate skeleton.

d) Effect of adding Chap 0/4: C9 and C10

Combination 9 contains a 50/50 ratio of Recycled mix 0/3 and Mengzand 0/4 25/90, with compressive strengths of 2,8 and 3,6 MPa at 7 and 28 days, respectively. In contrast, combination 10 incorporates 20% Chap 0/4 at the expense of the other components (40/40/20). The addition of Chap 0/4 results in a marked reduction in strength to 1,4 and 1,6 MPa, respectively, at 7 and 28 days.

E. Conclusions

Some of the observed strength trends are difficult to explain based solely on the available results. In general, multiple parameters affect the development of compressive strength at 7 and 28 days. Among these, the effective water-to-cement ratio plays a critical role, as does the workability of the mixture. The angle of repose of the composite mixture is also relevant, as it influences the degree of compaction, which in turn impacts the mechanical properties of the floor screed. Given the large variability and the lack of complete data on the physical properties of the mixtures, it is challenging to draw unambiguous conclusions from the results obtained.

VI. Conclusion

This master's thesis investigates the applicability of recycled aggregates as sustainable alternative to natural sand in traditional, cement-based screeds. The research focuses on how particle size distribution, material properties, and internal friction affect the workability and strength development of screed mixtures. Well-graded aggregates, in line with or near the limits set by Technical Guideline TV 189, were shown to promote the formation of a homogeneous and compactable granular skeleton. However, recycled aggregates often do not meet these grading requirements individually, which necessitates blending strategies to create suitable aggregate skeletons. Mixtures with balanced proportions of coarse and fine particles approach more practical grading curves and thereby improve density, compaction, and mechanical performance.

The physical properties of the aggregates were assessed using pycnometer and optical microscopy, both of which proved effective in determining porosity and water absorption. These properties significantly influence the water demand of the mix. Recycled aggregates typically exhibit higher water absorption, reducing the amount of free water available for hydration. This requires careful adjustment of the added water-to-cement ratio. To better compare different mixes, the effective water-to-cement ratio was introduced as a meaningful parameter that captures both workability and potential strength development.

Another key parameter was the internal friction (defined as the angle of repose) of the aggregates. A lower angle of repose facilitates better particle interaction within the mixtures, enhancing compaction and contributing to higher strength. Observations from optical microscopy supported these findings, showing how grain shape and surface texture affect internal friction. Additionally, the study explored electrical conductivity testing as a potentially valuable method for indirectly assessing porosity and water absorption, although further investigation is required to confirm its applicability to recycled aggregates.

Regarding consistency assessment, no standard test was found to reliably predict the workability of screed mortars. The mini-slump test, allowed visual inspection of cone shape, texture and compaction, proved the most reliable method, though it may lead to the selection of overly dry mixtures. The flow table test remains usable if evaluation criteria are adapted to account for parameters such as internal friction. Overall, good workability results from a delicate balance between sufficient free water and low internal friction, both of which are crucial for adequate compaction and strength.

Although none of the recycled screed mix can currently replace River sand without compromise, the studied "Recycled mix" showed the most promising behaviour. It combined relatively low water absorption with favourable particle shape and adequate strength properties, provided that the water-to-cement ratio is carefully controlled. Further investigation into the interactions within Mengzand mixtures is essential, as the behaviour of composite aggregates cannot be accurately predicted based on the characteristics of individual components. Continued modelling and validation of key parameters will be necessary to enable sustainable, high-performance screed applications using recycled aggregates.

References

[1] W. Van Laecke, “TVN_189,” 1993.

[2] Z. Li, J. Liu, J. Xiao, and P. Zhong, “A method to determine water absorption of recycled fine aggregate in paste for design and quality control of fresh mortar,” *Constr Build Mater*, vol. 197, pp. 30–41, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.11.115.

[3] L. Xie, J. Li, and Y. Liu, “Review on charging model of sand particles due to collisions,” *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 276–285, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.taml.2020.01.047.

[4] L. Scholtès, B. Chareyre, F. Nicot, and F. Darve, “Micromechanics of granular materials with capillary effects,” *Int J Eng Sci*, vol. 47, no. 1, pp. 64–75, 2009, doi: 10.1016/j.ijengsci.2008.07.002.

[5] BBG, *Betontechnologie*. 2018.

[6] K. Van Meirvenne, V. Boel, P. De Pauw, T. Gryspeert, S. Korte, and T. Vangheel, *Pocket geïsoleerde binnenvloeren*. Onbekende uitgever, 2016. Accessed: Apr. 29, 2025. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/1854/LU-8501615

Inhoudsopgave

Voorwoord i
Samenvatting iv
Kernwoorden iv
Abstract v
Keywords v
Extended abstract vii
Inhoudsopgave 1
Lijst met figuren 8
Lijst met tabellen 15
Lijst met afkortingen en symbolen 17

Hoofdstuk 1: Inleiding, afbakening en onderzoeksmethode 22

1.1 Probleemstelling 22
1.2 Afbakening van het onderzoeksveld 22
1.3 Doelstellingen en onderzoeksmethode 23
1.4 ECO2Chape 24

Hoofdstuk 2: Verkennende literatuurstudie 25

2.1 Soorten dekvloeren 25
2.1.1 Wat is een dekvloer 25
2.1.2 Types dekvloeren 26
2.1.2.1 Cementgebonden dekvloer 26
2.1.2.2 Calciumsulfaat gebonden dekvloeren 27
2.1.2.3 Cementgebonden gietdekvloeren 28
2.1.3 Toepassingen dekvloeren 29
2.1.3.1 Hechtende dekvloer 29
2.1.3.2 Niet-hechtende dekvloer 30
2.1.3.3 Zwevende dekvloer 31
2.1.3.4 Vloerverwarmingsdekvloer 32
2.2 Duurzaamheidsanalyse 33
2.2.1 Algemeen 33
2.2.2 Gebruik van grondstoffen 33
2.2.3 Watergebruik 35
2.2.4 Gebruik van bouw- en sloopafval 35

2.2.5 CO_2-uitstoot 36
2.3 Gerecycleerde puingranulaten 37
2.3.1 Afkomst van de puingranulaten 38
2.3.2 Recycleproces 38
2.3.2.1 Algemeen 38
2.3.2.2 Brekerinstallatie 39
2.3.2.3 Sorteren en verwijderen van verontreinigingen 40
2.3.3 Eigenschappen van RCA granulaten 42
2.3.4 Invloed van fijne fractie op beton/dekvloeren/mortel 42
2.3.4.1 Typen fijn granulaat 43
2.3.4.2 Consistentie van het mengsel 44
2.3.5 Invloed van de waterabsorptie van RCA 44
2.3.5.1 Eigenschappen van waterabsorptie bij RCA 45
2.3.5.2 Invloed van waterabsorptie op de werkbaarheid van het mengsel 45
2.3.5.3 Invloed van voorbevochtiging op werkbaarheid 45
2.3.5.4 Verbetering van de waterabsorptie-eigenschap van RCA granulaten 46
2.3.5.5 Gebruik van superplastificeerders 46
2.3.6 Hoeveelheid aanmaakwater 47
2.4 Sneeuwbaltest 48
2.5 Granulair skelet 48
2.5.1 Opbouw en eigenschappen van het granulair skelet 49
2.5.1.1 Continu en discontinu granulair skelet 49
2.5.1.2 Invloed van de pakdichtheid 50
Hoofdstuk 3: Fysische eigenschappen van de onderzochte granulaten 51
3.1 Omschrijving onderzochte fijne granulaten 51
3.1.1 Gerecycleerd betonzand 0/4 en 0/6,3 51
3.1.2 Chapyt 0/2 en Chapyt 0/4 52
3.1.3 Recycled mix 0/2 en Recycled mix 0/3 53
3.1.4 Rivierzand 0/4 26/90 en Rivierzand 0/4 35/90 54
3.1.5 Mengzand 0/4 25/90 55
3.1.6 Overzicht van de zandtypes en hun codenaam 56
3.2 Zeefanalyse 58
3.2.1 Uitvoering 58
3.2.2 Het beproefde materiaal en monstername 58

3.2.3 Gebruikte zeven 58
3.2.4 Normen 60
3.2.5 Aannames 61
3.2.6 Meetgegevens 61
3.2.6.1 Bepaling zeefrest 61
3.2.6.2 Bepaling gecumuleerde zeefrest 62
3.2.6.3 Bepaling van de doorval 62
3.2.7 Bepaling fijnheidsmodulus en doorval bij 0,5 mm 63
3.2.7.1 Fijnheidsmodulus 63
3.2.7.2 Doorval bij 0,5 mm 64
3.2.8 Resultaten 65
3.2.9 Conclusies 66
3.2.9.1 Conclusie korrelverdelingsdiagram 66
3.2.9.2 Verband fijnheidsmodulus en doorval bij 0,5 mm 66
3.3 Waterabsorptie en volumemassa 68
3.3.1 Pyknometertest 68
3.3.1.1 Wat is de pyknometertest? 68
3.3.1.2 Norm NBN EN 1097-6 69
3.3.1.3 Uitvoering 69
3.3.1.4 Berekening 73
3.3.1.5 Conclusie 75
3.3.2 Waterabsorptie na 5 min 78
3.3.2.1 Theoretisch concept 78
3.3.2.2 Uitvoering 79
3.3.2.3 Resultaten 81
3.3.2.4 Conclusie 82
3.3.3 Conductiviteitstest 84
3.3.3.1 Doel en principe 84
3.3.3.2 Proefopstelling 84
3.3.3.3 Uitvoering 85
3.3.3.4 Resultaten en conclusie 89
3.3.4 Vergelijking pyknometertest en conductiviteitstest 91
3.4 Inwendige wrijvingshoek 93
3.4.1 Norm ISO 4324-1977 93
3.4.2 Uitvoering 94

3.4.3 Vergelijking glazen basisplaat met basisplaat met papier 98
3.4.4 Resultaten 99
3.4.5 Conclusie 100
3.5 Inwendige wrijvingshoek per fractie 101
3.5.1 Uitvoering 101
3.5.2 Fracties 101
3.5.3 Resultaten 102
3.5.4 Conclusie 103
3.6 Optische microscopie 104
3.6.1 Visuele analyse 104
3.6.1.1 Gerecycleerd betonzand 0/4 104
3.6.1.2 Chapyt 0/2 106
3.6.1.3 Chapyt 0/4 107
3.6.1.4 Recycled mix 0/2 107
3.6.1.5 Recycled mix 0/3 108
3.6.1.6 Rivierzand 0/4 26/90 109
3.6.1.7 Rivierzand 0/4 35/90 110
3.6.1.8 Mengzand 0/4 25/90 111
3.6.2 Analyse rondheid en circulariteit per fractie 112
3.6.3 Resultaten 113
3.6.4 Conclusie 115
3.7 Overzicht van de eigenschappen 116
3.8 Conclusie na hoofdstuk 3 117
Hoofdstuk 4: Gedrag van dekvloermengsels in verse en geharde toestand 118
4.1 Samenstelling 118
4.2 Consistentie van dekvloermengsels 122
4.2.1 Casagrande-test 122
4.2.1.1 Uitvoering 122
4.2.1.1 Resultaten 124
4.2.2 Mini-slump test 124
4.2.2.1 Norm NBN EN 12350-2 124
4.2.2.2 Uitvoering 124
4.2.2.3 Resultaten en conclusie 125
4.2.3 Vebe-apparaat 127

4.2.3.1 Norm NBN EN 12350-3 127
4.2.3.2 Uitvoering van de Vebe-test 128
4.2.3.3 Resultaten en conclusie 130
4.2.3.4 Slump-hoogte in functie van de tijd 130
4.2.4 Vloeitafel 131
4.2.4.1 Norm NBN EN 12350-5 131
4.2.4.2 Uitvoering 132
4.2.4.3 Resultaten en conclusie 133
4.2.5 V-funnel test 135
4.2.5.1 Norm NBN EN 12350-9 135
4.2.5.2 Uitvoering 135
4.2.5.3 Resultaten en conclusie 136
4.2.6 Omgekeerde Abramskegel 136
4.2.6.1 Uitvoering 136
4.2.6.2 Resultaten en conclusie 137
4.2.7 Conclusie consistentie 138
4.3 Verwerkbaarheid van dekvloermengsels 140
4.3.1 Gerecycleerd betonzand 0/4 141
4.3.2 Chapyt 0/2 142
4.3.3 Chapyt 0/4 142
4.3.4 Recycled mix 0/2 143
4.3.5 Recycled mix 0/3 144
4.3.6 Rivierzand 0/4 26/90 144
4.3.7 Rivierzand 0/4 35/90 145
4.3.8 Mengzand 0/4 25/90 145
4.3.9 Conclusie verwerkbaarheid 146
4.4 Mechanische eigenschappen van dekvloermengsels 148
4.4.1 Norm NBN EN 13892-1 148
4.4.2 Buigsterkte 148
4.4.2.1 Uitvoering 148
4.4.3 Druksterkte 151
4.4.3.1 Uitvoering 151
4.4.4 Dichtheden 154
4.4.4.1 Voorafgaande dichtheidsbepaling 154
4.4.4.2 Berekening 154

4.4.5 Conclusie en resultaten 156
4.4.5.1 Invloed van zandsoort 158
4.4.5.2 Verband dichtheid en druksterkte 159
4.4.5.3 Invloed van verdichtingswijze 162
4.4.5.4 Invloed van de W/C-factor 162
4.5 Conclusie na hoofdstuk 4 163

Hoofdstuk 5: Optimalisatie dekvloermengsel 164

5.1 De ideale korrelverdeling voor cementgebonden dekvloeren 164
5.2 Bepaling van de ideale korrelverdeling voor cementgebonden dekvloeren 166
5.2.1.1 Samenstelling van het mengsel 166
5.2.1.2 Berekening van de samengestelde korrelkromme 166
5.2.1.3 Toetsing aan TV 189 167
5.2.1.4 Herhaling van de berekening 167
5.2.1.5 Vergelijking theoretisch model met de praktijk 167
5.2.1.6 Gekozen combinaties en naamgeving 168
5.2.1.7 FM en doorval bij 0,5 mm 170
5.3 Samenstelling gecombineerde dekvloermengsels 171
5.4 Consistentie en verwerkbaarheid van de gecombineerde dekvloermengsels 176
5.4.1 C1: 75 RCS 0/4 – 25 RMS 0/2 177
5.4.2 C2: 50 RCS 0/4 – 50 RMS 0/2 178
5.4.3 C3: 75 RCS 0/4 – 25 RMS 0/3 180
5.4.4 C4: 50 RCS 0/4 – 50 RMS 0/3 183
5.4.5 C5: 75 RCS 0/4 – 25 MZ 25/90 185
5.4.6 C6: 50 RCS 0/4 – 50 MZ 25/90 187
5.4.7 C7: 25 RMS 0/2 – 75 RMS 0/3 189
5.4.8 C8: 25 RMS 0/3 – 75 MZ 25/90 191
5.4.9 C9: 50 RMS 0/3 – 50 MZ 25/90 193
5.4.10 C10: 40 RMS 0/3 – 40 MZ 25/90 – 20 Chap 0/4 194
5.4.11 Overzicht gekozen W/C-factoren en conclusie 196
5.5 Mechanische eigenschappen gecombineerde dekvloermengsels 197
5.5.1 Dichtheden 197
5.5.1.1 Conclusies 198
5.5.2 Buig- en druksterkte 198
5.5.3 Conclusie 200

5.5.3.1 Invloed van ouderdom 200
5.5.3.2 Invloed van fractie zandtypes 200
5.6 Conclusie na hoofdstuk 5 201
Hoofdstuk 6: Discussie 202
Hoofdstuk 7: Conclusies 206
Hoofdstuk 8: Toekomstig onderzoek 207
Hoofdstuk 9: Maatschappelijke reflectie 209
9.1 Milieukundige impact: reductie van grondstoffen en afvalstromen 209
9.2 Economische en maatschappelijke voordelen 209
9.3 Technische prestaties en maatschappelijke perceptie 210
9.4 Bijdrage aan klimaatdoelstellingen 210
9.5 Conclusie 210
Bibliografie 211
Bijlagen 215
Bijlage A: Zeefresultaten 215
Bijlage B: Waterabsorptie in functie van de tijd 225
Bijlage C: Conductiviteit resultaten 228
Bijlage D: Inwendige wrijvingshoek 240
Bijlage E: Inwendige wrijvingshoek per fractie grafieken 243
Bijlage F: Technische fiche cement 256
Bijlage G: Samenstelling dekvloermengsels 258
Bijlage H: Mini-slump en Flow table 262
Bijlage I: Sterktetesten dekvloermengsels 266
Bijlage J: Zeefkrommes geoptimaliseerde zandmengsels 289
Bijlage K: Samenstelling gecombineerde dekvloermengsels 299
Bijlage L: Sterktetesten gecombineerde dekvloermengsels 303

Lijst met figuren

Figuur 2-1: Traditionele dekvloer (Chapewerken, 2025) 26
Figuur 2-2: Calciumsulfaatgebonden dekvloer (Architectura, 2025) 28
Figuur 2-3: Cementgebonden gietdekvloer (Totaalafbouw, 2025) 29
Figuur 2-4: Hechtende dekvloer (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019) 29
Figuur 2-5: Niet-hechtende dekvloer (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019) 30
Figuur 2-6: Zwevende dekvloer (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019) 31
Figuur 2-7: Dekvloer met vloerverwarming (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019) 32
Figuur 2-8: Brekers: (a) kaakbreker, (b) slagbreker, (c) gyratory- en kegelbrekers (Dhir et al., 2019b) 40
Figuur 3-1: Gerecycleerd betonzand 0/6,3 52
Figuur 3-2: Chapyt 0/2 53
Figuur 3-3: Chapyt 0/4 53
Figuur 3-4: Recycled mix 0/2 54
Figuur 3-5: Recycled mix 0/3 54
Figuur 3-6: Rivierzand 0/4 26/90 55
Figuur 3-7: Rivierzand 0/4 35/90 55
Figuur 3-8: Mengzand 0/4 25/90 56
Figuur 3-9: Gebruikte zeven 59
Figuur 3-10: Grenskrommen granulaten (Van Laecke, 1993) 60
Figuur 3-11: Korrelverdelingsdiagrammen zanden 65
Figuur 3-12: Fijnheidsmodulus in functie van de doorval bij 0,5 mm 67
Figuur 3-13: Pyknometer (NBN EN 1097-6, 2013) 68
Figuur 3-14: Gebruikte pyknometers 68
Figuur 3-15: Gevulde pyknometer met Gerecycleerd betonzand 0/4 en Chapyt 0/4 70
Figuur 3-16: IJzeren bak gevuld met de mengsels 70
Figuur 3-17: Afgeknotte kegel (bovenaanzicht) met gewicht 71
Figuur 3-18: Afgeknotte kegel (onderaanzicht) 71
Figuur 3-19: Helling ingestorte zandkegel (NBN EN 1097-6, 2013) 71
Figuur 3-20: Foute helling volgens Figuur 3-19 72
Figuur 3-21: Goede helling volgens Figuur 3-19 72
Figuur 3-22: Dichtheid en waterabsorptie 76
Figuur 3-23: Effect van de absorptie door RFA op de verdeling van het water in het verse dekvloermengsel (Li et al., 2019) 78
Figuur 3-24: Maatkolf met droge monster 79

Figuur 3-25: Maatkolf opgevuld tot ijkmarkering 79
Figuur 3-26: Water geabsorbeerd door het granulaat 80
Figuur 3-27: WA-verloop 82
Figuur 3-28: Staafdiagram WA na 5 minuten en 24 uur 83
Figuur 3-29: Benodigdheden conductiviteitstest 84
Figuur 3-30: U-vormige meetcel 84
Figuur 3-31: Proefopstelling 85
Figuur 3-32: Schematische weergave proefopstelling 85
Figuur 3-33: Droogprocedure 86
Figuur 3-34: Meetcel gevuld met vochtig monster 86
Figuur 3-35: Voorbeeldgrafiek conductiviteitstest (VITO, 2024) 88
Figuur 3-36: Regressiewaarden voor droge en natte tak (VITO, 2024) 88
Figuur 3-37: Rivierzand 0/4 35/90 conductiviteitstest 90
Figuur 3-38: Resultaten conductiviteitstest Chapyt 0/2 90
Figuur 3-39: Vergelijking waterabsorptie van de pyknometertest met de conductiviteitstest 92
Figuur 3-40: De inwendige wrijvingshoek (Wikipedia, 2020) 93
Figuur 3-41: Trechter zijaanzicht 94
Figuur 3-42: Trechter onderaanzicht 94
Figuur 3-43: Opstelling 95
Figuur 3-44: Maatbeker 250 ml met 150 ml monster 95
Figuur 3-45: Uitlopen monster uit trechter 96
Figuur 3-46: Schematische schets berekening inwendige wrijvingshoek 96
Figuur 3-47: Papieren basisplaat 98
Figuur 3-48: Test met papieren basisplaat 98
Figuur 3-49: Vergelijking glazen basisplaat met papieren basisplaat 98
Figuur 3-50: Gemiddelde inwendige wrijvingshoek 99
Figuur 3-51: Rivierzand 0/4 35/90 opgedeeld in fracties 102
Figuur 3-52: Optische microscoop 104
Figuur 3-53: Onderzochte monster van een fractie 104
Figuur 3-54: Gerecycleerd betonzand 0/4 fractie 1 105
Figuur 3-55: Gerecycleerd betonzand 0/4 fractie 2 105
Figuur 3-56: Gerecycleerd betonzand 0/4 fractie 3 105
Figuur 3-57: Chapyt 0/2 fractie 1 106
Figuur 3-58: Chapyt 0/2 fractie 2 106

Figuur 3-59: Chapyt 0/2 fractie 3 106
Figuur 3-60: Chapyt 0/2 fractie 4 106
Figuur 3-61: Chapyt 0/4 fractie 1 107
Figuur 3-62: Chapyt 0/4 fractie 2 107
Figuur 3-63: Chapyt 0/4 fractie 3 107
Figuur 3-64: Chapyt 0/4 fractie 4 107
Figuur 3-65: Recycled mix 0/2 fractie 1 108
Figuur 3-66: Recycled mix 0/2 fractie 2 108
Figuur 3-67: Recycled mix 0/2 fractie 3 108
Figuur 3-68: Recycled mix 0/2 fractie 4 108
Figuur 3-69: Recycled mix 0/3 fractie 1 109
Figuur 3-70: Recycled mix 0/3 fractie 2 109
Figuur 3-71: Recycled mix 0/3 fractie 3 109
Figuur 3-72: Recycled mix 0/3 fractie 4 109
Figuur 3-73: Rivierzand 0/4 26/90 fractie 1 109
Figuur 3-74: Rivierzand 0/4 26/90 fractie 2 109
Figuur 3-75: Rivierzand 0/4 26/90 fractie 3 110
Figuur 3-76: Rivierzand 0/4 26/90 fractie 4 110
Figuur 3-77: Rivierzand 0/4 35/90 fractie 1 111
Figuur 3-78: Rivierzand 0/4 35/90 fractie 2 111
Figuur 3-79: Rivierzand 0/4 35/90 fractie 3 111
Figuur 3-80: Rivierzand 0/4 35/90 fractie 4 111
Figuur 3-81: Mengzand 0/4 25/90 fractie 1 111
Figuur 3-82: Mengzand 0/4 25/90 fractie 2 111
Figuur 3-83: Mengzand 0/4 25/90 fractie 3 112
Figuur 3-84: Mengzand 0/4 25/90 fractie 4 112
Figuur 3-85: Maximale korreldiameter, dmax 113
Figuur 3-86: Bepaling van de omtrek, O 113
Figuur 3-87: Bepaling van de oppervlakte, A 113
Figuur 3-88: Resultaten rondheid en circulariteit 114
Figuur 4-1: Apparaat van Casagrande (Dirk Vinckier, 2018) 122
Figuur 4-2: Voorbeeldgrafiek Casagrande-test (Dirk Vinckier, 2018) 123
Figuur 4-3: Na het trekken van de lijn 124
Figuur 4-4: Na het schokken 124

Figuur 4-5: Mini-slump schematisch (NBN EN 12350-2, 2019) 125
Figuur 4-6: Kegel mini-slump 125
Figuur 4-7: Mini-slump resultaten 126
Figuur 4-8: Vebe-apparaat 128
Figuur 4-9: Kegelvorm 128
Figuur 4-10: De metalen staaf 129
Figuur 4-11: Vormen van slump (NBN EN 12350-3, 2019) 129
Figuur 4-12: Ware slump 129
Figuur 4-13: Verdicht mengsel na een Vebe-tijd van 60 seconden 130
Figuur 4-14: Slump-hoogte i.f.v. de tijd 131
Figuur 4-15: Opmeting diameter vloeitafel (NBN EN 12350-5, 2019) 132
Figuur 4-16: Kegel flow-table 132
Figuur 4-17: De vloeitafel 132
Figuur 4-18: Resultaten vloeimaat 134
Figuur 4-19: Afmetingen V-funnel (NBN EN 12350-9, 2010) 135
Figuur 4-20: Gevulde V-funnel 136
Figuur 4-21: Omgekeerde Abramskegel 137
Figuur 4-22: Gevulde Abramskegel 137
Figuur 4-23: Vergelijking mini-slump met vloeitafel 138
Figuur 4-24: Mal verwerkbaarheid 141
Figuur 4-25: Egalisatielat 141
Figuur 4-26: Gerecycleerd betonzand 0/4; W/C_{add} 1,2; 0/4 W/C_{eff} 0,9 142
Figuur 4-27: Gerecycleerd betonzand 0/4; W/C_{add} 1,6; W/C_{eff} 1,3 142
Figuur 4-28: Chapyt 0/2; W/C_{add} 1,6; W/C_{eff} van 1,3 142
Figuur 4-29: Chapyt 0/2; W/C_{add} 2,0; W/C_{eff} van 1,7 142
Figuur 4-30: Chapyt 0/4; W/C_{add} 1,6; W/C_{eff} van 1,3 143
Figuur 4-31: Chapyt 0/4; W/C_{add} 2,0; W/C_{eff} van 1,7 143
Figuur 4-32: Recycled mix 0/2; W/C_{add} 1,2; W/C_{eff} van 1,1 143
Figuur 4-33: Recycled mix 0/2; W/C_{add} 1,4; W/C_{eff} van 1,3 143
Figuur 4-34: Recycled mix 0/3; W/C_{add} 1,2; W/C_{eff} van 1,0 144
Figuur 4-35: Recycled mix 0/3; W/C_{add} 1,4; W/C_{eff} van 1,2 144
Figuur 4-36: Rivierzand 0/4 26/90; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,7 145
Figuur 4-37: Rivierzand 0/4 26/90; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,9 145
Figuur 4-38: Rivierzand 0/4 35/90; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} van 0,7 145

Figuur 4-39: Rivierzand 0/4 35/90; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} van 0,9 145
Figuur 4-40: Mengzand 0/4 25/90; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} van 0,8 146
Figuur 4-41: Mengzand 0/4 25/90; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} van 1,0 146
Figuur 4-42: Proefstukken voor 7 dagen 148
Figuur 4-43: Meetconventies 149
Figuur 4-44: Proefopstelling buiging 149
Figuur 4-45: Gebroken proefstuk bij buiging 150
Figuur 4-46: Proefstukken voor druksterkte 151
Figuur 4-47: Proefopstelling druk 152
Figuur 4-48: Bezweken proefstuk 152
Figuur 4-49: Vergelijkende grafiek resultaten buigsterkte 158
Figuur 4-50: Vergelijkende grafiek resultaten buigsterkte 158
Figuur 4-51: Druksterkte in functie van de dichtheid van de proefstukken 160
Figuur 4-52: Verband tussen hoekige granulaten en holten (Kim & de Souza, 2009) 160
Figuur 4-53: Invloed van verdichtingsgraad op druksterkte in functie van de water-cementfactor(BBG, 2018) 161
Figuur 4-54: Normalisatiedichtheid in functie van de druksterkte van de proefstukken 161
Figuur 4-55: Proefstuk verdicht in 3 lagen 162
Figuur 5-1: Grenskrommen granulaten (Van Laecke, 1993) 164
Figuur 5-2: Vergelijking theoretisch model met de werkelijke combinatie 168
Figuur 5-3: Mal voor verwerkbaarheid 176
Figuur 5-4: Combinatie 1; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,6 177
Figuur 5-5: Mini-slump combinatie 1; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,6 177
Figuur 5-6: Combinatie 1; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,7 177
Figuur 5-7: Mini-slump combinatie 1; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,7 177
Figuur 5-8: Combinatie 1; W/C_{add} 1,1; W/C_{eff} 0,8 178
Figuur 5-9: Mini-slump combinatie 1; W/C_{add} 1,1; W/C_{eff} 0,8 178
Figuur 5-10: Combinatie 2; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,6 178
Figuur 5-11: Mini-slump combinatie 2; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,6 178
Figuur 5-12: Combinatie 2; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7 179
Figuur 5-13: Mini-slump combinatie 2; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7 179
Figuur 5-14: Combinatie 2; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,8 179
Figuur 5-15: Mini-slump combinatie 2; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,8 179
Figuur 5-16: Combinatie 3; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,4 180

Figuur 5-17: Mini-slump combinatie 3; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,4 180
Figuur 5-18: Combinatie 3; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,5 180
Figuur 5-19: Mini-slump combinatie 3; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,6 180
Figuur 5-20: Combinatie 3; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,6 181
Figuur 5-21: Mini-slump combinatie 3; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,6 181
Figuur 5-22: Combinatie 3; W/C_{add} 1,0 ; W/C_{eff} 0,7 181
Figuur 5-23: Mini-slump combinatie 3; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,7 181
Figuur 5-24: Combinatie 3; W/C_{add} 1,1; W/C_{eff} 0,8 182
Figuur 5-25: Mini-slump combinatie 3; W/C_{add} 1,1; W/C_{eff} 0,8 182
Figuur 5-26: Combinatie 3; W/C_{add} 1,2; W/C_{eff} 0,9 182
Figuur 5-27: Mini-slump combinatie 3; W/C_{add} 1,2; W/C_{eff} 0,9 182
Figuur 5-28: Combinatie 4; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,5 183
Figuur 5-29: Mini-slump combinatie 4; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,5 183
Figuur 5-30: Combinatie 4; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,6 183
Figuur 5-31: Mini-slump combinatie 4; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,6 183
Figuur 5-32: Combinatie 4; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7 184
Figuur 5-33: Mini-slump combinatie 4; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7 184
Figuur 5-34: Combinatie 4; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,8 184
Figuur 5-35: Mini-slump combinatie 4; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,8 184
Figuur 5-36: Combinatie 4; W/C_{add} 1,1; W/C_{eff} 0,9 185
Figuur 5-37: Mini-slump combinatie 4; W/C_{add} 1,1; W/C_{eff} 0,9 185
Figuur 5-38: Combinatie 5; W/C_{add} 0,6; W/C_{eff} 0,4 185
Figuur 5-39: Mini-slump combinatie 5; W/C_{add} 0,6; W/C_{eff} 0,4 185
Figuur 5-40: Combinatie 5; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,5 186
Figuur 5-41: Mini-slump combinatie 5; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,5 186
Figuur 5-42: Combinatie 5; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,6 186
Figuur 5-43: Mini-slump combinatie 5, W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,6 186
Figuur 5-44: Combinatie 5; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7 187
Figuur 5-45: Mini-slump combinatie 5; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7 187
Figuur 5-46: Combinatie 5; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,8 187
Figuur 5-47: Mini-slump combinatie 5; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,8 187
Figuur 5-48: Combinatie 6; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,5 188
Figuur 5-49: Mini-slump combinatie 6; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,5 188
Figuur 5-50: Combinatie 6; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,6 188

Figuur 5-51: Mini-slump combinatie 6; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,6 188
Figuur 5-52: Combinatie 6; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7 189
Figuur 5-53: Mini-slump combinatie 6; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7 189
Figuur 5-54: Combinatie 7; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,7 189
Figuur 5-55: Mini-slump combinatie 7; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,7 189
Figuur 5-56: Combinatie 7; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7 190
Figuur 5-57: Mini-slump combinatie 7; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7 190
Figuur 5-58: Combinatie 7; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,9 190
Figuur 5-59: Mini-slump combinatie 7; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,9 190
Figuur 5-60: Combinatie 7; W/C_{add} 1,1; W/C_{eff} 1,0 191
Figuur 5-61: Mini-slump combinatie 7; W/C_{add} 1,1; W/C_{eff} 1,0 191
Figuur 5-62: Combinatie 7; W/C_{add} 1,2; W/C_{eff} 1,1 191
Figuur 5-63: Mini-slump combinatie 7; W/C_{add} 1,2; W/C_{eff} 1,1 191
Figuur 5-64: Combinatie 8; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,6 192
Figuur 5-65: Mini-slump combinatie 8; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,6 192
Figuur 5-66: Combinatie 8; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,7 192
Figuur 5-67: Mini-slump combinatie 8; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,7 192
Figuur 5-68: Combinatie 8; W/C-factor 0,9; W/C_{eff} 0,8 192
Figuur 5-69: Combinatie 8; W/C-factor 0,9; W/C_{eff} 0,8 192
Figuur 5-70: Combinatie 9; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,6 193
Figuur 5-71: Mini-slump combinatie 9; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,6 193
Figuur 5-72: Combinatie 9; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,7 193
Figuur 5-73: Mini-slump combinatie 9; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,7 193
Figuur 5-74: Combinatie 9; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,8 194
Figuur 5-75: Mini-slump combinatie 9; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,8 194
Figuur 5-76: Combinatie 10; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,7 194
Figuur 5-77: Mini-slump combinatie 10; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,7 194
Figuur 5-78: Combinatie 10; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,8 195
Figuur 5-79: Mini-slump combinatie 10; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,8 195
Figuur 5-80: Combinatie 10; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,9 195
Figuur 5-81: Mini-slump combinatie 10; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,9 195
Figuur 5-82: Resultaten buigsterkte na 7 en 28 dagen 199
Figuur 5-83: Resultaten druksterkte na 7 en 28 dagen 199

Lijst met tabellen

Tabel 3-1: Ovenzicht van de zandtypes en hun codenaam 57
Tabel 3-2: Gebruikte zeven 59
Tabel 3-3: Doorvallen voor cementgebonden dekvloer volgens TV 189 (Van Laecke, 1993) 61
Tabel 3-4: Zeefresultaten Rivierzand 0/4 35/90 63
Tabel 3-5: Categorisering fijnheidsmodulus 64
Tabel 3-6: Fijnheidsmoduli 64
Tabel 3-7: Categorisering van fijn granulaat op basis van doorval van 0,5 mm 64
Tabel 3-8: Doorval bij 0,5 mm 65
Tabel 3-9: Vergelijking fijnheidsmodulus en doorval bij 0,5 mm 66
Tabel 3-10: Massa's pyknometertest 72
Tabel 3-11: Dichtheden pyknometertest 75
Tabel 3-12: Voornaamste eigenschappen 75
Tabel 3-13: Waterabsorptie na 5 min 81
Tabel 3-14: WA-verloop Recycled mix 0/3 81
Tabel 3-15: Vergelijking WA na 5 min en WA na 24 uur 83
Tabel 3-16: Resultaten conductiviteitstest 89
Tabel 3-17: Vergelijking resultaten van pyknometertest met conductiviteitstest 91
Tabel 3-18: Gemiddelde inwendige wrijvingshoek 99
Tabel 3-19: Fracties 101
Tabel 3-20: Gemiddelde inwendige wrijvingshoek per fractie 102
Tabel 3-21: Rondheid en circulariteit per fractie 114
Tabel 3-22: Overzicht eigenschappen 116
Tabel 4-1: Gemeten dichtheden van de zandsoorten 119
Tabel 4-2: Berekening effectieve W/C-factor recycled mix 0/3 121
Tabel 4-3: Resultaten mini-slump test 125
Tabel 4-4: Slump-hoogte in functie van tijd 131
Tabel 4-5: Resultaten vloeitafeltest 133
Tabel 4-6: Toegevoegde W/C-factoren 139
Tabel 4-7: Hoeveelheid water per mengselsamenstelling 140
Tabel 4-8: Overzicht prestaties verwerkbaarheid 146
Tabel 4-9: Dichtheden proefstukken na 7 dagen 155
Tabel 4-10: Dichtheden proefstukken na 28 dagen 156
Tabel 4-11: Gemiddelde buig- en druksterkte per effectieve W/C-factor na 7 en 28 dagen 157

Tabel 5-1: Doorvallen voor cementgebonden dekvloer volgens TV 189 (Van Laecke, 1993) 165
Tabel 5-2: Percentage verhoudingen mengsels 168
Tabel 5-3: Naamgeving combinaties 169
Tabel 5-4: FM en doorval bij 0,5mm voor de gecombineerde zangmengsels 170
Tabel 5-5: Massa's zandmengsel 171
Tabel 5-6: Gemeten dichtheden van de zandsoorten 172
Tabel 5-7: Samenstelling combinaties 173
Tabel 5-8: Berekening W/C-eff combinatie 1 175
Tabel 5-9: Overzicht toegevoegde en effectieve W/C-factoren 196
Tabel 5-10: Dichtheden proefstukken na 7 dagen 197
Tabel 5-11: Dichtheden proefstukken na 28 dagen 197
Tabel 5-12: Gemiddelde buig- en druksterkte voor 7 en 28 dagen voor de 10 combinaties 198

Lijst met afkortingen en symbolen

Symbool:	Eenheid:	Betekenis:
A	[mm²]	Contactoppervlak van het proefstuk, maximaal 1600mm²
A	[mm²]	Oppervlakte van de korrel
a	$\left[\frac{\mu S}{cm\%}\right]$	Richtingscoëfficiënt (helling) van de regressielijn voor de droge tak
AC		Wisselstroom
AOR		Angle of repose
b	$\left[\frac{\mu S}{cm}\right]$	Snijpunt met de y-as van de regressielijn voor de droge tak
b_1	[mm]	Breedte van het proefstuk langs de ene kant
b_2	[mm]	Breedte van het proefstuk langs de andere kant
b_{gem}	[mm]	Gemiddelde breedte van het proefstuk
C	$\left[\frac{\mu S}{cm}\right]$	Conductiviteit
c	$\left[\frac{\mu S}{cm\%}\right]$	Richtingscoëfficiënt (helling) van de regressielijn voor de natte tak
$CaCO_3$		Calciumcarbonaat
CaO		Calciumoxide
$CaSO_4$		Calciumsulfaat
CDW		Construction and demolition waste
CO_2		Koolstofdioxide
CRCA		Coarse recycled concrete aggregate
CS		Crushed sand
d	$\left[\frac{\mu S}{cm}\right]$	Snijpunt met de y-as van de regressielijn voor de natte tak
d	[cm]	Gemeten diameter van de vloeitafel
d	[mm]	Gemeten diameter van de bodemplaat

DC		Gelijkstroom
D_{cement}	[g/l]	Cementdosering
$\Delta m_{absorptie}$ [delta]	g	Hoeveelheid water geabsorbeerd door granulaat tussen 2 metingen
D_i	[g] of [%]	Gecumuleerde doorval voor zeefmaat i
D_i	[%]	Gecombineerde gecumuleerde doorval voor zeefmaat i
$D_{i,x}$	[%]	Gecumuleerde doorval van granulaat X voor zeefmaat i
d_{max}	[mm]	Maximale korreldiameter
EPS		Expanded polystyrene
F_1		Fractie 1
F_2		Fractie 2
F_3		Fractie 3
F_4		Fractie 4
F_c	[kN]	Maximale drukkracht
F_f	[kN]	Maximale buigkracht
FM	[%]	Fijnheidsmodulus
FRCA		Fine recylced concrete aggregate
h	[mm] of [cm]	Gemeten hoogte van de kegel
h_1	[mm]	Hoogte van het proefstuk langs de ene kant
h_2	[mm]	Hoogte van het proefstuk langs de andere kant
h_{gem}	[mm]	Gemiddelde hoogte van het proefstuk
I	[A]	Stroom
ISO		Internationale Organisatie voor Standaardisatie
K	[cm]	Coëfficiënt afhankelijk van meetcel tot meetcel
l	[mm]	Afstand tussen de steunrollen, die vastligt op 100mm
l	[mm]	Lengte van het proefstuk

LCA		Life cycle assessment
M_1	[g]	Massa van het verzadigde en oppervlak gedroogde granulaat in lucht
M_2	[g]	Massa van de pyknometer met het monster van verzadigd granulaat en water
M_3	[g]	Massa van de pyknometer gevuld met water
M_4	[g]	Massa van het in de oven gedroogde testmonster
m_{cement}	[g]	Massa van het cement
$m_{cement,j}$	[g]	Massa van het cement van combinatie j
m_j	[g]	Totale massa in de meetkolf op tijdstip X, meting j
m_{j-1}	[g]	Totale massa in de meetkolf bij de vorige meting, meting j-1
m_p	[kg]	Massa van het proefstuk
m_i	[g]	Massa zeefrest van zeef i
$m_{t=0}$	[g]	Totale massa op tijdstip t=0
$m_{t=X}$	[g]	Totale massa op tijdstip t=X
m_{tot}	[g]	Totale droge massa na het zeven
$m_{w,granulaat}$	[g]	Massa water dat wordt opgenomen door de granulaten
$m_{w,granulaat\ i}$	[g]	Massa water dat wordt opgenomen door granulaat i
$m_{w,reactie}$	[g]	Massa water dat in reactie kan treden
$m_{w,tot}$	[g]	Totale massa van het water
m_{zand}	[g]	Massa van het zand
$m_{zand,i}$	[g]	Massa van het zand i
n		Aantal slagen bij de proef van Casagrande
NA		Natural aggregates
NBN		Bureau voor Normalisatie
O	[mm]	Omtrek van de korrel
φ [phi]	[°] of [RAD]	Inwendige wrijvingshoek

φ_{gem} [phi]	[°] of [RAD]	Gemiddelde inwendige wrijvingshoek
$\varphi_{meting\ X}$ [phi]	[°] of [RAD]	Inwendige wrijvingshoek van meting X
RA		Recycled aggregates
R_c	[N/mm²] of [MPa]	Druksterkte
$R_{c,\ gem}$	[N/mm²] of [MPa]	Gemiddelde druksterkte
RCA		Recycled concrete aggregates
R_f	[N/mm²] of [MPa]	Buigsterkte
$R_{f,\ gem}$	[N/mm²] of [MPa]	Gemiddelde buigsterkte
RFA		Recycled Fine Aggregates
ρ_a [rho]	[kg/m³]	Apparent particle density
ρ_p [rho]	[kg/m³]	Dichtheid van het proefstuk
$\rho_{p,gem}$ [rho]	[kg/m³]	Gemiddelde dichtheid van het proefstuk
ρ_{rd} [rho]	[kg/m³]	Oven-dried particle density
$\rho_{s,zand\ i}$ [rho]	[kg/m³]	Schijnbare dichtheid van het zand i
ρ_{ssd} [rho]	[kg/m³]	Saturated and surface-dried particle density
ρ_w [rho]	[kg/m³]	Dichtheid van water (1000kg/m³)
R_i	[g] of [%]	Zeefrest van zeef i
SCC		Self compacting concrete
SCM		Self compacting mortar
SSD		Surface saturated dry
t	[min]	Tijd
T/m		Tot en met

TV		Technische voorlichting
U	[V]	Spanning
VITO		Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek
VLAIO		Vlaams Agentschap Innoveren & Ondernemen
V_p	[m³]	Volume van het proefstuk
V_{zand}	[m³]	Schijnbaar volume van het zand
$V_{zand,i}$	[l]	Schijnbaar volume van het zand i
$V_{zand,totaal}$	[l]	Totaal schijnbaar volume zand
W/C_{add}		Toegevoegde water/cement-factor
W/C_{eff}		Effectieve water/cement-factor
W/C		Water/cement-factor
WA	[%]	Waterabsorptie
$WA_{24\ pyknometer}$	[%]	Waterabsorptie na 24 uur bij de pyknometertest
$WA_{5\ min}$	[%]	Waterabsorptie na 5 minuten
$WA_{conductiviteit}$	[%]	Waterabsorptie bij de conductiviteitstest
$WA_{X\ min}$	[%]	Waterabsorptie na X minuten
WF		Watervoetafdruk
w_x	[%]	Watergehalte bij de proef van casagrande
XPS		Extruded polystyrene
X_x		Fractie van granulaat x in het mengsel
Z_i	[g] of [%]	Gecumuleerde zeefrest van zeef i

Hoofdstuk 1: Inleiding, afbakening en onderzoeksmethode

1.1 Probleemstelling

Wereldwijd wordt steeds meer ingezet op de recyclage van bouwpuin (zoals mengpuin en betonpuin), met als doel dit niet enkel in te zetten als laagwaardig opvulmateriaal, maar ook als volwaardig bouwmateriaal. De dringende nood aan duurzamere oplossingen in de bouwsector wordt onderbouwd in de literatuurstudie aan de hand van een duurzaamheidsanalyse. In deze masterproef wordt specifiek onderzocht in hoeverre de fijne fractie van gerecycleerde puingranulaten inzetbaar is als grondstof in dekvloermengsels.

1.2 Afbakening van het onderzoeksveld

De zandsoorten die dienst doen als fijne fractie worden beperkt tot acht. Binnen deze acht zandsoorten bevinden zich twee rivierzanden en een mengzand, die zullen dienen ter referentie van de andere, gerecycleerde granulaten. Zoals eerder in de probleemstelling beschreven, worden dekvloerenmengsels vandaag de dag traditioneel met deze rivierzanden samengesteld. De andere vijf zandsoorten zijn gerecycleerde granulaten of een mengvorm. Ze zijn afkomstig van de afbraak van constructiematerialen. Omdat de fijne fractie dient te worden onderzocht, worden alle zanden gezeefd tot een fractie kleiner dan 4 mm.

De studie richt zich specifiek op de toepassing van de traditionele dekvloer. Gietdekvloeren, die andere verwerkings- en materiaaleigenschappen kennen, worden niet opgenomen in de proefopzet. Binnen de traditionele dekvloeren wordt er gefocust op de analyse van de sterkte, verwerkbaarheid en consistentie van dekvloermengsels met gerecycleerde granulaten. In een eerste stap worden hiertoe enkele essentiële fysische eigenschappen van het zandskelet onderzocht, zoals de inwendige wrijvingshoek, dichtheid, waterabsorptie, fijnheidsmodulus en het doorvalpercentage bij een zeefopening van 0,5 mm. Deze parameters leveren belangrijke inzichten in het gedrag van het zand in het mengsel en de mogelijke invloed ervan op de prestaties van de dekvloer. Bepaalde aspecten vallen hierbij bewust buiten het bereik van deze studie. Zo worden krimp- en hechtsterkte niet geëvalueerd. Deze elementen kunnen het onderwerp vormen van een vervolgonderzoek of een afzonderlijke masterproef. Eveneens worden uitsluitend traditionele dekvloeren onderzocht. Deze duidelijke afbakening laat toe om gericht en diepgaand te werken binnen het gekozen onderzoeksdomein.

1.3 Doelstellingen en onderzoeksmethode

De voornaamste doelstelling van deze masterproef is het ontwikkelen van een geschikt cementgebonden dekvloermengsel op basis van gerecycleerde granulaten. Om dit te realiseren, wordt een gefaseerde onderzoeksmethode gehanteerd.

In een eerste fase worden de fysische en mechanische eigenschappen van de gerecycleerde granulaten in kaart gebracht. Hierbij wordt aandacht besteed aan parameters zoals de zeefkromme, waterabsorptie, dichtheid, fijnheidsmodulus en de inwendige wrijvingshoek. Daarnaast wordt een visuele analyse uitgevoerd met behulp van optische microscopie, om inzicht te verkrijgen in de korrelvorm en de oppervlaktetextuur van de granulaten.

In de tweede fase worden de gerecycleerde granulaten afzonderlijk toegepast als zandskelet in standaard dekvloermengsels. Deze mengsels worden onderworpen aan een reeks proeven om de consistentie, verwerkbaarheid en mechanische prestaties te evalueren.

In de derde en laatste fase worden verschillende gerecycleerde granulaten met elkaar gecombineerd in geoptimaliseerde mengverhoudingen. Het doel is om de nadelige eigenschappen van afzonderlijke fracties te compenseren en zo tot een performant eindmengsel te komen. Ook deze mengsels worden opnieuw geëvalueerd op consistentie, verwerkbaarheid en mechanische eigenschappen.

Tot slot worden alle mengsels vergeleken met de referentiemengsels op basis van rivierzand. Op basis van deze vergelijking kan worden nagegaan in welke mate gerecycleerde granulaten een duurzaam en technisch haalbaar alternatief kunnen vormen voor natuurlijk rivierzand in dekvloertoepassingen.

Er wordt ook gestreefd naar de ontwikkeling van een geschikte en objectieve testmethode voor de beoordeling van de consistentie van het dekvloermengsel, zodat kan worden nagegaan of het mengsel voldoet aan de vereisten voor een kwalitatieve dekvloer.

Onderzoeksvragen die in dit kader aan bod komen, zijn onder meer:

- Wat zijn de meest geschikte korrelverdelingen voor dekvloeren en hoe kunnen deze bereikt worden?
- Welke proefmethodes zijn geschikt om waterabsorptie en vormkenmerken van gerecycleerde granulaten vast te stellen?
- Welke invloed hebben de gerecycleerde granulaten op de waterbehoefte van het dekvloermengsel?
- Welke proeven geven een geschikt beeld over een goede consistentie van een dekvloermengsel?
- Welke consistentie moet het dekvloermengsel hebben om een goede verwerkbaarheid te hebben?
- Welke karakteriseringsproeven kunnen bij het plaatsen van de dekvloer aantonen of het mengsel beschikt over de gewenste eigenschappen?
- Is er een dekvloermengsel op basis van gerecycleerde granulaten dat in de toekomst een dekvloermengsel op basis van natuurlijke granulaten kan vervangen?

1.4 ECO2Chape

Deze masterthesis is een onderdeel van het *ECO2Chape*-project. Het *ECO2Chape*-onderzoeksproject is een Vlaams initiatief dat tot doel heeft de vloerensector te transformeren door de ontwikkeling van een hoogperformante, milieuvriendelijke chape. Dit project loopt van 1 februari 2024 tot 31 januari 2027 en wordt gefinancierd door het Vlaams Agentschap Innoveren & Ondernemen (VLAIO). De promotor van het project is prof. Veerle Boel van de vakgroep Bouwmaterialen aan de Universiteit Gent, met ondersteuning van copromotor prof. Stijn Matthys en onderzoeker dr. Muhammad Arslan Yaqub. (UGent, 2024)

Twee belangrijke partners werken mee aan het project: de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO) en ResourceFull. Samen ondersteunen ze de ontwikkeling van innovatieve bindmiddelen en de valorisatie van secundaire grondstoffen om de milieu-impact van chapes aanzienlijk te verlagen. (UGent, 2024)

De innovatiedoelstelling van het *ECO2Chape*-onderzoeksproject is om de vloerindustrie te transformeren door een hoogwaardige, eco-efficiënte dekvloer te creëren. Dit ambitieuze doel zal worden bereikt via twee transformatieve benaderingen. Enerzijds wordt ingezet op het ontwerpen van op prestaties gebaseerde dekvloerbinders die de koolstofvoetafdruk aanzienlijk verlagen. Anderzijds wordt gestreefd naar het maximaliseren van de valorisatie van afval door gerecycleerde betonmaterialen en bijproducten te integreren in zowel het korrelskelet als het bindmiddelsysteem van de dekvloeren, waardoor het storten van afval tot een minimum wordt beperkt. (UGent, 2024)

Deze innovatie brengt versterking op drie niveaus. Op productniveau wordt een duurzame en circulaire dekvloersamenstelling gecreëerd. Op procesniveau worden nieuwe voorbehandelingsmethoden ontwikkeld voor de verwerking van secundaire materialen. Ten slotte wordt ook de dienstverlening verbeterd door de vloerindustrie een duurzame, hoogwaardige oplossing aan te bieden. (UGent, 2024)

Hoofdstuk 2: Verkennende literatuurstudie

De bouwsector staat voor de uitdaging om duurzamer en meer circulair te worden, waarbij het hergebruik van materialen een steeds belangrijkere rol speelt. Binnen deze context is de ontwikkeling van duurzame en kwalitatieve dekvloeren een cruciale factor. Dekvloeren vormen immers een essentieel onderdeel van de gebouwstructuur en moeten voldoen aan strenge eisen op het gebied van sterkte, duurzaamheid en verwerkbaarheid. Tegelijkertijd biedt het gebruik van gerecycleerde materialen, zoals puingranulaten, kansen om de milieu-impact van de bouwsector te verkleinen.

Deze literatuurstudie heeft als doel om een diepgaand inzicht te krijgen in de eigenschappen en duurzaamheid van dekvloeren met gerecycleerde materialen. In eerste instantie worden de verschillende soorten dekvloeren besproken, waarbij hun samenstelling, functie en toepassingsmogelijkheden in kaart worden gebracht. Vervolgens wordt een duurzaamheidsanalyse uitgevoerd, waarbij de ecologische en technische voordelen van alternatieve materialen ten opzichte van conventionele dekvloeren worden geëvalueerd. Een belangrijk aandachtspunt binnen deze studie is het gebruik van gerecycleerde puingranulaten als vervanger van primaire grondstoffen in dekvloermengsels. De eigenschappen van deze granulaten, evenals de invloed van de herkomst en verwerking, worden in detail onderzocht. Binnen dit kader wordt ook de invloed van de fijne fractie op het dekvloermengsel geanalyseerd, aangezien de aanwezigheid van fijne deeltjes een significante impact kan hebben op de mengsamenstelling, verwerkbaarheid en uiteindelijke prestaties van de vloer. Tot slot wordt de opbouw van het granulair skelet binnen dekvloermengsels bestudeerd. Dit aspect is van cruciaal belang voor de mechanische eigenschappen en duurzaamheid van de dekvloer. Door inzicht te krijgen in de optimale samenstelling van het granulair skelet, kan een evenwicht worden gevonden tussen sterkte, stabiliteit en milieuvriendelijkheid. De verkennende literatuurstudie legt zo de basis voor verder onderzoek naar duurzame en hoogwaardige dekvloeren met gerecycleerde materialen en draagt bij aan de kennisontwikkeling binnen circulair bouwen.

2.1 Soorten dekvloeren

2.1.1 Wat is een dekvloer

Een dekvloer is een constructieve laag die op een draagvloer wordt aangebracht om een vlakke en stabiele ondergrond te creëren voor de uiteindelijke vloerafwerking. Deze laag speelt een cruciale rol in de structurele en functionele prestaties van een vloerconstructie, doordat ze bijdraagt aan de sterkte, duurzaamheid en compatibiliteit met de afwerkingsmaterialen. Dekvloeren kunnen worden vervaardigd uit verschillende materialen en composities, afhankelijk van de specifieke eisen van het bouwproject. Factoren zoals

mechanische sterkte, vochtbestendigheid, thermische prestaties en de snelheid van uitharding beïnvloeden de keuze van het type dekvloer. In moderne bouwtechnieken wordt steeds vaker gebruikgemaakt van innovatieve materialen en methoden om de prestaties en levensduur van dekvloeren te verbeteren. (Peter Domone & John Illston, 2010)

2.1.2 Types dekvloeren

2.1.2.1 Cementgebonden dekvloer

Een cementgebonden dekvloer is een veelgebruikte vloerafwerking in woningen en commerciële gebouwen. Deze vloer dient als ondergrond voor vloerbedekking zoals tegels, parket of tapijt en zorgt voor een egale afwerking. Daarnaast kan een dekvloer bijdragen aan thermische en akoestische isolatie. Een cementgebonden dekvloer bestaat uit cement (meestal CEMI of CEM II), zand, water en eventueel toeslagstoffen zoals plastificeerders of vezels. De dikte varieert tussen de 4 en 7 cm en is afhankelijk van de toepassing. Het gebruik van een traditionele cementgebonden dekvloer brengt verschillende voordelen met zich mee. Een belangrijk voordeel is dat deze vloer relatief goedkoop en breed beschikbaar is. Daarnaast is de dekvloer ook geschikt voor verschillende toepassingen en afwerkingen en heeft deze een hoge druksterkte en duurzaamheid. (Van Meirvenne et al., 2016)

Er zijn echter ook enkele nadelen verbonden aan dit type vloer. Eén van de grootste nadelen is de lange droogtijd, die invloed kan hebben op de bouwplanning. Bovendien is er een risico op scheurvorming als de dekvloer niet op de juiste manier wordt nabehandeld. Daarnaast is een cementgebonden dekvloer een zwaar materiaal, wat betekent dat de draagconstructie van het gebouw voldoende sterk moet zijn om het gewicht te kunnen dragen. (Van Meirvenne et al., 2016)



Figuur 2-1: Traditionele dekvloer (Chapewerken, 2025)

2.1.2.2 Calciumsulfaat gebonden dekvloeren

Een calciumsulfaatgebonden dekvloer, ook wel een anhydrietdekvloer genoemd, is een veelgebruikte vloeroplossing in de bouw. In tegenstelling tot traditionele cementgebonden dekvloeren maakt dit type gebruik van $CaSO_4$ als bindmiddel in plaats van cement. Een calciumsulfaatgebonden dekvloer bestaat zo uit anhydriet ($CaSO_4$), zand, water en eventuele additieven. Doordat dit type dekvloer vloeibaar wordt aangebracht, werkt het zelfnivellerend, waardoor een zeer vlak oppervlak ontstaat. Dit maakt de vloer bijzonder geschikt als ondergrond voor diverse afwerkingen zoals tegels parket en vinyl. (Van Meirvenne et al., 2016)

Een calciumsulfaat-gebonden dekvloer heeft verschillende voor- en nadelen ten opzichte van cementgebonden dekvloeren. Een belangrijk voordeel is dat deze dekvloer een zeer vlak oppervlak oplevert, waardoor extra egalisatie meestal niet nodig. Doordat de vloer zelfnivellerend is en minder krimp vertoont dan een cementgebonden dekvloer, is de kans op scheurvorming aanzienlijk kleiner. Dit maakt het een duurzame en stabiele ondergrond voor verdere afwerking. Daarnaast heeft deze dekvloer een uitstekende warmtegeleiding, wat deze vloer bijzonder geschikt maakt voor toepassing in combinatie met vloerverwarming. Dankzij de goede warmtegeleiding wordt de efficiëntie van het verwarmingssysteem verbeterd, wat kan leiden tot energiebesparing. Verder vereist de productie en verwerking van deze dekvloer minder water dan een cementgebonden dekvloer, wat bijdraagt aan een duurzamer bouwproces. (Van Meirvenne et al., 2016)

Ondanks de vele voordelen zijn er ook enkele nadelen waarmee rekening moet gehouden worden. Eén van de grootste nadelen is de lange droogtijd van de vloer. Gemiddeld heeft een calciumsulfaatgebonden dekvloer één week per centimeter dikte nodig om volledig uit te harden. Dit kan een beperking vormen voor bouwprojecten met een strakke planning. Daarnaast is deze dekvloer gevoelig voor vocht, waardoor deze niet geschikt is voor natte ruimtes zoals badkamers of keukens, tenzij er extra maatregelen worden genomen om de vloer te beschermen tegen vochtindringing. Tot slot vereist de afwerking van deze dekvloer soms een voorbehandeling, zoals het aanbrengen van een primer of een extra laag egalisatie, vooral wanneer de vloer wordt afgewerkt met tegels of parket. (Van Meirvenne et al., 2016)



Figuur 2-2: Calciumsulfaatgebonden dekvloer (Architectura, 2025)

2.1.2.3 Cementgebonden gietdekvloeren

Een cementgebonden dekvloer is een vloeibare dekvloer die wordt samengesteld op basis van cement als bindmiddel. Dit type dekvloer combineert de sterkte van traditionele cementgebonden dekvloeren met de zelfnivellerende eigenschappen van vloeibare systemen. Hierdoor ontstaat een strakke en vlakke afwerking, wat deze vloer geschikt maakt voor diverse toepassingen, waaronder woningen, kantoren en industriële gebouwen. Cementgebonden dekvloeren bestaan uit cement, zand, water en toeslagstoffen zoals plastificeerders en vezels. Door de vloeibare samenstelling wordt de dekvloer gepompt en uitgegoten, waarna deze zichzelf nivelleert. Dit resulteert in een egale en vlakke vloer, zonder dat intensieve afwerking nodig is. Kenmerkend voor dit type dekvloer is de hoge druk- en buigsterkte, waardoor de vloer bestand is tegen zware belasting. Daarnaast heeft de vloer een snelle uitharding, waardoor deze sneller beloopbaar is dan traditionele cementdekvloeren. (Van Meirvenne et al., 2016)

Een cementgebonden gietdekvloer heeft verschillende voordelen. Doordat de vloer zelfnivellerend is, wordt een zeer vlak en egaal oppervlak gecreëerd zonder dat extra egalisatie nodig is. Daarnaast is de vloer zeer sterk en slijtvast, waardoor deze geschikt is voor zowel woning als zwaarbelaste ruimtes, zoals werkplaatsen of magazijnen. Een ander voordeel is de snelle uitharding, waardoor de vloer sneller beloopbaar is en bouwprojecten minder vertraging oplopen. Bovendien is deze vloer goed te combineren met vloerverwarming, dankzij de efficiënte warmtegeleiding. De cementgebonden gietdekvloer heeft als nadeel een relatief lage flexibiliteit te hebben, wat betekent dat bij spanningen in de ondergrond scheurvorming kan optreden. Daarnaast kan de vloer gevoelig zijn voor krimp, waardoor in sommige gevallen krimpvoegen of wapeningsnetten nodig zijn om scheuren te voorkomen. Verder heeft dit type vloer een hogere wateropname dan bijvoorbeeld calciumsulfaatgebonden gietdekvloeren, waardoor extra voorbehandeling nodig kan zijn bij bepaalde vloerafwerkingen. (Van Meirvenne et al., 2016)



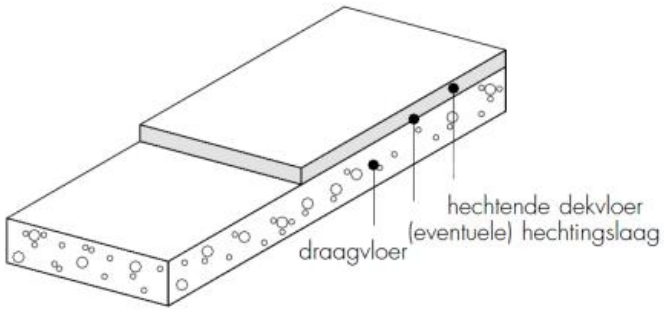
Figuur 2-3: Cementgebonden gietdekvloer (Totaalafbouw, 2025)

2.1.3 Toepassingen dekvloeren

2.1.3.1 Hechtende dekvloer

Een hechtende dekvloer is een dekvloer die direct verbonden is met de draagvloer. Dit type dekvloer wordt toegepast wanneer een sterke hechting tussen de dekvloer en de ondergrond nodig is. Omdat de dekvloer geen aparte scheidingslaag heeft, kan deze krachten direct overbrengen op de onderliggende constructievloer, wat zorgt voor eens stabiele en duurzame afwerking. De dikte van een hechtende dekvloer varieert doorgaans tussen 2 en 5 cm, afhankelijk van de belastingseisen. Dit is dunner dan bij zwevende of niet-hechtende dekvloeren, omdat de hechting aan de ondergrond zorgt voor extra stabiliteit. (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019)

Een hechtende dekvloer kan spanningen uit de ondergrond overnemen, wat in sommige gevallen tot scheuren kan leiden. Hierdoor moeten eventuele krimpvoegen overeenkomen met de onderliggende constructie zodat er geen onthechting optreedt door differentiële uitzettingen of krimpingen. Dit type vloer is minder geschikt voor geluidsisolatie, omdat trillingen en contactgeluid direct worden overgedragen op de draagvloer. (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019)

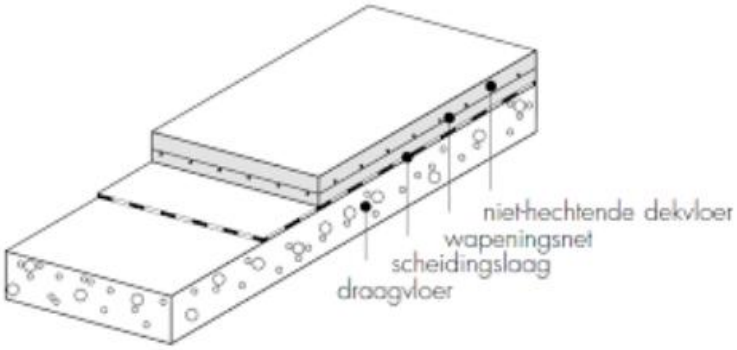


Figuur 2-4: Hechtende dekvloer (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019)

2.1.3.2 Niet-hechtende dekvloer

Een niet-hechtende dekvloer biedt verschillende voordelen ten opzichte van een hechtende dekvloer. Een belangrijk voordeel is dat dit type dekvloer spanningen en scheurvorming vermindert, doordat de vloer vrij kan bewegen ten opzichte van de ondergrond. Dit maakt de vloer geschikt voor situaties waarin de draagvloer krimp of uitzetting kan vertonen. Daarnaast biedt een niet-hechtende dekvloer een effectieve vochtbarrière. Door de aanwezigheid van een scheidingslaag, zoals een plasticfolie of bitumenpapier, wordt voorkomen dat vocht uit de dekvloer in de draagvloer trekt. Dit maakt deze vloer bijzonder geschikt voor vochtige omgevingen, zoals badkamers, kelders en andere ruimtes waar waterdichtheid een belangrijke factor is. Een ander voordeel is dat een niet-hechtende dekvloer geschikt is voor diverse ondergronden. Zelfs wanneer de draagvloer oneffen of beschadigd is, kan een niet-hechtende dekvloer worden toegepast zonder dat er hechtingsproblemen ontstaan. Dit maakt deze vloeroplossing ideaal voor renovatieprojecten en situaties waarin de onderliggende constructie niet geschikt is voor een hechtende vloer. (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019)

Ondanks deze voordelen zijn er ook enkele nadelen. Omdat de vloer niet rechtstreeks op de ondergrond is bevestigd, moet deze dikker worden uitgevoerd dan een hechtende dekvloer om voldoende stabiliteit te garanderen. Dit betekent dat er meer materiaal nodig is en dat de vloer een langere droogtijd heeft. Verder is de stabiliteit van een niet-hechtende vloer over het algemeen lager dan die van een hechtende vloer. Dit kan ertoe leiden dat er sneller doorgangsscheuren ontstaan, vooral wanneer de vloer zwaar belast wordt. Tot slot is een niet-hechtende dekvloer minder geschikt voor ruimtes met zware belasting, zoals industriële toepassingen of werkplaatsen. Doordat de krachten niet direct worden overgebracht op de draagvloer, is er een groter risico op vervorming en beschadiging bij intensief gebruik. (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019)

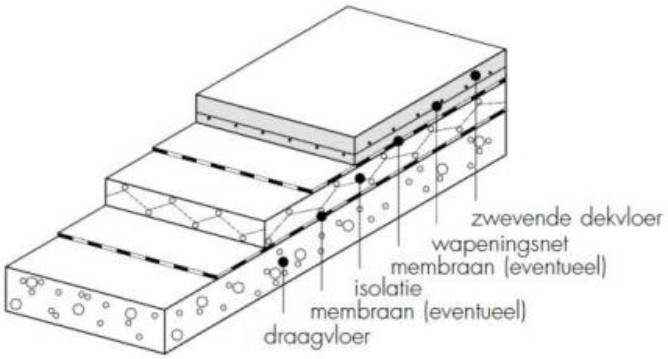


Figuur 2-5: Niet-hechtende dekvloer (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019)

2.1.3.3 Zwevende dekvloer

Een zwevende dekvloer is een dekvloer die volledig losligt van zowel de draagvloer als de wanden. Dit wordt bereikt door de vloer aan te brengen op een isolatielaag, zonder dat er directe hechting plaatsvindt. Hierdoor biedt een zwevende dekvloer zowel geluidsisolatie als thermische isolatie, wat bijdraagt aan een comfortabel en energiezuinig binnenklimaat. (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019)

Een zwevende dekvloer bestaat uit meerdere lagen die samenwerken om de gewenste eigenschappen te bereiken. De onderste laag is de draagvloer, waarop een isolatielaag wordt aangebracht. Deze isolatielaag kan bestaan uit materialen zoals EPS, XPS of minerale wol en helpt bij het verminderen van geluidsoverlast en warmteverlies. Langs de randen van de ruimte worden randstroken geplaatst om contactgeluid te minimaliseren. De bovenste laag is de dekvloer zelf, die meestal is samengesteld uit cement- of calciumsulfaatgebonden mortel. Daarnaast zijn ze bijzonder geschikt voor vloerverwarming, omdat de isolatielaag voorkomt dat de warmte verloren gaat in de draagvloer. (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019)



Figuur 2-6: Zwevende dekvloer (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019)

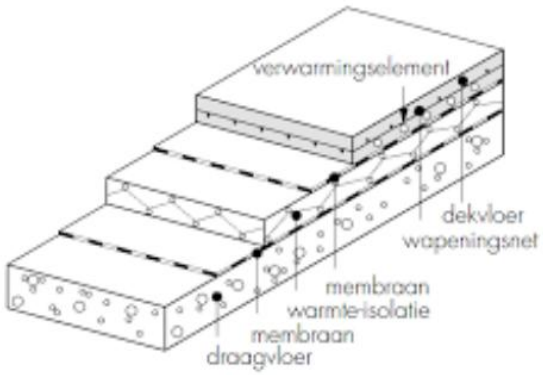
Een zwevende dekvloer heeft verschillende voordelen. Doordat de vloer volledig losligt van de draagvloer, biedt hij uitstekende geluidisolatie. Dit voorkomt geluidsoverlast, wat vooral bij appartementen en meersgezinswoningen van groot belang is. Daarnaast draagt de isolatielaag bij aan thermische isolatie, waardoor de warmte beter behouden blijft en het energieverbruik afneemt. Dit maakt een zwevende dekvloer ook zeer geschikt voor vloerverwarming, omdat de warmte efficiënter wordt verdeeld in de ruimte. (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019)

Eén van de nadelen is het feit dat de vloer geen directe hechting heeft. Hierdoor moet hij dikker worden uitgevoerd om voldoende stabiliteit te garanderen, dit betekent dat er meer materiaal nodig is en dat de vloerhoogte toeneemt, wat in sommige situaties een beperking kan vormen. Daarnaast is een zwevende dekvloer minder stabiel dan een hechtende dekvloer, waardoor er sneller scheuren kunnen ontstaan. De

installatie vereist bovendien een zorgvuldige plaatsing van de isolatie en randstroken, omdat fouten kunnen leiden tot geluidsbruggen en een verminderde isolerende werking. (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019)

2.1.3.4 Vloerverwarmingsdekvloer

Een vloerverwarmingsdekvloer is een dekvloer die speciaal ontworpen is om vloerverwarmingselementen te integreren en een optimale warmteoverdracht te garanderen. Deze dekvloer zorgt ervoor dat de warmte gelijkmatig wordt verspreid en dat het rendement van de vloerverwarming zo hoog mogelijk blijft. Een vloerverwarmingsdekvloer bestaat uit verschillende lagen. De onderste laag is de draagvloer, waarop meestal een isolatielaag wordt geplaatst. Deze isolatielaag, vaak gemaakt van EPS of XPS, voorkomt warmteverlies naar beneden en zorgt ervoor dat de warmte omhoog de ruimte in wordt geleid. Bovenop de isolatielaag worden de vloerverwarmingsbuizen of -matten aangebracht. Deze worden vervolgens ingegoten in een cementgebonden of calciumsulfaatgebonden gietdekvloer. De minimale dikte van de dekvloer bedraagt meestal 5 tot 7 cm, waarbij er minstens 3 cm afdekking boven de verwarmingsbuizen nodig is om de warmte goed te verspreiden. (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019)



Figuur 2-7: Dekvloer met vloerverwarming (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019)

Een vloerverwarmingsdekvloer biedt verschillende voordelen. Doordat de verwarmingselementen in de dekvloer zijn verwerkt, wordt de warmte gelijkmatig verdeeld, wat zorgt voor een comfortabele en efficiënte verwarming. Dit type dekvloer draagt bij aan een lager energieverbruik, omdat de warmte vanaf de vloer opstijgt en zo op een natuurlijke manier de ruimte verwarmt. Daarnaast zorgt de massa van de dekvloer voor warmteopslag, waardoor de vloer de warmte langer vasthoudt en minder vaak hoeft te verwarmen. Dit is vooral gunstig bij gebouwen met een constante bezetting, zoals woningen en kantoren. (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019)

Hiertegenover staat dat een vloerverwarmingsdekvloer een langere opwarmtijd heeft dan radiatoren, omdat de warmte eerst door de massa van de vloer moet trekken voordat deze de ruimte verwarmt. Daarnaast is het belangrijk dat de dekvloer voldoende flexibel is, zodat deze kan omgaan met de temperatuurswisselingen

die optreden bij verwarmen en afkoelen. Daarom wordt gebruik gemaakt van krimpnetten of vezelwapening om scheurvorming te voorkomen. Verder moet er rekening mee gehouden worden dat de vloer dikker wordt uitgevoerd dan bij standaard dekvloeren, wat in sommige situaties een verhoogde vloerhoogte betekent. Dit kan vooral bij renovaties een aandachtspunt zijn. (Van der Elstraeten & Van Hecke, 2019)

2.2 Duurzaamheidsanalyse

2.2.1 Algemeen

Dekvloeren zijn een essentieel onderdeel van de bouw en worden wereldwijd op grote schaal toegepast in zowel residentiële als commerciële gebouwen. Jaarlijks worden enorme hoeveelheden materialen gebruikt voor de productie en installatie van dekvloeren, wat aanzienlijke milieueffecten met zich meebrengt. De impact van de productie en plaatsing van dekvloeren omvat verschillende negatieve gevolgen, zoals het verbruik van natuurlijke hulpbronnen, energie-intensieve productieprocessen, de uitstoot van CO_2, afvalproductie en waterverbruik. (Van den Heede & De Belie, 2012)

Net als bij beton speelt het gebruik van natuurlijke grondstoffen een cruciale rol in de ecologische voetafdruk van dekvloeren. Traditionele materialen zoals zand, cement en bindmiddelen worden gewonnen uit natuurlijke afzettingen, wat leidt tot de uitputting en aantasting van land. Bovendien genereert de productie van cement en andere bindmiddelen aanzienlijke hoeveelheden CO_2, wat bijdraagt aan de klimaatverandering. Een ander aspect is de productie van bouw- en sloopafval (CDW). Bij de vervanging of renovatie van vloeren komt veel afval vrij, waaronder cementresten, zand en chemische additieven. Dit afval wordt vaak gestort of verbrand, wat extra milieubelasting veroorzaakt. Daarnaast verbruikt de productie en installatie van dekvloeren grote hoeveelheden water, vooral bij traditionele cementgebonden systemen. Dit waterverbruik kan een probleem vormen in regio's waar waterschaarste heerst. (Van den Heede & De Belie, 2012)

Om de ecologische impact van dekvloeren te verminderen, worden steeds vaker duurzame alternatieven onderzocht, zoals gerecycleerde granulaten, alternatieve bindmiddelen en droogbouwsystemen die minder water verbruiken. Efficiënter materiaalgebruik en innovatieve verwerkingstechnieken kunnen bijdragen aan een duurzamere toekomst in de bouwsector. (Van den Heede & De Belie, 2012)

2.2.2 Gebruik van grondstoffen

Er wordt wereldwijd jaarlijks tussen de 47 en 59 miljard ton aan materialen gewonnen. Aangezien beton het meest gebruikte bouwmateriaal ter wereld is, vormen zand en grind – die ongeveer 80% van de massa van beton uitmaken – het grootste deel van de wereldwijd gewonnen vaste materialen. De Europese

Granulatenvereniging rapporteerde dat de jaarlijkse vraag naar granulaten ongeveer 2,70 miljard ton bedraagt. Hiervan wordt 25% gebruikt in de stortklare betonindustrie en 20% voor prefabbeton en architectonische betonelementen. (Krausmann et al., 2009) Binnen de overige 55% bevinden zich sectoren zoals de wegenbouw, maar ook het gebruik van mortel en dekvloermengsels is een grote verbruiker van grondstoffen.

Ondanks het besef dat natuurlijke grondstoffen zoals zand en grind beperkt zijn, blijft de consumptie ervan stijgen, omdat men er vaak van uitgaat dat er wereldwijd een onbeperkte voorraad is. Er wordt vastgesteld dat de uitputting van natuurlijke hulpbronnen afhangt van de schaal waarop deze wordt bekeken. Op wereldniveau lijkt de uitputting van hulpbronnen verwaarloosbaar, maar op lokaal niveau is er in bepaalde regio's een merkbaar tekort aan natuurlijke granulaten. In 2014 waarschuwde het Milieuprogramma van de Verenigde Naties voor de risico's van een aanhoudende stijging in de vraag naar granulaten en de mogelijke uitputting ervan. (Habert et al., 2012) Door globalisering is het tegenwoordig gebruikelijk om natuurlijke granulaten over landsgrenzen heen aan te kopen. In sommige gevallen is het economisch voordeliger om materialen uit buurlanden te importeren in plaats van deze nationaal te winnen. Hoewel dit het probleem van grondstoffentekorten kan verlichten, verhoogt deze praktijk de ecologische voetafdruk van granulaattoepassingen, aangezien de uitstoot door transport aan de totale milieu-impact wordt toegevoegd.

Naast de uitputting van hulpbronnen heeft de grootschalige winning van granulaten ook andere milieueffecten. Zo beïnvloeden zand- en grindwinning de biodiversiteit van flora en fauna door verstoring van terrestrische, rivier- en kustecosystemen, en brengen ze veranderingen in het landschap teweeg. Mijnbouwactiviteiten veroorzaken ook visuele vervuiling door landschapsveranderingen. In veel landen zijn er echter beleidsmaatregelen die bepalen waar extractie mag plaatsvinden en die verplichtingen opleggen om het natuurlijke landschap na afloop te herstellen. Daarnaast leiden mijnbouwactiviteiten tot stof- en geluidsoverlast, wat schadelijk kan zijn voor de menselijke gezondheid. Ook kan er grondwatervervuiling optreden door de aanwezigheid van koolwaterstoffen en zwevende of opgeloste stoffen die vrijkomen bij reinigingsprocessen (Krausmann et al., 2009).

De milieu-impact van granulaten hangt ook af van de wijze waarop ze worden gewonnen. Gerolde granulaten, die door erosie en verwering ontstaan, vereisen minimale verwerking nadat ze uit rivier- of zeebeddingen zijn gehaald. Gebroken granulaten worden daarentegen gewonnen uit steengroeven en moeten intensiever mechanisch worden verwerkt. Zand wordt meestal verkregen via dagbouw of door het op te baggeren uit onderwaterafzettingen, terwijl grindwinning meer energie vergt vanwege de mogelijke noodzaak van explosieven, boren en breken. Hoewel de mechanische processen bij de productie van

natuurlijke granulaten bijdragen aan de totale CO_2-uitstoot, is hun aandeel relatief beperkt. Volgens Flower en Sanjayan (2007) is ongeveer 15% van de CO_2-uitstoot afkomstig van de mijnbouw- en verwerkingsactiviteiten van granulaten. De uitstoot per kilogram granulaat varieert van 0,004 tot 0,008 kg CO_2, afhankelijk van het type granulaat: alluviale of gebroken natuurlijke granulaten. De exacte milieu-impact hangt echter sterk af van lokale factoren zoals de locatie van de steengroeve en de gebruikte verwerkingstechnieken. Daarom wordt er benadrukt dat voor een nauwkeurige levenscyclusanalyse (LCA) specifieke industriële data nodig zijn om realistische resultaten te verkrijgen. Er kan geconcludeerd worden dat de milieu-impact ten gevolge van ontginning sterk afhangt van de regio en de wijze waarop ontgonnen wordt. In het geval van natuurlijk zand, hetgeen wordt toegepast in mortel-of dekvloermengsels, wordt dit veelal gebaggerd uit rivier- of zeebeddingen. Deze factor is klein, maar dient in gedachten te worden gehouden bij de globale CO_2-uitstoot. (Krausmann et al., 2009)

2.2.3 Watergebruik

De productie van cementmengsels, zoals beton en dekvloeren, en de bijbehorende grondstoffen, zoals cement, zand en grind, vergt grote hoeveelheden water. Zo is er voor de productie van cement ongeveer 4 liter water per ton nodig. (Zabalza Bribián et al., 2011) Daarnaast gebruikt de cementindustrie water voor het koelen van machines, het beheersen van emissies en het mengen van cement in natte productiemethoden. Ook de productie van granulaten brengt een hoog waterverbruik met zich mee, vooral wanneer natte zeef- en wasprocessen worden toegepast. Volgens schattingen is er ongeveer 1000 liter water nodig om één ton natuurlijke granulaten te produceren. (Kellenberger & Althaus, 2009)

Hoewel het waterverbruik bij productie van cementmengsels meestal niet expliciet wordt meegenomen in levenscyclusanalyses (LCA), kan het wel worden beoordeeld met behulp van de watervoetafdruk (WF). Deze geeft aan hoeveel water direct en indirect wordt verbruikt en vervuild tijdens de volledige productiecyclus van een materiaal (Hoekstra et al., 2011). De WF wordt uitgedrukt in watervolume per eenheid productie, maar er bestaat geen directe relatie tussen deze voetafdruk en de daadwerkelijke milieuschade die het veroorzaakt. (Ridoutt & Pfister, 2010)

2.2.4 Gebruik van bouw- en sloopafval

De opname van bouw- en sloopafval (CDW) in de dekvloeren kan een positieve bijdrage leveren aan duurzaamheid in de bouwsector. Uit de literatuur blijkt dat gerecycleerde granulaten uit CDW al worden toegepast in beton en andere bouwmaterialen, waarbij ze bijdragen aan de vermindering van het gebruik van natuurlijke hulpbronnen en de uitstoot van CO_2. (Rodríguez-Robles et al., 2019)

Het gebruik van gerecycleerde granulaten in dekvloeren biedt enkele duidelijke voordelen, zoals:

- Vermindering van afvalstromen: Door CDW te hergebruiken, wordt de hoeveelheid afval die op stortplaatsen belandt aanzienlijk verminderd.
- Besparing van natuurlijke grondstoffen: Zand en grind, veelgebruikte componenten in dekvloeren, zijn niet-hernieuwbare hulpbronnen. Het vervangen van een deel van deze materialen door gerecycleerde alternatieven vermindert de druk op natuurlijke reserves.
- Lagere CO_2- uitstoot: De cementindustrie is een belangrijke bron van CO_2-uitstoot. Door gerecycleerde materialen te gebruiken, wordt de vraag naar nieuw cement verlaagt, wat indirect de uitstoot vermindert.

Uit onderzoek blijkt dat gerecycleerde granulaten uit CDW vaak een hogere porositeit en waterabsorptie hebben dan natuurlijke granulaten. Dit kan de prestaties van dekvloeren beïnvloeden, bijvoorbeeld door een verhoogde waterbehoefte tijdens het mengen of een lagere eindsterkte. Daarom is het belangrijk om deze eigenschappen te optimaliseren door bijvoorbeeld extra verwerkingsstappen of het gebruik van additieven. (Rodríguez-Robles et al., 2019)

2.2.5 CO_2-uitstoot

Cement is een essentieel bestanddeel in de bouwsector en vormt de basis voor beton en dekvloeren. De productie van cement is echter een energie-intensief proces dat gepaard gaat met aanzienlijke CO_2-uitstoot. Dit vormt een belangrijke uitdaging binnen de bouwsector, waar duurzaamheid en milieubeheer steeds meer aandacht krijgen. (CBR et al., 2007) De CO_2-uitstoot bij cementproductie is grotendeels toe te schrijven aan twee factoren. Ten eerste vereist het productieproces extreem hoge temperaturen (~1.450 °C), wat doorgaans wordt bereikt door het verbranden van fossiele brandstoffen. Ten tweede vindt tijdens de chemische omzetting van kalksteen ($CaCO_3$) naar calciumoxide (CaO) een proces plaats dat bekendstaat als decarbonatatie, waarbij CO_2 vrijkomt. Meer dan 60% van de totale CO_2-uitstoot van cementproductie is te wijten aan deze chemische reactie, weergegeven in vergelijking 2-1.

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \qquad 2\text{-}1$$

Bij de toepassing van cement in dekvloeren draagt deze uitstoot bij aan de totale milieu-impact van gebouwen. Dekvloeren bestaan vaak uit cementgebonden mengsels, die door hun samenstelling en productiemethode bijdragen aan de CO_2-emissies van de bouwsector. Traditionele cementgebonden dekvloeren bevatten een relatief hoog aandeel cement, wat resulteert in een aanzienlijke ecologische voetafdruk. (CBR et al., 2007) Om de CO_2-uitstoot van cementgebonden dekvloeren te reduceren, zijn verschillende strategieën ontwikkeld. Een van de belangrijkste methoden is het gebruik van alternatieve bindmiddelen, zoals geopolymeer cementen en kalk-gebaseerde mengsels. Deze materialen kunnen de

noodzaak voor traditioneel Portlandcement verminderen, wat resulteert in een lagere CO_2-uitstoot. Daarnaast kan het gebruik van secundaire cementachtige materialen, zoals vliegas en hoogovenslak, de hoeveelheid klinker in cement verlagen, wat eveneens bijdraagt aan emissiereductie.

Een andere benadering om de impact van cementgebonden dekvloeren te verminderen, is de optimalisatie van de mengverhouding. Door het gebruik van cementarme mengsels of gerecycleerd betonpoeder, kan de hoeveelheid nieuw geproduceerd cement worden verminderd. Dit draagt niet alleen bij aan emissiereductie, maar bevordert ook de circulaire economie binnen de bouwsector. Daarnaast wordt onderzocht hoe herbruikbare of modulaire dekvloersystemen kunnen bijdragen aan een duurzamere bouwpraktijk. Door de levensduur van dekvloeren te verlengen en hergebruik mogelijk te maken, kan de noodzaak voor nieuwe cementproductie verder worden beperkt. Innovaties zoals CO_2-bindende cementsoorten en carbon capture-technologieën bieden aanvullende mogelijkheden om de impact van cementproductie te verkleinen. (CBR et al., 2007) Een afname van de vraag naar cement door gerecycleerde materialen te gebruiken, betekent indirect een vermindering van de uitstoot. Bovendien werd ook bij de ontginning van natuurlijke granulaten aangehaald welke CO_2-uitstoot hierbij gepaard kan gaan.

Samenvattend is de CO_2-uitstoot van cementgebonden dekvloeren een significante factor in de totale milieu-impact van gebouwen. Door het gebruik van alternatieve bindmiddelen, optimalisatie van de samenstelling en hergebruik van materialen kunnen aanzienlijke emissiereducties worden gerealiseerd. Toekomstige ontwikkelingen in materiaaltechnologie en procesoptimalisatie zullen een cruciale rol spelen in het verder verduurzamen van de bouwsector. (CBR et al., 2007)

2.3 Gerecycleerde puingranulaten

Gerecycleerde puingranulaten kunnen afkomstig zijn van sloop-, bouw- en graafafval en hebben een groot potentieel inzake het vervangen van natuurlijke granulaten. Gerecycleerde granulaten bieden op die manier een (gedeeltelijke) oplossing voor de grote CO2-uitstoot waarvoor de bouwwereld verantwoordelijk is. De milieu-impact van bouwmaterialen, met name cement en natuurlijke granulaten, is niet te onderschatten en dragen hier aanzienlijk toe bij. (Dhir et al., 2019a)

Bijkomstig kan het puin bestaan uit zowel beton-, baksteen- of mortelresten. Hier zal rekening mee moeten gehouden worden en de eigenschappen van de gerecycleerde puingranulaten zullen grondig moeten onderzocht worden.

2.3.1 Afkomst van de puingranulaten

Er kan onderscheid gemaakt worden tussen puingranulaten, afkomstig van prefab betonelementen ten gevolge van productiefouten, overschotten of beschadigingen tijdens productie, en betonpuin afkomstig van afbraakwerken op een werf. De eerste categorie wordt één à twee keer per jaar vernield tot puingranulaat. Een langere wachtperiode voor het vernielen houdt in dat het beton al verder is kunnen uitharden, en dat bijgevolg meer cement al gehydrateerd zal zijn. Door de gecontroleerde manier waarop deze structuren worden gefabriceerd en gesloopt is het puin zeer zuiver. Dit staat tegenover de tweede categorie, waarbij het puingranulaat afkomstig is van sloopwerken op de werf. In deze omstandigheden is er onzekerheid over de samenstelling en zuiverheid van het granulaat aangezien er zich hier onder andere ook hout-, pleister-, mortel- of baksteenresten kunnen bevinden tussen het betongranulaat. (Boehme et al., 2013) Het is dus van belang de afkomst van het puingranulaat en de omstandigheden van de sloop- en afbraakwerken te kennen.

2.3.2 Recycleproces

2.3.2.1 Algemeen

Het proces van recycling begint bij de sloop van bestaande structuren. In deze fase kunnen al maatregelen worden genomen om de variabiliteit van de gerecycleerde granulaten afkomstig uit bouw- en sloopafval te verminderen, vooral met betrekking tot verontreinigingen.

Er zijn twee sloopbenaderingen: conventionele en selectieve sloop. Selectieve sloop richt zich op het recyclen, herverwerken, hergebruiken en aanpassen van bouwmaterialen, wat leidt tot minder afval en een lagere milieu-impact. Ondanks dat selectieve sloop in sommige landen al gebruikelijk is, is het nog niet volledig geïntegreerd in de industrie en blijft de economische aantrekkingskracht discutabel. De haalbaarheid van selectieve sloop hangt af van lokale factoren zoals arbeidskosten en marktprijzen. Wanneer het goed uitgevoerd is, kan het kostenbesparend zijn en bijdragen aan een "groenere" bouwsector. Milieuvoordelen omvatten een aanzienlijke reductie van afval naar stortplaatsen en verminderde milieueffecten, vooral bij hoge recyclingpercentages. Bij conventionele sloop wordt alles gemengd en zo afgevoerd. Bij aankomst in de recyclingsinstallatie wordt het CDW visueel beoordeeld, gewogen en gesorteerd op basis van kwaliteit. Grof materiaal wordt vervolgens verkleind met kaak- of gyratorybrekers. Hierna worden verontreinigingen zoals, hout, plastic en metalen verwijderd, deels handmatig en deels met elektromagneten of luchtscheiding. (Dhir et al., 2019a)

Na de eerste breekfase volgt een secundaire breking, waarbij impact- of kegelbrekers de granulaten verder verkleinen en een betere korrelvorm geven. Afhankelijk van de toepassing kan een extra tertiaire breekfase worden toegepast om nog fijnere en zuiverdere granulaten te verkrijgen. (Dhir et al., 2019a)

In de laatste stap worden lichte en chemische verontreinigingen verwijderd via luchtscheiding of natte reiniging. Luchtscheiding is energiezuiniger, terwijl natte reiniging beter oplosbare verontreinigingen zoals chloriden en sulfaten verwijdert. Na een kwaliteitscontrole worden de gerecycleerde granulaten gescheiden en verkocht op basis van hun toepassing. (Dhir et al., 2019b)

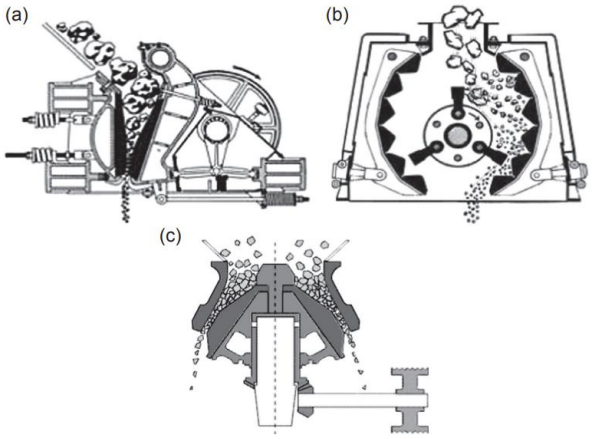
2.3.2.2 Brekerinstallatie

Afhankelijk van de grootte van het puin kan het direct verwerkt worden of eerst worden verkleind tot een werkbare korrelgrootte. Voor stukken puin worden hydraulische brekers op rupskranen of graafmachines gebruikt. Daarnaast is het vaak nodig om handmatig materialen zoals staal, hout, plastic en papier te verwijderen om de kwaliteit van het eindproduct te verbeteren.
Er zijn drie veelgebruikte brekers in het recyclingproces van bouw- en sloopafval:

a. Kaakbreker (Jaw crusher)
   Een kaakbreker bestaat uit twee platen, waarvan één heen en weer beweegt tegen de andere onder een vaste hoek. Dit type breker wordt het meeste gebruikt in de primaire breekfase en kan grote en harde betonstukken, inclusief gewapend beton breken. De grootte van het eindproduct hangt af van de opening tussen de platen.

b. Slagbreker (Impact crusher)
   Een slagbreker verkleint het puin door middel van een roterende rotor met stalen tanden of messen, die het materiaal tegen een breekplaat werpen. Dit type breker zorgt voor een betere korrelverdeling, vooral voor toepassingen in de wegenbouw, en is minder gevoelig voor metalen wapening. Slagbrekers genereren echter meer fijne fracties dan kaakbrekers.

c. Gyratory- en kegelbrekers (Gyratory and cone crushers)
   Deze werken volgens hetzelfde principe als slagbrekers en bewegen door middel van een excentrische schijf. Ze zijn minder geschikt als primaire brekers omdat ze geen grote stukken puin kunnen verwerken en sneller vastlopen door zware of grote fragmenten. Wel hebben ze voordelen zoals lager energieverbruik, controle over de korrelgrootte en minder fijn fracties.



Figuur 2-8: Brekers: (a) kaakbreker, (b) slagbreker, (c) gyratory- en kegelbrekers (Dhir et al., 2019b)

Om een constante korrelverdeling te garanderen, wordt CDW meestal verwerkt in minstens twee breekfasen. De grootte van het puin moet vooraf worden verkleind tot een formaat dat door de primaire breker kan worden verwerkt. Bij grote stationaire installaties kan de invoeropening groter zijn dan bij mobiele installaties. Daardoor vereist het recyclen van CDW goede coördinatie tussen sloop- en recyclingbedrijven. (Dhir et al., 2019b)

Hoewel meerdere breekfasen de kwaliteit van gerecycleerde granulaten verbeteren door rondere deeltjes en minder cementresten, leidt dit ook tot hogere kosten en meer fijne fracties. Dit kan nadelig zijn wanneer een hoger percentage grove granulaten gewenst is. De keuze voor het aantal breekfasen hangt af van de gewenste kwaliteit van het eindproduct en de verhouding russen grove en fijne fracties. (Dhir et al., 2019b)

2.3.2.3 Sorteren en verwijderen van verontreinigingen

Eén van de grootste uitdagingen bij het gebruik van gerecycleerde granulaten in de bouwsector is de aanwezigheid van verontreinigingen. Bouw- en sloopafval kan verschillende ongewenste materialen bevatten, zoals hout, aarde, asfalt, glas, metalen en plastic. Deze verontreinigingen kunnen de verwerking bemoeilijken en de kwaliteit van het eindproduct negatief beïnvloeden. Hierdoor worden gerecycleerde granulaten vaak als minderwaardig beschouwd ten opzichte van natuurlijke granulaten. (Dhir et al., 2019b)

Om de hoeveelheid verontreinigingen te minimaliseren, kunnen er twee methoden worden toegepast. De eerste methode is het scheiden van de materialen voorafgaand aan het breken. Dit kan gebeuren door middel van selectieve sloop, waarbij materialen al op de slooplocatie worden gescheiden. Hierdoor wordt de hoeveelheid gemengd afval die naar de recyclinginstallatie wordt gestuurd, aanzienlijk verminderd. Daarnaast kan er een extra controle plaatsvinden op de recyclingsinstallatie zelf, waarbij het afval visueel wordt geïnspecteerd en gesorteerd op basis van het materiaaltype en mate van verontreiniging. Dit proces

zorgt ervoor dat schone materialen efficiënter kunnen worden verwerkt en dat het energieverbruik tijdens het breken wordt beperkt. (Dhir et al., 2019b)

De tweede methode is het scheiden van verontreinigingen na het breken. Na de eerste breekfase worden de resterende verontreinigingen uit het gebroken materiaal verwijderd. Dit kan op verschillende manieren gebeuren. Handmatige sortering wordt bijvoorbeeld toegepast om moeilijk detecteerbare materialen, zoals glas en kunststof, te verwijderen. Daarnaast maken moderne computergestuurde sorteertechnieken, zoals near-infrared detectie, het mogelijk om specifieke verontreinigingen, zoals gips en organisch materiaal, te identificeren en te scheiden met behulp van luchtstromen. (Dhir et al., 2019b)

Verschillende technieken worden gebruikt om verontreinigingen te verwijderen en de kwaliteit van gerecycleerde granulaten te verbeteren. Een veelgebruikte methode is magnetische scheiding, waarbij elektromagneten worden gebruikt om metalen, zoals wapeningsstaal, uit het puin te verwijderen. Deze magneten kunnen op twee manieren werken. In sommige installaties worden vaste elektromagneten gebruikt, waarbij de metalen op de magneet blijven kleven totdat ze handmatig worden verwijderd. In andere gevallen worden roterende magnetische banden toegepast, die de metalen zijwaarts uit het materiaalstroom verwijderen en ophoping voorkomen. Naast ferrometalen bevat bouw- en sloopafval ook niet-ferrometalen, zoals aluminium, koper en zink. Deze metalen worden meestal verwijderd door middel van wervelstroomscheiding. Dit proces maakt gebruik van een magnetisch veld dat de metalen uit het puin stoot, terwijl de overige materialen door de zwaartekracht naar beneden vallen. (Dhir et al., 2019b)

Een andere veelgebruikte techniek is zeeftechnologie, waarbij het materiaal door een reeks zeven wordt geleid om gips, aarde en fijn stof te scheiden. Dit proces helpt bij het bepalen of de fijne fracties kunnen worden hergebruikt of als afval moeten worden beschouwd. In sommige gevallen wordt natte scheiding (wet separation) toegepast om lichtere verontreinigingen, zoals hout, papier, kunststof en stro, te verwijderen. Dit gebeurt door waterstralen te combineren met een float-sink techniek, waarbij lichte materialen blijven drijven en zware materialen naar de bodem zakken. Deze methode is vooral effectief voor het verwijderen van oplosbare verontreinigingen, zoals chloriden en sulfaten. (Dhir et al., 2019b)

Een alternatief voor natte scheiding is luchtscheiding (air sifting). Bij deze methode worden luchtstromen gebruikt om lichte materialen, zoals papier, isolatiemateriaal en hout, te scheiden van zwaardere granulaten. Dit proces is milieuvriendelijker dan natte scheiding, omdat er geen water nodig is. Een nadeel van luchtscheiding is echter dat het grote hoeveelheden stofdeeltjes genereert, wat gecontroleerd moet worden door middel van gesloten systemen en luchtfilters. (Dhir et al., 2019b)

2.3.3 Eigenschappen van RCA granulaten

Het is algemeen geweten dat niet al het cement in het beton zal hydrateren tijdens het uitharden. In RCA zullen niet-gehydrateerde cementdeeltjes in aanklevende mortel vrijkomen bij het slopen. Deze deeltjes kunnen echter nog steeds hydrateren. Hierdoor kan gestockeerd betonpuin terug samenklitten tijdens de stockageperiode. Daartegenover staat dat bij het slopen van volledig uitgehard beton de scheur vaak doorheen de originele granulaten gaat. Dit gebeurt niet bij het slopen van niet-volledig uitgehard beton. Hier loopt de scheur tussen de granulaten door. Er kan worden onderzocht of het voordelig is om prefabproducten eerder snel te slopen om zo de overblijvende hydratatie van cementdeeltjes en het scheuren tussen de granulaten in te kunnen gebruiken. (Boehme et al., 2013) Hier wordt verder niet op ingegaan aangezien deze masterproef zich eerder toelegt op puingranulaat afkomstig van constructies. Het is dus weliswaar van belang om goed de afkomst van het puingranulaat en de omstandigheden van de sloop- en afbraakwerken te kennen. (Sosa et al., 2018)

Het gebruik van gerecycleerde betongranulaten (*recycled concrete aggregates*), afgekort RCA, in hedendaagse betonproducties omvat twee soorten milieuvoordelen. Het reduceert de ontginning van natuurlijke granulaten en vermindert de milieu-impact die wordt veroorzaakt door het afvoeren van constructie- en afbraakafval. Echter, het grote verschil tussen natuurlijke granulaten (*natural aggregates)*, afgekort NA, en gerecycleerde betongranulaten is de aanklevende mortelresten bij de gerecycleerde betongranulaten. De gehechte mortel zorgt voor een grotere porositeit en waterabsorptie van het granulaat. Hierdoor kan de mortel verantwoordelijk zijn voor een potentiële afname in sterkte en duurzaamheid van het beton. Er dient aandacht te worden besteed aan het mogelijks afwijkend gedrag van betonstructuren vervaardigd op basis van gerecycleerde granulaten, wanneer RCA een deel van het mengwater opneemt en de verwerkbaarheid beïnvloedt. De waterabsorptie van het granulaat moet in rekening worden gebracht, zodat de extra benodigde hoeveelheid water kan worden toegevoegd bij het mengen. Grove gerecycleerde betongranulaten (*coarse recycled concrete aggregate*, CRCA) worden reeds veelvuldig toegepast in structureel beton. De toepassing van CRCA is reeds gestandaardiseerd en geïmplementeerd in verschillende landen. (Sosa et al., 2018)

Verder dient bij het onderzoek onderscheid te worden gemaakt tussen het type en de afkomst van het puingranulaat en zullen fracties en hun eigenschappen afzonderlijk onderzocht moeten worden.

2.3.4 Invloed van fijne fractie op beton/dekvloeren/mortel

In een volgende fase van de literatuurstudie wordt specifiek ingegaan op de invloed van de fijne fractie van het aggregaat op het mengsel. Hiervoor zal voornamelijk een mortelmengsel onderzocht worden, aangezien het nauwer aansluit bij het mengsel toegepast voor het vervaardigen van een dekvloer.

2.3.4.1 Typen fijn granulaat

Er bestaan verschillende typen zand, zoals gebroken zand, rivierzand, duinzand en combinaties hiervan. De invloed van het type zand en kalksteenfijnstof op de mechanische eigenschappen van de mortel wordt onderzocht, meer specifiek voor zelfverdichtende mortel (self-compacting mortar), afgekort SCM. Zelfverdichtende mortel vereist een hogere hoeveelheid cement en fijne vulstoffen om de vloeibaarheid en stabiliteit te garanderen. Fijne kalksteen en zand met hoog fijnstofgehalte kunnen dienen als economische oplossing voor het gebruik van externe vulstoffen. Gebroken zand (crushed sand), afgekort CS, heeft een hoge dichtheid en fijne korrelstructuur. Rivierzand heeft een grovere samenstelling en hogere eenheidsmassa. Duinzand is zeer fijn, maar heeft bijgevolg een hogere water- en cementbehoefte om dezelfde vloeibaarheid te bereiken. (Benabed et al., 2012)

Fijne gerecycleerde betongranulaten (fine recycled concrete aggregate), afgekort FRCA, bezitten aanzienlijke beperkingen ten gevolge van hun afwijkende porositeit. De fijne fractie verwijst naar de deeltjes van puingranulaten en gerecycleerde betongranulaten die kleiner zijn dan 4 mm. De fijne fractie, dat het grootste deel van de verharde pasta bevat, wordt meestal gedowncycled en gebruikt in laagwaardige toepassingen. Het is noodzakelijk te zoeken naar opwaarderingstechnologieën om de fijne fracties van puingranulaten om te zetten in secundaire hoogwaardige grondstoffen. Aangezien granulaten een relatief goedkope component dient te blijven in de betonsamenstelling, is het van cruciaal belang dat de complexiteit van de behandeling tot een minimum wordt beperkt, vooral met het oog op mogelijke opschaling en toepasbaarheid op de werf. (Villagrán-Zaccardi et al., 2023)

Momenteel is er geen consensus op vlak van de invloed van de fijne fractie van gerecycleerde betongranulaten (FRCA) op de betoneigenschappen. Er kunnen grote verschillen zijn tussen verschillende onderzoeken inzake de slump-waarde of de druksterkte. Er is wel eensgezindheid over het feit dat de hoge waterabsorptie van FRCA de hoofdreden is voor de verminderde prestaties van het vervaardigde beton. Het overschatten van het benodigde, extra aanmaakwater voor het granulaat kan ook een reden zijn voor de mindere prestaties. Het is dus noodzakelijk om accuraat de correcte hoeveelheid van dit extra water te bepalen. (Sosa et al., 2018)

De fijne fractie van RCA, oftewel FRCA, bestaat voornamelijk uit mortel en uitgeharde cementpasta en heeft een grote waterbehoefte. Dit maakt recycling in beton en mortel moeilijker dan bij grovere RCA. Veel studies tonen aan dat de eigenschappen van beton afnemen naarmate het vervangingspercentage van FRCA toeneemt. Bovendien blijkt dat de vochtverzadigingstoestand van gerecycleerd granulaat ook een invloed heeft op de betoneigenschappen. Zo ontdekten onderzoekers dat oven gedroogde grovere gerecycleerde

betongranulaten (CRCA) in eerste instantie tot een grotere verwerkbaarheid van het beton leidt, maar dat deze verwerkbaarheid sneller afneemt dan bij verzadigde CRCA. Tevens bleek dat beton met oven gedroogde CRCA een hogere druksterkte vertoonden in vergelijking met beton met verzadigde CRCA. (Zhao et al., 2015)

Net als bij beton, leidt mortel gemaakt met FRCA vaak tot een lagere sterkte en duurzaamheid in vergelijking met mortel op basis van natuurlijk zand. De druksterkte van mortel neemt over het algemeen af naarmate het gehalte aan FRCA toeneemt. Hoewel enkele studies suggereren dat tot 30% vervanging door FRCA de mechanische eigenschappen van mortel niet nadelig beïnvloedt, zijn er ook studies die wijzen op negatieve effecten door de hoge waterabsorptie en de aanhangende cementpasta in FRCA. (Zhao et al., 2015)

2.3.4.2 Consistentie van het mengsel

De resultaten gaven aan dat een hogere hoeveelheid fijne kalksteen de slump flow verlaagt en de V-trechter vloeitijd verhoogt. Een gehalte van 10-15% fijne kalksteen zorgt voor optimale vloeibaarheid en een significante verbetering van de druksterkte. Een hoger gehalte fijne kalksteen resulteert in het dalen van de druksterkte, dit komt doordat er onvoldoende cementpasta aanwezig is om alle deeltjes volledig te omhullen. (Benabed et al., 2012)

Het type zand heeft eveneens een sterke invloed op de eigenschappen van de mortel. Duinzand verlaagt de vloeibaarheid aanzienlijk door de fijne structuur en hoge waterbehoefte, terwijl rivierzand de vloeibaarheid juist verhoogt wanneer het wordt gecombineerd met gebroken zand. Bij een hoog gehalte aan duinzand (75%) bleek er nauwelijks doorstroming te zijn in de V-trechter, vanwege de hoge viscositeit. Daarnaast hadden mortels met duinzand een hogere viscositeit dan die met gebroken of rivierzand. Qua druksterkte presteerden mortels met rivierzand het beste, terwijl combinaties van gebroken zand met rivier- of duinzand ook goede resultaten opleverden, mits het duinzandgehalte niet hoger was dan 25%. Er kan geconcludeerd worden dat mengsels met gebroken zand en rivierzand ideaal zijn voor een goede vloeibaarheid en sterkte. Hoge percentages duinzand zijn nadelig voor zowel de vloeibaarheid als de druksterkte. Het gebruik van combinatiezanden biedt technische, economische en milieutechnische voordelen voor de productie van zelfverdichtende mortel. (Benabed et al., 2012)

2.3.5 Invloed van de waterabsorptie van RCA

In de zoektocht naar duurzamere bouwmaterialen wint het gebruik van gerecycleerde betongranulaten (RCA) steeds meer aan belang. Een van de voornaamste eigenschappen die RCA onderscheidt van natuurlijke granulaten, is de verhoogde waterabsorptie. Dit heeft aanzienlijke gevolgen voor de werkbaarheid, sterkte en duurzaamheid van betonmengsels. Dit hoofdstuk bespreekt de waterabsorptie van

RCA en de effecten daarvan op beton, met inachtneming van verschillende mitigerende maatregelen zoals voorbevochtiging en het gebruik van superplastificeerders.

2.3.5.1 Eigenschappen van waterabsorptie bij RCA

Recycled concrete aggregates (RCA) hebben een waterabsorptie die varieert tussen 5% en 10%, wat aanzienlijk hoger is dan de absorptie van natuurlijke granulaten zoals gebroken kalksteen, die doorgaans tussen 0,5% en 1% ligt. Dit verschil is voornamelijk te wijten aan de aanwezigheid van een poreuze cementmortellaag die tijdens het recyclageproces aan de granulaten blijft kleven. Deze mortellaag bevat capillaire poriën die water snel opnemen, waardoor RCA een verhoogde initiële waterabsorptie vertoont in vergelijking met natuurlijke granulaten. (Boehme et al., 2013)

2.3.5.2 Invloed van waterabsorptie op de werkbaarheid van het mengsel

Een directe consequentie van de hogere waterabsorptie van RCA is een afname in de werkbaarheid van betonmengsels. Tijdens het mengen onttrekken de RCA-deeltjes water uit het cementmengsel, wat leidt tot een lagere initiële vloeibaarheid van het beton. Dit effect kan worden gecompenseerd door extra water toe te voegen, maar dit verhoogt de water-cementverhouding (W/C), wat een negatieve impact heeft op de uiteindelijke druksterkte en duurzaamheid van het beton. (Boehme et al., 2013)

2.3.5.3 Invloed van voorbevochtiging op werkbaarheid

Om het probleem van waterabsorptie tijdens het mengproces te beperken, kan RCA vooraf worden bevochtigd. In het onderzoek van Boehme (2013) werden verschillende voorbevochtigingsstrategieën getest:

- Geen voorbevochtiging:
    - Wanneer RCA droog wordt toegevoegd aan het betonmengsel, absorbeert het een groot deel van het aanmaakwater. Dit leidt tot een snelle daling van de werkbaarheid, vooral in de eerste 10 minuten na menging.
- Korte voorbevochtiging (30 seconden - 5 minuten)
    - Dit resulteert in een meer gecontroleerde wateropname en een gelijkmatigere verdeling van het water in het mengsel. Bij een voorbevochtiging van 5 minuten werd een significante verbetering in werkbaarheid waargenomen zonder een drastische toename in de vereiste hoeveelheid aanmaakwater.
- Lange voorbevochtiging (15 minuten)
    - RCA dat gedurende langere tijd werd geweekt, had een initiële werkbaarheid die hoger lag dan bij kortere bevochtiging, maar vertoonde een snellere afname in werkbaarheid na

verloop van tijd. Dit komt doordat het effect van de wateropname in de eerste fase minder uitgesproken is, maar de lange blootstelling aan water leidt tot een snellere afname van de vloeibaarheid.

2.3.5.4 Verbetering van de waterabsorptie-eigenschap van RCA granulaten

Er zijn verschillende minder toegepaste technieken voor het verbeteren van de kwaliteit van gerecycleerd granulaat (RA) die verder gaan dan de gebruikelijke scheidingsmethoden. Een van de meest effectieve methoden is de autogene reiniging, waarbij RA in een draaiende trommel wordt geplaatst. Tijdens dit proces botsen de granulaatdeeltjes tegen elkaar, wat resulteert in de verwijdering van verzwakte cementresten en leidt tot schonere en rondere korrels met een hogere dichtheid en lagere waterabsorptie. (Dhir et al., 2019b)

Een andere innovatieve techniek is onderwater sonische impulsen, waarbij geluidsimpulsen worden gegenereerd in een watergevulde container. Deze impulsen creëren spanningen tussen de cementpasta en het granulaat, wat de binding vernietigt en resulteert in RA met eigenschappen die vergelijkbaar zijn met natuurlijke granulaat. Daarnaast maken microwave- en verhittingsmethoden gebruik van temperatuurverschillen om cementpasta te delamineren, wat de verwijdering vergemakkelijkt. (Dhir et al., 2019b)

Natte zware media scheiding met magnetiet biedt een effectieve manier om RA op basis van dichtheid te scheiden, terwijl zure voorbehandeling de oude cementpasta effectief verwijdert. Tot slot kan versnelde carbonatie het poreuze netwerk van RA verbeteren door calciumcarbonaat neer te slaan, wat resulteert in een lagere waterabsorptie en een hogere dichtheid. Deze technieken dragen aanzienlijk bij aan de productie van gerecycleerd granulaat met verbeterde mechanische eigenschappen voor hoogwaardige betonproducten. (Dhir et al., 2019b)

2.3.5.5 Gebruik van superplastificeerders

Een alternatieve methode om de negatieve impact van waterabsorptie te beperken, is het gebruik van superplastificeerders. Deze chemische toevoegingen verbeteren de werkbaarheid zonder de W/C-verhouding te verhogen. Uit het onderzoek van Boehme (2013) bleek dat:

- Superplastificeerders efficiënter werken wanneer ze worden toegevoegd nadat een deel van de cementhydratatie reeds heeft plaatsgevonden. Wanneer superplastificeerders 10 minuten na menging werden toegevoegd in plaats van direct bij de start, bleef de werkbaarheid langer behouden.

- In mengsels waarin RCA niet vooraf werd bevochtigd, bleven de superplastificeerders langer in oplossing, wat resulteerde in een tragere maar langdurigere toename in werkbaarheid.
- Bij mengsels met voorbevochtigde RCA werd een snellere initiële werking van de superplastificeerders waargenomen, maar de werkbaarheid nam sneller af in de tijd.

Deze informatie over het gebruik van superplastificeerders is louter informatief voor het vervolg van dit onderzoeksrapport. Onderzoek naar het gebruik van superplastificeerders in de dekvloermengsels valt buiten het onderzoeksgebied van deze masterproef. (Boehme et al., 2013)

2.3.6 Hoeveelheid aanmaakwater

Er zijn verschillende manieren voor het bepalen van de hoeveelheid benodigd aanmaakwater van RCA, maar slechts enkele van deze methoden is ook toepasbaar voor fijne granulaten. De betrouwbaarheid van elke proefmethode is afhankelijk van het vermogen om de verzadigde droge oppervlaktetoestand van het monster nauwkeurig te bepalen. Een veel gebruikte methode is de onderdompelingsmethode. (Sosa et al., 2018)

Bij de onderdompelingsmethode wordt een monster van fijn gerecycleerd betongranulaat (FRCA) op een zeef met een maaswijdte van 0,044 mm geplaatst en vervolgens ondergedompeld in water. Tijdens deze onderdompeling wordt de massaverandering geregistreerd na lichte roering, met tijdsintervallen gedurende de eerste 24 uur. Uit de verzamelde gegevens wordt een absorptie-tijdcurve opgesteld. De toenemende absorptie gedurende opeenvolgende tijdsperioden maakt het mogelijk om de gedeeltelijke waterabsorptiecapaciteit van het granulaat te schatten in de periode waarin vers beton wordt gemengd en verwerkt. In theorie kan dit een nauwkeurige correctie van de hoeveelheid aanmaakwater mogelijk maken zonder nadelige effecten op de prestaties van het beton te veroorzaken. Een belangrijke beperking van deze methode is echter dat ze niet in staat is het initiële onderwatergewicht vast te leggen, omdat de eerste meting pas na twee minuten onderdompeling kan worden uitgevoerd, dit vanwege de benodigde stabilisatietijd van de weegschaal. De waterabsorptie wordt uiteindelijk berekend als het gemiddelde tussen de absorptiewaarden met betrekking tot het gewicht van het droge monster en het gewicht van het ondergedompelde monster. Aangezien deze berekeningsmethode geen theoretische ondersteuning heeft, houdt ze een aanzienlijke onzekerheid in. Bijkomend is er bij de onderdompelingsproef ook onzekerheid over het al dan niet samenklitten van de fijne granulaten. Dit zou resulteren in een ingesloten volume lucht en bijgevolg onzekerheden met zich meebrengen over de correcte massa. (Sosa et al., 2018)

2.4 Sneeuwbaltest

De sneeuwbaltest is een eenvoudige en informele methode om de werkbaarheid van een dekvloermengsel ter plaatse te testen. Bij deze test wordt een handvol van het mengsel samengeperst tot een bal. Als de bal stevig is en geen water uitloopt, heeft het mengsel de juiste consistentie en is het goed verwerkt. Als de bal uit elkaar valt, betekent dit dat het mengsel te droog is en er meer water nodig is. Als er water uit de bal lekt, is het mengsel te nat en moet de hoeveelheid water worden verminderd. Deze test is handig voor het snel bepalen of een dekvloermengsel de juiste hoeveelheid water bevat voor een optimale verwerkbaarheid. Het biedt een directe indicatie van de consistentie van het mengsel, wat essentieel is voor de verwerking en het verkrijgen van een kwalitatieve dekvloer. De sneeuwbaltest kan snel worden uitgevoerd zonder dat er speciale apparatuur nodig is, waardoor het een praktische methode is voor dagelijks gebruik op de werkvloer. Hoewel de test eenvoudig en snel is, heeft het een belangrijke beperking: de beoordeling is afhankelijk van de ervaring van de operator. Dit kan leiden tot enige subjectiviteit, omdat verschillende mensen het mengsel mogelijk op verschillende manieren interpreteren. Bovendien biedt de test geen gedetailleerde informatie over andere eigenschappen van het mengsel, zoals de luchtopname of de uiteindelijke sterkte van de dekvloer. Toch blijft de sneeuwbaltest een waardevolle methode voor het snel controleren van de werkbaarheid in het veld.

2.5 Granulair skelet

Het granulair skelet van een dekvloermengsel verwijst naar de samenstelling en verdeling van de toeslagmaterialen binnen de mortel. Dit skelet speelt een essentiële rol in de verwerkbaarheid, sterkteontwikkeling, krimpbeheersing en duurzaamheid van de dekvloer. In essentie bestaat een dekvloermengsel uit cement, water, toeslagmaterialen en eventueel hulpstoffen, waarbij het granulair skelet de fysieke structuur bepaalt en invloed heeft op zowel de verse als de uitgeharde eigenschappen van de vloer. Het granulair skelet van een dekvloermengsel wordt geoptimaliseerd om een evenwicht te vinden tussen sterkte, verwerkbaarheid en minimale krimp. Een juiste verdeling van de granulaten, vaak met een continue of semi-continue granulometrie, zorgt ervoor dat de korrels efficiënt inpassen en een compact mengsel vormen met een goede cohesie en minimale porositeit. Dit voorkomt segregatie en verbetert de weerstand tegen scheurvorming, een cruciale eigenschap bij dekvloeren die vaak worden blootgesteld aan thermische en mechanische spanningen.

De fijnheid van het skelet beïnvloedt de vloeibaarheid en verwerking. Bij vloeiende dekvloeren, zoals zelfnivellerende anhydriet- of cementgebonden dekvloeren, wordt vaak een fijner granulair skelet gebruikt dat meer op traditionele mortel lijkt. Dit type dekvloer moet een hoge mate van vloeibaarheid behouden, zonder dat de granulaten zich scheiden van de cementpasta. Bij handmatig afgewerkte cementgebonden

dekvloeren wordt doorgaans een iets grover skelet toegepast, wat bijdraagt aan een stabielere structuur en een hogere mechanische weerstand.

2.5.1 Opbouw en eigenschappen van het granulair skelet

2.5.1.1 Continu en discontinu granulair skelet

De samenstelling van het granulair skelet speelt een cruciale rol in zowel de verse als de geharde eigenschappen van het materiaal. Binnen deze context wordt een onderscheid gemaakt tussen een continu skelet (C-mengsels) en een discontinu skelet (D-mengsels), waarbij de verdeling en samenstelling van de toeslagmaterialen sterk variëren. Dit onderscheid beïnvloedt niet alleen de verwerkbaarheid en segregatieweerstand van het beton, maar ook de uiteindelijke mechanische prestaties en duurzaamheid van het materiaal. (Santos et al., 2015)

Een continu skelet wordt gekenmerkt door een gelijkmatige verdeling van de granulaten over de verschillende fracties, waarbij er een geleidelijke overgang is tussen fijne en grove deeltjes. Dit leidt tot een hogere mate van compactheid en een verhoogde stabiliteit in zowel de verse als de geharde toestand. Doordat het continue skelet een relatief hogere hoeveelheid fijn materiaal bevat, bestaande uit zand en pasta (cement en water), wordt een betere cohesie verkregen. Hierdoor is de vloeibaarheid van het mengsel hoger, en wordt de kans op segregatie aanzienlijk gereduceerd. De fijnere korrels vullen de ruimte tussen de grovere granulaten op, waardoor een homogene structuur ontstaat met een verbeterde zelfverdichtende capaciteit. Deze eigenschappen maken het continu skelet bijzonder geschikt voor toepassingen die door directe storting worden verwerkt, bijvoorbeeld via emmers of goten. (Santos et al., 2015)

In tegenstelling tot het continue skelet, bestaat een discontinu skelet uit een ongelijke verdeling van de granulaten, waarbij bepaalde fracties minder vertegenwoordigd zijn of zelfs ontbreken. Dit resulteert in een meer open structuur met grotere tussenruimtes tussen de toeslagmaterialen. In deze mengsels is er een lagere hoeveelheid fijne granulaten aanwezig, terwijl het aandeel grof toeslagmateriaal aanzienlijk hoger is. Dit leidt tot een verminderde cohesie, wat de kans op segregatie en ontmenging vergroot, vooral tijdens transport en verwerking. Doordat discontinue mengsels minder fijn materiaal bevatten, kunnen ze echter wel beter verpompt worden, aangezien de verminderde viscositeit de weerstand in de leidingen verlaagt. Dit maakt discontinue skeletten geschikt voor toepassingen waarbij de pasta via pompen wordt verwerkt, zoals bij hoogbouw en moeilijk bereikbare stortlocaties. (Santos et al., 2015)

De verdeling van de toeslagmaterialen in beide skelettypes heeft directe gevolgen voor de werkbaarheid en mechanische prestaties van het mengsel. Zo vertonen continue mengsels doorgaans een hogere slump-flow

waarde, wat wijst op een betere vloeibaarheid en een verbeterde verdichtingseigenschap. Dit komt voort uit het grotere aandeel pasta, dat als smeermiddel fungeert en het mengsel een vlottere stroomcapaciteit geeft. In discontinue mengsels daarentegen zorgt het hogere percentage grof toeslagmateriaal voor meer interlock tussen de granulaten, wat leidt tot een kleinere slump-flow diameter en een hogere stromingsweerstand. Dit verhoogt het risico op blokkades rond wapeningsnetten. (Santos et al., 2015)

Naast de invloed op de verse eigenschappen, vertalen deze structurele verschillen zich ook in de geharde toestand. Continue skeletten vertonen doorgaans een iets hogere druksterkte dan discontinue mengsels, doordat de fijnere korrels en de grotere cohesie bijdragen aan een compactere microstructuur en een betere krachtoverdracht binnen de cementmatrix. Daarnaast heeft het continue skelet een licht verhoogde elasticiteitsmodulus, wat resulteert in een stijver beton met een verbeterde weerstand tegen vervorming. Bij discontinue mengsels is de grotere hoeveelheid grof toeslagmateriaal echter niet altijd gunstig voor de sterkteontwikkeling, aangezien de beperkte cohesie en de grotere tussenruimtes in sommige gevallen tot een lagere eindsterkte kunnen leiden. (Santos et al., 2015)

Op basis van de analyse van het granulair skelet in dekvloermengsels kan geconcludeerd worden dat een continu skelet (C-mengsel) de meest geschikte keuze is voor de toepassing van een dekvloer. Dit mengsel zorgt voor een betere cohesie, waardoor segregatie en luchtinsluiting worden verminderd, en draagt bij aan een hogere compactheid en sterkteverdeling. Daarnaast biedt een continu skelet een gladde afwerking, wat essentieel is voor de plaatsing van vloerbedekkingen, en beperkt het de kans op scheurvorming door een gelijkmatige spanningsverdeling en minimale krimp. Door de goede verwerkbaarheid en vloei-eigenschappen is het gemakkelijker aan te brengen en af te werken, wat de duurzaamheid en kwaliteit van de dekvloer ten goede komt. Kortom, een continu skelet garandeert een efficiënte uitvoering en een duurzame, stabiele dekvloer met optimale mechanische eigenschappen. (Santos et al., 2015)

2.5.1.2 Invloed van de pakdichtheid

Klein et al. (2020) onderzochten de invloed van de pakdichtheid van het granulair skelet en concludeerden dat door een optimale verdeling van de toeslagmaterialen, de pakdichtheid van het granulair skelet kan worden verhoogd van 8% tot 10%. Dit betekent dat er minder cementpasta nodig is om de open ruimtes tussen de granulaten op te vullen, wat resulteert in een cementbesparing. Een verhoogde pakdichtheid leidt tot een compactere mengselstructuur en verbetert de mechanische prestaties zonder de noodzaak om extra cement toe te voegen. Dit is een belangrijke bevinding in het kader van duurzaam bouwen, omdat cementproductie verantwoordelijk is voor een aanzienlijke CO_2-uitstoot, zoals reeds besproken in deze literatuurstudie in paragraaf 2.2.5 (Klein et al., 2020)

Hoofdstuk 3: Fysische eigenschappen van de onderzochte granulaten

In dit hoofdstuk worden de onderzochte fijne granulaten uitgebreid beschreven, met bijzondere aandacht voor hun herkomst en fysische eigenschappen. Allereerst wordt een beknopte toelichting gegeven bij de oorsprong van elk granulaat. Vervolgens wordt een zeefanalyse uitgevoerd om de korrelverdeling van de verschillende materialen nauwkeurig in kaart te brengen. Naast de korrelverdeling worden ook andere fysische eigenschappen grondig geanalyseerd. Verder wordt de waterabsorptiecapaciteit van de granulaten geëvalueerd aan de hand van twee meetmethodes: de pyknometertest en een conductiviteitstest. De conductiviteitstest wordt geanalyseerd en de resultaten worden met elkaar vergeleken. Verder wordt de volumemassa van de granulaten bepaald, wat een indicatie geeft van hun dichtheid en pakkingsdichtheid. Ook wordt de inwendige wrijvingshoek onderzocht, zowel voor het volledige granulaatmengsel als voor de afzonderlijke fracties. Deze parameter is essentieel om het stromingsgedrag en de stabiliteit van de materialen in toepassingen zoals dekvloermengsels beter te begrijpen. Tot slot wordt een microscopische analyse uitgevoerd, waarmee de korrelstructuur en oppervlaktestructuur van de granulaten in beeld worden gebracht. Deze informatie is van belang, aangezien de microstructuur een invloed kan uitoefenen op de verwerkbaarheid en cohesie van het materiaal in diverse bouwtoepassingen.

3.1 Omschrijving onderzochte fijne granulaten

In dit onderzoek zullen de volgende zandsoorten worden gebruikt: Gerecycleerd betonzand 0/4, Chapyt 0/2, Chapyt 0/4, Recycled mix 0/2, Recycled mix 0/3, Rivierzand 0/4 26/90, Rivierzand 0/4 35/90 en Mengzand 0/4 25/90. Deze zandsoorten worden geselecteerd om de vereiste testen en analyses uit te voeren binnen de context van dit onderzoek. Hieronder worden alle zandsoorten overlopen met de voornaamste eigenschappen.

3.1.1 Gerecycleerd betonzand 0/4 en 0/6,3

Gerecycleerd betonzand is een type zand dat ontstaat door het breken van grotere stukken betonpuin. Dit zand wordt geproduceerd door het mechanisch vergruizen van de stenen, wat resulteert in een zandsoort met scherpe, hoekige korrels. Deze scherpe randen zorgen ervoor dat het gerecycleerd betonzand goed samenklontert en een stevige structuur vormt, wat het bijzonder geschikt maakt voor bepaalde bouwtoepassingen. (Ground Cover Group B, 2023)

Gerecycleerd betonzand wordt vaak gebruikt in de bouwsector, bijvoorbeeld als vulmateriaal voor funderingen, als onderlaag voor bestrating, of in betonmengsels. De scherpe korrels zorgen voor een betere

binding met de andere materialen, wat stabiliteit van de constructie ten goede komt. Daarnaast kan gerecycleerd betonzand ook worden gebruikt in drainageprojecten, waar het helpt bij het afvoeren van water. (Ground Cover Group B, 2023)

Vanwege de herkomst en de productie van gerecycleerd betonzand is het meestal sterker en duurzamer dan andere soorten zand, zoals rivierzand. Het is dus een veelzijdig materiaal dat in verschillende bouw- en infrastructuurprojecten wordt toegepast. (Ground Cover Group B, 2023)

In het verdere verloop van deze masterproef wordt gebruikgemaakt van gezeefd granulaat 0/4 in plaats van het aangeleverde 0/6,3. De reden hiervoor is dat de 6,3 mm-fractie te grof is voor de beoogde toepassing. Een maximale korrelgrootte van 4 mm is vereist om de verwerkbaarheid en afstrijkbaarheid van het dekvloermengsel te waarborgen. De zeefproef werd echter uitgevoerd voor beide granulaten. De resultaten van het gerecycleerd betonzand 0/6,3 worden ter informatie opgenomen in dit verslag.



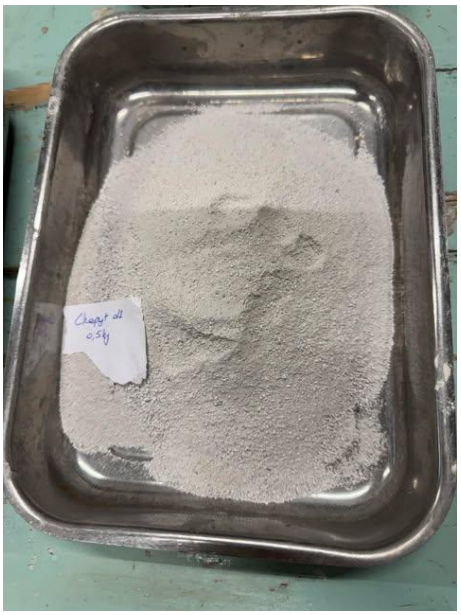
Figuur 3-1: Gerecycleerd betonzand 0/6,3

3.1.2 Chapyt 0/2 en Chapyt 0/4

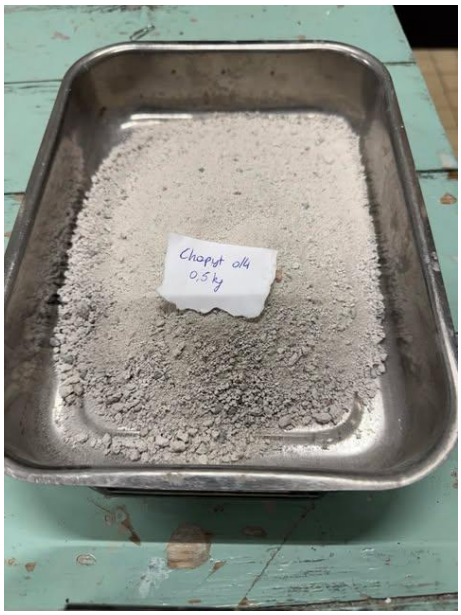
Chap-Yt is een Belgisch bedrijf dat zich specialiseert in de recyclage van cellenbeton en gevestigd is in de regio Rijkevorsel. Tijdens hun onderzoek naar de recyclage van cellenbeton in Turnhout en Rijkevorsel werden enkele belangrijke problemen geïdentificeerd. Een eerste probleem bij de recyclage van cellenbeton is de hoge porositeit van het materiaal. Door de vele luchtbelletjes in cellenbeton kan de structuur veranderen tijdens het verwerkingsproces, wat invloed heeft op de mechanische eigenschappen van het gerecycleerde product. Een tweede belangrijk probleem is de verhoogde uitloging van sulfaten. Deze uitloging kan een negatieve impact hebben op het milieu en de bruikbaarheid van het gerecycleerde materiaal beperken. Om deze uitdagingen aan te pakken, heeft Chap-Yt specifieke verwerkingsmethoden ontwikkeld.

Door zorgvuldige kwaliteitscontroles en aangepaste recyclageprocessen wordt de porositeit van het materiaal beheerst, waardoor de structurele eigenschappen behouden blijven. Daarnaast worden technieken toegepast om de uitloging van sulfaten te minimaliseren, zodat het gerecycleerde cellenbeton voldoet aan de geldende milieunormen. (CHAP-YT, 2025)

Na recyclage krijgt het cellenbeton diverse nieuwe toepassingen. Een voorbeeld hiervan is Chapyt 0/2 en Chapyt 0/4, een gerecycleerd zand dat deels als vervanger voor klassiek rijnzand wordt gebruikt. Daarnaast wordt het ook ingezet als alternatief voor scheldezand in stabilisétoepassingen. Op deze manier draagt Chap-Yt bij aan een duurzamere bouwsector door afval om te zetten in hoogwaardige, herbruikbare grondstoffen. (CHAP-YT, 2025)



Figuur 3-2: Chapyt 0/2



Figuur 3-3: Chapyt 0/4

3.1.3 Recycled mix 0/2 en Recycled mix 0/3

Recycled mix is een bouwmateriaal dat bestaat uit een gerecycleerd granulaat, dat afkomstig is van oude bouwmaterialen zoals beton, asfalt en bakstenen. Deze materialen worden verzameld, vermalen en gezeefd om een nieuw product te creëren. Het doel van het Recycled mix-zand is om bouwmaterialen die anders als afval zouden eindigen, opnieuw te gebruiken, wat bijdraagt aan het verminderen van afval en het bevorderen van duurzaamheid in de bouwsector. (gp groot, 2025)

Het gebruik van Recycled mix heeft meerdere voordelen. Ten eerste is het een milieuvriendelijke keuze, omdat het hergebruik van materialen de vraag naar nieuwe grondstoffen vermindert en tegelijkertijd de hoeveelheid bouwafval verkleint. Daarnaast biedt het materiaal een goede stabiliteit en is het vaak compacterend, waardoor het een stevige en betrouwbare basis biedt voor verschillende bouwtoepassingen. (gp groot, 2025)

Recycled mix wordt veel gebruikt in de bouw, bijvoorbeeld als funderingsmateriaal voor wegen, als onderlaag voor bestrating of als grondverbeteraar in de tuinbouw. Het is een veelzijdig materiaal dat bijdraagt aan een circulaire economie door het hergebruik van bestaande materialen. (Beton Lexicon, 2019)



Figuur 3-4: Recycled mix 0/2



Figuur 3-5: Recycled mix 0/3

3.1.4 Rivierzand 0/4 26/90 en Rivierzand 0/4 35/90

Rivierzand is een zandsoort die afkomstig is uit rivierbeddingen en wordt gekenmerkt door zijn fijne en afgeronde korrels. Het ontstaat door de natuurlijke erosie van stenen en rotsen, waarbij de stroming van het rivierwater de zandkorrels glad en gelijkmatig maakt. Hierdoor heeft rivierzand een unieke structuur die het geschikt maakt voor diverse toepassingen. (Zandbestellen, 2025)

De korrels van rivierzand zijn doorgaans glad en rond, omdat ze door de stroming van het water worden gepolijst. Dit maakt het een ideale zandsoort voor gebruik in beton en mortel, waar een goede binding met cement belangrijk is. Rivierzand bevat daarnaast weinig organisch materiaal, zoals klei of slib, waardoor het een zuivere zandsoort is. De korrelgrootte van rivierzand kan variëren, maar wordt vaak gezeefd om specifieke maten te verkrijgen, zoals 0/2 mm of 0/4 mm. (Zandbestellen, 2025)

Rivierzand wordt veel toegepast in de bouw, bijvoorbeeld als bestanddeel van beton en mortel. Daarnaast is het een populaire keuze in straatwerk, waar het wordt gebruikt als onderlaag of voegzand vanwege de stabiliteit en goede drainage-eigenschappen. In de tuinbouw wordt rivierzand soms toegevoegd aan de grond om deze losser en beter doorlatend te maken. Verder wordt het ook decoratief gebruikt, bijvoorbeeld in zandbakken of voor andere doeleinden waar een fijne zandstructuur gewenst is. (Zandbestellen, 2025)



Figuur 3-6: Rivierzand 0/4 26/90



Figuur 3-7: Rivierzand 0/4 35/90

De aanduiding 0/4 verwijst naar de korrelgrootteverdeling van het zand, waarbij de deeltjes een grootte hebben tussen 0 mm (zeer fijn en bijna stofachtig) en 4 mm (grovere zandkorrels).
Daarnaast geven de aanduidingen 26/90 en 35/90 het percentage materiaal weer dat achterblijft op de zeven met maaswijdtes van 1 mm en 250 µm. Een waarde van 26-90 betekent dat 26% van het materiaal op de 1 mm zeef blijft liggen, wat neerkomt op een gecumuleerde zeefrest van 74%. Tegelijkertijd blijft 90% van het materiaal achter op de 250 µm zeef, wat overeenkomt met een gecumuleerde zeefrest van 10%.
Deze waarden worden in het algemeen gebruikt om de korreligheidsgraad van zand te karakteriseren. Dit is een cruciale parameter bij de beoordeling van de geschiktheid van het zand voor specifieke bouwtoepassingen, zoals beton- en mortelmengsels.

3.1.5 Mengzand 0/4 25/90

Mengzand is een natuurlijk zand dat ontstaat door het mengen van verschillende soorten natuurzand, zoals rivierzand en duinzand. Dit type zand wordt veel gebruikt in de bouw en tuinbouw vanwege zijn veelzijdige eigenschappen, zoals een goede korrelverdeling en verdichtbaarheid. (Minerva, 2025)
Het heeft een specifieke korrelverdeling die geschikt is voor toepassingen waarbij stabiliteit of drainage belangrijk is. De exacte structuur van mengzand kan variëren, afhankelijk van de verhouding tussen de gemengde zandsoorten. (Minerva, 2025)

In de bouw wordt mengzand vaak gebruikt voor het maken van beton, cement en funderingen. Daarnaast is het een veelgebruikte onderlaag voor bestrating, omdat het een goede draagkracht en stabiliteit biedt. In

de tuinbouw wordt mengzand soms gebruikt om de grond te verbeteren, bijvoorbeeld om de drainage te verbeteren of als aanvulling bij de aanleg van gazons. (Minerva, 2025)



Figuur 3-8: Mengzand 0/4 25/90

De aanduiding 0/4 verwijst naar de korrelgrootteverdeling van het zand, waarbij de deeltjes een grootte hebben tussen 0 mm (zeer fijn en bijna stofachtig) en 4 mm (grovere zandkorrels).

Daarnaast geeft de aanduiding 25/90 het percentage materiaal weer dat achterblijft op de zeven met maaswijdtes van 1 mm en 250 µm. Een waarde van 25-90 betekent dat 25% van het materiaal op de 1 mm zeef blijft liggen, wat neerkomt op een gecumuleerde zeefrest van 75%. Tegelijkertijd blijft 90% van het materiaal achter op de 250 µm zeef, wat overeenkomt met een gecumuleerde zeefrest van 10%.

3.1.6 Overzicht van de zandtypes en hun codenaam

In onderstaande Tabel 3-1 wordt een overzicht gegeven van de verschillende onderzochte zandsoorten, onderverdeeld in natuurlijk en gerecycleerd zand. De tweede kolom bevat de volledige naam van het zand, terwijl de derde kolom de codenaam weergeeft die verder in deze thesis wordt gebruikt. Deze codenamen worden gebruikt omwille van de vaak lange benamingen van de zandtypes met hun respectievelijke water-cementfactoren.

Tabel 3-1: Ovenzicht van de zandtypes en hun codenaam

Type zand	Volledige naam	Codenaam
Natuurlijk zand	Rivierzand 0/4 26/90	RS 26/90
	Rivierzand 0/4 35/90	RS 35/90
	Mengzand 0/4 25/90	MZ 25/90
Gerecycleerd zand	Chapyt 0/2	Chap 0/2
	Chapyt 0/4	Chap 0/4
	Recycled mix 0/2	RMS 0/2
	Recycled mix 0/3	RMS 0/3
	Gerecycleerd betonzand 0/4	RCS 0/4
	Gerecycleerd betonzand 0/6,3	RCS 0/6,3

3.2 Zeefanalyse

3.2.1 Uitvoering

Het bepalen van de korrelverdeling van een zandmengsel gebeurt door middel van een zeefanalyse, waarbij een zandmonster door een reeks zeven met verschillende maaswijdten wordt gezeefd. Dit proces resulteert in een zeefkromme, die inzicht geeft in de verdeling van de korrelgrootte en daarmee de geschiktheid van het materiaal voor bepaalde toepassingen, in dit geval voor dekvloeren.

De proef start met het voorbereiden van het monster, waarbij het zand droog moet zijn voor gebruik. Vervolgens wordt het totale droge monster gewogen en genoteerd als de beginmassa. Daarna wordt een reeks standaardzeven klaargezet, oplopend in maaswijdte van fijn naar grof, met een opvangbak onderaan om de zogenaamde zeefrest op te vangen. Het zandmonster wordt vervolgens gelijkmatig over de bovenste zeef verdeeld, waarna het zeven plaatsvindt met behulp van een schudzeefmachine of handmatig door de zeven te schudden gedurende enkele minuten. Na het zeven wordt de massa van het achtergebleven materiaal op elke zeef nauwkeurig gewogen en genoteerd.

Door het percentage materiaal per zeef te berekenen ten opzichte van de beginmassa, vervolgens de gecumuleerde zeefrest en de doorval te bepalen, kan een zeefkromme worden opgesteld. Deze wordt weergegeven in een grafiek met de maaswijdte op een logaritmische schaal en de doorval in procenten op de verticale as. De resulterende zeefkromme geeft inzicht in de mate van korrelverdeling, wat essentieel is voor de beoordeling en eventuele aanpassing van het zandmengsel om optimale eigenschappen te verkrijgen voor specifieke toepassingen.

3.2.2 Het beproefde materiaal en monstername

De zeefanalyse wordt toegepast op de hierboven beschreven zandsoorten uit 3.1 Vooreerst wordt het mengsel goed geroerd en overgegoten. Deze stap is noodzakelijk omdat de fijnste fracties door transport of trillingen naar de bodem van de emmer kunnen gezakt zijn. Op deze manier wordt een goede representatie van het mengsel door het monster verzekerd. Vervolgens wordt van elk mengsel een massa van 1 kg afgewogen. Voor Chapyt 0/2 en Chapyt 0/4 wordt een massa van 0,5 kg afgewogen.

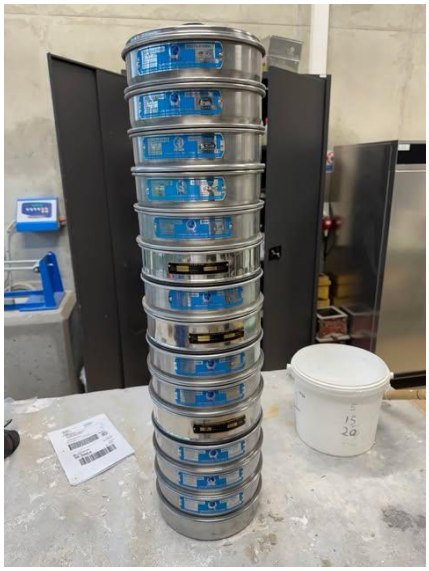
3.2.3 Gebruikte zeven

Onderstaande Tabel 3-2 geeft een overzicht van de zeven die zijn gebruikt bij de zeefanalyse. Alle zeven zijn gestandaardiseerd en erkend volgens de ISO- en Europese normen, waardoor de resultaten betrouwbaar en reproduceerbaar zijn. De gebruikte zeven variëren in maaswijdte en maken het mogelijk om de korrelverdeling van het onderzochte materiaal nauwkeurig te bepalen.

Tabel 3-2: Gebruikte zeven

Zeef [mm]
10
8
6,3
5,6
4
2,5
2
1,25
1
0,5
0,315
0,25
0,125
0,063
Rest

In Figuur 3-9 wordt een visuele weergave van de gebruikte zeven gegeven.

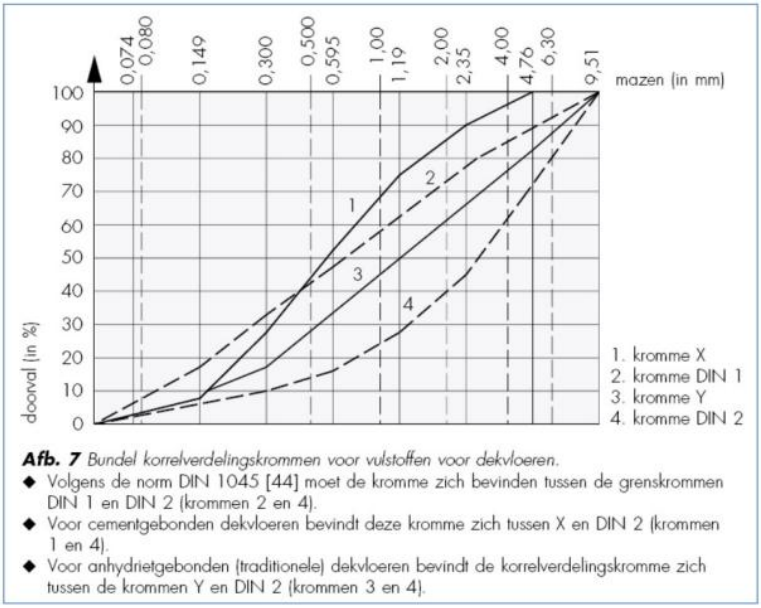


Figuur 3-9: Gebruikte zeven

3.2.4 Normen

De norm NBN EN 12620 specificeert onder meer de korrelverdeling, waarbij eisen worden gesteld aan de zeefanalyse en korrelgrootteverdeling. Daarnaast worden fysische eigenschappen zoals volumieke massa, porositeit en waterabsorptie vastgelegd, evenals mechanische kenmerken zoals slijtvastheid en weerstand tegen verwering.

De norm NBN EN 12620 specifieert ook de classificatie van granulaten op basis van verschillende parameters, waaronder de fijnheidsmodulus FM en de doorval bij een zeef met een maaswijdte van 0,5 mm. De zeven zijn ISO- of Europees erkende zeven. De technische voorlichting TV 189 (Van Laecke, 1993) geeft aanbevelingen voor de korrelverdeling van de granulaten. Deze dient binnen grenskrommen te vallen zoals weergegeven in Figuur 3-10.



Afb. 7 *Bundel korrelverdelingskrommen voor vulstoffen voor dekvloeren.*

- Volgens de norm DIN 1045 [44] moet de kromme zich bevinden tussen de grenskrommen DIN 1 en DIN 2 (krommen 2 en 4).
- Voor cementgebonden dekvloeren bevindt deze kromme zich tussen X en DIN 2 (krommen 1 en 4).
- Voor anhydrietgebonden (traditionele) dekvloeren bevindt de korrelverdelingskromme zich tussen de krommen Y en DIN 2 (krommen 3 en 4).

Figuur 3-10: Grenskrommen granulaten (Van Laecke, 1993)

De richtkrommen voor cementgebonden dekvloeren volgens de technische voorlichting TV 189, zijn krommen 1 en 4. De korrelverdeling bevindt zich dus idealiter tussen kromme één en vier. De gecumuleerde doorvallen voor deze krommen worden weergegeven in Tabel 3-3.

Tabel 3-3: Doorvallen voor cementgebonden dekvloer volgens TV 189 (Van Laecke, 1993)

	TV 189 min	**TV 189 max**
Zeefmaat [mm]	Gecumuleerde doorval [%]	Gecumuleerde doorval [%]
0,063	3,0	3,0
0,125	7,0	8,0
0,250	9.0	25,0
0,500	14,0	45,0
1,000	25,0	70,0
2,000	40,0	85,0
4,000	60,0	95,0
5,600	75,0	100,0
8,000	90,0	100,0
10,000	100,0	100,0

3.2.5 Aannames

Er wordt verondersteld dat het gegeven granulaat effectief overeenstemt met wat er op het label beschreven staat. Het granulaat wordt ook als volledig droog beschouwd, waardoor het zeefmonster een constante massa heeft. Vervolgens wordt ook verondersteld dat de zeven in goede staat zijn.

3.2.6 Meetgegevens

In het vervolg worden de meetresultaten en formules bij de zeefanalyse besproken. Voor de berekeningen wordt een voorbeeld getoond aan de hand van het Rivierzand 0/4 35/90. In Tabel 3-4 zijn de resultaten terug te vinden van Rivierzand 0/4 35/90.

3.2.6.1 Bepaling zeefrest

De zeefrest is het percentage materiaal dat op een bepaalde zeef achterblijft na een zeefanalyse, waarbij de deeltjes groter zijn dan de maaswijdte van de zeef. De zeefrest [%] wordt bepaald door de zeefrest [g] te delen door de totale droge massa na het zeven [g].

$$R_i = \frac{M_{R,i}}{M_{tot}} * 100 \quad [\%] \qquad 3\text{-}1$$

Met:

R_i [%]: Zeefrest van zeef i

$M_{R,i}$ [g]: Zeefrest van zeef i

M_{tot}[g]: Totale droge massa na het zeven

3.2.6.2 Bepaling gecumuleerde zeefrest

De gecumuleerde zeefrest Z is het totale percentage van granulaten dat op een reeks zeven achterblijft na het zeven, opgeteld over alle groottes boven een bepaalde zeefmaat. Ze wordt bekomen door sommatie van de zeefresten R per zeef uit de zeefproeven. Ze kan worden uitgedrukt in gram of procentueel, de formules volgen respectievelijk:

$$Z_{i,gram} = \sum M_{R,i} \quad [g] \tag{3-2}$$

$$Z_{i,procentueel} = \frac{\sum_i^j M_{R,i}}{M_{tot}} * 100 \quad [\%] \tag{3-3}$$

Met:

$Z_{i,gram}$ [g]: Gecumuleerde zeefrest van zeef i

$M_{r,i}$ [g]: Zeefrest van zeef i

$Z_{i,procentueel}$ [%]: Gecumuleerde zeefrest van zeef i

M_{tot}[g]: Totale droge massa na het zeven

3.2.6.3 Bepaling van de doorval

De doorval is het percentage materiaal dat tijdens een zeefanalyse door een zeef valt, waarbij de deeltjes kleiner zijn dan de maaswijdte van de zeef. Om de doorval te bepalen wordt de gecumuleerde zeefrest [%] telkens afgetrokken van 100%. Hierbij komt 100% overeen met de totale droge massa voor het zeven. Dit geeft volgende twee formules:

$$D_i = M_{tot} - Z_{i,gram} \quad [g] \tag{3-4}$$

$$D_i = 100 - Z_{i,procentueel} \quad [\%] \tag{3-5}$$

Met:

D_i [g]: Doorval

$Z_{i,gram}$ [g]: Gecumuleerde zeefrest van zeef i

M_{tot} [g]: Totale droge massa na het zeven

D_i [%]: Doorval

$Z_{i,procentueel}$ [%]: Gecumuleerde zeefrest van zeef i

In onderstaande Tabel 3-4 zijn de zeefresultaten van Rivierzand 0/4 35/90 te vinden. De andere resultaten zijn te vinden in Bijlage A.

Tabel 3-4: Zeefresultaten Rivierzand 0/4 35/90

Rivierzand 0/4 35/90

Maaswijdte [mm]	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrest [%]	Gecumuleerde zeefrest [%]	Doorval [%]
10	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
8	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
6,3	0,43	0,43	0,04%	0,04%	99,96%
5,6	0,63	1,06	0,06%	0,11%	99,89%
4	30,56	31,62	3,07%	3,17%	96,83%
2,5	104,38	136	10,48%	13,66%	86,34%
2	47,5	183,5	4,77%	18,42%	81,58%
1,25	106,14	289,64	10,66%	29,08%	70,92%
1	47,7	337,34	4,79%	33,87%	66,13%
0,5	308,4	645,74	30,97%	64,84%	35,16%
0,315	191	836,74	19,18%	84,02%	15,98%
0,25	55,61	892,35	5,58%	89,60%	10,40%
0,125	97,1	989,45	9,75%	99,35%	0,65%
0,063	5,56	995,01	0,56%	99,91%	0,09%
rest	0,93	995,94	0,09%	100,00%	0,00%

3.2.7 Bepaling fijnheidsmodulus en doorval bij 0,5 mm

De fijnheidsmodulus en het doorval bij 0,5 mm zijn parameters die iets zeggen over de korrelverdeling van zand. Ze worden gebruikt om te beoordelen of het zand geschikt is als toeslagmateriaal in beton of mortel.

3.2.7.1 Fijnheidsmodulus

De fijnheidsmodulus FM van fijne granulaten wordt berekend met behulp van de volgende formule:

$$FM = \frac{\sum Z_i}{100} = \frac{Z_4 + Z_2 + Z_1 + Z_{0,5} + Z_{0,25} + Z_{0,125}}{100} [-] \qquad 3\text{-}6$$

Met:

FM [-]: Fijnheidsmodulus

Z_j [%]: De cumulatieve percentages van de zeefresten op zeven met maaswijdtes van 4mm, 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,25mm en 0,125mm.

Voor het granulaattype Chapyt 0/2 wordt de FM als volgt berekend:

$$FM = \frac{\sum Z_i}{100} = \frac{0,03\% + 0,08\% + 14,76\% + 46,51\% + 74,10\% + 92,67\%}{100\%} = 2,28$$

Hetzelfde kan worden gedaan voor de grenskrommen TV 189 met de vooropgestelde doorval zoals weergegeven in Tabel 3-3. Op analoge wijze wordt zo, respectievelijk voor TV 189 max en TV 189 min, een fijnheidsmodulus van 2,7 en 4,5 gevonden. Tabel 3-5 geeft een overzicht van de categorisering van de fijnheidsmodulus volgens NBN EN 12620.

Tabel 3-5: Categorisering fijnheidsmodulus

FM	Soort granulaat
0-2,6	Te fijn
2,7-3,9	Goed
4,0-6	Te grof

De fijnheidsmoduli voor de verschillende zandsoorten zijn samengevat in Tabel 3-6.

Tabel 3-6: Fijnheidsmoduli

Zandsoort	FM	Soort granulaat
Gerecycleerd betonzand 0/6,3	4,60	Te grof
Gerecycleerd betonzand 0/4	2,99	Goed
Chapyt 0/2	2,28	Te fijn
Chapyt 0/4	2,44	Te fijn
Recycled mix 0/2	2,48	Te fijn
Recycled mix 0/3	3,10	Goed
Rivierzand 0/4 26/90	3,15	Goed
Rivierzand 0/4 35/90	3,09	Goed
Mengzand 0/4 25/90	2,46	Te fijn
TV 189 min	4,50	Te grof
TV 189 max	2,72	Goed

3.2.7.2 Doorval bij 0,5 mm

Naast de fijnheidsmodulus kan ook de doorval van het granulaat bij een zeef met maaswijdte van 0,5 mm worden gebruikt om het granulaat te categoriseren. Deze classificatie is eveneens vastgelegd in de norm NBN EN 12620. Tabel 3-7 geeft een overzicht van de categorisering.

Tabel 3-7: Categorisering van fijn granulaat op basis van doorval van 0,5 mm

Doorval bij 0,5 mm [%]	Soort granulaat
0-14	Te grof
15-45	Goed
46-100	Te fijn

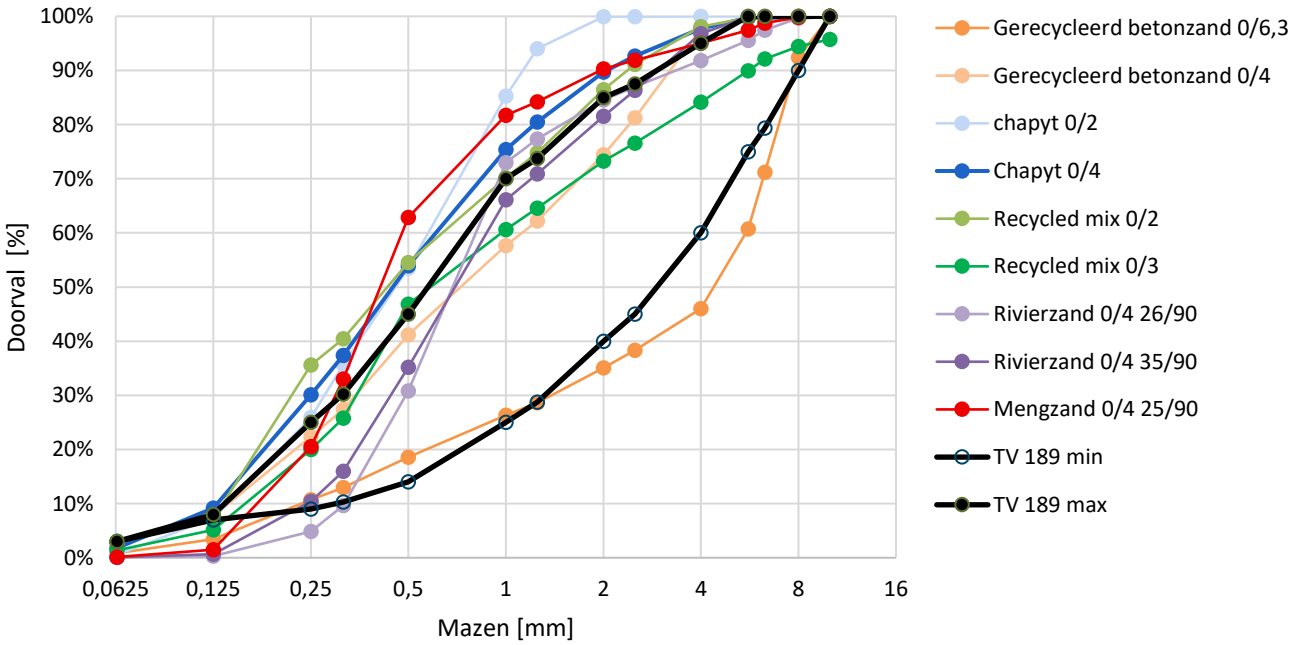
Tabel 3-8 geeft een overzicht van de doorval bij 0,5mm van de verschillende onderzochte zandsoorten:

Tabel 3-8: Doorval bij 0,5 mm

Zandsoort	Doorval bij 0,5 mm [%]	Soort granulaat
Gerecycleerd betonzand 0/6,3	19	Goed
Gerecycleerd betonzand 0/4	41	Goed
Chapyt 0/2	53	Te fijn
Chapyt 0/4	54	Te fijn
Recycled mix 0/2	55	Te fijn
Recycled mix 0/3	47	Te fijn
Rivierzand 0/4 26/90	31	Goed
Rivierzand 0/4 35/90	35	Goed
Mengzand 0/4 25/90	64	Te fijn
TV 189 min	14	Te grof
TV 189 max	45	Goed

3.2.8 Resultaten

In Figuur 3-11 zijn alle korrelverdelingsdiagrammen samengevat. De grafiek geeft een overzicht van de doorvalpercentages van de verschillende onderzochte zanden in relatie tot de maaswijdte van de zeven. Dit maakt het mogelijk om de korrelverdeling van de verschillende zanden te analyseren en onderlinge verschillen en overeenkomsten te vergelijken. De zwarte lijnen in de grafiek vertegenwoordigen de minimale en maximale grenzen volgens TV 189, wat dient als referentie voor het ideale zandskelet zoals hierboven werd aangehaald. De doorvallen voor deze krommen worden weergegeven in Tabel 3-3.



Figuur 3-11: Korrelverdelingsdiagrammen zanden

3.2.9 Conclusies

3.2.9.1 Conclusie korrelverdelingsdiagram

Uit de zeefanalyse blijkt dat de verschillende zandsoorten een uiteenlopende korrelverdeling vertonen. Aan de hand van de zeefkrommen is het zandskelet van zowel de rivierzanden als de gerecycleerde granulaten in kaart gebracht.

De materialen Rivierzand 0/4 26/90 en Rivierzand 0/4 35/90 vertonen een evenwichtige korrelverdeling, waarbij de doorval over de verschillende zeefmaten geleidelijk toeneemt. De gerecycleerde granulaten Recycled mix 0/2 en Recycled mix 0/3 vertonen een grotere fijne fractie ten opzichte van de rivierzanden. Vanaf een doorval van 1 mm benadert hun korrelverdelingsdiagram dat van de rivierzanden. Het materiaal Chapyt 0/2 bevat voornamelijk fijne deeltjes, wat betekent dat een groot percentage door de kleine zeefmaten valt. Chapyt 0/4 heeft daarentegen een iets grovere korrelverdeling en benadert opnieuw vanaf een doorval van 1 mm de rivierzanden. Het Mengzand 0/4 25/90 heeft een korrelverdeling die nauw aansluit bij de rivierzanden, maar over het algemeen een grotere fijne fractie vertoont. Het Gerecycleerd betonzand 0/6,3 heeft groot aandeel grovere korrels. Het Gerecycleerd betonzand 0/4 vertoont daarentegen een betere spreiding. Door het lager gehalte aan grove korrels neemt de doorval meer geleidelijk toe en valt de korrelverdeling perfect binnen de grenzen van TV 189.

Algemeen kan worden gesteld dat er combinaties van deze gerecycleerde granulaten zullen nodig zijn om tot een goede korrelverdeling te komen. Dit wordt nagegaan in "Hoofdstuk 5: Optimalisatie dekvloermengsel".

3.2.9.2 Verband fijnheidsmodulus en doorval bij 0,5 mm

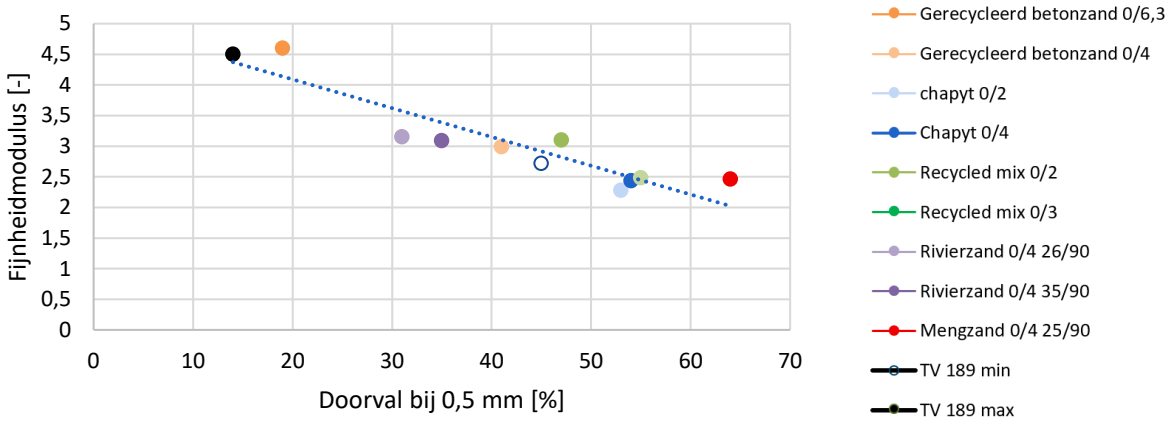
De fijnheidsmodulus en de doorval bij 0,5 mm worden met elkaar vergeleken. Ze worden weergegeven in onderstaande Tabel 3-9.

Tabel 3-9: Vergelijking fijnheidsmodulus en doorval bij 0,5 mm

Zandsoort	Doorval bij 0,5 mm [%]	Soort granulaat	FM [-]	Soort granulaat
Gerecycleerd betonzand 0/6,3	19	Goed	4,60	Te grof
Gerecycleerd betonzand 0/4	41	**Goed**	2,99	**Goed**
Chapyt 0/2	53	**Te fijn**	2,28	**Te fijn**
Chapyt 0/4	54	**Te fijn**	2,44	**Te fijn**
Recycled mix 0/2	55	**Te fijn**	2,48	**Te fijn**
Recycled mix 0/3	47	Te fijn	3,10	Goed
Rivierzand 0/4 26/90	31	**Goed**	3,15	**Goed**
Rivierzand 0/4 35/90	35	**Goed**	3,09	**Goed**
Mengzand 0/4	64	**Te fijn**	2,46	**Te fijn**

TV 189 min	14	**Te grof**	4,50	**Te grof**
TV 189 max	45	**Goed**	2,72	**Goed**

Uit de analyse van de fijnheidsmodulus en de doorval bij 0,5 mm blijkt dat er een omgekeerd verband tussen beide bestaat. Een hoge doorval bij 0,5 mm resulteert in een hogere hoeveelheid fijne korrels en bijgevolg in een lagere fijnheidsmodulus. De classificatie op basis van fijnheidsmodulus komt in veel gevallen overeen met de classificatie op basis van de doorval bij 0,5 mm, maar er zijn ook enkele afwijkingen.



Figuur 3-12: Fijnheidsmodulus in functie van de doorval bij 0,5 mm

Nagenoeg alle zandsoorten worden door beide analysemethoden eenduidig gecategoriseerd. Dit wijst op een goed verband tussen de twee benaderingen.

Toch zijn er enkele afwijkingen vastgesteld. Zo wordt Gerecycleerd betonzand 0/6,3 volgens de fijnheidsmodulus als te grof beschouwd, terwijl de doorval bij 0,5 mm binnen de categorie 'goed' valt. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat dit granulaat weliswaar een hoog aandeel grovere korrels bevat, maar tegelijkertijd ook voldoende materiaal rond 0,5 mm bezit. Een ander voorbeeld is Recycled mix 0/3, dat op basis van zijn fijnheidsmodulus als 'goed' wordt beoordeeld, terwijl de doorval net boven de grens ligt en het granulaat bijgevolg als 'te fijn' wordt ingedeeld. Dit wijst op een hoge fractie aan korrels net onder 0,5 mm, maar aangezien de doorval van 47% zich net boven de grenswaarde van 45% bevindt, wordt het verband toch als geldig beschouwd.

Op basis van deze analyse kan worden geconcludeerd dat beide parameters - fijnheidsmodulus en doorval bij 0,5 mm - waardevolle en complementaire inzichten bieden. De fijnheidsmodulus geeft een algemeen beeld van de korrelverdeling over het volledige bereik van zeven, terwijl de doorval bij 0,5 mm gericht is op een specifieke fractie die cruciaal kan zijn voor de verwerkbaarheid en de prestaties van het granulaat in een dekvloer.

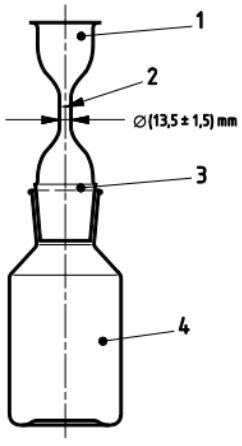
3.3 Waterabsorptie en volumemassa

In dit onderzoek is de waterabsorptie van het zand bepaald met behulp van twee verschillende methoden: de pyknometertest en de conductiviteitstest. Deze tests bieden inzicht in de hoeveelheid water die door het zand wordt opgenomen, wat een belangrijke factor is voor de verwerking en prestaties van het materiaal in dekvloeren. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen waterabsorptie en waterbehoefte. Granulaten gaan aan het oppervlak namelijk ook water opnemen, dit fenomeen wordt wateradsorptie genoemd. De waterbehoefte komt voort uit zowel de waterabsorptie, de wateradsorptie als water nodig voor een goede verwerkbaarheid. De waterabsorptie is afhankelijk van de porositeit van de granulaten. Porositeit verwijst naar het al dan niet aanwezig zijn van poriën en poriekanalen in de granulaten waarin water wordt vastgehouden. Daarnaast is de dichtheid van het zand enkel vastgesteld met de pyknometertest, aangezien deze methode specifiek ontworpen is om nauwkeurige dichtheidsmetingen uit te voeren. In deze paragraaf worden beide testmethoden uitgebreid besproken, inclusief hun werkingsprincipes, testprocedures en resultaten. Vervolgens worden deze resultaten geanalyseerd en met elkaar vergeleken om een duidelijk beeld te krijgen van de waterabsorptie-eigenschappen van het zand. Tot slot wordt ook de waterabsorptie na 5 minuten getest. Deze parameter is nodig om later de effectieve W/C-factor te berekenen.

3.3.1 Pyknometertest

3.3.1.1 Wat is de pyknometertest?

Een pyknometer is een glazen instrument waarvan het volume nauwkeurig bekend is, dat wordt gebruikt voor het bepalen van de soortelijke massa van mengsels. Figuur 3-13geeft een schematische weergave van een pyknometer. Figuur 3-14 toont de gebruikte pyknometers bij het uitvoeren van de proef.



Figuur 3-13: Pyknometer (NBN EN 1097-6, 2013)



Figuur 3-14: Gebruikte pyknometers

3.3.1.2 Norm NBN EN 1097-6

De norm NBN EN 1097-6 beschrijft de methode voor het bepalen van de volumemassa en de waterabsorptie van toeslagmaterialen, zoals zand, grind en gerecycleerde toeslagmaterialen. Deze tests zijn belangrijk om de fysieke eigenschappen van deze materialen vast te stellen, die een grote invloed hebben op de prestaties van bouwmaterialen zoals beton en dekvloeren. (NBN EN 1097-6, 2013)

De norm is van toepassing op natuurlijke, gerecycleerde en kunstmatige toeslagmaterialen. Het gaat bijvoorbeeld om grind, zand en andere soorten granulaten die worden gebruikt in constructies zoals wegen, funderingen en beton. De volumemassa en wateropname worden bepaald in verschillende toestanden, afhankelijk van hoe het materiaal wordt toegepast. (NBN EN 1097-6, 2013)

3.3.1.3 Uitvoering

1) Voorbereiding van het monster

Er wordt een monster van het granulaat genomen en gewassen het op een 4 mm zeef en een 0,063 mm zeef om de grotere deeltjes (groter dan 4 mm) en de fijnere deeltjes (kleiner dan 0,063 mm) te verwijderen. De deeltjes die op de 4 mm zeef blijven en de deeltjes die door de 0,063 mm zeef vallen mogen weggegooid worden. Zorg ervoor dat de massa van het monster tussen 0,063 mm en 4 mm minimaal 300 g bedraagt. De totale massa van het monster tussen 0,063 mm en 4 mm wordt aangeduid als M_4.

2) Voorbereiding van de test

De pyknometer wordt vervolgens met water tot het aangegeven streepje gevuld. De massa van de pyknometer met het water erin wordt gewogen en genoteerd. Dit is M_3. De pyknometer wordt daarna leeggegoten in de gootsteen, zodat het water wordt verwijderd.

3) Weken van het monster

De pyknometer wordt gevuld met de afgewogen massa uit stap 1. Vul vervolgens de pyknometer met water tot aan het streepje. Alle ingesloten lucht dient te worden verwijderd door de pyknometer voorzichtig te rollen of te schudden. Als alle lucht uit de pyknometer is, wordt deze opgevuld met water tot aan het streepje. Laat het mengsel nu 24 uur weken in de pyknometer.



Figuur 3-15: Gevulde pyknometer met Gerecycleerd betonzand 0/4 en Chapyt 0/4

4) Droging

Nadat het mengsel 24 uur heeft geweekt, wordt het mengsel gewogen met de pyknometer. De massa die hierbij wordt gemeten, wordt aangeduid als M_2. Vervolgens wordt het mengsel uit de pyknometer gegoten in een ijzeren bak. Het is belangrijk om ervoor te zorgen dat alle deeltjes uit de pyknometer verwijderd zijn, zodat ze volledig in de bak terechtkomen. Dit is cruciaal om ervoor te zorgen dat de metingen nauwkeurig zijn en geen deeltjes achterblijven die de resultaten kunnen beïnvloeden.



Figuur 3-16: IJzeren bak gevuld met de mengsels

Nadat de bak met het mengsel in de oven is geplaatst bij een temperatuur van ongeveer 105 °C, wordt het zand gedroogd totdat het bijna volledig droog is. Zodra het zand bijna droog is, wordt de kegeltest uitgevoerd. Hierbij wordt eerst de afgeknotte kegelmal gevuld met het ovengedroogde zand. Daarna wordt het zand 25 keer verdicht door het gewicht te laten vallen onder zijn eigengewicht. Het is belangrijk om het gewicht recht op het zand te zetten en niet te laten vallen, zodat de verdichting gelijkmatig gebeurt. Het gewicht en de afgeknotte kegelmal worden weergegeven in Figuur 3-17 en Figuur 3-18.

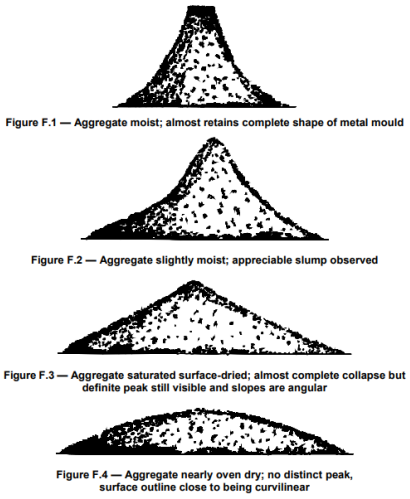


Figuur 3-17: Afgeknotte kegel (bovenaanzicht) met gewicht



Figuur 3-18: Afgeknotte kegel (onderaanzicht)

Nadat de zandkegel is verdicht, wordt de kegelmal voorzichtig opgeheven. Vervolgens wordt de helling beoordeeld door de operator. Als de helling van de ingestorte zandkegel overeenkomt met de helling van F2-F3 in Figuur 3-19, wordt de totale massa van het zand gewogen. Deze gemeten massa wordt aangeduid als M_1.



Figuur 3-19: Helling ingestorte zandkegel (NBN EN 1097-6, 2013)

Op de onderstaande figuren is een voorbeeld weergegeven van de kegeltest. In Figuur 3-20is de top van de kegel nog afgeplat, wat aangeeft dat het mengsel nog te nat is en dus verder gedroogd moet worden. In Figuur 3-21is de top van de kegel niet afgeplat, wat betekent dat het zand nu voldoende gedroogd is. Op dit punt kan de massa van het zand gewogen worden.



Figuur 3-20: Foute helling volgens Figuur 3-19



Figuur 3-21: Goede helling volgens Figuur 3-19

Zoals hierboven te zien is, is deze proef behoorlijk subjectief aangezien de uitkomst sterk afhankelijk is van de bevindingen van de persoon die de test uitvoert. De ene persoon zal de helling van de kegel misschien nog niet goed genoeg vinden, terwijl de ander het wel als een goede helling beschouwt. Dit kan leiden tot een afwijkende waarde voor de massa M_1. Hoe sneller de helling als goed wordt bevonden, hoe hoger massa M_1 zal zijn. Dit resulteert in een hogere waterabsorptie (WA) en een lagere absolute dichtheid. De resultaten van de pyknometertest worden weergegeven in onderstaande Tabel 3-10.

Tabel 3-10: Massa's pyknometertest

Zandsoort	M_1 [g]	M_2 [g]	M_3 [g]	M_4 [g]
Gerecycleerd betonzand 0/4	908,04	2527,36	2008,42	842,26
Chapyt 0/2	669,67	2182,00	1908,79	581,83
Chapyt 0/4	734,52	2222,62	1908,79	2008,42
Recycled mix 0/3	825,72	3972,00	3495,87	800,03
Recycled mix 0/2	750,53	2459,20	2026,65	727,39
Rivierzand 0/4 26/90	1558,28	4464,50	3495,87	1567,86
Rivierzand 0/4 35/90	1030,33	2663,16	2026,65	1029,43
Mengzand 0/4 25/90	1115,02	2722,50	2008,42	1116,83

Omdat de test niet volledig objectief is en de waarden daardoor mogelijk onnauwkeurig kunnen zijn, wordt de waterabsorptie ook bepaald met een nieuwe methode: de conductiviteitstest.

3.3.1.4 Berekening

Als alle massa's bekend zijn, kunnen met behulp van de onderstaande formules zowel de dichtheden als de waterabsorptie van het materiaal worden berekend. Het bepalen van deze eigenschappen is essentieel voor een grondige analyse van het materiaalgedrag onder verschillende omstandigheden.

De dichtheid geeft informatie over de massa per eenheid van het volume. De waterabsorptie, aan de andere kant, is een maat voor de hoeveelheid water die door het materiaal kan worden opgenomen. Voor de definitie van de dichtheden is de terminologie uit de eerder vermeldde norm gevolgd. De norm hanteert de benamingen "*apparent particle density*", in het Nederlands gangbaar als "werkelijke volumemassa", en "*oven-dried particle density*", in het Nederlands gangbaar als "schijnbare volumemassa". De dichtheden worden als volgt gedefinieerd en berekend:

- *Apparent particle density* [kg/m³]: Verhouding verkregen door de oven-droge massa van een granulaat te delen door het volume dat het inneemt in water, inclusief het volume van eventuele interne afgesloten poriën, maar exclusief het volume van water in enig toegankelijke holtes.

$$\rho_a = \rho_w * \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \left[\frac{kg}{m^3}\right] \qquad 3\text{-}7$$

  Met:

  ρ_a [kg/m³]: *Apparent particle density*

  ρ_w [kg/m³]: Dichtheid van water = 1000kg/m³

  M_2 [g]: Massa van de pyknometer met het monster van verzadigd granulaat en water

  M_3 [g]: Massa van de pyknometer gevuld met water

  M_4 [g]: Massa van het in de oven gedroogde testmonster

  Voor Gerecycleerd betonzand 0/4 is dit:

$$\rho_a = 1000kg/m^3 * \frac{842{,}26g}{842{,}26g - (2527{,}36g - 2008{,}42g)} = 2605kg/m^3$$

- *Oven-dried particle density* [kg/m³]: Verhouding verkregen door de oven-droge massa van het granulaat te delen door het volume dat het inneemt in water, inclusief het volume van zowel interne afgesloten holtes als watertoegankelijke holtes.

$$\rho_{rd} = \rho_w * \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \left[\frac{kg}{m^3}\right] \qquad 3\text{-}8$$

  Met:

  ρ_{rd} [kg/m³]: *Oven-dried particle density*

  ρ_w [kg/m³]: Dichtheid van water = 1000kg/m³

  M_1 [g]: Massa van het verzadigde en oppervlak gedroogde granulaat in lucht

  M_2 [g]: Massa van de pyknometer met het monster van verzadigd granulaat en water

M_3 [g]: Massa van de pyknometer gevuld met water

M_4 [g]: Massa van het in de oven gedroogde testmonster

Voor Gerecycleerd betonzand 0/4 is dit:

$$\rho_{rd} = 1000kg/m^3 * \frac{842{,}26g}{908{,}04g - (2527{,}36g - 2008{,}42g)} = 2164kg/m^3$$

- *Saturated and surface-dried particle density* [kg/m³]: Verhouding verkregen door de som van de oven-droge massa van een granulaat en de massa van het water in de watertoegankelijke holtes te delen door het volume dat het inneemt in water, inclusief het volume van zowel interne afgesloten holtes als watertoegankelijke holtes.

$$\rho_{SSD} = \rho_w * \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \left[\frac{kg}{m^3}\right] \quad \textit{3-9}$$

Met:

ρ_{SSD} [kg/m³]: *Saturated and surface-dried particle density*

ρ_w [kg/m³]: Dichtheid van water = 1000kg/m³

M_1 [g]: Massa van het verzadigde en oppervlak gedroogde granulaat in lucht

M_2 [g]: Massa van de pyknometer met het monster van verzadigd granulaat en water

M_3 [g]: Massa van de pyknometer gevuld met water

Voor Gerecycleerd betonzand 0/4 is dit:

$$\rho_{SSD} = 1000kg/m^3 * \frac{908{,}04g}{908{,}04g - (2527{,}36g - 2008{,}42g)} = 2333kg/m^3$$

- Waterabsorptie na 24 uur [%]: Dit verwijst naar de hoeveelheid water die het testmonster kan opnemen in 24 uur als het volledig ondergedompeld is in water. Deze eigenschap is belangrijk voor het beoordelen van de porositeit en het absorptievermogen van het monster, wat invloed kan hebben op de prestaties in toepassingen zoals beton en dekvloeren.

$$WA_{24} = \frac{100 * (M_1 - M_4)}{M_4} [\%] \quad \textit{3-10}$$

Met:

WA_{24}[%]: Waterabsorptie na 24 uur

M_1 [g]: Massa van het verzadigde en oppervlak gedroogde granulaat in lucht

M_4 [g]: Massa van het in de oven gedroogde testmonster

Voor Gerecycleerd betonzand 0/4 is dit:

$$WA_{24} = \frac{100 * (908{,}04g - 842{,}26g)}{842{,}26g} = 7{,}81\%$$

In Tabel 3-11 worden alle dichtheden en de waterabsorptie na 24 uur van alle zanden samengevat.

Tabel 3-11: Dichtheden pyknometertest

Zandsoort	ρ_a [kg/m³]	ρ_{rd} [kg/m³]	ρ_{SSD} [kg/m³]	WA_{24} [%]
Gerecycleerd betonzand 0/4	2605	2164	2334	7,81
Chapyt 0/2	1857	1492	1689	13,15
Chapyt 0/4	1900	1575	1746	10,85
Recycled mix 0/3	2467	2288	2360	3,21
Recycled mix 0/2	2470	2287	2361	3,18
Rivierzand 0/4 26/90	2616	2658	2642	-0,61
Rivierzand 0/4 35/90	2620	2613	2616	0,09
Mengzand 0/4 25/90	2773	2785	2781	-0,16

In bovenstaande Tabel 3-11 worden de *apparent density*, *oven-dried particle density* en de *saturated and surface-dried density* weergegeven. De dichtheden van de rivierzanden en het Mengzand vertonen weinig tot geen verschillen. Dit toont aan dat er geen interne poriën aanwezig zijn in de natuurlijke zandkorrels. Er zijn met andere woorden geen watertoegankelijke poriën, wat resulteert in een nagenoeg gelijke waarde voor deze drie dichtheden. Voor de gerecycleerde granulaten geldt een andere waarneming. De *apparent density* is merkelijk hoger. Dit is een gevolg van het aanwezig zijn van interne poriën bij de gerecycleerde granulaten. Het verschil tussen de *oven-dried density* en de *saturated and surface-dried density* geeft de waterabsorptie van de zandsoorten weer.

3.3.1.5 Conclusie

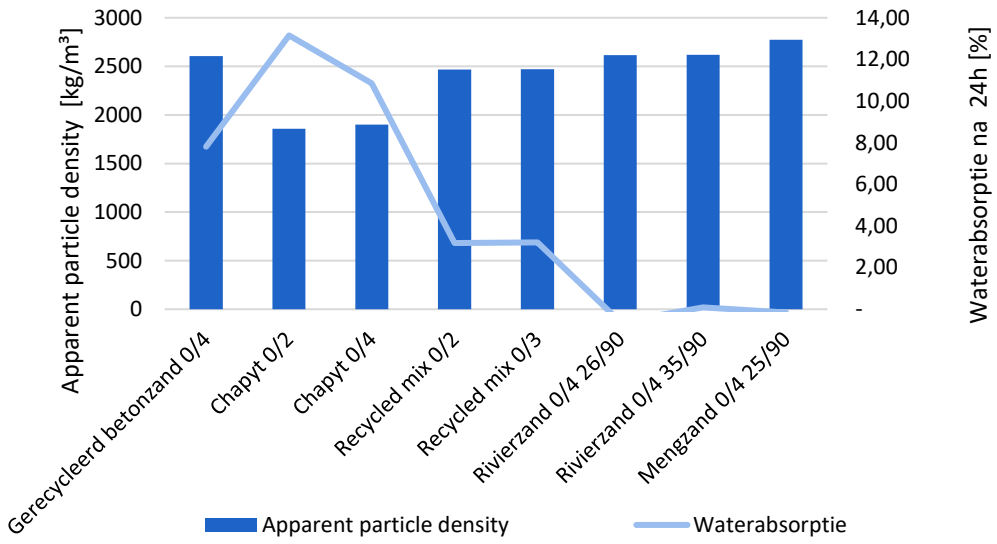
A) Verband tussen waterabsorptie en dichtheid

In onderstaande Tabel 3-12 worden de resultaten van de voornaamste eigenschappen uit de zonet besproken pyknometertest weergegeven.

Tabel 3-12: Voornaamste eigenschappen

Zandsoort	ρ_a [kg/m³]	$WA_{pyknometer}$ [%]
Gerecycleerd betonzand 0/4	2605,03	7,81
Chapyt 0/2	1857,48	13,15
Chapyt 0/4	1899,82	10,85
Recycled mix 0/3	2467,07	3,21
Recycled mix 0/2	2469,99	3,18
Rivierzand 0/4 26/90	2616,46	-0,61
Rivierzand 0/4 35/90	2619,95	0,09
Mengzand 0/4 25/90	2773,01	-0,16

In onderstaande grafiek worden de resultaten uit Tabel 3-12 weergegeven.



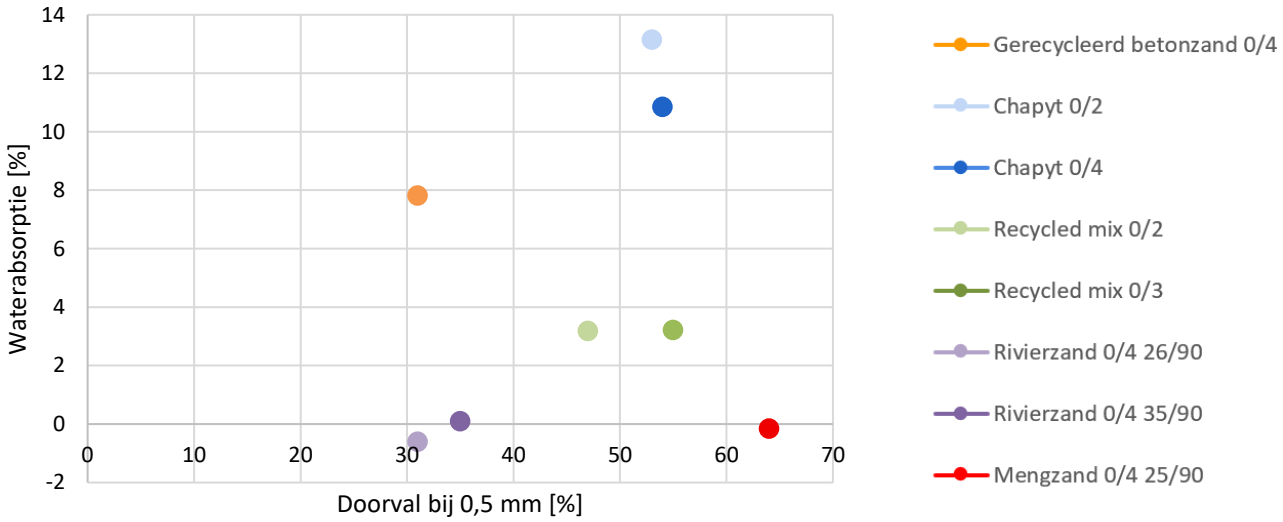
Figuur 3-22: Dichtheid en waterabsorptie

Uit de tabel en grafiek kunnen verschillende conclusies worden getrokken over de relatie tussen de *apparent particle density* en waterabsorptie van verschillende zandsoorten.

Allereerst valt op dat er een omgekeerde relatie lijkt te zijn tussen de *apparent particle density* en waterabsorptie na 24 uur. Dit is duidelijk te zien bij Chapyt 0/2, dat de laagste *apparent particle density* heeft (1857,48 kg/m³) en tegelijkertijd de hoogste waterabsorptie vertoont (13,15 %). Daartegenover staat Mengzand 0/4 25/90, dat de hoogste *apparent particle density* heeft (2773,01 kg/m³) en een waterabsorptie heeft van -0,16 %, wat als nul mag beschouwd worden. Ook valt op dat rivierzand de hoogste *apparent particle density* heeft en vrijwel geen water absorbeert. Zo heeft Rivierzand 0/4 26/90 een *apparent particle density* dichtheid van 2616,46 kg/m³ en een waterabsorptie van -0,61 %, terwijl Rivierzand 0/4 35/90 een *apparent particle density* van 2619,95 kg/m³ en een waterabsorptie van 0,09 % heeft. Omdat negatieve waterabsorptiewaarden als nul mogen worden beschouwd, betekent dit dat rivierzand in de praktijk geen vocht opneemt. Dit voldoet aan de verwachtingen aangezien natuurlijk zand verondersteld wordt geen inwendige poriën te hebben. Er kan bijgevolg geen water geabsorbeerd worden. De waterabsorptie-waarden die negatief uitvallen kunnen worden toegeschreven aan meetonnauwkeurigheden. Verder blijkt dat Recycled mix relatief hoge *apparent particle densities*, heeft en een relatief lage waterabsorptie. Zo heeft Recycled mix 0/3 een *apparent particle density* van 2469,99 kg/m³ en een waterabsorptie van 3,21 %, terwijl Recycled mix 0/2 een vergelijkbare *apparent particle density* van 2467,07 kg/m³ en een waterabsorptie van 3,18 % heeft. Tot slot bevindt het Gerecycleerd betonzand 0/4 zich qua eigenschappen tussen Chapyt-zand en Recycled mix-zand in. Gerecycleerd betonzand 0/4 heeft een *apparent particle density* van 2605,04 kg/m³ en een waterabsorptie van 7,81 %, wat hoger is dan Recycled mix-zand maar lager dan Chapyt-zand.

B) Verband tussen waterabsorptie en doorval bij 0,5 mm

Er wordt nagegaan of de waterabsorptie een verband heeft met de doorval bij 0,5 mm. De waterabsorptie wordt in functie van de doorval bij 0,5 mm weergegeven in Figuur 3-11.



3-11: Waterabsorptie in functie van de doorval bij 0,5 mm

Er is geen verband te zien tussen de doorval bij 0,5 mm en de waterabsorptie. Bijgevolg kan geconcludeerd worden dat de waterabsorptie enkel afhankelijk is van het type en de afkomst van het granulaat. Gerecycleerde granulaten hebben een bepaalde mate van porositeit, waar natuurlijke zanden dit niet vertonen, zoals vastgesteld bij het vergelijken van de verschillende opgemeten dichtheden. De hoge waterabsorptie waarde voor de Chapyt-zanden wordt verklaard door hun afkomst van het poreuze cellenbeton. De hogere waterabsorptie van gerecycleerd betonzand ten opzichte van Recycled mix-zand kan worden verklaard door het feit dat aanwezige mortelresten of cementpasta in het gerecycleerd betonzand water opnemen, dit wordt geverifieerd aan de hand van een optische microscopie in '3.6 Optische microscopie'. De porositeit van beide zanden ontstaat wellicht door het ontstaan van microscheurtjes tijdens het breken van het materiaal.

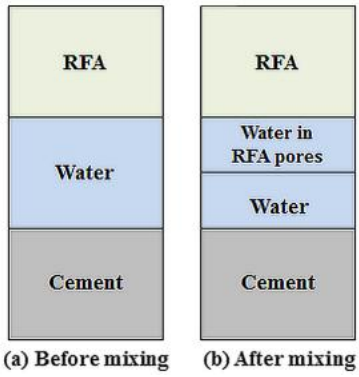
3.3.2 Waterabsorptie na 5 min

De waterabsorptie na vijf minuten wordt eveneens bepaald. Dit aangezien deze informatie essentieel is om het wateropnemend vermogen van de granulaten tijdens het mengen in te schatten. Deze hoeveelheid wordt later in mindering gebracht op de toegevoegde W/C-factor om zo de effectieve W/C-factor te berekenen. Dit is van belang omdat droge granulaten tijdens het mengen niet in staat zijn om evenveel water op te nemen als wanneer ze gedurende 24 uur in contact zouden zijn met water.

3.3.2.1 Theoretisch concept

Figuur 3-23 toont het effect van RFA (gerecycleerde fijne toeslagmaterialen) op de verdeling van water in een vers dekvloermengsel, zowel voor als na het mengen van de componenten. In het linkse deel, aangeduid als "Before mixing", bevinden de drie hoofdcomponenten zich nog in hun oorspronkelijke toestand. De RFA is droog en bevindt zich bovenaan. Daaronder bevindt zich het mengwater, dat volledig beschikbaar is. Onderaan ligt het cement, dat nog niet gereageerd heeft. In deze fase is al het water vrij beschikbaar om een reactie met het cement aan te gaan. (Li et al., 2019) In het rechterdiagram, "After mixing", is het duidelijk te zien dat de verdeling van het water is veranderd. Zodra het droge RFA wordt gemengd met water en cement, begint het RFA deel van het mengwater op te nemen in zijn poriën. Dit geabsorbeerde water wordt aangegeven als "Water in RFA pores". Het resterende vrije water, dat nog beschikbaar is voor de hydratatiereactie met cement, is afgenomen. Het cement bevindt zich nog steeds onderaan, maar heeft nu minder vrij water om mee te reageren. (Li et al., 2019)

Deze verandering in waterverdeling heeft directe gevolgen voor de effectieve W/C-factor. Doordat een deel van het water wordt vastgehouden in de poriën van de RFA, is er minder water beschikbaar voor de hydratatie van het cement, wat invloed kan hebben op de verwerkbaarheid en sterkte. (Li et al., 2019)



Figuur 3-23: Effect van de absorptie door RFA op de verdeling van het water in het verse dekvloermengsel (Li et al., 2019)

3.3.2.2 Uitvoering

1) Voorbereiding:

Er wordt 100 ±10 g oven gedroogd zand afgewogen en in een maatkolf van 250 ml gebracht. Verhoudingsgewijs kunnen ook andere maatkolven gebruikt worden. Zo kan voor een kolf van 1000 ml een massa van 400 ±10 g afgewogen worden. De maatkolf met het droge monster wordt weergegeven in Figuur 3-24.



Figuur 3-24: Maatkolf met droge monster

2) Vullen tot ijkmarkering:

Er wordt vervolgens water toegevoegd tot net onder de ijkmarkering en voorzichtig geschud om luchtbellen te verwijderen. Daarna wordt het water bijgevuld tot het waterniveau zich exact op de ijkmarkering bevindt. Dit moment is tijdstip nul (t=0). Figuur 3-25 geeft de maatkolf weer, gevuld tot het ijkmarkering.



Figuur 3-25: Maatkolf opgevuld tot ijkmarkering

3) Metingen over de tijd:

Laat de meetkolf staan en voeg na 5, 10, 20, 30, 40, 50 en 60 min water toe om het vloeistofniveau gelijk te houden aan dat van tijdstip nul. De hoeveelheid extra water geeft aan hoeveel water het zand geabsorbeerd heeft gedurende de wachttijd, deze massa wordt weergegeven als $\Delta m_{absorptie}$ en wordt gezien als meting j. Bijgevolg wordt de formule:

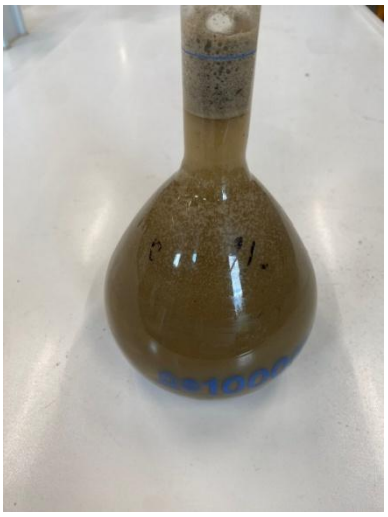
$$m_j = m_{j-1} + \Delta m_{absorptie}\ [g] \qquad 3\text{-}11$$

Met:

m_j [g]: Totale massa in de meetkolf op tijdstip X; meting j

m_t [g]: Totale massa in de meetkolf bij de vorige meting; meting j-1

$\Delta m_{absorptie}$ [g]: Hoeveelheid water geabsorbeerd door granulaat tussen 2 metingen



Figuur 3-26: Water geabsorbeerd door het granulaat

4) Bepaling van de absorptie:

De totale waterabsorptie op basis van de massatoename van de maatkolf tussen nul en X minuten kan worden achterhaald. Het bepalen van de waterabsorptie gebeurt aan de hand van volgende formule:

$$WA_{X\ min} = \frac{m_{t=X} - m_{t=0}}{m_{t=0}} * 100\ \%\ [\%] \qquad 3\text{-}12$$

Met:

$WA_{x\ min}$ [%]: Waterabsorptie na X minuten

$m_{t=X}$ [g]: Totale massa op tijdstip t=X

$m_{t=0}$ [g]: Totale massa op tijdstip t=0

3.3.2.3 Resultaten

De verkregen resultaten voor de waterabsorptie na 5 minuten worden weergegeven in Tabel 3-13.

Tabel 3-13: Waterabsorptie na 5 min

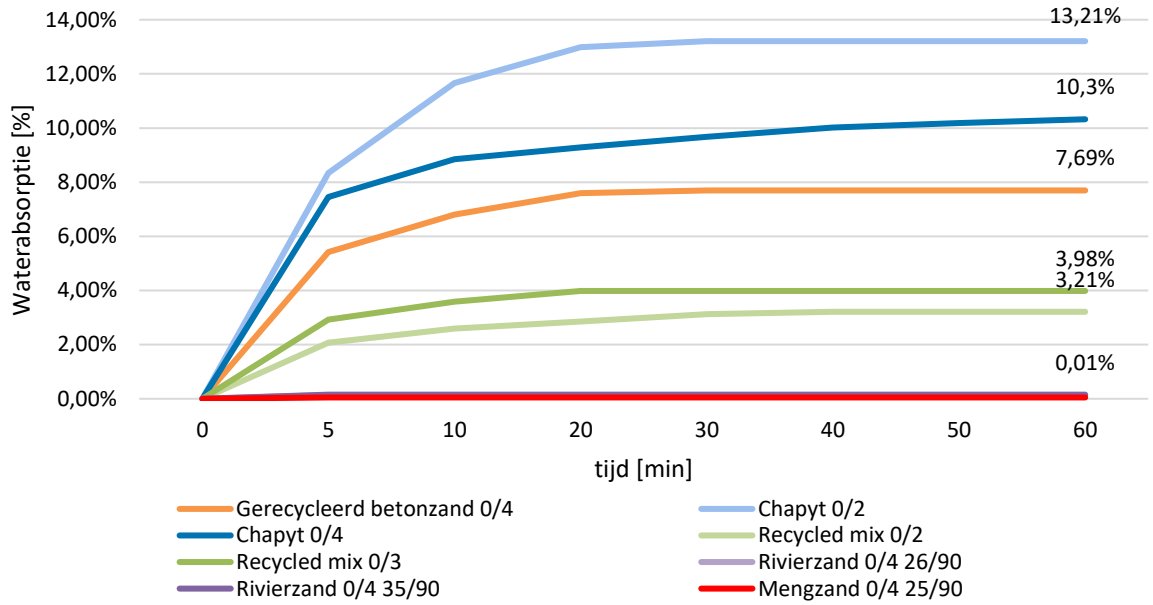
Zandsoort	**Waterabsorptie na 5 min [%]**
Gerecycleerd betonzand 0/4	3,60
Chapyt 0/2	8,34
Chapyt 0/4	7,45
Recycled mix 0/3	2,07
Recycled mix 0/2	2,92
Rivierzand 0/4 26/90	0,14
Rivierzand 0/4 35/90	0,15
Mengzand 0/4 25/90	0,05

Tabel 3-14 geeft het waterabsorptieverloop in functie van de tijd weer voor Recycled mix 0/3. Het waterabsorptieverloop van de andere zanden zijn terug te vinden in Bijlage B.

Tabel 3-14: WA-verloop Recycled mix 0/3

Tijd [min]	m_j [g]	$\boldsymbol{\Delta m_{absorptie}}$ [g]	$WA_{X\ min}$ [%]
0	401,55	0,00	0,00
5	413,29	11,74	2,92
10	415,97	2,68	3,59
20	417,54	1,57	3,98
30	417,54	0,00	3,98
40	417,54	0,00	3,98
50	417,54	0,00	3,98
60	417,54	0,00	3,98

Onderstaande grafiek toont het verloop van de waterabsorptie van alle acht zanden in functie van de tijd.



Figuur 3-27: WA-verloop

3.3.2.4 Conclusie

A) Waterabsorptie na 5 minuten

De resultaten uit Tabel 3-13 tonen aan dat Chapyt 0/2 (8,34%) en Chapyt 0/4 (7,45%) het hoogste wateropnemend vermogen hebben na vijf minuten. Ook Gerecycleerd betonzand 0/4 vertoont met 5,42% een aanzienlijke opnamecapaciteit, wat duidt op de poreuze structuur van deze gerecycleerde granulaten. De Recycled mix-zandsoorten hebben hiermee vergeleken een lagere waarde: Recycled mix 0/2 neemt 2,92% op, terwijl Recycled mix 0/3 2,07% absorbeert.

Aan de andere kant nemen natuurlijke zandsoorten zoals Rivierzand 0/4 26/90 (0,14%), Rivierzand 0/4 35/90 (0,15%) en Mengzand 0/4 25/90 (0,05%) vrijwel geen water op binnen deze korte periode. Deze lage waarden liggen binnen de verwachtingen en wijzen op een zeer dichte korrelstructuur met een minimaal poriënvolume, wat resulteert in een verwaarloosbare initiële waterabsorptie.

B) Waterabsorptie in functie van de tijd

Tabel 3-14 geeft naast de waterabsorptie na 5 minuten, ook de waarden voor de waterabsorptie na 10, 20, 30, 40, 50 en 60 minuten weer. De resultaten van de andere zandsoorten worden opgenomen in Bijlage B. Uit het verloop van de waterabsorptie in functie van de tijd, weergegeven in de samenvattende grafiek als Figuur 3-27, blijkt dat de meeste wateropname bij de sterk absorberende granulaten reeds binnen de eerste 5 tot 10 minuten plaatsvindt. Daarna verloopt de opname trager en vlakt de curve merkbaar af. Vooral bij de gerecycleerde granulaten en Chapyt-zanden is een asymptotische benadering zichtbaar vanaf ongeveer 30 minuten, wat wijst op een verzadiging van de poriënstructuur. De asymptotische waarde wordt

weergegeven aan de hand van de gegevenslabels op Figuur 3-27. Deze observatie werd ook gemaakt in Li et al. (2019).

C) Vergelijking waterabsorptie 5 minuten en 24 uur

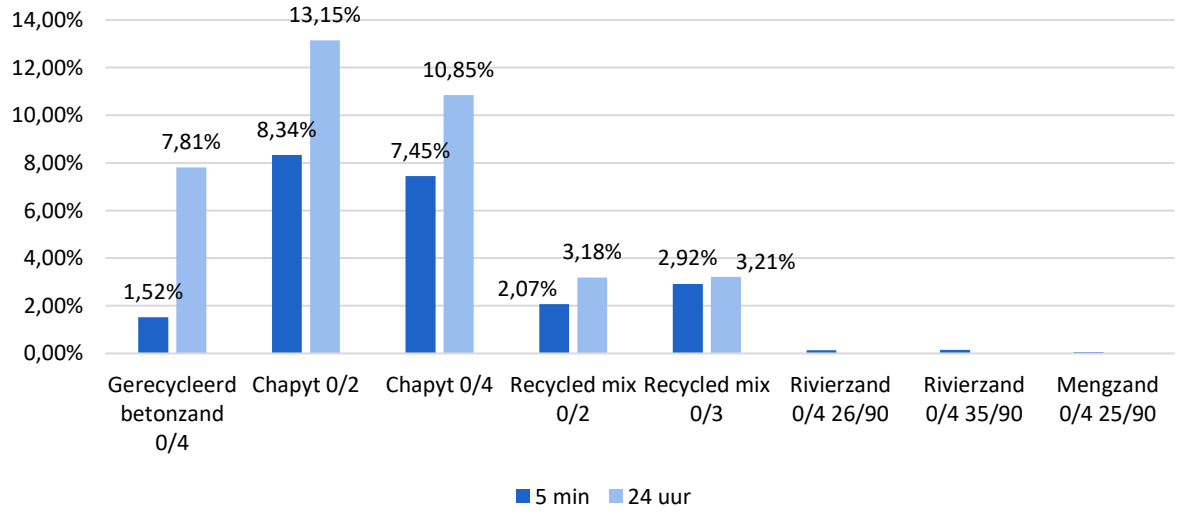
Wanneer deze bevindingen in verband worden gebracht met de waterabsorptie over langere tijd WA_{24}, valt op dat de zandsoorten die veel water opnemen na 5 minuten – zoals Chapyt 0/2 (13,15%) en gerecycleerd betonzand (7,81%) – ook op 24 uur een hoge waterabsorptie hebben. Een vergelijkende tabel en staafdiagram worden weergegeven in respectievelijk Tabel 3-15 en Figuur 3-28 en geven deze trend weer. Dit is belangrijk, omdat het aantoont dat de 5-minutenwaarde een goede benadering is van het kritieke opnamemoment tijdens het mengen.

Samengevat onderstrepen deze waarnemingen het belang van een aangepaste benadering bij het gebruik van poreuze of gerecycleerde zandsoorten.

Tabel 3-15: Vergelijking WA na 5 min en WA na 24 uur

Zandsoort	Waterabsorptie na 5 min [%]	Waterabsorptie na 24 uur [%]
Gerecycleerd betonzand 0/4	5,42	7,81
Chapyt 0/2	8,34	13,15
Chapyt 0/4	7,45	10,85
Recycled mix 0/3	2,07	3,21
Recycled mix 0/2	2,92	3,18
Rivierzand 0/4 26/90	0,14	-0,61
Rivierzand 0/4 35/90	0,15	0,09
Mengzand 0/4 25/90	0,05	-0,16

Onderstaand staafdiagram vergelijkt de waterabsorptie na 5 min en na 24 uur.



Figuur 3-28: Staafdiagram WA na 5 minuten en 24 uur

3.3.3 Conductiviteitstest

3.3.3.1 Doel en principe

De elektrische conductiviteitstest is gebaseerd op het principe dat de elektrische geleidbaarheid toeneemt naarmate het vochtgehalte aan het oppervlak van de granulaten stijgt. Wanneer het oppervlak volledig ontdaan is van water door droging van het monster, treedt er een abrupte daling op in de elektrische conductiviteit. Dit markeert het moment waarop al het oppervlaktewater is verdwenen en er enkel nog water aanwezig is in de poriën of holtes van de granulaten. In deze toestand neemt de geleidbaarheid aanzienlijk af, aangezien droge, vaste granulaten een veel lagere elektrische transportcapaciteit bezitten dan natte oppervlakken. (Sosa et al., 2018)

Door het uitzetten van de conductiviteit en het vochtgehalte van het monster in een semi-logaritmische grafiek, ontstaan twee duidelijk te onderscheiden rechte lijnen. De overgang tussen beide lijnen definieert de zogenaamde SSD-conditie (Surface Saturated Dry).

3.3.3.2 Proefopstelling

Voor de test word gebruikgemaakt van een U-vormige meetcel waarin het monster wordt geplaatst (Sosa et al., 2018). Dit ontwerp zorgt ervoor dat er geen rechte hoeken aanwezig waren die de metingen konden verstoren. De interne elektroden zijn vervaardigd uit roestvrij staal. Voor de metingen wordt gebruik gemaakt van een stroombron op wisselstroom en twee multimeters, verbonden met de meetcel. De zonet beschreven benodigdheden zijn zichtbaar in Figuur 3-29, Figuur 3-30 geeft de meetcel weer.



Figuur 3-29: Benodigdheden conductiviteitstest

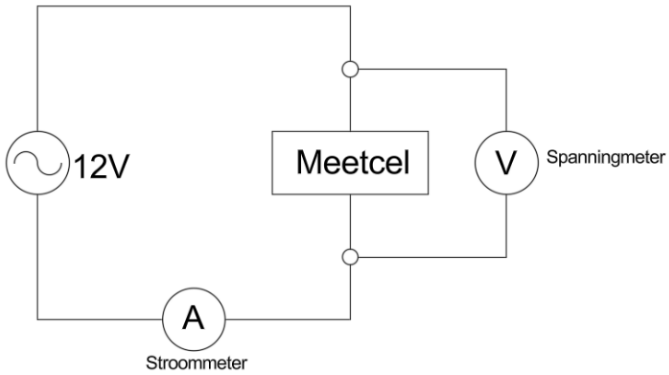


Figuur 3-30: U-vormige meetcel

De uiteindelijke proefopstelling waarin alle onderdelen met elkaar worden verbonden wordt weergegeven in Figuur 3-31 en schematisch in Figuur 3-32.



Figuur 3-31: Proefopstelling



Figuur 3-32: Schematische weergave proefopstelling

3.3.3.3 Uitvoering

Het doorlopen van de proefmethode gebeurt op basis van de handleiding die werd verkregen vanuit VITO (Vlaams Instituut voor Technisch Onderzoek), genaamd *'Water absorption of sand by electrical conductivity method'*.

1) Monstername en voorbereiding

Eerst wordt een representatieve hoeveelheid van het zand afgewogen. Er wordt aangeraden steeds 1,5 kg droog materiaal af te wegen van de verschillende zandsoorten. Vervolgens wordt het monster voorbereid door water toe te voegen tot dat het goed verzadigd is. Dit gebeurt bij kamertemperatuur van (22 ± 3) °C. Ingesloten lucht dient te worden verwijderd door de container voorzichtig te kantelen en zacht te rollen of te schudden. Een te grote hoeveelheid water heeft als risico de fijnste deeltjes granulaat weg te spoelen, wat de representativiteit van het monster aantast. Bovendien verlengt een grotere hoeveelheid water de droogtijd van het monster na de verzadigingsfase.

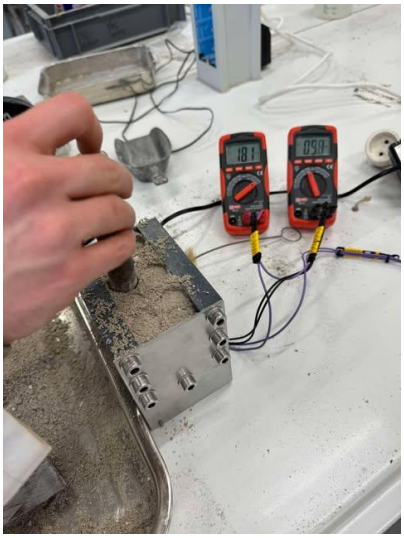
2) Uitvoering

De droogprocedure volgt dezelfde methode als de methode die gebruikt wordt voor de bepaling van de waterabsorptie van zand volgens EN 1097-6 zoals eerder beschreven, waarbij warme lucht wordt toegepast. Hiervoor wordt het monster gelijkmatig over de bodem van de container verspreid en geleidelijk gedroogd met een luchtdroger. Tijdens het drogen dient het monster regelmatig geroerd te worden om een gelijkmatige droging van het monster te garanderen. Het gehele monster wordt blootgesteld aan een zachte stroom warme lucht, waardoor het oppervlaktevocht verdampt. Het monster kan op verschillende manieren worden gedroogd. Dit kan door gebruik te maken van een oven of luchtdroger. De keuze dient zorgvuldig te worden gemaakt, en het drogen van het monster moet gemonitord worden door de operator, zodat voldoende metingen kunnen worden uitgevoerd voor het bekomen van een correcte grafiek.



Figuur 3-33: Droogprocedure

Op regelmatige tijdstippen wordt een conductiviteitsmeting uitgevoerd. Ook terwijl het monster nog vochtig is, net boven de SSD-conditie. Indien de waterabsorptie onbekend is worden in totaal een 20-tal metingen uitgevoerd. Indien de verwachte waterabsorptie-waarde bij benadering bekend is, kan het aantal metingen worden gereduceerd, op voorwaarde dat ten minste acht metingen worden uitgevoerd bij een vochtgehalte lager dan de verwachte WA en ten minste acht metingen bij een vochtgehalte hoger dan de verwachte WA.



Figuur 3-34: Meetcel gevuld met vochtig monster

Voor een conductiviteitsmeting wordt een deel van het monster in de meetcel geplaatst. Eens de meetcel is opgevuld wordt het driemaal aangestampt onder het eigengewicht van het gewicht zoals beschreven in de norm. Vervolgens wordt de meetcel bijgevuld en zesmaal aangedrukt. De meetcel wordt een laatste keer volledig gevuld en deze keer 16 maal aangestampt. Zo wordt ook hier een totaal van 25 verdichtingen bekomen. Het overtollig monster wordt afgeschraapt. Voor het meten van de elektrische geleidbaarheid wordt de stroombron aangesloten en wordt de stroom door de externe elektroden geregistreerd, met een precisie van twee decimalen voor waarden boven 2 mA en zonder decimalen voor waarden onder 2 mA.

Tegelijkertijd wordt de spanningsval tussen de interne elektroden gemeten met een precisie van twee decimalen. Hierbij is het belangrijk dat de aansluitingen correct zijn ingesteld om beide waarden gelijktijdig vast te leggen. De stroombron werkt op wisselstroom (AC), waardoor zowel de spanning als de stroom in de juiste AC-stand van de meter moet worden gemeten en met de correcte bekabeling moet worden aangesloten. De spanning ligt doorgaans rond de 4 V, waarbij nauwkeurige metingen tot op 0,01 V vereist zijn. De stroom kan variëren tussen 100 mA en 0,1 µA. De draaiknop van de multimeter dient dan ook op een van de laagste bereikstanden te worden ingesteld. Omdat sommige multimeters standaard in de gelijkstroommodus (DC) opstarten bij stroommetingen, moet deze handmatig worden omgezet naar AC-modus, wat op het display moet worden gecontroleerd voordat de waarde wordt genoteerd. Aangezien de meetwaarden vaak fluctueren, moeten ze direct na het aansluiten van de stroombron worden genoteerd en moet de stroombron vervolgens onmiddellijk worden losgekoppeld van de meetcel.

3) Berekeningen

Aan de hand van de waarden voor de stroom en spanning kan de conductiviteit als volgt berekend worden:

$$C = \frac{I}{K * U} \left[\frac{\mu S}{cm}\right] \qquad \textit{3-13}$$

Met:

C[$\frac{\mu S}{cm}$]: Conductiviteit

I[μA]: Stroom

U[V]: Spanning

K[cm]: De coëfficiënt afhankelijk van de meetcel. Deze is uniek voor de meetcel en werd vooraf experimenteel vastgesteld door de meetcel te vullen met een oplossing met gekende conductiviteit. Ze heeft de eenheid [cm] en bedroeg voor deze testen 7,34 cm.

4) Vochtgehalte

Direct na het meten van de geleidbaarheid en het loskoppelen van de stroombron wordt een kleine hoeveelheid materiaal, 10-20 g, uit het midden van het meetapparaat genomen en gewogen in een container. Deze container wordt vervolgens gedurende de nacht gedroogd bij 105 °C. Om het vochtgehalte in het mengsel op het moment van de meting te bepalen, wordt het massaverschil tussen het vochtige en ovengedroogde monster gemeten. Het apparaat wordt na elke meting volledig geleegd. Eventuele resterende deeltjes die zich aan de wanden of hoeken hebben gehecht, worden verwijderd met een schone borstel. De procedure wordt herhaald voor steeds drogere staten en telkens wordt een kleine monstername genomen ter bepaling van het aanwezige vocht op het moment van de desbetreffende meting. Er moeten metingen worden verricht voor zowel vochtgehaltes boven (natte tak) als onder (droge tak) de verzadigde oppervlakte-droge toestand. Het vochtgehalte kan bepaald worden met onderstaande formule:

$$Vochtgehalte = \frac{m_{voor\ oven} - m_{na\ oven}}{m_{na\ oven}}\ [\%] \qquad 3\text{-}14$$

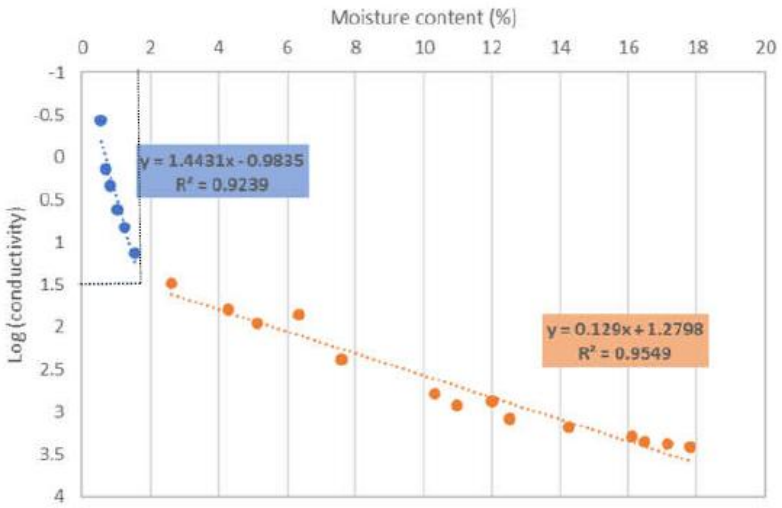
Met:

$m_{voor\ oven}$ [g]: Massa nat materiaal voor de oven

$m_{na\ oven}$ [g]: Massa droog materiaal na de oven

5) Grafiek

Voor de analyse worden de meetgegevens weergegeven in een semi-logaritmische grafiek. Hierbij wordt de geleidbaarheid uitgezet op de verticale (logaritmische) as en het vochtgehalte op de horizontale (lineaire) as. De gegevens worden opgesplitst in twee reeksen: één voor het droge deel en één voor het natte deel van het zand. Voor beide reeksen wordt afzonderlijk de best passende lineaire regressielijn bepaald.



Figuur 3-35: Voorbeeldgrafiek conductiviteitstest (VITO, 2024)

Het snijpunt van deze twee regressielijnen komt overeen met de verzadigde oppervlakte-droge toestand (SSD) van het zand, namelijk de waterabsorptie. Dit snijpunt wordt grafisch voorgesteld in Figuur 3-35. Een voorbeeld van de gebruikte regressiewaarden voor beide lineaire delen is terug te vinden in Figuur 3-36.

dry branch		wet branch		
Slope	Intercept	Slope	Intercept	WA [%]
a	b	c	d	
1.4431	-0.9835	0.129	1.2798	1.72

Figuur 3-36: Regressiewaarden voor droge en natte tak (VITO, 2024)

Het exacte snijpunt van beide lijnen wordt wiskundig bepaald door de vergelijkingen van de twee regressielijnen aan elkaar gelijk te stellen en op te lossen naar de x-waarde. Deze x-waarde stemt overeen met het vochtgehalte bij SSD, namelijk de waterabsorptie (WA) van het monster. De berekening gebeurt volgens onderstaande formule:

$$WA_{conductiviteit} = \frac{d-b}{a-c}\ [\%] \qquad 3\text{-}15$$

Met:

$WA_{conductiviteit}$ [%]: Waterabsorptie van het zand

a$\left[\frac{\mu S}{cm\%}\right]$: Richtingscoëfficiënt (helling) van de regressielijn voor de droge tak

b$\left[\frac{\mu S}{cm}\right]$: Snijpunt met de y-as van de regressielijn voor de droge tak

c$\left[\frac{\mu S}{cm\%}\right]$: Richtingscoëfficiënt (helling) van de regressielijn voor de natte tak

d$\left[\frac{\mu S}{cm}\right]$: Snijpunt met de y-as van de regressielijn voor de natte tak

Door het verschil tussen de y-waarden (d-b) te delen door het verschil in richtingscoëfficiënten (a-c), wordt het snijpunt van de twee lijnen bepaald. Dit punt vertegenwoordigt de waterabsorptie van het onderzochte zand. Hieronder wordt een voorbeeld uitgeschreven: Voor Gerecycleerd betonzand 0/4 is dit:

$$WA_{conductiviteit} = \frac{d-b}{a-c} = \frac{1{,}759\,\frac{\mu S}{cm} - (-0{,}394)\,\frac{\mu S}{cm}}{15{,}747\,\frac{\mu S}{cm\%} - 4{,}420\,\frac{\mu S}{cm\%}} = 19{,}01\%$$

3.3.3.4 Resultaten en conclusie

In Tabel 3-16 worden de a, b, c, d en de WA-waarden weergegeven voor de onderzochte granulaten.

Tabel 3-16: Resultaten conductiviteitstest

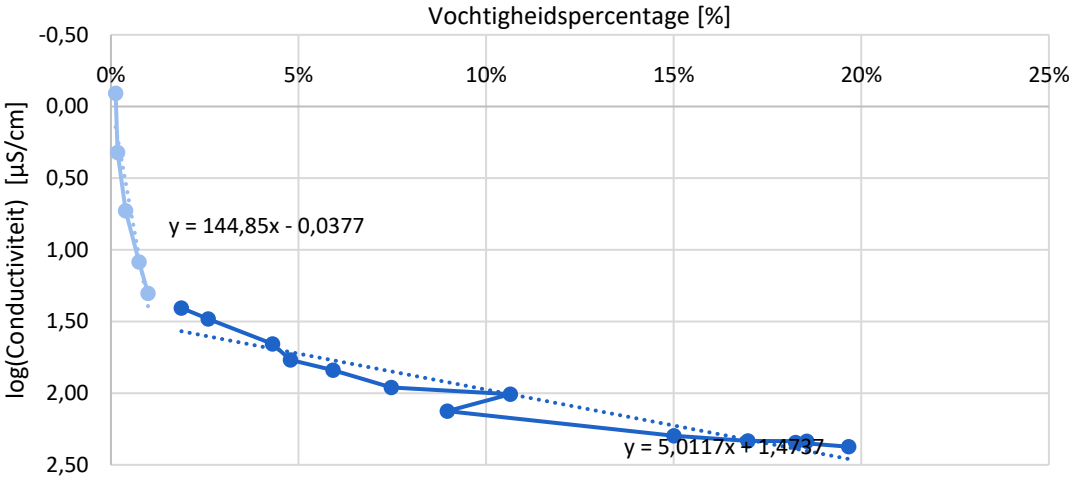
Zandsoort	a $[\frac{\mu S}{cm\%}]$	b $[\frac{\mu S}{cm}]$	c $[\frac{\mu S}{cm\%}]$	d $[\frac{\mu S}{cm}]$	$WA_{conductiviteit}$ [%]
Gerecycleerd betonzand 0/4	15,747	-0,394	4,420	1,759	19,01
Chapyt 0/2	6,543	-1,140	3,297	0,630	54,49
Chapyt 0/4	12,432	-2,825	2,540	1,406	42,77
Recycled mix 0/2	16,193	-0,018	5,961	1,493	14,77
Recycled mix 0/3	13,465	0,360	1,221	2,892	20,68
Rivierzand 0/4 26/90	144,850	-0,038	5,018	1,474	1,08
Rivierzand 0/4 35/90	229,590	-1,121	5,270	1,375	1,11
Mengzand 0/4 25/90	93,668	0,550	5,268	2,018	1,66

Alle resultaten en grafieken zijn terug te vinden in Bijlage C.

Er is een duidelijke verschil tussen de drie natuurlijke zanden enerzijds en de gerecycleerde granulaten anderzijds. Dit wordt aan de hand van hun grafieken aangetoond.

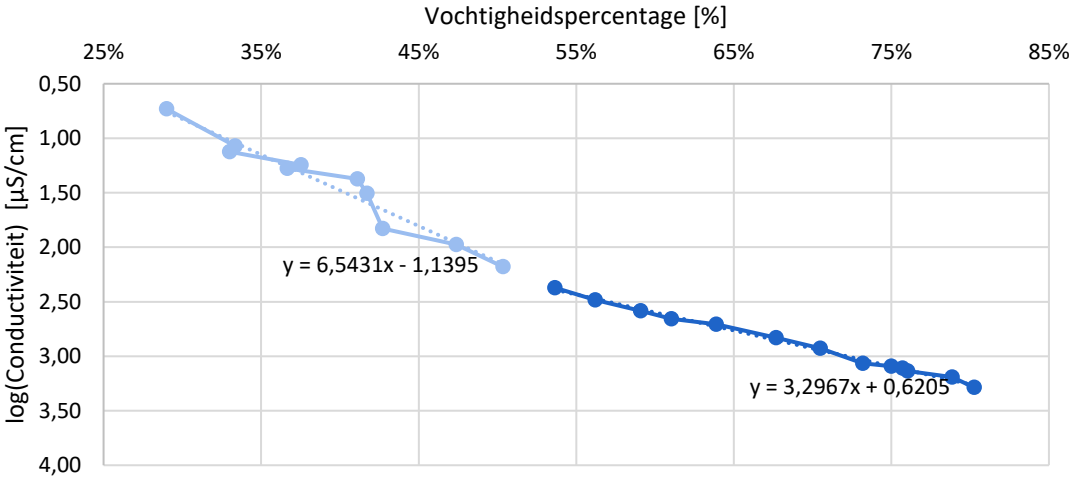
Het rivier- en mengzand toont een duidelijk verschil in helling van de rechten. Hierdoor is de bepaling van het snijpunt eenvoudig en uniform te kiezen. Dit resulteert in een betrouwbare waarde voor de

waterabsorptie. Voor het rivier- en mengzand geldt bijgevolg de hierboven beschreven methodologie. De grafiek voor Rivierzand 0/4 35/90 wordt weergegeven in Figuur 3-37 ter illustratie.



Figuur 3-37: Rivierzand 0/4 35/90 conductiviteitstest

Voor de gerecycleerde granulaten is het verschil in helling van de rechten moeilijker te onderscheiden. Hierdoor moet door de operator een inschatting worden gemaakt van het snijpunt. Dit resulteert bijgevolg in een minder betrouwbare en eerder foutieve waarde voor de waterabsorptie, aangezien deze eerder subjectief wordt bepaald door de operator. De grafiek voor het gerecycleerde granulaat Chapyt 0/2 wordt weergegeven in Figuur 3-38.



Figuur 3-38: Resultaten conductiviteitstest Chapyt 0/2

De oorzaak hiervan zou kunnen liggen in het feit dat bij de gerecycleerde granulaten water geabsorbeerd wordt in interne poriën en hierdoor water aanwezig blijft in het zandskelet. Dit is niet het geval voor rivier-

en mengzand aangezien deze granulaten geen water absorberen. Hierdoor kan er wel een duidelijk onderscheid worden gemaakt tussen het verschil in helling van de droge en natte tak in de grafiek.

3.3.4 Vergelijking pyknometertest en conductiviteitstest

De pyknometertest en de conductiviteitstest zijn twee methoden voor het analyseren van de waterabsorptie van granulaten. Hoewel beide technieken hetzelfde doel nastreven, hebben ze elk hun eigen voor- en nadelen.

Bij het analyseren van de verkregen grafieken van de conductiviteitstest valt op dat er een duidelijk onderscheid te maken is tussen de natuurlijke zanden en gerecycleerde granulaten. Voor rivier- en mengzand vertoont de verkregen grafiek een duidelijke verandering in helling tussen de twee rechten, waardoor het snijpunt, en dus de waterabsorptie, nauwkeurig kan worden bepaald. Bij gerecycleerde granulaten is deze hellingsverandering echter veel moeilijker te detecteren. Deze observatie werd ook door VITO gerapporteerd. Om dit fenomeen beter te begrijpen, is bijkomend onderzoek nodig, met name aan de hand van metingen bij lage conductiviteit en hoge spanningen. Bij deze instellingen lijkt de hellingsverandering beter zichtbaar, al vereist dit zeer nauwkeurige meetapparatuur en methodiek.

Een bijkomend probleem bij beide methoden is de afhankelijkheid van de operator. De methode voor het bepalen van het snijpunt is niet gestandaardiseerd en vereist interpretatie door de operator, wat leidt tot variabele resultaten. Bij de pyknometertest hangt de nauwkeurigheid van de metingen sterk af van de ervaring en zorgvuldigheid van de operator, meer bepaald bij het inschatten van de correcte helling van F2–F3 in Figuur 3-19. Dit leidt tot mogelijke subjectieve variaties. Ondanks deze beperkingen biedt de conductiviteitstest op dit gebied wel potentieel. In tegenstelling tot de pyknometertest maakt deze gebruik van een instrumentele benadering waarbij de elektrische geleidbaarheid rechtstreeks wordt gemeten. Dit kan, mits verdere standaardisatie, resulteren in objectievere en reproduceerbare metingen met een lagere afhankelijkheid van de operator.

Hoewel de conductiviteitstest op termijn voordelen kan bieden ten opzichte van de pyknometertest, wordt ze momenteel als minder betrouwbaar beschouwd voor het analyseren van gerecycleerde granulaten. Door de onzekerheid rond de bepaling van het snijpunt en de nood aan verdere verfijning, worden de resultaten van de conductiviteitstest in dit stadium enkel ter volledigheid opgenomen in het verslag, maar niet als basis gebruikt voor verdere conclusies of besluitvorming.

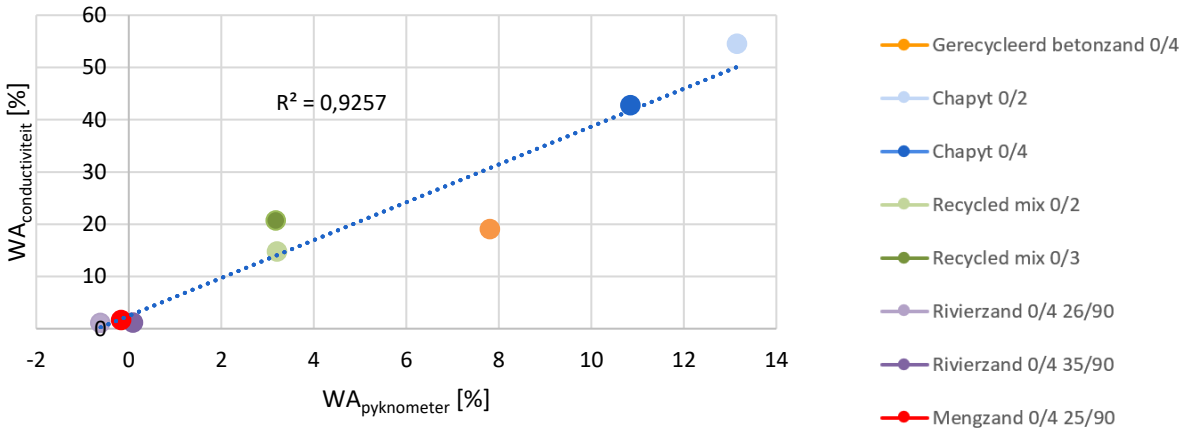
Tabel 3-17: Vergelijking resultaten van pyknometertest met conductiviteitstest

Zandsoort	**$WA_{pyknometer}$ [%]**	**$WA_{conductiviteit}$ [%]**

Gerecycleerd betonzand 0/4	7,81	19,01
Chapyt 0/2	13,15	54,49
Chapyt 0/4	10,85	42,77
Recycled mix 0/2	3,21	14,77
Recycled mix 0/3	3,18	20,68
Rivierzand 0/4 26/90	-0,61	1,08
Rivierzand 0/4 35/90	0,09	1,11
Mengzand 0/4 25/90	-0,16	1,66

Op onderstaande grafiek wordt de waterabsorptie volgens de pyknometer op de x-as uitgezet en de waterabsorptie volgens de conductiviteit op de y-as uitgezet. Er is te zien dat er een lineaire correlatie is tussen beide testen. De grootteordes van beide methodes zijn verschillend. De resultaten bekomen met de conductiviteitstest liggen systematisch aanzienlijk hoger dan deze bekomen met de pyknometertest. Dit verschil in grootteorde duidt erop dat de conductiviteitstest niet enkel het intern opgenomen water detecteert, zoals bij de pyknometermethode, maar ook rekening houdt met water dat aan het oppervlak van de granulaten aanwezig blijft of tijdelijk wordt gebonden in oppervlakkige uithollingen. Deze oppervlakkige of nauwelijks gebonden waterfractie draagt niet bij aan de chemische hydratatiereacties die essentieel zijn voor de binding van cementgebonden systemen, noch aan de werkelijke verbetering van de verwerkbaarheid van het mengsel. Vanuit praktisch oogpunt impliceert dit dat de hoeveelheid extra aanmaakwater die men zou toevoegen op basis van de resultaten van de conductiviteitstest, significant hoger zou liggen dan de effectieve interne absorptiecapaciteit van de granulaten. Dit kan leiden tot een overschatting van de benodigde waterhoeveelheid, met als gevolg een verhoogd risico op krimp of verminderde mechanische eigenschappen in de dekvloer.

Het verschil tussen beide meetmethodes is dan ook van cruciaal belang bij het ontwerpen van dekvloermengsels met gerecycleerde granulaten, aangezien een correcte inschatting van de effectieve waterbehoefte essentieel is om zowel verwerkbaarheid als duurzaamheid van het eindproduct te waarborgen.



Figuur 3-39: Vergelijking waterabsorptie van de pyknometertest met de conductiviteitstest

3.4 Inwendige wrijvingshoek

De inwendige wrijvingshoek (angle of repose of AOR) van een korrelige stof is de steilste hoek van de helling ten opzichte van het horizontale vlak waarop het materiaal kan worden gestapeld zonder in te storten. Bij deze hoek staat het materiaal op punt van schuiven. Deze hoek kan variëren tussen 0 en 90°. (Wikipedia, 2020)



Figuur 3-40: De inwendige wrijvingshoek (Wikipedia, 2020)

De inwendige wrijvingshoek is niet alleen afhankelijk van de vorm en grootte van de deeltjes, maar er zijn ook andere belangrijke factoren die de stabiliteit van een gestapelde hoop beïnvloeden. Ten eerste speelt de korrelgrootte- en verdeling een rol. Kleinere deeltjes kunnen dichter op elkaar gestapeld worden, waardoor er minder ruimte is tussen de deeltjes en ze beter op elkaar kunnen rusten. Dit verhoogt de stabiliteit en verlaagt de inwendige wrijvingshoek. Grotere deeltjes kunnen daarentegen vaak steilere hoeken bereiken, omdat de deeltjes beter in elkaar grijpen en interageren, waardoor de stapel stabieler wordt. (Wikipedia, 2020)

Daarnaast speelt vochtigheid een aanzienlijke invloed. Wanneer er een beetje water aanwezig is tussen de deeltjes, kunnen de watermoleculen een brug vormen tussen deze deeltjes door middel van capillaire krachten. Dit verhoogt de wrijving tussen de deeltjes, waardoor de stapel stabieler wordt en de inwendige wrijvingshoek stijgt. (Wikipedia, 2020)

Een andere belangrijke factor is de wrijvingscoëfficiënt van het materiaal. De wrijving tussen de deeltjes is groter bij ruw materiaal, zoals grind of ruwe zandkorrels, omdat de deeltjes beter in elkaar grijpen. Dit resulteert is een grotere inwendige wrijvingshoek, omdat de deeltjes moeilijker zullen verschuiven. Gladdere materialen, zoals marmer of zout, hebben een lagere wrijvingscoëfficiënt, wat betekent dat ze gemakkelijker zullen verschuiven en de inwendige wrijvingshoek kleiner zal zijn. (Wikipedia, 2020)

3.4.1 Norm ISO 4324-1977

De ISO 4324-1977 is een internationale norm die een methode beschrijft voor het meten van de inwendige wrijvingshoek van poeders en granulaten. Dit is de hoek die een poeder of granulaat vormt wanneer het vrij

uit een trechter op een vlak oppervlak wordt gestort. Deze meting geeft belangrijke informatie over de stromingseigenschappen van het materiaal en kan bijvoorbeeld worden gebruikt om te bepalen hoe een poeder of granulaat zich gaat gedragen bij opslag in silo's of tijdens transport. (ISO 4324, 1977)

3.4.2 Uitvoering

1) Opstellen van de meetapparatuur

Voor deze test zijn de volgende componenten essentieel:

- Een trechter: De trechter moet een binnendiameter van 10 mm hebben. Aangezien dergelijke glazen trechters niet commercieel zijn is er zelf een aangepaste versie gemaakt. De trechter is samengesteld door een glazen trechter met binnendiameter 10 mm in een plastic trechter te verlijmen met behulp van siliconen.



Figuur 3-41: Trechter zijaanzicht



Figuur 3-42: Trechter onderaanzicht

- Een statief
- Een klem voor de bevestiging van de trechter
- Een glazen schaaltje met een diameter van 100 mm
- Een opvangbak
- Een maatcilinder van 250 ml

Om een nauwkeurige meting te garanderen, dient het schaaltje op een verhoogde positie te worden geplaatst, zodat het monster dat van het plaatje valt geen invloed uitoefent op de uiteindelijke hoogtebepaling. De afstand tussen de onderkant van de trechter en de bovenkant van het schaaltje dient exact 75 mm te bedragen. Bovendien moet de trechter centraal boven het schaaltje worden uitgelijnd om een uniforme materiaalophoping te waarborgen.



Figuur 3-43: Opstelling

2) Voorbereiding van het monster

Voordat de proef kan beginnen, moet het te testen monster goed worden voorbereid. Het granulaat moet vrij zijn van klonten en mag geen samenklonteringen bevatten. Als het monster lange tijd heeft stilgestaan en daardoor minder vloeiend is geworden, kan het voorzichtig worden omgekeerd in de opslagcontainer om de oorspronkelijke vloei-eigenschappen te herstellen. Vervolgens wordt met behulp van een gegradueerde maatcilinder van 250 ml een hoeveelheid van 150 ml van het monster nauwkeurig afgemeten.



Figuur 3-44: Maatbeker 250 ml met 150 ml monster

3) Uitvoeren van de meting

Om de meting te starten, wordt het afgemeten poeder in de trechter geplaatst. De uitstroomopening van de trechter wordt in eerste instantie geblokkeerd om te voorkomen dat het granulaat voortijdig begint te stromen. Zodra alles correct is gepositioneerd, wordt de blokkering verwijderd en mag het poeder vrij naar

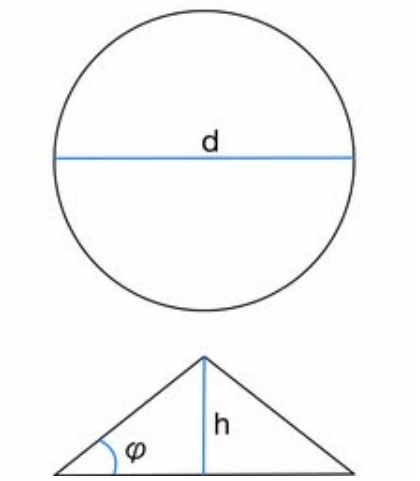
beneden stromen. Belangrijk hierbij is dat het schaaltje (diameter 100 mm) waarop het monster valt zich centraal onder de trechter moet bevinden. Bij sommige granulaten, vooral bij plakkerige of kleverige stoffen, kan het nodig zijn om de uitstroom te vergemakkelijken door voorzichtig een spatel te gebruiken. Zodra het granulaat volledig is uitgestroomd, wordt er 2 minuten gewacht voordat de hoogte van de gevormde kegel wordt gemeten. Dit zorgt ervoor dat de kegel volledig is gestabiliseerd. Het meten van de hoogte gebeurt met een meetlat.



Figuur 3-45: Uitlopen monster uit trechter

4) Formule van inwendige wrijvingshoek

De onderstaande afbeelding toont een schematische weergave van de formule voor de inwendige wrijvingshoek (φ). In deze formule staat d voor de diameter van de plaat, die 100 mm bedraagt, terwijl h de hoogte van de gevormde kegel representeert. De parameter φ verwijst naar de inwendige wrijvingshoek, die berekend kan worden op basis van deze afmetingen.



Figuur 3-46: Schematische schets berekening inwendige wrijvingshoek

De hoogte van de kegel wordt gemeten. Vervolgens wordt de inwendige wrijvingshoek φ berekend met volgende formule:

$$\varphi = Boogtan\left(\frac{h}{\frac{d}{2}}\right)[°] \qquad \textit{3-16}$$

Met:

φ[°]: Inwendige wrijvingshoek

h [mm]: Gemeten hoogte van de kegel in mm

d [mm]: Gemeten diameter van de bodemplaat in mm

Voor Gerecycleerd betonzand 0/4 bedraagt dit:

$$\varphi = Boogtan\left(\frac{h}{\frac{d}{2}}\right) = Boogtan\left(\frac{34mm}{\frac{100mm}{2}}\right) = 34°$$

5) Herhaling van de metingen

Om betere en betrouwbaardere resultaten te verkrijgen, wordt de meting minimaal vijf keer herhaald met verschillende porties van hetzelfde monster. Na het uitvoeren van alle metingen wordt de uiteindelijke waarde bepaald als het rekenkundig gemiddelde van deze vijf metingen. Indien de resultaten onderling meer dan 5 % afwijken, moeten de metingen worden herhaald om eventuele fouten of inconsistenties te corrigeren.

6) Berekening gemiddelde inwendige wrijvingshoek

De gemiddelde inwendige wrijvingshoek wordt bepaald door het rekenkundig gemiddelde te nemen van de vijf metingen.

$$\varphi_{gem}[°] = \frac{\varphi_{meting\ 1} + \varphi_{meting\ 2} + \varphi_{meting\ 3} + \varphi_{meting\ 4} + \varphi_{meting\ 5}}{5}[°] \qquad \textit{3-17}$$

Met:

φ_{gem}[°]: Gemiddelde inwendige wrijvinshoek

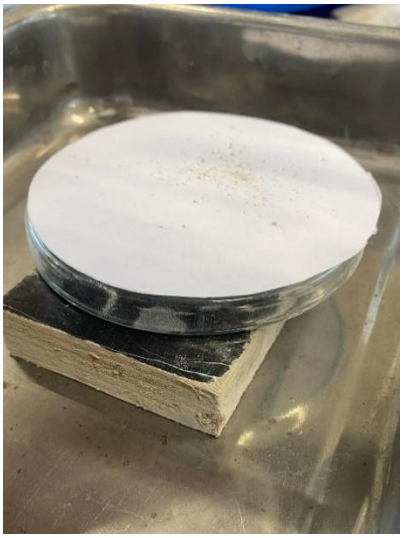
$\varphi_{meting\ X}$ [°]: Inwendige wrijvingshoek van meting X in graden

Voor Gerecycleerd betonzand 0/4 bedraagt dit:

$$\varphi_{gem} = \frac{34° + 32° + 32° + 33° + 33°}{5} = 33°$$

3.4.3 Vergelijking glazen basisplaat met basisplaat met papier

Volgens de norm ISO 4324 1977 moest een plastic bodemplaat worden gebruikt, maar deze was niet beschikbaar. Daarom werd er gekozen voor een glazen plaat als alternatief. Om te verifiëren of dit een significante invloed had op de metingen, werd de test op twee manieren uitgevoerd: eenmaal met een glazen bodemplaat en eenmaal met een glazen bodemplaat met een papiertje erop.

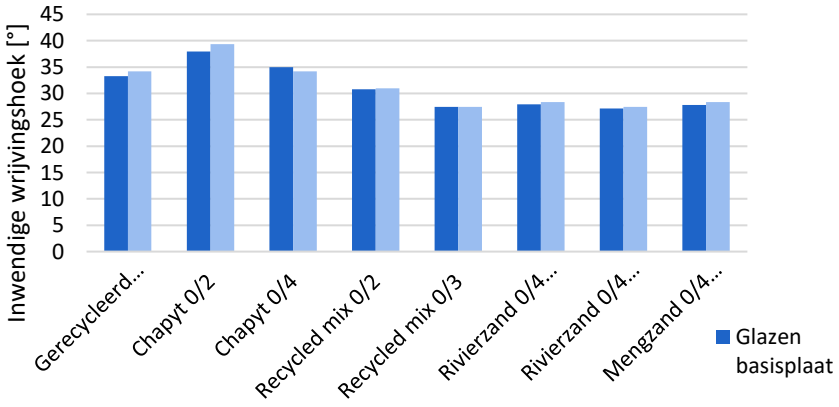


Figuur 3-47: Papieren basisplaat



Figuur 3-48: Test met papieren basisplaat

De resultaten tonen aan dat er geen significant verschil was tussen beide tests. In enkele gevallen was de gemeten hoogte maximaal 1 mm hoger bij de meting met papier, maar in de meeste gevallen lagen de waarden binnen dezelfde variatie als die van de glazen bodemplaat. Dit suggereert dat het gebruik van een glazen plaat als alternatief geen grote invloed had op de testresultaten. In de onderstaande grafiek worden de resultaten weergegeven.



Figuur 3-49: Vergelijking glazen basisplaat met papieren basisplaat

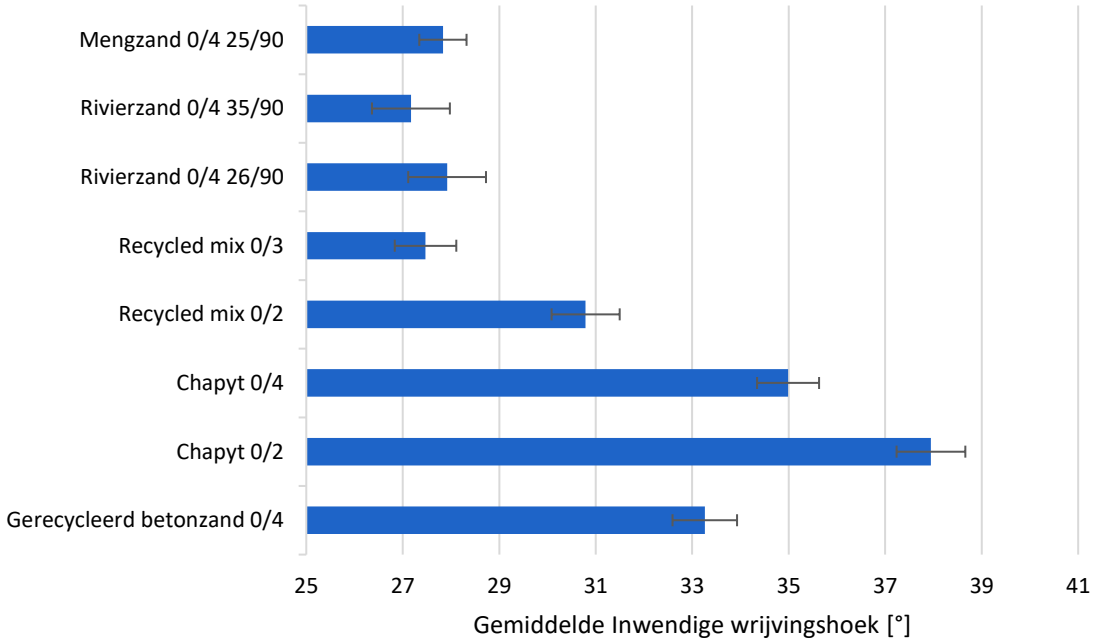
3.4.4 Resultaten

De resultaten van de gemiddelde inwendige wrijvingshoek met de glazen basisplaat worden weergegeven in onderstaande Tabel 3-18. Deze tabel geeft een overzicht van de berekende waarden. Alle resultaten waarmee de gemiddelde inwendige wrijvingshoek is bepaald staan in Bijlage D.

Tabel 3-18: Gemiddelde inwendige wrijvingshoek

Zandsoort	φ_{gem} [°]	φ_{gem} [RAD]
Gerecycleerd betonzand 0/4	33	0,58
Chapyt 0/2	38	0,66
Chapyt 0/4	35	0,61
Recycled mix 0/2	31	0,54
Recycled mix 0/3	27	0,48
Rivierzand 0/4 26/90	28	0,49
Rivierzand 0/4 35/90	27	0,47
Mengzand 0/4 25/90	28	0,49

De resultaten van de gemiddelde inwendige wrijvingshoek worden in onderstaand staafdiagram, Figuur 3-50, visueel getoond.



Figuur 3-50: Gemiddelde inwendige wrijvingshoek

3.4.5 Conclusie

Uit de resultaten uit Tabel 3-18 blijkt dat de inwendige wrijvingshoek sterk varieert tussen de verschillende zandsoorten. Deze variatie wordt grotendeels beïnvloed door de korrelgrootteverdeling en, in het bijzonder, de korrelvorm. Chapyt-zand (0/2 en 0/4) toont de hoogste gemiddelde wrijvingshoeken (38° en 35°), wat aangeeft dat dit zand een sterke interne stabiliteit heeft. De relatief hoekige korrels zorgen ervoor dat de deeltjes moeilijker langs elkaar kunnen bewegen, wat de weerstand tegen afschuiving verhoogt. Gerecycleerd betonzand 0/4 vertoont eveneens een hoge wrijvingshoek (33°), wat te verklaren is door de zeer onregelmatige en hoekige vorm van de korrels. Dit zorgt ervoor dat de korrels in elkaar grijpen, waardoor ze meer weerstand bieden tegen afschuiving en de schuifweerstand stijgt. Het tegenovergestelde effect wordt waargenomen bij de natuurlijke zanden. Rivierzand 0/4 26/90, Rivierzand 0/4 35/90 en Mengzand 0/4 25/90 hebben de laagste gemiddelde wrijvingshoeken (27°-28°), wat direct te koppelen is aan hun afgeronde korrelvorm. De afgeronde korrels rollen gemakkelijker over elkaar heen, waardoor de onderlinge vergrendeling beperkt blijft en de weerstand tegen afschuiving afneemt. Gerecycleerde zanden (Recycled mix 0/2 en 0/3) tonen over het algemeen lagere gemiddelde wrijvingshoeken (27°-31°), vergelijkbaar met die van rivierzand. Deze veronderstellingen worden geverifieerd in '3.6 Optische microscopie'.
Binnen eenzelfde zandsoort, zoals Chapyt, Recycled mix en rivierzand, blijkt dat de fractie met een hoger aandeel fijne korrels (0/2 of 26/90) een hogere gemiddelde inwendige wrijvingshoek vertoont dan de overeenkomstige 0/4 of 35/90-fractie. Dit suggereert dat fijnere korrelverdelingen bijdragen aan een verhoogde schuifweerstand, vermoedelijk door een betere opvulling van holten en een verhoogde korrelinteractie.

De resultaten tonen aan dat niet alleen de korrelgrootteverdeling, maar ook de korrelvorm een bepalende factor is voor de inwendige wrijvingshoek. Natuurlijke zanden met hun afgeronde korrels hebben een lagere wrijvingshoek, omdat de deeltjes gemakkelijker over elkaar rollen, terwijl Gerecycleerd betonzand 0/4 een hogere wrijvingshoek vertoont door zijn onregelmatige, hoekige vorm, die zorgt voor meer onderlinge vergrendeling.

3.5 Inwendige wrijvingshoek per fractie

De uitvoering, zoals beschreven in de vorige paragraaf, blijft ongewijzigd. Echter, in dit geval wordt de inwendige wrijvingshoek niet bepaald voor het volledige zand in zijn geheel, maar afzonderlijk voor elke fractie. Dit zorgt voor een meer gedetailleerde en nauwkeurige analyse van de mechanische eigenschappen van de verschillende deeltjesgroottes binnen het zand.

3.5.1 Uitvoering

Om een nauwkeurigere analyse van de mechanische eigenschappen van het zand uit te voeren, wordt het materiaal eerst gezeefd. Hierdoor worden de verschillende deeltjes op basis van hun grootte ingedeeld in de juiste fracties, zodat elke fractie een homogene samenstelling heeft. Vervolgens wordt voor elke afzonderlijke fractie de inwendige wrijvingshoek bepaald. Deze methode, die aansluit bij de uitvoering zoals beschreven in de vorige paragraaf, zorgt voor een gedetailleerder inzicht in de invloed van de deeltjesgrootte op de wrijvingshoek en draagt bij aan een preciezere karakterisering van het zand.

3.5.2 Fracties

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de fractieverdeling van verschillende zandsoorten die in dit onderzoek worden geanalyseerd. Elke zandsoort is onderverdeeld in vier fracties (F_1 t/m F_4) op basis van de korrelgrootte, die in millimeters wordt weergegeven.

Tabel 3-19: Fracties

Zandsoort	F_1 [mm]	F_2 [mm]	F_3 [mm]	F_4 [mm]
Gerecycleerd betonzand 0/4	0-0,5	0,5-4	**4-6,3**	**6,3-8**
Chapyt 0/2	0-0,125	0,125-0,5	0,5-1	1-2
Chapyt 0/4	0-0,125	0,125-0,5	0,5-1	1-4
Recycled mix 0/2	0-0,125	0,125-0,5	0,5-1	1-2
Recycled mix 0/3	0-0,25	0,25-0,5	0,5-1,4	1,4-2,8
Rivierzand 0/4 26/90	0-0,5	0,5-0,63	0,63-1	1-4
Rivierzand 0/4 35/90	0-0,315	0,315-0,63	0,63-1,4	1,4-4
Mengzand 0/4 25/90	0-0,25	0,25-0,315	0,315-1	1-4

De fracties worden bepaald op basis van de korrelverdeling van het materiaal, dat eerst wordt gezeefd om de korrels in te delen op grootte. Vervolgens wordt de totale korrelverdeling opgedeeld in vier fracties (F_1 t/m F_4), waarbij elke fractie ongeveer een kwart van het materiaal bevat. De exacte grenzen van de fracties verschillen per zandsoort en worden afgeleid uit de specifieke korrelgrootteverdeling van het materiaal. Een voorbeeld van de scheiding van het Rivierzand 0/4 35/90 mengsel in fracties wordt getoond in 3-51.



Figuur 3-51: Rivierzand 0/4 35/90 opgedeeld in fracties

3.5.3 Resultaten

Per fractie wordt de meting vijfmaal herhaald. De gemiddelde waarde van deze vijf metingen wordt opgenomen in Tabel 3-20. De gemiddelde inwendige wrijvingshoek van het gehele zandskelet wordt weergegeven als φ_{gem}. Bij het testen van gerecycleerd betonzand 0/4 zijn slechts twee fracties geanalyseerd. Dit komt doordat de grotere granulaatdeeltjes de trechter blokkeren, waardoor de doorstroming wordt belemmerd. De gebruikte proefmethode is specifiek ontworpen voor poeders en zeer fijne zandfracties, waardoor deze minder geschikt is voor grovere materialen.

Tabel 3-20: Gemiddelde inwendige wrijvingshoek per fractie

Zandsoort	$\varphi_{gem\ F1}$ [°]	$\varphi_{gem\ F2}$ [°]	$\varphi_{gem\ F3}$ [°]	$\varphi_{gem\ F4}$ [°]	φ_{gem} [°]
Gerecycleerd betonzand 0/4	37	35	-	-	33
Chapyt 0/2	43	34	34	36	38
Chapyt 0/4	44	33	35	37	35
Recycled mix 0/2	28	28	33	35	31
Recycled mix 0/3	32	31	33	37	27
Rivierzand 0/4 26/90	29	29	30	32	28
Rivierzand 0/4 35/90	29	29	30	32	27
Mengzand 0/4 25/90	29	28	28	32	28

3.5.4 Conclusie

Om de invloed van de korrelgrootteverdeling en herkomst van verschillende zandsoorten op de schuifweerstand te onderzoeken, werd de inwendige wrijvingshoek (φ) bepaald per afzonderlijke fractie. Deze aanpak biedt een gedetailleerder inzicht dan een globale benadering, en maakt het mogelijk om gerichter conclusies te trekken over het gedrag van zand in de context van cementgebonden dekvloermengsels.

Uit de resultaten blijkt dat de inwendige wrijvingshoek aanzienlijk varieert tussen de onderzochte zandsoorten. De hoogste waarden werden gemeten bij Chapyt 0/2 en Chapyt 0/4, met respectievelijk een gemiddelde wrijvingshoek van 38° en 37°. Opvallend is dat bij deze twee zandsoorten vooral de fijnste fractie (F1) uitzonderlijk hoge waarden behaalt, namelijk 43° en 44°. Dit wijkt af van het algemene patroon waarbij de fijnere fracties doorgaans een lagere inwendige wrijvingshoek vertonen. De hoge waarden in F1 kunnen verklaard worden door elektrostatische effecten: fijne deeltjes beschikken over een relatief groot contactoppervlak per volume-eenheid, waardoor ze bij droge omstandigheden een elektrische lading kunnen opbouwen. Dit veroorzaakt onderlinge aantrekking of afstoting, wat de interne ordening en weerstand van het materiaal beïnvloedt en de wrijvingshoek verhoogt. (Xie et al., 2020)

Het gerecycleerde betonzand 0/4 vertoont een gemiddelde wrijvingshoek van 33°, wat wijst op een zekere korrelvergrendeling, mogelijk als gevolg van de hoekige vorm van de deeltjes. Recycled mix 0/2 en 0/3 vertonen een lagere inwendige wrijvingshoek met respectievelijk 31° en 27°, wat kan worden toegeschreven aan een meer afgeronde korrelvorm of heterogene structuur.

De rivierzanden, waaronder de mengsels 0/4 26/90 en 0/4 35/90, vertonen over het algemeen de laagste en meest constante wrijvingshoeken (tussen 28° en 30°). Dit is te verklaren door de afgeronde morfologie van rivierzand, wat leidt tot minder onderlinge vergrendeling tussen de korrels. Ook Mengzand 0/4 25/90 toont gelijkaardige eigenschappen met een gemiddelde wrijvingshoek van 28°.

Hoewel een hoge wrijvingshoek traditioneel geassocieerd wordt met verminderde verwerkbaarheid, blijkt uit de analyse dat dit niet altijd het geval hoeft te zijn. Fijne fracties kunnen, net als cement, een smeerwerking uitoefenen tussen grovere korrels. Dit bevordert de verdeling en cohesie binnen het mengsel, wat de werkbaarheid ten goede kan komen ondanks een hoge schuifweerstand. Deze observatie sluit aan bij de prestaties van samengestelde dekvloermengsels, die verder besproken worden in hoofdstuk 5.

Samenvattend bevestigt deze analyse dat de inwendige wrijvingshoek sterk afhankelijk is van zowel de fractiegrootte als de oorsprong van het zand. De resultaten onderstrepen het belang van een gefractioneerde beoordeling bij het selecteren van geschikte grondstoffen voor cementgebonden dekvloeren, zeker bij het gebruik van gerecycleerde granulaten als alternatief voor natuurlijk rivierzand.

3.6 Optische microscopie

In dit deel wordt de vorm van de zandkorrels geanalyseerd voor dezelfde fracties die in Tabel 3-19 zijn gehanteerd bij de bepaling van de gemiddelde inwendige wrijvingshoek per fractie. De vorm van de zandkorrels wordt geobserveerd door middel van de optische microscoop, weergeven in Figuur 3-52. Een klein monster van de te onderzoeken fractie wordt hieronder geplaatst zoals weergeven in Figuur 3-53. Voor elke fractie en zandsoort wordt een foto genomen, een beschrijving gemaakt, en de rondheid en circulariteit berekend. Deze parameters geven een kwantitatieve beoordeling van de korrelvorm en maken het mogelijk om verschillen tussen de fracties en zandsoorten te analyseren.



Figuur 3-52: Optische microscoop



Figuur 3-53: Onderzochte monster van een fractie

3.6.1 Visuele analyse

De visuele analyse van de korrels bestaat eruit de zandsoorten in detail te analyseren en hun oorsprong te verifiëren. Op basis van de analyse kunnen fysische eigenschappen verklaard worden en voorspellingen gedaan worden voor hun gedrag in een dekvloermengsel.

3.6.1.1 Gerecycleerd betonzand 0/4

Op Figuur 3-54 is fractie 1 van Gerecycleerd betonzand 0/4 te zien. De fijne korrels vertonen een klonterstructuur en bevatten mortelresten, wat wijst op een hoge mate van onregelmatigheid en een ruwe textuur. Opvallend is ook de aanwezigheid van de een roodachtige tint in sommige deeltjes, wat erop wijst

dat er nog resten van gebroken baksteen aanwezig zijn in deze fractie. In Figuur 3-55 wordt fractie 2 getoond, waarin de korrels al iets groter zijn, maar nog steeds een zeer hoekige structuur hebben. De scherpe randen en breukvlakken zijn duidelijk zichtbaar, wat past bij een lage rondheid en een lage circulariteit. Dit bevestigt dat gerecycleerd betonzand over het algemeen minder afgeronde en sterk onregelmatige korrels heeft in vergelijking met rivierzand.



Figuur 3-54: Gerecycleerd betonzand 0/4 fractie 1



Figuur 3-55: Gerecycleerd betonzand 0/4 fractie 2

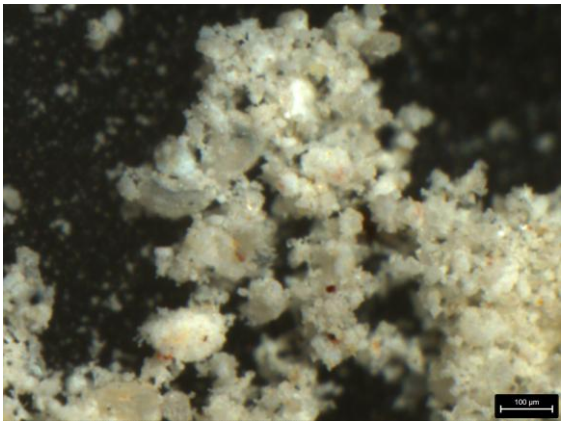
In Figuur 3-56 wordt fractie 3 van Gerecycleerd betonzand 0/4 weergegeven. De korrel uit de derde fractie is aanzienlijk groter dan de voorgaande, maar kon nog net worden opgemeten met behulp van de microscoop. De structuur is ruw en onregelmatig, met opnieuw een hoekige vorm die typerend is voor gerecycleerd betonzand. Ook achterblijvende mortelresten zijn zichtbaar op de korrel. Voor de vierde fractie van het gerecycleerd betonzand bleek de korrel echter te groot om nog met de microscoop te kunnen worden gemeten. Dit vormt echter geen probleem, aangezien in de verdere analyse enkel gewerkt wordt met het "fijne" gedeelte van het granulaat, met een korrelgrootte onder de 4 mm. Het ontbreken van deze meting heeft dan ook geen invloed op de resultaten van het onderzoek.



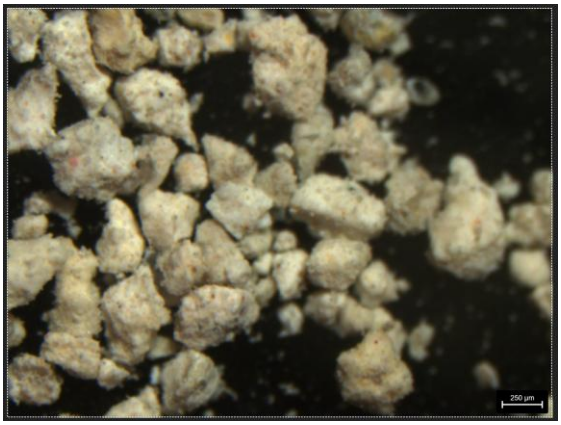
Figuur 3-56: Gerecycleerd betonzand 0/4 fractie 3

3.6.1.2 Chapyt 0/2

Zoals besproken in 3.1.2 zijn de Chapyt-mengsels afkomstig van gerecycleerd cellenbeton. Fractie 1, weergegeven in Figuur 3-57, toont de zeer fijne fractie. Hier zijn verschillende korrels moeilijk te onderscheiden van elkaar doordat ze omgeven zijn door de grote mate aan zeer fijn materiaal. Fractie 2 daarentegen geeft een duidelijkere korrelvorm weer. Hierbij valt vooral de onregelmatigheid van de korrels op, maar is het oppervlak nog niet goed te bestuderen.

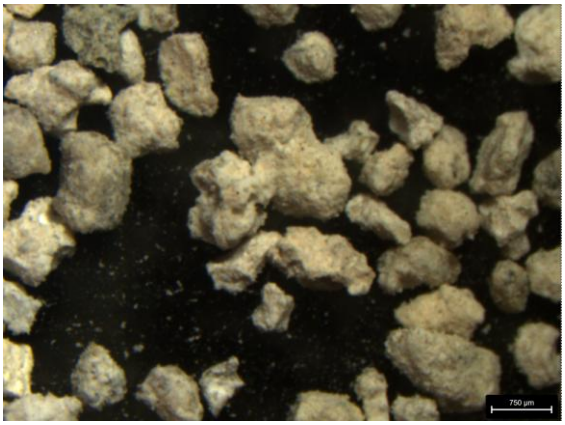


Figuur 3-57: Chapyt 0/2 fractie 1

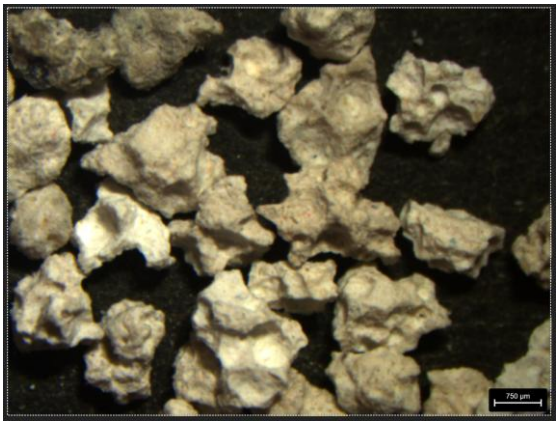


Figuur 3-58: Chapyt 0/2 fractie 2

Fracties 3 en 4, weergegeven in respectievelijk Figuur 3-59 en Figuur 3-60, tonen op hun beurt wel de verschillende korrels en hun oppervlak. Hierdoor is de poreuze eigenschap van het oorspronkelijk cellenbeton ook goed zichtbaar in de korrels. De korrels vertonen namelijk duidelijke uithollingen aan hun oppervlak. De porositeit van het cellenbeton wordt hier zichtbaar en geeft een verklaring voor de grote waterabsorptie van de Chapyt-mengsels, zoals eerder werd geconcludeerd. Daarnaast is er een grote mate aan hoekigheid te zien, dewelke de hoge wrijvingshoek van deze zandsoort verklaart.



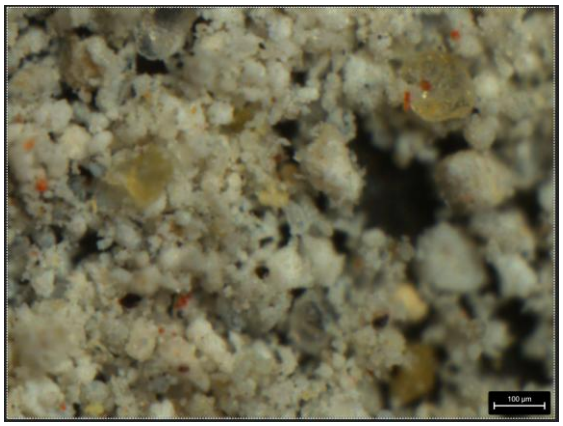
Figuur 3-59: Chapyt 0/2 fractie 3



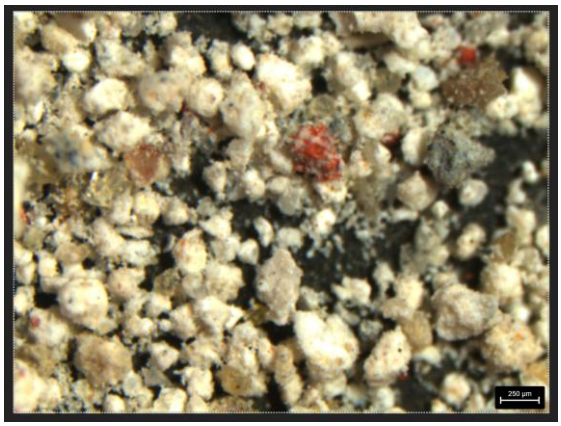
Figuur 3-60: Chapyt 0/2 fractie 4

3.6.1.3 Chapyt 0/4

Voor fractie 1, weergegeven in Figuur 3-61, geldt dezelfde conclusie als voor het Chapyt 0/2. Figuur 3-62 toont duidelijker de afzonderlijke korrels. Hier is een grotere verscheidenheid aan afkomst van korrels op te merken ten opzichte van het Chapyt 0/2-mengsel. Naast de cellenbeton resten, zijn er ook zand- en baksteengranulaten te onderscheiden.

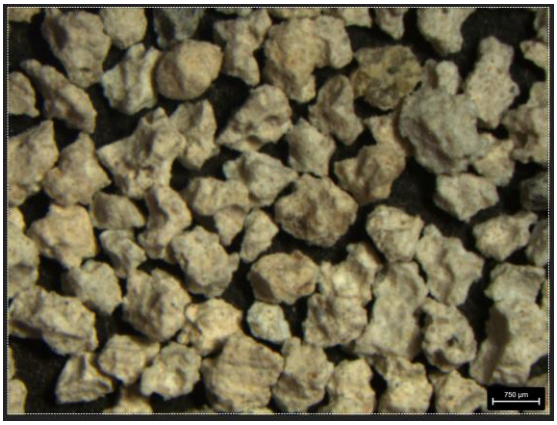


Figuur 3-61: Chapyt 0/4 fractie 1

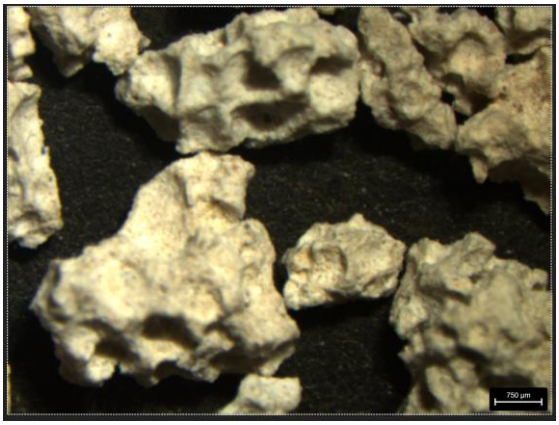


Figuur 3-62: Chapyt 0/4 fractie 2

Fractie 3 en 4, respectievelijk Figuur 3-63 en Figuur 3-64, tonen opnieuw het poreuze karakter van de korrels afkomstig van het originele cellenbeton, evenals hun lage mate aan rondheid en beperkte circulariteit. Ook zijn de uithollingen in het oppervlak van de korrels duidelijk zichtbaar



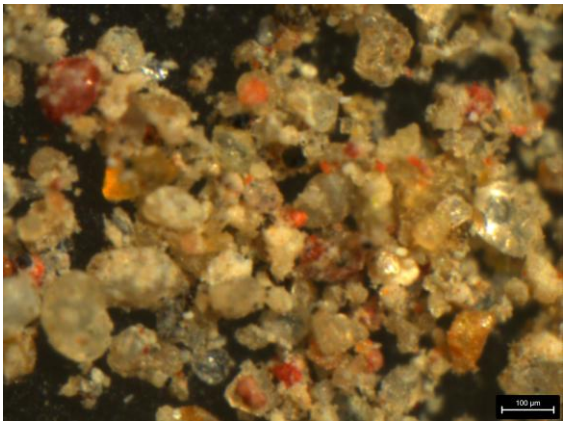
Figuur 3-63: Chapyt 0/4 fractie 3



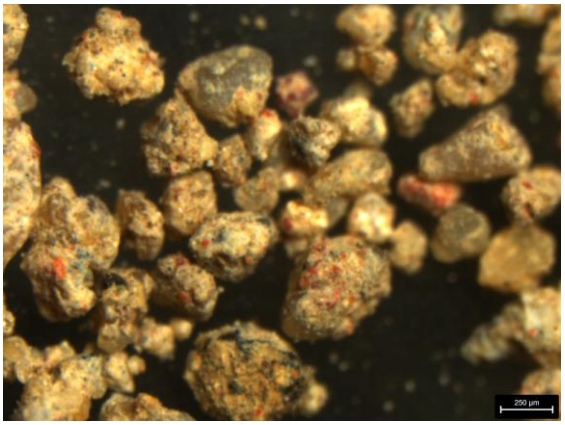
Figuur 3-64: Chapyt 0/4 fractie 4

3.6.1.4 Recycled mix 0/2

De fijnste fractie, fractie 1, wordt getoond in Figuur 3-65. Hier zijn, zoals bij het gerecycleerd betonzand, nog klontervorming en mortelresten zichtbaar die de korrels omhullen. Dit heeft een grotere waterabsorptie tot gevolg. Dit komt omdat mortelresten een zekere porositeit hebben waardoor er meer water geabsorbeerd kan worden. Figuur 3-66 toont fractie 2. Hier zijn de afzonderlijke korrels beter te observeren en is de afkomst van de korrels moeilijk te achterhalen. Dit is te wijten aan aanklevende mortelresten.

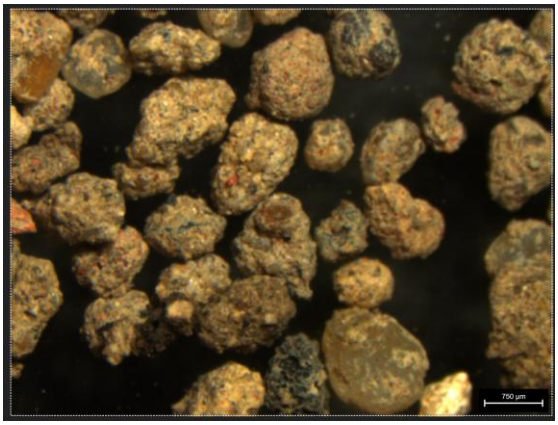


Figuur 3-65: Recycled mix 0/2 fractie 1

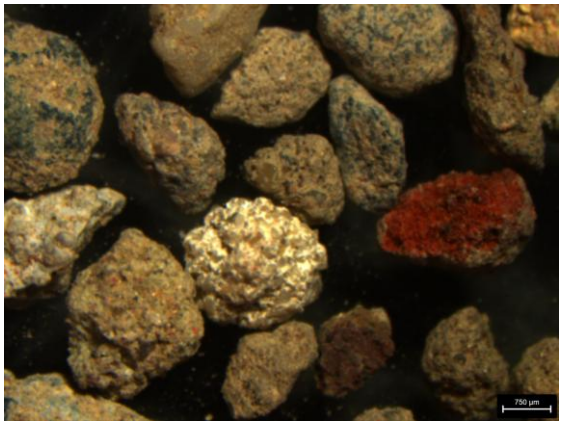


Figuur 3-66: Recycled mix 0/2 fractie 2

Fractie 3, weergegeven in Figuur 3-67, geeft dezelfde conclusies als fractie 2. De korrels hebben een ruwere rand en zijn niet uniform. Deze fracties vertonen in vergelijking met de eerder geobserveerde gerecycleerde granulaten eerder ronde korrels. Figuur 3-68 toont fractie 4. Hier kan duidelijk een baksteenrest in herkend worden alsook de grote verscheidenheid in afkomst van dit mengsel.



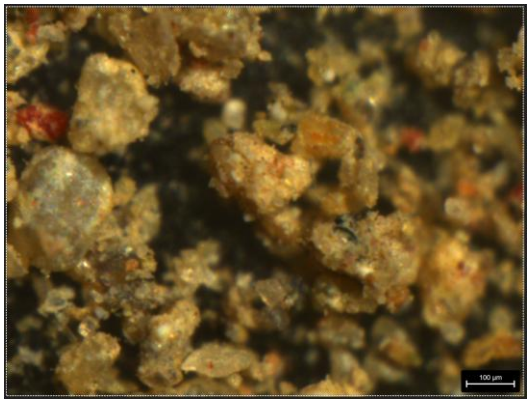
Figuur 3-67: Recycled mix 0/2 fractie 3



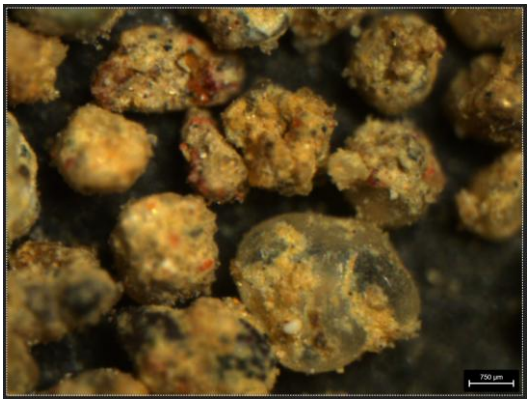
Figuur 3-68: Recycled mix 0/2 fractie 4

3.6.1.5 Recycled mix 0/3

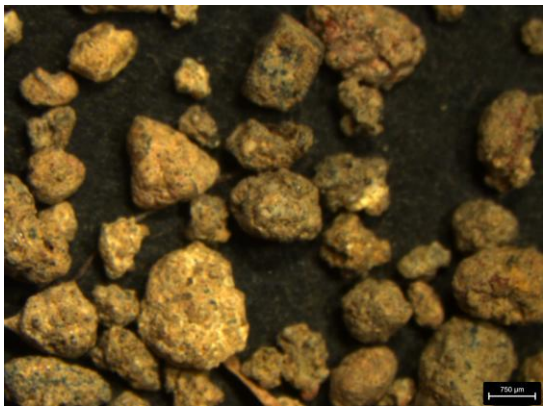
Voor de fracties van Recycled mix 0/3 gelden grotendeels dezelfde conclusies als bij de observatie van Recycled mix 0/2. Fractie 2, weergegeven in Figuur 3-70, toont de verscheidenheid in afkomst aangezien er zowel zanderige korrels, als korrels afkomstig van baksteen te herkennen zijn. De grotere fracties 3 en 4, respectievelijk weergegeven in Figuur 3-71 en Figuur 3-72, tonen opnieuw ruwere oppervlakken en meer ronde korrels dan bijvoorbeeld Chapyt of gerecycleerd betonzand.



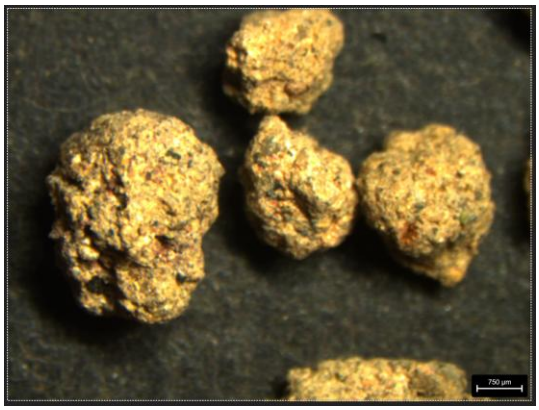
Figuur 3-69: Recycled mix 0/3 fractie 1



Figuur 3-70: Recycled mix 0/3 fractie 2



Figuur 3-71: Recycled mix 0/3 fractie 3



Figuur 3-72: Recycled mix 0/3 fractie 4

3.6.1.6 Rivierzand 0/4 26/90

De onderstaande afbeeldingen tonen microscoopbeelden van Rivierzand 0/4 26/90. Op Figuur 3-73 is fractie 1 te zien. De zandkorrels in deze fractie hebben over het algemeen een afgeronde vorm en variëren in kleur van doorzichtig tot lichtbruin. Op Figuur 3-74 is fractie 2 afgebeeld. Hier zijn voornamelijk de afgeronde korrels zichtbaar, die een mix van doorzichtige en lichtbruine tinten vertonen.



Figuur 3-73: Rivierzand 0/4 26/90 fractie 1



Figuur 3-74: Rivierzand 0/4 26/90 fractie 2

Figuur 3-75 geeft fractie 3 weer. De zandkorrels in deze fractie vertonen, net als bij fractie 1 en 2, een overwegend afgeronde vorm. Toch is er een iets grotere variatie in grootte en vorm zichtbaar, met enkele hoekigere en donkerdere tussen de lichte en beter afgeronde exemplaren. Op Figuur 3-76is fractie 4 afgebeeld, waarbij een individuele korrel wordt afgebeeld omdat de microscoop maximaal 1 korrel kon zien. Deze korrel is sterk afgerond, maar heeft enkele onregelmatigheden aan het oppervlak. Dit wijst erop dat grotere fracties binnen rivierzand soms minder perfect afgerond zijn dan de kleinere fracties, zoals eerder te zien was bij fractie 1 en 2.



Figuur 3-75: Rivierzand 0/4 26/90 fractie 3

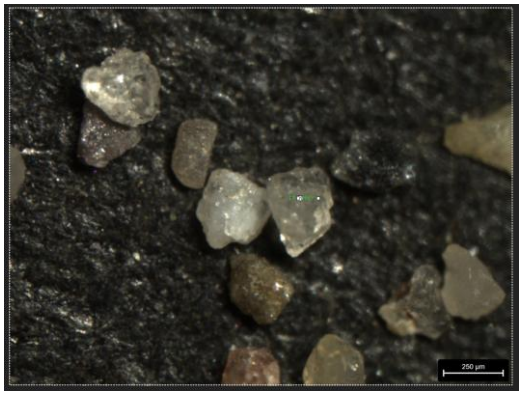


Figuur 3-76: Rivierzand 0/4 26/90 fractie 4

Wanneer deze waarnemingen worden gecombineerd met de eerder besproken fracties, bevestigt dit dat rivierzand in het algemeen een hoge rondheid en circulariteit heeft. Tegelijkertijd tonen de microscoopbeelden aan dat er binnen de verschillende fracties nog steeds variatie in vorm en grootte voorkomt. In vergelijking met de eerdere observatie van het Gerecycleerd betonzand 0/4 kan er geconcludeerd worden dat gerecycleerd betonzand een veel hoekigere en onregelmatigere korrelstructuur heeft. Dit zijn belangrijke eigenschappen die invloed hebben op de inwendige wrijvingshoek en de verwerkbaarheid van het mengsel, waarover later meer.

3.6.1.7 Rivierzand 0/4 35/90

De analyse van deze fracties, weergegeven in Figuur 3-77 tot en met Figuur 3-80, leidt tot gelijklopende conclusies als die van de eerder besproken fracties van het Rivierzand 0/4 26/90. Opnieuw is er een iets grotere mate van onregelmatigheid te zien binnen de grotere fracties, echter blijven de korrels steeds sterk afgerond.



Figuur 3-77: Rivierzand 0/4 35/90 fractie 1



Figuur 3-78: Rivierzand 0/4 35/90 fractie 2



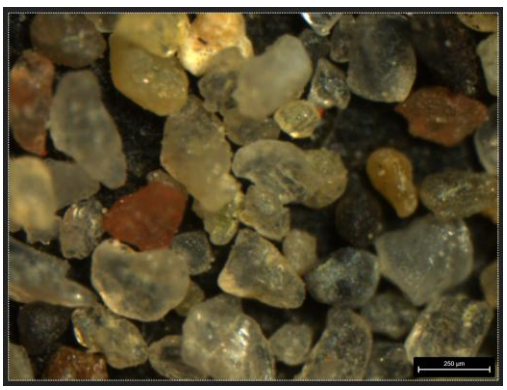
Figuur 3-79: Rivierzand 0/4 35/90 fractie 3



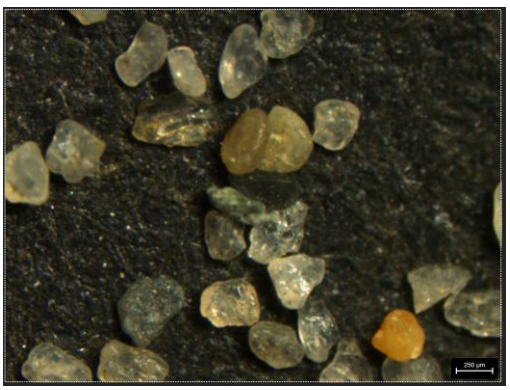
Figuur 3-80: Rivierzand 0/4 35/90 fractie 4

3.6.1.8 Mengzand 0/4 25/90

Mengzand 0/4 25/90 toont sterke gelijkenissen met de eerder besproken rivierzanden. Enkele gelijkenissen zijn het uitzicht en mate van zuiverheid van de korrels, aangezien het hier opnieuw om een van zand afkomstig type gaat. Figuur 3-81 toont fractie 2 van het Mengzand 0/4 25/90. Binnen deze fractie zijn enkele korrels met scherpe randen op te merken. Deze grotere mate van onregelmatigheid kan te wijten zijn aan de afkomst van het zandtype.



Figuur 3-81: Mengzand 0/4 25/90 fractie 1



Figuur 3-82: Mengzand 0/4 25/90 fractie 2



Figuur 3-83: Mengzand 0/4 25/90 fractie 3



Figuur 3-84: Mengzand 0/4 25/90 fractie 4

3.6.2 Analyse rondheid en circulariteit per fractie

Bij de vormanalyse van zandkorrels zijn rondheid en circulariteit twee essentiële parameters. Ze geven een objectieve maat voor hoe regelmatig en afgerond een korrel is, en worden gebruikt om verschillen tussen fracties en zandsoorten in kaart te brengen.

De rondheid geeft aan in welke mate een korrel lijkt op een perfecte cirkel. Dit wordt berekend via de verhouding tussen de oppervlakte van de korrel en de oppervlakte van de grootste omhullende cirkel. Hoe dichter deze waarde bij 1 ligt, hoe compacter en hoe meer afgerond de korrel is. De formule luidt:

$$Rondheid = \frac{4 * A}{\pi * d_{max}^2} \ [-] \qquad 3\text{-}18$$

Met:

A [mm²]: Oppervlakte van de korrel

d_{max} [mm]: Maximale korreldiameter

Hieronder is een voorbeeld uitgeschreven hoe de rondheid wordt berekend voor Rivierzand 0/4 26/90 voor fractie 4:

$$Rondheid = \frac{4 * A}{\pi * d_{max}^2} = \frac{4 * 13{,}84mm^2}{\pi * 4{,}65^2 mm^2} = 0{,}82$$

Een hoge rondheid duidt op een compacte, vloeiende vorm, terwijl een lage rondheid wijst op meer langgerekte of onregelmatige contour.

Circulariteit meet hoe sterk de omtrek van een korrel afwijkt van een cirkel. Het vergelijkt de oppervlakte van de korrel met de omtrek, waarbij een perfecte cirkel de maximale circulariteit van 1 heeft. De berekening gebeurt als volgt:

$$Circulariteit = \frac{4 * \pi * A}{O^2} [-] \qquad 3\text{-}19$$

Met:

A [mm²]: Oppervlakte van de korrel

O [mm]: Omtrek van de korrel

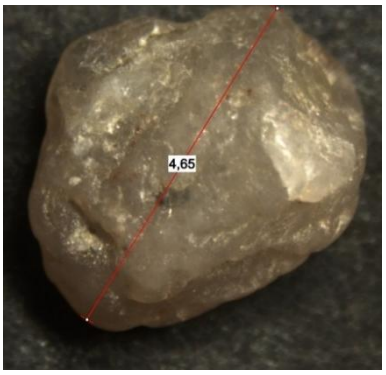
Hieronder is een voorbeeld uitgeschreven hoe de circulariteit wordt berekend voor Rivierzand 0/4 26/90 voor fractie 4:

$$Circulariteit = \frac{4 * \pi * A}{O^2} = \frac{4 * \pi * 13{,}84\ mm^2}{13{,}82^2 mm^2} = 0{,}93$$

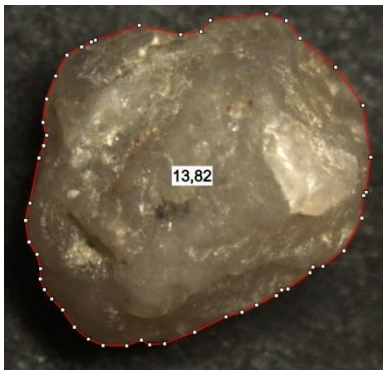
Hoe lager de circulariteit, hoe grilliger of hoekiger de vorm van de korrel.

Voor elke fractie werd geprobeerd om een representatieve korrel te selecteren, een korrel die het typische uiterlijk van die fractie weerspiegelt. Idealiter zouden meerdere korrels per fractie opgenomen moeten worden voor een meer betrouwbaar beeld, maar dit bleek echter niet haalbaar. Daarom is ervoor gekozen om per fractie één goed zichtbare en kenmerkende korrel te analyseren. Deze benadering levert een indicatief beeld op van de korrelvorm, al moet dit met de nodige nuance geïnterpreteerd worden.

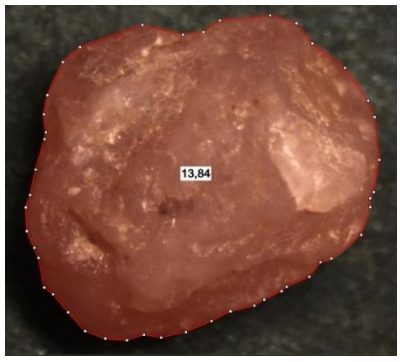
De maximale korreldiameter, de omtrek en de oppervlakte van de korrels konden nauwkeurig bepaald worden met behulp van de analysetool in de microscoopsoftware. Deze metingen worden respectievelijk weergegeven in de onderstaande figuren.



Figuur 3-85: Maximale korreldiameter, dmax



Figuur 3-86: Bepaling van de omtrek, O



Figuur 3-87: Bepaling van de oppervlakte, A

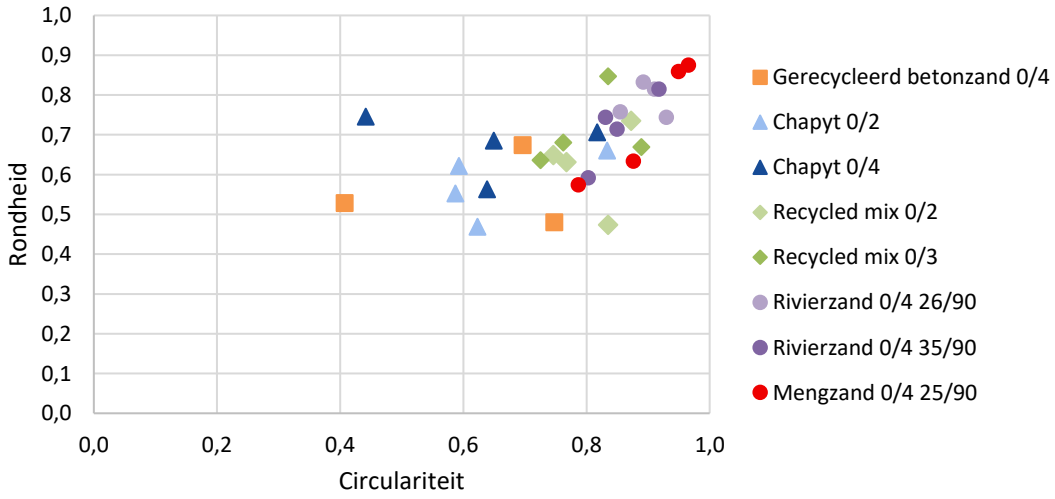
3.6.3 Resultaten

In onderstaande Tabel 3-21 worden de resultaten van de rondheid en circulariteit per fractie samengevat. Deze waarden bieden inzicht in de vorm van de zandkorrels en maken het mogelijk om de verschillen tussen de verschillende fracties en zandsoorten te analyseren. Zoals eerder vermeld zijn er geen resultaten opgenomen voor de fractie 4 van het gerecycleerd betonzand, aangezien de korrels in deze fractie te groot bleken voor de microscoop.

Tabel 3-21: Rondheid en circulariteit per fractie

Zandsoort		F_1	F_2	F_3	F_4
Gerecycleerd betonzand 0/4	Rondheid	0,53	0,48	0,67	/
	Circulariteit	0,41	0,75	0,70	/
Chapyt 0/2	Rondheid	0,62	0,66	0,47	0,55
	Circulariteit	0,59	0,83	0,62	0,59
Chapyt 0/4	Rondheid	0,75	0,56	0,71	0,68
	Circulariteit	0,44	0,64	0,82	0,65
Recycled mix 0/2	Rondheid	0,73	0,65	0,63	0,47
	Circulariteit	0,87	0,74	0,77	0,84
Recycled mix 0/3	Rondheid	0,64	0,68	0,67	0,85
	Circulariteit	0,73	0,76	0,89	0,84
Rivierzand 0/4 26/90	Rondheid	0,74	0,76	0,83	0,82
	Circulariteit	0,93	0,85	0,89	0,91
Rivierzand 0/4 35/90	Rondheid	0,74	0,81	0,59	0,71
	Circulariteit	0,83	0,92	0,80	0,85
Mengzand 0/4 25/90	Rondheid	0,57	0,63	0,88	0,86
	Circulariteit	0,79	0,88	0,97	0,95

In de onderstaande figuur worden de resultaten van de rondheid en circulariteit visueel voorgesteld.



Figuur 3-88: Resultaten rondheid en circulariteit

3.6.4 Conclusie

Uit de resultaten van de rondheid en circulariteit per fractie blijkt dat er duidelijke variaties bestaan tussen de verschillende zandsoorten. Rivierzand vertoont over het algemeen de hoogste waarden voor zowel rondheid als circulariteit, met een rondheid van 0,74 voor fractie F_1 en een circulariteit van 0,93 voor dezelfde fractie. Dit wijst op een zeer afgeronde en gelijkmatige korrelvorm. De groepering van de natuurlijke zanden is in Figuur 3-88 terug te vinden voor hoge waarden voor zowel circulariteit als rondheid, wat deze vaststelling staaft.

Gerecycleerd betonzand 0/4 daarentegen heeft lagere waarden voor rondheid en circulariteit, met een rondheid van 0,53 voor F_1 en een circulariteit van 0,41 voor dezelfde fractie. Dit duidt op hoekigere en minder regelmatige korrels, wat de verwerkbaarheid kan beïnvloeden, met mogelijk minder optimale verdichtingscapaciteit en sterkte. Deze hoekige en onregelmatige korrelstructuur zijn ook waargenomen op de microscopiebeelden, waar duidelijk te zien is dat de korrels scherpe randen en een minder afgeronde vorm vertonen.

Chapyt 0/2 en 0/4 vertonen ook lagere waarden voor zowel rondheid als circulariteit, met name een rondheid van 0,62 van Chapyt 0/2 voor F_1 en een circulariteit van 0,59 voor dezelfde fractie. Dit betekent dat dit zand meer onregelmatige en hoekige korrels bevat. Dit is ook zichtbaar op de gemaakte foto, waarop duidelijk te zien is dat de korrels een onregelmatige vorm hebben met scherpe randen en variërende groottes.

De Recycled mix-mengsels vertonen variabele resultaten afhankelijk van de fractie, zoals een rondheid van 0,73 voor fractie F_1 (Recycled mix 0/2) en een circulariteit van 0,87 voor dezelfde fractie. Dit suggereert dat de korrelvorm kan fluctueren op basis van het gebruikte materiaal en het verwerkingsproces. Deze mengsels kunnen echter nuttig zijn voor toepassingen waarbij de korrelvorm minder van belang is.

3.7 Overzicht van de eigenschappen

De in dit hoofdstuk onderzochte fysische eigenschappen van de zandsoorten worden in Tabel 3-22 samengevat.

Tabel 3-22: Overzicht eigenschappen

Zandsoort	FM [-]	Doorval bij 0,5 mm [%]	Apparent density [kg/m³]	WA Pyknometer [%]	WA Conductiviteit [%]	WA 5min [%]	φ_{gem} [°]	φ_{gem} [°]				Rondheid [-]				Circulariteit [-]			
								F_1	F_2	F_3	F_4	F_1	F_2	F_3	F_4	F_1	F_2	F_3	F_4
Gerecycleerd betonzand 0/4	2,99	41	2605	7,81	19,01	3,60	33	37	35	-	-	0,53	0,48	0,67	/	0,41	0,75	0,70	/
Chapyt 0/2	2,28	53	1860	13,15	54,49	8,34	38	43	34	34	36	0,62	0,66	0,47	0,55	0,59	0,83	0,62	0,59
Chapyt 0/4	2,44	54	1900	10,85	42,77	7,45	35	44	33	35	37	0,75	0,56	0,71	0,68	0,44	0,64	0,82	0,65
Recycled mix 0/2	2,48	55	2465	3,21	14,77	2,07	31	28	28	33	35	0,73	0,65	0,63	0,47	0,87	0,74	0,77	0,84
Recycled mix 0/3	3,10	47	2470	3,18	20,68	2,92	27	32	31	33	37	0,64	0,68	0,67	0,85	0,73	0,76	0,89	0,84
Rivierzand 0/4 26/90	3,15	31	2615	-0,61	1,08	0,14	28	29	29	30	32	0,74	0,76	0,83	0,82	0,93	0,85	0,89	0,91
Rivierzand 0/4 35/90	3,09	35	2620	0,09	1,11	0,15	27	29	29	30	32	0,74	0,81	0,59	0,71	0,83	0,92	0,80	0,85
Mengzand 0/4 25/90	2,46	64	2775	-0,16	1,66	0,05	28	29	28	28	32	0,57	0,63	0,88	0,86	0,79	0,88	0,97	0,95

3.8 Conclusie na hoofdstuk 3

Er werden duidelijke verschillen vastgesteld in fysische eigenschappen tussen de geteste zandtypes. Natuurlijke rivierzanden vertoonden goed gegradeerde, dichte structuren met afgeronde, niet-poreuze korrels, wat resulteerde in een lage waterabsorptie en een lage inwendige wrijvingshoek wat de goede verwerkbaarheid verklaart. Gerecycleerde granulaten, zoals Chapyt en gerecycleerd betonzand, hadden een poreuze, hoekige structuur met een hogere waterabsorptie. Recycled mix vormde hierop een uitzondering: dit materiaal vertoonde, net als rivierzand, een lage inwendige wrijvingshoek en dus een vergelijkbaar verwerkingsgedrag. De bevindingen uit de pyknometertest en de verschillende dichtheidsmetingen bevestigen het poreuze karakter van de gerecycleerde granulaten. Deze conclusies worden gestaafd door de microscopiebeelden, waarop cementresten, microscheuren en poriën duidelijk zichtbaar zijn. Ook de resultaten van de inwendige wrijvingshoek komen overeen met de morfologische kenmerken die via microscopie werden waargenomen, wat het verband tussen korrelvorm, porositeit en menggedrag versterkt. Deze eigenschappen zijn essentieel bij het ontwerpen van een performant dekvloermengsel en moeten zorgvuldig worden meegenomen in het mengontwerp van toekomstig dekvloermengsels in de komende hoofdstukken.

Hoofdstuk 4: Gedrag van dekvloermengsels in verse en geharde toestand

In dit hoofdstuk worden de consistentie, verwerkbaarheid en sterkte-eigenschappen van dekvloermengsels geëvalueerd, afzonderlijk voor elk type zand. De consistentie wordt beoordeeld met zes proeven: de vloeitafeltest, mini-slumptest, V-funneltest, Casagrande-test, Vebe-test en een omgekeerde Abramstest. Daarnaast wordt er gekeken naar de praktische verwerkbaarheid, zoals het vermogen tot verdichten en opensmeren zonder visuele gebreken. Tot slot worden buig- en drukproeven uitgevoerd om de mechanische sterkte na uitharding te bepalen.

4.1 Samenstelling

Een standaard dekvloermengsel heeft een volumetrische mengverhouding van 1:6 (cement : zand). Volgens VITO moet er 225 kg cement per m³ zand (schijnbaar volume) worden toegevoegd. De technische fiche van het gebruikte cement staat in Bijlage F. Op basis van deze gegevens en onderstaande formule 4-1 kan voor een bepaalde hoeveelheid zand een gepaste hoeveelheid cement worden bepaald:

$$m_{cement} = D_{cement} * V_{zand}\ [g] \qquad 4\text{-}1$$

Met:

m_{cement} [g]: Massa van het cement

V_{zand} [l]: Schijnbaar volume van het zand (2,5 l)

D_{cement} [g/l]: Cementdosering (225 g/l)

Voor alle proeven wordt 2,5 liter zand gebruikt en een cementdosering van 225 g/l. De benodigde cementmassa wordt in dit geval:

$$m_{cement} = D_{cement} * V_{zand} = 225\ g/l * 2{,}5\ l = 562{,}5\ g$$

Eens de cementmassa bepaald is, kan de hoeveelheid toe te voegen water worden bepaald aan de hand van de toegevoegde water-cementfactor:

$$W/C_{add} = \frac{m_{w,tot}}{m_{cement}}\ [-] \qquad 4\text{-}2$$

Met:

W/C_{add} [-]: Toegevoegde water-cement factor

m_{cement} [g]: Massa van het cement (562,5 g)

$m_{w,tot}$ [g]: Totale massa van het water

Door bovenstaande formule toe te passen kunnen de bijhorende watermassa's voor de verschillende W/C_{add}-factoren worden berekend. Hieronder is een voorbeeld uitgewerkt voor W/C_{add}-factor van 0,8.

$$W/_{C_{add}} = \frac{m_{w,tot}}{m_{cement}} \rightarrow m_{w,tot} = W/_{C_{add}} * m_{cement} = 0{,}8 * 562{,}5\ g = 450\ g$$

Aangezien de dichtheid van elk zandtype verschilt, varieert ook de werkelijke massa van het zand bij een vast volume. De schijnbare dichtheid werd bepaald door 1 liter van elk zandtype af te wegen. In onderstaande tabel worden de gemeten schijnbare dichtheden weergegeven voor elk zandtype.

Tabel 4-1: Gemeten dichtheden van de zandsoorten

Zandsoort	**Schijnbare dichtheid [g/l]**
Gerecycleerd betonzand 0/4	1240,04
Chapyt 0/2	756,00
Chapyt 0/4	823,35
Recycled mix 0/2	1241,31
Recycled mix 0/3	1224,00
Rivierzand 0/4 26/90	1698,58
Rivierzand 0/4 35/90	1704,88
Mengzand 0/4 25/90	1631,88

Vervolgens werd de massa van het zand berekend door het volume van 2,5 liter te vermenigvuldigen met deze schijnbare dichtheid:

$$m_{zand} = V_{zand} * \rho_{zand,i}\ [g] \qquad 4\text{-}3$$

Met:

V_{zand}[l]: Schijnbaar volume van het zand (2,5 l)

m_{zand}[g]: Massa van het zand i

$\rho_{s,zand,i}$[g/l]: Schijnbare dichtheid van het zand i

Voor Recycled mix 0/3 wordt dit:

$$m_{zand} = V_{zand} * \rho_{zand,i} = 2{,}5\ l * 1224\ \frac{g}{l} = 3060\ g$$

De totale massa van het toegevoegde water wordt niet volledig gebruikt voor de reactie met cement. Een deel van dit water wordt namelijk opgenomen door de granulaten. De rest blijft beschikbaar voor de chemische reactie met cement. De verdeling van het water dat wordt toegevoegd aan het mengsel wordt als volgt beschreven:

$$m_{w,tot} = m_{w,granulaat} + m_{w,reactie}\ [g] \qquad 4\text{-}4$$

Met:

$m_{w,tot}$ [g]: Totale toegevoegde massa van het water

$m_{w,granulaat}$ [g]: Massa water dat wordt opgenomen door de granulaten

$m_{w,reactie}$ [g]: Massa water dat in reactie kan treden

De hoeveelheid water die door het granulaat kan worden geabsorbeerd tijdens het mengen, wordt berekend op basis van de eerder bepaalde waterabsorptie na vijf minuten onderdompeling, aangeduid als WA_{5min}. De formule hiervoor luidt:

$$m_{w,granulaat} = WA_{5min} * m_{zand}\ [g] \qquad 4\text{-}5$$

Met:

$m_{w,granulaat}$ [g]: Massa water dat wordt opgenomen door de granulaten

WA_{5min} [%]: Waterabsorptie van het granulaat na 5 minuten

m_{zand} [g]: Totale massa van het zand

Voor Recycled mix 0/3 wordt dit:

$$m_{w,granulaat} = WA_{5min} * m_{zand} = 2{,}92\ \% * 3060\ g = 89{,}46\ g$$

De resterende hoeveelheid water die beschikbaar blijft voor chemische binding met het cement, wordt dan als volgt berekend:

$$m_{w,reactie} = m_{w,tot} - m_{w,granulaat}\ [g] \qquad 4\text{-}6$$

Met:

$m_{w,tot}$ [g]: Totale massa van het water

$m_{w,granulaat}$ [g]: Massa water dat wordt opgenomen door de granulaten

$m_{w,reactie}$ [g]: Massa van het water dat kan binden met het cement

Voor Recycled mix 0/3 met een toegevoegde W/C-factor van 0,8 wordt dit:

$$m_{w,reactie} = m_{w,tot} - m_{w,granulaat} = 450\ g - 89{,}46\ g = 360{,}54\ g$$

Omdat niet al het water beschikbaar blijft voor de hydratatiereactie met cement, moet de effectieve water-cementfactor berekend worden. Deze wordt gedefinieerd als de verhouding tussen het chemisch beschikbare water en de cementmassa:

$$W/C_{effectief} = \frac{m_{w,reactie}}{m_{cement}}\ [-] \qquad 4\text{-}7$$

Met:

$W/C_{effectief}$ [-]: Effectieve water-cement factor

m_{cement} [g]: Massa van het cement (562,5 g)

$m_{w,reactie}$ [g]: Massa van het water dat kan binden met het cement

Voor Recycled mix 0/3 wordt dit:

$$W/C_{effectief} = m_{w,reactie}/m_{cement} = \frac{360{,}54\ g}{562{,}5\ g} = 0{,}6$$

De berekening van de andere W/C_{eff}-factoren voor Recycled mix 0/3 worden weergegeven in onderstaande Tabel 4-2. De berekening van de andere zandsoorten worden opgenomen in Bijlage G. Hierbij valt op dat voor de natuurlijke zanden de W/C_{add} gelijk is aan de W/C_{eff}, wat logischerwijs volgt uit de vaststelling dat deze granulaten geen water absorberen en bijgevolg al het water aanwezig in het mengsel kan worden gebruikt voor de hydratatiereactie.

Tabel 4-2: Berekening effectieve W/C-factor recycled mix 0/3

Recycled mix 0/3

W/C_{add} [-]	m_{zand} [g]	$m_{w,tot}$ [g]	$m_{w,granulaat}$ [g]	$m_{w,reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,8	3060,00	450,00	89,46	360,54	0,6
0,9	3060,00	506,25	89,46	416,79	0,7
1,0	3060,00	562,50	89,46	473,04	0,8
1,1	3060,00	618,75	89,46	529,29	0,9
1,2	3060,00	675,00	89,46	585,54	1,0
1,3	3060,00	731,25	89,46	641,79	1,1
1,4	3060,00	787,50	89,46	698,04	1,2
1,5	3060,00	843,75	89,46	754,29	1,3
1,6	3060,00	900,00	89,46	810,54	1,4
1,7	3060,00	956,25	89,46	866,79	1,5
1,8	3060,00	1012,50	89,46	923,04	1,6
1,9	3060,00	1068,75	89,46	979,29	1,7
2,0	3060,00	1125,00	89,46	1035,54	1,8
2,1	3060,00	1181,25	89,46	1091,79	1,9
2,2	3060,00	1237,50	89,46	1148,04	2,0
2,3	3060,00	1293,75	89,46	1204,29	2,1
2,4	3060,00	1350,00	89,46	1260,54	2,2

4.2 Consistentie van dekvloermengsels

Om de consistentie van het dekvloermengsel kwantitatief te evalueren, worden zes proeven uitgevoerd: de Casagrande-test, de V-funneltest, de mini-slumptest, de vloeitafeltest, de Vebe-test en de omgekeerde Abramskegel. Deze beproevingen zijn oorspronkelijk ontwikkeld voor betonmengsels, maar worden in deze studie toegepast op dekvloeren bij gebrek aan een gestandaardiseerde, optimale consistentietest specifiek voor dit type toepassing. Ze bieden gezamenlijk inzicht in de consistentie, het vloeigedrag en de stabiliteit van het mengsel, drie parameters die cruciaal zijn voor een correcte plaatsing en een duurzame eindkwaliteit van de dekvloer. Elke test wordt herhaald voor verschillende toegevoegde water-cement-factoren, met als doel de optimale toegevoegde W/C-factor te identificeren die een goede verwerkbaarheid combineert met structurele betrouwbaarheid. Door systematisch te variëren in W/C-factoren kan de invloed van het watergehalte op het gedrag van het mengsel nauwkeurig worden geanalyseerd. Voor de V-funneltest, die het grootste monstervolume vereist, wordt gekozen voor 2500 ml zand om een voldoende representatief resultaat te bekomen.

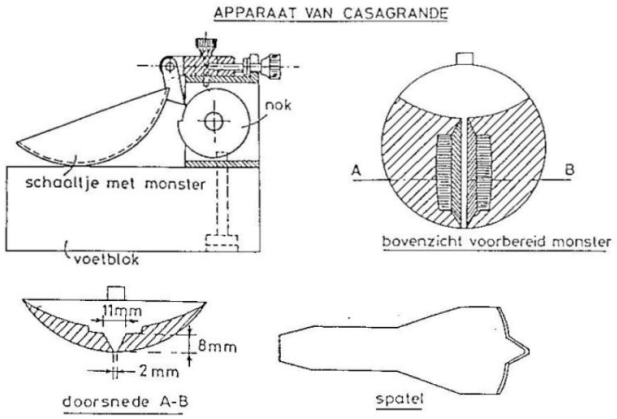
4.2.1 Casagrande-test

De vloeigrens is het watergehalte waarbij de grond overgaat van de vloeibare naar de plastische toestand. De bepaling van de vloeigrens wordt gestandaardiseerd met behulp van het Casagrande-apparaat. (Dirk Vinckier, 2018)

4.2.1.1 Uitvoering

1) Voorbereiding van het testmonster

Een natte laag mengsel van ongeveer 1 cm dik wordt gelijkmatig in het metalen schaaltje van het apparaat aangebracht. Nadien wordt met een spatel een V-vormige groef in het midden van het mengsel getrokken. In onderstaande foto staan alle materialen die nodig zijn voor deze test.



Figuur 4-1: Apparaat van Casagrande (Dirk Vinckier, 2018)

2) Uitvoeren van de test

Men laat het schaaltje herhaaldelijk van een hoogte van 1 cm op een harde ondergrond vallen, totdat de groef sluit. Het aantal slagen (n) dat hiervoor nodig is, wordt genoteerd.

3) Bepalen van het watergehalte

Na het sluiten van de groef wordt het watergehalte van het gebruikte zandmengsel bepaald. Dit gebeurt door de massa van het toegevoegde water te delen door de som van de droge massa van het zand en de massa cement.

$$w_x = \frac{m_{w,tot}}{m_{zand} + m_{cement}} \ [\%] \qquad 4\text{-}8$$

Met:

w_x [%]: Watergehalte bij een bepaalde toegevoegde W/C-factor

m_{zand}[g]: Massa van het zand i

m_{cement} [g]: Massa van het cement (562,5 g)

Voor Rivierzand 0/4 26/90 met een toegevoegde W/C-factor van 0,6 is dit:

$$w_{Rivierzand\ 0/4\ 26/90,W/C0,6} = \frac{450\ g}{4262\ g + 562{,}5\ g} = 9{,}33\ \%$$

4) Herhaling bij andere watergehaltes

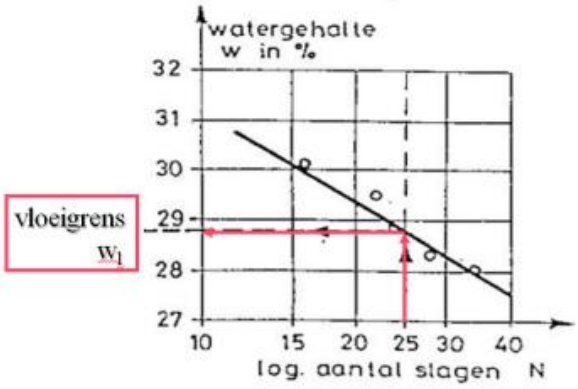
De proef wordt meerdere keren uitgevoerd met verschillende watergehaltes (w_1, w_2,…), wat telkens een bijhorend aantal slagen (n_1, n_2,…) oplevert.

5) Opstellen van de grafiek

De resultaten worden uitgezet in een grafiek met het watergehalte op een lineaire schaal (op de y-as) en het aantal slagen op een logaritmische schaal (op de x-as).

6) Bepaling van de vloeigrens

Met behulp van een lineaire regressie wordt een rechte lijn door de meetpunten gelegd. De vloeigrens (w_1) is het watergehalte waarbij de groef na exact 25 slagen sluit. Een voorbeeld van deze regressie staat op onderstaande figuur.



Figuur 4-2: Voorbeeldgrafiek Casagrande-test (Dirk Vinckier, 2018)

4.2.1.1 Resultaten

De proef werd uitgevoerd op Rivierzand 0/4 26/90 en Rivierzand 0/4 35/90 met een toegevoegde water-cementfactor (W/C) van 0,6.

Tijdens het uitvoeren van de Casagrande-test werd opgemerkt dat het dekvloermengsel niet op zijn plaats bleef toen de groef met een spatel werd getrokken (zie Figuur 4-3). Het zand werd deels meegetrokken, en bovendien gleed het materiaal uit de kom bij het toepassen van de schokken, waardoor de groef niet kon samenvloeien (zie Figuur 4-4).

Op basis van deze bevindingen kan er geconcludeerd worden dat de Casagrande-test niet geschikt is voor de analyse van dekvloeren.



Figuur 4-3: Na het trekken van de lijn



Figuur 4-4: Na het schokken

4.2.2 Mini-slump test

4.2.2.1 Norm NBN EN 12350-2

De NBN EN 12350-2 beschrijft de slump-test, een eenvoudige manier om de verwerkbaarheid en consistentie van vers beton te bepalen. Hierbij wordt beton in een metalen kegelvormige mal gestort, waarna de mal wordt opgetild en de mate van inzakking wordt gemeten. (NBN EN 12350-2, 2019)

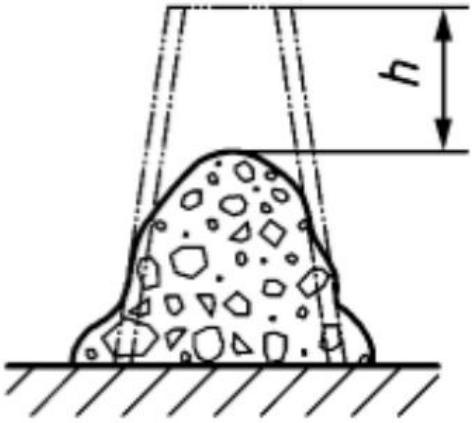
4.2.2.2 Uitvoering

1) **Vullen en verdichten**

De mini-slump kegel wordt in 3 lagen gevuld. De eerste 2 lagen worden elk 10 keer verdicht, terwijl de bovenste en laatste laag maar 5 keer wordt verdicht.

2) **Verwijderen en meten**

Na het optillen van de kegel wordt de inzinking van het mengsel gemeten met een plooimeter en afgerond tot 10 mm. De test wordt ongeldig verklaard als er een asymmetrische inzinking is of er onvoldoende samenhang is van het mengsel.



Figuur 4-5: Mini-slump schematisch (NBN EN 12350-2, 2019)



Figuur 4-6: Kegel mini-slump

3) Doel van de test

Een inzinking van 0 mm wijst op een ideale consistentie voor een dekvloer: het zandmengsel is noch te nat, noch te droog en heeft een stabiele consistentie.

4) Toepassing bij W/C-factoren

De test wordt uitgevoerd bij een toenemende toegevoegde W/C-factor. Zodra een rechtopstaande kegel ontstaat en daarna weer instort bij teveel water, wordt het toevoegen van water stopgezet.

4.2.2.3 Resultaten en conclusie

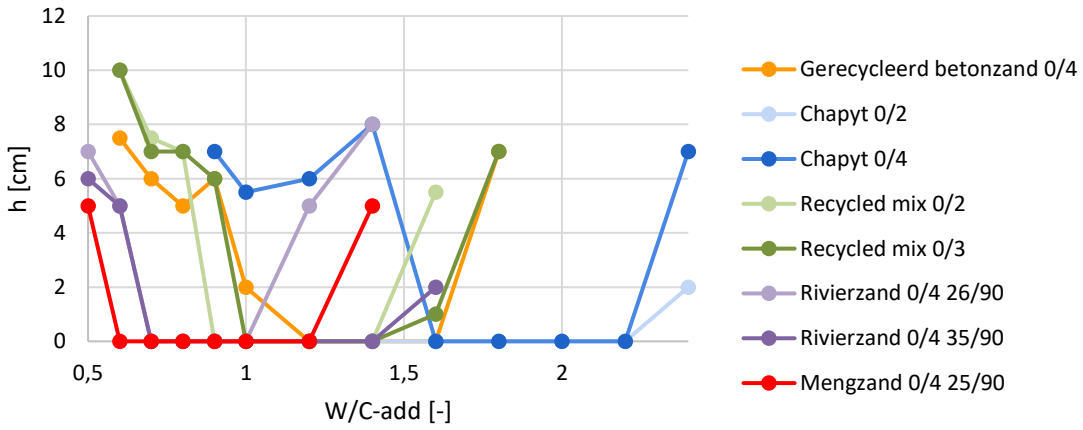
De resultaten van deze test voor de verschillende mengsels en toegevoegde W/C-factoren worden weergegeven in de onderstaande tabel.

Tabel 4-3: Resultaten mini-slump test

(W/C)add [-]	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1**	**1,2**	**1,4**	**1,6**	**1,8**	**2,0**	**2,2**	**2,4**
							h [cm]						
Gerecycleerd betonzand 0/4	-	7,5	6	5	6	2	0	0	0	7	-	-	-
Chapyt	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	2

0/2													
Chapyt 0/4	-	-	-	-	7	5,5	6	8	0	0	0	0	7
Recycled mix 0/2	-	10	7,5	7	0	0	0	0	5,5	-	-	-	-
Recycled mix 0/3	-	10	7	7	6	0	0	0	1	7	-	-	-
Rivierzand 0/4 26/90	7	5	0	0	0	0	5	-	-	-	-	-	-
Rivierzand 0/4 35/90	5	6	0	0	0	0	0	0	2	-	-	-	-
Mengzand 0/4 25/90	5	0	0	0	0	0	0	5	-	-	-	-	-

In onderstaande grafiek worden de resultaten van de mini-slump visueel voorgesteld.



Figuur 4-7: Mini-slump resultaten

De rivierzanden en het mengzand geven een rechtopstaande kegel die, in vergelijking met de gerecycleerde granulaten, tot stand komt bij beduidend lagere toegevoegde W/C_{add}-factoren. Dit komt door het feit dat deze natuurlijke zanden geen waterabsorptie hebben. Bijgevolg kan het toegevoegde water gebruikt worden voor de samenhang van het mengsel. De gerecycleerde granulaten absorberen daarentegen een deel van het toegevoegde water alvorens het water kan gebruikt worden om een samenhang te bekomen. Hierdoor liggen

de toegevoegde W/C_{add}-factoren, waarbij een rechtopstaande kegel bekomen wordt, voor de gerecycleerde granulaten hoger.

Chapyt 0/2 en Chapyt 0/4 vertonen pas bij zeer hoge toegevoegde W/C_{add}-factoren ($\geq$ 1,6) een rechtopstaande kegel. Dit kan verklaard worden door de hoge waterabsorptie die karakteristiek is voor de Chapyt-mengsels, zoals aangetoond in 3.3.1.50. Het verschil tussen de fijne (0/2) en grovere (0/4) Chapyt-mix toont aan dat granulometrie een belangrijke rol speelt: Chapyt 0/2 heeft een groot bereik aan W/C-factoren waarbij een rechtopstaande kegel wordt gevonden. Dit kan verklaard worden aan de hand van de lagere inwendige wrijvingshoek die bekomen wordt voor Chapyt 0/4, zoals geconstateerd in 3.4.5

Ook voor de Recycled mix-mengsels geldt hetzelfde verband binnen de granulometrie. Het fijnere 0/2-mengsel heeft reeds bij een lagere toegevoegde W/C_{add}-factor van 0,9 een vormvaste kegel tegenover het 0/3-mengsel, dat vormvast wordt bij een W/C-factor van 1. Opnieuw kan dit verklaard worden aan de hand van de lagere inwendige wrijvingshoek voor het grovere 0/3 mengsel. Algemeen tonen de Recycled mix-mengsels ook een hoger bereik betreffende de W/C-factor, vergeleken met de rivierzanden. Ook dit is te verklaren door de hogere waterabsorptie van deze mengsels. Het Gerecycleerd betonzand 0/4 vertoont een klein bereik aan vormvastheid. Slechts bij drie W/C-factoren wordt een rechtopstaande kegel gevonden, namelijk tussen W/C_{add} = 1,2 en W/C_{add} = 1,6. Ook hier treedt een rechtopstaande kegel op bij hogere W/C-factoren vergeleken met de rivierzanden. Dit is opnieuw te wijten aan de hogere waterabsorptie, onder andere door mortelresten en de porositeit van het gerecycleerde granulaat.

4.2.3 Vebe-apparaat

De Vebe-test meet de consistentie van vers beton, specifiek voor eerder droge betonsamenstellingen. Mede hierdoor wordt onderzocht of deze test bruikbare resultaten biedt voor dekvloermengsels. Het resultaat is de Vebe-tijd (in seconden), die aangeeft hoe lang het duurt voor het beton (in dit geval dekvloermengsel) volledig is vervormd onder trilling. Naar analogie met de eerder vermeldde formules in paragraaf 4.1 wordt een mengsel samengesteld met een volume van 5,5 l Rivierzand 0/4 35/90 en een W/C-factor van 0,7.

4.2.3.1 Norm NBN EN 12350-3

De NBN EN 12350-3:2019 beschrijft de Vebe-proef om de verwerkbaarheid en de consistentie van vers beton te meten. Daarbij wordt de tijd bepaald die nodig is om het beton door trilling te verdichten. De methode is geschikt voor beton met een lage tot matige verwerkbaarheid dus ideaal voor dekvloeren. Bij een Vebe-tijd korter dan 5 seconden of langer dan 30 seconden is de test niet geschikt. (NBN EN 12350-3, 2019)

4.2.3.2 Uitvoering van de Vebe-test

1) Voorbereiding van het testapparaat

De Vebe-meter wordt geplaatst op een stabiele en horizontale ondergrond. De metalen container wordt stevig vastgemaakt met behulp van vleugelmoeren. Figuur 4-8 toont een foto van het Vebe-apparaat.



Figuur 4-8: Vebe-apparaat

De kegelvormige bekisting wordt vooraf bevochtigd met een vochtige doek en centraal in de container geplaatst. De kegel wordt weergegeven in Figuur 4-9 en heeft een hoogte van 30 cm. De kleine en grote diameter bedragen respectievelijk 10 en 20 cm.



Figuur 4-9: Kegelvorm

2) Vullen van de kegel met beton

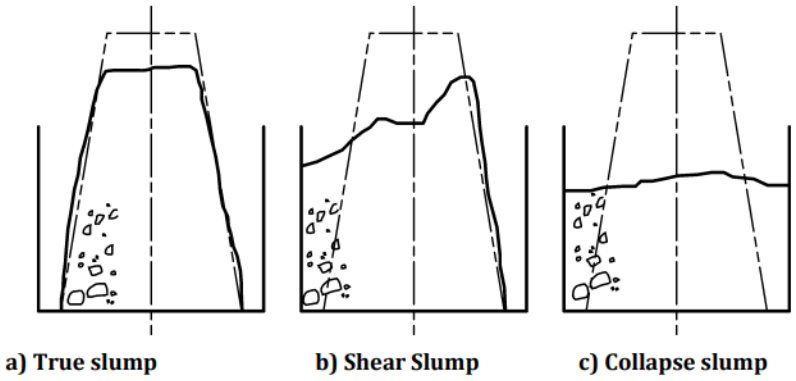
De kegel wordt in drie gelijke lagen gevuld met het verse dekvloermengsel. Elke laag wordt afzonderlijk verdicht met 25 slagen van een metalen staaf. De slagen worden gelijkmatig verdeeld over het oppervlak van de laag. De metalen staaf wordt weergegeven in Figuur 4-10.



Figuur 4-10: De metalen staaf

3) Verwijderen van de kegel en beoordelen van het slumpgedrag

Na het afstrijken van het oppervlak bovenaan de kegel, wordt de kegel gelijkmatig opgetild in een tijdspanne van 2 tot 4 seconden. Hierbij wordt beoordeeld of het mengsel een ware slump (a: True slump) vertoont, dan wel een afschuifslump (b: Shear slump) of intsortslump (c: Collapse slump). Indien een ware slump wordt vastgesteld, wordt de transparante schijf voorzichtig neergelaten tot deze net in contact komt met het hoogste punt van het mengsel. De slumphoogte wordt afgelezen op de schaalverdeling van de stang. De mogelijke slump-vormen worden weergegeven in Figuur 4-11. Het resultaat voor het eerder vermeldde mengsel wordt weergegeven in Figuur 4-12 en toont een ware slump.



Figuur 4-11: Vormen van slump (NBN EN 12350-3, 2019)



Figuur 4-12: Ware slump

4) Meting van de Vebe-tijd

Na het positioneren van de transparante schijf wordt de bevestiging losgemaakt zodat de schijf vrij kan zakken. De triltafel en de timer worden gelijktijdig gestart. Terwijl het mengsel zich onder invloed van trilling hervormt, wordt geobserveerd wanneer de schijf volledig in contact is met het oppervlak. Op dat moment wordt de timer gestopt en de tijd geregistreerd in seconden. Deze tijd is de Vebe-tijd.

4.2.3.3 Resultaten en conclusie

De proef werd uitgevoerd met Rivierzand 0/4 35/90 en een toegevoegde W/C_{add}-factor van 0,7. Tijdens de uitvoering van de test bleek na 30 seconden dat de plaat niet volledig in contact komt met het oppervlak van het mengsel. Ook bij een verlengde trilduur van 60 seconden bleef slechts een beperkt oppervlak tegen de plaat gedrukt. Het resultaat na 60 seconden trillen is weergegeven in Figuur 4-13.



Figuur 4-13: Verdicht mengsel na een Vebe-tijd van 60 seconden

Hieruit kan worden afgeleid dat de Vebe-test niet geschikt is voor het karakteriseren van de consistentie van dekvloermengsels.

4.2.3.4 Slump-hoogte in functie van de tijd

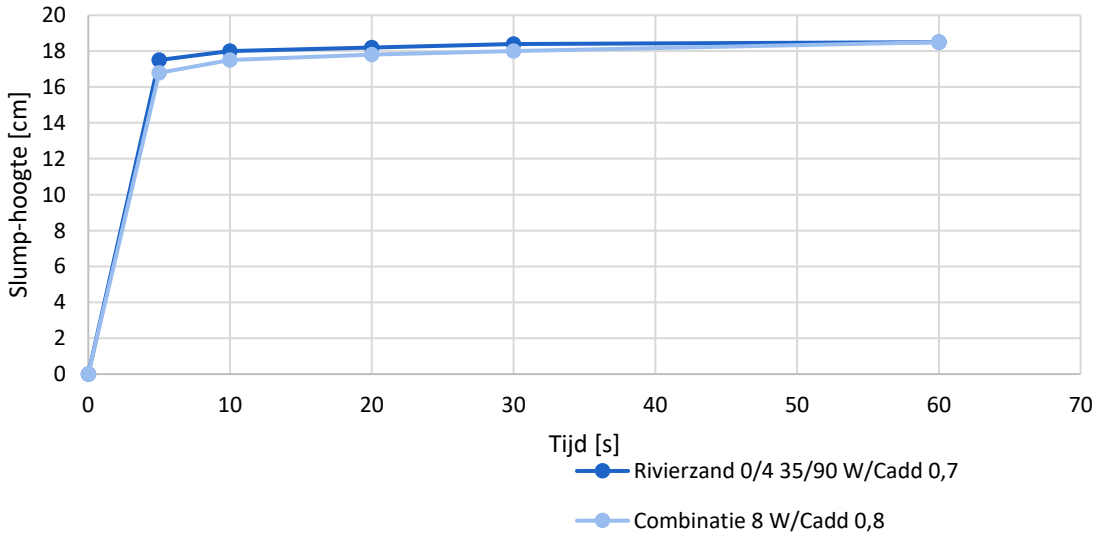
Om toch bruikbare metingen van de verwerkbaarheid te bekomen, werd onderzocht of het mogelijk was om een aangepaste testmethode te ontwikkelen met behulp van hetzelfde meettoestel. Er werd gekozen om de verandering van de slump-hoogte in functie van de tijd te analyseren. Bij deze proef werd de slump-hoogte van het dekvloermengsel opgemeten na tijdsintervallen van 5, 10, 20, 30 en 60 seconden. De test werd uitgevoerd voor twee mengsels: enerzijds Rivierzand 0/4 35/90 met een toegevoegde W/C_{add}-factor

van 0,7 en anderzijds combinatie 8 (beschreven in volgende hoofdstuk) met een toegevoegde W/C-factor van 0,8. De gemeten waarden worden weergegeven in Tabel 4-4.

Tabel 4-4: Slump-hoogte in functie van tijd

	Rivierzand 0/4 35/90	**Combinatie 8**
Tijd [s]	**Slump-hoogte [cm]**	
0	0	0
5	17,5	16,8
10	18,0	17,5
20	18,2	17,8
30	18,4	18
60	18,5	18,5

De resultaten zijn tevens grafisch weergegeven in onderstaande figuur. Er kan worden vastgesteld dat beide mengsels een gelijkaardig verloop van de slump-hoogte vertonen doorheen de tijd. Het verschil tussen beide reeksen is verwaarloosbaar, waardoor geen onderscheid kan worden gemaakt tussen beide mengsels. Hieruit blijkt dat deze aangepaste methode eveneens geen significant inzicht biedt in verwerkbaarheid van dekvloermengsels.



Figuur 4-14: Slump-hoogte i.f.v. de tijd

4.2.4 Vloeitafel

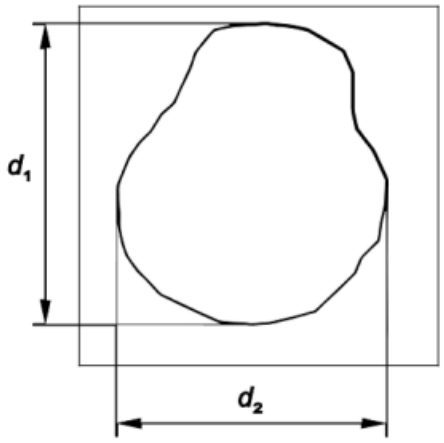
4.2.4.1 Norm NBN EN 12350-5

De NBN EN 12350-5 beschrijft de flow-table test voor het bepalen van de vervormbaarheid van vers beton. Bij deze test wordt het beton op een metalen plaat geplaatst, waarna de plaat meerdere keren wordt opgetild en neergelaten om het beton te laten uitvloeien. (NBN EN 12350-5, 2019)

4.2.4.2 Uitvoering

1) Vullen en verdichten van de kegel

De kegel wordt in drie lagen gevuld. Elke laag wort respectievelijk 10, 10 en 5 keer aangestampt om het mengsel gelijkmatig te verdichten.



Figuur 4-15: Opmeting diameter vloeitafel (NBN EN 12350-5, 2019)



Figuur 4-16: Kegel flow-table

2) Schokken op de vloeitafel

Na het verwijderen van de kegel wordt de tafel 15 keer geschokt om het mengsel te laten uitvloeien. De vloeitafel wordt weergegeven in Figuur 4-17.



Figuur 4-17: De vloeitafel

3) Meting van de uitvloei

De uitgevloeide diameter wordt gemeten in twee loodrechte richtingen met een plooimeter en afgerond op 5 mm.

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \; [cm] \qquad 4\text{-}9$$

Met:

d [cm]: Uitvloeiing

d_1 [cm]: Maximale afmeting van de uitvloeiing van het mengsel, parallel aan één zijde van de tafel

d_2 [cm]: Maximale afmeting van de uitvloeiing van het mengsel, parallel aan de andere zijde van de tafel

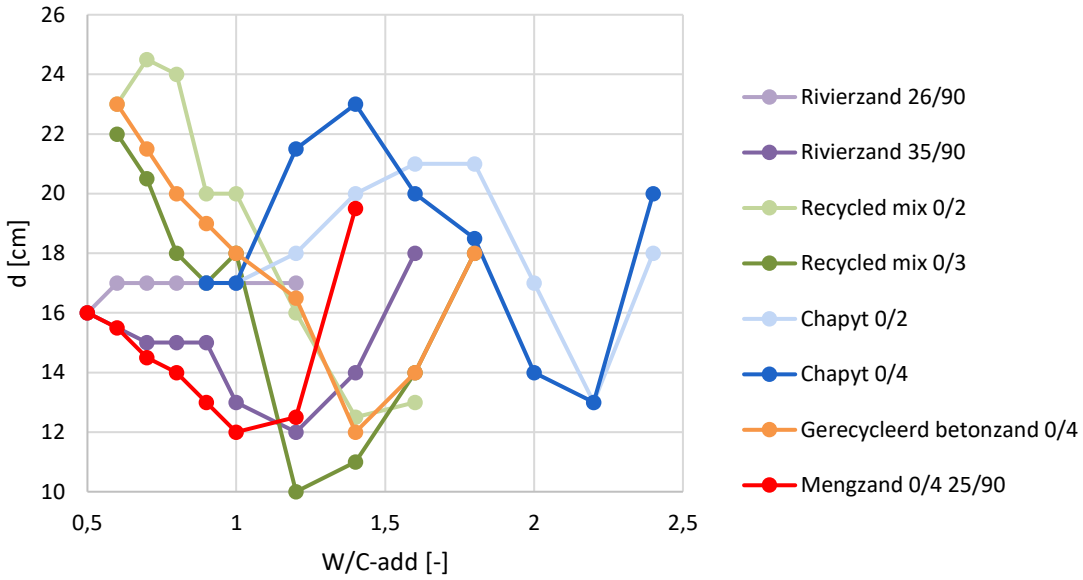
4.2.4.3 Resultaten en conclusie

Onderstaande tabel geeft de resultaten van de vloeitafel consistentietest weer.

Tabel 4-5: Resultaten vloeitafeltest

W/Cadd [-]	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1**	**1,2**	**1,4**	**1,6**	**1,8**	**2,0**	**2,2**	**2,4**
							d [cm]						
Gerecycleerd betonzand 0/4	-	23	21,5	20	19	18	16,5	12	14	18	-	-	-
Chapyt 0/2	-	-	-	-	17	17	18	29	21	21	17	13	18
Chapyt 0/4	-	-	-	-	17	17	21,5	23	20	18,5	14	13	20
Recycled mix 0/2	-	23	24,5	24	20	20	16	12,5	13	-	-	-	-
Recycled mix 0/3	-	22	20,5	18	17	18	10	11	14	18	-	-	-
Rivierzand 0/4 26/90	16	17	17	17	17	17	17	-	-	-	-	-	-
Rivierzand 0/4 35/90	16	16	15	15	15	13	12	14	18	-	-	-	-
Mengzand 0/4 25/90	16	15,5	14,5	14	13	12	12,5	19,5	-	-	-	-	-

De resultaten van de vloeitafel worden visueel weergegeven in onderstaande Figuur 4-18.



Figuur 4-18: Resultaten vloeimaat

De rivierzanden vertonen geen grote verschillen naargelang de W/C-factor toeneemt. De waarden bevinden zich voor beide soorten tussen de 12 en 18 cm.

Voor de gerecycleerde granulaten geldt een meer onvoorspelbaar verloop van de waarden uit de vloeitafeltest. De Recycled mix-mengsels en het gerecycleerd betonzand vertonen een gelijkaardig verloop waarbij een droog mengsel resulteert in grote diameters. Dit komt doordat er voor deze toegevoegde W/C-factoren nog water wordt opgenomen door de granulaten zelf. Hierdoor blijft het mengsel korrelig en vertoont het nog geen samenhang. Bij hogere W/C-factoren wordt het water wel gebruikt voor de samenhang van het mengsel en worden gelijkaardige waarden verkregen als voor de rivierzanden. Naargelang de W/C-factor toeneemt, is er opnieuw een kantelpunt naar grotere waarden bij een te nat mengsel. Bij het vergelijken van de fijnere fractie met de grovere fractie bij zowel de Chapyt- als de Recycled mix-mengsels geldt doorgaans dat sneller een lagere waarde wordt bekomen voor het grovere mengsel. Dit komt doordat capillaire krachten ontstaan door waterbruggen tussen deeltjes, die afhankelijk zijn van de kromming van het korreloppervlak en de afstand tussen de deeltjes. Grotere korrels hebben doorgaans grotere poriën, wat resulteert in grotere waterbruggen met een grotere straal van kromming. Volgens de Young-Laplace-vergelijking leidt een grotere straal tot een lagere capillaire druk, maar de grotere contactoppervlakken kunnen compenseren door sterkere bindende krachten te genereren.(Scholtès et al., 2009). Deze bindende krachten kunnen als verklaring worden gezien voor de snellere samenhang van de grovere mengsels.

De Chapyt-mengsels vertonen echter een ander verloop. In eerste instantie daalt de samenhang bij een toenemende toegevoegde W/C_{add}-factor. Dit duidt op een afname van de interne wrijving door het initieel toegevoegde water. Door het stijgende volume en het aanwezig zijn van kleine hoeveelheden water tussen de korrels is er in dit stadium een grotere afschuiving tussen de korrels. Bij het verder toenemen van de waterhoeveelheid, komt dit de samenhang wel ten goede, en vanaf een W/C_{add}-factor van 1,4 is opnieuw een dalende trend in de diameter zichtbaar. Deze redenering is ook geldig voor de andere gerecycleerde granulaten, maar is niet waarneembaar. Dit komt doordat het fenomeen voor deze granulaten plaatsvindt bij lagere W/C-waarden waarvoor geen rechtopstaande kegel werd bekomen en waarvoor bijgevolg geen vloeitafel test werd uitgevoerd. Het wel bekomen van een rechtopstaande kegel voor de Chapyt-mengsels wordt verklaard door de grote inwendige wrijvingshoek van deze zandsoort, zoals eerder vastgesteld.
Het mengzand vertoont opnieuw gelijkaardige waarden aan het rivierzand en heeft een kleinere variatie binnen de verschillende W/C-factoren.

4.2.5 V-funnel test

4.2.5.1 Norm NBN EN 12350-9

De NBN EN 12350-9 beschrijft de V-funneltest, een methode die de vloei-eigenschappen test van zelfverdichtend beton. Tijdens deze test wordt gemeten hoe lang het beton nodig heeft om uit de V-vormige trechter te stromen. Dit geeft een indicatie over de viscositeit van het mengsel. (NBN EN 12350-9, 2010)

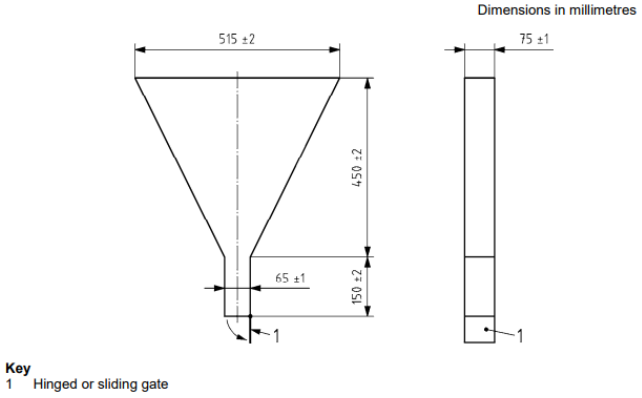
4.2.5.2 Uitvoering

1) Voorbereiding van de trechter

Er wordt eerst gecontroleerd of de V-funnel zuiver is en de schuif onderaan goed sluit. Vervolgens dient de binnenwand licht bevochtigd te worden om hechting te voorkomen.

2) Vullen V-funnel

Giet het dekvloermengsel zonder verdichting in de trechter en vul de trechter tot aan de bovenkant.



Figuur 4-19: Afmetingen V-funnel (NBN EN 12350-9, 2010)

3) Start en meting

De schuif wordt geopend en gelijktijdig wordt de stopwatch gestart. De tijd die het mengsel nodig heeft om volledig uit de trechter te stromen wordt geregistreerd. Deze tijd is de V-funnel tijd. Een korte uitstroomtijd duidt op een lage viscositeit en goede vloei-eigenschappen, terwijl een langere tijd wijst op een hogere viscositeit en mogelijk verminderde vloeibaarheid.

4.2.5.3 Resultaten en conclusie

Deze test werd uitgevoerd met het mengsel Rivierzand 0/4 26/90 met een toegevoegde W/C_{add}-factor van 0,5. Nadat het dekvloermengsel in de V-funnel was geplaatst, bleek dat het niet uit de trechter stroomde. Dit wijst erop dat de viscositeit te hoog is en dat ook deze test niet geschikt is voor de beoordeling van dekvloeren.



Figuur 4-20: Gevulde V-funnel

4.2.6 Omgekeerde Abramskegel

De omgekeerde Abramskegel is een test die vergelijkbaar is met de V-funnel, maar bij deze test wordt de V-funnel vervangen door een omgekeerde Abramskegel. Deze variant wordt gebruikt omdat de opening van de Abramskegel groter is, waardoor het dekvloermengsel gemakkelijker kan uitstromen. Dit maakt de test geschikter voor mengsels met hogere viscositeit, waarvoor de standaard V-funneltest te beperkt is.

4.2.6.1 Uitvoering

1) Voorbereiding van de kegel

Er wordt eerst gecontroleerd of de kegel schoon is. De kegel wordt omgekeerd op de grond gezet en de binnenwand wordt licht bevochtigd om hechting te voorkomen. De kegel heeft een grote diameter van 20 cm, een kleine diameter van 10 cm en een hoogte van 30 cm.



Figuur 4-21: Omgekeerde Abramskegel

2) Vullen van de kegel

Het dekvloermengsel wordt zonder verdichting in de kegel gegoten tot aan de bovenkant gevuld.



Figuur 4-22: Gevulde Abramskegel

3) Start en meting

De kegel wordt opgeheben en de timer wordt gelijktijdig gestart. De tijd die het mengsel nodig heeft om volledig uit de kegel te stromen wordt genoteerd. Deze tijd is de Abrams-tijd. Een korte uitstroomtijd duidt op een lage viscositeit en goede vloei-eigenschappen, terwijl een langere tijd wijst op een hogere viscositeit en mogelijk verminderde vloeibaarheid.

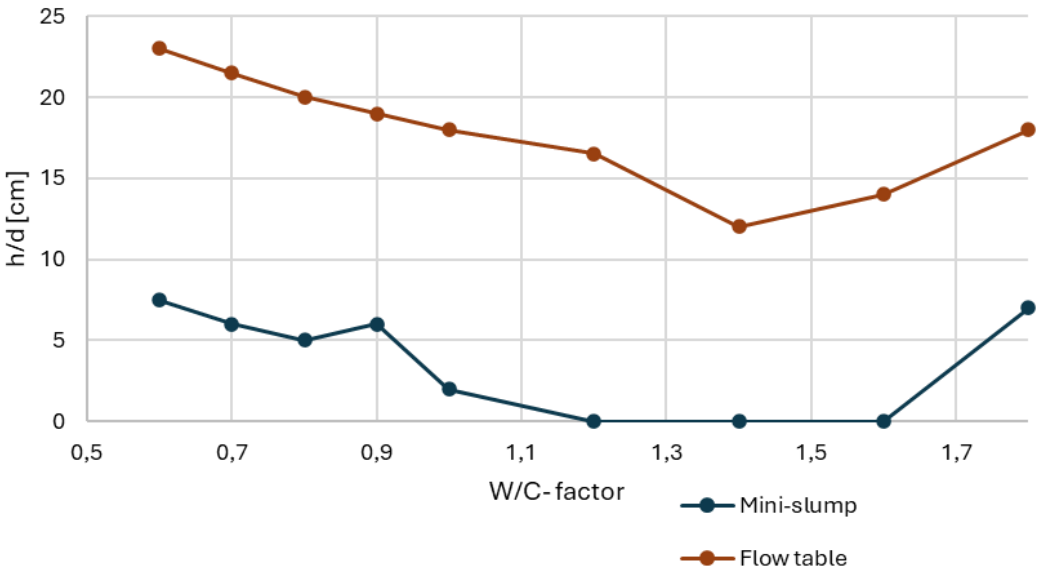
4.2.6.2 Resultaten en conclusie

Voor deze proef werd er gebruikgemaakt van Rivierzand 0/4 35/90 met een toegevoegde W/C_{add}-factor van 0,6. Net zoals bij de V-funnel liep het dekvloermengsel niet spontaan uit de kegel. Pas nadat er een schok werd gegeven liep het mengsel uit de kegel. Dit wijst er op dat deze test niet geschikt is voor representatieve en betrouwbare resultaten.

4.2.7 Conclusie consistentie

Aangezien enkel de mini-slump- en vloeitafeltest reproduceerbare resultaten weergaven, wordt op basis van deze proeven per zandsoort een selectie gemaakt van twee toegevoegde W/C_{add}-factoren. De selectie gebeurt door de resultaten van de mini-slump en de vloeitafel te vergelijken. Wanneer bij de mini-slumptest een hoogte van 0 cm wordt gemeten, wat duidt op een rechtopstaande kegel zonder vervorming, komt de bijhorende W/C-factor in aanmerking. Vervolgens wordt bij de vloeitafel gekeken naar spreidingsdiameters die binnen of nabij het bereik van 13 tot 16 cm liggen. Er wordt voor dit bereik gekozen aangezien dit het bereik bedraagt waarbinnen de rivierzanden zich grotendeels bevinden. Enkel de W/C-factoren die zowel aan de mini-slumpcriteria voldoen als binnen het diameterbereik van de vloeitafel vallen, worden weerhouden.

Aan de hand van deze selectieprocedure worden per zandsoort de toegevoegde W/C-factoren bepaald, zoals weergeven in Tabel 4-6. In onderstaande figuur wordt de vergelijking van de resultaten van Gerecycleerd betonzand 0/4 getoond. Op basis van deze gegevens worden voor deze zandsoort de toegevoegde W/C_{add}-factoren 1,2 en 1,6 geselecteerd. Met deze samenstellingen wordt in een volgende stap de verwerkbaarheid en sterkte geëvalueerd.



Figuur 4-23: Vergelijking mini-slump met vloeitafel

De overige vergelijkende grafieken zijn terug te vinden in Bijlage H. De uiteindelijke geselecteerde toegevoegde W/C-factoren, W/C_{add}, zijn samengevat in onderstaande Tabel 4-6.

Tabel 4-6: Toegevoegde W/C-factoren

	W/C_{add}-factor 1	**W/C_{add}-factor 2**
	[-]	**[-]**
Gerecycleerd betonzand 0/4	1,2	1,6
Chapyt 0/2	1,6	2,2
Chapyt 0/4	1,6	2
Recycled mix 0/2	1,2	1,4
Recycled mix 0/3	1,2	1,4
Rivierzand 0/4 26/90	0,7	0,9
Rivierzand 0/4 35/90	0,7	0,9
Mengzand 0/4 25/90	0,8	1

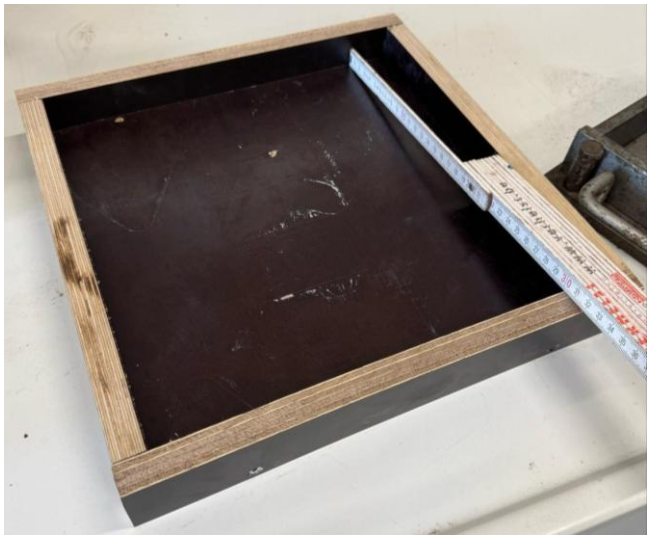
4.3 Verwerkbaarheid van dekvloermengsels

Aan de hand van de selectieprocedure in 4.2.5 werden per mengsel twee W/C-factoren vooropgesteld. In een volgende stap zal de verwerkbaarheid van deze samenstellingen worden getest. Voor het samenstellen van het mengsel werd steeds een schijnbaar volume van 2,5 liter granulaat afgemeten en opnieuw een hoeveelheid cement van 225 kg $_{cement}/m^3_{zand}$ gebruikt. Dit komt neer op 562,5 g cement. De op die manier bekomen hoeveelheden water worden per mengselsamenstelling weergegeven in Tabel 4-7. In het verdere verloop wordt gebruik gemaakt van de effectieve W/C-factor, W/C_{eff}, zoals eerder werd bepaald.

Tabel 4-7: Hoeveelheid water per mengselsamenstelling

Zandsoort	**W/C_{add}**	**W/C_{eff}**
	[-]	**[-]**
Gerecycleerd betonzand 0/4	1,2	0,9
	1,6	1,3
Chapyt 0/2	1,6	1,3
	2	1,7
Chapyt 0/4	1,6	1,3
	2	1,7
Recycled mix 0/2	1,2	1,1
	1,4	1,3
Recycled mix 0/3	1,2	1,0
	1,4	1,2
Rivierzand 0/4 26/90	0,7	0,7
	0,9	0,9
Rivierzand 0/4 35/90	0,7	0,7
	0,9	0,9
Mengzand 0/4 25/90	0,8	0,8
	1	1

Voor het testen van de verwerkbaarheid wordt een mal gebuikt met afmetingen van 30 cm x 30 cm x 3 cm. De mal wordt weergegeven in Figuur 4-24.



Figuur 4-24: Mal verwerkbaarheid

Aan de hand van deze mal wordt getest of de verwerkbaarheid van elk mengsel voldoet. Hierbij wordt het oppervlak beoordeeld en wordt gelet op het eventueel ontstaan van strepen tijdens het afstrijken. Het afstrijken gebeurt aan de hand van een egalisatielat, weergegeven in Figuur 4-25. Daarnaast wordt geëvalueerd of het mengsel goed te verdichten is. Ten slotte wordt nagegaan hoe vlot het dekvloermengsel zich laat uitstrijken.



Figuur 4-25: Egalisatielat

4.3.1 Gerecycleerd betonzand 0/4

Voor een effectieve W/C-factor 0,9 wordt een goed verwerkbaar mengsel bekomen. Er is een goede verdichting in de hoeken en het mengsel vormt een egaal oppervlak zonder extra aandacht bij het uitstrijken. Het uitstrijken zelf verloopt vlot. Bij een W/C-factor van 1,3 ontstaat een mengsel dat goed verdichtbaar en uitstrijkbaar is, maar qua consistentie niet overeenkomt met die van traditionele dekvloermengsels. Het watergehalte is in beide gevallen eerder te hoog. Het oppervlak is wel egaal.



Figuur 4-26: Gerecycleerd betonzand 0/4; W/C_{add} 1,2; 0/4 W/C_{eff} 0,9



Figuur 4-27: Gerecycleerd betonzand 0/4; W/C_{add} 1,6; W/C_{eff} 1,3

4.3.2 Chapyt 0/2

Bij een effectieve W/C-factor van 1,3 wordt een goed uitstrijkbaar en vlak oppervlak bekomen. Het uitstrijken gaat vlot. Het oppervlak is snel egaal en vlak. Het mengsel laat zich goed verdichten in de hoeken en aan de randen. Bij een hogere W/C-factor van 1,7, wordt het mengsel te kleverig en is er sprake van hoopvorming door het aankleven van het mengsel tijdens het uitstrijken. Hierdoor wordt geen egaal oppervlak bekomen en is dit ook niet realiseerbaar. Ook het verdichten wordt hierdoor bemoeilijkt.



Figuur 4-28: Chapyt 0/2; W/C_{add} 1,6; W/C_{eff} van 1,3



Figuur 4-29: Chapyt 0/2; W/C_{add} 2,0; W/C_{eff} van 1,7

4.3.3 Chapyt 0/4

Ook voor het Chapyt 0/4-mengsel met een effectieve W/C-factor van 1,3 wordt na enkele strijkbewegingen een goed uitstrijkbaar en vlak oppervlak bekomen. Daarnaast is er sprake van een goede verdichting in de hoeken van de mal. Bij een effectieve W/C-factor van 1,7, wordt het mengsel daarentegen opnieuw kleverig. Hierdoor is het uitstrijken moeilijker en wordt een minder egaal oppervlak bekomen. De hoeken worden

ook hier moeilijker verdicht en vragen extra aandacht. Voor beide Chapyt-mengsels blijkt een effectieve W/C-factor van 1,7 te hoog en nefast voor de verwerkbaarheid.



Figuur 4-30: Chapyt 0/4; W/C_{add} 1,6; W/C_{eff} van 1,3



Figuur 4-31: Chapyt 0/4; W/C_{add} 2,0; W/C_{eff} van 1,7

4.3.4 Recycled mix 0/2

Voor het Recycled mix 0/2-mengsel met een effectieve W/C-factor van 1,1 wordt vastgesteld dat het mengsel te droog is. De korrelige, niet samenhangende structuur is moeilijk verwerkbaar. Na enkele strijken blijven strepen over aan het oppervlak. Er wordt moeilijk verdicht in de hoeken en randen. Bij een effectieve W/C-factor van 1,3 wordt een beter verwerkbaar mengsel bekomen, maar blijven meerdere herverdelingen en strijkbewegingen noodzakelijk alvorens een egaal oppervlak wordt bekomen. Ook de verdichting blijft na meerdere strijkbewegingen een aandachtspunt.



Figuur 4-32: Recycled mix 0/2; W/C_{add} 1,2; W/C_{eff} van 1,1



Figuur 4-33: Recycled mix 0/2; W/C_{add} 1,4; W/C_{eff} van 1,3

4.3.5 Recycled mix 0/3

Bij het Recycled mix 0/3-mengsel wordt bij een effectieve W/C-factor van 1,1 opnieuw een korrelig en te droog mengsel bekomen. Dezelfde conclusies gelden als voor het Recycled mix 0/2-mengsel met een effectieve W/C-factor van 1,1. Er is geen goede verdichting en er worden opnieuw duidelijke strepen getrokken aan het oppervlak. Bij een verhoging van de W/C-factor naar 1,4 wordt het mengsel beter verwerkbaar. Het strijken verloopt beter en na enkele bewegingen wordt een relatief vlak oppervlak bekomen. Er blijven echter nog holten zichtbaar aan het oppervlak. Dit zorgt voor een minder glad oppervlak en de verdichting blijft een aandachtspunt.



Figuur 4-34: Recycled mix 0/3; W/C_{add} 1,2; W/C_{eff} van 1,0



Figuur 4-35: Recycled mix 0/3; W/C_{add} 1,4; W/C_{eff} van 1,2

4.3.6 Rivierzand 0/4 26/90

Het rivierzand geeft bij een W/C-factor van 0,7 een goed uitstrijkbaar mengsel. Het verdichten van hoeken vraagt extra aandacht, maar een relatief vlak en egaal oppervlak wordt vlot bekomen na enkele heen-en weer bewegingen met de egalisatielat. Vervolgens wordt de W/C-factor verhoogd tot 0,9 aangezien ook voor deze W/C-factor goede waarden werden bekomen bij de eerder besproken consistentietesten. Dit mengsel is iets moeilijker uitstrijkbaar en vatbaarder voor het creëren van een golvend oppervlak. Ook het verdichten blijft een extra aandachtspunt.



Figuur 4-36: Rivierzand 0/4 26/90; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,7



Figuur 4-37: Rivierzand 0/4 26/90; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,9

4.3.7 Rivierzand 0/4 35/90

Voor het Rivierzand 0/4 35/90 met een effectieve W/C-factor van 0,7 wordt een goed verwerkbaar mengsel gevonden. Een vlak oppervlak wordt bekomen na enkele strijkbewegingen en de hoeken worden goed verdicht. Bij een verhoging van de W/C-factor naar 0,9 wordt een eerder moeilijk verwerkbaar mengsel bekomen in vergelijking met een W/C-factor van 0,7. Er zijn meer strijkbewegingen nodig voor het egaal maken van het oppervlak, maar dit wordt uiteindelijk wel bekomen.



Figuur 4-38: Rivierzand 0/4 35/90; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} van 0,7



Figuur 4-39: Rivierzand 0/4 35/90; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} van 0,9

4.3.8 Mengzand 0/4 25/90

Voor het mengzand 0/4 25/90-mengsel met een effectieve W/C-factor van 0,8 wordt een goed verdichte mal bekomen. Het mengsel is moeilijker glad te strijken dan het zuivere rivierzand, maar er wordt wel een egaal oppervlak bekomen na herhaalde strijkbewegingen en herverdelingen van het mengsel. Bij een verhoging van de W/C-factor naar 1 wordt de uitstrijkbaarheid negatief beïnvloed en is het oppervlak bijgevolg minder vlak. Ook voor het verdichten van het mengsel is de verhoging van de W/C-factor nefast.



Figuur 4-40: Mengzand 0/4 25/90; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} van 0,8



Figuur 4-41: Mengzand 0/4 25/90; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} van 1,0

4.3.9 Conclusie verwerkbaarheid

Uit de uitgevoerde verwerkbaarheidstesten blijkt dat zowel de zandsoort als de effectieve W/C_{eff}-factor een aanzienlijke invloed uitoefenen op het praktische gedrag van het dekvloermengsel. Per combinatie werd beoordeeld in hoeverre het mengsel zich gemakkelijk laat uitstrijken, hoe goed het zich laat verdichten, en of een egaal oppervlak zonder strepen of oneffenheden kon worden gerealiseerd; bekomen wordt zonder zichtbare strepen of oneffenheden.

Voor elke zandsoort werden twee W/C-factoren getest. Tijdens deze proeven zijn subjectieve observaties systematisch genoteerd. Deze bevindingen zijn samengebracht in overzichtstabel Tabel 4-8, waarin de prestaties van de verschillende mengsels worden geëvalueerd op een schaal van –, + en ++. Deze schaal staat respectievelijk voor: 'onvoldoende', 'aanvaardbaar' en 'goede verwerkbaarheid'.

Tabel 4-8: Overzicht prestaties verwerkbaarheid

Zandsoort	W/C_{add}-factor [-]	W/C_{eff}-factor [-]	Verwerkbaarheid [++/+/-]
Gerecycleerd betonzand 0/4	1,2	0,9	++
	1,6	1,3	+
Chapyt 0/2	1,6	1,3	++
	2	1,7	-
Chapyt 0/4	1,6	1,3	++
	2	1,7	-
Recycled mix 0/2	1,2	1,1	-
	1,4	1,3	+
Recycled mix 0/3	1,2	1,0	-

	1,4	1,2	+
Rivierzand 0/4 26/90	0,7	0,7	++
	0,9	0,9	+
Rivierzand 0/4 35/90	0,7	0,7	++
	0,9	0,9	+
Mengzand 0/4 25/90	0,8	0,8	+
	1	1	+

De resultaten tonen aan dat een hogere W/C-factor in het algemeen leidt tot een betere consistentie en strijkbaarheid, maar dat dit niet altijd gepaard gaat met een egaal oppervlak of een goede verdichting. Sommige mengsels vertonen, ondanks hun hogere vloeibaarheid, nog steeds onregelmatigheden zoals strepen of holtes aan het oppervlak. Dit is vaak afhankelijk van de korrelverdeling en de vorm van het gebruikte zand, wat het belang benadrukt van een gebalanceerde keuze tussen watergehalte en granulometrie. (Estephane et al., 2019) De subjectieve beoordeling levert een eerste indicatie van de meest geschikte mengsels op basis van verwerkbaarheid. Achteraf blijkt echter dat dat de keuze van de W/C_{add}-factor louter op basis van de vloeitafel niet optimaal was. Een mengsel kan immers een korrelige, droge structuur vertonen en toch een goede verwerkbaarheid hebben., terwijl het bij de vloeitafel sterk uitvloeit onder invloed van de mechanische schokken. Hierdoor wordt een relatief kleine diameter geselecteerd, die in realiteit enkel wordt bereikt door samenhangende mengsels met een (te) hoge waterinhoud. Het toelaten van grotere diameters bij lagere toegevoegde W/C_{add}-factoren zou in dat opzicht kunnen voorkomen dat potentieel goed verwerkbare mengsels onterecht worden uitgesloten. Desondanks bieden de bekomen resultaten waardevolle inzichten. Via vergelijking kunnen onderbouwde conclusies worden getrokken over de sterkte en verwerkbaarheid van de verschillende zandsoort in functie van de W/C-factor.

4.4 Mechanische eigenschappen van dekvloermengsels

4.4.1 Norm NBN EN 13892-1

De norm NBN EN 13892-1 beschrijft testmethoden voor dekvloermortels en legt specifiek vast hoe de buigsterkte en druksterkte van gevormde proefstukken moeten worden bepaald. Deze Europese norm is van toepassing op verschillende soorten dekvloermaterialen, waaronder cementgebonden dekvloeren, calciumsulfaatdekvloeren etc.

4.4.2 Buigsterkte

4.4.2.1 Uitvoering

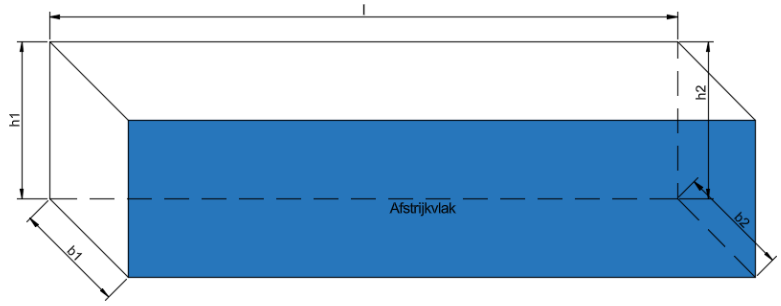
1) Voorbereiding van de proefstukken

De proefstukken worden vooraf voorbereid volgens de richtlijnen van EN 13892-1. Voor de test worden zes balkvormige proefstukken vervaardigd met afmetingen van 40 x 40 x 160 mm. Per water-cementfactor worden zes proefstukken aangemaakt: drie voor een test na 7 dagen en drie voor een test na 28 dagen. Aangezien deze proefstukken vervaardigd worden met hetzelfde mengsel als gebruikt bij de verwerkbaarheidstesten, is het logisch om ook hier dezelfde W/C-factoren toe te passen. Na het uitvoeren van de verwerkbaarheidstesten worden de proefstukken bewaard tot het moment van testen, respectievelijk 7 en 28 dagen. Vlak voor de test worden de zijden van de proefstukken zorgvuldig schoongeveegd om loszittend materiaal te verwijderen. In onderstaande figuur staan de proefstukken voor 7 dagen.



Figuur 4-42: Proefstukken voor 7 dagen

De proefstukken zijn balkvormig, met een lengte van 160 mm en een doorsnede van 40 x 40 mm. In Figuur 4-43 wordt het blauwe vlak aangeduid als het afstrijkvlak. Dit vlak is 90° naar voren gedraaid om bovenaan een vlak oppervlak te bekomen.



Figuur 4-43: Meetconventies

2) Plaatsing van het proefstuk

Tijdens de test ligt elk proefstuk op twee steunrollen die 100 mm van elkaar zijn geplaatst. Een derde rol, de belastingsrol, bevindt zich exact in het midden van het proefstuk. Het is heel belangrijk dat het proefstuk met het afstrijkvlak naar voren wordt geplaatst, zodat het vlakke, ontkiste oppervlak naar boven is gericht. Tijdens de test oefent de belastingsrol een neerwaartse kracht uit in het midden van het proefstuk. Om een gelijkmatige verdeling van de belastingsrol te garanderen, moet één van de steunrollen en de belastingsrol licht kunnen kantelen.



Figuur 4-44: Proefopstelling buiging

3) Uitvoeren van de test

De belasting wordt op het midden van het proefstuk aangebracht zonder schokken. De kracht neemt geleidelijk toe met een snelheid van 15 ± 10 N/s. De test wordt voortgezet totdat het proefstuk breekt. Op dat moment wordt de maximale kracht F_f die het proefstuk heeft weerstaan, genoteerd.



Figuur 4-45: Gebroken proefstuk bij buiging

4) Berekening van de buigsterkte

De buigsterkte, R_f, wordt berekend met volgende formule:

$$R_{f,x} = \frac{1{,}5 * F_f * l}{b * h^2} \left[\frac{N}{mm^2}\right] \qquad 4\text{-}10$$

Met:

$R_{f,x}$ [MPa]: Buigsterkte van proefstuk x

F_f [N]: Maximale belasting in Newton die tijdens de test is gemeten

L [mm]: Afstand tussen de steunrollen, die vastligt op 100mm

b [mm]: Breedte van het proefstuk, zoals afgebeeld op Figuur 4-43

h [mm]: Hoogte van het proefstuk, zoals afgebeeld op Figuur 4-43

Voor Recycled mix 0/3 met een effectieve W/C-factor 1,1 na 7 dagen wordt de buigsterkte R_f als volgt berekend:

$$R_f = \frac{1{,}5 * F_f * l}{b * h^2} = \frac{1{,}5 * 752\ N * 100\ mm}{39{,}35\ mm * 39{,}94^2\ mm^2} = 1{,}80\ N/mm^2$$

5) Resultaten

De buigsterkte per proefstuk wordt afgerond op 0,5 N/mm². De gemiddelde buigsterkte wordt met onderstaande formule berekend:

$$R_{f,gem} = \frac{R_{f,1} + R_{f,2} + R_{f,3}}{3} \left[\frac{N}{mm^2}\right] \qquad 4\text{-}11$$

Met:

$R_{f,gem}$ [MPa]: Gemiddelde buigsterkte van de drie proefstukken

$R_{f,1}$ [MPa]: Buigsterkte van proefstuk 1

$R_{f,2}$ [MPa]: Buigsterkte van proefstuk 2

$R_{f,3}$ [MPa]: Buigsterkte van proefstuk 3

Hieronder wordt een voorbeeld uitgeschreven voor de gemiddelde buigsterkte van Recycled mix 0/3 met een effectieve W/C-factor 1,1 na 7 dagen.

$$R_{f,gem} = \frac{R_{f,1} + R_{f,2} + R_{f,3}}{3} = \frac{1{,}80\ MPa + 1{,}70\ MPa + 1{,}60\ MPa}{3} = 1{,}70\ MPa$$

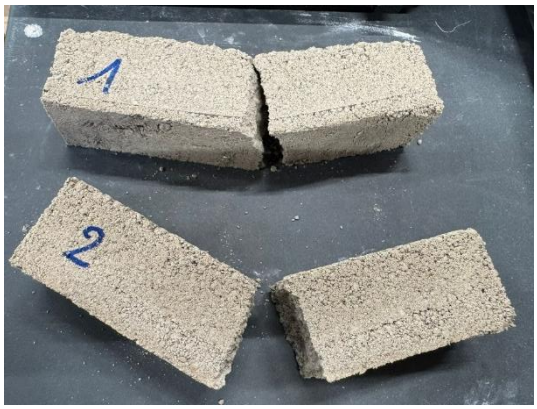
De gemiddelde buigsterkte van de 3 proefstukken wordt afgerond op 0,1 N/mm². Na de test worden de 2 helften bewaard, zodat deze later kunnen worden gebruikt voor de druksterktetest.

4.4.3 Druksterkte

4.4.3.1 Uitvoering

1) Voorbereiding van de proefstukken

De proefstukken voor de druksterktetest worden gevormd door de twee helften van de gebroken proefstukken uit de buigsterktetest. Deze helften worden onmiddellijk na de buigproef getest. Voorafgaand aan de test worden de zijden van de proefstukken gereinigd om stof en loszittend materiaal te verwijderen. De proefstukken worden weergegeven in Figuur 4-46.



Figuur 4-46: Proefstukken voor druksterkte

2) Plaatsing proefstuk

Elk proefstuk wordt correct uitgelijnd in de druktestmachine, waarbij de belasting wordt uitgeoefend op de zijden van het proefstuk, en niet op her oorspronkelijke gietoppervlak. Het proefstuk wordt zodanig gepositioneerd dat de belasting gelijkmatig wordt verdeeld over het contactoppervlak. Het is bovendien belangrijk dat het afstrijkvlak opnieuw naar voren is gericht.



Figuur 4-47: Proefopstelling druk

3) Uitvoeren van de test

De belasting wordt zonder schokken aangebracht en neemt geleidelijk toe met een snelheid van 1000 ± 100 N/s. De test wordt voortgezet totdat het proefstuk bezwijkt. Op dat moment wordt de maximale belasting, F_c, die het proefstuk heeft weerstaan, genoteerd.



Figuur 4-48: Bezweken proefstuk

4) Berekening van de druksterkte

De druksterkte, R_c, wordt berekend met volgende formule:

$$R_{c,x} = \frac{F_c}{A} \left[\frac{N}{mm^2}\right] \qquad 4\text{-}12$$

Met:

$R_{c,x}$ [MPa]: Druksterkte van proefstuk x

F_c [N]: Maximale belasting in Newton die tijdens de test is gemeten

A[mm²]: Contactoppervlak van het proefstuk, maximaal 1600 mm²

Het contactoppervlak A wordt hierbij bepaald door de breedte, b_1 of b_2, van het desbetreffende proefstuk te vermenigvuldigen met de lengte van het contactoppervlak, namelijk 40 mm.

$$A = b_x * 40mm\ [mm^2] \leq 1600\ mm^2 \qquad \textit{4-13}$$

Met:

b_x[mm]: Breedte van het proefstuk

A[mm²]: Contactoppervlak van het proefstuk, maximaal 1600 mm²

Hieronder is een voorbeeld uitgeschreven hoe de druksterkte wordt berekend van Recycled mix 0/3 met een effectieve W/C-factor 1,1 na 7 dagen.

$$R_c = \frac{F_c}{A} = \frac{10\ 430\ N}{39{,}85\ mm * 40\ mm} = 6{,}55\ N/mm^2$$

5) Resultaten

De druksterkte van elk afzonderlijk proefstuk wordt afgerond op 0,05 N/mm². De gemiddelde druksterkte van de 6 proefstukken wordt afgerond op 0,1 N/mm². Via onderstaande formule wordt de gemiddelde druksterkte per W/C-factor berekend:

$$R_{c,gem} = \frac{R_{c,1.1} + R_{c,1.2} + R_{c,2.1} + R_{c,2.2} + R_{c,3.1} + R_{c,3.2}}{6}\ [\frac{N}{mm^2}] \qquad \textit{4-14}$$

Met:

$R_{c,gem}$[MPa]: Gemiddelde druksterkte van de zes proefstukken

$R_{c,1.1}$ [MPa] en $R_{c,1.2}$ [MPa]: Druksterkte van de twee helften van de eerste prisma

$R_{c,2.1}$ [MPa] en $R_{c,2.2}$ [MPa]: Druksterkte van de twee helften van de tweede prisma

$R_{c,3.1}$ [MPa] en $R_{c,3.2}$ [MPa]: Druksterkte van de twee helften van de derde prisma

Hieronder is een voorbeeld uitgeschreven van hoe de gemiddelde druksterkte wordt berekend van Recycled mix 0/3 met een effectieve W/C-factor 1,1 na 7 dagen.

$$R_{c,gem} = \frac{R_{c,1.1} + R_{c,1.2} + R_{c,2.1} + R_{c,2.2} + R_{c,3.1} + R_{c,3.2}}{6}$$

$$= \frac{6{,}55\ MPa + 7{,}40\ MPa + 6{,}55\ MPa + 7{,}20\ MPa + 7{,}45\ MPa + 7{,}20\ MPa}{6} = 7{,}1\ MPa$$

4.4.4 Dichtheden

4.4.4.1 Voorafgaande dichtheidsbepaling

De gemeten dichtheid is een directe indicator voor de homogeniteit en verdichting van het dekvloermengsel. Een dichtheid die significant lager is dan de verwachte waarde wijst op luchtinsluitingen of onvoldoende compacte verwerking. Een abnormaal hoge dichtheid kan daarentegen duiden op overmatige verdichting. Door reeds vóór de sterkteproef de dichtheid vast te leggen, kunnen mengfouten tijdig worden opgespoord en kunnen proefstukken die niet aan de kwaliteitseisen voldoen worden uitgesloten.

Zonder kennis van de dichtheid zijn vergelijkingen tussen verschillende proefstukken moeilijk te rechtvaardigen. Twee proefstukken kunnen eenzelfde maximale breukbelasting bereiken, maar als het ene proefstuk een veel lagere dichtheid heeft, impliceert dit dat de interne materiaalsamenstelling of -structuur wezenlijk afwijkt. Alleen door druksterktemetingen te combineren met dichtheidsmetingen ontstaat een volledig beeld van de materiaalkwaliteit en de structurele integriteit van het dekvloermengsel.

4.4.4.2 Berekening

Om de dichtheid van het proefstuk te berekenen, moet eerst het volume V_p bepaald worden. Dit gebeurt door het gemiddelde te nemen van de gemeten breedtes (b_1 en b_2) en hoogtes (h_1 en h_2), en dit vervolgens te vermenigvuldigen met de lengte l van het proefstuk. De gebruikte afmetingen zijn terug te vinden in Figuur 4-43. De berekening van het volume gebeurt volgens onderstaande formule:

$$V_p = \left(\frac{b_1 + b_2}{2}\right) * \left(\frac{h_1 + h_2}{2}\right) * l[m^3] \qquad \textit{4-1515}$$

Met:

V_p [m³]: Volume van het proefstuk

b_1 [mm]: Overeenkomstige breedte van het proefstuk volgens Figuur 4-43

b_2 [mm]: Overeenkomstige breedte van het proefstuk volgens Figuur 4-43

h_1 [mm]: Overeenkomstige hoogte van het proefstuk volgens Figuur 4-43

h_2 [mm]: Overeenkomstige hoogte van het proefstuk volgens Figuur 4-43

l [mm]: Lengte van het proefstuk

Het volume van het proefstuk wordt berekend voor een mengsel met Gerecycleerd betonzand 0/4, waaraan een water-cementfactor van 0,9 is toegevoegd:

$$V_p = \left(\frac{38{,}71\ mm + 39{,}70\ mm}{2}\right) * \left(\frac{39{,}66\ mm + 39{,}66\ mm}{2}\right) * 160{,}14\ mm = 249{,}02\ cm^3$$

De dichtheid per proefstuk wordt via onderstaande formule berekend:

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \left[\frac{kg}{m^3}\right] \qquad \textit{4-1616}$$

Met:

ρ_p[kg/m³]: Dichtheid van het proefstuk

m_p [kg]: Massa van het proefstuk

V_p [m³]: Volume van het proefstuk

De dichtheid van het eerste proefstuk, samengesteld met Gerecycleerd betonzand 0/4 en een toegevoegde water-cement factor van 0,9, wordt berekend op basis van de gemeten massa en het bepaalde volume:

$$\rho_{p,1} = \frac{0{,}3879\ kg}{0{,}000249029\ m^3} = 1558\ \frac{kg}{m^3}$$

De gemiddelde dichtheid van de 3 proefstukken wordt via onderstaande formule berekend:

$$\rho_{gem} = \frac{\rho_{p,1} + \rho_{p,2} + \rho_{p,3}}{3} \left[\frac{kg}{m^3}\right] \qquad \textit{4-17}$$

Met:

ρ_{gem} [kg/m³]: Gemiddelde dichtheid van de 3 proefstukken

$\rho_{p,1}$ [kg/m³]: Dichtheid van proefstuk 1

$\rho_{p,2}$ [kg/m³]: Dichtheid van proefstuk 2

$\rho_{p,3}$ [kg/m³]: Dichtheid van proefstuk 3

De gemiddelde dichtheid van de drie proefstukken, vervaardigd met Gerecycleerd betonzand 0/4 en een toegevoegde water-cementfactor van 0,9, wordt hieronder berekend:

$$\rho_{gem} = \frac{1558\frac{kg}{m^3} + 1556\frac{kg}{m^3} + 1486\frac{kg}{m^3}}{3} = 1533\frac{kg}{m^3}$$

De dichtheden van de proefstukken zijn terug te vinden in Tabel 4-9 en Tabel 4-10.

Tabel 4-9: Dichtheden proefstukken na 7 dagen

Zandsoort	**W/C$_{eff}$-factor [-]**	**$\rho_{p,1}$ [kg/m³]**	**$\rho_{p,2}$ [kg/m³]**	**$\rho_{p,3}$ [kg/m³]**	**ρ_{gem} [kg/m³]**
Gerecycleerd betonzand 0/4	0,9	1558	1556	1486	1533
	1,3	1692	1694	1679	1688
Chapyt 0/2	1,3	1085	1094	1039	1073
	1,7	1011	1055	995	1020

Chapyt 0/4	1,3	1054	1086	1058	1066
	1,7	1266	1253	1182	1234
Recycled mix 0/2	1,1	1771	1772	1772	1772
	1,3	1775	1783	1772	1776
Recycled mix 0/3	1,0	1775	1799	1796	1790
	1,2	1781	1841	1758	1793
Rivierzand 0/4 26/90	0,7	1904	1897	1943	1915
	0,9	1965	1922	1975	1954
Rivierzand 0/4 35/90	0,7	1904	1939	2003	1948
	0,9	1825	1872	1876	1858
Mengzand 0/4 25/90	0,8	1891	1845	1891	1876
	1	1924	1911	1900	1912

Tabel 4-10: Dichtheden proefstukken na 28 dagen

Zandsoort	**W/C$_{eff}$-factor [-]**	**$\rho_{p,1}$ [kg/m³]**	**$\rho_{p,2}$ [kg/m³]**	**$\rho_{p,3}$ [kg/m³]**	**ρ_{gem} [kg/m³]**
Gerecycleerd betonzand 0/4	0,9	1607	1641	1624	1624
	1,3	1684	1635	1668	1662
Chapyt 0/2	1,3	1036	1085	1048	1056
	1,7	1147	1228	1169	1181
Chapyt 0/4	1,3	1002	1072	1021	1032
	1,7	1213	1251	1218	1227
Recycled mix 0/2	1,1	1809	1824	1807	1813
	1,3	1804	1781	1733	1772
Recycled mix 0/3	1,0	1804	1805	1829	1813
	1,2	1733	1753	1745	1741
Rivierzand 0/4 26/90	0,7	1846	1847	1841	1844
	0,9	1959	1955	1963	1959
Rivierzand 0/4 35/90	0,7	1867	1896	1899	1887
	0,9	1997	2006	2009	2004
Mengzand 0/4 25/90	0,8	1840	1867	1867	1858
	1	1724	1900	1935	1853

4.4.5 Conclusie en resultaten

De invloed van zowel de zandsoort als de water-cementfactor (W/C-factor) op de mechanische eigenschappen van de dekvloer werd onderzocht aan de hand van metingen van de gemiddelde buig- en druksterkte na 7 en 28 dagen uitharding. Als referentie dienden de mengsels op basis van natuurlijk rivierzand, dat traditioneel wordt beschouwd als standaardgrondstof voor dekvloermengsels.

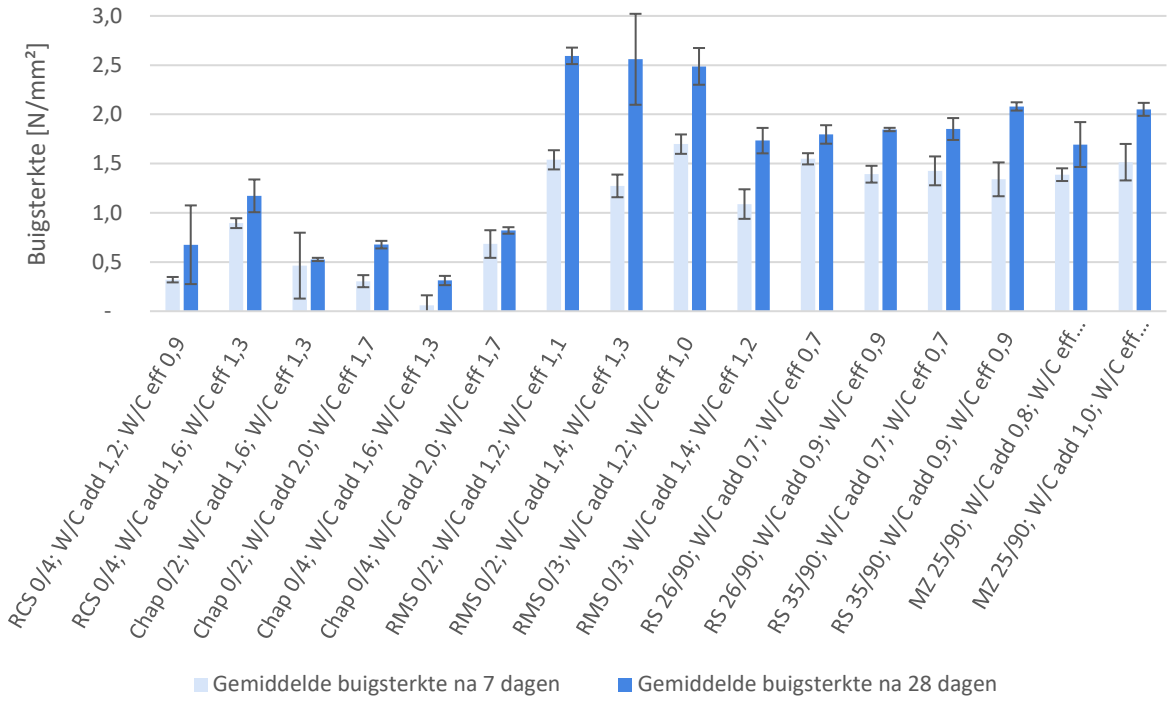
Omdat de W/C-factoren werden geselecteerd op basis van de consistentietesten, waarbij in sommige gevallen een te hoge waarde werd gekozen, zijn de mechanische prestaties hiervan mogelijk negatief beïnvloed. Desondanks laten de bekomen resultaten onderling vergelijking toe, en kunnen er zinvolle conclusies worden getrokken onder de invloed van zandsoort en W/C-verhouding op de sterkteontwikkeling.

De gemiddelde buig- en druksterkten worden weergegeven in Tabel 4-11 en Figuur 4-49. De gedetailleerde testresultaten per proefstuk zijn opgenomen in Bijlage I.

Tabel 4-11: Gemiddelde buig- en druksterkte per effectieve W/C-factor na 7 en 28 dagen

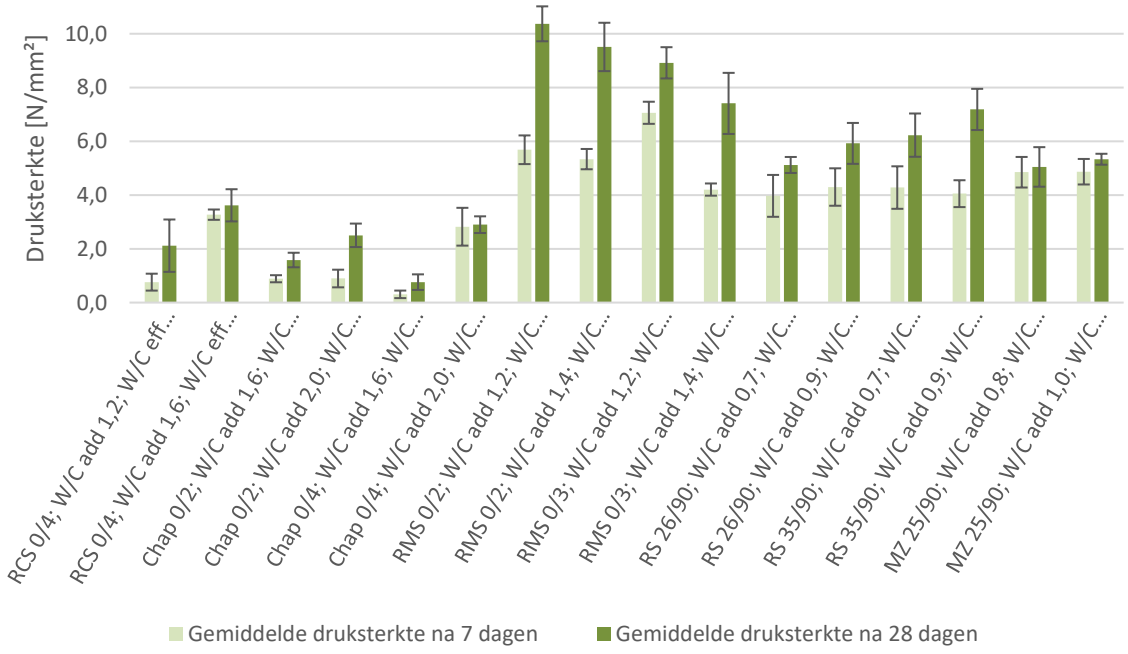
Zandsoort	**W/C_{eff}-factor [-]**	**$R_{f,gem}$ na 7 dagen [MPa]**	**$R_{f,gem}$ na 28 dagen [MPa]**	**$R_{c,gem}$ na 7 dagen [MPa]**	**$R_{c,gem}$ na 28 dagen [MPa]**
Gerecycleerd betonzand 0/4	0,9	0,3	0,7	0,8	2,1
	1,3	0,9	1,2	3,3	3,6
Chapyt 0/2	1,3	0,5	0,5	0,9	1,6
	1,7	0,3	0,7	0,9	2,5
Chapyt 0/4	1,3	0,1	0,3	0,3	0,8
	1,7	0,7	0,8	2,8	2,9
Recycled mix 0/2	1,1	1,5	2,6	5,7	10,4
	1,3	1,3	2,6	5,3	9,5
Recycled mix 0/3	1,0	1,7	2,5	7,1	8,9
	1,2	1,1	1,7	4,2	7,4
Rivierzand 0/4 26/90	0,7	1,5	1,8	4,0	5,1
	0,9	1,4	1,8	4,3	5,9
Rivierzand 0/4 35/90	0,7	1,4	1,9	4,3	6,2
	0,9	1,3	2,1	4,1	7,2
Mengzand 0/4 25/90	0,8	1,4	1,7	4,8	5,0
	1	1,5	2,1	4,9	5,3

Figuur 4-49 toont de resultaten van de buigsterktetesten na 7 en 28 dagen.



Figuur 4-49: Vergelijkende grafiek resultaten buigsterkte

Figuur 4-50 toont de resultaten van de druksterktetesten van 7 en 28 dagen.



Figuur 4-50: Vergelijkende grafiek resultaten buigsterkte

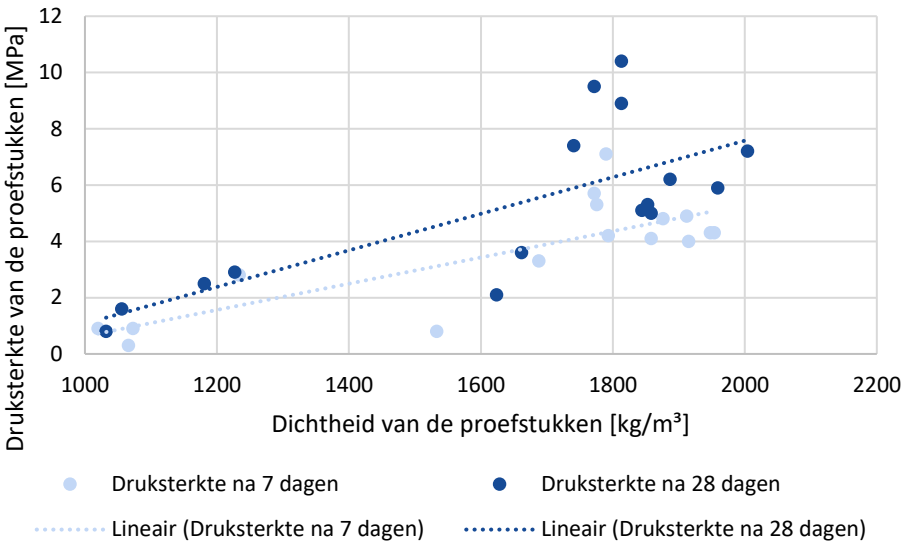
4.4.5.1 Invloed van zandsoort

De dekvloermengsels op basis van Rivierzand 0/4 (26/90 en 35/90) worden gehanteerd als referentie, gezien hun courante toepassing in de praktijk. Rivierzand 0/4 26/90 bereikt een maximale druksterkte van 5,9 MPa en een buigsterkte van 1,8 MPa na 28 dagen. Rivierzand 0/4 35/90 toont een gelijkaardig patroon, met een maximale druksterkte van 7,2 MPa en een buigsterkte van 2,1 MPa na 28 dagen. De verhouding tussen vroege (7 dagen) en late (28 dagen) sterkte is gunstig en wijst op een evenwichtige sterkteontwikkeling.
Recycled mix 0/2 behaalt een maximale druksterkte van 10,4 en een buigsterkte van 2,6 MPa na 28 dagen. Recycled mix 0/3 is vergelijkbaar met een druksterkte van 8,9 MPa en buigsterkte van 2,5 MPa. In vergelijking met rivierzand liggen de mechanische prestaties van Recycled mix-mengsels significant hoger. Chapyt 0/2 bereikt maximaal slechts een druksterkte van 2,5 MPa en een buigsterkte van 0,7 MPa. Chapyt 0/4 heeft hier respectievelijk waarden van 2,9 MPa en 0,8 MPa. De Chapyt-mengsels vertonen opvallend lagere mechanische prestaties dan de rivierzandmengsels. Gerecycleerd betonzand 0/4 tenslotte bereikt een maximale druk- en buigsterkte van 3,6 MPa en 1,2 MPa. Ook deze waarden zijn aanzienlijk lager dan de mechanische prestaties van de rivierzanden. Mengzand 0/4 25/90 vertoont prestaties die vergelijkbaar zijn met rivierzand. De maximale druk- en buigsterkte bedraagt hier 5,3 MPa en 2,1 MPa na 28 dagen

De prestaties van cementgebonden dekvloeren zijn sterk afhankelijk van de kwaliteit van het gebruikte zand. Rivierzand toont stabiele prestaties en fungeert als betrouwbare referentie. Recycled mix 0/2 en 0/3 leveren goede mechanische eigenschappen en overstijgen zelfs het natuurlijk rivierzand in zowel druk- als buigsterkte. De Chapyt-mengsels en het gerecycleerd betonzand blijven onder de structurele vereisten.

4.4.5.2 Verband dichtheid en druksterkte

Er is een duidelijk stijgend lineair verband waarneembaar tussen de gemiddelde druksterkte en de gemiddelde dichtheid van de proefstukken. Dit verband manifesteert zich zowel na 7 als na 28 dagen uitharding. Opvallend is dat de druksterkte van Recycled mix hoger ligt dan verwacht op basis van het lineaire verloop, terwijl het gerecycleerde betonzand significant lagere druksterktes vertoont dan de trend zou voorspellen. Het waargenomen verband wordt grafisch weergegeven in Figuur 4-51.

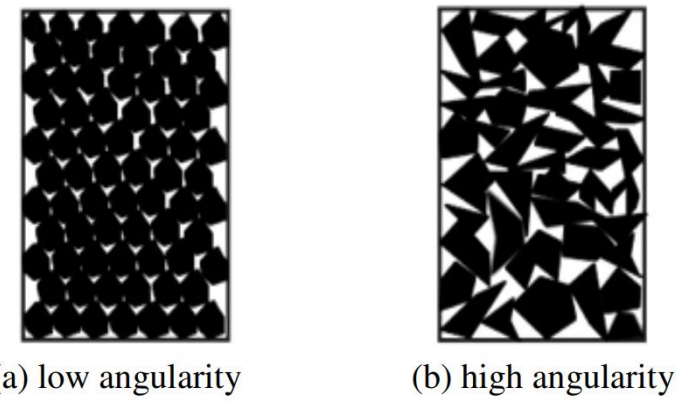


Figuur 4-51: Druksterkte in functie van de dichtheid van de proefstukken

De waargenomen afwijkingen van het lineaire verband kunnen worden verklaard door verschillen in de inwendige wrijvingshoek van de gebruikte materialen. De Recycled mix-mengsels vertoont een relatief lage inwendige wrijvingshoek, vergelijkbaar met die van rivierzand. Dit bevordert de verdichtbaarheid van het mengsel, wat resulteert in een hoge druksterkte na 28 dagen uitharding.

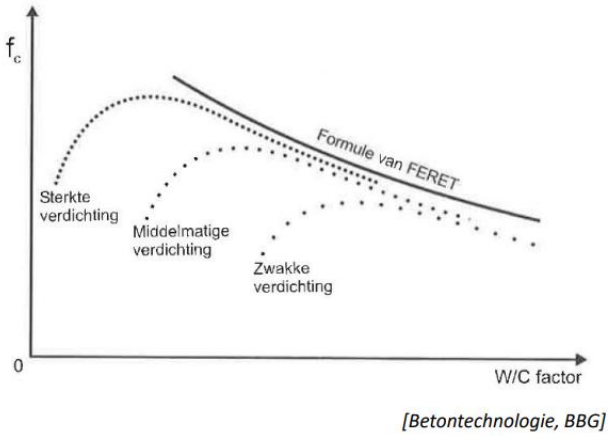
Daarentegen wordt het gerecycleerde betonzand gekenmerkt door een veel hogere inwendige wrijvingshoek en een grovere korrelstructuur. Deze combinatie bemoeilijkt een efficiënte verdichting, wat leidt tot een lagere dichtheid en bijgevolg een lagere druksterkte. Dezelfde redenering geldt ook voor de Chapyt-mengsels.(Kim & de Souza, 2009)

Deze redenering wordt ondersteund door de visuele waarnemingen tijdens de proeven: proefstukken met slechte verdichting vertonen een zanderig oppervlak. . Een slechte verdichting wordt bovendien gekenmerkt door een zanderig oppervlak. De samenhang tussen deze parameters wordt schematisch weergegeven in onderstaande figuur.



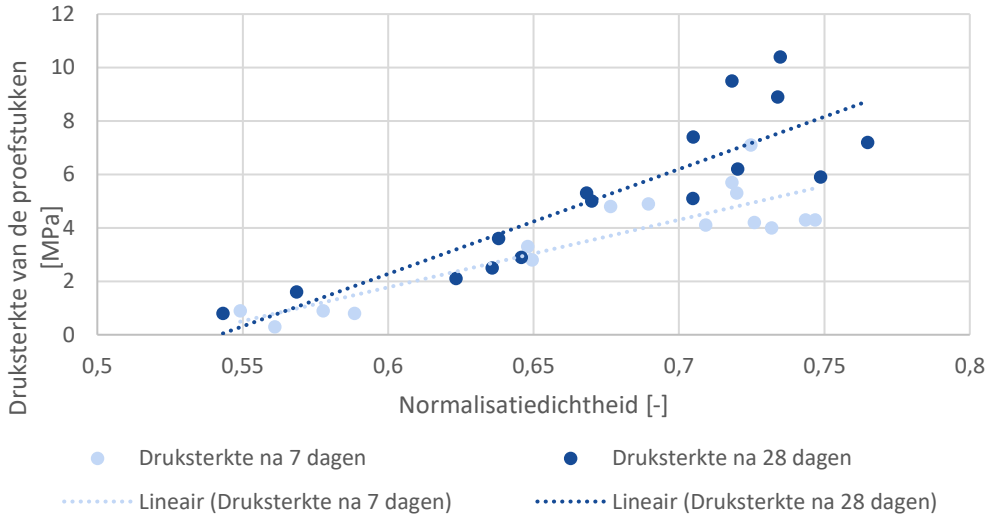
Figuur 4-52: Verband tussen hoekige granulaten en holten (Kim & de Souza, 2009)

Deze bevindingen sluiten aan bij de theorie dat een betere verdichting leidt tot hogere druksterktes, zoals weergegeven in Figuur 4-53. Deze figuur toont duidelijk dat, bij gelijke water-cementfactoren, een sterkte verdicht mengsel aanzienlijk hogere druksterkte bereikt dan zwakker verdichte mengsels.



Figuur 4-53: Invloed van verdichtingsgraad op druksterkte in functie van de water-cementfactor(BBG, 2018)

Wanneer de genormaliseerde dichtheid wordt uitgezet in functie van de druksterkte van de proefstukken, ontstaat een meer genuanceerd beeld van de resultaten. De genormaliseerde dichtheid wordt berekend door de dichtheid van het proefstuk te delen door de "*apparent particle density*" van het desbetreffende zandtype. Door deze verhouding te koppelen aan de druksterkte per proefstuk, wordt duidelijker hoe efficiënt de dichtheid van de mengsels bijdraagt aan de mechanische prestaties van de proefstukken. Opvallend is dat de mengsels met Recycled mix consequent boven het lineaire verloop liggen. Dit wijst op een relatief hoge sterkte ten opzichte van hun verdichtingsgraad.



Figuur 4-54: Normalisatiedichtheid in functie van de druksterkte van de proefstukken

4.4.5.3 Invloed van verdichtingswijze

De verdichtingswijze beïnvloedt ook de druk- en buigsterkte. De stelselmatige trapverdichting in mallen geeft hogere druksterktes dan verdichting in twee lagen (zowel bij de belasting loodrecht op het verdichtingsvlak als deze evenwijdig met het verdichtingsvlak. (Van Meirvenne et al., 2016)

De proefstukken in deze masterproef zijn telkens op dezelfde wijze verdicht, namelijk in drie horizontale lagen. Op onderstaande foto zijn deze verdichtingslagen duidelijk zichtbaar. Aangezien het proefstuk getest wordt met het afstrijkvlak naar voren, komen deze drie horizontale lagen verticaal te staan tijdens het testen. Volgens Van Meirvenne et al. is deze verdichtingsmethode de minst gunstige van de drie onderzochte methoden: horizontale verdichting, verticale verdichting en trapsgewijze verdichting.



Figuur 4-55: Proefstuk verdicht in 3 lagen

4.4.5.4 Invloed van de W/C-factor

Voor Recycled mix 0/2 leidt een verhoging van de W/C_{eff}-factor van 1,1 naar 1,3 tot een daling van de druksterkte van 10,4 MPa naar 9,5 MPa. De buigsterkte daalt mee van 5,7 MPa naar 5,3 MPa. Een vergelijkbaar patroon wordt vastgesteld bij Recycled mix 0/3, waar de druksterkte bij stijgende W/C-factor van 1,0 naar 1,2 terugvalt van 8,9 MPa naar 7,4 MPa, met een overeenkomstige daling van de buigsterkte van 7,1 MPa naar 4,2 MPa. Deze gegevens bevestigen de verwachte negatieve impact van overmatig aanmaakwater op de microstructuur en porositeit bij het gebruik van gerecycleerde granulaten.

Echter, voor de Rivierzanden 0/4 (35/90 en 26/90) stijgt de druksterkte bij een toegenomen W/C-factor. Het rivierzand bereikt bij de desbetreffende W/C-factor een kritisch punt, dat mogelijk overeenkomt met het ideale verwerkingsbereik.

Ook bij het verhogen van de W/C-factor bij de Chapyt-mengsels, mengzand en gerecycleerd betonzand wordt eenzelfde tendens als bij de rivierzanden gevonden. Er is een toename in druk- en buigsterkte. Deze toename bij hoge W/C-factoren kan worden verklaard door de slechte verdichting van deze mengsels. Dit is zichtbaar in Figuur 4-53.

Algemeen kan worden gesteld dat er een omslagpunt bestaat in de invloed van de W/C-factor op de mechanische prestaties van het mengsel. Tot een bepaald niveau leidt een toenemende W/C-factor tot een toename van de sterkte. Wanneer echter na dit kritieke punt extra water wordt toegevoegd, daalt de sterkte opnieuw.

Dit gedrag is duidelijk zichtbaar bij de Recycled mix-mengsels en wordt geïllustreerd in Figuur 4-53.

4.5 Conclusie na hoofdstuk 4

Dit hoofdstuk draagt bij aan het onderzoek door praktijkervaringen te delen en conclusies te formuleren op basis van de uitgevoerde proeven op dekvloermengsels. Uit de resultaten blijkt dat de flow table test, in combinatie met de mini-slumptest, op zichzelf onvoldoende is om de optimale water-cement verhouding nauwkeurig te bepalen. Hoewel de flow table test een eerste indicatie biedt van de verwerkbaarheid, kunnen hiermee drogere mengsels ten onrechte worden uitgesloten – mengsels die ondanks een beperkte vloei in de praktijk wel voldoende verwerkbaar blijken te zijn.

Daarnaast toont dit hoofdstuk duidelijk aan dat zowel het zandtype als de water-cementfactor een significante invloed hebben op de mechanische eigenschappen én de verwerkbaarheid van de cementgebonden dekvloermengsels.

Zo leverde rivierzand stabiele prestaties. Opvallend is dat bepaalde Recycled mix-dekvloermengsels zelfs betere prestaties vertoonden dan die op basis van rivierzand. Dit onderstreept hun potentieel als duurzaam en efficiënt alternatief.

Daartegenover staan de mengsels op basis van Chapyt-zand en gerecycleerd betonzand, die onvoldoende verdicht konden worden en daardoor ook slechtere mechanische eigenschappen vertoonden.

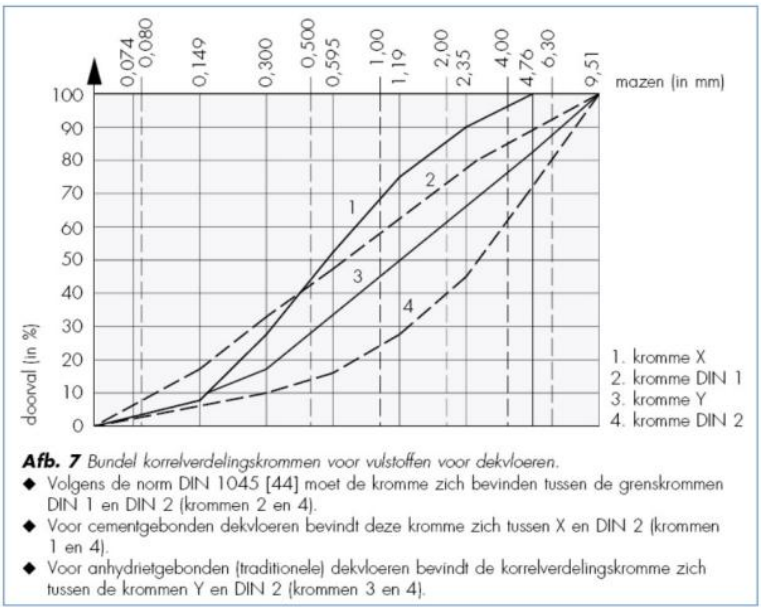
Op basis van de in dit hoofdstuk opgedane inzichten en praktijkervaringen kunnen gerichtere keuzes worden gemaakt voor het optimaliseren van de dekvloermengsels.

Hoofdstuk 5: Optimalisatie dekvloermengsel

In dit hoofdstuk wordt onderzocht hoe zandmengsels optimaal kunnen worden samengesteld om te voldoen aan de eisen voor cementgebonden dekvloeren. Om een geschikte korrelverdeling te bekomen, wordt er vertrokken vanuit de richtlijnen van de Technische Voorlichting TV 189, waarin grenswaarden voor de gecumuleerde doorval per zeefmaat worden opgegeven. Op basis van deze richtlijnen is een Excel-tool ontwikkeld waarmee verschillende zandfracties met elkaar gecombineerd kunnen worden tot een samengestelde korrelkromme die volledig binnen de gestelde grenzen valt. Door systematisch combinaties te genereren en te toetsen aan TV 189, kunnen de meest geschikte mengverhoudingen geselecteerd worden. Vervolgens worden deze theoretisch bepaalde mengsels verder geanalyseerd aan de hand van praktische parameters zoals de fijnheidsmodulus en doorval bij 0,5 mm. De mini-slump test en verwerkbaarheid worden voor verschillende W/C-factoren nagegaan. Op basis van deze bevindingen en de nodige cement- en waterdoseringen worden prismatische balken gemaakt die onderworpen worden aan een buig- en druksterkteproef. Zo kan worden nagegaan in welke mate de combinaties overeenkomen met de beoogde prestaties en kunnen er conclusies getrokken worden.

5.1 De ideale korrelverdeling voor cementgebonden dekvloeren

Zoals eerder vermeld, geeft de Technische Voorlichting TV 189 richtlijnen over de korrelverdeling van granulaten. In onderstaande figuur zijn de bijbehorende grenskrommen weergegeven.



Afb. 7 *Bundel korrelverdelingskrommen voor vulstoffen voor dekvloeren.*

- Volgens de norm DIN 1045 [44] moet de kromme zich bevinden tussen de grenskrommen DIN 1 en DIN 2 (krommen 2 en 4).
- Voor cementgebonden dekvloeren bevindt deze kromme zich tussen X en DIN 2 (krommen 1 en 4).
- Voor anhydrietgebonden (traditionele) dekvloeren bevindt de korrelverdelingskromme zich tussen de krommen Y en DIN 2 (krommen 3 en 4).

Figuur 5-1: Grenskrommen granulaten (Van Laecke, 1993)

Volgens TV 189 zijn de richtkrommen voor cementgebonden dekvloeren krommen 1 en 4. De korrelverdeling van het granulaat bevindt zich dus idealiter tussen deze twee krommen. De overeenkomstige gecumuleerde doorvallen zijn samengevat in onderstaande tabel:

Tabel 5-1: Doorvallen voor cementgebonden dekvloer volgens TV 189 (Van Laecke, 1993)

	TV 189 min	**TV 189 max**
Zeefmaat [mm]	Gecumuleerde doorval [%]	Gecumuleerde doorval [%]
0,063	3,0	3,0
0,125	7,0	8,0
0,250	9.0	25,0
0,5	14,0	45,0
1	25,0	70,0
2	40,0	85,0
4	60,0	95,0
5,6	75,0	100,0
8	90,0	100,0
10	100,0	100,0

5.2 Bepaling van de ideale korrelverdeling voor cementgebonden dekvloeren

Voor het bepalen van een geschikte korrelverdeling voor cementgebonden dekvloeren, is een eigen Excel-tool ontwikkeld. Deze tool is gebaseerd op de richtlijnen uit TV 189, waarin de toegelaten grenzen voor de gecumuleerde korrelverdeling zijn vastgelegd aan de hand van twee grenskrommen. Het doel van deze tool is om via het mengen van twee of drie bestaande granulaten een samengestelde korrelkromme te verkrijgen die volledig binnen deze grenzen valt.

5.2.1.1 Samenstelling van het mengsel

Voor elk granulaat werd een zeefanalyse uitgevoerd waarbij het gecumuleerde doorvalpercentage voor elke zeefmaat werd bepaald. De zeefmaten variëren van 0,063 mm tot 10 mm. De resultaten van deze zeefanalyse zijn te vinden in Bijlage J. Om de bijdrage van elk granulaat aan het mengsel te sturen, worden wegingsfactoren toegekend:

- X_1: Fractie van granulaat 1 in het mengsel
- X_2: Fractie van granulaat 2 in het mengsel
- X_3: Fractie van granulaat 3 in het mengsel

Deze moeten voldoen aan volgende voorwaarde:

$$X_1 + X_2 + X_3 = 1 \qquad \textit{5-1}$$

Met:

X_1[-]: Fractie van granulaat 1 in het mengsel

X_2[-]: Fractie van granulaat 2 in het mengsel

X_3[-]: Fractie van granulaat 3 in het mengsel

5.2.1.2 Berekening van de samengestelde korrelkromme

Voor elke zeefmaat i wordt het gecombineerde gecumuleerde doorval D_i berekend aan de hand van volgende formule:

$$D_i = X_1 * D_{i,1} + X_2 * D_{i,2} + X_3 * D_{i,3}\ [\%] \qquad \textit{5-2}$$

Met:

Di [%]: Gecombineerde gecumuleerde doorval voor zeefmaat i

X_1[-]: Fractie van granulaat 1 in het mengsel

$Di_{,1}$[%]: Gecumuleerde doorval van granulaat 1 voor zeefmaat i

X_2[-]: Fractie van granulaat 2 in het mengsel

$Di_{,2}$[%]: Gecumuleerde doorval van granulaat 2 voor zeefmaat i

X_3[-]: Fractie van granulaat 3 in het mengsel

$Di_{,3}$[%]: Gecumuleerde doorval van granulaat 3 voor zeefmaat i

Deze formule wordt toegepast op alle zeefmaten, waardoor een volledige samengestelde korrelkromme ontstaat.

5.2.1.3 Toetsing aan TV 189

De gecombineerde curve wordt vergeleken met de grenzen zoals voorgeschreven in TV 189. De richtlijn vereist dat voor elke zeefmaat geldt:

$$TV\ 189\,\min \leq D_i \leq\ TV\ 189\ max \qquad 5\text{-}3$$

In de Exceltool worden de waarden die aan deze voorwaarde voldoen visueel gemarkeerd, zodat meteen duidelijk is of het mengsel binnen de norm valt.

5.2.1.4 Herhaling van de berekening

De bovenstaande berekening wordt herhaald voor een 40-tal combinaties van de twee of drie zandfracties, telkens met verschillende waarden voor de wegingsfactoren X_1, X_2 en X_3. Voor elke combinatie wordt de samengestelde korrelkromme bepaald en vergeleken met de grenzen uit TV 189.

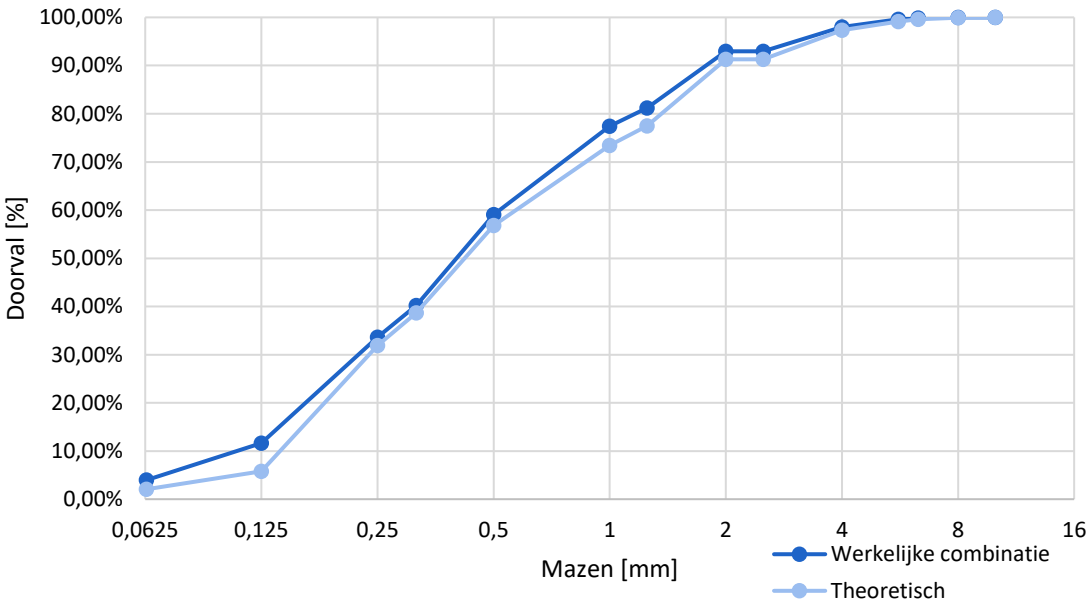
Na evaluatie worden de 10 best presterende mengsels geselecteerd op basis van hun geschiktheid ten opzichte van de norm. Deze geselecteerde mengsels worden in de volgende paragrafen verder geanalyseerd en geëvalueerd op basis van aanvullende criteria zoals verwerkbaarheid, sterkte en duurzaamheid.

5.2.1.5 Vergelijking theoretisch model met de praktijk

Aangezien deze berekening een theoretisch model blijft, werd er aanvullend één zeving uitgevoerd op een specifieke mengcombinatie. Deze zeving werd uitgevoerd op een mengsel bestaande uit 25% Mengzand 0/4 25/90 en 75% Recycled mix 0/2. De werkwijze is dezelfde beschreven als in hoofdstuk 3. In tegenstelling tot de zeving in hoofdstuk 3, werden hier niet één, maar twee verschillende zandfracties gezeefd. Er werd 250 g Mengzand 0/4 25/90 en 750 g Recycled mix 0/2 afgewogen. Deze fracties werden samengevoegd, waarna de cumulatieve doorval op dezelfde manier bepaald als in hoofdstuk 3.

Op onderstaande figuur is de vergelijking tussen het theoretisch model en de werkelijke combinatie. Hieruit blijkt dat het theoretisch model sterk overeenkomt met de gemeten zeefresultaten van de werkelijke

combinatie. Dit bevestigt dat het theoretisch model een betrouwbare benadering vormt en dus zeker als vervanging kan dienen.



Figuur 5-2: Vergelijking theoretisch model met de werkelijke combinatie

5.2.1.6 Gekozen combinaties en naamgeving

In onderstaande Tabel 5-2 zijn de fracties weergegeven van de gekozen zandmengsels die samen de combinaties vormen.

Tabel 5-2: Percentage verhoudingen mengsels

Combinatie	Gerecycleerd betonzand 0/4 [%]	Recycled mix 0/2 [%]	Recycled mix 0/3 [%]	Mengzand 0/4 25/90 [%]	Chapyt 0/4 [%]
1	75	25			
2	50	50			
3	75		25		
4	50		50		
5	75			25	
6	50			50	
7		25	75		
8			25	75	
9			50	50	
10			40	40	20

De combinaties zijn geselecteerd op basis van de theoretische zeefkromme die hierboven bepaald is. Daarbij is ervoor voor gezorgd dat het merendeel van de mengsels zich tussen de grenzen van TV 189 min en max bevindt. De tien zeefkrommes die het best aansloten en binnen deze grenzen vallen, zijn geselecteerd. Daarnaast zijn eerdere bevindingen uit dit rapport, zoals de sterkteontwikkeling en verwerkbaarheid, mee in overweging genomen bij de samenstelling van de mengsels. Zo is er bijvoorbeeld bewust onderzocht of Chapyt de verwerkbaarheid van een mengsel kan verbeteren, zonder daarbij een al te grote negatieve impact te hebben op de mechanische eigenschappen.
Een concreet voorbeeld is een mengsel bestaande uit 40% Recycled mix 0/3, 40% Mengzand 0/4 25/90 en 20% Chapyt 0/4. Dit mengsel kan vergeleken worden met combinatie 9, die bestaat uit 50% Recycled mix 0/3 en 50% Mengzand 0/4 25/90. Een ander voorbeeld is het toevoegen van Recycled mix en de invloed daarvan op de mechanische eigenschappen.
De bijhorende zeefkrommes van de geselecteerde zandmengsels zijn opgenomen in Bijlage J.

Om de verschillende combinaties en hun eigenschappen eenvoudig met elkaar te kunnen vergelijken wordt er gebruik gemaakt van een specifieke codering voor de verdere naamgeving. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de individuele codenaam van de zandsoorten zoals weergegeven in Tabel 3-1.
De naamgeving voor combinatie 1 met 75% Gerecycleerd betonzand 0/4 en 25% Recycled mix 0/2, krijgt de codering C1: 75 RCS 0/4 - 25 RMS 0/2. Een overzicht van de naamgeving voor de combinaties wordt weergegeven in Tabel 5-3.

Tabel 5-3: Naamgeving combinaties

Combinatie
C1: 75 RCS 0/4 – 25 RMS0/2
C2: 50 RCS 0/4 – 50 RMS 0/2
C3: 75 RCS 0/4 – 25 RMS 0/3
C4: 50 RCS 0/4 – 50 RMS 0/3
C5: 75 RCS 0/4 – 25 MZ 25/90
C6: 50 RCS 0/4 – 50 MZ 25/90
C7: 25 RMS 0/2 – 75 RMS 0/3
C8: 25 RMS 0/3 – 75 MZ 25/90
C9: 50 RMS 0/3 – 50 MZ 25/90
C10: 40 RMS 0/3 – 40 MZ 25/90 – 20 Chap 0/4

5.2.1.7 FM en doorval bij 0,5 mm

Net als in hoofdstuk 3 worden ook hier de fijnheidsmodulus en de doorval bij 0,5 mm bepaald. De resultaten worden vergeleken met de theoretische tabellen en met de referentiecurves uit TV 189.

Tabel 5-4: FM en doorval bij 0,5mm voor de gecombineerde zangmengsels

Combinatie	FM [-]	Soort granulaat	Doorval bij 0,5mm [%]	Soort granulaat
1	3,14	Goed	44	Goed
2	3,27	Goed	48	Te fijn
3	2,98	Goed	43	Goed
4	2,96	Goed	44	Goed
5	3,14	Goed	47	Te fijn
6	3,26	Goed	52	Te fijn
7	3,06	Goed	49	Te fijn
8	3,05	Goed	51	Te fijn
9	3,21	Goed	55	Te fijn
10	3,28	Goed	55	Te fijn

Hoewel alle mengsels op basis van de fijnheidsmodulus binnen het bereik "goed" vallen, toont de doorval bij 0,5 mm aan dat een aantal combinaties te fijn zijn. Dit is het geval voor combinatie 2, die net boven de grens van het doorvalpercentage valt, dit als gevolg van het gebruik van Recycled mix 0/2. Recycled mix 0/2 heeft zelf een doorval bij 0,5 mm van 55%. Dit komt voornamelijk doordat het gebruikte mengzand een hoge doorval bij 0,5 mm (64%), wat het totale resultaat van het zandmengsel aanzienlijk verhoogt. Ook combinaties 5, 6, 8, 9 en 10 overschrijden de bovengrens van de doorval bij 0,5 mm omwille van deze reden. Daarnaast zorgt het gebruik van Recycled mix 0/2 er ook voor dat de doorval bij 0,5 mm van combinatie 7 net boven de grens ligt en dus wordt hier het mengsel ook als te fijn beoordeeld.

Toch kan er geconcludeerd worden dat de samenstellingen goede eigenschappen hebben om te gebruiken in dekvloermengsels aangezien alle fijnheidsmoduli binnen de categorie "goed" vallen en de doorval bij 0,5 steeds lichtjes boven de grens ligt.

5.3 Samenstelling gecombineerde dekvloermengsels

Voor de ontwikkeling van de dekvloermengsels werd gebruikgemaakt van verschillende combinaties van zanden. Deze mengsels zijn samengesteld op basis van gerecycleerde en natuurlijke granulaten. De volgende zanden werden gebruikt: Gerecycleerd betonzand 0/4, Recycled mix 0/2, Recycled mix 0/3, Mengzand 0/4 25/90 en Chapyt 0/4. Bij elk mengsel werd de totale zandmassa constant gehouden op 2000 g. Deze massa werd gekozen op basis van praktische overwegingen, voornamelijk om voldoende volume te verkrijgen voor de vervaardiging van zes prisma's, bestemd voor druksterktetesten op een verhardingsouderdom van 7 en 28 dagen. De massaverdeling van de verschillende zandfracties per combinatie is weergegeven in Tabel 5-5.

Tabel 5-5: Massa's zandmengsel

Combinatie	Massa Gerecycleerd betonzand 0/4 [g]	Massa Recycled mix 0/2 [g]	Massa Recycled mix 0/3 [g]	Massa Mengzand 0/4 25/90 [g]	Massa Chapyt 0/4 [g]
1	1500	500			
2	1000	1000			
3	1500		500		
4	1000		1000		
5	1500			500	
6	1000			1000	
7		500	1500		
8			1500	500	
9			1000	1000	
10			800	400	400

Omdat de dichtheid van elk zandtype verschillend is, varieert het uiteindelijke zandvolume van mengsel tot mengsel. Om een correcte volumeberekening te kunnen maken, wordt eerst de schijnbare dichtheid van elk zandtype experimenteel bepaalt. Dit gebeurd door één liter van het desbetreffende zand in een maatbeker af te wegen, de berekeningen worden hier uitgevoerd met het schijnbare volume van het granulaat. Op die manier kon de massa per liter (in g/L) bepaald worden, wat vervolgens gebruikt werd om de volumes van de verschillende mengsels te berekenen.

In onderstaande tabel worden de gemeten schijnbare dichtheden weergegeven voor elk afzonderlijk zandtype.

Tabel 5-6: Gemeten dichtheden van de zandsoorten

Zandsoort	Schijnbare dichtheid [g/l]
Gerecycleerd betonzand 0/4	1240,04
Chapyt 0/2	756,00
Chapyt 0/4	823,35
Recycled mix 0/2	1241,31
Recycled mix 0/3	1224
Rivierzand 0/4 26/90	1698,58
Rivierzand 0/4 35/90	1704,88
Mengzand 0/4 25/90	1631,88

Vervolgens werd per zandfractie het volume berekend door de massa ervan te delen door de bijhorende dichtheid, volgens onderstaande formule:

$$V_{zand,i} = \frac{m_{zand,i}}{\rho_{zand,i}} \; [l] \qquad 5\text{-}4$$

Met:

$V_{zand,i}$[l]: Schijnbaar volume van het zand i

$m_{zand,i}$[g]: Massa van het zand i

$\rho_{s,zand,i}$[g/l]: Schijnbare dichtheid van het zand i

Voor combinatie 1 is dit:

$$V_{zand,gerecycleerd\ betonzand\ 0/4} = \frac{1500g}{1240{,}04\ g/l} = \ 1{,}21\ l$$

$$V_{zand,recycled\ mix\ 0/2} = \frac{500g}{1241{,}31\ g/l} = \ 0{,}40\ l$$

Het totale zandvolume $V_{zand,totaal}$ werd vervolgens bekomen door de volumes van de verschillende fracties op te tellen:

$$V_{zand,totaal} = \sum_{i=1}^{n} V_{zand,i} \; [l] \qquad 5\text{-}5$$

Met:

$V_{zand,totaal}$[l]: Totaal schijnbaar volume zand

$V_{zand,i}$[l]: Schijnbaar volume van het zand i

Voor combinatie 1 is dit:

$$V_{zand,totaal} = 1{,}21\ l + 0{,}40\ l = 1{,}61\ l$$

Op basis van dit totale schijnbare volume werd de benodigde cementmassa berekend via de cementdosering van 225g per liter zand:

$$m_{cement,j} = D_{cement} * V_{zand,totaal}\ [g] \qquad 5\text{-}6$$

Met:

$m_{cement,j}$ [g]: Massa van het cement van combinatie j

$V_{zand,totaal}$ [l]: Totaal schijnbaar volume van het zand

D_{cement} [g/l]: cementdosering (225 g/l)

Voor combinatie 1 is dit:

$$m_{cement,combinatie\ 1} = 225\ \frac{g}{l} * 1{,}61\ l = 362{,}80\ g$$

In onderstaande tabel worden alle cementmassa's samengevat van alle 10 de combinaties.

Tabel 5-7: Samenstelling combinaties

Combinatie	Volume Gerecycleerd betonzand 0/4 [l]	Volume Recycled mix 0/2 [l]	Volume Recycled mix 0/3 [l]	Volume Mengzand 0/4 25/90 [l]	Volume Chapyt 0/4 [l]	Totaal volume [l]	Massa cement [g]
1	1,21	0,40				1,61	362,80
2	0,81	0,81				1,61	362,71
3	1,21		0,41			1,62	364,08
4	0,81		0,82			1,62	365,27
5	1,21			0,31		1,52	341,11
6	0,81			0,61		1,42	319,32
7		0,40	1,23			1,63	366,37
8			1,23	0,31		1,53	344,67
9			0,82	0,61		1,43	321,70
10			0,65	0,49	0,49	1,63	366,67

De bijhorende hoeveelheid water wordt berekend aan de hand van de toegevoegde water-cementfactor (W/C):

$$W/C_{add} = \frac{m_{w,tot}}{m_{cement,j}}\ [-] \qquad 5\text{-}7$$

Met:

W/C_{add}[-]: Toegevoegde W/C-factor

$m_{cement,j}$ [g]: Massa van het cement van combinatie j

$m_{w,tot}$ [g]: Totale massa van het water

Door bovenstaande formule toe te passen kunnen de bijhorende watermassa's voor de verschillende W/C_{add}-factoren worden berekend.

$$W/C = \frac{m_{w,totaal}}{m_{cement}} \rightarrow m_{w,totaal} = \frac{W}{C} * m_{cement,j}$$

Voor combinatie 1 met een toegevoegde W/C-factor van 0,6 is dit:

$$m_{w,totaal} = 0{,}6 * 362{,}80\ g = 218\ g$$

Vervolgens moet worden berekend hoeveel water door de granulaten wordt geabsorbeerd. Dit geabsorbeerde water is niet beschikbaar voor de reactie met cement. De hoeveelheid opgenomen water wordt bepaald op basis van de eerder vastgestelde waterabsorptie na vijf minuten onderdompeling, aangeduid als WA_{5min}. De formule hiervoor luidt:

$$m_{w,granulaat,i} = WA_{5min,i} * m_{zand,i}\ [g] \qquad 5\text{-}85$$

Met:

$m_{w,granulaat,i}$ [g]: Massa water dat wordt opgenomen door granulaat i

$WA_{5min,i}$ [%]: Waterabsorptie van het granulaat i na vijf minuten

$m_{zand,i}$ [g]: Totale massa van het granulaat i

Voor combinatie 1 met een toegevoegde W/C-factor van 0,6 is dit:

$$m_{w,granulaat,gerecycleerd\ betonzand\ 0/4} = 5{,}42\ \% * 1500\ g = 81\ g$$

$$m_{w,granulaat,recycled\ mix\ 0/2} = 2{,}07\ \% * 500\ g = 10\ g$$

De som van de opgenomen waterhoeveelheden wordt vervolgens afgetrokken van de totale watermassa om de hoeveelheid water te bekomen die effectief beschikbaar is voor de hydratatiereactie:

$$m_{w,reactie} = m_{w,tot} - \sum_{i=1}^{n} m_{w,granulaat,i}\ [g] \qquad 5\text{-}95$$

Met:

$m_{w,tot}$ [g]: Totale massa van het water

$m_{w,granulaat,i}$ [g]: Massa water dat wordt opgenomen granulaat i

$m_{w,reactie}$ [g]: Massa van het water dat kan binden met het cement

Voor combinatie 1 met een toegevoegde W/C-factor van 0,6 is dit:

$$m_{w,reactie} = 218\ g - 81\ g - 10\ g = 126\ g$$

De effectieve water-cementfactor houdt enkel rekening met het water dat beschikbaar blijft voor de cementhydratatie. Deze wordt als volgt gedefinieerd:

$$W/C_{eff} = m_{w,reactie}/m_{cement}\ [-] \qquad 5\text{-}10$$

Met:

W/C_{eff}[-]: Effectieve water-cement factor

m_{cement} [g]: Massa van het cement (562,5 g)

$m_{w,reactie}$ [g]: Massa van het water dat kan binden met het cement

Voor combinatie 1 met een toegevoegde W/C-factor van 0,6 is dit:

$$W/C_{eff} = 126\ g\ /\ 362{,}8\ g = 0{,}3$$

Tabel 5-8 geeft de voorbeeldberekening voor combinatie 1 weer. De rest van de berekening voor de andere combinaties zijn terug te vinden in Bijlage K.

Tabel 5-8: Berekening W/C-eff combinatie 1

C1: 75 RCS 0/4 – 25 RMS 0/2

W/C_{add} [-]	**$m_{w,\ totaal}$** [g]	**m_w, Gerecycleerd betonzand 0/4** [g]	**m_w, Recycled mix 0/2** [g]	**m_w, Recycled mix 0/3** [g]	**m_w, Mengzand 0/4 25/90** [g]	**m_w, Chapyt 0/4** [g]	**$m_{w,\ reactie}$** [g]	**W/C_{eff}** [-]
0,6	218	81	10	-	-	-	126	**0,3**
0,7	254	81	10	-	-	-	162	**0,4**
0,8	290	81	10	-	-	-	199	**0,5**
0,9	327	81	10	-	-	-	235	**0,6**
1	363	81	10	-	-	-	271	**0,7**
1,1	399	81	10	-	-	-	307	**0,8**
1,2	435	81	10	-	-	-	344	**0,9**
1,3	472	81	10	-	-	-	380	**1,0**

5.4 Consistentie en verwerkbaarheid van de gecombineerde dekvloermengsels

Op basis van de eerder verworven kennis en ervaring wordt in dit hoofdstuk gezocht naar een goede verwerkbaarheid bij lagere W/C-factoren, zowel vanwege de positieve invloed op de mechanische prestaties als op de praktische verwerkbaarheid. In tegenstelling tot het vorige hoofdstuk wordt de optimale W/C-factor bepaald op basis van de mini-slumptest en de verwerkbaarheid van het mengsel. Dit omdat er geen geschikte consistentietest voorhanden is gebleken voor dekvloermengsels.

Bij de uitvoering van de mini-slumptest wordt gestreefd naar een rechtopstaande kegel. In de onderstaande paragrafen worden enkel de foto's opgenomen van de gecombineerde dekvloermengsels waarbij de kegel na uitvoering van de mini-slumptest rechtop blijft staan. Mengsels waarbij de kegel is omgevallen, worden niet weergegeven.

Ter ondersteuning van de evaluatie wordt in alle gevallen een foto toegevoegd van de rechtstaande kegel toegevoegd, om visueel te onderbouwen waarom bepaalde keuzes zijn genomen. Deze beelden geven een goed beeld van de inwendige structuur en verdichting van de mengsels.

Voor het testen van de verwerkbaarheid werd een nieuwe mal gebruikt met afmetingen van 10 x 10 x 3 cm. Deze kleinere mal vervangt de eerder gebruikte mal, die een te grote hoeveelheid materiaal vereiste om volledig gevuld te worden.



Figuur 5-3: Mal voor verwerkbaarheid

5.4.1 C1: 75 RCS 0/4 – 25 RMS 0/2

Op basis van de visuele beoordeling van zowel de mini-slump als het oppervlak in de mal, biedt een W/C_{add}-factor van 1,0 het meest evenwichtige resultaat. Het mengsel vertoont voldoende verwerkbaarheid voor een egale afwerking, zonder dat de vormstabiliteit in het gedrang komt. Lagere W/C_{add}-factoren (zoals 0,9) leiden tot een te droge, korrelige structuur met risico op onvoldoende verdichting, terwijl bij 1,1 de mini-slump een korrelige structuur van het mengel begint te vertonen. Daarom wordt gekozen voor een W/C_{add}-factor van 1,0 als optimaal compromis tussen verwerkbaarheid en stabiliteit.



Figuur 5-4: Combinatie 1; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,6



Figuur 5-5: Mini-slump combinatie 1; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,6



Figuur 5-6: Combinatie 1; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,7



Figuur 5-7: Mini-slump combinatie 1; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,7



Figuur 5-8: Combinatie 1; W/C$_{add}$ 1,1; W/C$_{eff}$ 0,8



Figuur 5-9: Mini-slump combinatie 1; W/C$_{add}$ 1,1; W/C$_{eff}$ 0,8

5.4.2 C2: 50 RCS 0/4 – 50 RMS 0/2

Op basis van de observaties bij toename van de W/C$_{add}$-factor, wordt ook voor combinatie 2 een W/C$_{add}$-factor 1,0 gekozen. Het mengsel toont hier een goede verdichting en stabiele structuur. Bij toename van de waterhoeveelheid vormen er zich korrels en is het oppervlak moeilijker te verwerken. Verdere toename zorgt voor het instorten van de mini-slump.



Figuur 5-10: Combinatie 2; W/C$_{add}$ 0,8; W/C$_{eff}$ 0,6



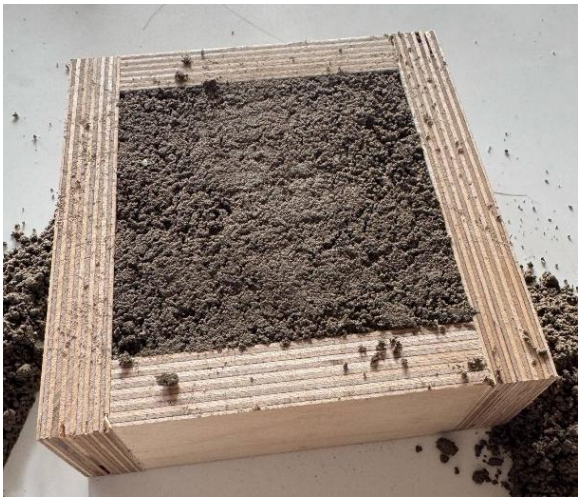
Figuur 5-11: Mini-slump combinatie 2; W/C$_{add}$ 0,8; W/C$_{eff}$ 0,6



Figuur 5-12: Combinatie 2; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7



Figuur 5-13: Mini-slump combinatie 2; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7



Figuur 5-14: Combinatie 2; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,8



Figuur 5-15: Mini-slump combinatie 2; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,8

5.4.3 C3: 75 RCS 0/4 – 25 RMS 0/3

Figuur 5-16 tot en met Figuur 5-27 tonen de evolutie van de verwerkbaarheid en structuur van het mengsel bij een toenemende W/C-factor. Bij combinatie 3 wordt gekozen voor W/C_{add}-factor 1,0 aangezien het mengsel bij deze verhouding een goede verdichtbaarheid vertoont in combinatie met een goede verwerkbaarheid. De eerder geteste mengsels vertonen weliswaar een egaal oppervlak, maar blijken te droog om een goede hechting en sterkte te waarborgen.



Figuur 5-16: Combinatie 3; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,4



Figuur 5-17: Mini-slump combinatie 3; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,4



Figuur 5-18: Combinatie 3; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,5



Figuur 5-19: Mini-slump combinatie 3; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,6



Figuur 5-20: Combinatie 3; W/C$_{add}$ 0,9; W/C$_{eff}$ 0,6



Figuur 5-21: Mini-slump combinatie 3; W/C$_{add}$ 0,9; W/C$_{eff}$ 0,6



Figuur 5-22: Combinatie 3; W/C$_{add}$ 1,0 ; W/C$_{eff}$ 0,7



Figuur 5-23: Mini-slump combinatie 3; W/C$_{add}$ 1,0; W/C$_{eff}$ 0,7



Figuur 5-24: Combinatie 3; W/C$_{add}$ 1,1; W/C$_{eff}$ 0,8



Figuur 5-25: Mini-slump combinatie 3; W/C$_{add}$ 1,1; W/C$_{eff}$ 0,8



Figuur 5-26: Combinatie 3; W/C$_{add}$ 1,2; W/C$_{eff}$ 0,9



Figuur 5-27: Mini-slump combinatie 3; W/C$_{add}$ 1,2; W/C$_{eff}$ 0,9

5.4.4 C4: 50 RCS 0/4 – 50 RMS 0/3

Voor combinatie 4 wordt W/C-factor 1,0 gekozen op basis van de verwerkbaarheidsprestaties. Het mengsel heeft goede verdichtingseigenschappen, is niet te korrelig en kan goed egaal worden gestreken.



Figuur 5-28: Combinatie 4; W/C$_{add}$ 0,7; W/C$_{eff}$ 0,5



Figuur 5-29: Mini-slump combinatie 4; W/C$_{add}$ 0,7; W/C$_{eff}$ 0,5



Figuur 5-30: Combinatie 4; W/C$_{add}$ 0,8; W/C$_{eff}$ 0,6



Figuur 5-31: Mini-slump combinatie 4; W/C$_{add}$ 0,8; W/C$_{eff}$ 0,6



Figuur 5-32: Combinatie 4; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7



Figuur 5-33: Mini-slump combinatie 4; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7



Figuur 5-34: Combinatie 4; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,8



Figuur 5-35: Mini-slump combinatie 4; W/C_{add} 1,0; W/C_{eff} 0,8



Figuur 5-36: Combinatie 4; W/C$_{add}$ 1,1; W/C$_{eff}$ 0,9



Figuur 5-37: Mini-slump combinatie 4; W/C$_{add}$ 1,1; W/C$_{eff}$ 0,9

5.4.5 C5: 75 RCS 0/4 – 25 MZ 25/90

Voor combinatie 5 wordt een W/C$_{add}$-factor van 0,8 gekozen. Het mengsel is hierbij niet te droog en vormt een stabiel, goed samenhangend geheel. Een verdere verhoging resulteert in een korrelige structuur die moeilijk egaal te strijken is.



Figuur 5-38: Combinatie 5; W/C$_{add}$ 0,6; W/C$_{eff}$ 0,4



Figuur 5-39: Mini-slump combinatie 5; W/C$_{add}$ 0,6; W/C$_{eff}$ 0,4



Figuur 5-40: Combinatie 5; W/C$_{add}$ 0,7; W/C$_{eff}$ 0,5



Figuur 5-41: Mini-slump combinatie 5; W/C$_{add}$ 0,7; W/C$_{eff}$ 0,5



Figuur 5-42: Combinatie 5; W/C$_{add}$ 0,8; W/C$_{eff}$ 0,6



Figuur 5-43: Mini-slump combinatie 5, W/C$_{add}$ 0,8; W/C$_{eff}$ 0,6



Figuur 5-44: Combinatie 5; W/C$_{add}$ 0,9; W/C$_{eff}$ 0,7



Figuur 5-45: Mini-slump combinatie 5; W/C$_{add}$ 0,9; W/C$_{eff}$ 0,7



Figuur 5-46: Combinatie 5; W/C$_{add}$ 1,0; W/C$_{eff}$ 0,8



Figuur 5-47: Mini-slump combinatie 5; W/C$_{add}$ 1,0; W/C$_{eff}$ 0,8

5.4.6 C6: 50 RCS 0/4 – 50 MZ 25/90

Op basis van de bevindingen wordt gekozen voor een W/C$_{add}$-factor van 0,7. Mengsels met een lagere waterhoeveelheid blijken niet stabiel en leiden tot een niet-rechtopstaande kegel. Bij het toevoegen van extra water neemt de korrelvorming toe en is er geen goed verdichtbare structuur meer. Dit is zichtbaar op Figuur 5-51, waar de W/C$_{add}$-factor 0,8 bedraagt.



Figuur 5-48: Combinatie 6; W/C$_{add}$ 0,7; W/C$_{eff}$ 0,5



Figuur 5-49: Mini-slump combinatie 6; W/C$_{add}$ 0,7; W/C$_{eff}$ 0,5



Figuur 5-50: Combinatie 6; W/C$_{add}$ 0,8; W/C$_{eff}$ 0,6



Figuur 5-51: Mini-slump combinatie 6; W/C$_{add}$ 0,8; W/C$_{eff}$ 0,6



Figuur 5-52: Combinatie 6; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7



Figuur 5-53: Mini-slump combinatie 6; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,7

5.4.7 C7: 25 RMS 0/2 – 75 RMS 0/3

Voor combinatie 7 wordt een W/C_{add}-factor van 1,0 gehanteerd. Er is sprake van een goede balans: het mengsel is niet meer te droog of poederig, en er treedt nog geen korrelvorming op. Hierdoor is er nog steeds een goede verdichting. Bij een verdere toename wordt het skelet korrelig, wat leidt tot een mindere mate aan verdichting.



Figuur 5-54: Combinatie 7; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,7



Figuur 5-55: Mini-slump combinatie 7; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,7



Figuur 5-56: Combinatie 7; W/C$_{add}$ 0,9; W/C$_{eff}$ 0,7



Figuur 5-57: Mini-slump combinatie 7; W/C$_{add}$ 0,9; W/C$_{eff}$ 0,7



Figuur 5-58: Combinatie 7; W/C$_{add}$ 1,0; W/C$_{eff}$ 0,9



Figuur 5-59: Mini-slump combinatie 7; W/C$_{add}$ 1,0; W/C$_{eff}$ 0,9



Figuur 5-60: Combinatie 7; W/C$_{add}$ 1,1; W/C$_{eff}$ 1,0



Figuur 5-61: Mini-slump combinatie 7; W/C$_{add}$ 1,1; W/C$_{eff}$ 1,0



Figuur 5-62: Combinatie 7; W/C$_{add}$ 1,2; W/C$_{eff}$ 1,1



Figuur 5-63: Mini-slump combinatie 7; W/C$_{add}$ 1,2; W/C$_{eff}$ 1,1

5.4.8 C8: 25 RMS 0/3 – 75 MZ 25/90

Voor combinatie 8 wordt een W/C$_{add}$-factor van 0,9 geselecteerd. De structuur van het mengsel oogt goed verdichtbaar en het oppervlak is hier het best verwerkbaar. Drogere mengsels tonen een grotere gevoeligheid voor het ontstaan van strepen als gevolg van de lagere waterhoeveelheid en bijgevolg een lagere samenhang van het mengsel.



Figuur 5-64: Combinatie 8; W/C$_{add}$ 0,7; W/C$_{eff}$ 0,6



Figuur 5-65: Mini-slump combinatie 8; W/C$_{add}$ 0,7; W/C$_{eff}$ 0,6



Figuur 5-66: Combinatie 8; W/C$_{add}$ 0,8; W/C$_{eff}$ 0,7



Figuur 5-67: Mini-slump combinatie 8; W/C$_{add}$ 0,8; W/C$_{eff}$ 0,7



Figuur 5-68: Combinatie 8; W/C-factor 0,9; W/C$_{eff}$ 0,8



Figuur 5-69: Combinatie 8; W/C-factor 0,9; W/C$_{eff}$ 0,8

5.4.9 C9: 50 RMS 0/3 – 50 MZ 25/90

Voor combinatie 9 wordt een W/C_{add}-factor van 0,8 geselecteerd. Bij deze verhouding is het oppervlak het best vlak en egaal af te werken, terwijl er nog geen sprake is van een korrelige structuur, wat duidelijk zichtbaar wordt bij toename tot W/C_{add}-factor van 0,9. De drogere mengsels vertonen een goed verdichtbare structuur, maar scoren minder goed op verwerkbaarheid.



Figuur 5-70: Combinatie 9; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,6



Figuur 5-71: Mini-slump combinatie 9; W/C_{add} 0,7; W/C_{eff} 0,6



Figuur 5-72: Combinatie 9; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,7



Figuur 5-73: Mini-slump combinatie 9; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,7



Figuur 5-74: Combinatie 9; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,8



Figuur 5-75: Mini-slump combinatie 9; W/C_{add} 0,9; W/C_{eff} 0,8

5.4.10 C10: 40 RMS 0/3 – 40 MZ 25/90 – 20 Chap 0/4

Tot slot toont combinatie 10 een goed verdichtbare structuur, wat toe te schrijven is aan de toevoeging van een fractie Chapyt 0/4. De hoge aanwezigheid van fijne deeltjes in dit mengsel draagt hier sterk aan bij. De beoordeling gebeurt op basis van de verwerkbaarheid en de samenhang van het mengsel. Deze eigenschappen blijken optimaal bij een W/C_{add}-factor van 1,0.



Figuur 5-76: Combinatie 10; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,7



Figuur 5-77: Mini-slump combinatie 10; W/C_{add} 0,8; W/C_{eff} 0,7



Figuur 5-78: Combinatie 10; W/C$_{add}$ 0,9; W/C$_{eff}$ 0,8



Figuur 5-79: Mini-slump combinatie 10; W/C$_{add}$ 0,9; W/C$_{eff}$ 0,8



Figuur 5-80: Combinatie 10; W/C$_{add}$ 1,0; W/C$_{eff}$ 0,9



Figuur 5-81: Mini-slump combinatie 10; W/C$_{add}$ 1,0; W/C$_{eff}$ 0,9

5.4.11 Overzicht gekozen W/C-factoren en conclusie

Op basis van de hierboven beschreven observaties wordt per combinatie een ideale W/C-factor bepaald voor het testen van de mechanische eigenschappen. Tabel 5-9 geeft een overzicht van de geselecteerde toegevoegde en de daarmee overeenstemmende effectieve W/C-factoren.

Tabel 5-9: Overzicht toegevoegde en effectieve W/C-factoren

Combinatie	W/C_{add} [-]	W/C_{eff} [-]
C1: 75 RCS 0/4 – 25 RMS 0/2	1,0	0,7
C2: 50 RCS 0/4 – 50 RMS 0/2	1,0	0,8
C3: 75 RCS 0/4 – 25 RMS 0/3	1,0	0,7
C4: 50 RCS 0/4 – 50 RMS 0/3	1,0	0,8
C5: 75 RCS 0/4 – 25 MZ 25/90	0,8	0,6
C6: 50 RCS 0/4 – 50 MZ 25/90	0,8	0,6
C7: 25 RMS 0/2 – 75 RMS 0/3	1,0	0,9
C8: 25 RMS 0/3 – 75 MZ 25/90	0,9	0,8
C9: 50 RMS 0/3 – 50 MZ 25/90	0,8	0,7
C10: 40 RMS 0/3 – 40 MZ 25/90 – 20 Chap 0/4	1,0	0,9

Uit bovenstaande tabel blijkt dat wanneer Gerecycleerd betonzand 0/4 wordt gecombineerd met het gerecycleerde granulaat Recycled mix, een toegevoegde W/C_{add}-factor nodig is van 1,0. Wanneer datzelfde Gerecycleerd betonzand 0/4 wordt gecombineerd met Mengzand 0/4 25/90, volstaat een lagere W/C_{add}-factor van 0,8 om een goed dekvloermengsel te bekomen. Dit kan eenvoudig worden verklaard vanuit de constatatie dat mengzand geen water zal absorberen, wat wel het geval is voor de combinaties waarbij Recycled mix wordt gecombineerd met het Gerecycleerd betonzand 0/4.

Eenzelfde conclusie geldt bij het vergelijken van combinaties 7 tot en met 9: het toevoegen en verhogen van Mengzand 0/4 25/90 leidt in het algemeen voor het dalen van de toegevoegde W/C_{add}-factor.

Voor combinatie 10 geldt opnieuw een hogere toegevoegde W/C_{add}-factor omwille van de fractie Chapyt 0/4, die een hoge waterabsorptie kent.

5.5 Mechanische eigenschappen gecombineerde dekvloermengsels

De druk- en buigsterkte van de gecombineerde dekvloermengsels wordt geëvalueerd volgens dezelfde proefmethoden als beschreven in hoofdstuk 4.4.

5.5.1 Dichtheden

De dichtheden van de drie proefstukken per combinatie, evenals de gemiddelde dichtheid, zijn weergegeven in Tabel 5-10 voor de metingen van 7 dagen en in Tabel 5-11 voor de metingen na 28 dagen. Deze gegevens zijn opgenomen voor alle tien combinaties.

Tabel 5-10: Dichtheden proefstukken na 7 dagen

Combinatie	$\rho_{p,1}$ [kg/m³]	$\rho_{p,2}$ [kg/m³]	$\rho_{p,3}$ [kg/m³]	ρ_{gem} [kg/m³]
Combinatie 1	1616	1679	1706	**1667**
Combinatie 2	1543	1508	1517	**1523**
Combinatie 3	1589	1579	1559	**1576**
Combinatie 4	1615	1588	1591	**1598**
Combinatie 5	1552	1578	1585	**1571**
Combinatie 6	1664	1698	1671	**1677**
Combinatie 7	1602	1570	1593	**1588**
Combinatie 8	1729	1768	1728	**1742**
Combinatie 9	1614	1693	1645	**1651**
Combinatie 10	1470	1483	1440	**1464**

Tabel 5-11: Dichtheden proefstukken na 28 dagen

Combinatie	$\rho_{p,1}$ [kg/m³]	$\rho_{p,2}$ [kg/m³]	$\rho_{p,3}$ [kg/m³]	ρ_{gem} [kg/m³]
Combinatie 1	1581	1609	1577	**1589**
Combinatie 2	1508	1446	1493	**1482**
Combinatie 3	1538	1501	1615	**1551**
Combinatie 4	1468	1514	1542	**1508**
Combinatie 5	1558	1574	1559	**1564**
Combinatie 6	1666	1678	1667	**1671**
Combinatie 7	1530	1555	1548	**1544**

Combinatie 8	1659	1653	1641	**1651**
Combinatie 9	1715	1720	1693	**1709**
Combinatie 10	1450	1458	1463	**1457**

5.5.1.1 Conclusies

Bij het vergelijken van de dichtheden op 7 en 28 dagen, blijkt dat deze op 28 dagen lager liggen voor combinaties 1 tot en met 8. Dit wordt verklaard door het voortzetting van de hydratatiereactie tussen water met cement, waarbij water verdwijnt uit het proefstuk. Combinaties 9 en 10 vertonen nauwelijks verschil in dichtheid.

Voor combinaties 9 en 10 is er nauwelijks verschil waarneembaar, de dichtheden blijven nagenoeg constant over de tijd.

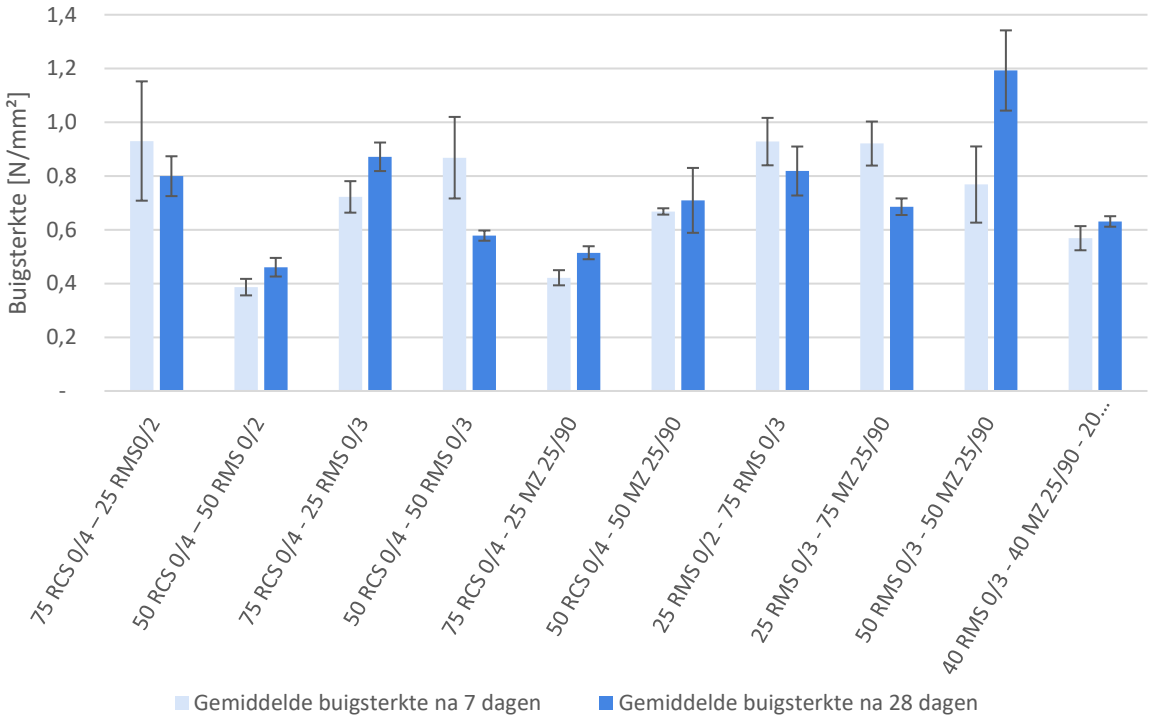
5.5.2 Buig- en druksterkte

De onderstaande tabel toont de gemiddelde buig- en druksterktes van alle mengsels op zowel 7 als 28 dagen. De individuele meetresultaten per proefstuk zijn opgenomen in Bijlage L.

Tabel 5-12: Gemiddelde buig- en druksterkte voor 7 en 28 dagen voor de 10 combinaties

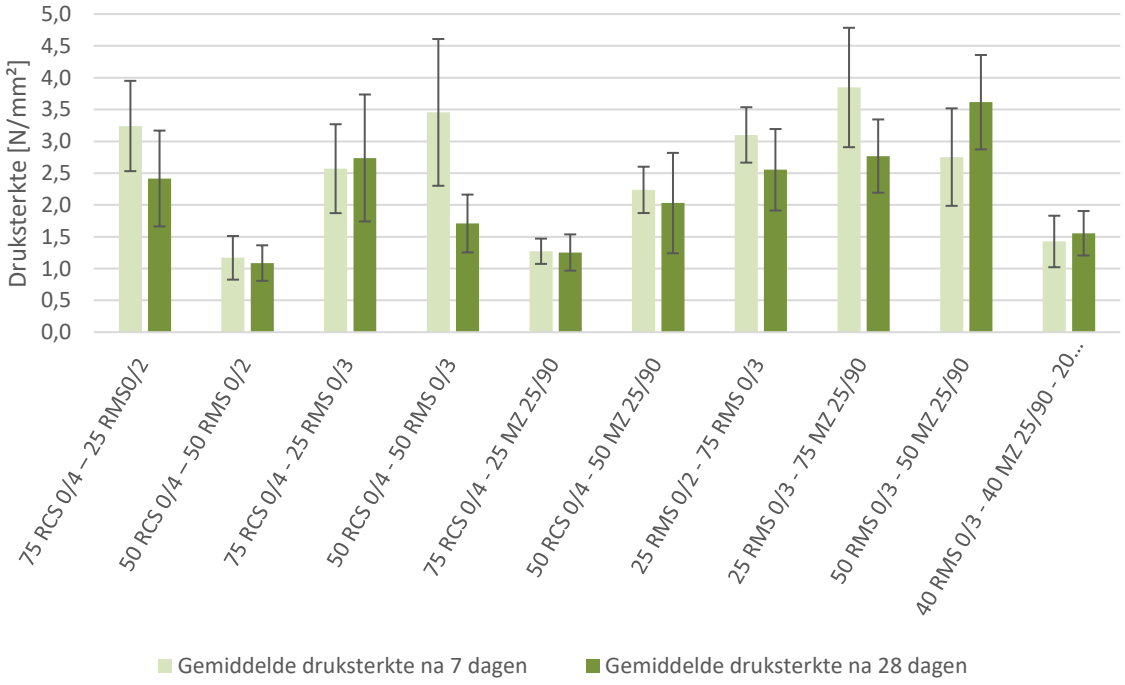
Combinatie	W/C_{eff} [-]	$R_{f,gem}$ na 7 dagen [MPa]	$R_{f,gem}$ na 28 dagen [MPa]	$R_{c,gem}$ na 7 dagen [MPa]	$R_{c,gem}$ na 28 dagen [MPa]
C1: 75 RCS 0/4 – 25 RMS 0/2	0,7	0,9	0,8	3,2	2,4
C2: 50 RCS 0/4 – 50 RMS 0/2	0,8	0,4	0,5	1,2	1,1
C3: 75 RCS 0/4 – 25 RMS 0/3	0,7	0,7	0,9	2,6	2,7
C4: 50 RCS 0/4 – 50 RMS 0/3	0,8	0,9	0,6	3,5	1,7
C5: 75 RCS 0/4 – 25 MZ 25/90	0,6	0,4	0,5	1,3	1,3
C6: 50 RCS 0/4 – 50 MZ 25/90	0,6	0,7	0,7	2,2	2,0
C7: 25 RMS 0/2 – 75 RMS 0/3	0,9	0,9	0,8	3,1	2,6
C8: 25 RMS 0/3 – 75 MZ 25/90	0,8	0,9	0,7	3,8	2,8
C9: 50 RMS 0/3 – 50 MZ 25/90	0,7	0,8	1,2	2,8	3,6
C10: 40 RMS 0/3 – 40 MZ 25/90 – 20 Chap 0/4	0,9	0,6	0,6	1,4	1,6

Figuur 5-82 toont de resultaten van de buigsterkte na 7 en 28 dagen.



Figuur 5-82: Resultaten buigsterkte na 7 en 28 dagen

Figuur 5-83 toont de resultaten van de druksterkte na 7 en 28 dagen.



Figuur 5-83: Resultaten druksterkte na 7 en 28 dagen

5.5.3 Conclusie

5.5.3.1 Invloed van ouderdom

Figuur 5-82 en Figuur 5-83 tonen een opvallend afwijkend gedrag bij combinaties 1, 2, 4, 6, 7 en 8. Deze combinaties lijken sterkte te verliezen op 28 dagen vergeleken met de sterkte op 7 dagen. Deze vaststelling strookt niet met wat wetenschappelijk verwacht wordt op basis van het hydratatiemechanisme van cementgebonden systemen.

Een mogelijke verklaring voor dit gedrag is dat deze mengsels te droog zijn samengesteld. Uit de literatuur blijkt dat het te droog kiezen van een dekvloermengsel kan leiden tot een eerder constant of onvoorspelbaar en onregelmatig gedrag in sterkte-ontwikkeling in functie van de ouderdom. (Van Meirvenne et al., 2016) Daarnaast blijft ook de invloed van verdichting een grote rol spelen in de uiteindelijke sterkte-ontwikkeling.

5.5.3.2 Invloed van fractie zandtypes

1) Gedrag bij toename Recycled mix 0/2: combinaties 1 en 2

Een toename van de fractie Recycled mix 0/2 van 25% naar 50% in combinatie met gerecycleerd betonzand bij respectievelijk combinatie 1 naar 2, resulteert in een daling van de sterkte-eigenschappen op zowel 7 als 28 dagen ouderdom. Deze vaststelling ligt niet in lijn met de verwachtingen, aangezien uit eerder onderzoek is gebleken dat de toevoeging van Recycled mix doorgans een positieve invloed heeft op de sterkte, onder andere door de gunstige korrelvorm en de daarmee gepaard gaande lagere inwendige wrijvingshoek.

Deze vaststelling opent opportuniteiten voor toekomstig onderzoek, met name naar de inwendige wrijvingshoek van de gecombineerde zandmengsels.

2) Gedrag bij toename Recycled mix 0/3: combinaties 3 en 4

In deze analyse wordt de toename van Recycled mix 0/3 van 25% naar 50% in combinatie met gerecycleerd betonzand onderzocht. De resultaten bij 7 dagen ouderdom tonen wel de verwachte stijging in druksterkte bij het verhogen van de fractie Recycled mix 0/3: de druksterkte stijgt van 2,6 naar 3,5 MPa.

De druksterkte van combinatie 4 valt echter terug van 3,5 naar 1,7 MPa, waar deze van combinatie 3 ligt toeneemt van 2,6 naar 2,7 MPa. Door het onregelmatige gedrag van combinatie 4, kan er bijgevolg enkel een onderbouwde conclusie worden getrokken op basis van de resultaten bij 7 dagen ouderdom.

3) Gedrag bij toename Mengzand 0/4 25/90: combinaties 5 en 6

Mengzand 0/4 25/90 wordt gecombineerd met gerecycleerd betonzand en neemt toe van 25% naar 50% tussen respectievelijk combinatie 5 en 6. Voor deze combinaties kan een uniforme conclusie worden gemaakt.

De resultaten tonen aan dat de druksterkte nauwelijks beïnvloed wordt door de verhardingsouderdom. In het geval van combinatie 5 blijft de druksterkte constant op 1,3 MPa bij zowel 7 als 28 dagen ouderdom. Bij combinatie 6 daalt de druksterkte licht van 2,2 op 7 dagen naar 2,0 MPa op 28 dagen.

Er kan bijgevolg gesteld worden dat een toename van de fractie mengzand resulteert in meer gunstige sterkte-eigenschappen, wat kan worden verklaard uit de granulometrie van het mengzand dat afgeronde en dichte korrels bevat. Dit zorgt voor een goede verdichtbaarheid en een meer stabiel zandskelet.

4) Gedrag door toevoeging van Chapyt 0/4: combinaties 9 en 10

Combinatie 9 heeft een 50/50 verdeling tussen Recycled mix 0/3 en rengzand 0/4 25/90. Deze combinatie heeft druksterkte waarden van 2,8 en 3,6 MPa na respectievelijk 7 en 28 dagen ouderdom. Combinatie 10 heeft een samenstelling 40/40 Recycled mix 0/3 en mengzand, aangevuld met een percentage 20% Chapyt 0/4. Door de toevoeging van Chapyt 0/4 aan het mengsel daalt de druksterkte beduidend naar 1,4 en 1,6 MPa voor respectievelijk 7 en 28 dagen ouderdom.

5.6 Conclusie na hoofdstuk 5

Enkele observaties met betrekking tot de sterkte-eigenschappen blijken moeilijk te verklaren op basis van de resultaten. Over het algemeen zijn er tal van parameters die de sterkteontwikkeling na 7 en 28 dagen beïnvloeden. Zo speelt de effectieve water-cementfactor een cruciale rol, evenals de verwerkbaarheid van het mengsel. Verder is de inwendige wrijvingshoek van het samengestelde zandmengsel van belang, aangezien deze gerelateerd is aan de verdichtingsgraad van het mengsel. Deze verdichtingsgraad beïnvloedt op zijn beurt de mechanische eigenschappen van het dekvloermengsel. Door de grote onderlinge variatie en het ontbreken van de fysische eigenschappen van de gevormde combinaties, is het moeilijk om eenduidige conclusies te trekken op basis van de bekomen resultaten. Over het algemeen zijn er verschillende parameters die de resultaten van de sterktetesten na 7 en 28 dagen beïnvloeden. Zo is de effectieve water-cement factor van essentieel belang voor een goede hydratatie en dus een correcte sterkteontwikkeling. Daarnaast speelt de verzadigingsgraad van het mengsel een rol: een te droog mengsel laat zich moeilijk verdichten. Een andere relevante parameter is de inwendige wrijvingshoek van het samengestelde mengsel. Deze beïnvloedt de verdichtingsgraad van het mengsel, die op zijn beurt een belangrijke determinant is van de uiteindelijke sterkte. Het geheel van deze invloeden zorgt ervoor dat de bekomen resultaten met de nodige voorzichtigheid geïnterpreteerd moeten worden.

Hoofdstuk 6: Discussie

Onderzoek naar de fysische eigenschappen van zandsoorten

In een eerste fase werd de nadruk gelegd op het onderzoek naar de fysische eigenschappen van de verschillende zandsoorten. Daarbij kwam een grote variatie aan korrelverdelingen aan het licht. Rivierzanden vertonen een evenwichtige en geleidelijke verdeling over het zeefbereik. Deze verdeling bevordert een goede verdichting en resulteert in lage porositeit. Gerecycleerde granulaten daarentegen vertonen doorgaans een minder gebalanceerde korrelverdeling: de Recycled mix bevat een overmaat aan fijne fracties, terwijl gerecycleerd betonzand relatief veel grove deeltjes bevat. Vaak vallen deze gerecycleerde granulaten buiten de grenzen van de TV 189-curven, die de toelaatbare korrelverdeling voor cementgebonden toepassingen definiëren. Dit benadrukt de noodzaak van doordachte mengstrategieën of het combineren van verschillende zandtypes om een geschikt zandskelet te verkrijgen. Deze aanpak wordt verder onderzocht in hoofdstuk 5.

Waterabsorptie en dichtheid

De waterabsorptie blijkt minder afhankelijk van de korrelgrootte, en meer bepaald te worden door de microstructuur van het materiaal. Dit wordt aangetoond via dichtheidsmetingen met behulp van de pyknometertest. Materialen zonder inwendige poriën vertonen geen of nauwelijks verschil tussen de gemeten dichtheden aangezien er geen water in de korrels kan binnendringen. Deze bevinding wordt bevestigd door microscopische analyse, die aantoont dat rivierzand een dichte, gesloten structuur heeft.
Bij gerecycleerde granulaten werd daarentegen wel een duidelijk verschil waargenomen tussen de *apparent density*, die hoger ligt dan de *oven-dried particle density*. Dit duidt op de aanwezigheid van interne poriën, en dus op een zekere mate van waterabsorptie. Microscopisch onderzoek bevestigt ook hier deze conclusie: gerecycleerde granulaten, met name Chapyt en gerecycleerd betonzand, vertonen een sterk poreuze structuur, met zichtbare cementresten en microscheurtjes. Deze kenmerken verklaren de hoge en snelle wateropname, die vooral binnen de eerste vijf tot tien minuten optreedt.

Mechanisch gedrag

De microscopische analyse blijkt ook bepalend voor het mechanisch gedrag. Rivierzanden bestaan uit afgeronde, gelijkmatige korrels, wat leidt tot een lage interne wrijvingshoeken en bijgevolg goede vloei-eigenschappen. Daartegenover staan de gerecycleerde materialen, die vaak scherpe randen en onregelmatige vormen vertonen. Deze vormkenmerken zorgen voor een hogere onderlinge vergrendeling tussen de korrels, wat resulteert in een verhoogde inwendige wrijvingshoek en meer interne weerstand. Vooral bij

Chapyt en gerecycleerd betonzand is dit effect uitgesproken, met een negatieve invloed op de verwerkbaarheid tot gevolg.

Gedrag van dekvloermengsels in verse en geharde toestand

In de volgende fase van het onderzoek werd het gedrag van dekvloermengsels bestudeerd, zowel in verse als geharde toestand. Elke onderzochte zandsoort werd afzonderlijk gebruikt als zandskelet. Uit de proeven (hoofdstuk 4) bleek dat klassieke consistentietesten, ontwikkeld voor beton, slechts beperkt toepasbaar zijn op dekvloermortels. Tests zoals de Casagrande-, Vebe-, V-funnel- en omgekeerde Abramskegeltest leverden inconsistente of irrelevante resultaten op doordat de mengsels weinig vloeigedrag vertonen of pas reageren op externe schokken. Enkel de mini-slumptest en de vloeitafeltest boden reproduceerbare resultaten, en werden daarom gebruikt om per zandtype twee geschikte W/C_{add}-factoren vast te leggen.

Samenhang tussen vloei en wrijvingshoek

Er werd een duidelijk verband vastgesteld tussen de vloei-eigenschappen van een mengsel en de inwendige wrijvingshoek van het zandskelet. Voor toekomstige consistentietesten met de vloeitafel is het dan ook aangewezen om de optimale vloeidiameter te bepalen op basis van deze inwendige wrijvingshoek, in plaats van een vaste diameter als criterium te hanteren.

Invloed van waterabsorptie en korrelgrootte

De verwerkbaarheid van de mengsels blijkt sterk afhankelijk van de waterabsorptiecapaciteit van het granulaat. Natuurlijke zanden zoals rivier- en mengzand vereisen een lagere toegevoegde W/C-factor om cohesie en vormvastheid te bereiken. Het volledige mengwater blijft immers beschikbaar. Gerecycleerde materialen nemen echter een deel van dit water op, waardoor hogere W/C_{add}-waarden nodig zijn om vergelijkbare consistentie te bereiken. Deze bevindingen sluiten aan bij de absorptietesten uit hoofdstuk 3 en benadrukken het belang van corrigeren naar een effectieve W/C_{eff}-waarde om eerlijke vergelijkingen te kunnen maken.

Ook de granulometrie heeft een merkbare invloed. Fijnere fracties (0/2) verkrijgen doorgaans sneller samenhang dan grovere (0/3 of 0/4), wat te verklaren is door hun grotere inwendige wrijvingshoek zoals vastgesteld in hoofdstuk 3.

Beperkingen van het vloeitafelcriterium

De gehanteerde selectie op basis van een vaste spreidingsdiameter van 13-16 cm (vloeitafeltest) leidde tot te natte mengsels, vooral bij granulaten met hoge absorptie of cohesie. Hierdoor werden droge of korrelige mengsels met goede verwerkbaarheid uitgesloten. Dit toont aan dat het vaste vloeitafelcriterium, zonder correctie voor zandtype of cohesie, onvoldoende selectief is en kan leiden tot een overschatting van de benodigde hoeveelheid water.

Mechanische prestatie en verdichtbaarheid

De mechanische prestaties van cementgebonden dekvloeren worden sterk beïnvloed door het zandtype, de verdichting, de dichtheid en de effectieve W/C_{eff}-factor. Deze onderlinge wisselwerking is bepalend voor de uiteindelijke mechanische prestaties van de mengsels. Rivierzand fungeerde als stabiele referentie en leverde een evenwichtige sterkteontwikkeling. Recycled mix 0/2 en 0/3 presteerden zelfs beter op vlak van druk- en buigsterkte, wat wijst op het potentieel van gerecycleerde granulaten mits goede mengselopbouw. Chapyt en gerecycleerd betonzand bleven onder de structurele drempelwaarden, voornamelijk door hun lage verdichtbaarheid. Er werd een lineair verband vastgesteld tussen dichtheid en druksterkte: hoe beter de verdichting, hoe hoger de sterkte. Recycled mix presteerde boven deze trendlijn, Chapyt en gerecycleerd betonzand eronder. Dit wordt verklaard door de interne wrijvingshoek: lagere wrijvingshoeken bevorderen verdichting en verhogen bijgevolg de sterkte. Deze relatie is visueel herkenbaar in de oppervlaktetextuur van de proefstukken.
De toegepaste verdichtingsmethode, in drie horizontale lagen, is volgens de literatuur de minst efficiënte techniek. Alternatieve verdichtingswijzen zouden vooral bij moeilijk verwerkbare mengsels tot betere resultaten kunnen leiden.

Invloed van W/C-verhouding

De invloed van de W/C-factor blijkt afhankelijk van de verdichtbaarheid van het zandtype. Bij Recycled mix leidt een hogere W/C-factor tot sterkteverlies, omdat de verdichting al optimaal is en extra water enkel de porositeit verhoogt. Bij rivierzand, mengzand, Chapyt en gerecycleerd betonzand verbetert extra water aanvankelijk de verdichting, wat resulteert in hogere sterktes. Na een bepaald punt leidt verdere waterdosering tot afnemende sterktes.

Optimalisatie van mengsels

In hoofdstuk 5 werd de mengselsamenstelling verder geoptimaliseerd.. De selectie van W/C-verhouding gebeurde via de mini-slumptest, in combinatie met visuele beoordeling van de verdichte mengselstructuur. Deze methode werd ingevoerd nadat bleek dat de vaste spreidingsdiameter uit hoofdstuk 4 mengsels met goede werkbaarheid maar beperkte vloei uitsloot.

De resultaten bevestigen dat de toegevoegde W/C_{add}-factor sterk samenhangt met de waterabsorptie van het gekozen granulaat. De sterkteontwikkeling verliep wisselend: sommige mengsels verloren sterkte na 28 dagen, vermoedelijk door de droge mengsels of onvoldoende verdichting. Dit onderstreept het belang van voldoende verwerkbaarheid en een correcte waterdosering, afgestemd op het absorptievermogen van het mengsel.

Invloed van zandfracties

De prestaties worden ook beïnvloed door de gekozen zandfracties. Een hoger aandeel Recycled mix 0/2 leidde onverwacht tot lagere sterktes, mogelijk door een ongunstige wrijvingshoekcombinatie. Recycled mix 0/3 daarentegen toonde wel de verwachte sterktetoename na 7 dagen. Mengzand leverde stabiele, zij het lagere, sterktes op. Toevoeging van Chapyt resulteerde opnieuw in een duidelijke daling van de sterkte.

Vooruitblik

Voor toekomstig onderzoek wordt aanbevolen om de effectieve W/C-factor constant te houden. Zo kunnen de resultaten uit de sterktetesten eenvoudiger en betrouwbaarder geïnterpreteerd en met elkaar vergeleken worden. Daarnaast is verder onderzoek nodig naar de fysische eigenschappen van gecombineerde mengsels, in het bijzonder de inwendige wrijvingshoek, gezien de cruciale invloed ervan verwerkbaarheid, verdichting de mate van verdichting van het mengsel en uiteindelijk de mechanische prestaties van het mengsel.

Hoofdstuk 7: Conclusies

Deze masterproef onderzocht de inzetbaarheid van gerecycleerde granulaten in traditionele, cementgebonden dekvloeren. Korrelverdelingen die binnen of in de buurt van de grenzen van TV 189 vallen, bleken gunstig voor het realiseren van een homogeen en goed verdichtbaar zandskelet. Individuele gerecycleerde granulaten voldeden doorgaans niet aan deze eisen, wat de noodzaak onderstreept van doordachte mengstrategieën om geschikte zandskeletten te vormen.

De pyknometertest en optische microscopie bleken betrouwbare methoden voor het bepalen van waterabsorptie en porositeit. De conductiviteitstest toont potentieel, maar vraagt bijkomend onderzoek voor toepassing op gerecycleerde granulaten.

Een centrale parameter in dit onderzoek is de inwendige wrijvingshoek, die via microscopische observaties onderbouwd werd. Deze inwendige wrijvingshoek speelt een belangrijke rol in zowel de verwerkbaarheid als de verdichtbaarheid van de mengsels. Een lagere wrijvingshoek bevordert de onderlinge beweeglijkheid van de korrels, wat leidt tot een betere verdichting en bijgevolg hogere sterkte-eigenschappen.

Door de verhoogde waterabsorptie van gerecycleerde granulaten blijft minder effectief water beschikbaar voor verwerkbaarheid en hydratatie. Dit vraagt om aangepaste toegevoegde water-cementfactor (W/C_{add}) en een nauwkeurige controle op de resulterende effectieve water-cementverhouding (W/C_{eff}). Deze laatste parameter maakt een eerlijke vergelijking mogelijk tussen dekvloermengsels.

Geen van de klassieke consistentietesten bleek geschikt om de werkbaarheid van dekvloermortels adequaat te voorspellen. De combinatie van een mini-slumptest met een visuele beoordeling van kegelvorm en verdichtingsstructuur leverde de meest betrouwbare resultaten, maar houdt het risico in dat mengsels te droog worden geselecteerd. De vloeitafeltest blijft inzetbaar, mits het selectiecriterium wordt afgestemd op parameters zoals de inwendige wrijvingshoek. Een goede consistentie ontstaat uit een evenwicht tussen voldoende beschikbaar water en een lage interne weerstand (lage wrijvingshoek). Deze balans is bepalend voor de verdichtbaarheid en dus ook de uiteindelijke sterkte.

Hoewel er momenteel geen gerecycleerd dekvloermengsel is dat rivierzand volledig kan vervangen, blijkt Recycled mix het meest beloftevol. Dit materiaal combineert een relatief lage waterabsorptie met een gunstige korrelvorm en goede sterkteprestaties, op voorwaarde dat de W/C-factor zorgvuldig wordt geoptimaliseerd.

Tot slot benadrukken de resultaten het belang van verder onderzoek naar de onderlinge interacties binnen gecombineerde zandmengsels. De prestaties van samengestelde mengsels zijn niet altijd voorspelbaar op basis van de individuele eigenschappen van hun componenten. Verdere modellering en validatie van invloedparameters zijn noodzakelijk om duurzame en performante toepassingen met gerecycleerde granulaten te realiseren.

Hoofdstuk 8: Toekomstig onderzoek

Tijdens de uitvoering van de proeven kwamen verschillende aandachtspunten naar voren die relevant zijn voor het testen van cementgebonden dekvloermengsels in het algemeen. Zo bleek dat de bepaling van de vloeibaarheid via de spreidingsdiameter op de vloeitafel niet altijd een betrouwbaar beeld geeft van de werkelijke consistentie. Het meten van de hoogte van de kegel na vloei (zoals toegepast in sommige varianten van de slumptest), kan een beter inzicht bieden in de vervormbaarheid en stabiliteit van het mengsel.

Voortschrijdend inzicht toont aan dat de vloei-eigenschappen nauw samenhangen met de inwendige wrijvingshoek van het zandskelet. Het is dan ook aan te bevelen dat toekomstige consistentietesten met de vloeitafel zich richten op het vastleggen van een geschikte spreidingsdiameter, afgestemd op deze parameter. Zo kan de verwerkbaarheid realistischer worden beoordeeld, in functie van de specifieke eigenschappen van het zandmengsel.

De klassieke Vebe-test bleek in zijn standaardvorm onvoldoende geschikt om de verwerkbaarheid van dekvloermengsels accuraat te karakteriseren. Een aangepaste opstelling – bijvoorbeeld met een lagere trilfrequentie en/of lichtere trillerplaat – zou de gevoeligheid van de test kunnen verbeteren, en zo meer relevante informatie opleveren over mengsels met beperkte vloei.

In hoofdstuk 5, waar dekvloermengsels op basis van gecombineerde zandsoorten weden samengesteld, blijkt het wenselijk om bij toekomstig onderzoek de effectieve W/C-factor constant te houden. Dit vereenvoudigt de interpretatie van sterkteresultaten en laat betere vergelijkingen toe tussen de verschillende samenstellingen. Bovendien blijft verdere studie naar de fysische eigenschappen van gecombineerde mengsels, waaronder de inwendige wrijvingshoek, cruciaal. Deze hoek beïnvloedt rechtstreeks de verdichtbaarheid, en dus indirect de uiteindelijke mechanische prestaties van het mengsel.

Hoewel deze masterproef zich hoofdzakelijk toespitste op de invloed van de zandsoort en de water-cementverhouding op de verwerkbaarheid en mechanische sterkte, blijven meerdere relevante onderzoeksthema's buiten beschouwing. Deze bieden waardevolle perspectieven voor toekomstig onderzoek binnen het domein van duurzame en performante dekvloertoepassingen.

Een eerste aanbeveling betreft het krimpgedrag. Krimp ten gevolge van droging vormt een belangrijke risicofactor voor scheurvorming in cementgebonden dekvloeren. De mate van krimp wordt beïnvloed door de W/C-verhouding, de korrelstructuur van het zand en de aanwezigheid van poreuze toeslagstoffen.

Daarnaast verdient de hechting tussen de dekvloer en de onderliggende constructielaag bijzondere aandacht. In de praktijk wordt de dekvloer zelden vrijliggend aangebracht, maar meestal op een draagvloer, isolatielaag of primer. De sterkte van deze interface bepaalt in belangrijke mate de duurzaamheid van het vloersysteem.

Factoren zoals oppervlakteruwheid, voorbehandeling van de ondergrond en de verwerkbaarheid van het mengsel kunnen hierbij een bepalende rol spelen.

Een derde onderzoeksrichting betreft het ontwikkelen en evalueren van gietdekvloeren of zelfnivellerende mengsels. Deze systemen vragen om een afwijkende reologie (de leer van het vloei- en vervormingsgedrag van materialen) ten opzichte van conventionele dekvloermortels en stellen andere eisen op het vlak van vloeigedrag en verwerkbaarheid. Hoewel de inzetbaarheid van gerecycleerde zandfracties in dergelijke systemen buiten de scope van dit onderzoek valt, is deze mogelijk bijzonder relevant met het oog op duurzaamheid en afwerkingskwaliteit;

Tot slot kan toekomstig onderzoek zich richten op het gebruik van chemische toevoegmiddelen, zoals superplastificeerders, luchtporiënvormers, krimpremmers of verdichtingshulpmiddelen. Deze werden in het huidige onderzoek bewust uitgesloten om de invloed van zandsoort en W/C-verhouding geïsoleerd te kunnen analyseren. In realistische toepassingen vormen ze echter essentiële instrumenten voor het optimaliseren van verwerkbaarheid, sterkte, krimpbeheersing en duurzaamheid. De interactie tussen dergelijke toevoegmiddelen en alternatieve zandtypes biedt dan ook een veelbelovende onderzoeksvraag met directe toepassing in de bouwsector.

Hoofdstuk 9: Maatschappelijke reflectie

De bouwsector staat wereldwijd voor een enorme uitdaging: het verkleinen van haar ecologische voetafdruk, terwijl de vraag naar gebouwen en infrastructuur blijft toenemen. Het *ECO2Chape*-project speelt in op deze problematiek door te streven naar een fundamentele transformatie van de vloerindustrie. Het ultieme doel is de ontwikkeling van een duurzame en circulaire dekvloer. Een sleutelrol is hierbij weggelegd voor het gebruik van gerecycleerde granulaten ter vervanging van natuurlijke grondstoffen, zoals rivier- en mengzand, die doorgaans worden gewonnen uit de Rijn.

9.1 Milieukundige impact: reductie van grondstoffen en afvalstromen

De ontginning van natuurlijk rivierzand brengt aanzienlijke ecologische schade met zich mee, waaronder erosie, verlies van biodiversiteit en verstoring van bodemstructuren. Door rivierzand gedeeltelijk of volledig te vervangen door gerecycleerde granulaten – afkomstig uit betonpuin of industriële reststromen – kan de druk op deze natuurlijke bronnen aanzienlijk worden verminderd. Tegelijkertijd krijgen bouw- en sloopmaterialen die anders zouden worden gestort, een nieuw leven binnen de bouwketen. Dit draagt rechtstreeks bij aan afvalreductie en helpt de uitstoot van broeikasgassen te beperken die gepaard gaan met afvalverbranding en transport.

9.2 Economische en maatschappelijke voordelen

Hoewel de verwerking en certificering van gerecycleerde granulaten in eerste instantie extra inspanningen vergen, creëren ze op langere termijn economische kansen. Lokale recyclagebedrijven krijgen een prominente rol in nieuwe waardeketens, terwijl de afhankelijkheid van schaarse primaire grondstoffen afneemt. Dit verhoogt de weerbaarheid van de bouwsector tegen prijsschommelingen op de wereldmarkt voor zand. Tegelijk stimuleert het gebruik van nieuwe alternatieve materialen technologische innovatie, wat bijdraagt aan nieuwe werkgelegenheid en kennisopbouw.

Ook vanuit maatschappelijk oogpunt is de inzet van gerecycleerde materialen waardevol. De maatschappelijke aanvaardbaarheid van bouwprojecten neemt toe naarmate ze milieuvriendelijk worden. ook de aanvaardbaarheid van bouwprojecten. Overheden stellen steeds strengere eisen rond duurzaamheid en verwachten van bouwheren en aannemers dat zij hun maatschappelijke verantwoordelijkheid opnemen. Door bewust te kiezen voor secundaire grondstoffen, kan de vloerindustrie zich positioneren als een koploper in duurzaam en verantwoord ondernemen.

9.3 Technische prestaties en maatschappelijke perceptie

Een vaak gehoorde bezorgdheid is dat gerecycleerde materialen zouden onderdoen voor hun natuurlijke tegenhangers. Het *ECO2Chape*-project weerlegt deze aanname door aan te tonen dat met gerecycleerde granulaten technisch volwaardige, performante dekvloeren kunnen worden gerealiseerd. Deze voldoen aan de vereisten op het vlak van mechanische sterkte, verwerkbaarheid en duurzaamheid.

Door deze prestaties wordt het negatieve stigma rond secundaire grondstoffen actief doorbroken – een cruciale stap richting brede maatschappelijke acceptatie. De toekomst van circulair bouwen hangt in belangrijke mate af van betrouwbare prestaties en duidelijke normering, die samen het vertrouwen in gerecycleerde bouwmaterialen structureel versterken.

9.4 Bijdrage aan klimaatdoelstellingen

Ten slotte levert het gebruik van gerecycleerde granulaten een aanzienlijke bijdrage aan de vermindering van de koolstofvoetafdruk van vloerconstructies. Dankzij een minder energie-intensieve productie, gereduceerde transportbehoefte en minder stortafval ontstaat een significante CO_2-reductie. In een tijd van klimaatverandering en steeds strengere emissienormen is dit geen bijkomstigheid, maar een essentiële voorwaarde voor duurzaam bouwen.

Door een concrete oplossing te bieden voor een tastbaar milieuprobleem, positioneert *ECO2Chape* zich als een relevante motor voor verandering, die rechtstreeks bijdraagt aan de klimaatdoelstellingen van België en Europa.

9.5 Conclusie

De keuze voor gerecycleerde granulaten binnen het *ECO2Chape*-project gaat verder dan louter technische innovatie - het is een maatschappelijke stap vooruit naar een duurzame en toekomstgerichte bouwsector. Het project bewijst dat prestatie en duurzaamheid elkaar niet uitsluiten, maar elkaar juist kunnen versterken. Door afvalstromen te herwaarderen en natuurlijke hulpbronnen te ontzien, toont *ECO2Chape* aan dat de vloerindustrie niet alleen kan verduurzamen, maar ook een voorbeeldfunctie kan vervullen in de bredere transitie naar een circulaire economie.

Bibliografie

Architectura. (2025). *Calciumsulfaatgebonden gietdekvloeren*. https://www.architectura.be/nl/nieuws/calciumsulfaatgebonden-gietdekvloeren-de-dekvloeren-van-de-toekomst/

BBG. (2018). *Betontechnologie*.

Benabed, B., Kadri, E. H., Azzouz, L., & Kenai, S. (2012). Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cement and Concrete Composites*, *34*(10), 1167–1173. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2012.07.007

Beton Lexicon. (2019, October 15). *Beton Lexicon*. https://www.betonlexicon.nl/M/Menggranulaat

Boehme, L., Joseph, M., Anseele, T., & Verstraete, S. (2013). *Central Europe towards Sustainable Building 2013 Low-tech and high-tech materials and technologies for sustainable buildings ASSESSMENT OF WATER REDUCING ADMIXTURE IN CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATES*.

CBR, CCB, & Holcim. (2007). *Milieuprofiel van Beton*.

Chapewerken. (2025). *Verschillende Soorten Chape*. https://chapewerken-jk.be/soorten-chape/

CHAP-YT. (2025). *CHAP-YT*. https://www.chapyt.be/2019/01/cellenbeton-recyclage.html#more

Dhir, R. K., de Brito, J., Silva, R. V., & Lye, C. Q. (2019a). Introduction. *Sustainable Construction Materials*, 1–14. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100985-7.00001-7

Dhir, R. K., de Brito, J., Silva, R. V., & Lye, C. Q. (2019b). Processing of Recycled Aggregates. *Sustainable Construction Materials*, 57–88. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100985-7.00004-2

Dirk Vinckier. (2018). *Geotechniek*.

Estephane, P., Garboczi, E. J., Bullard, J. W., & Wallevik, O. H. (2019). Three-dimensional shape characterization of fine sands and the influence of particle shape on the packing and workability of mortars. *Cement and Concrete Composites*, *97*, 125–142. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2018.12.018

gp groot. (2025). *Afval opwerken door middel van een puinbreekinstallatie Samen maken we de cirkel rond*.

Ground Cover Group B. (2023). *Wat is brekerzand en waar gebruik je het voor?* https://www.zand.nl/wat-is-brekerzand-en-waar-gebruik-je-het-voor

Habert, G., Arribe, D., Dehove, T., Espinasse, L., & Roy, R. Le. (2012). Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete: quantification of the improvement to concrete bridges. *Journal of Cleaner Production*, *35*, 250–262. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2012.05.028

Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*.

ISO 4324. (1977). *INTERNATIONAL STANDARD-INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION I MEXAYHAPOAHAfI OPI-AHW3AWII I-IO CTAHAAPTW3AIWd I ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION Surface active agents-Powders and granules-Measurement of the angle of repose Agents de surface-Poudres et granul&-Mesurage de l'angle du talus d'eboulement*.
https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/f3f8599c-8b23-471c-b054-

Kellenberger, D., & Althaus, H. J. (2009). Relevance of simplifications in LCA of building components. *Building and Environment*, *44*(4), 818–825. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2008.06.002

Kim, Y.-R., & de Souza, L. (2009). *Effects of Aggregate Angularity on Mix Design Characteristics and Pavement Performance*.

Klein, N. S., Lenz, L. A., & Mazer, W. (2020). Influence of the granular skeleton packing density on the static elastic modulus of conventional concretes. *Construction and Building Materials*, *242*, 118086. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118086

Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K. H., Haberl, H., & Fischer-Kowalski, M. (2009). Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, *68*(10), 2696–2705. https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2009.05.007

Li, Z., Liu, J., Xiao, J., & Zhong, P. (2019). A method to determine water absorption of recycled fine aggregate in paste for design and quality control of fresh mortar. *Construction and Building Materials*, *197*, 30–41. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.11.115

Minerva. (2025). *Mengzand*. https://www.satic-minera.be/producten/mengzand/

NBN EN 1097-6. (2013). *NBN EN 1097-6*. www.nbn.be

NBN EN 12350-2. (2019). *Testing fresh concrete-Part 2: Slump test*. www.nbn.be

NBN EN 12350-3. (2019). *Testing fresh concrete-Part 3: Vebe test*. www.nbn.be

NBN EN 12350-5. (2019). *Testing fresh concrete-Part 5: Flow table test*. www.nbn.be

NBN EN 12350-9. (2010). *Geregistreerde Belgische norm Normklasse: B 15*. www.nbn.be

Peter Domone, & John Illston. (2010). *Construction Materials Fourth edition*.

Ridoutt, B., & Pfister, S. (2010). A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on freshwater scarcity. *Global Environmental Change*, *20*, 113–120. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.08.003

Rodríguez-Robles, D., Van Den Heede, P., & De Belie, N. (2019). Life cycle assessment applied to recycled aggregate concrete. *New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete*, 207–256. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00009-9

Santos, A. C. P., Ortiz-Lozano, J. A., Villegas, N., & Aguado, A. (2015). Experimental study about the effects of granular skeleton distribution on the mechanical properties of self-compacting concrete (SCC). *Construction and Building Materials*, *78*, 40–49. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.01.006

Scholtès, L., Chareyre, B., Nicot, F., & Darve, F. (2009). Micromechanics of granular materials with capillary effects. *International Journal of Engineering Science*, *47*(1), 64–75. https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2008.07.002

Sosa, M. E., Carrizo, L. E., Zega, C. J., & Villagrán Zaccardi, Y. A. (2018). Water absorption of fine recycled aggregates: effective determination by a method based on electrical conductivity. *Materials and Structures*, *51*(5), 127. https://doi.org/10.1617/s11527-018-1248-2

Totaalafbouw. (2025). *Gietdekvloeren*. https://www.stuctotaalafbouw.nl/gietdekvloeren/

UGent. (2024). *ECO2Chape-project*. Https://Research.Ugent.Be/Web/Result/Project/E7405384-A17e-4999-Bb9a-06d65621fe70/Details/Nl.

Van den Heede, P. C. 002003450629 802000424816 0000-0003-1307-2831, & De Belie, N. T. 801000928732 0000-0002-0851-6242. (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations. *(2012) CEMENT & CONCRETE COMPOSITES*. http://lib.ugent.be/catalog/pug01:3047912

Van der Elstraeten, K., & Van Hecke, K. (2019). *Invloed van vezels en hulpstoffen op sterkte- en krimpeigenschappen van cementgebonden dekvloeren*. https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/785/924/RUG01-002785924_2019_0001_AC.pdf

Van Laecke, W. (1993). *TVN_189*.

Van Meirvenne, K., Boel, V., De Pauw, P., Gryspeert, T., Korte, S., & Vangheel, T. (2016). *Pocket geïsoleerde binnenvloeren*. Onbekende uitgever. http://hdl.handle.net/1854/LU-8501615

Villagrán-Zaccardi, Y., Broodcoorens, L., Heede, P., & De Belie, N. (2023). Fine Recycled Concrete Aggregates Treated by Means of Wastewater and Carbonation Pretreatment. *Sustainability*, *15*, 6386. https://doi.org/10.3390/su15086386

VITO. (2024). *Water absorption of sand by electrical conductivity method*.

Wikipedia. (2020). *Inwendige wrijvinshoek*. https://nl.wikipedia.org/wiki/Hoek_van_inwendige_wrijving

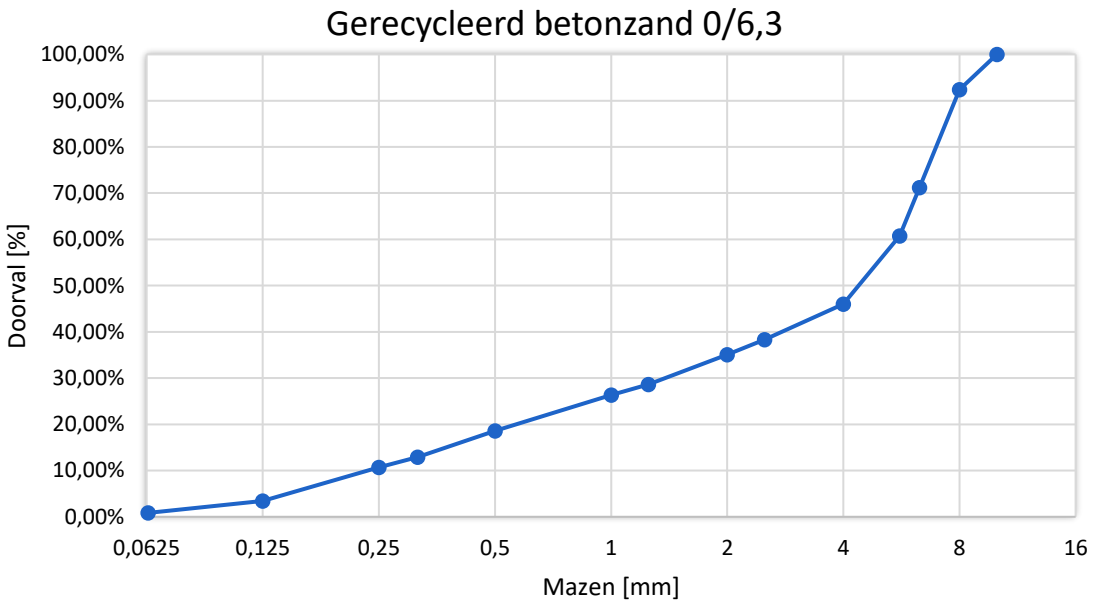
Xie, L., Li, J., & Liu, Y. (2020). Review on charging model of sand particles due to collisions. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, *10*(4), 276–285. https://doi.org/10.1016/j.taml.2020.01.047

Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., & Aranda Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, *46*(5), 1133–1140. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2010.12.002

Zandbestellen. (2025). *Rivierzand*. 2025. https://www.zandbestellen.nl/blog/rivierzand#:~:text=Rivierzand%20is%20zoet%20zand%20uit,is%20voor%20ontzettend%20veel%20toepassingen.

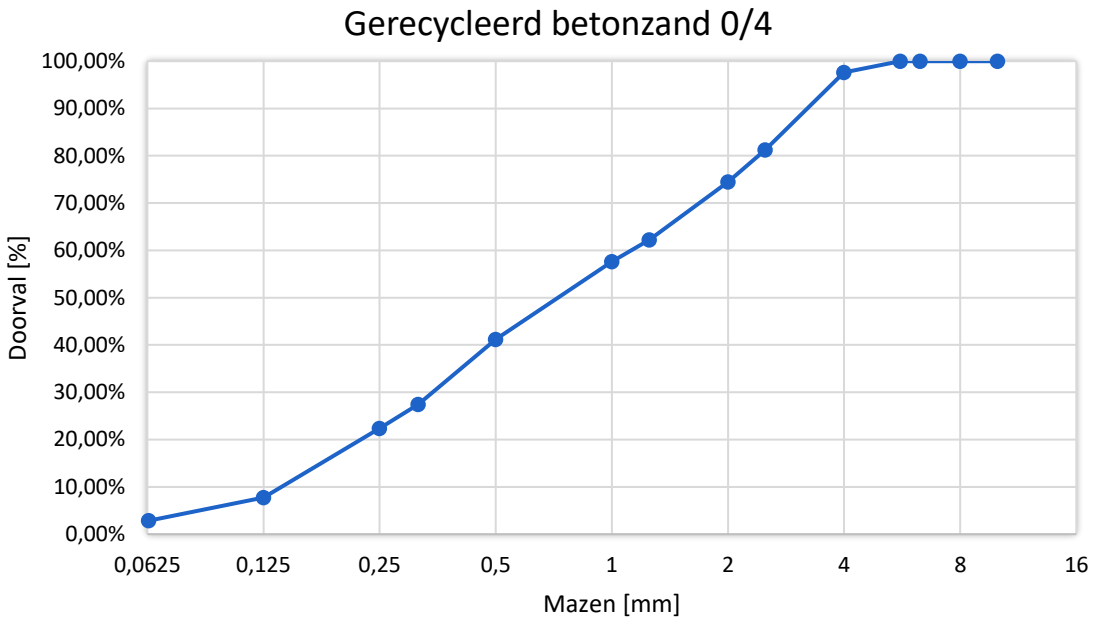
Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., & Xu, W. (2015). Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, *81*, 179–186. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.02.037

Bijlagen
Bijlage A: Zeefresultaten



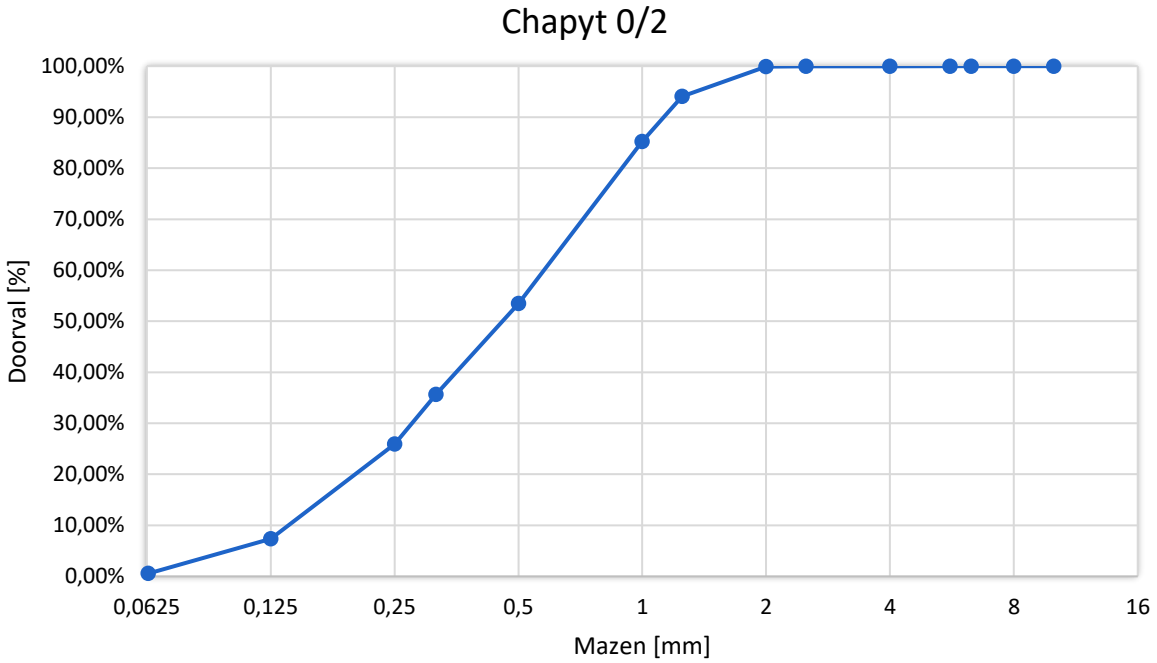
Gerecycleerd betonzand 0/6,3

Maaswijdte [mm]	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrest [%]	Gecumuleerde zeefrest [%]	Doorval [%]
10	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
8	75,6	75,6	7,57%	7,57%	92,43%
6,3	212,1	287,7	21,24%	28,82%	71,18%
5,6	104,3	392	10,45%	39,26%	60,74%
4	147,2	539,2	14,74%	54,00%	46,00%
2,5	76,5	615,7	7,66%	61,67%	38,33%
2	32,61	648,31	3,27%	64,93%	35,07%
1,25	64,11	712,42	6,42%	71,35%	28,65%
1	22,97	735,39	2,30%	73,65%	26,35%
0,5	77,38	812,77	7,75%	81,40%	18,60%
0,315	56,57	869,34	5,67%	87,07%	12,93%
0,25	22,23	891,57	2,23%	89,30%	10,70%
0,125	72,63	964,2	7,27%	96,57%	3,43%
0,063	25,87	990,07	2,59%	99,16%	0,84%
rest	8,36	998,43	0,84%	100,00%	0,00%



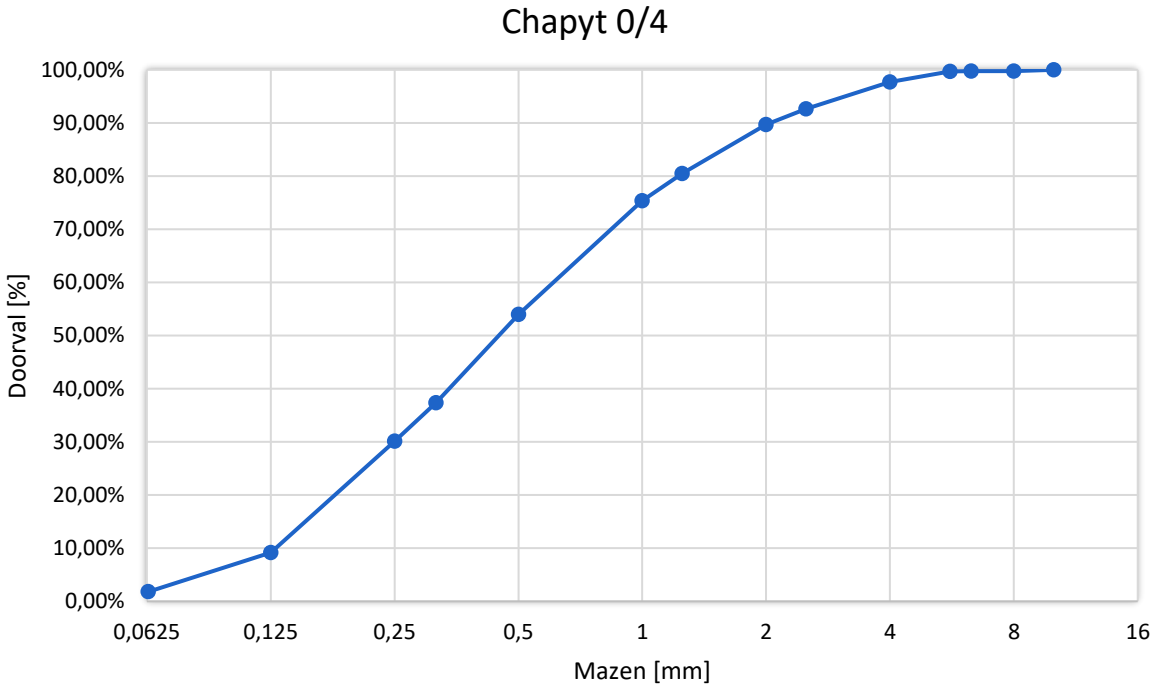
Gerecycleerd betonzand 0/4

Maaswijdte [mm]	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrest [%]	Gecumuleerde zeefrest [%]	Doorval [%]
10	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
8	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
6,3	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
5,6	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
4	147,2	147,2	24,27%	24,27%	75,73%
2,5	76,5	223,7	12,61%	36,89%	63,11%
2	32,61	256,31	5,38%	42,27%	57,73%
1,25	64,11	320,42	10,57%	52,84%	47,16%
1	22,97	343,39	3,79%	56,62%	43,38%
0,5	77,38	420,77	12,76%	69,38%	30,62%
0,315	56,57	477,34	9,33%	78,71%	21,29%
0,25	22,23	499,57	3,67%	82,38%	17,62%
0,125	72,63	572,2	11,98%	94,36%	5,64%
0,063	25,87	598,07	4,27%	98,62%	1,38%
rest	8,36	606,43	1,38%	100,00%	0,00%



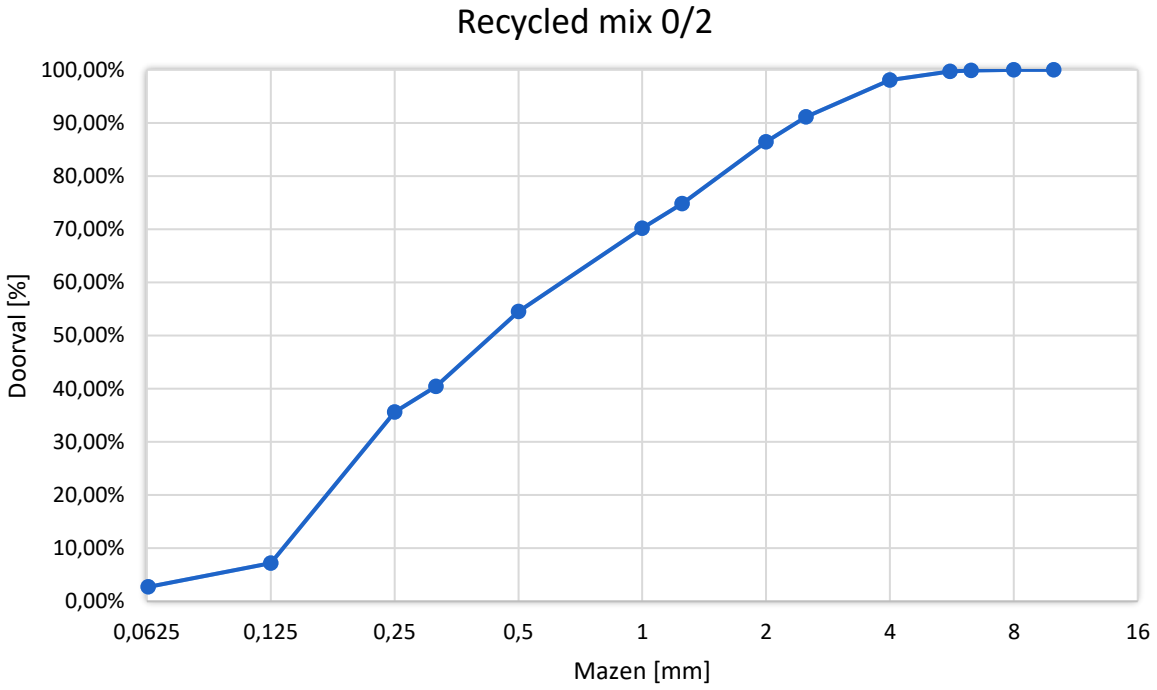
Chapyt 0/2

Maaswijdte [mm]	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrest [%]	Gecumuleerde zeefrest [%]	Doorval [%]
10	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
8	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
6,3	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
5,6	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
4	0,15	0,15	0,03%	0,03%	99,97%
2,5	0,05	0,2	0,01%	0,04%	99,96%
2	0,19	0,39	0,04%	0,08%	99,92%
1,25	28,91	29,3	5,87%	5,95%	94,05%
1	43,34	72,64	8,80%	14,76%	85,24%
0,5	156,3	228,94	31,75%	46,51%	53,49%
0,315	87,8	316,74	17,84%	64,34%	35,66%
0,25	48,06	364,8	9,76%	74,10%	25,90%
0,125	91,4	456,2	18,57%	92,67%	7,33%
0,063	33,38	489,58	6,78%	99,45%	0,55%
rest	2,7	492,28	0,55%	100,00%	0,00%



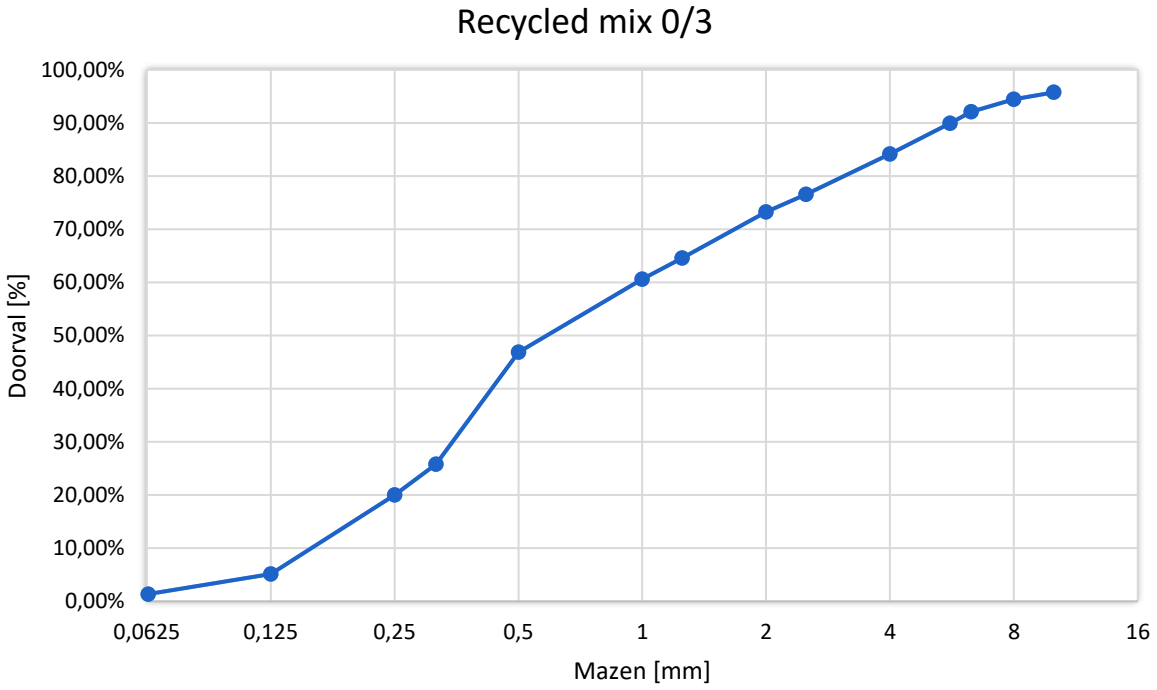
Chapyt 0/4

Maaswijdte [mm]	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrest [%]	Gecumuleerde zeefrest [%]	Doorval [%]
10	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
8	1,23	1,23	0,25%	0,25%	99,75%
6,3	0	1,23	0,00%	0,25%	99,75%
5,6	0,21	1,44	0,04%	0,29%	99,71%
4	9,7	11,14	1,97%	2,26%	97,74%
2,5	24,94	36,08	5,06%	7,32%	92,68%
2	14,78	50,86	3,00%	10,32%	89,68%
1,25	45,43	96,29	9,22%	19,54%	80,46%
1	24,98	121,27	5,07%	24,61%	75,39%
0,5	105,6	226,87	21,43%	46,04%	53,96%
0,315	81,85	308,72	16,61%	62,65%	37,35%
0,25	35,63	344,35	7,23%	69,88%	30,12%
0,125	103,3	447,65	20,96%	90,84%	9,16%
0,063	36,32	483,97	7,37%	98,21%	1,79%
rest	10,05	494,02	2,04%	100,00%	0,00%



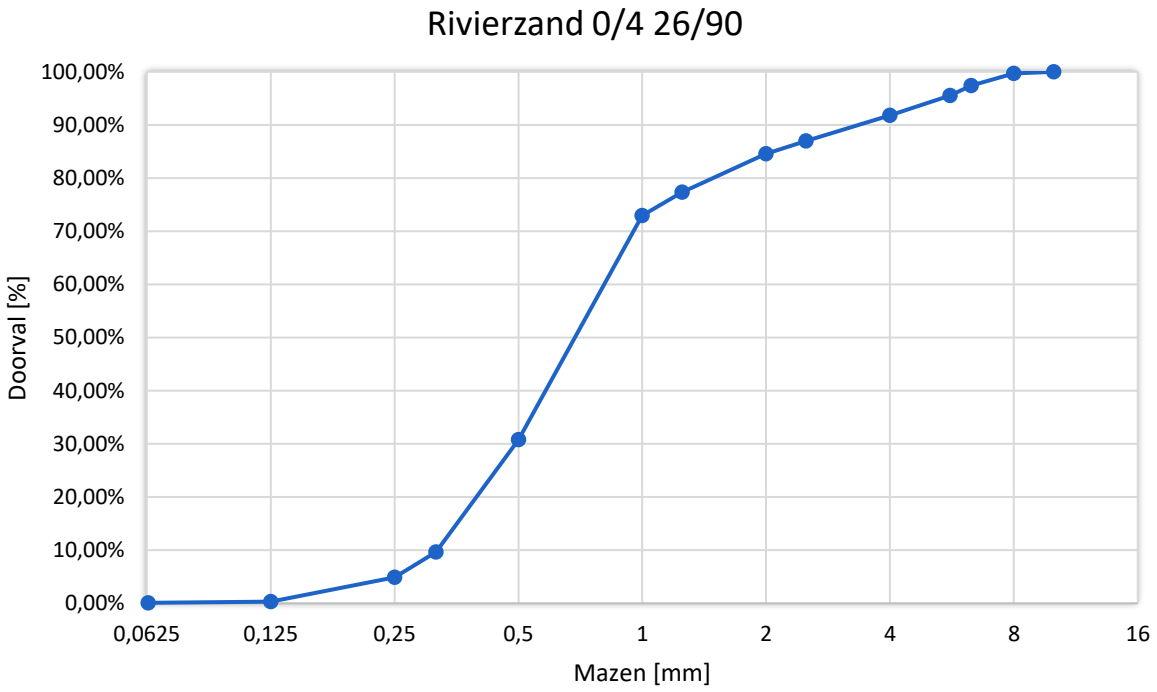
Recycled mix 0/2

Maaswijdte [mm]	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrest [%]	Gecumuleerde zeefrest [%]	Doorval [%]
10	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
8	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
6,3	1,07	1,07	0,11%	0,11%	99,89%
5,6	2,02	3,09	0,20%	0,31%	99,69%
4	15,94	19,03	1,60%	1,91%	98,09%
2,5	69,41	88,44	6,96%	8,87%	91,13%
2	46,49	134,93	4,66%	13,54%	86,46%
1,25	116,01	250,94	11,64%	25,17%	74,83%
1	46,21	297,15	4,64%	29,81%	70,19%
0,5	156,43	453,58	15,69%	45,50%	54,50%
0,315	140,21	593,79	14,07%	59,57%	40,43%
0,25	48,2	641,99	4,84%	64,40%	35,60%
0,125	283,1	925,09	28,40%	92,80%	7,20%
0,063	44,77	969,86	4,49%	97,30%	2,70%
rest	26,96	996,82	2,70%	100,00%	0,00%



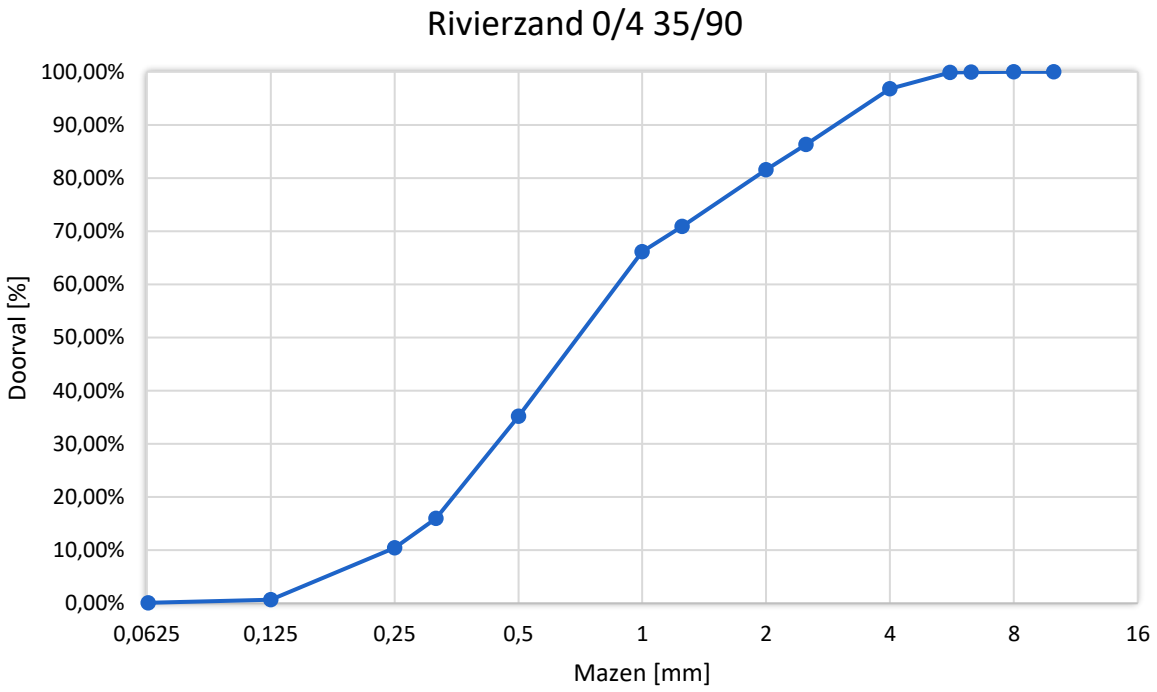
Recycled mix 0/3

Maaswijdte [mm]	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrest [%]	Gecumuleerde zeefrest [%]	Doorval [%]
10	41,95	41,95	4,24%	4,24%	95,76%
8	13,09	55,04	1,32%	5,56%	94,44%
6,3	22,75	77,79	2,30%	7,86%	92,14%
5,6	21,87	99,66	2,21%	10,07%	89,93%
4	56,88	156,54	5,75%	15,82%	84,18%
2,5	74,97	231,51	7,58%	23,40%	76,60%
2	33,17	264,68	3,35%	26,76%	73,24%
1,25	85,77	350,45	8,67%	35,43%	64,57%
1	39,29	389,74	3,97%	39,40%	60,60%
0,5	135,95	525,69	13,74%	53,14%	46,86%
0,315	208,3	733,99	21,06%	74,20%	25,80%
0,25	57,39	791,38	5,80%	80,00%	20,00%
0,125	147,1	938,48	14,87%	94,87%	5,13%
0,063	37,29	975,77	3,77%	98,64%	1,36%
rest	13,47	989,24	1,36%	100,00%	0,00%



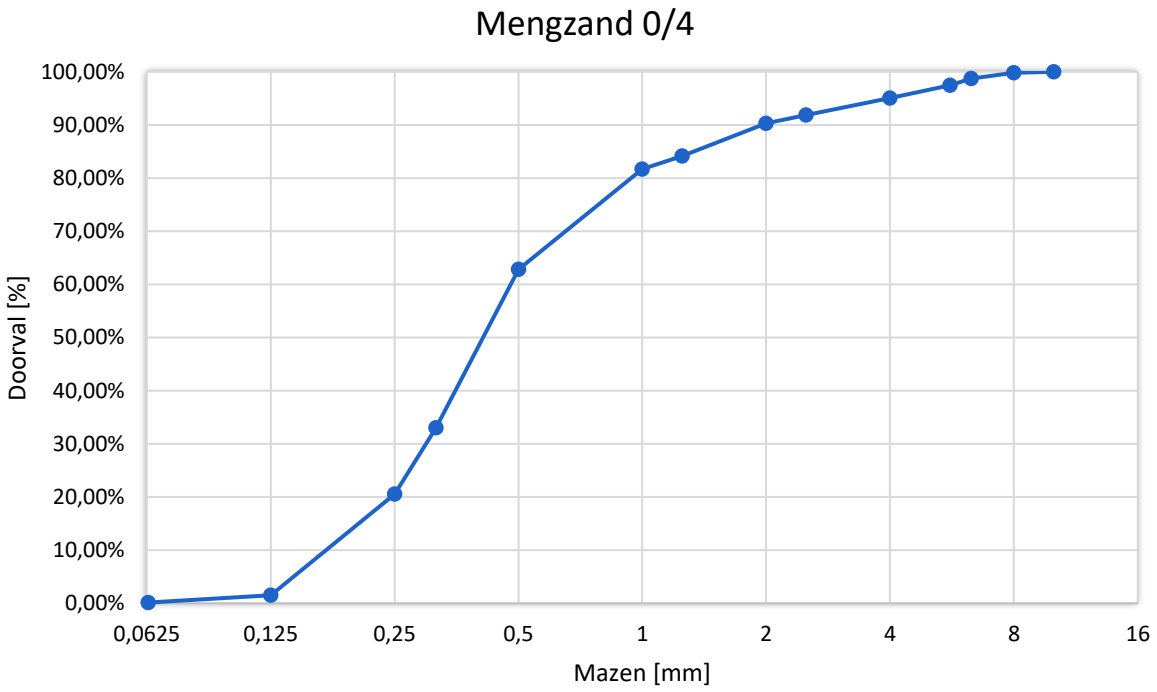
Rivierzand 0/4 26/90

Maaswijdte [mm]	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrest [%]	Gecumuleerde zeefrest [%]	Doorval [%]
10	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
8	3,23	3,23	0,32%	0,32%	99,68%
6,3	22,49	25,72	2,25%	2,58%	97,42%
5,6	18,72	44,44	1,88%	4,45%	95,55%
4	37,01	81,45	3,71%	8,16%	91,84%
2,5	48,13	129,58	4,82%	12,99%	87,01%
2	24,5	154,08	2,46%	15,44%	84,56%
1,25	71,84	225,92	7,20%	22,64%	77,36%
1	43,89	269,81	4,40%	27,04%	72,96%
0,5	420,9	690,71	42,18%	69,22%	30,78%
0,315	210,9	901,61	21,13%	90,35%	9,65%
0,25	47,82	949,43	4,79%	95,14%	4,86%
0,125	45,32	994,75	4,54%	99,68%	0,32%
0,063	2,29	997,04	0,23%	99,91%	0,09%
rest	0,87	997,91	0,09%	100,00%	0,00%



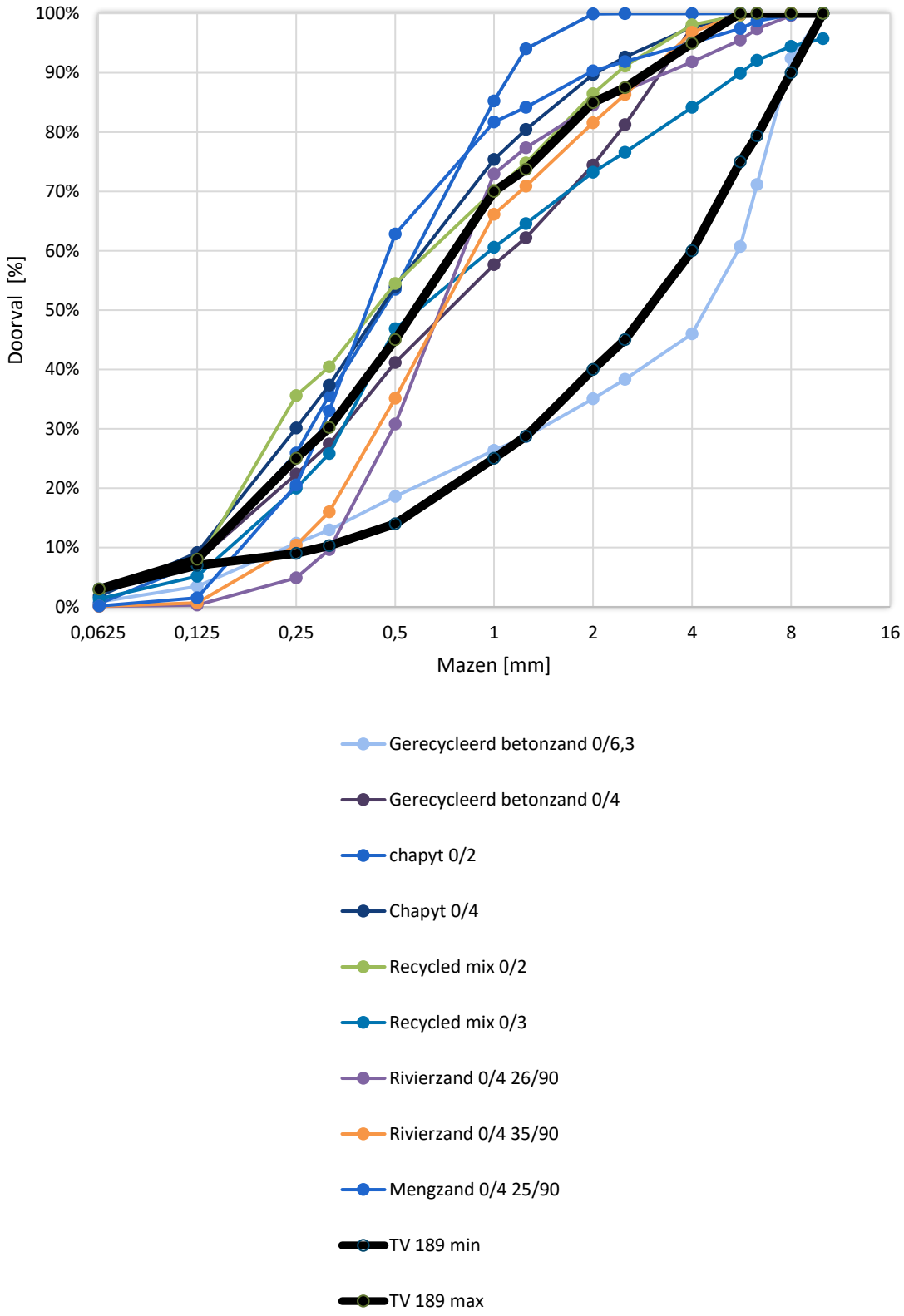
Rivierzand 0/4 35/90

Maaswijdte [mm]	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrest [%]	Gecumuleerde zeefrest [%]	Doorval [%]
10	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
8	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
6,3	0,43	0,43	0,04%	0,04%	99,96%
5,6	0,63	1,06	0,06%	0,11%	99,89%
4	30,56	31,62	3,07%	3,17%	96,83%
2,5	104,38	136	10,48%	13,66%	86,34%
2	47,5	183,5	4,77%	18,42%	81,58%
1,25	106,14	289,64	10,66%	29,08%	70,92%
1	47,7	337,34	4,79%	33,87%	66,13%
0,5	308,4	645,74	30,97%	64,84%	35,16%
0,315	191	836,74	19,18%	84,02%	15,98%
0,25	55,61	892,35	5,58%	89,60%	10,40%
0,125	97,1	989,45	9,75%	99,35%	0,65%
0,063	5,56	995,01	0,56%	99,91%	0,09%
rest	0,93	995,94	0,09%	100,00%	0,00%



Mengzand 0/4

Maaswijdte [mm]	Zeefrest [g]	Gecumuleerde zeefrest [g]	Zeefrest [%]	Gecumuleerde zeefrest [%]	Doorval [%]
10	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
8	2,05	2,05	0,21%	0,21%	99,79%
6,3	10,76	12,81	1,08%	1,29%	98,71%
5,6	12,87	25,68	1,29%	2,58%	97,42%
4	24,46	50,14	2,46%	5,04%	94,96%
2,5	31,97	82,11	3,21%	8,25%	91,75%
2	15,89	98	1,60%	9,85%	90,15%
1,25	45,98	143,98	4,62%	14,47%	85,53%
1	25,01	168,99	2,51%	16,98%	83,02%
0,5	190,8	359,79	19,17%	36,15%	63,85%
0,315	301,7	661,49	30,32%	66,47%	33,53%
0,25	125,9	787,39	12,65%	79,12%	20,88%
0,125	192,6	979,99	19,35%	98,48%	1,52%
0,063	13,73	993,72	1,38%	99,86%	0,14%
rest	1,42	995,14	0,14%	100,00%	0,00%


100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
Doorval [%]
0,0625
0,125
0,25
0,5
1
2
4
8
16
Mazen [mm]
Gerecycleerd betonzand 0/6,3
Gerecycleerd betonzand 0/4
chapyt 0/2
Chapyt 0/4
Recycled mix 0/2
Recycled mix 0/3
Rivierzand 0/4 26/90
Rivierzand 0/4 35/90
Mengzand 0/4 25/90
TV 189 min
TV 189 max

Bijlage B: Waterabsorptie in functie van de tijd

Gerecycleerd betonzand 0/4

Tijd [min]	$m_{t=X}$ [g]	$\Delta m_{geabsorptie,\ t=X}$ [g]	$WA_{5\ min}$ [%]
0	209,10	0,00	0,0
5	212,27	3,17	1,5
10	214,21	1,94	2,4
20	215,66	1,45	3,1
30	215,76	0,10	3,2
40	215,76	0,00	3,2
50	215,76	0,00	3,2
60	215,76	0,00	3,2

Chapyt 0/2

Tijd [min]	$m_{t=X}$ [g]	$\Delta m_{geabsorptie,\ t=X}$ [g]	$WA_{5\ min}$ [%]
0	207,06	0,00	0,0
5	224,32	17,26	8,3
10	231,20	6,88	11,7
20	233,96	2,76	13,0
30	234,41	0,45	13,2
40	234,41	0,00	13,2
50	234,41	0,00	13,2
60	234,41	0,00	13,2

Chapyt 0/4

Tijd [min]	$m_{t=X}$ [g]	$\Delta m_{geabsorptie,\ t=X}$ [g]	$WA_{5\ min}$ [%]
0	108,20	0,00	0,0
5	116,26	8,06	7,4
10	117,77	1,51	8,8
20	118,25	0,48	9,3
30	118,67	0,42	9,7
40	119,04	0,37	10,0
50	119,22	0,18	10,2
60	119,37	0,15	10,3

Recycled mix 0/2

Tijd [min]	$m_{t=X}$ [g]	$\Delta m_{geabsorptie,\ t=X}$ [g]	$WA_{5\ min}$ [%]
0	107,42	0,00	0,0
5	109,64	2,22	2,1
10	110,20	0,56	2,6
20	110,48	0,28	2,8
30	110,77	0,29	3,1
40	110,87	0,10	3,2
50	110,87	0,00	3,2
60	110,87	0,00	3,2

Recycled mix 0/3

Tijd [min]	$m_{t=X}$ [g]	$\Delta m_{geabsorptie,\ t=X}$ [g]	$WA_{5\ min}$ [%]
0	401,55	0,00	0,0
5	413,29	11,74	2,9
10	415,97	2,68	3,6
20	417,54	1,57	4,0
30	417,54	0,00	4,0
40	417,54	0,00	4,0
50	417,54	0,00	4,0
60	417,54	0,00	4,0

Rivierzand 0/4 26/90

Tijd [min]	$m_{t=X}$ [g]	$\Delta m_{geabsorptie,\ t=X}$ [g]	$WA_{5\ min}$ [%]
0	411,10	0,00	0,0
5	411,66	0,56	0,1
10	411,66	0,00	0,1
20	411,66	0,00	0,1
30	411,66	0,00	0,1
40	411,66	0,00	0,1
50	411,66	0,00	0,1
60	411,66	0,00	0,1

Rivierzand 0/4 35/90

Tijd [min]	$m_{t=X}$ [g]	$\Delta m_{geabsorptie,\ t=X}$ [g]	$WA_{5\ min}$ [%]
0	105,88	0,00	0,0
5	106,04	0,16	0,2
10	106,04	0,00	0,2
20	106,04	0,00	0,2
30	106,04	0,00	0,2
40	106,04	0,00	0,2
50	106,04	0,00	0,2
60	106,04	0,00	0,2

Mengzand 0/4 25/90

Tijd [min]	$m_{t=X}$ [g]	$\Delta m_{geabsorptie,\ t=X}$ [g]	$WA_{5\ min}$ [%]
0	206,66	0,00	0,0
5	206,76	0,10	0,0
10	206,76	0,00	0,0
20	206,76	0,00	0,0
30	206,76	0,00	0,0
40	206,76	0,00	0,0
50	206,76	0,00	0,0
60	206,76	0,00	0,0

Bijlage C: Conductiviteit resultaten

Gerecycleerd betonzand 0/4

Meting	Nat gewicht [g]	Droog gewicht [g]	Gewicht potje [g]	Vochtigheid	Spanning [V]	Stroom [mA]	Conductiviteit [µS/cm]	Log (conductiviteit) [µS/cm]
1	82,60	65,74	8,72	29,57%	4,58	35,60	1058,98	3,02
2	77,18	62,13	8,69	28,16%	4,36	32,80	1024,92	3,01
3	70,53	58,01	8,70	25,39%	3,99	25,60	874,12	2,94
4	71,00	59,16	8,67	23,45%	4,30	20,10	636,84	2,80
5	50,60	43,47	8,65	20,48%	4,33	13,55	426,34	2,63
6	46,48	40,90	8,73	17,35%	4,54	8,36	250,87	2,40
7	57,75	51,24	8,28	15,15%	4,60	4,44	131,50	2,12
8	61,77	55,60	8,74	13,17%	4,62	1,85	54,55	1,74
9	58,92	53,27	8,63	12,66%	4,82	1,04	29,40	1,47
10	63,47	57,83	11,79	12,25%	4,43	0,77	23,77	1,38
11	71,40	65,02	8,65	11,32%	4,47	0,71	21,64	1,34
12	46,06	42,41	8,67	10,82%	4,31	0,59	18,56	1,27
13	63,60	58,65	8,69	9,91%	4,14	0,39	12,83	1,11
14	47,18	44,07	8,63	8,78%	4,26	0,33	10,43	1,02
15	88,63	82,56	8,64	8,21%	4,36	0,29	8,91	0,95
16	98,86	92,73	8,62	7,29%	4,18	0,21	6,68	0,82
17	122,20	115,80	8,68	5,97%	3,90	0,11	3,88	0,59

Chapyt 0/2

Meting	Nat gewicht [g]	Droog gewicht [g]	Gewicht potje [g]	Vochtigheid	Spanning [V]	Stroom [mA]	Conductiviteit [µS/cm]	Log (conductiviteit) [µS/cm]
1	66,60	40,79	8,63	80,25%	4,60	65,30	1934,01	3,29
2	72,61	44,44	8,72	78,86%	4,63	52,80	1553,66	3,19
3	81,92	50,30	8,71	76,03%	4,68	47,00	1368,22	3,14
4	61,38	38,51	8,30	75,70%	4,65	43,90	1286,22	3,11
5	60,34	38,20	8,68	75,00%	4,60	41,80	1238,00	3,09
6	63,27	40,04	8,30	73,19%	4,56	39,00	1165,21	3,07
7	54,28	35,43	8,69	70,49%	4,70	29,10	843,53	2,93
8	51,87	34,45	8,71	67,68%	4,34	21,60	678,06	2,83
9	54,27	36,50	8,68	63,87%	4,44	16,60	509,36	2,71
10	59,40	40,20	8,74	61,03%	4,63	15,44	454,33	2,66
11	64,68	43,88	8,68	59,09%	4,36	12,26	383,10	2,58
12	54,23	37,82	8,62	56,20%	4,68	10,44	303,92	2,48
13	55,32	38,90	8,29	53,64%	4,77	8,23	235,06	2,37
14	42,73	31,20	8,30	50,35%	4,38	4,86	151,17	2,18
15	45,18	33,32	8,29	47,38%	4,69	3,26	94,70	1,98
16	56,75	42,37	8,70	42,71%	4,60	2,28	67,53	1,83
17	51,00	38,43	8,30	41,72%	4,47	1,05	32,00	1,51
18	50,68	38,32	8,26	41,12%	4,68	0,81	23,58	1,37
19	72,12	55,00	8,31	36,67%	4,43	0,62	18,94	1,28
20	53,50	41,16	8,29	37,54%	4,23	0,54	17,49	1,24
21	64,15	50,40	8,73	33,00%	4,56	0,45	13,30	1,12
22	58,06	45,70	8,63	33,34%	4,48	0,39	11,77	1,07
23	64,19	51,71	8,69	29,01%	4,73	0,19	5,39	0,73

Chapyt 0/4

Meting	Nat gewicht [g]	Droog gewicht [g]	Gewicht potje [g]	Vochtigheid	Spanning [V]	Stroom [mA]	Conductiviteit [µS/cm]	Log (conductiviteit) [µS/cm]
1	50,97	35,20	8,64	59,18%	4,33	23,80	748,85	2,87
2	42,28	30,17	8,73	59,38%	4,40	22,60	699,78	2,84
3	45,01	32,37	8,73	56,48%	4,40	19,48	603,17	2,78
4	39,91	29,22	8,28	53,47%	4,48	19,25	585,41	2,77
5	41,64	30,79	8,68	51,05%	4,45	15,26	467,20	2,67
6	38,12	28,49	8,30	49,07%	4,52	13,06	393,65	2,60
7	49,57	36,70	8,63	47,70%	4,63	11,45	336,92	2,53
8	44,53	33,75	8,62	45,85%	4,65	9,33	273,36	2,44
9	55,33	41,48	8,67	42,90%	4,54	6,96	208,86	2,32
10	41,72	32,26	8,72	42,21%	4,38	5,27	163,92	2,21
11	46,55	36,09	8,72	40,19%	4,47	4,18	127,40	2,11
12	43,96	34,23	8,63	38,22%	4,43	2,93	90,11	1,95
13	45,54	35,47	8,30	38,01%	4,45	2,22	67,97	1,83
14	49,19	38,33	8,31	37,06%	4,48	1,54	46,83	1,67
15	46,39	36,50	8,29	36,18%	4,42	1,17	36,06	1,56
16	82,47	63,70	8,71	35,06%	4,51	0,77	23,29	1,37
17	70,46	54,86	8,33	34,13%	4,58	0,61	18,26	1,26
18	80,09	62,78	8,27	33,53%	4,51	0,38	11,60	1,06
19	78,50	62,65	8,29	31,76%	4,38	0,21	6,59	0,82

Recycled mix 0/2

Meting	Nat gewicht [g]	Droog gewicht [g]	Gewicht potje [g]	Vochtigheid	Spanning [V]	Stroom [mA]	Conductiviteit [µS/cm]	Log (conductiviteit) [µS/cm]
1	39,70	33,93	8,70	22,87%	4,50	15,44	467,45	2,67
2	46,90	40,00	8,69	22,04%	4,27	19,80	631,74	2,80
3	35,39	30,86	8,71	20,45%	4,38	17,04	530,03	2,72
4	43,94	38,57	8,74	18,00%	4,27	11,39	363,41	2,56
5	48,45	43,00	8,40	15,75%	4,45	8,86	271,25	2,43
6	45,20	40,50	8,64	14,75%	4,44	7,05	216,33	2,34
7	49,17	44,31	8,71	13,65%	4,55	5,60	167,68	2,22
8	44,00	39,99	8,27	12,64%	4,41	3,61	111,53	2,05
9	50,89	46,49	8,77	11,66%	4,50	2,65	80,23	1,90
10	51,68	47,38	8,66	11,11%	4,50	2,09	63,28	1,80
11	59,22	54,78	11,90	10,35%	4,50	1,72	52,07	1,72
12	59,56	54,84	8,67	10,22%	4,56	1,36	40,63	1,61
13	55,12	50,84	8,63	10,14%	4,46	1,23	37,57	1,57
14	59,30	55,06	8,74	9,15%	4,52	0,99	29,84	1,47
15	66,03	61,37	8,72	8,85%	4,55	0,84	25,15	1,40
16	55,37	51,58	8,70	8,84%	4,47	0,69	21,03	1,32
17	54,37	50,91	8,69	8,20%	4,50	0,61	18,47	1,27
18	53,64	50,44	8,69	7,66%	4,56	0,56	16,73	1,22
19	47,40	44,87	8,75	7,00%	4,44	0,44	13,38	1,13
20	57,00	54,06	8,66	6,48%	4,48	0,41	12,41	1,09
21	48,81	46,70	8,66	5,55%	4,42	0,27	8,26	0,92
22	69,89	67,39	8,70	4,26%	4,25	0,14	4,42	0,65

Recycled mix 0/3

Meting	Nat gewicht [g]	Droog gewicht [g]	Gewicht potje [g]	Vochtigheid	Spanning [V]	Stroom [mA]	Conductiviteit [µS/cm]	Log (conductiviteit) [µS/cm]
1	85,91	68,76	8,67	28,54%	4,66	54,70	1599,21	3,20
2	121,94	96,92	8,71	28,36%	4,65	57,70	1690,55	3,23
3	97,87	78,90	8,75	27,04%	4,56	57,70	1723,91	3,24
4	102,60	83,03	8,71	26,33%	4,48	55,10	1675,63	3,22
5	87,38	71,32	8,90	25,73%	4,58	57,10	1698,54	3,23
6	74,84	61,70	8,75	24,82%	4,48	55,20	1678,67	3,22
7	87,52	72,76	8,81	23,08%	4,44	49,10	1506,62	3,18
8	62,56	52,85	8,73	22,01%	4,04	41,80	1409,61	3,15
9	66,04	55,63	8,74	22,20%	4,00	42,80	1457,77	3,16
10	47,43	40,61	8,30	21,11%	3,65	36,00	1343,73	3,13
11	53,99	46,75	8,67	19,01%	4,14	25,70	845,74	2,93
12	41,55	36,36	8,64	18,72%	4,45	21,60	661,30	2,82
13	35,32	31,66	8,70	15,94%	4,50	14,55	440,51	2,64
14	47,82	42,97	8,27	13,98%	4,56	5,79	172,99	2,24
15	45,63	41,47	8,65	12,68%	4,38	4,00	124,42	2,09
16	60,27	55,08	8,65	11,18%	4,38	2,84	88,34	1,95
17	61,32	56,34	8,64	10,44%	4,58	1,71	50,87	1,71
18	54,03	50,03	8,66	9,67%	4,87	1,25	34,97	1,54
19	52,71	49,27	8,74	8,49%	4,59	0,91	27,01	1,43
20	62,87	58,58	8,72	8,60%	4,17	0,84	27,44	1,44
21	57,77	54,55	8,76	7,03%	4,30	0,70	22,18	1,35
22	58,85	55,65	8,66	6,81%	4,15	0,55	17,99	1,26
23	66,00	63,54	8,68	4,48%	3,93	0,35	12,27	1,09

Rivierzand 0/4 26/90

Meting	Nat gewicht [g]	Droog gewicht [g]	Gewicht potje [g]	Vochtigheid	Spanning [V]	Stroom [mA]	Conductiviteit [µS/cm]	Log (conductiviteit) [µS/cm]
1	123,02	104,23	8,69	0,20	4,83	8,38	236,37	2,37
2	127,16	108,88	8,71	0,18	4,78	7,73	220,32	2,34
3	130,07	111,09	8,74	0,19	4,75	7,55	216,55	2,34
4	95,04	82,51	8,71	0,17	4,62	7,30	215,27	2,33
5	116,14	102,11	8,63	0,15	4,35	6,34	198,57	2,30
6	70,13	65,07	8,64	0,09	4,25	4,16	133,35	2,13
7	77,41	70,80	8,71	0,11	4,24	3,16	101,54	2,01
8	70,00	65,71	8,28	0,07	4,55	3,04	91,03	1,96
9	81,75	77,67	8,75	0,06	4,57	2,32	69,16	1,84
10	78,20	75,02	8,62	0,05	4,19	1,80	58,53	1,77
11	73,59	71,04	11,80	0,04	4,33	1,44	45,31	1,66
12	100,93	98,60	8,65	0,03	4,63	1,03	30,31	1,48
13	83,54	82,16	8,66	0,02	4,57	0,85	25,43	1,41
14	88,36	87,58	8,69	0,01	4,60	0,68	20,14	1,30
15	93,13	92,50	8,64	0,01	4,55	0,41	12,13	1,08
16	107,65	107,26	8,63	0,00	4,65	0,18	5,33	0,73
17	93,08	92,93	8,67	0,00	4,81	0,07	2,09	0,32
18	89,28	89,18	8,73	0,00	4,38	0,03	0,81	-0,09

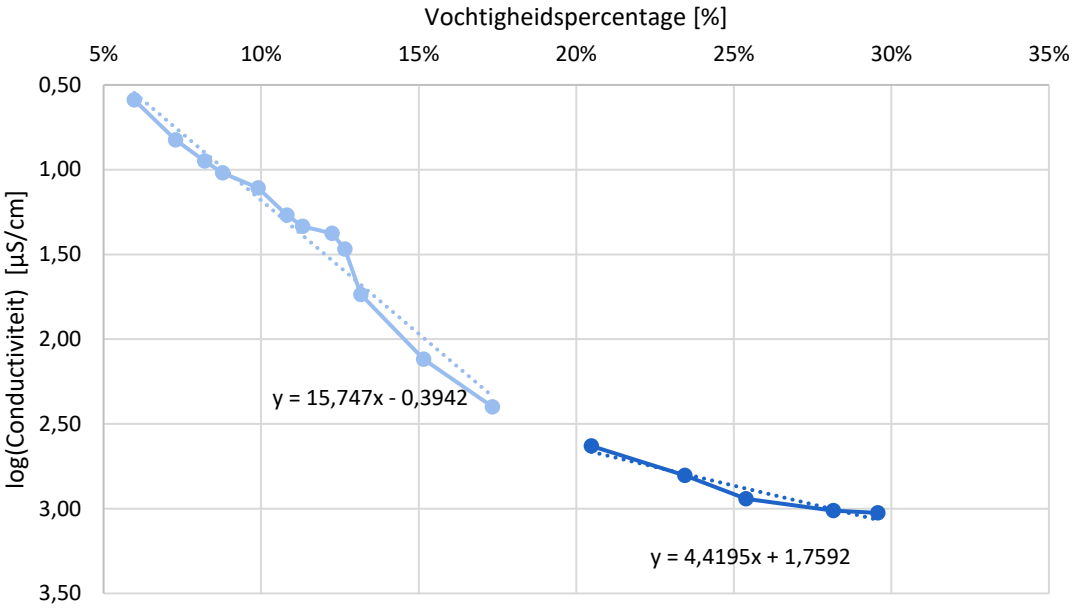
Rivierzand 0/4 35/90

Meting	Nat gewicht [g]	Droog gewicht [g]	Gewicht potje [g]	Vochtigheid	Spanning [V]	Stroom [mA]	Conductiviteit [µS/cm]	Log (conductiviteit) [µS/cm]
1	85,83	72,08	8,65	21,68%	4,87	7,54	210,93	2,32
2	56,11	47,48	8,62	22,21%	4,83	9,07	255,84	2,41
3	50,74	42,88	8,72	23,01%	4,79	10,81	307,46	2,49
4	54,39	48,93	8,70	13,57%	4,06	6,75	226,51	2,36
5	50,17	45,22	8,25	13,39%	4,24	6,00	192,79	2,29
6	53,72	49,18	8,64	11,20%	4,37	4,63	144,35	2,16
7	51,15	47,77	8,28	8,56%	4,01	3,31	112,46	2,05
8	59,00	55,61	8,68	7,22%	4,09	2,44	81,28	1,91
9	47,90	45,38	8,64	6,86%	4,23	2,02	65,06	1,81
10	46,20	44,12	8,64	5,86%	4,10	1,37	45,52	1,66
11	57,16	54,62	8,70	5,53%	4,41	1,33	41,09	1,61
12	55,99	53,79	8,69	4,88%	4,58	1,20	35,70	1,55
13	50,59	49,09	8,60	3,70%	4,64	1,07	31,42	1,50
14	50,41	49,26	8,24	2,80%	4,50	0,92	27,85	1,44
15	59,50	58,46	8,25	2,07%	4,71	0,74	21,40	1,33
16	45,76	45,19	8,27	1,54%	4,52	0,62	18,69	1,27
17	54,32	53,91	8,65	0,91%	4,37	0,30	9,35	0,97
18	61,92	61,56	8,29	0,68%	4,47	0,09	2,59	0,41
19	76,12	75,99	8,23	0,19%	3,22	0,01	0,21	-0,67

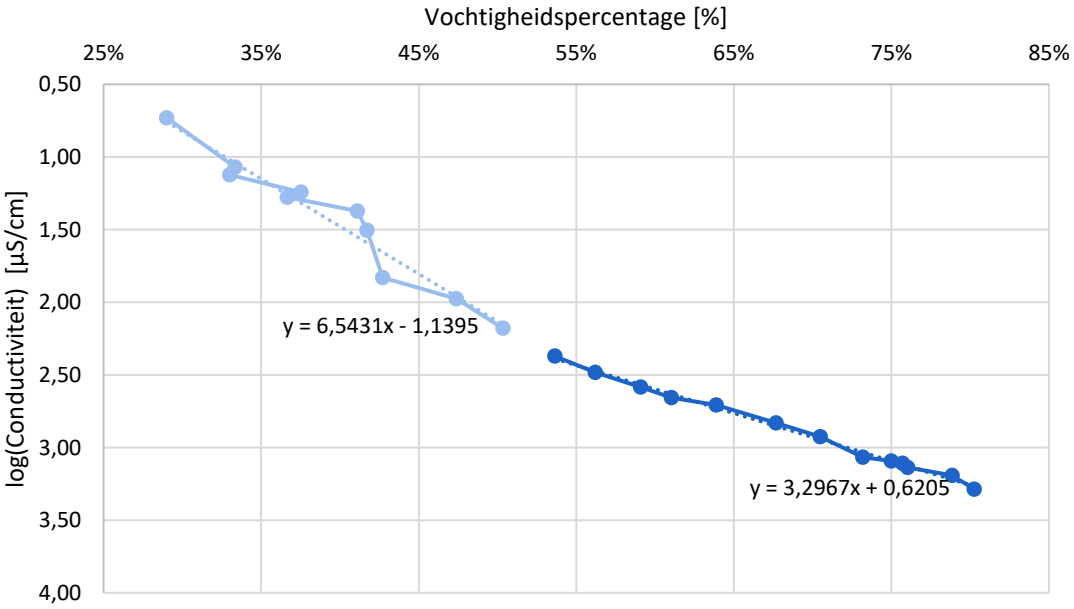
Mengzand 0/4 25/90

Meting	Nat gewicht [g]	Droog gewicht [g]	Gewicht potje [g]	Vochtigheid	Spanning [V]	Stroom [mA]	Conductiviteit [µS/cm]	Log (conductiviteit) [µS/cm]
1	97,36	83,49	8,76	0,19	4,55	23,30	697,67	2,84
2	100,64	86,13	9,21	0,19	4,61	29,00	857,04	2,93
3	83,11	73,18	8,86	0,15	4,08	26,00	868,19	2,94
4	69,74	62,68	8,67	0,13	3,88	18,48	648,89	2,81
5	71,87	65,13	8,69	0,12	3,93	15,32	531,09	2,73
6	80,66	73,74	8,30	0,11	4,05	13,45	452,45	2,66
7	78,51	72,94	8,65	0,09	4,41	9,92	306,46	2,49
8	73,20	69,34	8,64	0,06	4,56	7,35	219,60	2,34
9	78,57	75,31	8,70	0,05	4,37	5,32	165,86	2,22
10	59,90	58,14	8,70	0,04	4,35	4,17	130,60	2,12
11	84,55	83,41	8,35	0,02	4,27	2,42	77,21	1,89
12	92,33	91,66	8,71	0,01	4,75	0,90	25,81	1,41
13	75,15	74,83	8,67	0,00	4,38	0,48	14,93	1,17
14	74,26	73,99	8,66	0,00	4,42	0,32	9,86	0,99
15	100,67	100,35	8,66	0,00	4,50	0,23	6,81	0,83
16	99,78	99,57	8,26	0,00	4,42	0,12	3,64	0,56

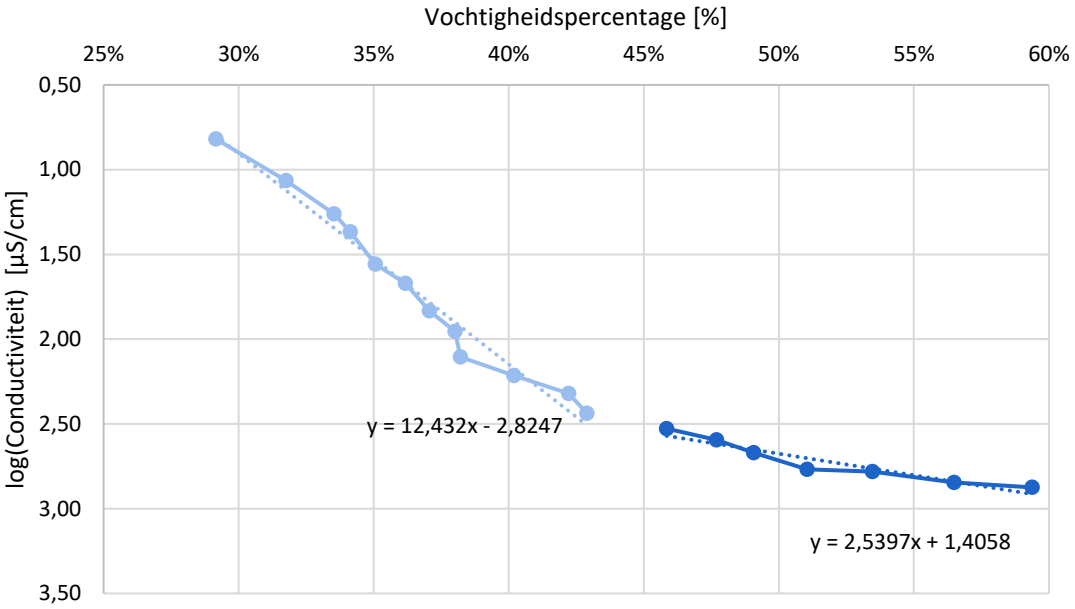
Gerecycleerd betonzand 0/4



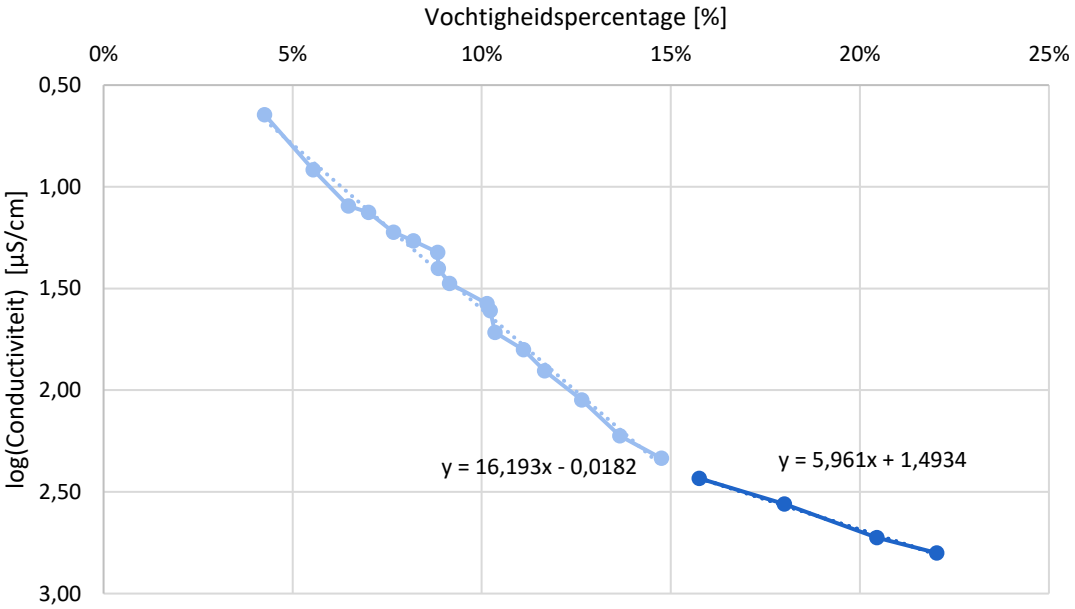
Chapyt 0/2



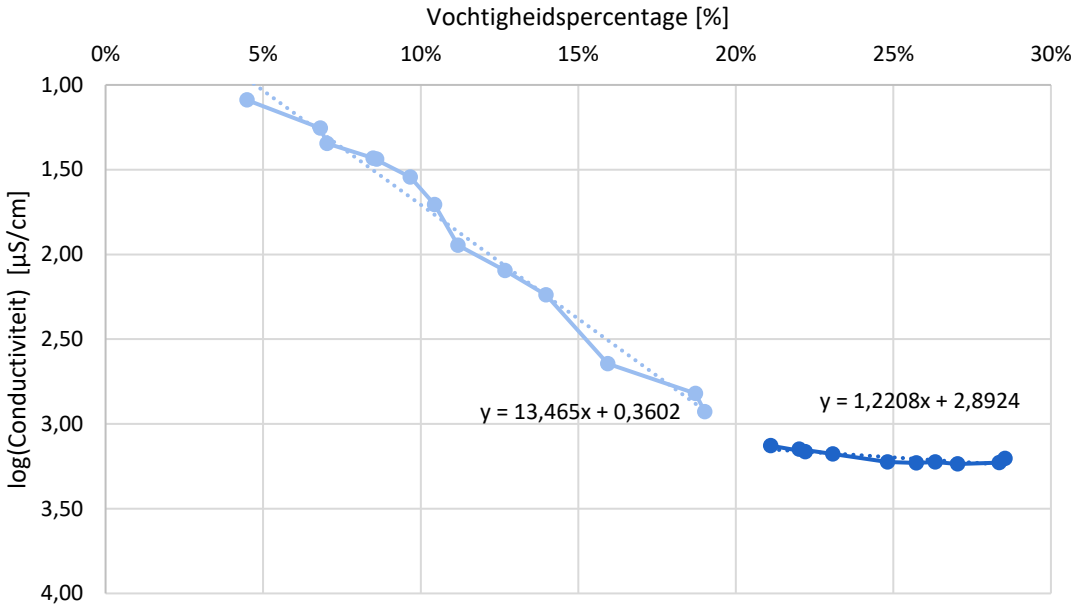
Chapyt 0/4



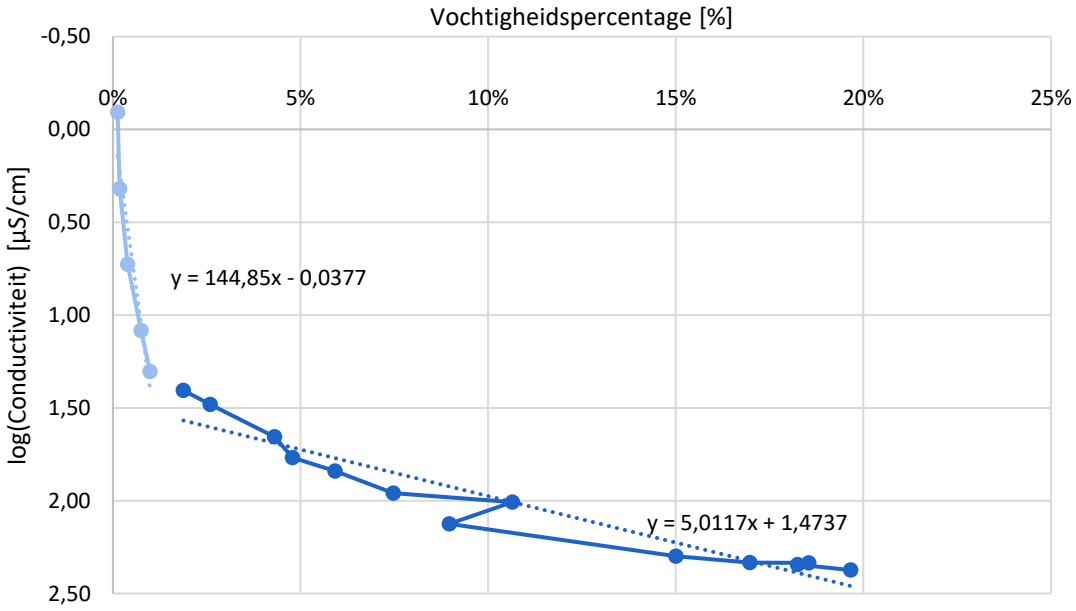
Recycled mix 0/2

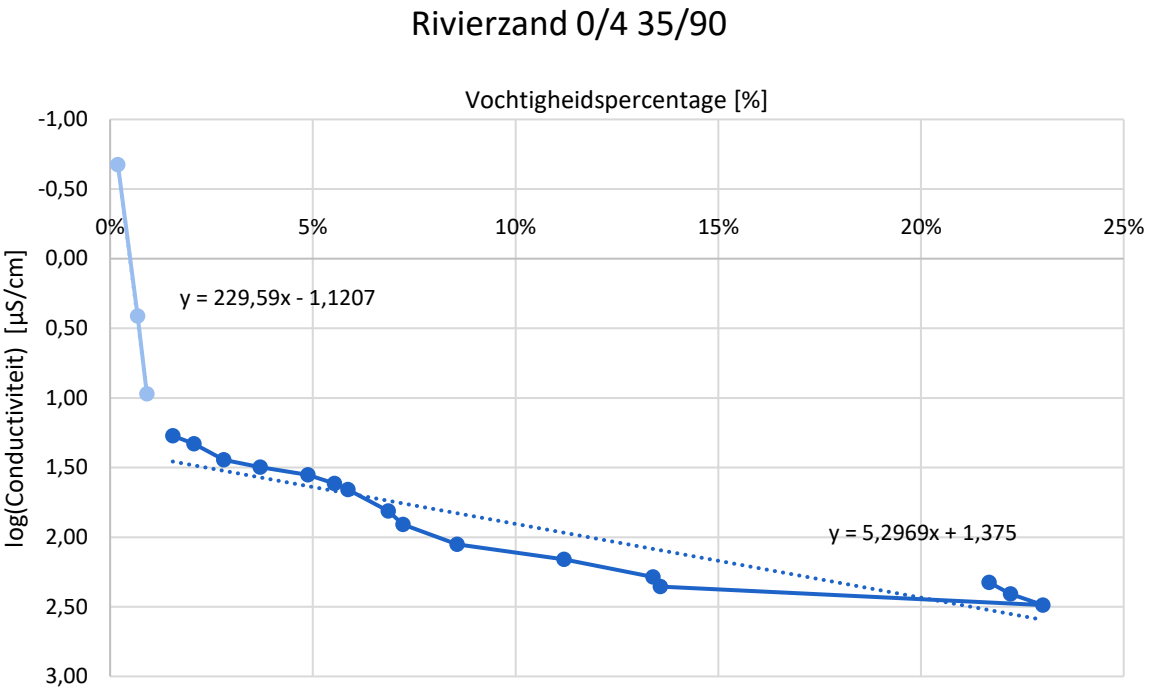


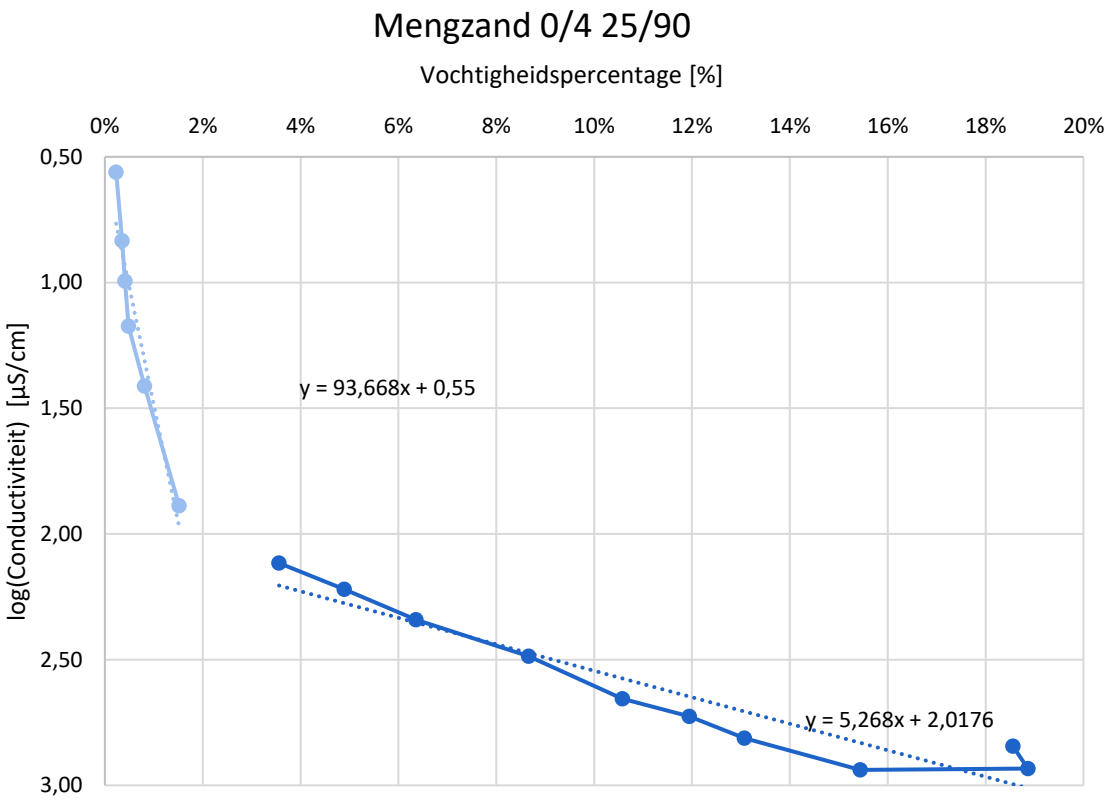
Recycled mix 0/3



Rivierzand 0/4 26/90




Rivierzand 0/4 35/90
Vochtigheidspercentage [%]
log(Conductiviteit) [µS/cm]
-1,00
-0,50
0,00
0,50
1,00
1,50
2,00
2,50
3,00
0%
5%
10%
15%
20%
25%
y = 229,59x - 1,1207
y = 5,2969x + 1,375


Mengzand 0/4 25/90
Vochtigheidspercentage [%]
log(Conductiviteit) [µS/cm]
0%
2%
4%
6%
8%
10%
12%
14%
16%
18%
20%
0,50
1,00
1,50
2,00
2,50
3,00
y = 93,668x + 0,55
y = 5,268x + 2,0176

Bijlage D: Inwendige wrijvingshoek

Gerecycleerd betonzand 0/4

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	34,00	0,60	34,22
2	32,00	0,57	32,62
3	32,00	0,57	32,62
4	33,00	0,58	33,42
5	33,00	0,58	33,42
Gemiddelde	32,80	0,58	33,26

Chapyt 0/2

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	40,00	0,67	38,66
2	38,00	0,65	37,23
3	39,00	0,66	37,95
4	38,00	0,65	37,23
5	40,00	0,67	38,66
Gemiddelde	39,00	0,66	37,95

Chapyt 0/4

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	34,00	0,60	34,22
2	36,00	0,62	35,75
3	35,00	0,61	34,99
4	35,00	0,61	34,99
5	36,00	0,62	35,75
Gemiddelde	35,20	0,61	34,99

Recycled mix 0/2

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	29,00	0,53	30,11
2	29,00	0,53	30,11
3	31,00	0,55	31,80
4	30,00	0,54	30,96
5	30,00	0,54	30,96
Gemiddelde	29,80	0,54	30,79

Recycled mix 0/3

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	26,00	0,48	27,47
2	26,00	0,48	27,47
3	26,00	0,48	27,47
4	27,00	0,50	28,37
5	25,00	0,46	26,57
Gemiddelde	26,00	0,48	27,47

Rivierzand 0/4 26/90

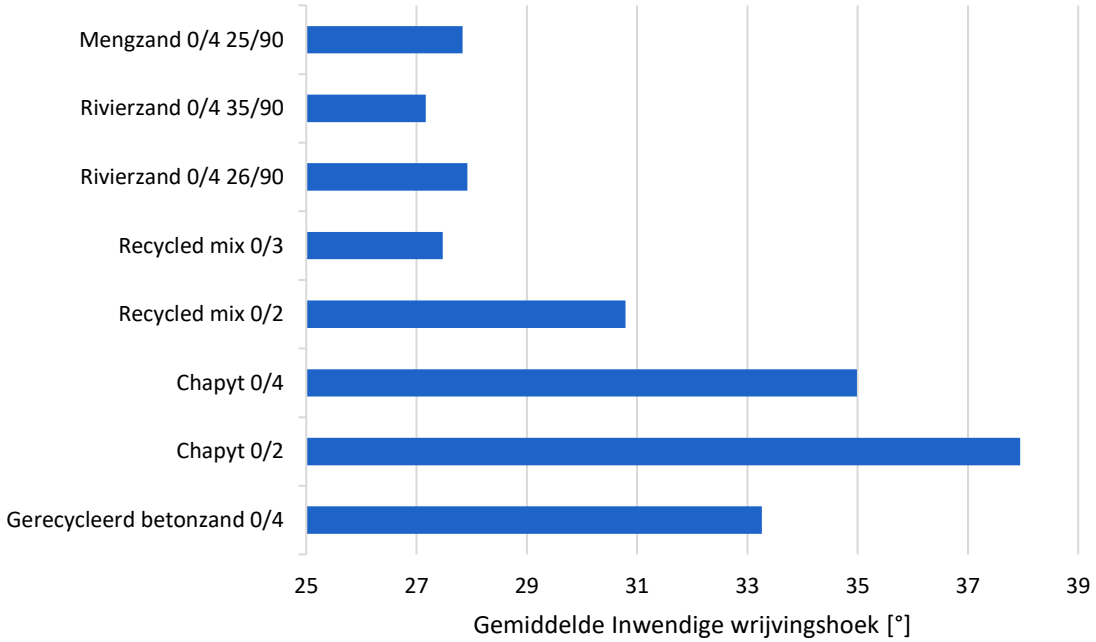
Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	27,00	0,50	28,37
2	27,00	0,50	28,37
3	25,00	0,46	26,57
4	26,00	0,48	27,47
5	27,00	0,50	28,37
Gemiddelde	26,40	0,49	27,92

Rivierzand 0/4 35/90

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	27,00	0,50	28,37
2	25,00	0,46	26,57
3	25,00	0,46	26,57
4	26,00	0,48	27,47
5	25,00	0,46	26,57
Gemiddelde	25,60	0,47	27,17

Rivierzand 0/4 35/90

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	26,00	0,48	27,47
2	27,00	0,50	28,37
3	26,00	0,48	27,47
4	26,00	0,48	27,47
5	27,00	0,50	28,37
Gemiddelde	26,40	0,49	27,83



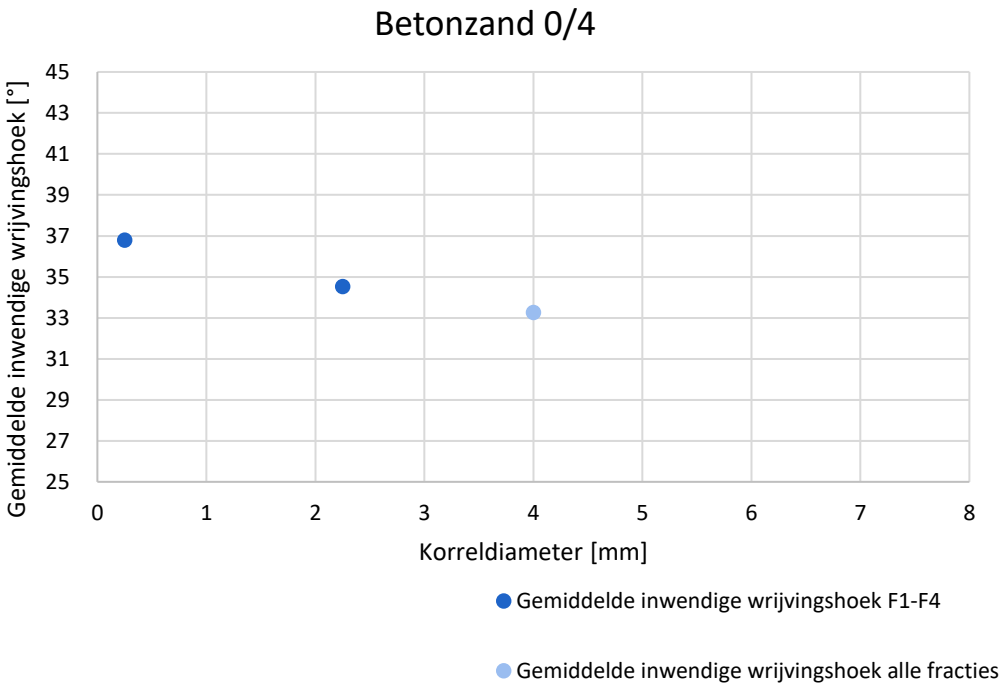
Bijlage E: Inwendige wrijvingshoek per fractie grafieken

Gerecycleerd betonzand 0/4 fractie 1

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	38,00	0,65	37,23
2	37,00	0,64	36,50
3	37,00	0,64	36,50
4	38,00	0,65	37,23
5	37,00	0,64	36,50
Gemiddelde	37,40	0,64	36,79

Gerecycleerd betonzand 0/4 fractie 2

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	27,00	0,50	28,37
2	29,00	0,53	30,11
3	27,00	0,50	28,37
4	26,00	0,48	27,47
5	27,00	0,50	28,37
Gemiddelde	34,40	0,50	28,54



Chapyt 0/2 fractie 1

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	49,00	0,78	44,42
2	46,00	0,74	42,61
3	47,00	0,75	43,23
4	48,00	0,76	43,83
5	47,00	0,75	43,23
Gemiddelde	47,40	0,76	43,46

Chapyt 0/2 fractie 2

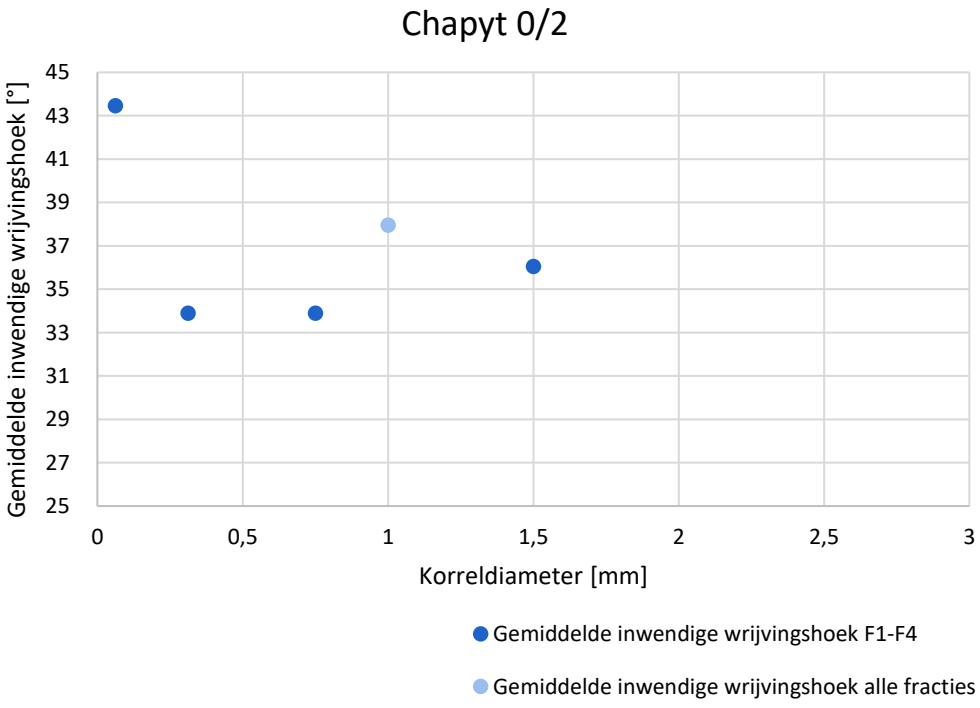
Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	33,00	0,58	33,42
2	35,00	0,61	34,99
3	33,00	0,58	33,42
4	34,00	0,60	34,22
5	33,00	0,58	33,42
Gemiddelde	33,60	0,59	33,90

Chapyt 0/2 fractie 3

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	34,00	0,60	34,22
2	34,00	0,60	34,22
3	33,00	0,58	33,42
4	34,00	0,60	34,22
5	33,00	0,58	33,42
Gemiddelde	33,60	0,59	33,90

Chapyt 0/2 fractie 4

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	36,00	0,62	35,75
2	37,00	0,64	36,50
3	36,00	0,62	35,75
4	36,00	0,62	35,75
5	37,00	0,64	36,50
Gemiddelde	36,40	0,63	36,05



Chapyt 0/4 fractie 1

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	51,00	0,80	45,57
2	47,00	0,75	43,23
3	50,00	0,79	45,00
4	49,00	0,78	44,42
5	48,00	0,76	43,83
Gemiddelde	49,00	0,78	44,41

Chapyt 0/4 fractie 2

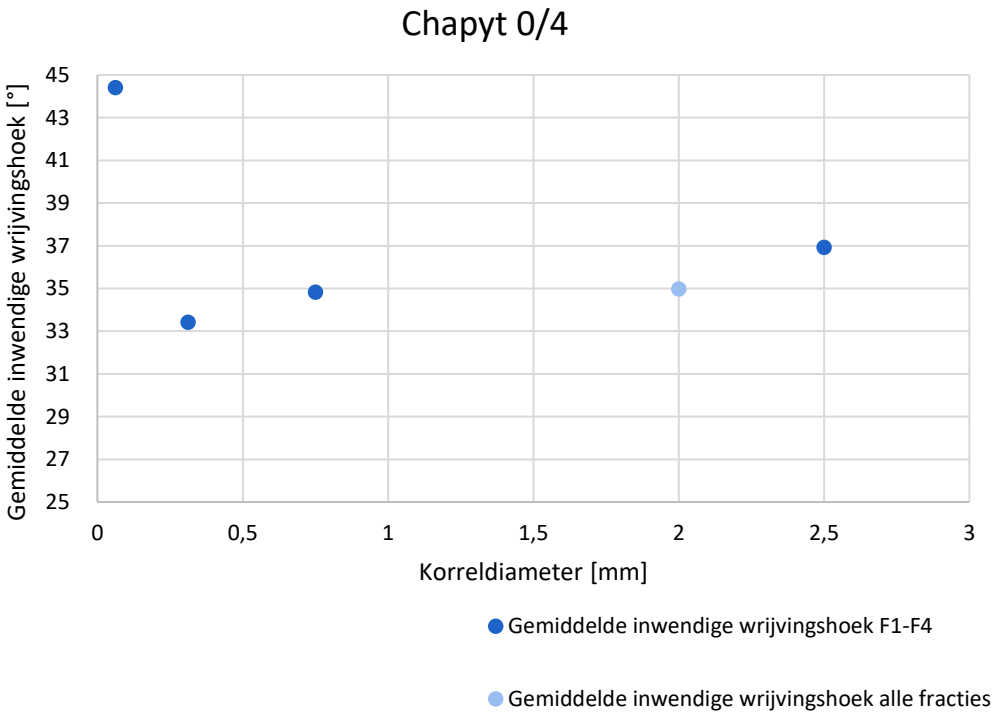
Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	34,00	0,60	34,22
2	33,00	0,58	33,42
3	33,00	0,58	33,42
4	32,00	0,57	32,62
5	33,00	0,58	33,42
Gemiddelde	33,00	0,58	33,42

Chapyt 0/4 fractie 3

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	36,00	0,62	35,75
2	35,00	0,61	34,99
3	34,00	0,60	34,22
4	35,00	0,61	34,99
5	34,00	0,60	34,22
Gemiddelde	34,80	0,61	34,83

Chapyt 0/4 fractie 4

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	39,00	0,66	37,95
2	38,00	0,65	37,23
3	36,00	0,62	35,75
4	38,00	0,65	37,23
5	37,00	0,64	36,50
Gemiddelde	37,60	0,64	36,94



Recycled mix 0/2 fractie 1

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	35,00	0,61	34,99
2	36,00	0,62	35,75
3	35,00	0,61	34,99
4	37,00	0,64	36,50
5	35,00	0,61	34,99
Gemiddelde	35,60	0,62	35,45

Recycled mix 0/2 fractie 2

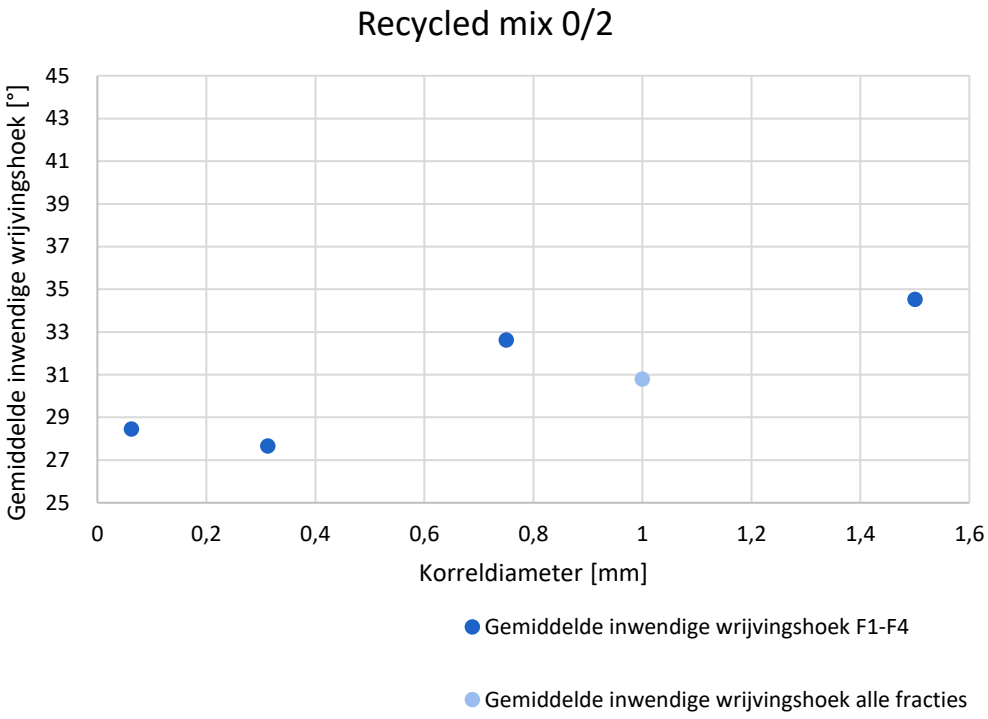
Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	27,00	0,50	28,37
2	25,00	0,46	26,57
3	26,00	0,48	27,47
4	26,00	0,48	27,47
5	27,00	0,50	28,37
Gemiddelde	26,20	0,48	27,65

Recycled mix 0/2 fractie 3

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	31,00	0,55	31,80
2	32,00	0,57	32,62
3	33,00	0,58	33,42
4	32,00	0,57	32,62
5	32,00	0,57	32,62
Gemiddelde	32,00	0,57	32,62

Recycled mix 0/2 fractie 4

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	34,00	0,60	34,22
2	35,00	0,61	34,99
3	34,00	0,60	34,22
4	35,00	0,61	34,99
5	34,00	0,60	34,22
Gemiddelde	34,40	0,60	34,53



Recycled mix 0/3 fractie 1

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	33,00	0,58	33,42
2	31,00	0,55	31,80
3	30,00	0,54	30,96
4	32,00	0,57	32,62
5	31,00	0,55	31,80
Gemiddelde	31,40	0,56	32,12

Recycled mix 0/3 fractie 2

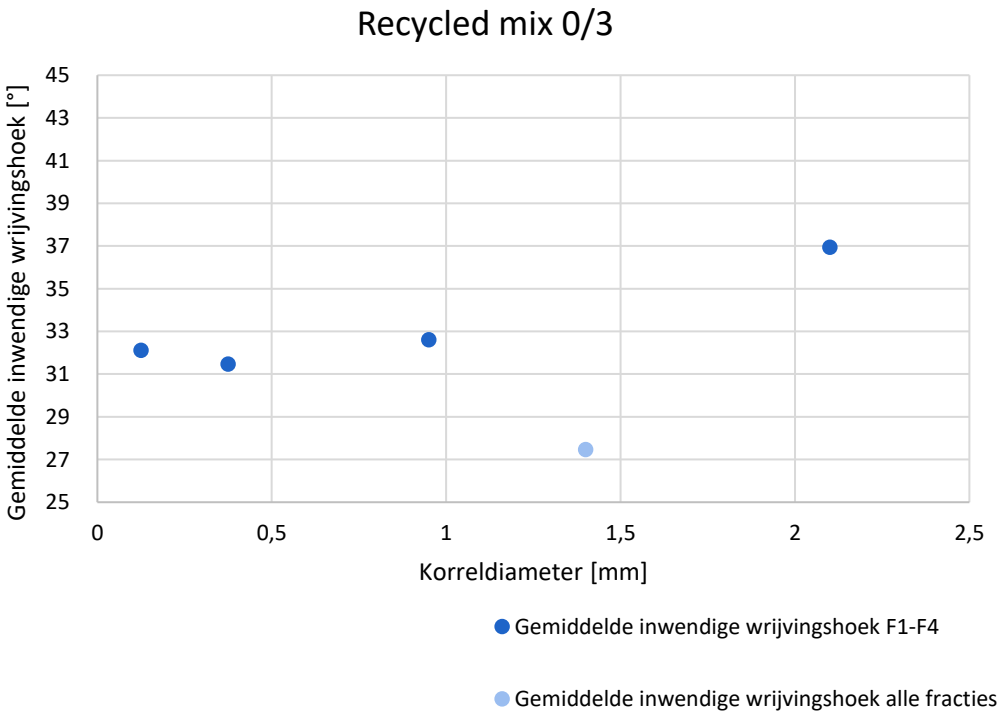
Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	31,00	0,55	31,80
2	30,00	0,54	30,96
3	31,00	0,55	31,80
4	30,00	0,54	30,96
5	31,00	0,55	31,80
Gemiddelde	30,60	0,55	31,46

Recycled mix 0/3 fractie 3

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	32,00	0,57	32,62
2	31,00	0,55	31,80
3	33,00	0,58	33,42
4	32,00	0,57	32,62
5	32,00	0,57	32,62
Gemiddelde	32,00	0,57	32,62

Recycled mix 0/2 fractie 4

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	37,00	0,64	36,50
2	38,00	0,65	37,23
3	38,00	0,65	37,23
4	38,00	0,65	37,23
5	37,00	0,64	36,50
Gemiddelde	37,60	0,64	36,94



Rivierzand 0/4 26/90 fractie 1

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	28,00	0,51	29,25
2	27,00	0,50	28,37
3	27,00	0,50	28,37
4	28,00	0,51	29,25
5	27,00	0,50	28,37
Gemiddelde	27,40	0,50	28,72

Rivierzand 0/4 26/90 fractie 2

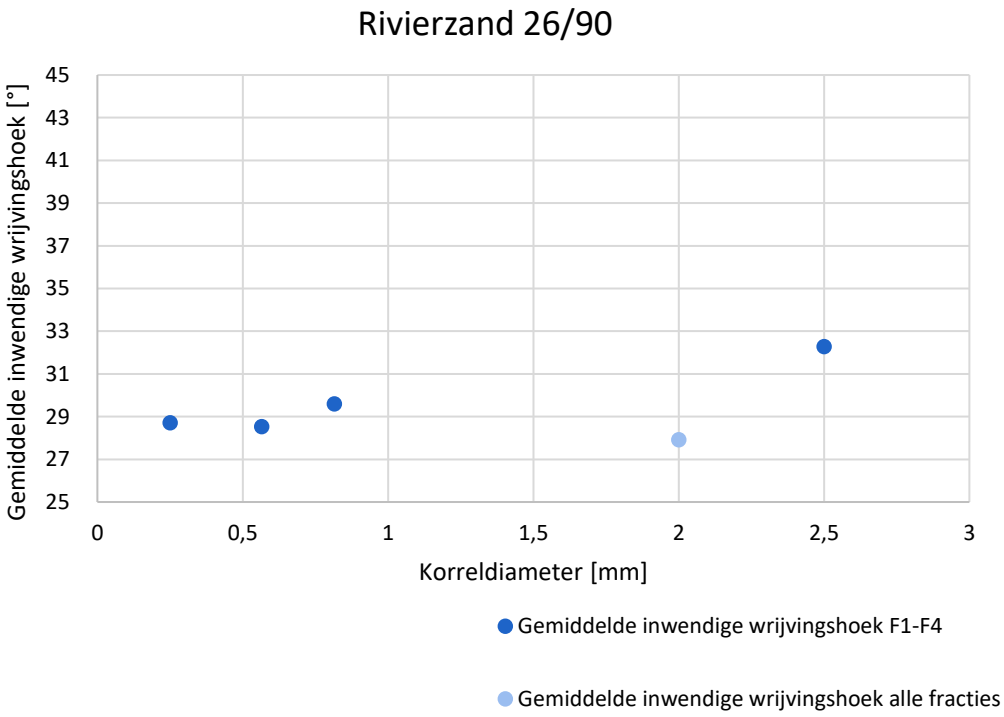
Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	27,00	0,50	28,37
2	29,00	0,53	30,11
3	27,00	0,50	28,37
4	26,00	0,48	27,47
5	27,00	0,50	28,37
Gemiddelde	27,20	0,50	28,54

Rivierzand 0/4 26/90 fractie 3

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	29,00	0,53	30,11
2	28,00	0,51	29,25
3	28,00	0,51	29,25
4	28,00	0,51	29,25
5	29,00	0,53	30,11
Gemiddelde	28,40	0,52	29,59

Rivierzand 0/4 26/90 fractie 4

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	33,00	0,58	33,42
2	32,00	0,57	32,62
3	31,00	0,55	31,80
4	30,00	0,54	30,96
5	32,00	0,57	32,62
Gemiddelde	31,60	0,56	32,29



Rivierzand 0/4 35/90 fractie 1

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	29,00	0,53	30,11
2	28,00	0,51	29,25
3	27,00	0,50	28,37
4	28,00	0,51	29,25
5	27,00	0,50	28,37
Gemiddelde	27,80	0,51	29,07

Rivierzand 0/4 35/90 fractie 2

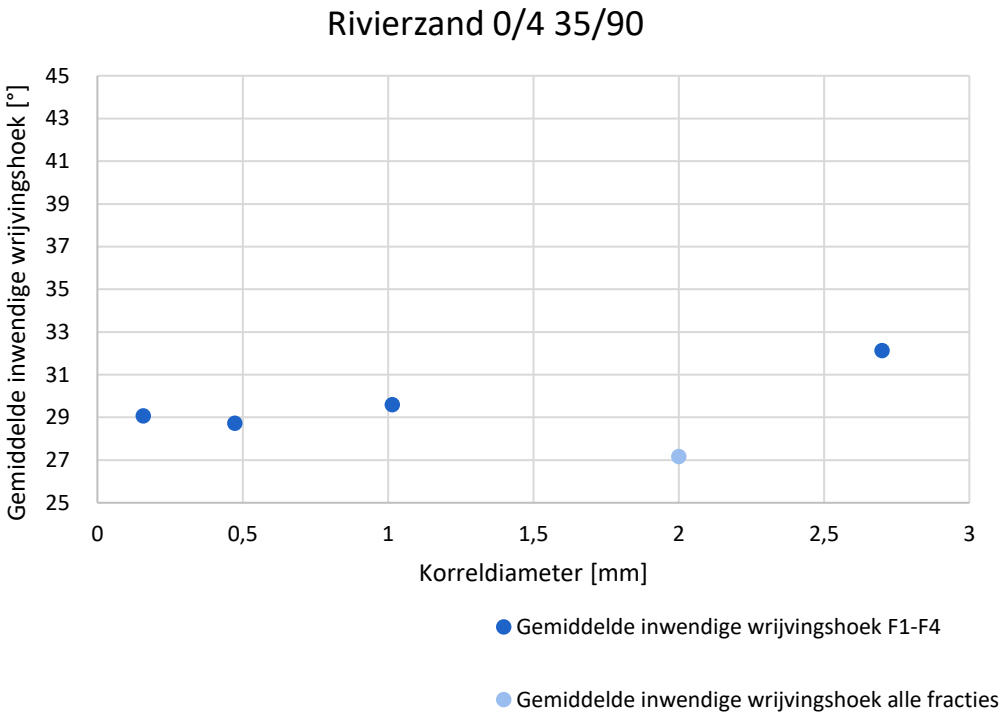
Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	28,00	0,51	29,25
2	27,00	0,50	28,37
3	26,00	0,48	27,47
4	28,00	0,51	29,25
5	28,00	0,51	29,25
Gemiddelde	27,40	0,50	28,72

Rivierzand 0/4 35/90 fractie 3

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	29,00	0,53	30,11
2	28,00	0,51	29,25
3	27,00	0,50	28,37
4	29,00	0,53	30,11
5	29,00	0,53	30,11
Gemiddelde	28,40	0,52	29,59

Rivierzand 0/4 35/90 fractie 4

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	31,00	0,55	31,80
2	32,00	0,57	32,62
3	31,00	0,55	31,80
4	31,00	0,55	31,80
5	32,00	0,57	32,62
Gemiddelde	31,40	0,56	32,13



Mengzand 0/4 25/90 fractie 1

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	28,00	0,51	29,25
2	28,00	0,51	29,25
3	29,00	0,53	30,11
4	28,00	0,51	29,25
5	28,00	0,51	29,25
Gemiddelde	28,20	0,51	29,42

Mengzand 0/4 25/90 fractie 2

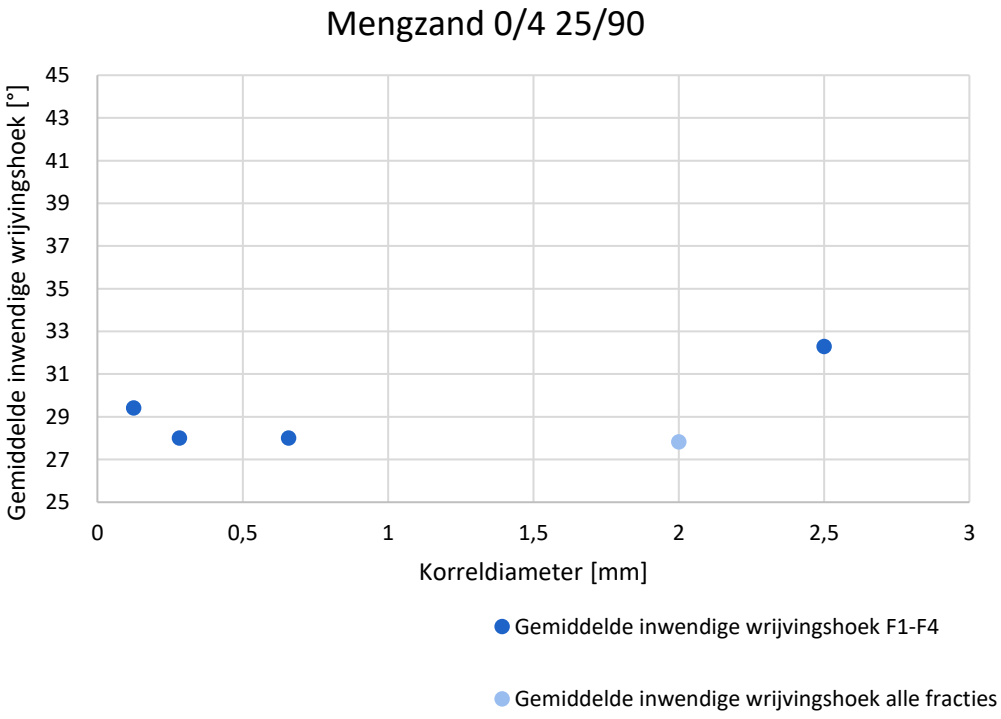
Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	26,00	0,48	27,47
2	27,00	0,50	28,37
3	27,00	0,50	28,37
4	26,00	0,48	27,47
5	27,00	0,50	28,37
Gemiddelde	26,60	0,49	28,01

Mengzand 0/4 25/90 fractie 3

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	26,00	0,48	27,47
2	27,00	0,50	28,37
3	27,00	0,50	28,37
4	26,00	0,48	27,47
5	27,00	0,50	28,37
Gemiddelde	26,60	0,49	28,01

Mengzand 0/4 25/90 fractie 4

Meting	h [mm]	φ [RAD]	φ [°]
1	32,00	0,57	32,62
2	31,00	0,55	31,80
3	32,00	0,57	32,62
4	32,00	0,57	32,62
5	31,00	0,55	31,80
Gemiddelde	31,60	0,56	32,29



Bijlage F: Technische fiche cement

Portlandcomposietcement
CEM II/C-M

Productomschrijving

Portlandcomposietcement is een grijs cement dat wordt samengesteld met de hoofdcomponenten portlandcementklinker met kalksteen en gegranuleerde hoogovenslak. Door de juiste verhouding tussen de samenstellende bestanddelen wordt, in combinatie met een bepaalde maalfijnheid, een cement vervaardigd in de sterkteklasse 32,5, met een normale beginsterkte. Portlandcomposietcement CEM II/C-M voldoet aan de eisen zoals gesteld in de Europese cementnorm EN 197-5. Deze norm geeft eisen ten aanzien van de samenstelling op bestanddelen, chemische eisen, mechanische en fysische eisen.

Samenstelling

De eisen aan de samenstelling zijn uitgedrukt in procenten ten opzichte van de som van alle hoofd- en nevenbestanddelen. Dit totaal wordt nog vermeerderd met de benodigde hoeveelheid calciumsulfaat om het bindingsgedrag te regelen.

Hoofdbestanddelen	in massa %
Portlandcementklinker (K)	50 — 64
Hoogovenslak (S) + Kalksteen (L)	36 — 50
Nevenbestanddelen	0 — 5

Mechanische en fysische eisen

De sterkteklasse van een cement bepaalt de minimale druksterkte gemeten na 28 dagen op normprisma's. Binnen zijn normsterkteklasse heeft dit cement een normale(N) beginsterkte. Het begin van de binding is een maat voor het opstijfgedrag van een cementpasta. Aan de eis van vormhoudendheid moet worden voldaan om aan te tonen dat een cementpasta niet gevoelig is voor expansie.

Sterkteklasse	Druksterkte in MPa				Begin van de binding (min)	Vormhoudendheid (mm)
	Beginsterkte		Normsterkte			
	2 dagen	7 dagen	28 dagen			
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10

Speciale eigenschappen

Cement dat voldoet aan de in EN 197-5 gestelde eisen; niet voorzien van een CE-markering. De naamgeving is afhankelijk van de norm op basis waarvan de speciale eigenschap is gecertificeerd. Heidelberg Materials brengt het volgende type Portlandcomposietcement CEM II/C-M op de markt:

CEM II/C-M(S-L) 32,5 N

Contact:

Netherlands
Tel: + 31 73 640 12 20
tv-cement-nl@heidelbergmaterials.com
cement.heidelbergmaterials.nl

Belgium
Tel. : + 32 2 678 32 11
ta-cement-be@heidelbergmaterials.com
cement.heidelbergmaterials.be

Heidelberg Materials

Portlandcomposietcement CEM II/C-M is leverbaar met de volgende certificaten:

Type cement	Certificaat		
	KOMO	BENOR	NF
	BRL 2601	PTV 603 NBN-B12	NF 002
CEM II/C-M(S-L) 32,5 N	√	√	√



Toepassingsgebied

Door het universele karakter van dit cement is het bijna overal in de bouw toe te passen. Het kan gebruikt worden bij het aanmaken van elke mortel en beton, toegepast in een niet-agressief milieu, waarvoor geen hoge aanvangssterkte of snelle ontkisting vereist is. Bij gebruik van een luchtbelvormer is het aangeraden een geschiktheidsproef uit te voeren. Voor een optimaal resultaat bij het gebruik van dit cement in mortel of beton, moeten in elk geval de gangbare regels bij het aanmaken, het verwerken en de nazorg in acht genomen worden.

Aanvullende informatie

De in dit productblad gegeven informatie is zeer algemeen en bevat de minimale eisen waaraan het cement volgens de relevante normen moet voldoen.

Heidelberg Materials produceert de in dit productblad beschreven cementen op verschillende locaties. Op aanvraag zijn er, per cementtype en per fabriek, aanvullende informatiebladen beschikbaar bij de vermelde contactgegevens.

Versie november 2023

Bijlage G: Samenstelling dekvloermengsels

Gerecycleerd betonzand 0/4

W/C_{add} [-]	m_{zand} [g]	$m_{w, tot}$ [g]	$m_{w, granulaat}$ [g]	$m_{w, reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,8	3100	450	168	282	**0,5**
0,9	3100	506	168	338	**0,6**
1,0	3100	563	168	394	**0,7**
1,1	3100	619	168	451	**0,8**
1,2	3100	675	168	507	**0,9**
1,3	3100	731	168	563	**1,0**
1,4	3100	788	168	619	**1,1**
1,5	3100	844	168	676	**1,2**
1,6	3100	900	168	732	**1,3**
1,7	3100	956	168	788	**1,4**
1,8	3100	1013	168	844	**1,5**
1,9	3100	1069	168	901	**1,6**
2,0	3100	1125	168	957	**1,7**
2,1	3100	1181	168	1013	**1,8**
2,2	3100	1238	168	1069	**1,9**
2,3	3100	1294	168	1126	**2,0**
2,4	3100	1350	168	1182	**2,1**

Chapyt 0/2

W/C_{add} [-]	M_{zand} [g]	$M_{w, tot}$ [g]	$M_{w, granulaat}$ [g]	$M_{w, reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,8	1890	450	158	292	**0,5**
0,9	1890	506	158	349	**0,6**
1,0	1890	563	158	405	**0,7**
1,1	1890	619	158	461	**0,8**
1,2	1890	675	158	517	**0,9**
1,3	1890	731	158	574	**1,0**
1,4	1890	788	158	630	**1,1**
1,5	1890	844	158	686	**1,2**
1,6	1890	900	158	742	**1,3**
1,7	1890	956	158	799	**1,4**
1,8	1890	1013	158	855	**1,5**
1,9	1890	1069	158	911	**1,6**
2,0	1890	1125	158	967	**1,7**
2,1	1890	1181	158	1024	**1,8**
2,2	1890	1238	158	1080	**1,9**
2,3	1890	1294	158	1136	**2,0**
2,4	1890	1350	158	1192	**2,1**

Chapyt 0/4

W/C_{add} [-]	M_{zand} [g]	$M_{w, tot}$ [g]	$M_{w, granulaat}$ [g]	$M_{w, reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,8	2058	450	153	297	**0,5**
0,9	2058	506	153	353	**0,6**
1,0	2058	563	153	409	**0,7**
1,1	2058	619	153	465	**0,8**
1,2	2058	675	153	522	**0,9**
1,3	2058	731	153	578	**1,0**
1,4	2058	788	153	634	**1,1**
1,5	2058	844	153	690	**1,2**
1,6	2058	900	153	747	**1,3**
1,7	2058	956	153	803	**1,4**
1,8	2058	1013	153	859	**1,5**
1,9	2058	1069	153	915	**1,6**
2,0	2058	1125	153	972	**1,7**
2,1	2058	1181	153	1028	**1,8**
2,2	2058	1238	153	1084	**1,9**
2,3	2058	1294	153	1140	**2,0**
2,4	2058	1350	153	1197	**2,1**

Recycled mix 0/2

W/C_{add} [-]	M_{zand} [g]	$M_{w, tot}$ [g]	$M_{w, granulaat}$ [g]	$M_{w, reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,8	3103	450	64	386	**0,7**
0,9	3103	506	64	442	**0,8**
1,0	3103	563	64	498	**0,9**
1,1	3103	619	64	555	**1,0**
1,2	3103	675	64	611	**1,1**
1,3	3103	731	64	667	**1,2**
1,4	3103	788	64	723	**1,3**
1,5	3103	844	64	780	**1,4**
1,6	3103	900	64	836	**1,5**
1,7	3103	956	64	892	**1,6**
1,8	3103	1013	64	948	**1,7**
1,9	3103	1069	64	1005	**1,8**
2,0	3103	1125	64	1061	**1,9**
2,1	3103	1181	64	1117	**2,0**
2,2	3103	1238	64	1173	**2,1**
2,3	3103	1294	64	1230	**2,2**
2,4	3103	1350	64	1286	**2,3**

Recycled mix 0/3

W/C_{add} [-]	M_{zand} [g]	$M_{w, tot}$ [g]	$M_{w, granulaat}$ [g]	$M_{w, reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,8	3060	450	89	361	**0,6**
0,9	3060	506	89	417	**0,7**
1,0	3060	563	89	473	**0,8**
1,1	3060	619	89	529	**0,9**
1,2	3060	675	89	586	**1,0**
1,3	3060	731	89	642	**1,1**
1,4	3060	788	89	698	**1,2**
1,5	3060	844	89	754	**1,3**
1,6	3060	900	89	811	**1,4**
1,7	3060	956	89	867	**1,5**
1,8	3060	1013	89	923	**1,6**
1,9	3060	1069	89	979	**1,7**
2,0	3060	1125	89	1036	**1,8**
2,1	3060	1181	89	1092	**1,9**
2,2	3060	1238	89	1148	**2,0**
2,3	3060	1294	89	1204	**2,1**
2,4	3060	1350	89	1261	**2,2**

Rivierzand 0/4 26/90

W/C_{add} [-]	M_{zand} [g]	$M_{w, tot}$ [g]	$M_{w, granulaat}$ [g]	$M_{w, reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,8	4246	450	6	444	**0,8**
0,9	4246	506	6	500	**0,9**
1,0	4246	563	6	557	**1,0**
1,1	4246	619	6	613	**1,1**
1,2	4246	675	6	669	**1,2**
1,3	4246	731	6	725	**1,3**
1,4	4246	788	6	782	**1,4**
1,5	4246	844	6	838	**1,5**
1,6	4246	900	6	894	**1,6**
1,7	4246	956	6	950	**1,7**
1,8	4246	1013	6	1007	**1,8**
1,9	4246	1069	6	1063	**1,9**
2,0	4246	1125	6	1119	**2,0**
2,1	4246	1181	6	1175	**2,1**
2,2	4246	1238	6	1232	**2,2**
2,3	4246	1294	6	1288	**2,3**
2,4	4246	1350	6	1344	**2,4**

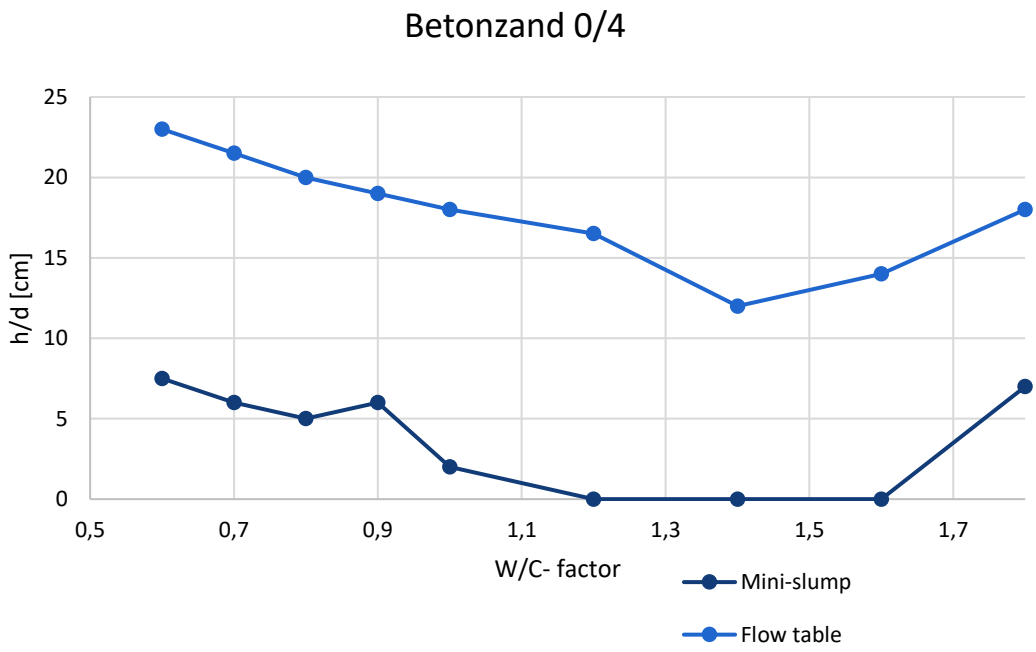
Rivierzand 0/4 35/90

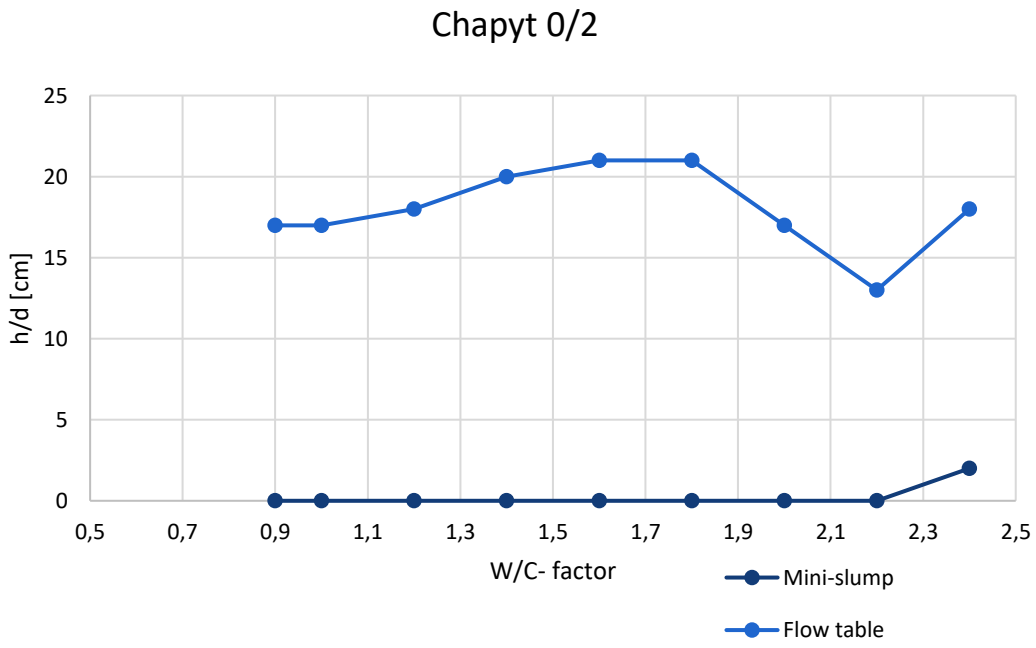
W/C_{add} [-]	M_{zand} [g]	$M_{w, tot}$ [g]	$M_{w, granulaat}$ [g]	$M_{w, reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,8	4262	450	6	444	**0,8**
0,9	4262	506	6	500	**0,9**
1,0	4262	563	6	556	**1,0**
1,1	4262	619	6	612	**1,1**
1,2	4262	675	6	669	**1,2**
1,3	4262	731	6	725	**1,3**
1,4	4262	788	6	781	**1,4**
1,5	4262	844	6	837	**1,5**
1,6	4262	900	6	894	**1,6**
1,7	4262	956	6	950	**1,7**
1,8	4262	1013	6	1006	**1,8**
1,9	4262	1069	6	1062	**1,9**
2,0	4262	1125	6	1119	**2,0**
2,1	4262	1181	6	1175	**2,1**
2,2	4262	1238	6	1231	**2,2**
2,3	4262	1294	6	1287	**2,3**
2,4	4262	1350	6	1344	**2,4**

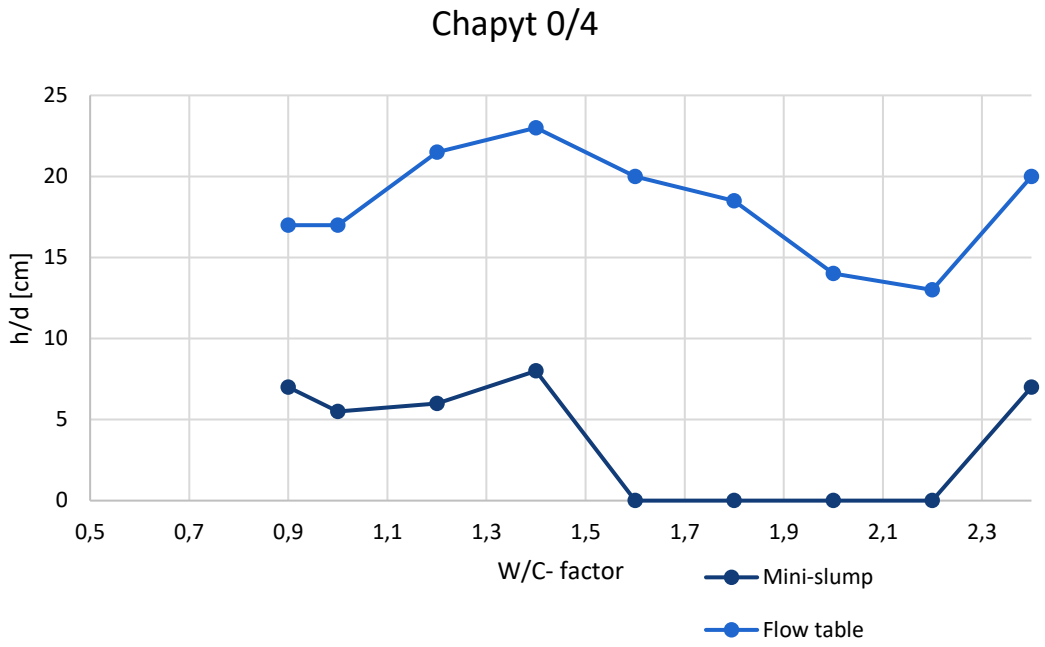
Mengzand 0/4 25/90

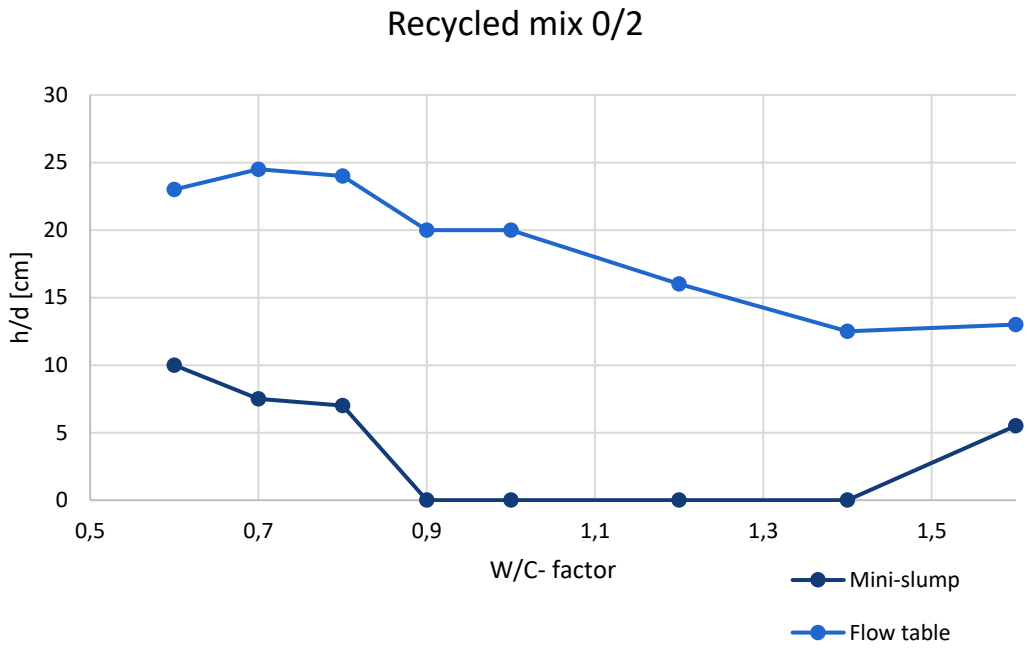
W/C_{add} [-]	M_{zand} [g]	$M_{w, tot}$ [g]	$M_{w, granulaat}$ [g]	$M_{w, reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,8	4080	450	2	448	**0,8**
0,9	4080	506	2	504	**0,9**
1,0	4080	563	2	561	**1,0**
1,1	4080	619	2	617	**1,1**
1,2	4080	675	2	673	**1,2**
1,3	4080	731	2	729	**1,3**
1,4	4080	788	2	786	**1,4**
1,5	4080	844	2	842	**1,5**
1,6	4080	900	2	898	**1,6**
1,7	4080	956	2	954	**1,7**
1,8	4080	1013	2	1011	**1,8**
1,9	4080	1069	2	1067	**1,9**
2,0	4080	1125	2	1123	**2,0**
2,1	4080	1181	2	1179	**2,1**
2,2	4080	1238	2	1236	**2,2**
2,3	4080	1294	2	1292	**2,3**
2,4	4080	1350	2	1348	**2,4**

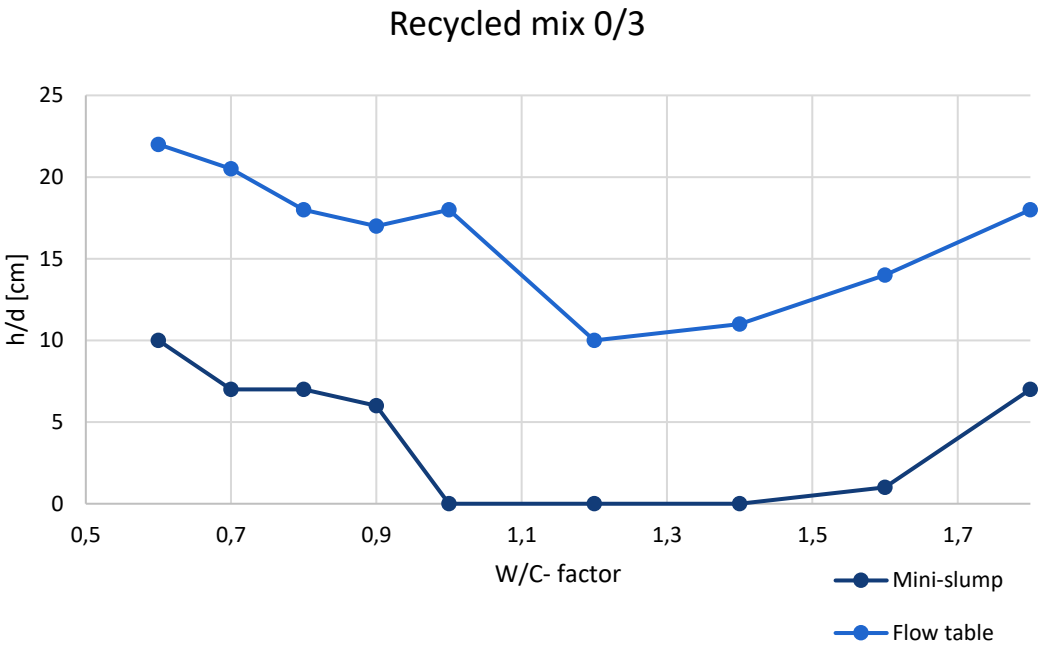
Bijlage H: Mini-slump en Flow table

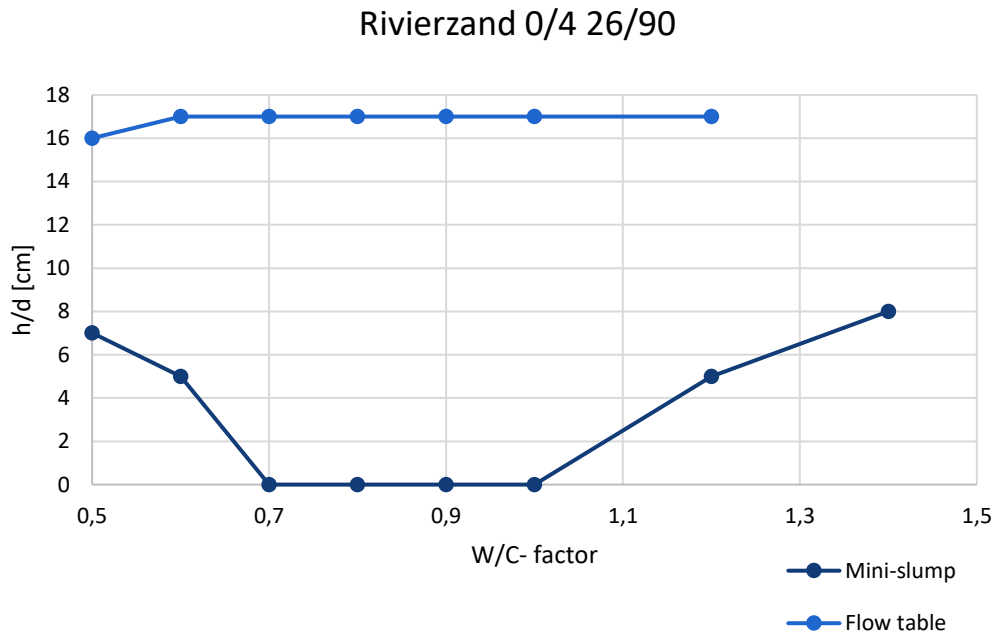


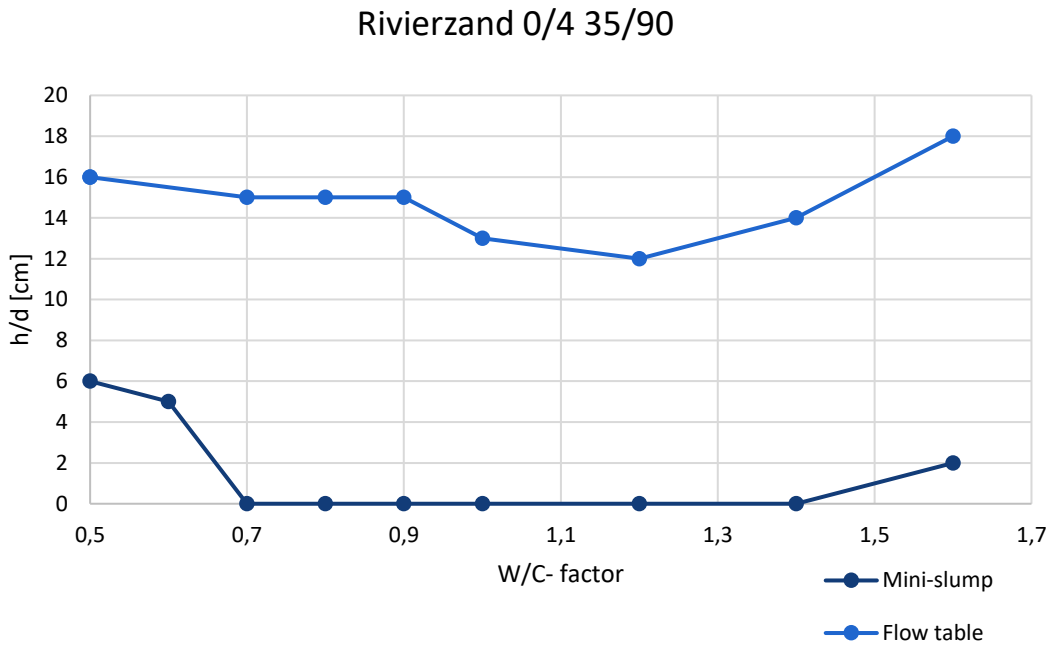


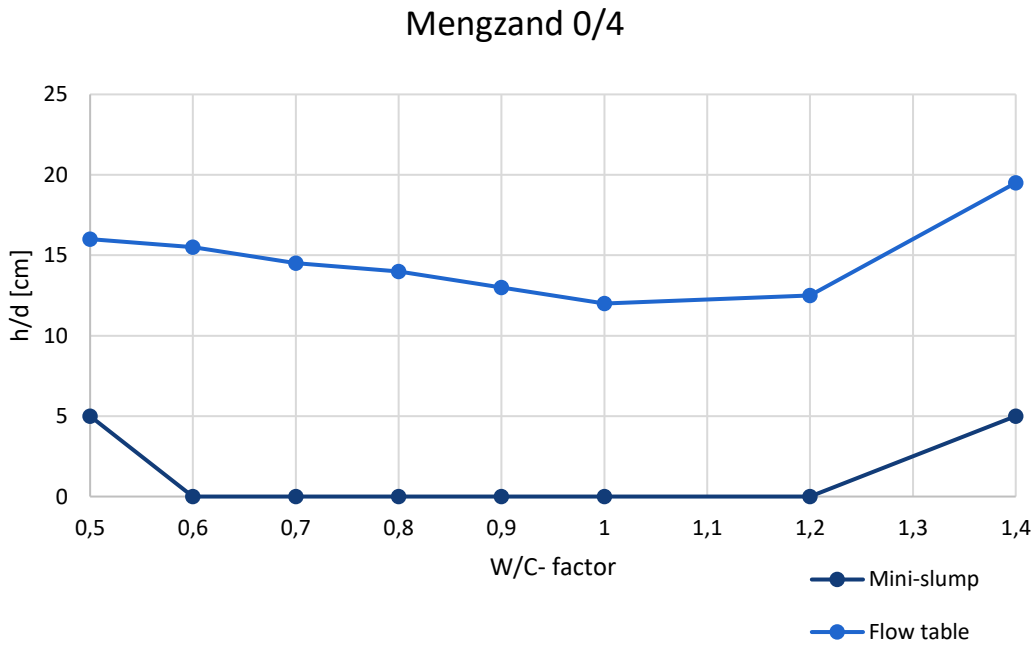

Chapyt 0/4
25
20
15
10
5
0
h/d [cm]
0,5
0,7
0,9
1,1
1,3
1,5
1,7
1,9
2,1
2,3
W/C- factor
Mini-slump
Flow table


Recycled mix 0/2
30
25
20
15
10
5
0
h/d [cm]
0,5
0,7
0,9
1,1
1,3
1,5
W/C- factor
Mini-slump
Flow table


Recycled mix 0/3
25
20
15
10
5
0
h/d [cm]
0,5
0,7
0,9
1,1
1,3
1,5
1,7
W/C- factor
Mini-slump
Flow table


Rivierzand 0/4 26/90
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
h/d [cm]
0,5
0,7
0,9
1,1
1,3
1,5
W/C- factor
Mini-slump
Flow table


Rivierzand 0/4 35/90
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
h/d [cm]
0,5
0,7
0,9
1,1
1,3
1,5
1,7
W/C- factor
Mini-slump
Flow table


Mengzand 0/4
25
20
15
10
5
0
h/d [cm]
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1
1,1
1,2
1,3
1,4
W/C- factor
Mini-slump
Flow table

Bijlage I: Sterktetesten dekvloermengsels

Gerecycleerd betonzand 0/4 W/C_{eff} 0,9 na 7 dagen

	Proefstuk 1	Proefstuk 2	Proefstuk 3
Lengte [mm]	160,14	160,11	159,92
Hoogte 1 [mm]	39,66	39,40	39,68
Hoogte 2 [mm]	39,66	39,68	39,65
Gemiddelde hoogte [mm]	39,66	39,54	39,67
Breedte 1 [mm]	38,72	38,06	39,84
Breedte 2[mm]	39,70	38,97	39,87
Gemiddelde breedte [mm]	39,21	38,52	39,86
Gewicht [g]	387,9	379,4	375,7
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1558	1556	1486
Buigkracht [kN]	0,13	0,14	0,13
Buigsterkte [N/mm²]	0,30	0,35	0,30
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,3	
Drukkracht 1 [kN]	1,36	1,74	0,54
Oppervlakte 1 [mm²]	1548,80	1522,40	1593,60
Spanning 1 [N/mm²]	0,88	1,14	0,34
Drukkracht 2 [kN]	1,33	0,65	1,50
Oppervlakte 2 [mm²]	1588,00	1558,80	1594,80
Spanning 2 [N/mm²]	0,84	0,42	0,94
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		0,8	

Gerecycleerd betonzand 0/4 W/C_{eff} 1,3 na 7 dagen

	Proefstuk 1	Proefstuk 2	Proefstuk 3
Lengte [mm]	159,14	159,05	159,97
Hoogte 1 [mm]	39,79	40,23	39,82
Hoogte 2 [mm]	40,03	39,81	39,79
Gemiddelde hoogte [mm]	39,91	40,02	39,81
Breedte 1 [mm]	41,24	40,00	39,95
Breedte 2[mm]	40,93	40,15	40,27
Gemiddelde breedte [mm]	41,09	40,08	40,11
Gewicht [g]	441,58	431,99	428,9
	387,9	379,4	375,7
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1692	1694	1679
Buigkracht [kN]	0,39	0,36	0,40
Buigsterkte [N/mm²]	0,89	0,85	0,95
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,9	
Drukkracht 1 [kN]	5,43	5,14	5,21
	1,36	1,74	0,54
Oppervlakte 1 [mm²]	1600,00	1600,00	1598,00
Spanning 1 [N/mm²]	3,39	3,21	3,26
	0,88	1,14	0,34
Drukkracht 2 [kN]	5,57	5,35	4,69
	1,33	0,65	1,50
Oppervlakte 2 [mm²]	1600,00	1600,00	1600,00
Spanning 2 [N/mm²]	3,48	3,34	2,93
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		3,3	

Chapyt 0/2 W/C_{eff} 1,3 na 7 dagen

	Proefstuk 1	Proefstuk 2	Proefstuk 3
Lengte [mm]	159,76	160,04	159,95
Hoogte 1 [mm]	39,98	40,01	39,98
Hoogte 2 [mm]	39,98	40,57	39,93
Gemiddelde hoogte [mm]	39,98	40,29	39,96

Breedte 1 [mm]	39,97	40,16	41,25
Breedte 2[mm]	37,04	40,22	40,41
Gemiddelde breedte [mm]	38,51	40,19	40,83
Gewicht [g]	266,84	283,53	271,12
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1085	1094	1039
Buigkracht [kN]	0,11	0,37	0,12
Buigsterkte [N/mm²]	0,27	0,85	0,27
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,5	
Drukkracht 1 [kN]	1,65	1,43	1,14
Oppervlakte 1 [mm²]	1598,80	1600,00	1600,00
Spanning 1 [N/mm²]	1,03	0,90	0,72
Drukkracht 2 [kN]	1,10	1,52	1,58
Oppervlakte 2 [mm²]	1481,60	1600,00	1600,00
Spanning 2 [N/mm²]	0,74	0,95	0,99
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		0,9	

Chapyt 0/2 W/C_{eff} 1,7 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,98	160,22	159,80
Hoogte 1 [mm]	39,74	39,18	39,78
Hoogte 2 [mm]	39,87	39,71	39,95
Gemiddelde hoogte [mm]	39,81	39,45	39,87
Breedte 1 [mm]	38,79	38,53	37,98
Breedte 2[mm]	39,22	38,99	38,98
Gemiddelde breedte [mm]	39,01	38,76	38,48
Gewicht [g]	251,2	258,4	243,9
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1011	1055	995
Buigkracht [kN]	0,10	0,15	0,12
Buigsterkte [N/mm²]	0,25	0,37	0,29
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,3	
Drukkracht 1 [kN]	2,05	1,56	0,65

Oppervlakte 1 [mm²]	1551,60	1541,20	1519,20
Spanning 1 [N/mm²]	1,32	1,01	0,43
Drukkracht 2 [kN]	1,72	1,41	0,95
Oppervlakte 2 [mm²]	1568,80	1559,60	1559,20
Spanning 2 [N/mm²]	1,10	0,90	0,61
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		0,9	

Chapyt 0/4 W/C_{eff} 1,3 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	158,74	158,80	159,01
Hoogte 1 [mm]	39,04	39,42	38,96
Hoogte 2 [mm]	39,62	38,42	38,76
Gemiddelde hoogte [mm]	39,33	38,92	38,86
Breedte 1 [mm]	38,40	38,10	37,77
Breedte 2[mm]	38,70	39,13	37,77
Gemiddelde breedte [mm]	38,55	38,62	37,77
Gewicht [g]	253,65	259,24	246,86
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1054	1086	1058
Buigkracht [kN]	0,00	0,07	0,00
Buigsterkte [N/mm²]	-	0,18	-
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,1	
Drukkracht 1 [kN]	0,53	0,70	0,48
Oppervlakte 1 [mm²]	1536,00	1524,00	1510,80
Spanning 1 [N/mm²]	0,35	0,46	0,32
Drukkracht 2 [kN]	0,06	0,58	0,47
Oppervlakte 2 [mm²]	1548,00	1565,20	1510,80
Spanning 2 [N/mm²]	0,04	0,37	0,31
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		0,3	

Chapyt 0/4 W/C_{eff} 1,7 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**

Lengte [mm]	160,13	160,21	159,93
Hoogte 1 [mm]	39,96	40,07	39,70
Hoogte 2 [mm]	40,06	39,86	39,66
Gemiddelde hoogte [mm]	40,01	39,97	39,68
Breedte 1 [mm]	39,60	39,71	39,88
Breedte 2[mm]	38,82	37,36	37,62
Gemiddelde breedte [mm]	39,21	38,54	38,75
Gewicht [g]	318,1	309,1	290,6
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1266	1253	1182
Buigkracht [kN]	0,35	0,28	0,22
Buigsterkte [N/mm²]	0,82	0,68	0,54
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,7	
Drukkracht 1 [kN]	5,60	5,07	3,34
Oppervlakte 1 [mm²]	1584,00	1588,40	1595,20
Spanning 1 [N/mm²]	3,54	3,19	2,09
Drukkracht 2 [kN]	5,39	4,08	2,85
Oppervlakte 2 [mm²]	1552,80	1494,40	1504,80
Spanning 2 [N/mm²]	3,47	2,73	1,90
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		2,8	

Recycled mix 0/2 W/C_{eff} 1,1 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	160,05	160,23	160,15
Hoogte 1 [mm]	40,08	40,20	40,10
Hoogte 2 [mm]	39,23	40,30	39,09
Gemiddelde hoogte [mm]	39,66	40,25	39,60
Breedte 1 [mm]	38,55	40,40	38,42
Breedte 2[mm]	37,65	38,97	39,52
Gemiddelde breedte [mm]	38,10	39,69	38,97
Gewicht [g]	428,36	453,43	437,84
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1771	1772	1772

Buigkracht [kN]	0,60	0,63	0,67
Buigsterkte [N/mm²]	1,50	1,47	1,65
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,5	
Drukkracht 1 [kN]	8,65	8,45	9,68
Oppervlakte 1 [mm²]	1542,00	1600,00	1536,80
Spanning 1 [N/mm²]	5,61	5,28	6,30
Drukkracht 2 [kN]	7,61	9,91	8,70
Oppervlakte 2 [mm²]	1506,00	1558,80	1580,80
Spanning 2 [N/mm²]	5,05	6,35	5,51
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		5,7	

Recycled mix 0/2 W/C_{eff} 1,3 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	160,05	160,50	160,12
Hoogte 1 [mm]	39,69	39,68	39,93
Hoogte 2 [mm]	39,85	39,72	39,86
Gemiddelde hoogte [mm]	39,77	39,70	39,90
Breedte 1 [mm]	38,59	38,51	38,63
Breedte 2[mm]	38,85	39,18	39,11
Gemiddelde breedte [mm]	38,72	38,85	38,87
Gewicht [g]	437,39	441,23	440,02
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1775	1783	1772
Buigkracht [kN]	0,50	0,49	0,58
Buigsterkte [N/mm²]	1,23	1,19	1,40
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,3	
Drukkracht 1 [kN]	7,85	8,97	7,36
Oppervlakte 1 [mm²]	1543,60	1540,40	1545,20
Spanning 1 [N/mm²]	5,09	5,82	4,76
Drukkracht 2 [kN]	8,31	8,42	8,80
Oppervlakte 2 [mm²]	1554,00	1567,20	1564,40
Spanning 2 [N/mm²]	5,35	5,37	5,62
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		5,3	

Recycled mix 0/3 W/C_{eff} 1,0 na 7 dagen

	Proefstuk 1	Proefstuk 2	Proefstuk 3
Lengte [mm]	160,05	160,10	160,03
Hoogte 1 [mm]	40,03	39,86	39,85
Hoogte 2 [mm]	39,85	40,15	39,81
Gemiddelde hoogte [mm]	39,94	40,01	39,83
Breedte 1 [mm]	39,85	39,89	40,99
Breedte 2[mm]	38,85	39,87	40,21
Gemiddelde breedte [mm]	39,35	39,88	40,60
Gewicht [g]	446,59	459,58	464,87
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1775	1799	1796
Buigkracht [kN]	0,75	0,72	0,69
Buigsterkte [N/mm²]	1,80	1,69	1,60
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,7	
Drukkracht 1 [kN]	10,43	11,81	10,48
Oppervlakte 1 [mm²]	1594,00	1595,60	1600,00
Spanning 1 [N/mm²]	6,54	7,40	6,55
Drukkracht 2 [kN]	11,20	11,91	11,51
Oppervlakte 2 [mm²]	1554,00	1594,80	1600,00
Spanning 2 [N/mm²]	7,21	7,47	7,19
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		7,1	

Recycled mix 0/3 W/C_{eff} 1,2 na 7 dagen

	Proefstuk 1	Proefstuk 2	Proefstuk 3
Lengte [mm]	159,70	158,90	159,16
Hoogte 1 [mm]	40,56	39,99	39,96
Hoogte 2 [mm]	40,23	39,34	39,99
Gemiddelde hoogte [mm]	40,40	39,67	39,98
Breedte 1 [mm]	37,60	38,77	38,75
Breedte 2[mm]	37,34	37,51	39,51
Gemiddelde breedte [mm]	37,47	38,14	39,13

Gewicht [g]	430,51	442,55	437,7
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1781	1841	1758
Buigkracht [kN]	0,38	0,50	0,45
Buigsterkte [N/mm²]	0,94	1,24	1,08
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,1	
Drukkracht 1 [kN]	6,52	7,13	6,41
Oppervlakte 1 [mm²]	1504,00	1550,80	1550,00
Spanning 1 [N/mm²]	4,34	4,60	4,13
Drukkracht 2 [kN]	5,92	6,15	6,47
Oppervlakte 2 [mm²]	1493,60	1500,40	1580,40
Spanning 2 [N/mm²]	3,96	4,10	4,10
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		4,2	

Rivierzand 0/4 26/90 W/C_{eff} 0,7 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	161,06	160,92	160,73
Hoogte 1 [mm]	40,21	40,17	40,49
Hoogte 2 [mm]	40,16	40,29	40,21
Gemiddelde hoogte [mm]	40,19	40,23	40,35
Breedte 1 [mm]	39,85	39,87	38,37
Breedte 2[mm]	39,91	39,93	38,37
Gemiddelde breedte [mm]	39,88	39,90	38,37
Gewicht [g]	491,35	490,1	483,63
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1904	1897	1943
Buigkracht [kN]	0,66	0,65	0,67
Buigsterkte [N/mm²]	1,53	1,51	1,61
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,5	
Drukkracht 1 [kN]	5,26	6,02	7,32
Oppervlakte 1 [mm²]	1594,00	1594,80	1534,80
Spanning 1 [N/mm²]	3,30	3,78	4,77
Drukkracht 2 [kN]	4,64	6,80	7,37

Oppervlakte 2 [mm²]	1596,40	1597,20	1534,80
Spanning 2 [N/mm²]	2,91	4,26	4,80
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		4,0	

Rivierzand 0/4 26/90 W/C_{eff} 0,9 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	161,12	160,72	161,67
Hoogte 1 [mm]	39,93	39,97	39,34
Hoogte 2 [mm]	39,94	39,95	38,61
Gemiddelde hoogte [mm]	39,94	39,96	38,98
Breedte 1 [mm]	38,36	40,00	40,14
Breedte 2[mm]	39,19	39,76	39,85
Gemiddelde breedte [mm]	38,78	39,88	40,00
Gewicht [g]	490,3	492,28	497,83
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1965	1922	1975
Buigkracht [kN]	0,55	0,57	0,60
Buigsterkte [N/mm²]	1,34	1,34	1,49
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,4	
Drukkracht 1 [kN]	5,35	5,70	7,91
Oppervlakte 1 [mm²]	1534,40	1600,00	1600,00
Spanning 1 [N/mm²]	3,49	3,56	4,95
Drukkracht 2 [kN]	6,28	7,72	7,87
Oppervlakte 2 [mm²]	1567,60	1590,40	1594,00
Spanning 2 [N/mm²]	4,01	4,86	4,93
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		4,3	

Rivierzand 0/4 35/90 W/C_{eff} 0,7 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	160,52	160,38	160,05
Hoogte 1 [mm]	39,94	40,01	40,09
Hoogte 2 [mm]	40,00	40,02	40,09

Gemiddelde hoogte [mm]	39,97	40,02	40,09
Breedte 1 [mm]	40,73	39,52	37,05
Breedte 2[mm]	39,66	39,01	38,18
Gemiddelde breedte [mm]	40,20	39,27	37,62
Gewicht [g]	490,92	488,49	483,35
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1904	1939	2003
Buigkracht [kN]	0,54	0,60	0,63
Buigsterkte [N/mm²]	1,27	1,44	1,57
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,4	
Drukkracht 1 [kN]	5,15	7,63	6,64
Oppervlakte 1 [mm²]	1600,00	1580,80	1482,00
Spanning 1 [N/mm²]	3,22	4,83	4,48
Drukkracht 2 [kN]	5,57	6,75	8,11
Oppervlakte 2 [mm²]	1586,40	1560,40	1527,20
Spanning 2 [N/mm²]	3,51	4,32	5,31
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		4,3	

Rivierzand 0/4 35/90 W/C_{eff} 0,9 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,77	159,98	160,01
Hoogte 1 [mm]	39,92	40,00	39,84
Hoogte 2 [mm]	39,99	39,95	39,94
Gemiddelde hoogte [mm]	39,96	39,98	39,89
Breedte 1 [mm]	39,61	40,14	39,77
Breedte 2[mm]	40,44	39,58	39,29
Gemiddelde breedte [mm]	40,03	39,86	39,53
Gewicht [g]	466,4	477,24	473,27
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1825	1872	1876
Buigkracht [kN]	0,49	0,62	0,59
Buigsterkte [N/mm²]	1,14	1,46	1,42
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,3	

Drukkracht 1 [kN]	4,99	7,27	6,74
Oppervlakte 1 [mm²]	1584,40	1600,00	1590,80
Spanning 1 [N/mm²]	3,15	4,54	4,24
Drukkracht 2 [kN]	6,14	6,89	6,59
Oppervlakte 2 [mm²]	1600,00	1583,20	1571,60
Spanning 2 [N/mm²]	3,84	4,35	4,19
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		4,1	

Mengzand 0/4 25/90 W/C_{eff} 0,8 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,94	159,99	160,03
Hoogte 1 [mm]	39,84	39,96	39,92
Hoogte 2 [mm]	39,85	39,93	39,90
Gemiddelde hoogte [mm]	39,85	39,95	39,91
Breedte 1 [mm]	39,75	39,90	38,11
Breedte 2[mm]	41,41	41,17	40,11
Gemiddelde breedte [mm]	40,58	40,54	39,11
Gewicht [g]	489,11	477,94	472,43
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1891	1845	1891
Buigkracht [kN]	0,62	0,61	0,55
Buigsterkte [N/mm²]	1,44	1,40	1,32
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,4	
Drukkracht 1 [kN]	7,60	8,43	6,74
Oppervlakte 1 [mm²]	1590,00	1596,00	1524,40
Spanning 1 [N/mm²]	4,78	5,28	4,42
Drukkracht 2 [kN]	8,50	8,53	6,34
Oppervlakte 2 [mm²]	1600,00	1600,00	1600,00
Spanning 2 [N/mm²]	5,31	5,33	3,96
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		4,8	

Mengzand 0/4 25/90 W/C_{eff} 1 na 7 dagen

	Proefstuk 1	Proefstuk 2	Proefstuk 3
Lengte [mm]	159,70	160,54	160,35
Hoogte 1 [mm]	39,92	39,96	39,98
Hoogte 2 [mm]	39,98	39,95	39,93
Gemiddelde hoogte [mm]	39,95	39,96	39,96
Breedte 1 [mm]	40,07	39,45	39,39
Breedte 2[mm]	40,41	40,70	39,16
Gemiddelde breedte [mm]	40,24	40,08	39,28
Gewicht [g]	494,02	491,13	478,17
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1924	1911	1900
Buigkracht [kN]	0,68	0,71	0,54
Buigsterkte [N/mm²]	1,59	1,65	1,30
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,5	
Drukkracht 1 [kN]	8,42	8,07	6,47
Oppervlakte 1 [mm²]	1600,00	1578,00	1575,60
Spanning 1 [N/mm²]	5,26	5,12	4,11
Drukkracht 2 [kN]	8,51	7,84	7,06
Oppervlakte 2 [mm²]	1600,00	1600,00	1566,40
Spanning 2 [N/mm²]	5,32	4,90	4,51
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		4,9	

Gerecycleerd betonzand 0/4 W/C_{eff} 0,9 na 28 dagen

	Proefstuk 1	Proefstuk 2	Proefstuk 3
Lengte [mm]	158,6	105,82	158,61
Hoogte 1 [mm]	39,76	39,55	39,48
Hoogte 2 [mm]	39,31	39,40	39,60
Gemiddelde hoogte [mm]	39,54	39,48	39,54
Breedte 1 [mm]	39,70	40,04	39,59
Breedte 2[mm]	40,15	40,55	39,29
Gemiddelde breedte [mm]	39,93	40,30	39,44
Gewicht [g]	402,20	276,20	401,70

Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1607	1641	1624
Buigkracht [kN]	0,24		0,31
Buigsterkte [N/mm²]	0,59	0,00	0,76
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,7	
Drukkracht 1 [kN]	2,49	4,02	3,54
Oppervlakte 1 [mm²]	1588,00	1600,00	1583,60
Spanning 1 [N/mm²]	1,57	2,51	2,23
Drukkracht 2 [kN]	2,58		4,17
Oppervlakte 2 [mm²]	1600,00	1600,00	1571,60
Spanning 2 [N/mm²]	1,61	0,00	2,65
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		2,1	

Gerecycleerd betonzand 0/4 W/C_{eff} 1,3 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	158,48	163,94	158,88
Hoogte 1 [mm]	39,43	39,69	39,74
Hoogte 2 [mm]	39,55	39,39	39,72
Gemiddelde hoogte [mm]	39,49	39,54	39,73
Breedte 1 [mm]	42,89	38,06	38,20
Breedte 2[mm]	37,55	39,69	40,27
Gemiddelde breedte [mm]	40,22	38,88	39,24
Gewicht [g]	410,60	411,90	413,10
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1684	1635	1668
Buigkracht [kN]	0,46	0,55	0,44
Buigsterkte [N/mm²]	1,10	1,36	1,05
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,2	
Drukkracht 1 [kN]	5,12	5,29	5,15
Oppervlakte 1 [mm²]	1600,00	1522,40	1528,00
Spanning 1 [N/mm²]	3,20	3,47	3,37
Drukkracht 2 [kN]	4,92	7,63	5,73
Oppervlakte 2 [mm²]	1502,00	1587,60	1600,00

Spanning 2 [N/mm²]	3,27	4,81	3,58
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		3,6	

Chapyt 0/2 W/C_{eff} 1,3 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,81	159,72	159,8
Hoogte 1 [mm]	39,50	39,80	39,97
Hoogte 2 [mm]	39,84	39,85	39,95
Gemiddelde hoogte [mm]	39,67	39,83	39,96
Breedte 1 [mm]	37,03	38,69	38,74
Breedte 2[mm]	39,51	38,91	39,40
Gemiddelde breedte [mm]	38,27	38,80	39,07
Gewicht [g]	251,30	267,90	261,50
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1036	1085	1048
Buigkracht [kN]	0,22	0,22	0,21
Buigsterkte [N/mm²]	0,54	0,54	0,51
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,5	
Drukkracht 1 [kN]	2,50	2,21	1,95
Oppervlakte 1 [mm²]	1481,20	1547,60	1549,60
Spanning 1 [N/mm²]	1,69	1,43	1,26
Drukkracht 2 [kN]	2,61	3,16	2,27
Oppervlakte 2 [mm²]	1580,40	1556,40	1576,00
Spanning 2 [N/mm²]	1,65	2,03	1,44
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		1,6	

Chapyt 0/2 W/C_{eff} 1,7 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	160,01	160,2	159,97
Hoogte 1 [mm]	39,86	39,95	39,82
Hoogte 2 [mm]	39,85	39,95	39,87

Gemiddelde hoogte [mm]	39,86	39,95	39,85
Breedte 1 [mm]	39,48	39,67	38,60
Breedte 2[mm]	38,50	38,86	39,40
Gemiddelde breedte [mm]	38,99	39,27	39,00
Gewicht [g]	285,30	308,60	290,60
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1147	1228	1169
Buigkracht [kN]	0,28	0,30	0,26
Buigsterkte [N/mm²]	0,68	0,72	0,64
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,7	
Drukkracht 1 [kN]	3,26	4,31	3,40
Oppervlakte 1 [mm²]	1579,20	1586,80	1544,00
Spanning 1 [N/mm²]	2,07	2,71	2,20
Drukkracht 2 [kN]	3,38	5,02	4,11
Oppervlakte 2 [mm²]	1540,00	1554,40	1576,00
Spanning 2 [N/mm²]	2,19	3,23	2,61
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		2,5	

Chapyt 0/4 W/C_{eff} 1,3 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,65	159,83	159,75
Hoogte 1 [mm]	38,73	39,92	39,87
Hoogte 2 [mm]	39,87	39,62	39,87
Gemiddelde hoogte [mm]	39,30	39,77	39,87
Breedte 1 [mm]	40,52	40,31	39,53
Breedte 2[mm]	39,16	39,05	39,05
Gemiddelde breedte [mm]	39,84	39,68	39,29
Gewicht [g]	250,50	270,40	255,60
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1002	1072	1021
Buigkracht [kN]	0,15	0,13	0,11
Buigsterkte [N/mm²]	0,35	0,32	0,26
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,3	

Drukkracht 1 [kN]	0,66	1,90	1,08
Oppervlakte 1 [mm²]	1600,00	1600,00	1581,20
Spanning 1 [N/mm²]	0,41	1,19	0,68
Drukkracht 2 [kN]	0,91	1,60	1,05
Oppervlakte 2 [mm²]	1566,40	1562,00	1562,00
Spanning 2 [N/mm²]	0,58	1,03	0,67
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		0,8	

Chapyt 0/4 W/C_{eff} 1,7 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,87	160,33	160,3
Hoogte 1 [mm]	40,08	39,89	39,85
Hoogte 2 [mm]	40,00	39,86	39,93
Gemiddelde hoogte [mm]	40,04	39,88	39,89
Breedte 1 [mm]	38,35	38,36	38,74
Breedte 2[mm]	40,25	40,45	38,98
Gemiddelde breedte [mm]	39,30	39,41	38,86
Gewicht [g]	305,10	315,20	302,70
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1213	1251	1218
Buigkracht [kN]	0,34	0,36	0,33
Buigsterkte [N/mm²]	0,80	0,86	0,80
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,8	
Drukkracht 1 [kN]	3,94	4,75	4,41
Oppervlakte 1 [mm²]	1534,00	1534,40	1549,60
Spanning 1 [N/mm²]	2,57	3,10	2,84
Drukkracht 2 [kN]	4,30	5,47	4,32
Oppervlakte 2 [mm²]	1600,00	1600,00	1559,20
Spanning 2 [N/mm²]	2,69	3,42	2,77
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		2,9	

Recycled mix 0/2 W/C_{eff} 1,1 na 28 dagen

	Proefstuk 1	Proefstuk 2	Proefstuk 3
Lengte [mm]	160,38	160,41	160,51
Hoogte 1 [mm]	40,02	39,78	39,70
Hoogte 2 [mm]	39,94	39,97	39,97
Gemiddelde hoogte [mm]	39,98	39,88	39,84
Breedte 1 [mm]	40,88	41,20	39,73
Breedte 2[mm]	39,24	38,72	40,38
Gemiddelde breedte [mm]	40,06	39,96	40,06
Gewicht [g]	464,70	466,10	462,90
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1809	1824	1807
Buigkracht [kN]	1,14	1,10	1,06
Buigsterkte [N/mm²]	2,67	2,60	2,51
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		2,6	
Drukkracht 1 [kN]	15,79	15,75	15,61
Oppervlakte 1 [mm²]	1600,00	1600,00	1589,20
Spanning 1 [N/mm²]	9,87	9,84	9,82
Drukkracht 2 [kN]	17,38	17,44	16,57
Oppervlakte 2 [mm²]	1569,60	1548,80	1600,00
Spanning 2 [N/mm²]	11,07	11,26	10,35
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		10,4	

Recycled mix 0/2 W/C_{eff} 1,3 na 28 dagen

	Proefstuk 1	Proefstuk 2	Proefstuk 3
Lengte [mm]	159,39	159,52	159,53
Hoogte 1 [mm]	39,72	39,78	39,83
Hoogte 2 [mm]	39,75	39,75	39,71
Gemiddelde hoogte [mm]	39,74	39,77	39,77
Breedte 1 [mm]	40,02	40,61	42,02
Breedte 2[mm]	39,50	39,44	41,27
Gemiddelde breedte [mm]	39,76	40,03	41,65
Gewicht [g]	454,20	452,20	457,80

Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1804	1781	1733
Buigkracht [kN]	1,26	1,08	0,92
Buigsterkte [N/mm²]	3,02	2,56	2,10
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		2,6	
Drukkracht 1 [kN]	16,51	15,92	13,63
Oppervlakte 1 [mm²]	1600,00	1600,00	1600,00
Spanning 1 [N/mm²]	10,32	9,95	8,52
Drukkracht 2 [kN]	16,76	14,29	13,77
Oppervlakte 2 [mm²]	1580,00	1577,60	1600,00
Spanning 2 [N/mm²]	10,61	9,06	8,60
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		9,5	

Recycled mix 0/3 W/C_{eff} 1,0 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,94	159,8	159,78
Hoogte 1 [mm]	39,93	39,97	39,86
Hoogte 2 [mm]	39,91	39,86	39,92
Gemiddelde hoogte [mm]	39,92	39,92	39,89
Breedte 1 [mm]	39,47	41,02	39,81
Breedte 2[mm]	39,65	40,37	39,67
Gemiddelde breedte [mm]	39,56	40,70	39,74
Gewicht [g]	455,70	468,60	463,20
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1804	1805	1829
Buigkracht [kN]	0,98	1,16	1,03
Buigsterkte [N/mm²]	2,32	2,69	2,45
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		2,5	
Drukkracht 1 [kN]	13,83	14,02	13,90
Oppervlakte 1 [mm²]	1578,80	1600,00	1592,40
Spanning 1 [N/mm²]	8,76	8,76	8,73
Drukkracht 2 [kN]	12,96	14,71	15,71
Oppervlakte 2 [mm²]	1586,00	1600,00	1586,80

Spanning 2 [N/mm²]	8,17	9,19	9,90
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		8,9	

Recycled mix 0/3 W/C_{eff} 1,2 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,36	159,47	159,25
Hoogte 1 [mm]	39,87	39,69	39,75
Hoogte 2 [mm]	39,91	39,73	39,77
Gemiddelde hoogte [mm]	39,89	39,71	39,76
Breedte 1 [mm]	39,87	39,41	39,37
Breedte 2[mm]	40,54	40,88	39,89
Gemiddelde breedte [mm]	40,21	40,15	39,63
Gewicht [g]	442,80	445,60	437,90
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1733	1753	1745
Buigkracht [kN]	0,74	0,79	0,67
Buigsterkte [N/mm²]	1,74	1,86	1,60
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,7	
Drukkracht 1 [kN]	9,67	12,38	11,16
Oppervlakte 1 [mm²]	1594,80	1576,40	1574,80
Spanning 1 [N/mm²]	6,06	7,85	7,09
Drukkracht 2 [kN]	10,86	15,03	11,60
Oppervlakte 2 [mm²]	1600,00	1600,00	1595,60
Spanning 2 [N/mm²]	6,79	9,39	7,27
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		7,4	

Rivierzand 0/4 26/90 W/C_{eff} 0,7 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	160,25	160,28	160,34
Hoogte 1 [mm]	39,68	40,30	40,05
Hoogte 2 [mm]	39,91	40,25	40,00
Gemiddelde hoogte [mm]	39,80	40,28	40,03

Breedte 1 [mm]	39,18	40,48	39,73
Breedte 2[mm]	40,11	40,13	39,70
Gemiddelde breedte [mm]	39,65	40,31	39,72
Gewicht [g]	466,60	480,50	469,10
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1846	1847	1841
Buigkracht [kN]	0,79	0,78	0,73
Buigsterkte [N/mm²]	1,90	1,78	1,71
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,8	
Drukkracht 1 [kN]	7,39	8,80	8,59
Oppervlakte 1 [mm²]	1567,20	1600,00	1589,20
Spanning 1 [N/mm²]	4,71	5,50	5,40
Drukkracht 2 [kN]	7,82	8,20	8,06
Oppervlakte 2 [mm²]	1600,00	1600,00	1588,00
Spanning 2 [N/mm²]	4,89	5,13	5,08
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		5,1	

Rivierzand 0/4 26/90 W/C_{eff} 0,9 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,81	160,02	159,94
Hoogte 1 [mm]	40,41	40,36	40,12
Hoogte 2 [mm]	40,26	40,22	40,36
Gemiddelde hoogte [mm]	40,34	40,29	40,24
Breedte 1 [mm]	40,30	40,38	40,16
Breedte 2[mm]	39,15	40,04	39,70
Gemiddelde breedte [mm]	39,73	40,21	39,93
Gewicht [g]	501,70	506,80	504,40
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1959	1955	1963
Buigkracht [kN]	0,80	0,79	0,80
Buigsterkte [N/mm²]	1,85	1,83	1,86
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,8	
Drukkracht 1 [kN]	9,02	11,63	8,70

Oppervlakte 1 [mm²]	1600,00	1600,00	1600,00
Spanning 1 [N/mm²]	5,64	7,27	5,44
Drukkracht 2 [kN]	8,17	10,14	8,93
Oppervlakte 2 [mm²]	1566,00	1600,00	1588,00
Spanning 2 [N/mm²]	5,22	6,34	5,62
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		5,9	

Rivierzand 0/4 35/90 W/C_{eff} 0,7 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	160,08	160,05	160,24
Hoogte 1 [mm]	40,01	40,05	39,97
Hoogte 2 [mm]	39,99	40,02	39,92
Gemiddelde hoogte [mm]	40,00	40,04	39,95
Breedte 1 [mm]	39,82	39,37	39,08
Breedte 2[mm]	39,16	39,89	40,25
Gemiddelde breedte [mm]	39,49	39,63	39,67
Gewicht [g]	472,20	481,50	482,10
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1867	1896	1899
Buigkracht [kN]	0,76	0,75	0,83
Buigsterkte [N/mm²]	1,81	1,77	1,98
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,9	
Drukkracht 1 [kN]	9,95	9,98	11,05
Oppervlakte 1 [mm²]	1592,80	1574,80	1563,20
Spanning 1 [N/mm²]	6,25	6,34	7,07
Drukkracht 2 [kN]	7,35	10,25	10,56
Oppervlakte 2 [mm²]	1566,40	1595,60	1600,00
Spanning 2 [N/mm²]	4,70	6,42	6,60
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		6,2	

Rivierzand 0/4 35/90 W/C_{eff} 0,9 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**

Lengte [mm]	160,02	160,09	159,93
Hoogte 1 [mm]	40,16	40,18	40,05
Hoogte 2 [mm]	40,17	40,18	40,13
Gemiddelde hoogte [mm]	40,17	40,18	40,09
Breedte 1 [mm]	40,30	38,26	39,09
Breedte 2[mm]	39,95	40,26	39,54
Gemiddelde breedte [mm]	40,13	39,26	39,32
Gewicht [g]	514,90	506,60	506,40
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1997	2006	2009
Buigkracht [kN]	0,89	0,90	0,87
Buigsterkte [N/mm²]	2,06	2,13	2,06
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		2,1	
Drukkracht 1 [kN]	10,85	12,83	12,28
Oppervlakte 1 [mm²]	1600,00	1530,40	1563,60
Spanning 1 [N/mm²]	6,78	8,38	7,86
Drukkracht 2 [kN]	10,18	10,85	10,98
Oppervlakte 2 [mm²]	1598,00	1600,00	1581,60
Spanning 2 [N/mm²]	6,37	6,78	6,94
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		7,2	

Mengzand 0/4 25/90 W/C_{eff} 0,8 na 28 dagen

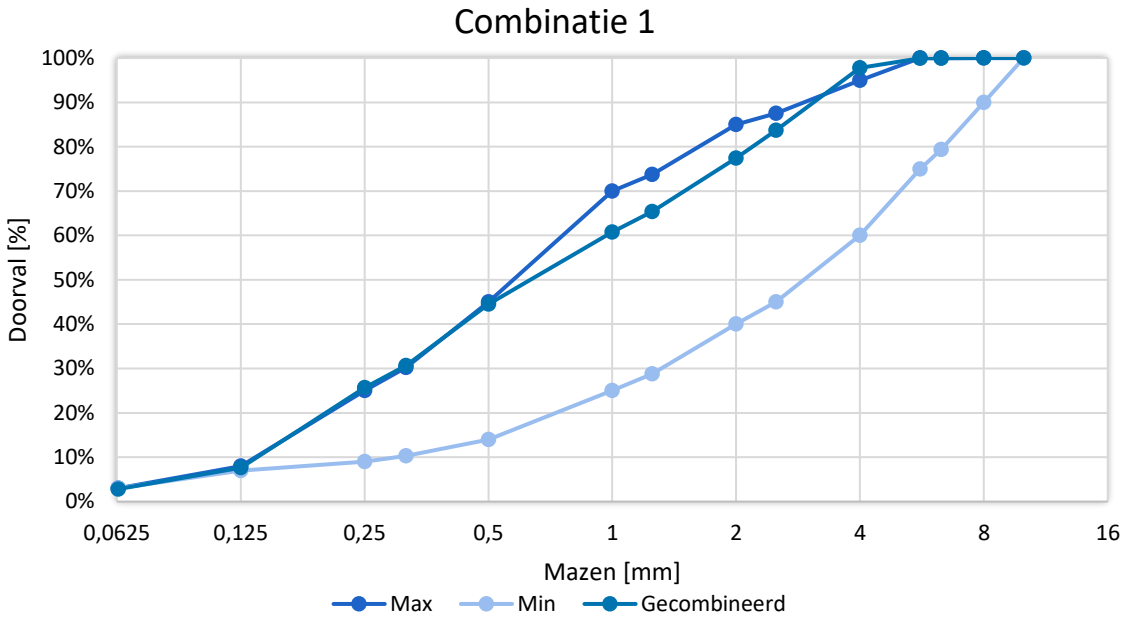
	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	160,47	160,51	160,42
Hoogte 1 [mm]	39,95	40,29	40,25
Hoogte 2 [mm]	40,11	40,17	39,92
Gemiddelde hoogte [mm]	40,03	40,23	40,09
Breedte 1 [mm]	39,29	39,85	39,60
Breedte 2[mm]	39,83	39,95	39,39
Gemiddelde breedte [mm]	39,56	39,90	39,50
Gewicht [g]	467,70	481,00	474,10
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1840	1867	1867

Buigkracht [kN]	0,81	0,63	0,71
Buigsterkte [N/mm²]	1,92	1,47	1,69
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,7	
Drukkracht 1 [kN]	6,06	8,56	7,41
Oppervlakte 1 [mm²]	1571,60	1594,00	1584,00
Spanning 1 [N/mm²]	3,86	5,37	4,68
Drukkracht 2 [kN]	7,86	9,56	8,59
Oppervlakte 2 [mm²]	1593,20	1598,00	1575,60
Spanning 2 [N/mm²]	4,94	5,98	5,45
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		5,0	

Mengzand 0/4 25/90 W/C_{eff} 1 na 7 dagen

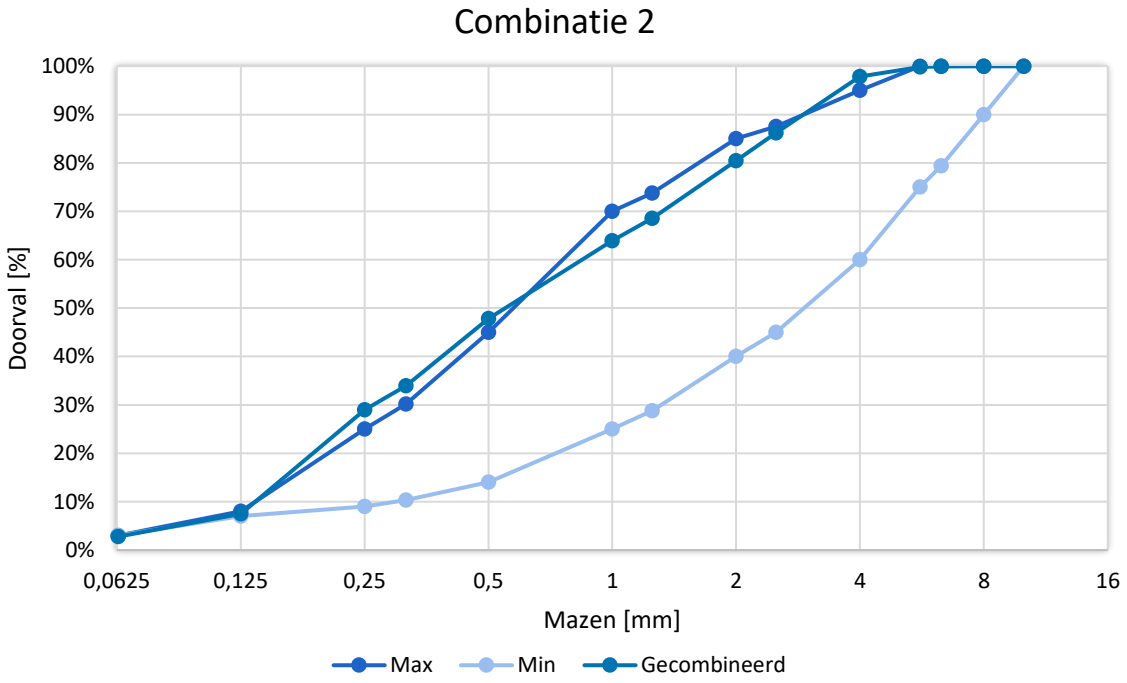
	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	72,09	159,27	159,2
Hoogte 1 [mm]	39,81	39,66	39,61
Hoogte 2 [mm]	-	39,68	39,63
Gemiddelde hoogte [mm]	39,81	39,67	39,62
Breedte 1 [mm]	39,69	39,85	39,50
Breedte 2[mm]	-	38,64	39,02
Gemiddelde breedte [mm]	39,69	39,25	39,26
Gewicht [g]	196,40	471,20	479,20
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1724	1900	1935
Buigkracht [kN]	-	0,83	0,86
Buigsterkte [N/mm²]	0,00	2,00	2,10
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		2,1	
Drukkracht 1 [kN]	8,30	8,66	8,36
Oppervlakte 1 [mm²]	1587,60	1594,00	1580,00
Spanning 1 [N/mm²]	5,23	5,43	5,29
Drukkracht 2 [kN]	-	8,68	7,94
Oppervlakte 2 [mm²]	0,00	1545,60	1560,80
Spanning 2 [N/mm²]	-	5,62	5,09
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		5,3	

Bijlage J: Zeefkrommes geoptimaliseerde zandmengsels



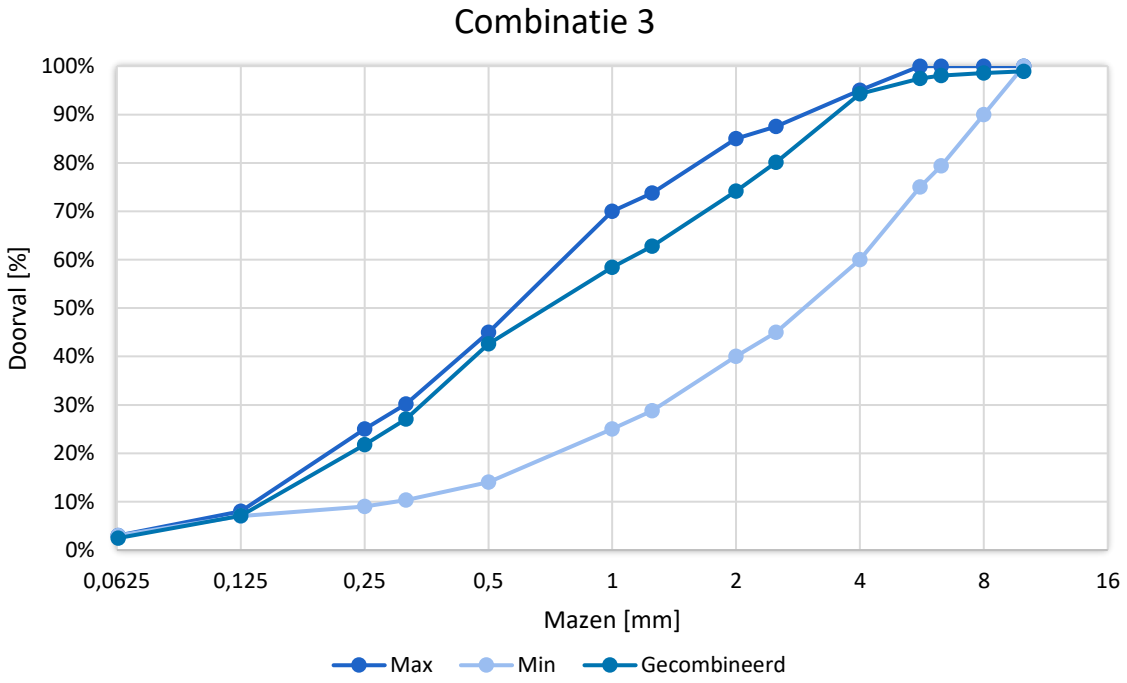
Combinatie 1

Wegingsfactor:	**75%**	**25%**			
Maaswijdte [mm]	**Doorval Gerecycleerd betonzand 0/4**	**Doorval Recycled mix 0/2**	**Gecombineerde doorval**	**TV 189 min**	**TV 189 max**
10	100%	100%	100%	100%	100%
8	100%	100%	100%	90%	100%
6,3	100%	100%	100%	79%	100%
5,6	100%	100%	100%	75%	100%
4	98%	98%	98%	60%	95%
2,5	81%	91%	84%	45%	88%
2	74%	86%	77%	40%	85%
1,25	62%	75%	65%	29%	74%
1	58%	70%	61%	25%	70%
0,5	41%	54%	44%	14%	45%
0,315	27%	40%	31%	10%	30%
0,25	22%	36%	26%	9%	25%
0,125	8%	7%	8%	7%	8%
0,063	3%	3%	3%	3%	3%



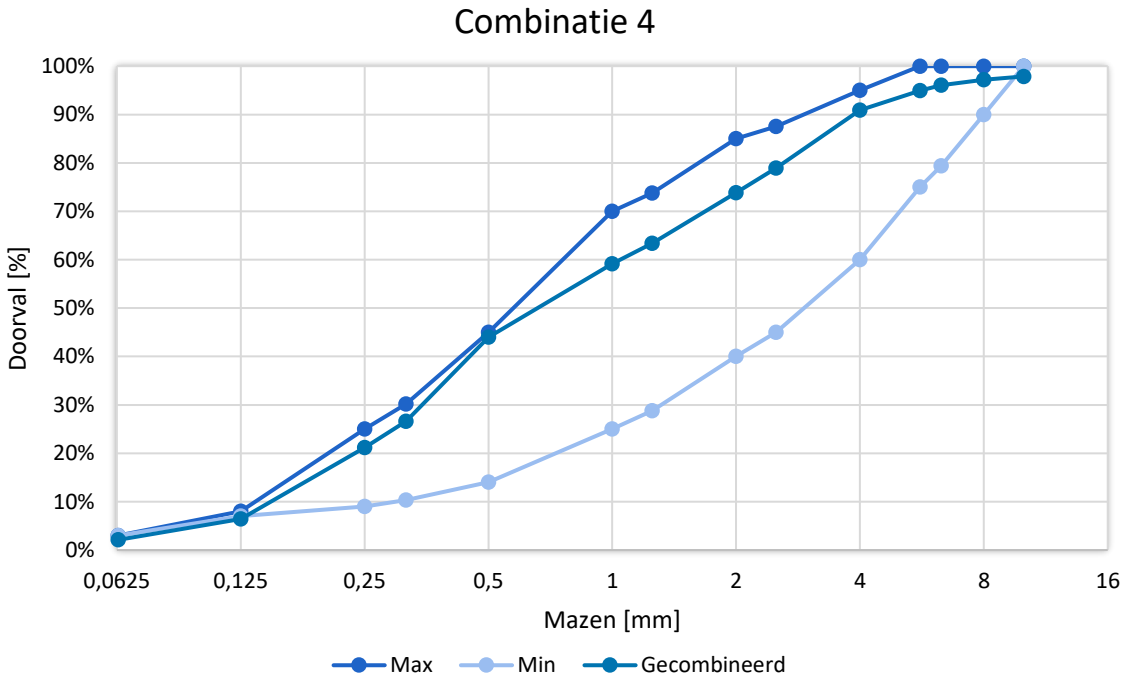
Combinatie 2

Wegingsfactor:	**50%**	**50%**			
Maaswijdte [mm]	**Doorval Gerecycleerd betonzand 0/4**	**Doorval Recycled mix 0/2**	**Gecombineerde doorval**	**TV 189 min**	**TV 189 max**
10	100%	100%	100%	100%	100%
8	100%	100%	100%	90%	100%
6,3	100%	100%	100%	79%	100%
5,6	100%	100%	100%	75%	100%
4	98%	98%	98%	60%	95%
2,5	81%	91%	86%	45%	88%
2	74%	86%	80%	40%	85%
1,25	62%	75%	69%	29%	74%
1	58%	70%	64%	25%	70%
0,5	41%	54%	48%	14%	45%
0,315	27%	40%	34%	10%	30%
0,25	22%	36%	29%	9%	25%
0,125	8%	7%	7%	7%	8%
0,063	3%	3%	3%	3%	3%



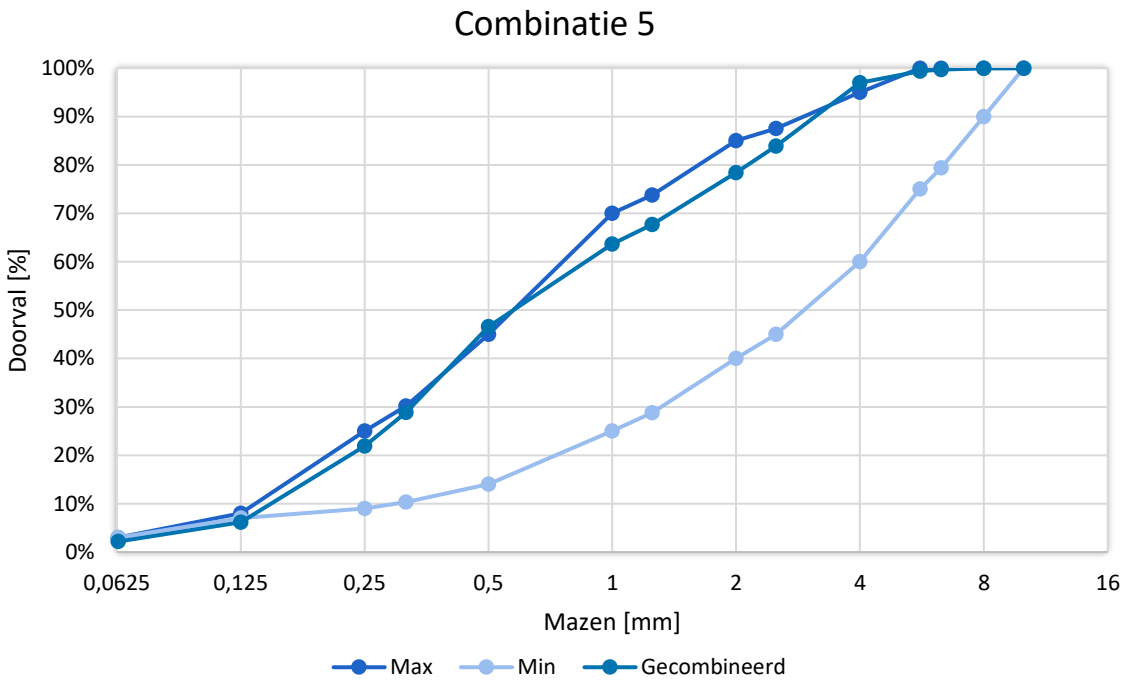
Combinatie 3

Wegingsfactor:	**75%**	**25%**			
Maaswijdte [mm]	**Doorval Gerecycleerd betonzand 0/4**	**Doorval Recycled mix 0/3**	**Gecombineerde doorval**	**TV 189 min**	**TV 189 max**
10	100%	96%	99%	100%	100%
8	100%	94%	99%	90%	100%
6,3	100%	92%	98%	79%	100%
5,6	100%	90%	97%	75%	100%
4	98%	84%	94%	60%	95%
2,5	81%	77%	80%	45%	88%
2	74%	73%	74%	40%	85%
1,25	62%	65%	63%	29%	74%
1	58%	61%	58%	25%	70%
0,5	41%	47%	43%	14%	45%
0,315	27%	26%	27%	10%	30%
0,25	22%	20%	22%	9%	25%
0,125	8%	5%	7%	7%	8%
0,063	3%	1%	2%	3%	3%



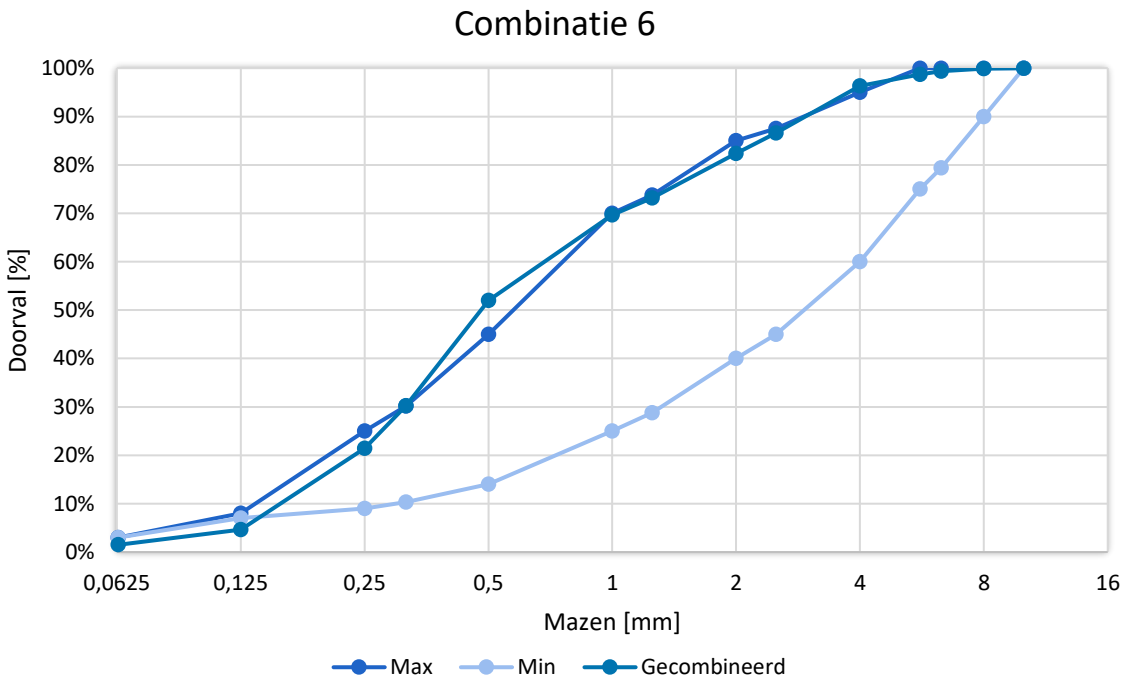
Combinatie 4

Wegingsfactor:	**50%**	**50%**			
Maaswijdte [mm]	**Doorval Gerecycleerd betonzand 0/4**	**Doorval Recycled mix 0/3**	**Gecombineerde doorval**	**TV 189 min**	**TV 189 max**
10	100%	96%	98%	100%	100%
8	100%	94%	97%	90%	100%
6,3	100%	92%	96%	79%	100%
5,6	100%	90%	95%	75%	100%
4	98%	84%	91%	60%	95%
2,5	81%	77%	79%	45%	88%
2	74%	73%	74%	40%	85%
1,25	62%	65%	63%	29%	74%
1	58%	61%	59%	25%	70%
0,5	41%	47%	44%	14%	45%
0,315	27%	26%	27%	10%	30%
0,25	22%	20%	21%	9%	25%
0,125	8%	5%	6%	7%	8%
0,063	3%	1%	2%	3%	3%



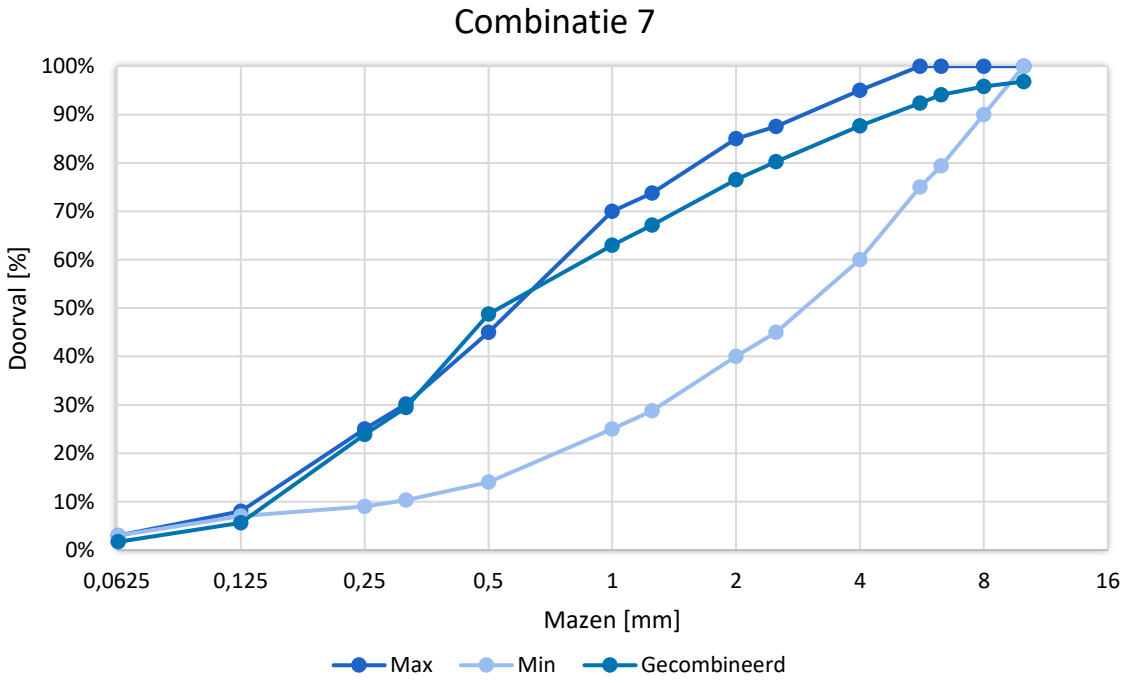
Combinatie 5

Wegingsfactor:	**75%**	**25%**			
Maaswijdte [mm]	**Doorval Gerecycleerd betonzand 0/4**	**Mengzand 0/4 25/90**	**Gecombineerde doorval**	**TV 189 min**	**TV 189 max**
10	100%	100%	100%	100%	100%
8	100%	100%	100%	90%	100%
6,3	100%	99%	100%	79%	100%
5,6	100%	97%	99%	75%	100%
4	98%	95%	97%	60%	95%
2,5	81%	92%	84%	45%	88%
2	74%	90%	78%	40%	85%
1,25	62%	84%	68%	29%	74%
1	58%	82%	64%	25%	70%
0,5	41%	63%	47%	14%	45%
0,315	27%	33%	29%	10%	30%
0,25	22%	21%	22%	9%	25%
0,125	8%	1%	6%	7%	8%
0,063	3%	0%	2%	3%	3%



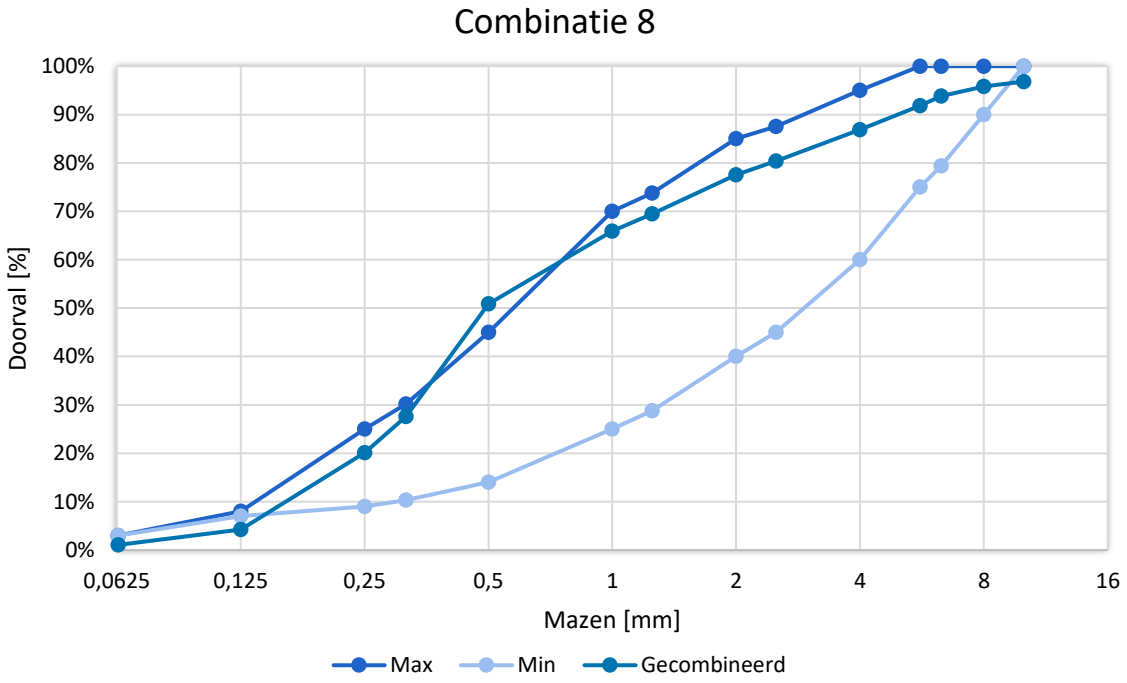
Combinatie 6

Wegingsfactor:	**50%**	**50%**			
Maaswijdte [mm]	**Doorval Gerecycleerd betonzand 0/4**	**Doorval Mengzand 0/4 25/90**	**Gecombineerde doorval**	**TV 189 min**	**TV 189 max**
10	100%	100%	100%	100%	100%
8	100%	100%	100%	90%	100%
6,3	100%	99%	99%	79%	100%
5,6	100%	97%	99%	75%	100%
4	98%	95%	96%	60%	95%
2,5	81%	92%	87%	45%	88%
2	74%	90%	82%	40%	85%
1,25	62%	84%	73%	29%	74%
1	58%	82%	70%	25%	70%
0,5	41%	63%	52%	14%	45%
0,315	27%	33%	30%	10%	30%
0,25	22%	21%	21%	9%	25%
0,125	8%	1%	5%	7%	8%
0,063	3%	0%	1%	3%	3%



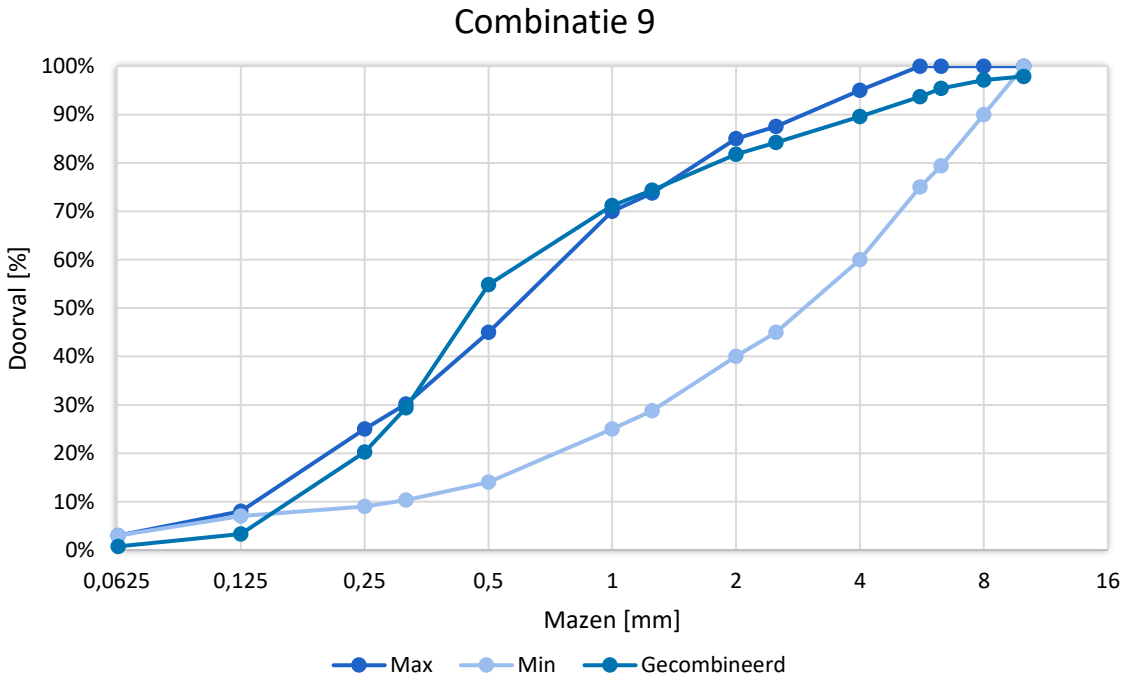
Combinatie 7

Wegingsfactor:	**50%**	**50%**			
Maaswijdte [mm]	**Doorval Recycled mix 0/2**	**Doorval Recycled mix 0/3**	**Gecombineerde doorval**	**TV 189 min**	**TV 189 max**
10	100%	100%	100%	100%	100%
8	100%	100%	100%	90%	100%
6,3	100%	99%	99%	79%	100%
5,6	100%	97%	99%	75%	100%
4	98%	95%	96%	60%	95%
2,5	81%	92%	87%	45%	88%
2	74%	90%	82%	40%	85%
1,25	62%	84%	73%	29%	74%
1	58%	82%	70%	25%	70%
0,5	41%	63%	52%	14%	45%
0,315	27%	33%	30%	10%	30%
0,25	22%	21%	21%	9%	25%
0,125	8%	1%	5%	7%	8%
0,063	3%	0%	1%	3%	3%



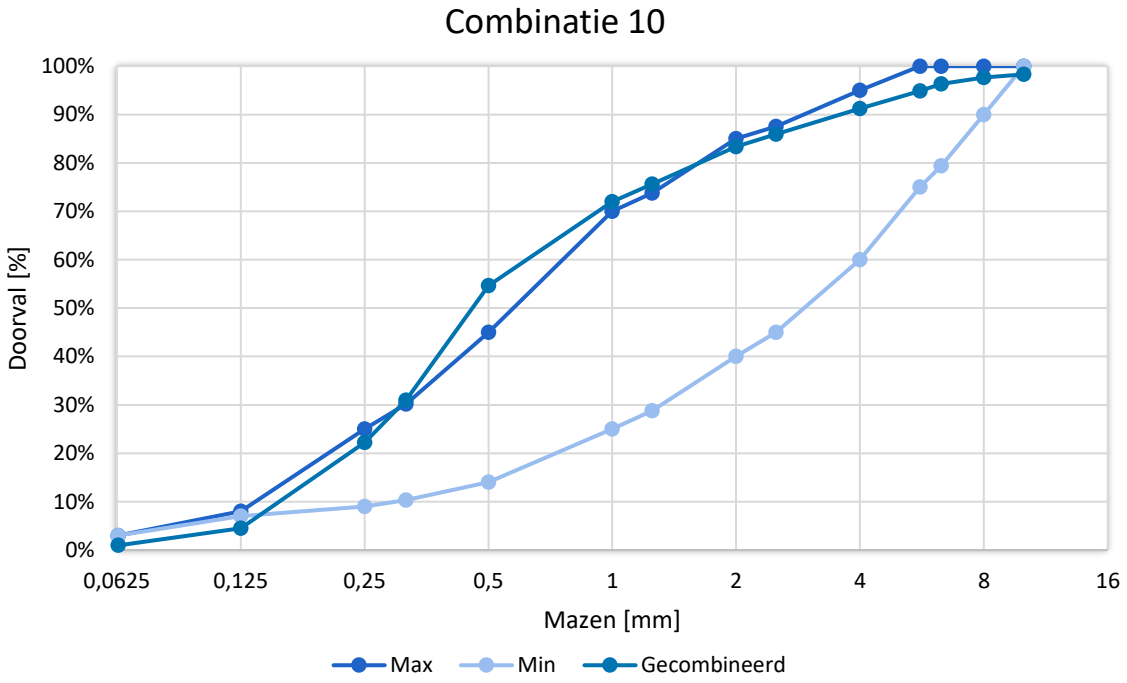
Combinatie 8

Wegingsfactor:	**75%**	**25%**			
Maaswijdte [mm]	**Doorval Recycled mix 0/3**	**Doorval Mengzand 0/4 25/90**	**Gecombineerde doorval**	**TV 189 min**	**TV 189 max**
10	96%	100%	97%	100%	100%
8	94%	100%	96%	90%	100%
6,3	92%	99%	94%	79%	100%
5,6	90%	97%	92%	75%	100%
4	84%	95%	87%	60%	95%
2,5	77%	92%	80%	45%	88%
2	73%	90%	78%	40%	85%
1,25	65%	84%	69%	29%	74%
1	61%	82%	66%	25%	70%
0,5	47%	63%	51%	14%	45%
0,315	26%	33%	28%	10%	30%
0,25	20%	21%	20%	9%	25%
0,125	5%	1%	4%	7%	8%
0,063	1%	0%	1%	3%	3%



Combinatie 9

Wegingsfactor:	**50%**	**50%**			
Maaswijdte [mm]	**Doorval Recycled mix 0/3**	**Doorval Mengzand 0/4 25/90**	**Gecombineerde doorval**	**TV 189 min**	**TV 189 max**
10	96%	100%	98%	100%	100%
8	94%	100%	97%	90%	100%
6,3	92%	99%	95%	79%	100%
5,6	90%	97%	94%	75%	100%
4	84%	95%	90%	60%	95%
2,5	77%	92%	84%	45%	88%
2	73%	90%	82%	40%	85%
1,25	65%	84%	74%	29%	74%
1	61%	82%	71%	25%	70%
0,5	47%	63%	55%	14%	45%
0,315	26%	33%	29%	10%	30%
0,25	20%	21%	20%	9%	25%
0,125	5%	1%	3%	7%	8%
0,063	1%	0%	1%	3%	3%



Combinatie 10

Wegingsfactor:	**50%**	**50%**	**20%**			
Maaswijdte [mm]	**Doorval Recycled mix 0/3**	**Doorval Mengzand 0/4 25/90**	**Doorval Chapyt 0/4**	**Gecombineerde doorval**	**TV 189 min**	**TV 189 max**
10	96%	100%	100%	98%	100%	100%
8	94%	100%	100%	98%	90%	100%
6,3	92%	99%	100%	96%	79%	100%
5,6	90%	97%	100%	95%	75%	100%
4	84%	95%	98%	91%	60%	95%
2,5	77%	92%	93%	86%	45%	88%
2	73%	90%	90%	83%	40%	85%
1,25	65%	84%	80%	76%	29%	74%
1	61%	82%	75%	72%	25%	70%
0,5	47%	63%	54%	55%	14%	45%
0,315	26%	33%	37%	31%	10%	30%
0,25	20%	21%	30%	22%	9%	25%
0,125	5%	1%	9%	4%	7%	8%
0,063	1%	0%	2%	1%	3%	3%

Bijlage K: Samenstelling gecombineerde dekvloermengsels

Combinatie 1

W/C_{add} [-]	$m_{w,\ totaal}$ [g]	m_w, Gerecycleerd betonzand 0/4 [g]	m_w, Recycled mix 0/2 [g]	m_w, Recycled mix 0/3 [g]	m_w, Mengzand 0/4 25/90 [g]	m_w, Chapyt 0/4 [g]	$m_{w,\ reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,6	218	81	10	-	-	-	126	**0,3**
0,7	254	81	10	-	-	-	162	**0,4**
0,8	290	81	10	-	-	-	199	**0,5**
0,9	327	81	10	-	-	-	235	**0,6**
1	363	81	10	-	-	-	271	**0,7**
1,1	399	81	10	-	-	-	307	**0,8**
1,2	435	81	10	-	-	-	344	**0,9**
1,3	472	81	10	-	-	-	380	**1,0**

Combinatie 2

W/C_{add} [-]	$m_{w,\ totaal}$ [g]	m_w, Gerecycleerd betonzand 0/4 [g]	m_w, Recycled mix 0/2 [g]	m_w, Recycled mix 0/3 [g]	m_w, Mengzand 0/4 25/90 [g]	m_w, Chapyt 0/4 [g]	$m_{w,\ reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,6	218	54	21	-	-	-	143	**0,4**
0,7	254	54	21	-	-	-	179	**0,5**
0,8	290	54	21	-	-	-	215	**0,6**
0,9	326	54	21	-	-	-	252	**0,7**
1	363	54	21	-	-	-	288	**0,8**
1,1	399	54	21	-	-	-	324	**0,9**
1,2	435	54	21	-	-	-	360	**1,0**
1,3	472	54	21	-	-	-	397	**1,1**

Combinatie 3

W/C_{add} [-]	$m_{w,\ totaal}$ [g]	m_w, Gerecycleerd betonzand 0/4 [g]	m_w, Recycled mix 0/2 [g]	m_w, Recycled mix 0/3 [g]	m_w, Mengzand 0/4 25/90 [g]	m_w, Chapyt 0/4 [g]	$m_{w,\ reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,6	218	81	-	15	-	-	123	**0,3**
0,7	255	81	-	15	-	-	159	**0,4**

0,8	291	81	-	15	-	-	195	**0,5**
0,9	328	81	-	15	-	-	232	**0,6**
1	364	81	-	15	-	-	268	**0,7**
1,1	400	81	-	15	-	-	305	**0,8**
1,2	437	81	-	15	-	-	341	**0,9**
1,3	473	81	-	15	-	-	377	**1,0**

Combinatie 4

W/C_{add} [-]	$m_{w,\ totaal}$ [g]	m_w, Gerecycleerd betonzand 0/4 [g]	m_w, Recycled mix 0/2 [g]	m_w, Recycled mix 0/3 [g]	m_w, Mengzand 0/4 25/90 [g]	m_w, Chapyt 0/4 [g]	$m_{w,\ reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,6	219	54	-	29	-	-	136	**0,4**
0,7	256	54	-	29	-	-	172	**0,5**
0,8	292	54	-	29	-	-	209	**0,6**
0,9	329	54	-	29	-	-	245	**0,7**
1	365	54	-	29	-	-	282	**0,8**
1,1	402	54	-	29	-	-	318	**0,9**
1,2	438	54	-	29	-	-	355	**1,0**
1,3	475	54	-	29	-	-	391	**1,1**

Combinatie 5

W/C_{add} [-]	$m_{w,\ totaal}$ [g]	m_w, Gerecycleerd betonzand 0/4 [g]	m_w, Recycled mix 0/2 [g]	m_w, Recycled mix 0/3 [g]	m_w, Mengzand 0/4 25/90 [g]	m_w, Chapyt 0/4 [g]	$m_{w,\ reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,6	205	81	-	-	0	-	123	**0,4**
0,7	239	81	-	-	0	-	157	**0,5**
0,8	273	81	-	-	0	-	191	**0,6**
0,9	307	81	-	-	0	-	225	**0,7**
1	341	81	-	-	0	-	260	**0,8**
1,1	375	81	-	-	0	-	294	**0,9**
1,2	409	81	-	-	0	-	328	**1,0**
1,3	443	81	-	-	0	-	362	**1,1**

Combinatie 6

W/C_{add} [-]	$m_{w,\ totaal}$ [g]	m_w, Gerecycleerd betonzand 0/4 [g]	m_w, Recycled mix 0/2 [g]	m_w, Recycled mix 0/3 [g]	m_w, Mengzand 0/4 25/90 [g]	m_w, Chapyt 0/4 [g]	$m_{w,\ reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,6	192	54	-	-	0	-	137	**0,4**
0,7	224	54	-	-	0	-	169	**0,5**
0,8	255	54	-	-	0	-	201	**0,6**
0,9	287	54	-	-	0	-	233	**0,7**
1	319	54	-	-	0	-	265	**0,8**
1,1	351	54	-	-	0	-	297	**0,9**
1,2	383	54	-	-	0	-	329	**1,0**
1,3	415	54	-	-	0	-	360	**1,1**

Combinatie 7

W/C_{add} [-]	$m_{w,\ totaal}$ [g]	m_w, Gerecycleerd betonzand 0/4 [g]	m_w, Recycled mix 0/2 [g]	m_w, Recycled mix 0/3 [g]	m_w, Mengzand 0/4 25/90 [g]	m_w, Chapyt 0/4 [g]	$m_{w,\ reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,6	220	-	10	44	-	-	166	**0,5**
0,7	256	-	10	44	-	-	202	**0,6**
0,8	293	-	10	44	-	-	239	**0,7**
0,9	330	-	10	44	-	-	276	**0,8**
1	366	-	10	44	-	-	312	**0,9**
1,1	403	-	10	44	-	-	349	**1,0**
1,2	440	-	10	44	-	-	385	**1,1**
1,3	476	-	10	44	-	-	422	**1,2**

Combinatie 8

W/C_{add} [-]	$m_{w,\ totaal}$ [g]	m_w, Gerecycleerd betonzand 0/4 [g]	m_w, Recycled mix 0/2 [g]	m_w, Recycled mix 0/3 [g]	m_w, Mengzand 0/4 25/90 [g]	m_w, Chapyt 0/4 [g]	$m_{w,\ reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,6	207	-	-	44	0	-	163	**0,5**
0,7	241	-	-	44	0	-	197	**0,6**
0,8	276	-	-	44	0	-	232	**0,7**
0,9	310	-	-	44	0	-	266	**0,8**
1	345	-	-	44	0	-	301	**0,9**

1,1	379	-	-	44	0	-	335	**1,0**
1,2	414	-	-	44	0	-	370	**1,1**
1,3	448	-	-	44	0	-	404	**1,2**

Combinatie 9

W/C_{add} [-]	$m_{w,\ totaal}$ [g]	m_w, Gerecycleerd betonzand 0/4 [g]	m_w, Recycled mix 0/2 [g]	m_w, Recycled mix 0/3 [g]	m_w, Mengzand 0/4 25/90 [g]	m_w, Chapyt 0/4 [g]	$m_{w,\ reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,6	193	-	-	29	0	-	163	**0,5**
0,7	225	-	-	29	0	-	195	**0,6**
0,8	257	-	-	29	0	-	228	**0,7**
0,9	290	-	-	29	0	-	260	**0,8**
1	322	-	-	29	0	-	292	**0,9**
1,1	354	-	-	29	0	-	324	**1,0**
1,2	386	-	-	29	0	-	356	**1,1**
1,3	418	-	-	29	0	-	388	**1,2**

Combinatie 10

W/C_{add} [-]	$m_{w,\ totaal}$ [g]	m_w, Gerecycleerd betonzand 0/4 [g]	m_w, Recycled mix 0/2 [g]	m_w, Recycled mix 0/3 [g]	m_w, Mengzand 0/4 25/90 [g]	m_w, Chapyt 0/4 [g]	$m_{w,\ reactie}$ [g]	W/C_{eff} [-]
0,6	220	-	-	23	0	30	166	**0,5**
0,7	257	-	-	23	0	30	203	**0,6**
0,8	293	-	-	23	0	30	240	**0,7**
0,9	330	-	-	23	0	30	276	**0,8**
1	367	-	-	23	0	30	313	**0,9**
1,1	403	-	-	23	0	30	350	**1,0**
1,2	440	-	-	23	0	30	386	**1,1**
1,3	477	-	-	23	0	30	423	**1,2**

Bijlage L: Sterktetesten gecombineerde dekvloermengsels

Combinatie 1 na 7 dagen

	Proefstuk 1	Proefstuk 2	Proefstuk 3
Lengte [mm]	160,38	159,47	160,29
Hoogte 1 [mm]	40,21	40,65	40,16
Hoogte 2 [mm]	40,23	40,17	40,20
Gemiddelde hoogte [mm]	40,22	40,41	40,18
Breedte 1 [mm]	39,58	40,50	39,42
Breedte 2[mm]	39,22	38,94	38,75
Gemiddelde breedte [mm]	39,40	39,72	39,09
Gewicht [g]	410,8	429,65	429,5
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1616	1679	1706
Buigkracht [kN]	0,33	0,36	0,50
Buigsterkte [N/mm²]	0,78	0,82	1,19
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,9	
Drukkracht 1 [kN]	3,57	5,99	6,32
Oppervlakte 1 [mm²]	1583,20	1600,00	1576,80
Spanning 1 [N/mm²]	2,25	3,74	4,01
Drukkracht 2 [kN]	5,58	5,31	3,84
Oppervlakte 2 [mm²]	1568,80	1557,60	1550,00
Spanning 2 [N/mm²]	3,55	3,41	2,48
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		3,2	

Combinatie 2 na 7 dagen

	Proefstuk 1	Proefstuk 2	Proefstuk 3
Lengte [mm]	160,03	160,14	160,07
Hoogte 1 [mm]	40,01	40,45	40,03
Hoogte 2 [mm]	39,94	40,01	40,01
Gemiddelde hoogte [mm]	39,98	40,23	40,02

Breedte 1 [mm]	38,77	37,27	39,06
Breedte 2[mm]	38,52	38,26	39,47
Gemiddelde breedte [mm]	38,65	37,77	39,27
Gewicht [g]	381,48	367	381,57
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1543	1508	1517
Buigkracht [kN]	0,16	0,14	0,17
Buigsterkte [N/mm²]	0,39	0,36	0,42
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,4	
Drukkracht 1 [kN]	1,97	1,39	2,77
Oppervlakte 1 [mm²]	1550,80	1490,80	1562,40
Spanning 1 [N/mm²]	1,27	0,93	1,77
Drukkracht 2 [kN]	1,21	1,63	1,87
Oppervlakte 2 [mm²]	1540,80	1530,40	1578,80
Spanning 2 [N/mm²]	0,79	1,07	1,18
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		1,2	

Combinatie 3 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,88	160,52	160,60
Hoogte 1 [mm]	40,07	40,44	40,56
Hoogte 2 [mm]	40,26	40,29	40,34
Gemiddelde hoogte [mm]	40,17	40,37	40,45
Breedte 1 [mm]	38,63	38,25	40,04
Breedte 2[mm]	39,16	39,25	39,38
Gemiddelde breedte [mm]	38,90	38,75	39,71
Gewicht [g]	396,76	396,43	402,23
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1589	1579	1559
Buigkracht [kN]	0,30	0,28	0,34
Buigsterkte [N/mm²]	0,71	0,67	0,78
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,7	
Drukkracht 1 [kN]	3,51	2,29	4,01

Oppervlakte 1 [mm²]	1545,20	1530,00	1600,00
Spanning 1 [N/mm²]	2,27	1,49	2,50
Drukkracht 2 [kN]	5,65	4,58	4,14
Oppervlakte 2 [mm²]	1566,40	1570,00	1575,20
Spanning 2 [N/mm²]	3,60	2,91	2,63
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		2,6	

Combinatie 4 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,92	160,09	159,95
Hoogte 1 [mm]	40,22	40,20	39,92
Hoogte 2 [mm]	40,31	39,94	40,20
Gemiddelde hoogte [mm]	40,27	40,07	40,06
Breedte 1 [mm]	40,10	40,60	40,38
Breedte 2[mm]	39,86	39,81	39,05
Gemiddelde breedte [mm]	39,98	40,21	39,72
Gewicht [g]	415,66	409,43	404,98
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1615	1588	1591
Buigkracht [kN]	0,45	0,33	0,34
Buigsterkte [N/mm²]	1,04	0,76	0,81
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,9	
Drukkracht 1 [kN]	5,45	8,01	7,41
Oppervlakte 1 [mm²]	1600,00	1600,00	1600,00
Spanning 1 [N/mm²]	3,41	5,01	4,63
Drukkracht 2 [kN]	4,92	3,85	3,40
Oppervlakte 2 [mm²]	1594,40	1592,40	1562,00
Spanning 2 [N/mm²]	3,09	2,42	2,17
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		3,5	

Combinatie 5 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,97	160,53	160,76

Hoogte 1 [mm]	40,31	40,48	40,26
Hoogte 2 [mm]	40,29	40,43	40,12
Gemiddelde hoogte [mm]	40,30	40,46	40,19
Breedte 1 [mm]	39,50	37,80	38,22
Breedte 2[mm]	39,30	39,67	39,14
Gemiddelde breedte [mm]	39,40	38,74	38,68
Gewicht [g]	394,12	396,85	396,03
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1552	1578	1585
Buigkracht [kN]	0,17	0,19	0,18
Buigsterkte [N/mm²]	0,39	0,45	0,43
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,4	
Drukkracht 1 [kN]	2,16	2,32	1,79
Oppervlakte 1 [mm²]	1580,00	1512,00	1528,80
Spanning 1 [N/mm²]	1,37	1,53	1,17
Drukkracht 2 [kN]	1,49	1,99	2,12
Oppervlakte 2 [mm²]	1572,00	1586,80	1565,60
Spanning 2 [N/mm²]	0,95	1,25	1,36
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		1,3	

Combinatie 6 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	160,63	160,30	160,24
Hoogte 1 [mm]	40,51	40,41	40,57
Hoogte 2 [mm]	40,33	40,33	40,47
Gemiddelde hoogte [mm]	40,42	40,37	40,52
Breedte 1 [mm]	40,66	39,47	39,23
Breedte 2[mm]	39,73	41,00	40,57
Gemiddelde breedte [mm]	40,20	40,24	39,90
Gewicht [g]	434,16	442,07	432,9
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1664	1698	1671
Buigkracht [kN]	0,29	0,30	0,29

Buigsterkte [N/mm²]	0,66	0,68	0,66
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,7	
Drukkracht 1 [kN]	3,46	4,44	3,54
Oppervlakte 1 [mm²]	1600,00	1578,80	1569,20
Spanning 1 [N/mm²]	2,17	2,81	2,25
Drukkracht 2 [kN]	2,65	3,63	3,60
Oppervlakte 2 [mm²]	1589,20	1600,00	1600,00
Spanning 2 [N/mm²]	1,67	2,27	2,25
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		2,2	

Combinatie 7 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	160,38	160,07	160,25
Hoogte 1 [mm]	40,17	40,33	40,35
Hoogte 2 [mm]	40,08	40,16	40,04
Gemiddelde hoogte [mm]	40,13	40,25	40,20
Breedte 1 [mm]	40,31	38,04	39,70
Breedte 2[mm]	39,53	38,62	39,25
Gemiddelde breedte [mm]	39,92	38,33	39,48
Gewicht [g]	411,45	387,79	405,08
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1602	1570	1593
Buigkracht [kN]	0,41	0,34	0,42
Buigsterkte [N/mm²]	0,96	0,83	0,99
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,9	
Drukkracht 1 [kN]	5,45	5,28	5,33
Oppervlakte 1 [mm²]	1600,00	1521,60	1588,00
Spanning 1 [N/mm²]	3,41	3,47	3,36
Drukkracht 2 [kN]	5,19	3,99	3,93
Oppervlakte 2 [mm²]	1581,20	1544,80	1570,00
Spanning 2 [N/mm²]	3,28	2,58	2,51
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		3,1	

Combinatie 8 na 7 dagen

	Proefstuk 1	Proefstuk 2	Proefstuk 3
Lengte [mm]	160,00	160,10	160,18
Hoogte 1 [mm]	40,37	39,93	39,98
Hoogte 2 [mm]	39,97	40,10	40,10
Gemiddelde hoogte [mm]	40,17	40,02	40,04
Breedte 1 [mm]	40,24	39,20	38,20
Breedte 2[mm]	38,91	38,56	38,63
Gemiddelde breedte [mm]	39,58	38,88	38,42
Gewicht [g]	439,79	440,46	425,69
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1729	1768	1728
Buigkracht [kN]	0,42	0,39	0,34
Buigsterkte [N/mm²]	0,99	0,94	0,83
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,9	
Drukkracht 1 [kN]	5,68	6,40	5,72
Oppervlakte 1 [mm²]	1600,00	1568,00	1528,00
Spanning 1 [N/mm²]	3,55	4,08	3,75
Drukkracht 2 [kN]	4,19	8,51	5,39
Oppervlakte 2 [mm²]	1556,40	1542,40	1545,20
Spanning 2 [N/mm²]	2,69	5,52	3,49
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		3,8	

Combinatie 9 na 7 dagen

	Proefstuk 1	Proefstuk 2	Proefstuk 3
Lengte [mm]	159,41	159,97	159,77
Hoogte 1 [mm]	40,41	40,42	40,35
Hoogte 2 [mm]	40,28	40,28	40,23
Gemiddelde hoogte [mm]	40,35	40,35	40,29
Breedte 1 [mm]	39,73	39,56	39,66
Breedte 2[mm]	38,86	38,56	39,00
Gemiddelde breedte [mm]	39,30	39,06	39,33

Gewicht [g]	407,8	426,83	416,54
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1614	1693	1645
Buigkracht [kN]	0,27	0,39	0,32
Buigsterkte [N/mm²]	0,64	0,92	0,75
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,8	
Drukkracht 1 [kN]	3,49	6,00	5,63
Oppervlakte 1 [mm²]	1589,20	1582,40	1586,40
Spanning 1 [N/mm²]	2,20	3,79	3,55
Drukkracht 2 [kN]	2,85	3,85	4,12
Oppervlakte 2 [mm²]	1554,40	1542,40	1560,00
Spanning 2 [N/mm²]	1,84	2,50	2,64
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		2,8	

Combinatie 10 na 7 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	160,01	160,06	160,21
Hoogte 1 [mm]	40,02	40,15	40,36
Hoogte 2 [mm]	40,13	40,08	39,77
Gemiddelde hoogte [mm]	40,08	40,12	40,07
Breedte 1 [mm]	39,74	39,72	40,04
Breedte 2[mm]	40,72	40,25	39,20
Gemiddelde breedte [mm]	40,23	39,99	39,62
Gewicht [g]	379,2	380,65	366,24
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1470	1483	1440
Buigkracht [kN]	0,25	0,26	0,22
Buigsterkte [N/mm²]	0,58	0,61	0,52
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,6	
Drukkracht 1 [kN]	2,91	3,19	1,55
Oppervlakte 1 [mm²]	1589,60	1588,80	1600,00
Spanning 1 [N/mm²]	1,83	2,01	0,97
Drukkracht 2 [kN]	1,91	1,91	2,14

Oppervlakte 2 [mm²]	1600,00	1600,00	1568,00
Spanning 2 [N/mm²]	1,20	1,19	1,36
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		1,4	

Combinatie 1 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,20	159,23	159,09
Hoogte 1 [mm]	40,08	40,15	39,91
Hoogte 2 [mm]	40,13	40,04	40,01
Gemiddelde hoogte [mm]	40,11	40,10	39,96
Breedte 1 [mm]	38,88	38,40	38,78
Breedte 2[mm]	39,31	38,72	38,38
Gemiddelde breedte [mm]	39,10	38,56	38,58
Gewicht [g]	394,6	396	386,9
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1581	1609	1577
Buigkracht [kN]	0,30	0,35	0,34
Buigsterkte [N/mm²]	0,71	0,85	0,84
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,8	
Drukkracht 1 [kN]	4,40	5,62	3,96
Oppervlakte 1 [mm²]	1555,2	1536	1551,2
Spanning 1 [N/mm²]	2,83	3,66	2,55
Drukkracht 2 [kN]	2,63	2,93	2,91
Oppervlakte 2 [mm²]	1572,4	1548,8	1535,2
Spanning 2 [N/mm²]	1,67	1,89	1,89
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		2,4	

Combinatie 2 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,99	159,34	159,40
Hoogte 1 [mm]	39,85	39,83	39,91
Hoogte 2 [mm]	39,87	39,89	39,90
Gemiddelde hoogte [mm]	39,86	39,86	39,91

Breedte 1 [mm]	37,82	38,06	38,11
Breedte 2[mm]	39,57	39,61	39,05
Gemiddelde breedte [mm]	38,70	38,84	38,58
Gewicht [g]	372,1	356,7	366,3
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1508	1446	1493
Buigkracht [kN]	0,11	0,12	0,14
Buigsterkte [N/mm²]	0,28	0,30	0,35
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,5	
Drukkracht 1 [kN]	1,07	1,12	1,00
Oppervlakte 1 [mm²]	1512,8	1522,4	1524,4
Spanning 1 [N/mm²]	0,71	0,73	0,66
Drukkracht 2 [kN]	1,93	1,29	2,03
Oppervlakte 2 [mm²]	1582,8	1584,4	1562
Spanning 2 [N/mm²]	1,22	0,82	1,30
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		1,1	

Combinatie 3 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,85	159,22	160,09
Hoogte 1 [mm]	40,37	40,15	40,15
Hoogte 2 [mm]	40,09	40,11	40,24
Gemiddelde hoogte [mm]	40,23	40,13	40,20
Breedte 1 [mm]	40,53	39,38	39,54
Breedte 2[mm]	38,69	40,23	38,45
Gemiddelde breedte [mm]	39,61	39,81	39,00
Gewicht [g]	391,7	381,8	405,3
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1538	1501	1615
Buigkracht [kN]	0,38	0,35	0,38
Buigsterkte [N/mm²]	0,90	0,81	0,91
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,9	
Drukkracht 1 [kN]	6,16	4,27	5,68

Oppervlakte 1 [mm²]	1600	1575,2	1581,6
Spanning 1 [N/mm²]	3,85	2,71	3,59
Drukkracht 2 [kN]	2,28	2,61	4,89
Oppervlakte 2 [mm²]	1547,6	1600	1538
Spanning 2 [N/mm²]	1,47	1,63	3,18
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		2,7	

Combinatie 4 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	160,86	160,30	160,83
Hoogte 1 [mm]	39,60	40,08	40,09
Hoogte 2 [mm]	40,01	40,07	39,21
Gemiddelde hoogte [mm]	39,81	40,08	39,65
Breedte 1 [mm]	39,21	39,42	39,29
Breedte 2[mm]	38,70	38,50	38,34
Gemiddelde breedte [mm]	38,96	38,96	38,82
Gewicht [g]	366,1	379	381,6
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1468	1514	1542
Buigkracht [kN]	0,24	0,23	0,24
Buigsterkte [N/mm²]	0,58	0,56	0,60
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,6	
Drukkracht 1 [kN]	2,45	3,47	3,59
Oppervlakte 1 [mm²]	1568,4	1576,8	1571,6
Spanning 1 [N/mm²]	1,56	2,20	2,28
Drukkracht 2 [kN]	1,67	2,42	2,39
Oppervlakte 2 [mm²]	1548	1540	1533,6
Spanning 2 [N/mm²]	1,08	1,57	1,56
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		1,7	

Combinatie 5 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,80	159,79	159,92

Hoogte 1 [mm]	39,82	39,85	39,88
Hoogte 2 [mm]	39,81	39,66	39,26
Gemiddelde hoogte [mm]	39,82	39,76	39,57
Breedte 1 [mm]	38,45	39,94	38,55
Breedte 2[mm]	37,92	38,39	39,38
Gemiddelde breedte [mm]	38,19	39,17	38,97
Gewicht [g]	378,5	391,7	384,5
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1558	1574	1559
Buigkracht [kN]	0,21	0,20	0,22
Buigsterkte [N/mm²]	0,53	0,49	0,53
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,5	
Drukkracht 1 [kN]	1,73	2,13	1,13
Oppervlakte 1 [mm²]	1538	1597,6	1542
Spanning 1 [N/mm²]	1,13	1,33	0,73
Drukkracht 2 [kN]	2,28	2,22	2,16
Oppervlakte 2 [mm²]	1516,8	1535,6	1575,2
Spanning 2 [N/mm²]	1,50	1,44	1,37
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		1,3	

Combinatie 6 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	159,54	159,91	159,42
Hoogte 1 [mm]	39,90	39,84	39,65
Hoogte 2 [mm]	39,42	39,93	39,96
Gemiddelde hoogte [mm]	39,66	39,89	39,81
Breedte 1 [mm]	39,60	38,24	38,70
Breedte 2[mm]	40,12	38,60	39,14
Gemiddelde breedte [mm]	39,86	38,42	38,92
Gewicht [g]	420,3	411,3	411,7
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1666	1678	1667
Buigkracht [kN]	0,28	0,35	0,26

Buigsterkte [N/mm²]	0,66	0,85	0,62
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,7	
Drukkracht 1 [kN]	3,99	4,63	4,10
Oppervlakte 1 [mm²]	1584	1529,6	1548
Spanning 1 [N/mm²]	2,52	3,02	2,65
Drukkracht 2 [kN]	2,25	2,09	1,92
Oppervlakte 2 [mm²]	1600	1544	1565,6
Spanning 2 [N/mm²]	1,40	1,35	1,22
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		2,0	

Combinatie 7 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	160,36	160,48	160,53
Hoogte 1 [mm]	39,74	39,75	39,93
Hoogte 2 [mm]	39,79	39,78	39,91
Gemiddelde hoogte [mm]	39,77	39,77	39,92
Breedte 1 [mm]	40,30	39,85	40,11
Breedte 2[mm]	39,22	39,45	38,94
Gemiddelde breedte [mm]	39,76	39,65	39,53
Gewicht [g]	387,8	393,5	392,2
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1530	1555	1548
Buigkracht [kN]	0,30	0,38	0,35
Buigsterkte [N/mm²]	0,73	0,91	0,82
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,8	
Drukkracht 1 [kN]	3,06	3,51	3,07
Oppervlakte 1 [mm²]	1600	1594	1600
Spanning 1 [N/mm²]	1,91	2,20	1,92
Drukkracht 2 [kN]	4,25	5,10	5,21
Oppervlakte 2 [mm²]	1568,8	1578	1557,6
Spanning 2 [N/mm²]	2,71	3,23	3,34
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		2,6	

Combinatie 8 na 28 dagen

	Proefstuk 1	Proefstuk 2	Proefstuk 3
Lengte [mm]	159,76	159,87	159,87
Hoogte 1 [mm]	39,91	39,97	39,91
Hoogte 2 [mm]	39,97	39,87	40,01
Gemiddelde hoogte [mm]	39,94	39,92	39,96
Breedte 1 [mm]	35,23	37,15	38,82
Breedte 2[mm]	35,16	38,72	39,78
Gemiddelde breedte [mm]	35,20	37,94	39,30
Gewicht [g]	372,5	400,2	412,1
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1659	1653	1641
Buigkracht [kN]	0,26	0,26	0,29
Buigsterkte [N/mm²]	0,71	0,65	0,70
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,7	
Drukkracht 1 [kN]	3,78	3,63	2,94
Oppervlakte 1 [mm²]	1409,2	1486	1552,8
Spanning 1 [N/mm²]	2,69	2,44	1,89
Drukkracht 2 [kN]	4,48	5,48	4,55
Oppervlakte 2 [mm²]	1406,4	1548,8	1591,2
Spanning 2 [N/mm²]	3,19	3,54	2,86
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		2,8	

Combinatie 9 na 28 dagen

	Proefstuk 1	Proefstuk 2	Proefstuk 3
Lengte [mm]	159,99	159,96	159,96
Hoogte 1 [mm]	39,87	40,01	39,98
Hoogte 2 [mm]	39,95	40,00	39,99
Gemiddelde hoogte [mm]	39,91	40,01	39,99
Breedte 1 [mm]	39,69	39,41	39,33
Breedte 2[mm]	39,45	39,49	39,93
Gemiddelde breedte [mm]	39,57	39,45	39,63

Gewicht [g]	433,3	434,3	429,1
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1715	1720	1693
Buigkracht [kN]	0,45	0,57	0,49
Buigsterkte [N/mm²]	1,07	1,36	1,15
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		1,2	
Drukkracht 1 [kN]	4,71	6,40	4,16
Oppervlakte 1 [mm²]	1587,6	1576,4	1573,2
Spanning 1 [N/mm²]	2,97	4,06	2,64
Drukkracht 2 [kN]	7,35	6,14	5,54
Oppervlakte 2 [mm²]	1578	1579,6	1597,2
Spanning 2 [N/mm²]	4,66	3,89	3,47
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		3,6	

Combinatie 10 na 28 dagen

	Proefstuk 1	**Proefstuk 2**	**Proefstuk 3**
Lengte [mm]	160,63	160,56	160,30
Hoogte 1 [mm]	39,98	39,67	39,92
Hoogte 2 [mm]	39,95	39,97	39,57
Gemiddelde hoogte [mm]	39,97	39,82	39,75
Breedte 1 [mm]	39,62	39,53	39,83
Breedte 2[mm]	39,19	39,16	38,46
Gemiddelde breedte [mm]	39,41	39,35	39,15
Gewicht [g]	366,8	366,7	364,8
Volume [m³]	0,00	0,00	0,00
Dichtheid [kg/m³]	1450	1458	1463
Buigkracht [kN]	0,27	0,26	0,25
Buigsterkte [N/mm²]	0,65	0,62	0,62
Gemiddelde buigsterkte [N/mm²]		0,6	
Drukkracht 1 [kN]	2,54	2,17	1,62
Oppervlakte 1 [mm²]	1584,8	1581,2	1593,2
Spanning 1 [N/mm²]	1,60	1,37	1,01
Drukkracht 2 [kN]	3,20	2,78	2,34

Oppervlakte 2 [mm²]	1567,6	1566,4	1538,4
Spanning 2 [N/mm²]	2,04	1,78	1,52
Gemiddelde druksterkte [N/mm²]		1,6	