KU LEUVEN

FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN

KU Leuven - Brugge

Vezelversterkt alkalisch geactiveerd materiaal op basis van bouw- en slooppuin

Invloed op de verse en mechanische eigenschappen

Thibault DECUYPER

Promotor: Prof. Dr.-Ing. Jiabin Li

Copromotoren: Drs. Jasper Vitse
Drs. Dongsheng Zhang

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

Academiejaar 2024-2025

© Copyright KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, kan u zich richten tot: KU Leuven Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen, W. de Croylaan 56, B-3000 Heverlee, email info.iiw@kuleuven.be.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut, om te refereren naar dit werk in publicaties en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.



Copyright informatie:
studiewerk van een student in het kader van de academische opleiding en examenbeoordeling.
Na deze beoordeling vond geen correctie plaats van het studiewerk.

Voorwoord

Deze masterproef, getiteld: *"Invloed van vezelversterking op de verse en mechanische eigenschappen van alkalisch geactiveerd materiaal op basis van bouw- en slooppuin"*, vormt het afsluitende werk van mijn opleiding. Deze thesis wordt ingediend ter verkrijging van het diploma: “Master in de Industriële Wetenschappen, Bouwkunde” aan de KU Leuven, Campus Brugge.

Het doel van deze masterproef is om de invloed van vezels op de eigenschappen van alkalisch geactiveerd materiaal (AAM) te onderzoeken. In deze thesis zal echter duidelijk worden dat er niet uitsluitend werd gefocust op deze hoofdvraag. Er werd regelmatig afgeweken van de centrale onderzoeksvraag om bijkomende studies uit te voeren, met als doel een zo volledig mogelijk inzicht in het onderwerp te verkrijgen.

Ik heb ernaar gestreefd een document te creëren dat zowel een stevige basis vormt als inspiratie biedt voor toekomstig onderzoek, en dat nieuwe lezers een helder en toegankelijk beeld geeft van AAM en geopolymeren.

Voor het tot stand brengen van deze masterproef wil ik allereerst mijn dank uitspreken naar Prof. Dr.-Ing. Jiabin Li voor de waardevolle begeleiding en ondersteuning gedurende dit traject. De vele besprekingen van resultaten en kritische bedenkingen heeft mij instaat gesteld het onderzoeksproces te optimaliseren. Dit om correcte resultaten en beproevingsmethodes te ontwikkelen.

Daarnaast gaat mijn oprechte dank uit naar Drs. Jasper Vitse voor zijn voortdurende ondersteuning, zijn bereidheid om al mijn vragen te beantwoorden en zijn uitgebreide, heldere uitleg. De waardevolle resultaten van zijn onderzoek vormen een stevig fundament waarop deze studie kon voortbouwen. Dankzij zijn bevindingen was het mogelijk om dieper op het onderwerp in te gaan en het verder uit te breiden. Dit heeft geleid tot een bredere en diepgaandere analyse van specifieke aspecten, wat een belangrijke bijdrage leverde aan de verrijking van de inzichten binnen dit vakgebied. Ook wil ik Drs. Ahmad Sultan van harte bedanken voor zijn hulp en ondersteuning waar nodig, en voor het inspringen op momenten van afwezigheid door ziekte. Ook wil ik graag dr. Ir. Brecht Vandevyvere van harte bedanken voor het beschikbaar stellen van de gebruikte synthetische polypropyleen (PP)-macrovezels.

Graag wil ik ook mijn dank uitspreken naar de docenten die mij gedurende mijn opleiding hebben ondersteund en altijd bereid waren om mijn vele vragen uitgebreid te beantwoorden.

Ten slotte wil ik graag mijn vriendin, Aleksandra Korbut, bedanken voor haar steun en voor haar hulp bij het op maat brengen van de vezels. Mijn dank gaat ook uit naar Gwen Meneve voor het ter beschikking stellen van zijn materiaal, en naar Virginie Deschoemaeker voor haar zorg en toewijding. Daarnaast ben ik mijn broers, zussen en vrienden bijzonder dankbaar voor hun onvoorwaardelijke steun en aanmoediging gedurende het hele traject. Hun vertrouwen in mij en hun constante aanwezigheid hebben me enorm gemotiveerd. Dankzij hun liefde en begrip kon ik dit proces met meer vertrouwen en doorzettingsvermogen doormaken.

Thibault Decuyper

Masterstudent in de industriële ingenieurswetenschappen, afstudeerrichting bouwkunde

Academiejaar 2024–2025

Samenvatting

Deze masterproef richt zich op het bros karakter van AAM en onderzoekt hoe de toevoeging van vezels dit nadeel kan beperken. Daarnaast wordt in deze studie een vergelijkende analyse gemaakt tussen AAM en Portlandcement om te onderzoeken in hoeverre AAM een deel van het Portlandcement in toepassingen kan vervangen. Dit onderzoek vindt plaats binnen het bredere kader van de Europese Green Deal, die streeft naar een CO_2-neutraal Europa tegen 2050. De bouwsector staat hierbij voor de uitdaging haar ecologische voetafdruk te verkleinen, aangezien de productie van Portlandcement een belangrijke bron van CO_2-uitstoot is en de zoektocht naar duurzame alternatieven stimuleert.

Naast deze hoofdvraag worden ook verschillende aanvullende onderzoeken uitgevoerd om een breder en diepgaander inzicht te verkrijgen in het gedrag en de eigenschappen van het AAM.

AAM's maken gebruik van precursors afkomstig uit reststromen van andere industrieën, zoals gegranuleerd hoogovenslak, een bijproduct van de staalindustrie dat fungeert als reactieve binder en bijdraagt aan het vormen van het bindingsmateriaal en het reduceren van CO_2-uitstoot. Daarnaast kunnen bouw- en slooppuin worden toegepast als vulstof met een beperkte mate van reactieve eigenschappen, wat bijdraagt aan de circulaire economie en verduurzaming van de bouwsector.

In de literatuurstudie wordt de basis van AAM behandeld, met nadruk op de rol van alkalische activators zoals natriumhydroxide en natronwaterglas, die essentieel zijn voor de vorming van AAM. Verder worden verschillende precursors en minder reactieve grondstoffen besproken, waaronder vliegas afkomstig van steenkool en huishoudelijk afvalverbranding, metakaolien, gemalen gegranuleerd hoogovenslak (GGBS), gerecycled betonpuinpoeder (RCP) en gerecycled baksteenpoeder (RBP), evenals hun invloed op de chemische samenstelling en eigenschappen van AAM. Daarnaast wordt ook de rol van zeezand ten opzichte van CEN-zand besproken, evenals additieven zoals vezels en plastificeerder, die de verse en mechanische eigenschappen van het eindproduct beïnvloeden.

Het onderzoek zelf richt zich op het vaststellen van de verse en mechanische eigenschappen van vezelversterkte AAM, gebaseerd op bouw- en slooppuin. Hiervoor werden natronwaterglas en natriumhydroxide als alkalische activator gebruikt, waarbij de berekeningsmethode voor de nodige hoeveelheid activator werd aangepast. Het onderzoek startte met het samenstellen van mengsels waarbij de percentage GGBS, RBP en RCP continu werden gevarieerd om zo de optimale samenstelling te bepalen. Uiteindelijk zijn 31 verschillende mengsels getest op zowel verse als mechanische eigenschappen. Omdat er geen gestandaardiseerde beproevingsnormen voor AAM bestaan, werden bestaande normen gebruikt en aangepast om beter aan te sluiten bij de eigenschappen van AAM. Tijdens het onderzoek werden aanvullende testen uitgevoerd, zoals het meten van waterabsorptie voor poeder en het onderzoeken van de invloed van ontkistingstijd en uitharding in een wateromgeving.

Experimenten met de AAM-pasta's resulteerden in de selectie van de meest voordelige mengverhouding, die vervolgens werd gebruikt voor de productie van AAM-mortel. Hierbij werd de invloed van het zandpercentage als variabele onderzocht, zonder rekening te houden met waterabsorptie. In een volgende fase werden vezels toegevoegd aan de AAM-mortel om de mechanische eigenschappen, zoals druksterkte en buigsterkte, te verbeteren. De optimalisatie van mengverhoudingen en testmethoden wordt gedetailleerd besproken.

De experimenten tonen aan dat de toevoeging van vezels een merkbare invloed heeft op de eigenschappen van AAM. Hoewel verwacht werd dat de vezels zouden bijdragen aan een verbetering van de mechanische prestaties, wijzen de resultaten in de praktijk juist op een afname van zowel de druk- als buigsterkte. Deze daling is grotendeels te verklaren door een verminderde verdichting van het mengsel en de insluiting van lucht, veroorzaakt door de aanwezigheid van vezels in het systeem.

Desondanks werd een positief effect waargenomen op het breukgedrag: het typische, explosieve falen van ongewapende AAM werd aanzienlijk verminderd. De vezels dragen dus bij aan een gecontroleerder, minder abrupt bezwijkmechanisme, wat vanuit veiligheids- en duurzaamheidsoogpunt relevant is. Bovendien heeft dit een positief effect op het na-scheurgedrag.

Gedurende dit proces werden verschillende apparaten, die defect waren, onderdelen misten of last hadden van softwareproblemen, grondig onderzocht en hersteld. Hierdoor kunnen zowel medestudenten als toekomstige onderzoekers nu diepgaand onderzoek uitvoeren, aangezien de apparatuur nu naar behoren functioneert en beschikbaar is voor gebruik. Daarnaast werden diverse problemen met het materiaal opgelost, waaronder het vinden van een geschikte ontkistingsolie voor het AAM, wat cruciaal was voor het behalen van de gewenste resultaten in de experimenten.

Dit onderzoek levert waardevolle inzichten in de wisselwerking tussen vezels en AAM-materiaal, en benadrukt de noodzaak om vezeldosering, spreiding en mengtechniek verder te optimaliseren. De inhoud van deze masterproef vormt daarmee een bruikbare basis voor toekomstig onderzoek. Tegelijk biedt dit onderzoek een praktische leidraad voor studenten en onderzoekers die zich verder willen verdiepen in het ontwerp en de toepassing van alternatieve bindmiddelen in de bouwsector.

Summary

This master thesis focuses on the brittle nature of AAM and investigates how the addition of fibres can mitigate this drawback. Additionally, the study includes a comparative analysis between AAM and Portland cement to explore the extent to which AAM can replace Portland cement in various applications. This research is conducted within the broader framework of the European Green Deal, which aims to achieve a CO_2-neutral Europe by 2050. The construction sector faces the challenge of reducing its ecological footprint, as Portland cement production is a significant source of CO_2 emissions, thereby driving the search for sustainable alternatives.

Besides this main research question, several supplementary studies were carried out to gain a broader and deeper understanding of the behaviour and properties of AAM. AAMs utilize precursors derived from waste streams of other industries, such as granulated blast furnace slag, a byproduct of the steel industry that acts as a reactive binder contributing to the formation of the binding material and the reduction of CO_2 emissions. Moreover, construction and demolition waste can be used as filler material with a limited degree of reactivity, supporting the circular economy and the sustainability of the construction sector.

The literature review covers the fundamentals of AAM, emphasizing the role of alkaline activators such as sodium hydroxide and water glass (sodium silicate), which are essential for AAM formation. It further discusses various precursors and less reactive raw materials, including coal fly ash, municipal solid waste incineration ash, metakaolin, ground granulated blast furnace slag (GGBS), recycled concrete powder (RCP), and recycled brick powder (RBP), as well as their influence on the chemical composition and properties of AAM. The role of sea sand compared to standard CEN sand is also examined, alongside additives such as fibres and plasticizers, which affect the fresh and mechanical properties of the final product.

The experimental research focused on determining the fresh and mechanical properties of fibre-reinforced AAM based on construction and demolition waste. Sodium silicate and sodium hydroxide were used as alkaline activators, with the calculation method for the required activator dosage adjusted. The study began by preparing mixtures in which the percentages of GGBS, RBP, and RCP were continuously varied to determine the optimal composition. Ultimately, 31 different mixtures were tested for both fresh and mechanical properties. Because no standardized testing protocols exist for AAM, existing standards were adapted to better fit the characteristics of AAM. Additional tests were conducted during the study, such as measuring water absorption of powders and investigating the influence of demoulding time and curing in a water environment.

Experiments with AAM pastes resulted in the selection of the most favourable mixing ratio, which was subsequently used for the production of AAM mortar. The influence of sand content was investigated as a variable, without accounting for water absorption. In a following phase, fibres were added to the AAM mortar to improve mechanical properties such as compressive and flexural strength. The optimization of mixing ratios and testing methods is discussed in detail.

The experiments showed that the addition of fibres has a noticeable impact on the properties of AAM. Although it was expected that fibres would improve mechanical performance, the results actually indicated a decrease in both compressive and flexural strength. This decline is largely explained by reduced compaction of the mixture and air entrainment caused by the presence of fibres in the system. Nonetheless, a positive effect was observed regarding fracture behaviour: the typical explosive failure of unreinforced AAM was significantly mitigated. The fibres contribute to a more controlled, less abrupt failure mechanism, which is relevant from both safety and sustainability perspectives. Additionally, this had a positive effect on post-crack behaviour.

During this process, several devices that were defective, missing components, or suffering from software issues were thoroughly examined and repaired. As a result, fellow students and future researchers can now conduct in-depth research, as the equipment is fully functional and available for use. Various material-related issues were also resolved, including the identification of a suitable release agent for AAM, which was crucial for achieving the desired results in the experiments.

This research provides valuable insights into the interaction between fibres and AAM materials, emphasizing the need for further optimization of fibre dosage, dispersion, and mixing techniques. The findings of this thesis thus form a useful basis for future research. At the same time, this study offers a practical guide for students and researchers who wish to further explore the design and application of alternative binders in the construction sector.

Keywords: Alkali activated materials, CO_2 Neutrality, Recycled Concrete Powder (RCP), Recycled Brick Powder (RBP), Circular Economy.

Fibre-reinforced alkali-activated material based on construction and demolition rubble

Influence on the fresh and mechanical properties

Thibault Decuyper
Supervisors: Prof. Dr.-Ing. Jiabin Li, Drs. Jasper Vitse
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering Technology
KU Leuven - Campus Bruges
8200 Bruges, Belgium

Abstract—This study explores the impact of flax fibre addition on the fresh and mechanical properties of alkali-activated materials (AAM) made from construction and demolition waste. Optimised mixtures of ground granulated blast furnace slag and recycled brick powder were activated using sodium hydroxide and sodium silicate. Fibre addition led to reduced compressive and flexural strength due to lower workability and air entrapment, but improved fracture behaviour by promoting more ductile failure. These findings support the potential of fibre-reinforced alkali activated materials in sustainable construction and provide a foundation for further research.

Keywords—AAM; Alkaline Activators; GGBS; RCP; RBP

I. INTRODUCTION

The construction industry is a major contributor to global CO_2 emissions, responsible for approximately 23% of total emission [2], largely due to the production of portlandcement, which accounts for approximately 5–7% of global CO_2-emissions [3]. At the same time, the sector generates significant amounts of construction and demolition waste, highlighting the urgent need for more sustainable and circular building practices [4]. The sector also generates large volumes of construction and demolition waste (CDW), emphasizing the need for more sustainable and circular practices aligned with the European Green Deal, which targets net-zero emissions by 2050 and a 55% reduction by 2030 [5].

Geopolymer binders, produced from industrial by-products such as fly ash and ground granulated blast furnace slag (GGBS), offer a promising low-carbon alternative to traditional cement [6].

However, alkali activated materials (AAMs) are known for their inherently brittle nature, which limits their structural applications [7]. To enhance their toughness and broaden their usability, this study investigates the incorporation of fibers.

The aim of this research is to systematically evaluate the effect of fiber reinforcement on both the fresh and mechanical properties of AAM mixtures made with recycled aggregates. This study contributes to the development of sustainable, circular (as shown in Fig. 1), and mechanically improved construction materials for future-oriented applications.

II. METHODOLOGY

A. Raw materials

The GGBS used in this study is ECO2cem, produced by Ecocem in Moerdijk, and conforms to the EN 15167-1:2006 standard [8], [9]. It was stored dry at room temperature (~20 °C) in the structural engineering laboratory at KU Leuven – Campus Bruges. The recycled brick powder (RBP), a by-product of brick manufacturing supplied by Ploegsteert, was initially stored outdoors in moist conditions, then dried at 100°C for 24 hours, cooled, sieved through a 125 µm mesh, and sealed for storage. The chemical compositions of both the GGBS and RBP are presented in TABLE I.

Tap water, despite EN 196-1:2016 prescribing distilled water for cement strength tests, was used due to the lack of specific standards for alkali-activated materials; its impurities have minimal impact since AAM reactions do not depend on hydration [10], [9], [11]. CEN reference sand, conforming to EN 196-1:2016 specifications, was verified through sieve analysis [9].

Fig. 1. *Linear economy versus circular economy [1]*

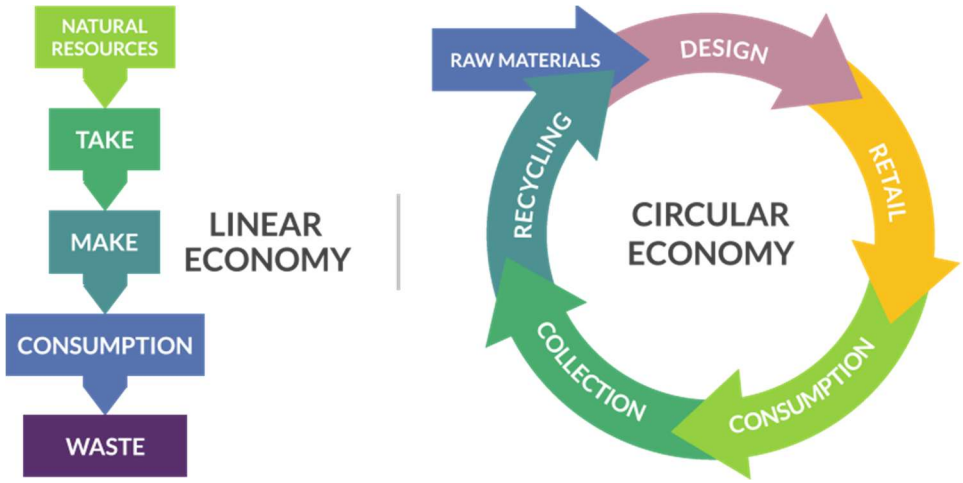


TABLE I. CHEMICAL COMPOSITION OF THE USED MATERIALS

Oxide (Quantity/%)	GGBS	RBP
SiO_2	37.5	63.2
AI_2O_3	10.5	13.0
Fe_2O_3	< 0.5	4.58
CaO	42.5	10.8
MgO	6	1.83
K_2O	< 1	2.72
Na_2O_3	< 0.5	1.89

A single variant of sodium silicate solution (waterglass) was used in this study composed of 7.9% Na_2O, 25.9% SiO_2, and 66.2% H_2O [12]. Sodium hydroxide was stored airtight and handled under strict safety protocols due to its corrosive nature, requiring appropriate personal protective equipment [13].

Flax fibers, sourced from Wavalin and cultivated in Belgium and Northern France, were retted, sorted by diameter using sieves (500 µm, 1 mm, and 2 mm), and stored accordingly, as shown in Fig. 2 [14].

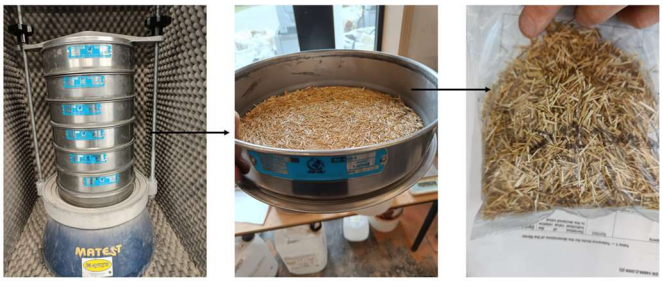


Fig. 2. Flax fibre classification

Synthetic polypropylene (PP) macro-fibers (Structo), produced by Fitco and compliant with EN 14889-2, were used, s shown in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**. These fibers have a length of 55 mm and a diameter of 0.65 mm.



Fig. 3. *Synthetic polypropylene macro-fibers*

B. Mixdesign

Based on previous studies [15], optimal mechanical properties were obtained using a precursor-to-activator system with the following ratios: Na_2O/binder = 8 wt.%, SiO_2/Na_2O molar ratio = 1.38, and water-to-binder ratio (w/b) = 0.40 (also shown in TABLE II.). In the present study, several mixtures were developed to validate and fine-tune this formulation.

TABLE II. MIX DESIGN PARAMETERS

Parameters	Values
Na_2O/b	8.00%
SiO_2 / Na_2O (Molar mass ratio)	1.38
w/b	0.40

Based on previous research [16], the apparent density of the fiber-free mortar mixture 16-C (containing 50% sand, see TABLE III.) was determined to be 2190 kg/m³. This value was used to calculate the required material quantities.

To fill one prism mold (40 × 40 × 160 mm³), approximately 561.6 g of mortar was required. For casting three prisms, performing a mini-slump test, and accounting for material loss, a total batch size of 2560.5 g was prepared.

Fibers were added to reduce cracking and brittleness. Using the measured density, fiber contents of 3, 6, and 9 kg/m³ were converted to specimen-scale masses. For example, 3 kg/m³ corresponds to the amount calculated in Equation (1).

$$3\ \frac{kg}{m^3} \times 2.5605kg \times \frac{1}{2190\ kg/m^3} = 0.0035kg = 3.5g \qquad (1)$$

Although differences between fiber types are noted in the naming conventions of the mixtures, the same dosages (3, 6, and 9 kg/m³) were applied uniformly to all fiber types, as shown in TABLE III. This allows a direct comparison of fiber influence on the AAM properties while maintaining consistency in the overall mix design. This method ensured precise dosing of fibers per specimen.

TABLE III. PARAMETERS FOR FIBRE-REINFORCED AAM MORTARS

Mix ID	Fibres contant [kg/m³]	Fibres amount [g]	Sand [g]	GGBS [g]	RBP [g]	Alkaline activator [g]
16-C	0	0	1280.3	480	320	480.27
16-C-1	3	3.5	1280.3	480	320	480.27
16-C-2	6	7.0	1280,3	480	320	480.27
16-C-3	9	9.0	1280,3	480	320	480.27

C. *Preparations*

The NaOH solution was first prepared and allowed to cool for approximately 24 hours. Next, the Na_2SiO_3 solution was added to the cooled NaOH solution, and the combined alkaline solution was left to cool for another 24 hours before mixing. This procedure is crucial to control the reaction kinetics and prevent adverse effects on the structure formation of the AAM, ensuring better and more consistent results [11].

The mixing-procedure was developed based on EN 196-1 and previous studies [9], [17]. All fillers were mixed at low speed (LS) for 2 minutes for uniformity. The alkaline solution was then added over 30 seconds during 1 minute of LS mixing, marking "zero time[1]." Sand was gradually added over 30 seconds at LS to ensure even distribution. Fibers were added over 60 seconds with some manual help during 1 minute of LS mixing. Finally, the mix was stirred at high speed (HS) for 2 minutes for full homogenization, totaling 8 minutes of mixing.

Specimens were stored in a climate chamber compliant with NBN EN 196-1:2016 [9], maintained at (20 ± 1) °C and a minimum relative humidity of 90%. Due to occasional fluctuations in humidity, specimens were covered with plastic foil to preserve moisture.

III. TESTPROGRAM

A. *Mini-slump test (based on NBN EN 1015-3)*

The mini-slump test was conducted to assess the consistency of fresh AAM-mortar. The test setup was based on EN 1015-3, with modifications adapted for AAM. A small frustum-shaped cone (according to ASTM C1437) was used, with dimensions of 60 mm in height, 100 mm bottom diameter, and 70 mm top diameter [9].

The inside of the cone and the surface of the table were coated with a thin layer of mold-release oil suitable for AAM (Marginel 335 from Demula) [18]. The mortar was placed into the cone in two equal layers, each compacted with 10 short strokes using a tamping rod. After leveling the surface, the cone was carefully lifted vertically after 15 seconds. The flow table was then operated by rotating the crank 15 times at a rate of approximately once per second to simulate vibration and ensure homogeneous spread.

Two diameters were measured at right angles, and their average was taken as the spread value (as shown in 0). If either diameter deviated more than 10% from the mean, the test was repeated. The test was conducted twice per mix to ensure reproducibility, and all equipment was thoroughly cleaned between tests.

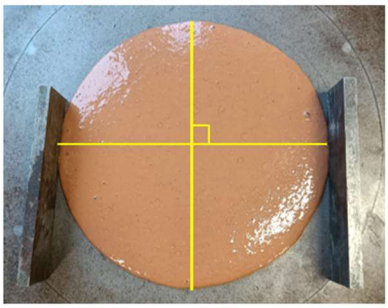


Fig. 4. *Measuring of the mini slump*

B. *Compressive strength test (based on NBN EN 196-1)*

The compressive strength test is conducted using a testing machine compliant with NBN EN 196-1:2016, adapted for AAM [9]. The machine must ensure precise vertical alignment of the ram and platen to apply uniform load through the specimen's center. Compression platens are made of tungsten carbide or hardened steel (minimum HV 600), with strict flatness and surface finish requirements.

An adapter (intermediate piece) is used between the platens and the specimen to ensure proper load transfer. The specimen, typically halves of a prism leftover from a flexural test, is centered laterally within ± 0.5 mm and positioned so it extends approximately 10 mm beyond the platen edges (as shown in 0). The load is applied at a controlled rate of (2400 ± 200) N/s until specimen failure, and compressive strength is calculated based on the maximum load and platen surface area. A stop load of 20% of the maximum load is used to detect strength loss. Compressive strength is calculated based on the maximum load and platen surface area.



Fig. 5. *Compressive strength test setup*

[1] Zero time: the moment when the alkaline activator is added to the reactive materials, initiating the chemical reactions.

C. *Flexural strength test (based on NBN EN 196-1)*

The flexural strength test is performed on a suitable fixture within a compression testing machine, following NBN EN 196-1:2016, with adjustments for AAM [9]. The apparatus consists of two support rollers (diameter 10.0 ± 0.5 mm) spaced 100.0 ± 0.5 mm apart, and a central loading roller of the same diameter (as shown in Fig. 6). The rollers' axes must remain parallel and perpendicular to the specimen's length, with at least one roller able to tilt slightly to avoid torsion.

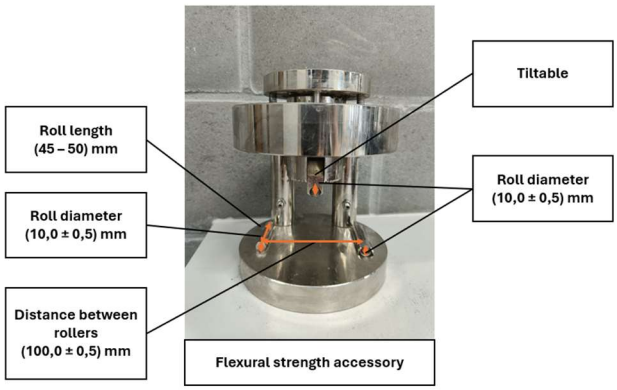


Fig. 6. *Flexural* strength accessory

The prism specimen is placed with one side resting on the support rollers, avoiding the top surface that was covered during curing (as shown in Fig. 7). Load is applied vertically via the central roller at a rate of 50 ± 10 N/s until fracture occurs. A stop load of 20% of the maximum load is used to identify strength loss. After failure, the halves are kept moist until further compressive testing. The flexural strength is calculated using the maximum load at fracture, roller spacing, and specimen dimensions.



Fig. 7. Flexural strength test setup

IV. RESULTS

A. *Natural flax fibers*

As shown in Fig. 8, the addition of flax fibers significantly reduces the workability of the mixture. This decrease is mainly attributed to the fibers' water absorption, which reduces the free water available, resulting in a stiffer mix. Additionally, higher fiber contents lead to fiber entanglement and increased internal friction, further lowering fluidity.

Finer fibers (500 µm) reduce fluidity more than coarser fibers, likely due to their larger specific surface area, which increases friction and bonding within the mix.

Fig. 8 also shows the reference line for the mixture without fibers, highlighting that fluidity decreases progressively with increasing flax fiber content.

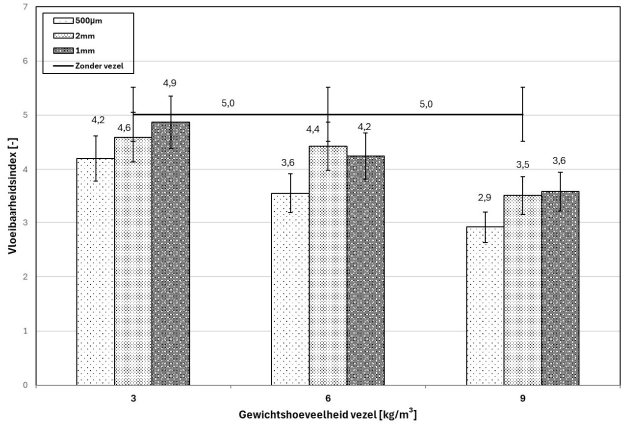


Fig. 8. Influence *of flaxfiber on the consistencie*

After 7 days, a reduction in compressive strength was observed in mixtures containing flax fibers, mainly due to air entrapment and weak fiber-matrix bonding, which hinder stress transfer [19]. Since flax fibers contribute little to compressive strength, their addition leads to a gradual strength decrease as more AAM is replaced.

Pre-treatment of flax fibers (e.g., removal of lignin, pectin, and waxes) may improve fiber surface reactivity and bonding with the AAM matrix, potentially mitigating this negative effect. Despite this, compressive strengths remain high; even the least favorable mix achieved 55 MPa, well above standard requirements. Thus, the minor strength reduction is technically negligible considering other benefits like toughness and crack control.

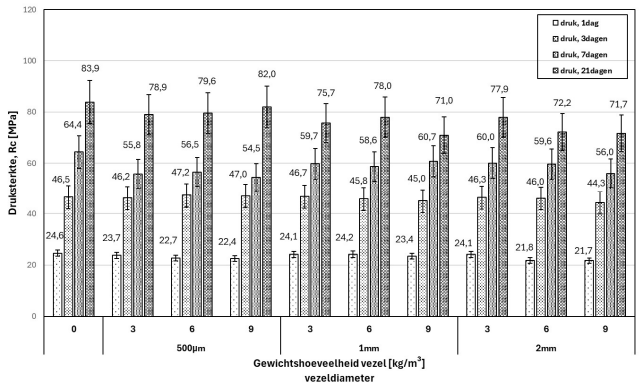


Fig. 9. *Influence* of *flaxfiber on the compressive strength*

A clear increase in flexural strength is noted after 1 day, due to ongoing activation where the matrix acts as a strong adhesive to the fibers. This effect is more pronounced at higher fiber contents and with finer fibers (500 µm), which offer more bonding sites. However, after 7 days, flexural strength declines due to air void formation and weakened microstructure caused by fiber addition.

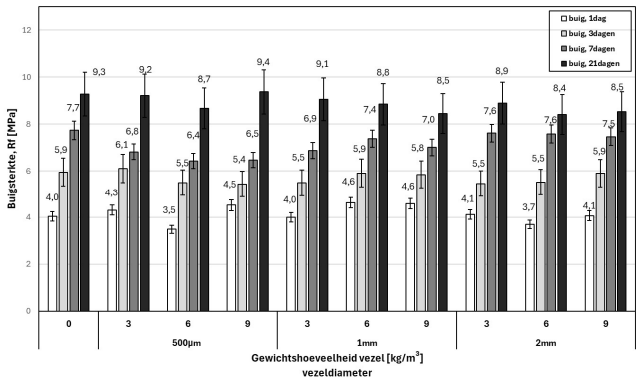


Fig. 10. *Influence of flaxfiber on the bending strenght*

The brittleness index (BI) remains largely unchanged with fiber addition. This index primarily reflects the ratio between flexural and bending strength, not the post-peak deformation capacity. BI increases with curing time due to matrix hardening, with values between 8.3 and 9.2 after 21 days—similar to the reference mix.

While flax fibers are generally added to reduce brittleness, their effect here is limited. Only fine fibers (500 µm) at low dosage show a reduced BI at day 1, indicating early-stage benefits that diminish over time, likely due to insufficient fiber-matrix bonding or suboptimal fiber distribution. The results suggest that flax fibers do not significantly reduce long-term brittleness but may enhance toughness and crack-bridging, effects not captured by the BI.

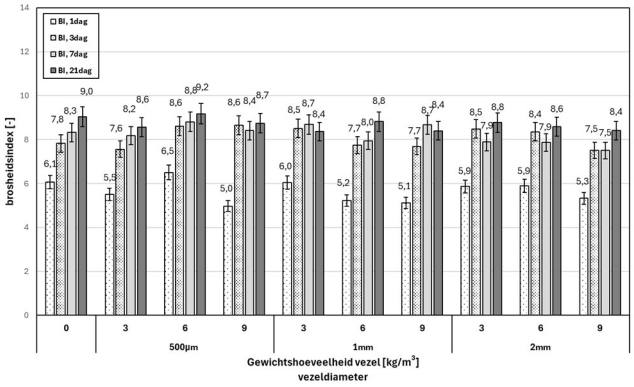
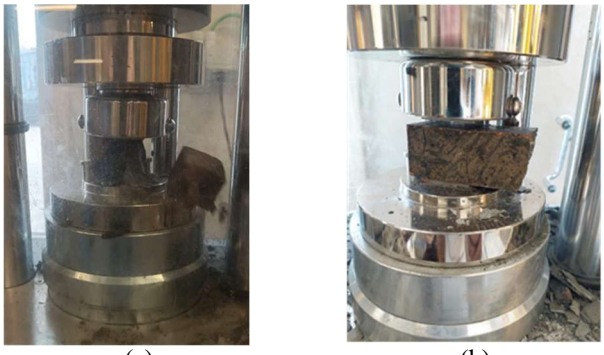


Fig. 11. *Influence of flaxfiber on the BI*

Despite minimal change in BI values, fiber addition clearly reduces the explosive, brittle failure typical of unreinforced AAM. Mixtures without fibers exhibit sudden failure (shown in Fig. 12a) whereas fiber-reinforced mixtures show more controlled cracking and improved resistance to crack propagation (as shown in Fig. 12b), resulting in safer failure behavior.



(a) (b)

Fig. 12. (a) mixture without fibers (b) mixture with fibers

B. Synthetic PP-fibers

The addition of macrofibers leads to a significant reduction in the flowability of the AAM mixture. Unlike microfibers, this effect is not mainly due to water absorption. Instead, the AAM matrix behaves like a glue, binding to the macrofibers and restricting their mobility. This results in the mixture functioning as an early-stage reinforcement system, where the fibers are mechanically anchored in place. As a consequence, the paste's free flow is hindered, leading to reduced spreadability (as shown in Fig. 13a)

Moreover, the physical characteristics of the macrofibers, (such as their length and relatively high dosage) hinder smooth surface finishing, requiring additional effort during application (as shown in Fig. 13b).



(a) (b)

Fig. 13. (a) Early-stage reinforcement system of PP-fibres (b) hinder of smooth surface finishing

Fig. 14 shows the decrease in flow spread with increasing macrofiber content, despite constant liquid content. This confirms that the reduced workability is mainly caused by mechanical interference with the flow rather than a reduction in available water.

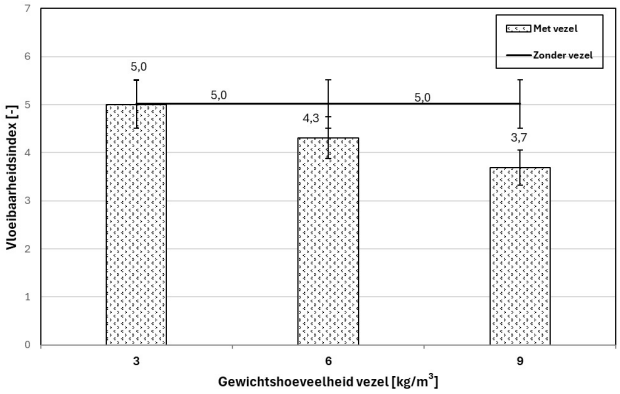


Fig. 14. Influence *of flaxfiber on the consistentie*

The addition of macrofibers results in a slight decrease or stabilization of compressive strength (as shown in Fig. 15), mainly due to limited load-bearing contribution from the fibers and their disruption of matrix compactness. This leads to increased porosity and air entrainment, reducing compressive strength, although values remain acceptable for structural use.

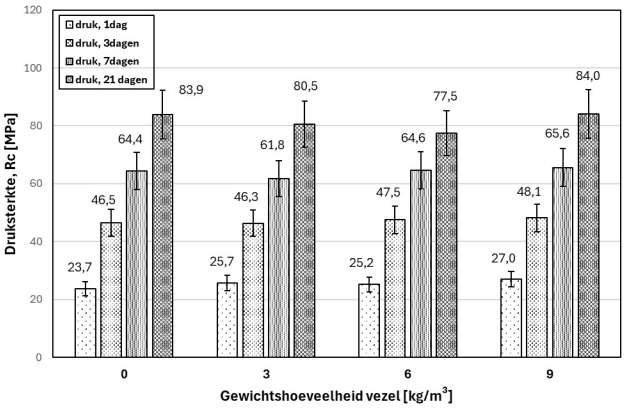


Fig. 15. *Influence of flaxfiber on the compressive strength*

Flexural strength is initially improved after 1 day of curing due to active activation bonding fibers as micro-reinforcement. However, after 7 days, a decline in flexural strength is observed compared to fiber-free mixes, attributed to compromised matrix density and microstructure (as shown in Fig. 16). Despite lower flexural strength, macrofiber-reinforced samples exhibit significantly less brittle failure and better crack control.

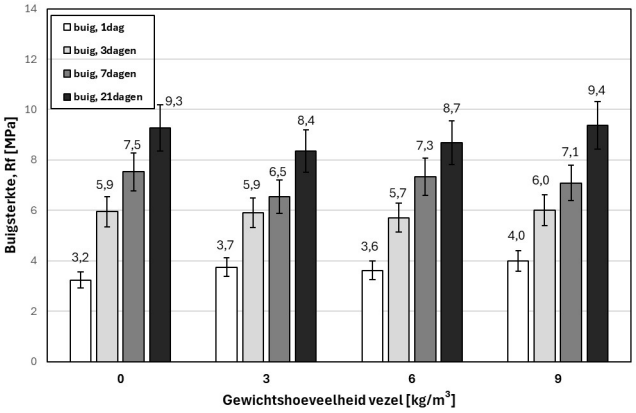


Fig. 16. *Influence of flaxfiber on the bending strenght*

Visual inspection reveals that specimens with macrofibers remain largely intact after failure, unlike fiberless samples that show sudden, explosive fracture. This indicates enhanced toughness and crack-bridging capacity of macrofibers, even after 20% strength loss.

Although the BI of macrofiber mixes is slightly higher (9.3 vs. 8.5), their fracture behavior is markedly more ductile, highlighting the limitation of BI in describing fiber-reinforced AAM. Even low fiber dosages (3 kg/m³) significantly improve failure mode, suggesting benefits for safety-critical and dynamic load applications.

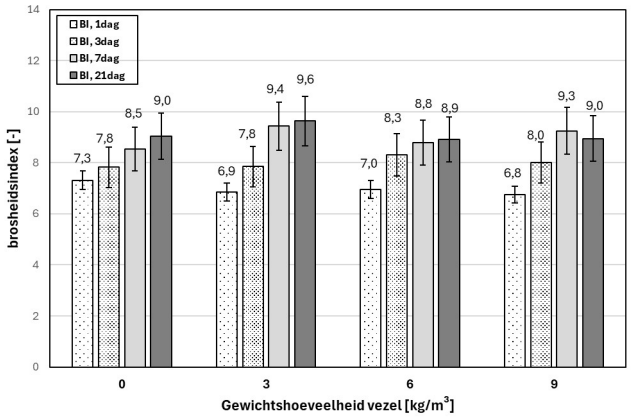


Fig. 17. *Influence of flaxfiber on the BI*

In conclusion, conventional strength metrics and BI alone are insufficient to characterize macrofiber-reinforced AAM. Complementary parameters such as residual flexural strength, toughness index, and energy absorption are essential to fully evaluate fiber effects on fracture behavior.

V. CONCLUSIE

The addition of natural fibers, especially flax fibers and PP macrofibers, significantly affects both fresh and mechanical properties of AAM based on recycled construction waste.

- Workability decreases due to mechanical hindrance from macrofibers and increased water demand from flax fibers.
- Fibers cause a slight initial increase in flexural strength during the first 24 hours, linked to fiber-matrix bonding.
- Over time, flexural strength stabilizes or decreases due to increased porosity and matrix disruption from fibers.
- Compressive strength shows a slight decrease with fiber addition due to matrix heterogeneity.
- Fiber-reinforced AAM exhibits improved fracture behavior and crack resistance compared to brittle failure in plain mixes.
- Existing brittleness indices do not fully capture toughness and energy absorption improvements from fibers.
- Alternative test methods are needed to better assess toughness, crack propagation, and post-peak behavior.
- Fiber reinforcement offers promising benefits for durability, safety, and crack control in AAM, but further research is required.

In summary, incorporating fibers into AAM presents promising enhancements but also highlights the need for advanced testing methods to fully understand their impact on material performance and durability.

REFERENCES

[1] Marketvector-Kendall Harrow, "A Circular Economy: Designing out Waste." Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: https://www.marketvector.com/insights/mvis-onehundred/a-circular-economy-designing-out-waste

[2] J. Chen, Y. Wang, Q. Shi, X. Peng, and J. Zheng, "An international comparison analysis of CO2 emissions in the construction industry," *Sustainable Development*, vol. 29, no. 4, pp. 754–767, Jul. 2021, doi: 10.1002/sd.2172.

[3] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei, and A. Bahadori, "Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry," Jul. 15, 2013, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.10.049.

[4] Odylhouse, "De milieu-impact van de woningbouw- en bouwsector toegelicht." Accessed: Dec. 23, 2024. [Online]. Available: https://odylhouse.com/nl/impact-woningbouwsector/?utm_source=chatgpt.com

[5] Europese Unie, "Europese green deal - onze doelstellingen bereiken," 2021. Accessed: May 22, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/869824/EGD_brochure_NL.pdf

[6] Euroslag, "Granulated blastfurnace slag."

[7] A. Kustirini, Antonius, and P. Setiyawan, "Confinement Effectiveness on the Strength and Ductility from Geopolymer Concrete," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2024. doi: 10.1088/1755-1315/1321/1/012018.

[8] Ecocem, "Eco2cem (GGBS)." Accessed: Dec. 27, 2024. [Online]. Available: https://www.ecocemglobal.com/nl-be/producten-projecten/eco2cem-ggbs/

[9] NBN, "NBN EN normen." Accessed: May 22, 2025. [Online]. Available: https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/all-standards?lang=nl&_gl=1*1xiojg6*_up*MQ..*_gs*MQ..&gclid=Cj0KCQjwlrvBBhDnARIsAHEQgOQHML7QQrOAogQB-YY1KjRFXaEx6YsHrxIJvCsAOoPwzT6RH2cqQ9EaAl98EALw_wcB&gbraid=0AAAADsB_83qMuF8GJcg2g9tRDbAy6R-_

[10] Farys, "Verslag drinkwateronderzoek 2024".

[11] J. Davidovits, "Why Alkali-activated materials (AAM) are not geopolymers?", doi: 10.13140/RG.2.2.34337.25441.

[12] I. Habay, "Sodium silicate in aqueous solution."

[13] Thermo Fisher scientific, "Sodium hydroxide, extra pure, micropearls," Jun. 2023.

[14] Wavalin, "Vlasproductie." Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: https://www.wavalin.be/nl

[15] A. Six, "Mechanical performance of eco-friendly geopolymer with construction and demolition waste".

[16] T. Decuyper, "Vezelversterkt alkalisch geactiveerd materiaal op basis van bouw- en slooppuin - Invloed op de verse en mechanische eigenschappen."

[17] J. Vitse, D. Zhang, and J. Li, "Effect of Increasing Slag Content on the Workability and Mechanical Properties of CDW-GGBS Based Geopolymer Composites," in *RILEM Bookseries*, vol. 55, Springer Science and Business Media B.V., 2025, pp. 62–70. doi: 10.1007/978-3-031-70277-8_8.

[18] Demula, "Marginel® FIPAH-CLASSIFICATIE ONTKISTINGSMIDDELEN *." [Online]. Available: www.fipah.be

[19] M. M. Camargo, E. A. Taye, J. A. Roether, D. T. Redda, and A. R. Boccaccini, "A review on natural fiber-reinforced geopolymer and cement-based composites," Oct. 02, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/ma13204603.

Inhoud

Voorwoord ..... **vi**
Samenvatting ..... **vii**
Summary ..... **ix**
Symbolenlijst ..... **xv**
Lijst met afkortingen ..... **xvi**
1 Inleiding **1**
1.1 Uitdagingen bouwindustrie *1*
1.1.1 Broeikaseffect 1
1.1.2 CO_2-uitstoot bouwsector 2
1.1.3 Grondstoffen voor binders in de bouwsector 3
1.2 Circulaire economie en duurzaamheid *6*
1.2.1 Algemeen 6
1.2.2 Uitdaging bouwsector 7
1.3 Onderzoeksvraag *8*
1.4 Onderzoeksmethodologie *8*
2 Literatuurstudie **9**
2.1 AAM als alternatief van portlandcement *9*
2.1.1 Portlandcement 9
2.1.2 Alkalisch geactiveerd materiaal 18
2.1.3 Vergelijking alkalisch geactiveerd materiaal en portlandcement 28
2.2 Alkalische activator *31*
2.2.1 Natriumhydroxide 31
2.2.2 Natriumsilicaat 33
2.3 Reactieve grondstoffen *35*
2.3.1 Vliegas van steenkool 35
2.3.2 Vliegas van huisvuil verbrandingsinstallatie 37
2.3.3 Gecalcineerde klei 38
2.3.4 Gemalen gegranuleerd hoogovenslak 42
2.3.5 Gerecycleerd baksteenpoeder 45
2.3.6 Gerecycleerd betonpuinpoeder 47
2.4 Waterabsorptie van poeders *49*

2.4.1 Algemeen 49
2.5 Zand 51
2.5.1 Algemeen 51
2.6 Toevoegsels 55
2.6.1 Vezels 55
2.6.2 Plastificeerder 63
3 Testprogramma 64
3.1 Gebruikte materialen 64
3.1.1 GGBS 64
3.1.2 RBP 65
3.1.3 RCP 66
3.1.4 CEM I portlandcement 66
3.1.5 Leidingwater 67
3.1.6 CEN referentie zand en zeezand 68
3.1.7 Natronwaterglas 69
3.1.8 Natriumhydroxide 70
3.1.9 Voorbereiding van alkalische oplossing 71
3.1.10 Vezels 72
3.2 Mengselontwerp en onderzoeksprogramma 75
3.2.1 Mengselontwerp 75
3.2.2 Mengmethode 78
3.2.3 Vulproces 81
3.2.4 Onderzoeksprogramma 85
4 Onderzoeksresultaten en analyse 110
4.1 Waterabsorptie poeder 110
4.2 Kleur en uitbloei 112
4.2.1 Kleurverandering mengsel 112
4.2.2 Kleurverandering mallen 113
4.2.3 Uitbloei 114
4.3 Pasta 116
4.3.1 Verse eigenschappen 116
4.3.2 Effect van olie en ontkistingstijd 124
4.3.3 Verharding onder water 127
4.3.4 Druksterkte 130

4.3.5 Samenvatting 132
4.4 Mortel 133
4.4.1 Zand 133
4.4.2 Verse eigenschappen 135
4.4.3 Mechanische eigenschappen 135
4.4.4 Samenvatting 138
4.5 Toevoeging van vezels 139
4.5.1 Vlasvezels 139
4.5.2 Macrovezel 145
4.5.3 Samenvatting 149
5 Conclusie 150
5.1 Invloed van de vezels 150
5.2 AAM als alternatief van portlandcement 151
6 Voorstel voor verder onderzoek 153
6.1 Spanning-rekdiagram 153
6.1.1 Beeldcorrelatie 154
6.1.2 Extensometers 155
6.2 Eenvoudige controlevorming van het geopolymeer mechanisme 155
6.3 Vorst-dooi invloed op AAM op basis van bouw- en slooppuin 156
6.4 Nood aan geopolymeer normen 156
6.5 Recyclage van AAM-beton 156
6.6 Gebruik van andere vezelsoorten 156
6.7 Vermoeiingsgedrag van AAM 156
Bijlage A GGBS 1
Bijlage B M92 1
Bijlage C Karakteristieken RCP & RBP 1
Bijlage D Adapter drukproef 1
Bijlage E Leidingwater samenstelling 1
Bijlage F Mal volgens EN 191-1 1
Bijlage G Mal volgens NF P15-434 1
Bijlage H Pasta samenstelling 1
Bijlage I Resultaten bindingstijd en consistentietijd pasta 1
Bijlage J Invloed ontkistingsolie 1
Bijlage K Invloed ontkistingstijd 1

Bijlage L **Invloed watermal op Vicat-test 1**
Bijlage M **Invloed onder water binding & uitharding 1**
Bijlage N **Mortel samenstelling & mortel met vezel samenstelling 1**
Bijlage O **Resultaten zeefproef 1**
Bijlage P **Technische fiche CEM I 52,5 R HES 1**
Bijlage Q **Productcertificaat ECO_2CEM 1**
Bijlage R **Technische fiche NaOH 1**
Bijlage S **Technische fiche Na_2SiO_3 ..... 1**
Bijlage T **Buigsterkte resultaten 1**
Bijlage U **Druksterkte resultaten 1**
Bijlage V **ontkistingsmiddel Marginel 335 ..... 1**

Symbolenlijst

b	Bindmiddel (binder)	[g]
b_1	De zijde van de vierkante doorsnede van het prisma	[mm]
d_0	De diameter van de mini slump kegel die gelijk is aan 100mm	[mm]
d_1	De maximale gemeten diameter	[mm]
d_2	De diameter haaks op d_1	[mm]
h_0	Hoogte van de grootste kegel	[mm]
h_1	Hoogte van de kleinste kegel	[mm]
l	is de afstand tussen de steunpunten	[mm]
m_{droog}	Massa droog	[g]
m_{SSD}	Massa nat, oppervlakte droog	[g]
r_0	Straal van de grootste kegel	[mm]
r_1	Straal van de kleinste kegel	[mm]
w	Watergehalte (water)	[g]
A	De oppervlakte van de drukplaten 40 x 40 mm².	[mm²]
D	Vloeibaarheidsindex (flow diameter)	[-]
F_C	De maximale belasting bij drukbreuk	[N]
F_f	De maximale belasting bij buigbreuk	[N]
L	Vloeistof (liquid)	[g]
M	Modulus	[-]
M_1	De droge test massa	[g]
P	Massa in opvangpan na zeving	[g]
R_c	De totale druksterkte	[N/mm²]
R_f	De totale buigsterkte	[N/mm²]
S	Vaste stof (solid)	[g]
V	Volume	[mm³]
W	Waterabsorptie	[%]

Lijst met afkortingen

AAM	Alkali geactiveerde materialen (Alkali activated material)
BI	Brosheidsindex
CEAP	Actieplan voor de Circulaire Economie (Circular economy action plan)
DIC	Beeldcorrelatie (Digital image correlation)
EFC	Earth Friendly Concrete
GCI	Global Change Institute
GGBS	Gemalen gegranuleerde hoogovenslak (Ground granulated Blast furnace slag)
MSWI	Verbranding van huishoudelijk afval (Municipal solid waste incinerator ashes)
NASH	Natriumaluminium silicaathydraat
PBM's	Persoonlijke beschermingsmiddelen
PC	Portlandcement
PP	Polypropyleen
RBP	Gerecycleerd baksteenpoeder (Recycled brick powder)
RCP	Gerecycleerd betonpuinpoeder (Recycled concrete powder)
RH	Luchtvochtigheid (Relative humidity)
SEM	Scanning elektromicroscopie (Scanning electron microscopy)
SCC	Zelfverdichtend beton (Self compacting concrete)
SSD	Verzadigd-oppervlakte-droge (Saturated surface dry)
UK	Verenigd Koninkrijk (United Kingdom)
Vlarema	Vlaamse reglement betreffende het duurzaam beheer van materialenkringlopen en afvalstoffen

1 INLEIDING

1.1 Uitdagingen bouwindustrie

1.1.1 Broeikaseffect

De atmosfeer van de aarde absorbeert een deel van de zonne-energie en zonnestraling, een ander deel wordt teruggekaatst [1]. Een gedeelte van deze energie en warmte wordt door de aarde geabsorbeerd, terwijl een ander deel als langgolvige infraroodstraling weer de atmosfeer in worden gestraald. Dit fenomeen noemt het natuurlijk broeikaseffect. Door verhogen van broeikasgassen (zoals koolstofdioxide (CO_2)) wordt er meer warmte vastgehouden. Dit leidt tot een stijging van de temperatuur op aarde. Ook wel het versterkt broeikaseffect genoemd, zoals geïllustreerd in Figuur 1-1. Dit veroorzaakt zowel temperatuurstijging als veranderingen in het klimaat.



Figuur 1-1: Wereldwijde temperatuurstijging als gevolg van CO_2-uitstoot (versterkt broeikaseffect) [1]

De temperatuurstijging lijd tot verschillende nadelige gevolgen [2]:

- *Stijging van de zeespiegel*: De temperatuurstijging leidt tot het smelten van gletsjers, wat resulteert in een stijgende zeespiegel. Hierdoor neemt de kans op overstromingen toe, wat de druk op duinen, dijken en stormvloedkeringen vergroot [3].

- *Droogte, hittegolven en Verwoestijning*: Droogte en hittegolven hebben zowel invloed op de menselijke bevolking als op het milieu, met aanzienlijke financiële gevolgen [4]. De temperatuurstijging veroorzaakt de verwoesting van grote gebieden, waardoor productieve graslanden veranderen in niet-productieve woestijnen [5].

- *Hevige bosbranden*: Hevige bosbranden verwoesten complete bossen, waarbij een aanzienlijke hoeveelheid CO_2 vrijkomt. Bomen spelen een cruciale rol in het filteren van CO_2 uit de lucht. Met de afname van het aantal bomen vermindert ook de capaciteit om CO_2 te filtreren [6].

- *Milieu- en luchtvervuiling:* Luchtverontreinigende stoffen brengen ook gezondheidsrisico's met zich mee, zoals verminderde vruchtbaarheid, zwangerschapsverlies en vroeggeboorte [7].

Daarom is er een dringende behoefte aan wereldwijde reductie van de CO_2-uitstoot. In dit kader heeft de Europese Unie de “European Green Deal: zero emissions by 2050” geïmplementeerd (zie Figuur 1-2) [8]. Het doel is om de CO_2 uitstoot in 2050 tot nul te reduceren. Dit betekent dat emissies in veel industrieën aangepakt moeten worden, en overtreders kunnen rekenen op boetes als de maatregelen niet worden nageleefd.

Als tussenstap richting 2050 heeft de EU ook ambitieuze doelstellingen vastgelegd voor 2030. Tegen dat jaar moet de netto-uitstoot van broeikasgassen met minstens 55 % verminderd zijn ten opzichte van het niveau van 1990. Daarnaast moet minstens 42,5 % van de energie afkomstig zijn uit hernieuwbare bronnen, en moet het energieverbruik aanzienlijk efficiënter worden. Deze doelen zijn juridisch bindend vastgelegd in de Europese Klimaatwet, en vormen een belangrijke drijfveer voor structurele veranderingen in sectoren als industrie, transport en gebouwde omgeving.



Figuur 1-2: Europese Green Deal [9]

1.1.2 CO_2-uitstoot bouwsector

De bouwsector is verantwoordelijk voor een aanzienlijk deel van de wereldwijde vervuiling, goed voor 23 % van de totale CO_2-uitstoot [10]. Binnen deze bouwsector behoort de cementindustrie tot een van de grootste vervuilers, met een bijdrage van 5 tot 7 % aan de mondiale CO_2-uitstoot [11]. Dit is te wijten aan de aanzienlijke warmteproductie (tot wel 1450 °C) die vereist is om de grondstoffen tot klinker te sinteren bij de productie van Portlandcement (PC) [12]. Een gedetailleerde uitleg van het productieproces van PC wordt behandeld in hoofdstuk 2.1.1.

Een veelbelovende oplossing die in dit onderzoek wordt verkend, is de toepassing van AAM. Deze technologie is gericht op klimaatmitigatie en biedt economische voordelen ten opzichte van PC [13]. Voorgaand onderzoek toont aan dat de geschatte CO_2-uitstoot van geopolymeerbeton slechts 9 % lager ligt dan die van PC, wat aanzienlijk minder is dan eerdere schattingen van 26 tot 80 % [14].

De hogere CO_2-uitstoot wordt voornamelijk toegeschreven aan de alkalische activator [14]. In onderzoek van Turner en Collins [14] werd rekening gehouden met de hogere temperaturen die de reactie tussen het vulmateriaal en de alkalische activator ondersteunen. In de verder besproken studie werd echter verharding bij kamertemperatuur (20 ± 2) °C toegepast, wat resulteerde in een lagere CO_2-uitstoot.

1.1.3 Grondstoffen voor binders in de bouwsector

1.1.3.1 Kalksteen en klei

Kalksteen is een sedimentair gesteente rijk aan calciumcarbonaat en wordt gevormd door een langdurig proces van sedimentatie. Kalksteen ontstaat vaak door biogene sedimentatie, waarbij organisch materiaal zoals schelpen, koralen en kalkhoudende algen zich ophopen op de bodem van zeeën, meren of andere waterlichamen. Deze organismen bevatten calciumcarbonaat in hun schalen en skeletten. Wanneer ze sterven, vallen hun overblijfselen naar de zeebodem, waar ze zich ophopen en door druk en cementatie uiteindelijk omgezet worden in kalksteen zoals weergegeven in Figuur 1-3. Dit proces kan miljoenen jaren duren. De kleur kan worden beïnvloed door onzuiverheden, wat zelfs kan leiden tot een zwarte tint zoals weergegeven op Figuur 1-4.

In België komen aanzienlijke kalksteenafzettingen voor, vooral in Wallonië. Dit heeft te maken met de geologische geschiedenis van de regio. Deze afzettingen dateren uit het Carboon en het Jura, periodes waarin tropische zeeën en ondiepe lagunes het gebied bedekten. De kalksteenafzettingen in Wallonië spelen een cruciale rol in de bouwindustrie en hebben zowel historische als economische waarde.

Belangrijke groeves bevinden zich in de provincies:" Henegouwen zoals de CBR-groeve weergegeven in Figuur 1-7, Namen en Luik"[15],[16]. Deze kalksteen is essentieel voor de productie van cement, kalk en andere bouwmaterialen [17].



Figuur 1-3: Kalksteen met een wit en gelere kleur [18]



Figuur 1-4: Kalksteen met een zwartere kleur [19]

Klei is een fijnkorrelig sedimentair materiaal dat voornamelijk bestaat uit kleimineralen zoals kaoliniet, illiet en smectiet, welke chemisch gevormd worden uit silicium- en aluminiumzouten. Klei ontstaat door langdurige verweringsprocessen van gesteenten, waarbij mineralen afgebroken worden en door water getransporteerd raken naar lager gelegen gebieden[20]. Daar bezinken de fijne deeltjes in rustige wateren zoals rivierdelta's, meren of ondiepe zeeën. Onder invloed van tijd, druk en chemische processen vormen zich uiteindelijk kleiafzettingen. De karakteristieke structuur van klei bestaat uit microscopisch kleine plaatjes, de zogenaamde kleiplaatjes, die bepalend zijn voor de plastische eigenschappen van het materiaal. De kleur van klei varieert afhankelijk van aanwezige mineralen en organisch materiaal, en kan uiteenlopen van lichtgrijs tot roodbruin zoals weergegeven in Figuur 1-5 en Figuur 1-6.



Figuur 1-5: Klei met een grijze kleur[21]

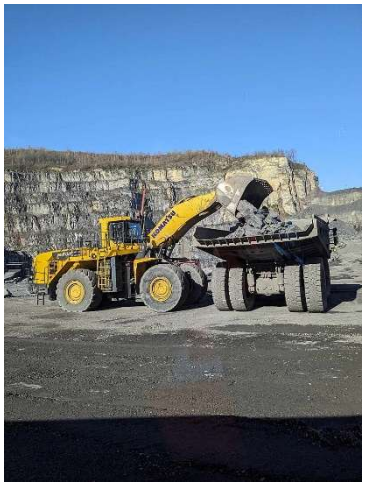


Figuur 1-6: Klei met een roodbruine kleur [22]

Wat klei betreft, beschikt Vlaanderen over aanzienlijke afzettingen. Gedurende de afgelopen 60 miljoen jaar zijn kleilagen afgezet in mariene omgevingen zonder sterke stroming, waardoor de klei kon bezinken [24]. In het westen van Vlaanderen bevinden zich de Ieperse Kleien, die nog steeds worden ontgonnen in de regio rond Kortrijk [25]. Deze klei is bijzonder geschikt voor de productie van dakpannen. Daarnaast is er in de Rupelstreek en het Waasland de Boomse Klei, die in het verleden intensief werd ontgonnen en momenteel nog steeds wordt gebruikt voor de productie van bakstenen en geëxpandeerde kleikorrels.

Hoewel deze grondstoffen momenteel nog voldoende beschikbaar zijn, gaat hun ontginning gepaard met aanzienlijke nadelen. Deze groeves veroorzaken niet alleen geluidsoverlast en stofoverlast, maar zorgen ook voor ingrijpende veranderingen in het landschap en de grondwaterstand [26]. Daarnaast leiden ze tot verlies van biodiversiteit, visuele vervuiling, en extra verkeersdruk door zwaar transport. Dergelijke ontginningen laten vaak permanente littekens na in het milieu zoals weergegeven in Figuur 1-7, waar herstel moeilijk of zelfs onmogelijk is. Daarom is het cruciaal om duurzaam om te gaan met zowel de ontginning als het gebruik van deze hulpbronnen. Dit betekent onder andere het monitoren van de voorraden, het beperken van nieuwe ontginningen waar mogelijk, en het stimuleren van recycling en hergebruik van bouwmaterialen. Op die manier kunnen we niet alleen de uitputting van aardevolle grondstoffen op lange termijn vermijden, maar ook de negatieve impact op milieu en leefomgeving aanzienlijk beperken.





Figuur 1-7: De CBR-groeve in Antoing [23]

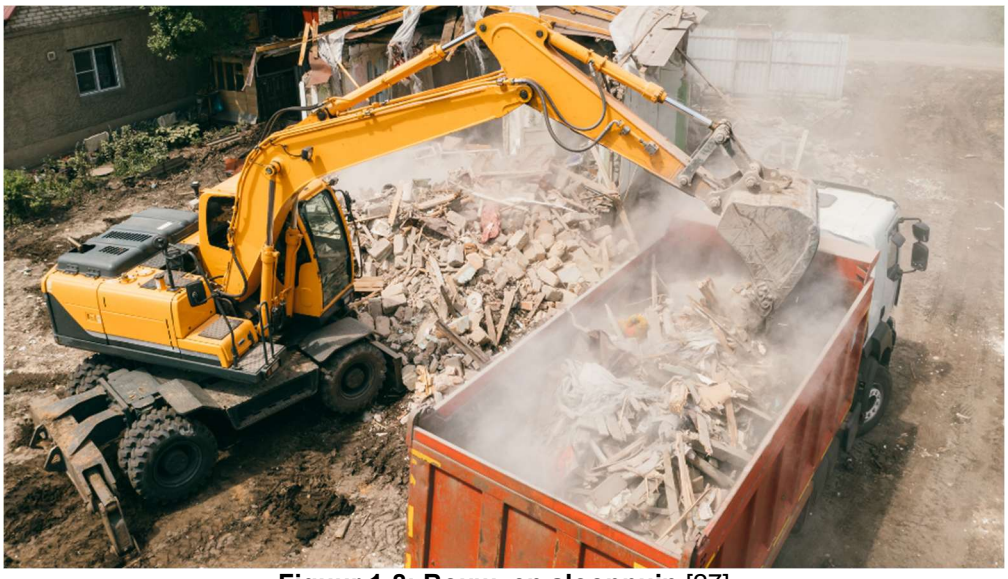
1.1.3.2 Bouw- en slooppuin

Bouw- en slooppuin (zie Figuur 1-8) vormt een aanzienlijke uitdaging voor zowel het milieu als het afvalbeheer in Europa. In 2018 werd in de EU ongeveer 50 % van het bouw- en slooppuin gerecycled, een percentage dat aanzienlijk lager is dan het doel van 70 % dat in de Kaderrichtlijn Afval uit 2008 werd gesteld [28]. Dit probleem wordt deels veroorzaakt door een gebrek aan vertrouwen in gerecycleerde bouwmaterialen, wat leidt tot een beperkte vraag ernaar. Veel mensen maken zich zorgen over de kwaliteit en veiligheid van gerecycled bouwmateriaal, waardoor het minder snel wordt geaccepteerd in de bouwsector. Daarnaast ontbreekt het in sommige regio's aan voldoende infrastructuur en technologieën om bouw- en sloopafval op een efficiënte manier te verwerken en te recyclen.

Om de efficiëntie van afvalbeheer te verbeteren en recycling te bevorderen, is er vanaf 1 juli 2024 een verplichte regelgeving ingevoerd voor de scheiding van bouw- en sloopafval [29]. Conform de regels van Vlaamse reglement betreffende het duurzaam beheer van materialenkringlopen en afvalstoffen (Vlarema) 9 moeten afvalproducenten hun bouw- en sloopafval gescheiden aanbieden. Inzamelaars zullen strenger controleren op gemengd afval en kunnen containers weigeren die niet voldoen aan de gestelde eisen.

Deze regelgeving markeert een belangrijke stap richting een duurzamer beheer van bouw- en sloopafval. Door de scheiding van afval te verplichten, wordt het mogelijk om grotere hoeveelheden afval te recyclen, wat zowel economische als ecologische voordelen met zich meebrengt. Het naleven van deze nieuwe wetgeving zal niet alleen bijdragen aan de verduurzaming van de bouwsector, maar ook aan het behalen van de Europese afvaldoelstellingen.

Er zijn twee hoofdcategorieën van bouwafval die bijdragen aan dit probleem: afval van nieuwbouwprojecten en afval van sloop. In het geval van nieuwbouwprojecten kan tot 30 % van de gebruikte materialen op een stortplaats terechtkomen, terwijl deze vaak geschikt zouden kunnen zijn voor recycling of hergebruik [30]. Wat betreft slooppuin wordt het grootste deel vaak gestort (met uitzondering van staal waarvan ongeveer 98 % wordt gerecycled). Wat zorgt verschillende schadelijke gevolgen voor het milieu en de samenleving.



Figuur 1-8: Bouw- en slooppuin [27]

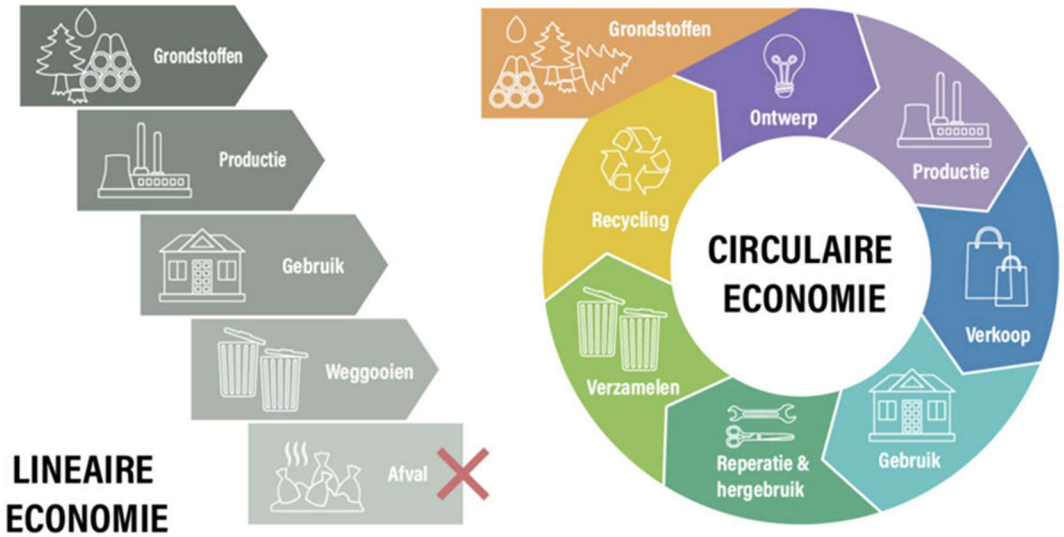
1.2 Circulaire economie en duurzaamheid

1.2.1 Algemeen

De circulaire economie biedt een alternatief voor het traditionele, lineaire model dat zorgt voor de groeiende milieuproblematiek en de uitputting van natuurlijke hulpbronnen. In tegenstelling tot de lineaire economie, die draait om het "nemen, maken en weggooien", richt de circulaire economie zich op het zo lang mogelijk behouden van materialen en producten. (zie Figuur 1-9). Door hergebruik, reparatie, renovatie en recycling wordt de levensduur van producten verlengd en het verbruik van primaire grondstoffen sterk verminderd.

Een belangrijk voordeel van de circulaire economie is de beperking van grondstoffenontginning en de reductie van broeikasgasemissies. Aangezien meer dan 80 % van de ecologische impact van een product al in de ontwerpfase wordt bepaald, speelt ecodesign[1] een cruciale rol [32] . Ook de toenemende hoeveelheid verpakkingsafval in Europa kan via circulaire strategieën effectief worden aangepakt .

Naast milieuwinsten draagt de circulaire economie bij aan economische veerkracht. Ze vermindert de afhankelijkheid van ingevoerde grondstoffen en stimuleert innovatie. Tegen 2030 kan dit model binnen de EU tot 700.000 extra banen opleveren [33]. Voor consumenten resulteert het in duurzamere producten van hogere kwaliteit met lagere gebruikskosten. De EU heeft als doelstelling om tegen 2050 een volledig circulaire en klimaat neutrale economie te bereiken, ondersteund door maatregelen zoals ecodesign richtlijnen, het recht op reparatie en regels tegen greenwashing. Het doel is om toekomstige generaties dezelfde levenskwaliteit te bieden door over te schakelen naar een systeem dat hoogwaardige producten levert zonder de uitputting van natuurlijke hulpbronnen en zonder afval te verbranden of te storten.



Figuur 1-9: Lineaire economie en circulaire economie [31]

[1] Ecodesign is het ontwerpen van producten met aandacht voor het milieu.

1.2.2 Uitdaging bouwsector

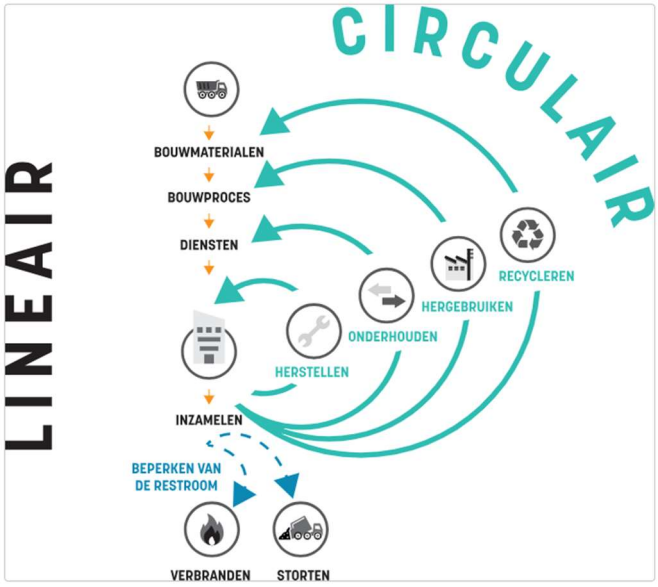
De bouwsector staat voor een ingrijpende transformatie [34]. De overstap van een lineair naar een circulair model brengt tal van uitdagingen met zich mee. Als sector is de bouw verantwoordelijk voor ongeveer 50 % van het materiaalverbruik in Europa [35]. Het is dan ook logisch dat er van bouwprofessionals een actieve bijdrage wordt verwacht in het realiseren van een duurzame toekomst.

Voor aannemers betekent dit een verandering in hun rol en verantwoordelijkheden. Zij worden niet langer gezien als louter uitvoerders, maar worden mee betrokken in het ontwerp en het volledige levenscyclusbeheer van gebouwen. Er wordt van hen verwacht dat ze meedenken over materiaalkeuzes, herbruikbaarheid, onderhoud en zelfs de demonteerbaarheid van constructies (zoals weergegeven in Figuur 1-10). Dit vereist nieuwe kennis, andere vaardigheden en een nauwere samenwerking met architecten, leveranciers en opdrachtgevers.

Tegelijkertijd komt er ook heel wat nieuwe regelgeving bij kijken. Europa heeft met het actieplan voor de Circulaire Economie (CEAP) en de EU-taxonomie duidelijke ambities geformuleerd: tegen 2050 moet de Europese economie volledig klimaatneutraal zijn [36]. Dat impliceert strengere normen rond duurzaamheid, gebruik van gerecycleerde materialen, afvalbeheer en traceerbaarheid van grondstoffen.

Daarnaast zijn er ook praktische en technische uitdagingen. Circulair bouwen vraagt om hergebruik van materialen, maar dat is niet altijd eenvoudig. Er is vaak een gebrek aan standaardisatie, waardoor materialen niet zomaar opnieuw inzetbaar zijn. Het selecteren, opslaan en controleren van gerecupereerde bouwmaterialen vraagt extra tijd, ruimte en vakkennis. Ook het demonteren van bestaande gebouwen vereist meer planning en inzet dan traditionele sloop.

Tot slot zorgen nieuwe circulaire businessmodellen voor economische onzekerheden. Concepten als 'product-as-a-service', materialenpaspoorten en modulaire bouwvormen bieden veel potentieel, maar vragen investeringen zonder onmiddellijke zekerheid op winst [37].



Figuur 1-10: Circulair bouwen [34]

1.3 Onderzoeksvraag

AAM's staan erom bekend een bros karakter te vertonen zoals weergegeven in Figuur 1-11; dit houdt in dat ze snel kunnen breken zonder veel vervorming of waarschuwing vooraf [38]. Dit gebrek aan taaiheid vormt een uitdaging bij structurele toepassingen. Om dit probleem op te lossen, worden zowel natuurlijke microvezels (vlasvezels) als synthetische macrovezels (PP-vezels) aan het mengsel toegevoegd. Dit bros karakter kan met de brosheidsindex (BI) in vergelijking (1-1) weergegeven worden.

$$BI = \frac{R_c}{R_f} \tag{1-1}$$

waarbij R_c: de druksterkte [N/mm²];
R_f: de buigsterkte [N/mm²].

Binnen het onderzoek worden zowel de verse als de mechanische eigenschappen van de mengsels onderzocht. De verse eigenschappen omvatten de verwerkbaarheid, vloeibaarheid en bindingstijd. Wat betreft de mechanische eigenschappen wordt er specifiek gekeken naar de druksterkte en buigsterkte. Door deze eigenschappen te analyseren, kan bepaald worden welk mengsel de beste balans biedt tussen werkbaarheid en structurele prestaties. Met andere woorden zoals de hoofdvraag geformuleerd: "***De invloed op de verse en mechanische eigenschappen van vezel versterkt AAM op basis van bouw en slooppuin***".



Figuur 1-11: Bros karakter AAM na uitgevoerde buigproef

1.4 Onderzoeksmethodologie

In dit onderzoek werd op een kritische manier te werk gegaan, wat noodzakelijk was vanwege het gebruik van een nieuwer materiaal waarvoor nog geen normeringen bestaan. Dit leidde tot diverse uitdagingen die systematisch werden opgelost. Het onderzoek begon met een grondige literatuurstudie over geopolymeer, waarbij het materiaal werd vergeleken met Portlandcement. Alle testen en benaderingen waren gebaseerd op bestaande cementnormeringen.

De verschillende verse en mechanische eigenschappen van dit materiaal werden op systematische wijze bepaald. Het proces werd opgedeeld in verschillende stappen: eerst werd de test voor de paste uitgevoerd, gevolgd door de toevoeging van zand voor het vormen van mortel, en ten slotte werden vezels aan de mortel toegevoegd. Tijdens de verschillende fasen werd er steeds toekomstgericht gewerkt. Zo werd bij het bepalen van de vloeibaarheid rekening gehouden met het feit dat in toekomstig onderzoek naar geopolymeerbeton de vloeibaarheid voldoende moet zijn.

2 LITERATUURSTUDIE

2.1 AAM als alternatief van portlandcement

2.1.1 Portlandcement

2.1.1.1 Oorsprong

Portlandcement werd voor het eerst geproduceerd in 1824 in het Verenigd Koninkrijk (UK). Cement is een hydraulisch bindmiddel: een fijn poeder van anorganisch materiaal dat, wanneer het met water wordt gemengd, een pasta vormt (door een chemische reactie). Deze pasta verhardt door hydratatiereacties en processen, waarbij het na uitharding zowel zijn sterke en volumestabiliteit behoudt, zelfs onder water [39]. De naam 'Portland' is afgeleid van de gelijkenis in kleur en kwaliteit met het portlandsteen zoals weergegeven in Figuur 2-1,dat gewonnen werd op het schiereiland Portland in Dorset, in het zuidwesten van het UK aangeduid op Figuur 2-2 [40].

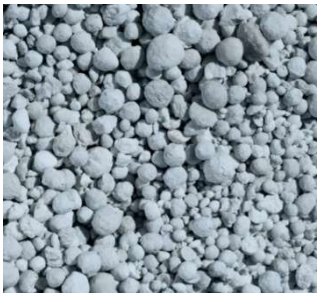


Figuur 2-1: Portlandsteen in Dorset, UK [41]



Figuur 2-2: Dorset in Verenigd Koninkrijk [42]

In het productieproces van Portlandcement worden de rauwe materialen, bestaande uit kalkrijke stoffen zoals kalksteen en silicaatmaterialen zoals klei, gemengd in de juiste verhoudingen. In een eerste fase namelijk de warme cyclus zoals weergegeven in Figuur 2-5, worden de grondstoffen verbrand in een draaitrommeloven bij een temperatuur van ongeveer 1.450 °C. Het resultaat van deze verhitting is klinker zoals weergegeven in Figuur 2-3**.** Klinker heeft een grote deeltjesgrootte en wordt na deze verhitting als een half afgewerkt product uit de oven gehaald. Het gewicht van de klinker die uit de oven komt, varieert, maar de deeltjesgrootte van de klinker is typisch tussen de 10 en 50 mm zoals weergegeven in Figuur 2-4.

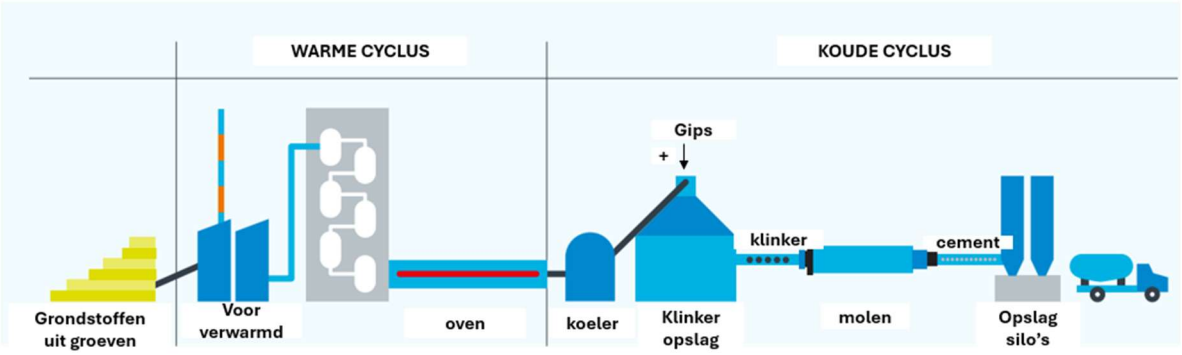


Figuur 2-3: Portlandklinker [43]



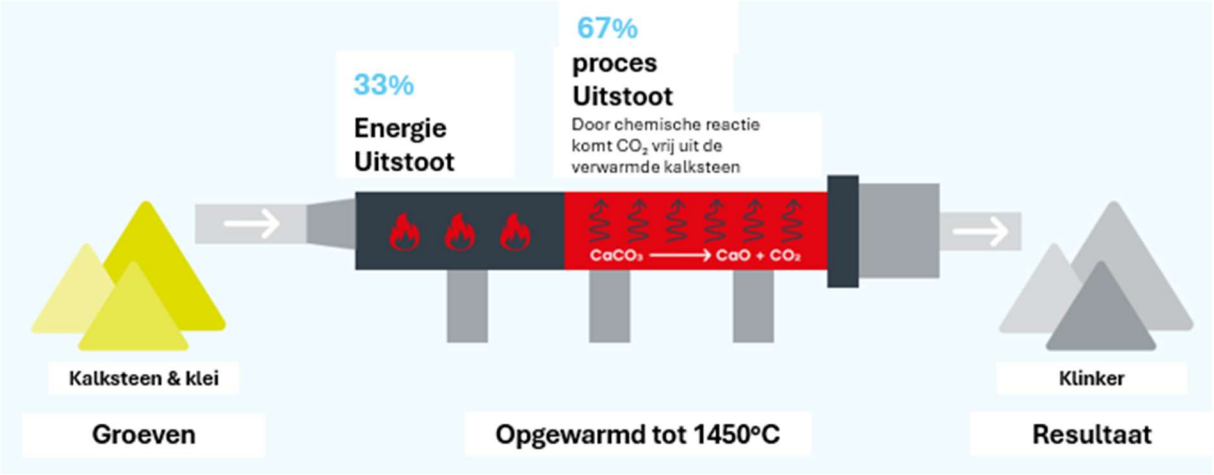
Figuur 2-4: De deeltjesgrootte van portlandklinker [44]

In de tweede fase ook wel de koude cyclus genoemd zoals weergegeven in Figuur 2-5, wordt de klinker gemalen tot een fijn poeder met een deeltjesgrootte van minder dan 90 µm [45]. Dit proces vindt plaats in een molen, samen met andere ingrediënten zoals vermalen gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) en aanvullende cementachtige materialen. Het gips wordt toegevoegd om de snelheid van de uitharding van het cement te beheersen. De combinatie van deze ingrediënten resulteert in het eindproduct: cementpoeder.



Figuur 2-5: Het productieproces van portlandcement [45]

Een belangrijk aspect van de klinkerproductie is de onvermijdelijke chemische reactie die optreedt tijdens de transformatie van het kalksteen- en kleimengsel naar klinker, bekend als de calcinatie. Deze reactie, samen met de energie die nodig is om de vereiste ovenwarmte te bereiken en de mechanische componenten in werking te houden, leidt tot aanzienlijke CO_2-uitstoot. Ongeveer 0,8 ton CO_2 wordt uitgestoten voor elke geproduceerde ton klinker. Het is indrukwekkend dat slechts 33 % van de totale CO_2-uitstoot wordt veroorzaakt door de energie die nodig is voor de verwarming, terwijl maar liefst 67 % voortkomt uit de chemische reactie die plaatsvindt bij het verhitten van kalksteen. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 2-6**,** waar de uitstoot van CO_2 tijdens het productieproces wordt weergegeven.



Figuur 2-6: De CO_2-uitstoot tijdens de productie van portlandcement [45]

2.1.1.2 Chemische samenstelling

De grondstoffen voor de productie van cement moeten calcium en silica in geschikte hoeveelheid leveren. Vooral kalksteen en zeeschelpen bevatten de benodigde stof calciumcarbonaat ($CaCO_3$) .

$$CaCO_3$$

Kalksteen wordt gevormd door het ophopen en samendrukken van schelpen en skeletten van mariene organismen zoals duidelijk te zien in Figuur 2-7. Klei (zoals weergegeven in Figuur 2-9) en schalie (zoals weergegeven in Figuur 2-8) bevatten de benodigde elementen siliciumdioxide (SiO_2), aluminiumoxide (Al_2O_3) en ijzeroxide (Fe_2O_3).

$$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$$



Figuur 2-7: Kalksteen [46]



Figuur 2-8: Schalie [47]



Figuur 2-9: Klei [48]

Hoofdbestandsdelen

De chemische reacties beginnen pas wanneer de temperatuur hoog genoeg is om de stoffen te laten reageren, meestal bij temperaturen boven de 1000 °C, maar de belangrijkste omzetting gebeurt pas bij 1450 °C. De hoofdbestanddelen worden weergegeven van vergelijking (2-1) tot (2-4). Het $CaCO_3$ in het kalksteen ontbindt bij hoge temperatuur in calciumoxide (CaO) en CO_2. Het koolstofdioxide ontsnapt als gas, terwijl de CaO overblijft [49].

$$\mathbf{CaCO_3} \xrightarrow{\textbf{hitte}} \mathbf{CaO} + \mathbf{CO_2} \tag{2-1}$$

De reactie van CaO en SiO_2 leidt tot de vorming van tricalciumsilicaat (C_3S). Dit is de belangrijkste minerale component in portlandcement.

$$\mathbf{CaO} + \mathbf{SiO_2} \rightarrow \mathbf{C_3S}(\mathbf{Ca_3SiO_5}) \tag{2-2}$$

De reactie van CaO met Al_2O_3 resulteert in de vorming van tricalciumaluminaat (C_3A).

$$3\,CaO + AlO_2O_3 \rightarrow \mathbf{C_3A}(Ca_3Al_2O_6) \tag{2-3}$$

De reactie van CaO, Al_2O_3 en Fe_2O_3 resulteert in tetracalciumaluminoferriet (C_4AF) .

$$4\,CaO + AlO_2O_3 + Fe_2O_3 \rightarrow \mathbf{C_4AF}(Ca_4Al_2Fe_2O_{10}) \tag{2-4}$$

Bijproducten

Cement bevat bijkomende componenten zoals magnesiumoxide (MgO), titaniumdioxide (TiO_2) mangaan(III)oxide (Mn_2O_3) [50]. Daarnaast zijn alkaliën aanwezig, specifiek kaliumoxide (K_2O) en natriumoxide (Na_2O). Deze stoffen komen slechts in zeer kleine hoeveelheden voor en zijn afkomstig van natuurlijke grondstoffen zoals kalksteen, klei en schalie, die onzuiverheden bevatten. Zo ontstaat MgO uit magnesiumhoudende mineralen in kalksteen, terwijl TiO_2, en Mn_2O_3 meestal uit klei of ijzerhoudende mineralen afkomstig zijn. K_2O en Na_2O, de alkalische oxiden, komen eveneens uit klei of brandstofresten. Hoewel de concentraties laag zijn, kunnen deze stoffen ongewenste effecten veroorzaken.

Een overmaat aan MgO kan leiden tot expansie en scheuren tijdens de uitharding van het beton. Dit komt doordat magnesiumoxide bij contact met water omgezet wordt in magnesiumhydroxide ($Mg(OH)_2$) zoals te zien in vergelijking (2-5), wat volumevergroting veroorzaakt. Deze expansie kan scheuren in het beton veroorzaken, wat de structurele integriteit aantast [51].

$$MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 \quad (2\text{-}5)$$

De alkalische oxiden, zoals K_2O en Na_2O, kunnen ook schadelijke effecten hebben, vooral door de alkali-silicareactie (ASR). Wanneer deze oxiden in contact komen met reactief silica in de toeslagmaterialen (zoals zand of grind), ontstaat er een chemische reactie die leidt tot de vorming van alkali-silicaatgel weergegeven in vergelijking (2-6) en (2-7). Deze gel heeft de neiging om vocht op te nemen, wat resulteert in uitzetting en uiteindelijk scheurvorming in het beton. Dit kan leiden tot structurele schade en verzwakking van de betonconstructie zoals weergegeven in Figuur 2-10 [52].

$$SiO_2 + 2NaOH\ (\text{of } KOH) \rightarrow Na_2SiO_3 (\text{of } K_2SiO_3) + H_2O \quad (2\text{-}6)$$

$$Na_2SiO_3 (\text{of } K_2SiO_3) + H_2O \rightarrow \text{uitgezette gel} \quad (2\text{-}7)$$



Figuur 2-10: Alkali-silicareactie [53]

Anderzijds kan TiO_2 gunstige eigenschappen bieden, zoals een bijdrage aan de fotokatalyse werking. TiO_2 kan gunstige eigenschappen bieden, niet alleen vanwege zijn fotokatalyse werking, maar ook doordat het als nanovuller de vroege hydratatie van cement versnelt en de vorming van gelporiën bevordert. Deze eigenschappen dragen bij aan verbeterde mechanische prestaties in de beginfase van hydratatie [54].

Mn_2O_3 speelt in de meeste gevallen een beperkte rol in de cementchemie. Het wordt vaak in kleine hoeveelheden gebruikt om de kleur van het cement of beton te beïnvloeden, zonder dat het een directe invloed heeft op de structurele integriteit van het beton. In principe veroorzaakt het geen significante nadelige effecten, hoewel het kan bijdragen aan kleurveranderingen in het uiteindelijke product [55].

Hydratatie reactie

Bij contact met water ondergaan deze verbindingen een proces dat hydratatie wordt genoemd. Tijdens de hydratatie ontstaan belangrijke producten: calcium-silicaathydraat (C-S-H) gel, het primaire bindmiddel dat zorgt voor sterkte en duurzaamheid; calciumhydroxide, dat de alkaliteit verhoogt en wapening beschermt tegen corrosie; en ettringiet, dat de initiële binding stabiliseert en snelle ongewenste reacties voorkomt. Het mengsel begint als een pasta, maar na verloop van tijd hardt het uit naarmate meer C-S-H gel en andere gehydrateerde producten worden gevormd. Dit proces kan dagen tot weken duren, afhankelijk van de omstandigheden.

C_3S ook wel beter bekend als Alite, reageert met water en vormt C-S-H, een amorf, gelachtig materiaal dat verantwoordelijk is voor de mechanische sterkte van het cement. Dit is het belangrijkste bindmiddel voor de vroege sterkteontwikkeling van het beton. Daarnaast wordt calciumhydroxide ($Ca(OH)_2$) gevormd, ook wel gebluste kalk genoemd. Dit bijproduct is oplosbaar in water en draagt bij aan de verhoogde alkaliteit van het beton, wat resulteert in een pH van ongeveer 12-13.

$$2\,C_3S + 6\,H_2O \rightarrow \ 3\,CaO\ \ 2\,SiO_2\ 3\,H_2O\ (C-S-H\ gel) + 3\,Ca\,(OH)_2 \qquad (2\text{-}8)$$

Dicalciumsilicaat (C_2S) ook wel beter bekend als Blite, resulteert ook in de vorming van C-S-H en $Ca(OH)_2$,maar de reactie verloopt langzamer dan die van C_3S en draagt dus bij aan de langzame ontwikkeling van sterkte op lange termijn.

$$2\,C_2S + 4\,H_2O \rightarrow \ 3\,CaO\ \ 2\,SiO_2\ 3\,H_2O\ (C-S-H\ gel) +\ Ca\,(OH)_2 \qquad (2\text{-}9)$$

De reactie van C_3A vindt plaats wanneer het reageert met water en sulfaten, wat de vorming van calcium-aluminaat-silicaathydraat (C-A-S-H) oplevert, samen met $Ca(OH)_2$. Dit reageert snel met water.

$$C_3A + 6\,H_2O\ +\ 2{SO_4}^{2-} \rightarrow\ Ca_3AI_2O_6 \cdot xH_2O\ (C-A-S-H\ gel) +\ 3\,Ca\,(OH)_2 \qquad (2\text{-}10)$$

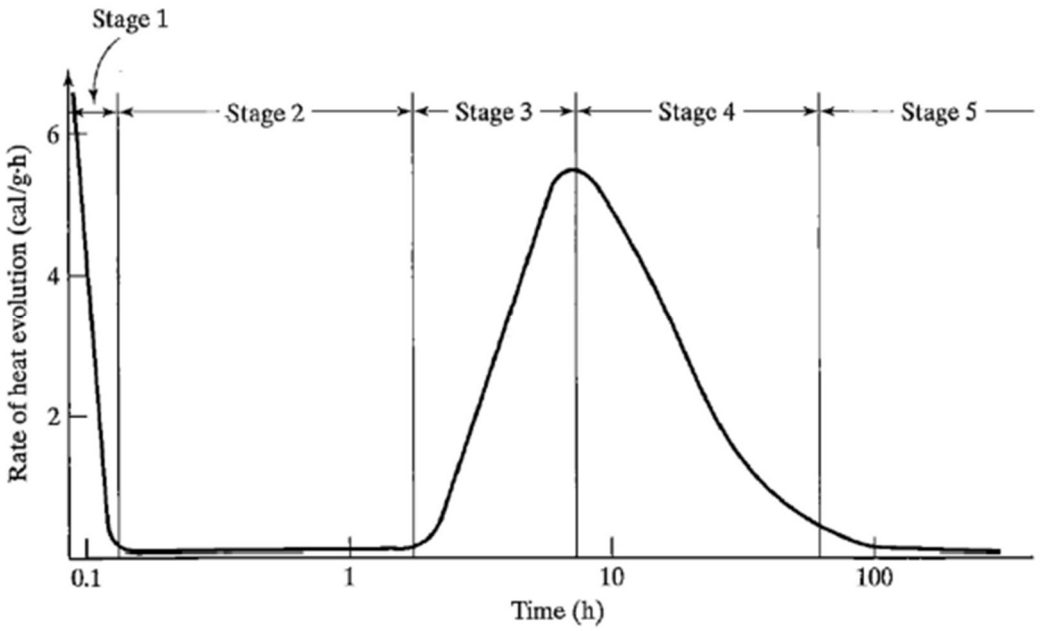
Om de reactie te vertragen en ongewenste warmteontwikkeling (hydratatiewarmte) te voorkomen, wordt $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ toegevoegd. De reactie met water en gips vormt een product die bekend staat als ettringiet. Ettringiet stabiliseert de structuur en voorkomt ongewenste snelle reacties. In deze formulering staat 6 $CaO \cdot Al_2O_3$ ook wel bekend als C_3A.

$$6CaO \cdot Al_2O_3 + 3(CaSO_4 \cdot 2H_2O) + 26\,H_2O \rightarrow 3\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3\,SO_3 \cdot 32\,H_2O \qquad (2\text{-}11)$$

C_4AF hydrateert op een vergelijkbare manier als C_3A, maar speelt een minder belangrijke rol in de sterkteontwikkeling. De hydratatie van C_4AF met water is complexer en wordt beïnvloed door de aanwezigheid van sulfaten. Tijdens dit proces kunnen ook C-S-H en C-A-S-H worden gevormd, samen met $Ca(OH)_2$.

Hydratatiewarmte

De chemische reacties tussen cement en water zijn exotherm, wat betekent dat ze warmte vrijgeven (zoals weergegeven in Figuur 2-11). Dit wordt hydratatiewarmte genoemd. Het vrijkomen van deze warmte is afhankelijk van de samenstelling van het cement. C_3A en C_3S dragen het meest bij aan de warmteontwikkeling.



Figuur 2-11: De snelheid van de warmteontwikkeling tijdens de hydratatie van C_3S [56]

2.1.1.3 Normeringen en kwaliteitslabel

De meeste testen zijn gebaseerd op de normen uit de NBN EN 196-reeks: methodes voor het beproeving van cement (zie Figuur 2-12) [57]. Deze normreeks, die in 2000 werd geïntroduceerd na 15 jaar voorbereiding, bevat gedetailleerde richtlijnen voor het uitvoeren van cementtesten. Voor een overzicht van de verschillende cementsoorten wordt verwezen naar de norm NBN EN 197, waarin 27 gewone cementsoorten [58].

In de Belgische cementindustrie wordt veel waarde gehecht aan de kwaliteit van de producten [59]. Elke stap in het productieproces wordt voortdurend gecontroleerd, en de kwaliteit wordt gewaarborgd door een strikt kwaliteitssysteem dat is gebaseerd op de ISO 9000-norm. De procedures voor kwaliteitsbeheer worden gedetailleerd beschreven in kwaliteitshandboeken, waarvan de naleving wordt gecontroleerd door zowel interne als externe audits.

Om de conformiteit van hun cement met de Europese normen te waarborgen, plaatsen de producenten de CE-markering op al hun gewone cementsoorten [60]. Dit gebeurt op basis van een overeenkomstigheidsattest, dat wordt verstrekt door een instelling die is genotificeerd door de Belgische overheid. De CE-markering bevestigt de naleving van de Europese normering.

Verder wordt de kwaliteit van het cement versterkt door het BENOR-keurmerk, dat wordt toegekend door het Belgisch Instituut voor Normalisatie (zie Figuur 2-13) [61]. Dit keurmerk wordt verleend door een onafhankelijke instantie, mits het cement voldoet aan de Belgische normen voor diverse cementtypen, zoals de NBN EN 197-1 voor gewone cementsoorten en aanvullende normen voor cementen met specifieke eigenschappen, zoals verhoogde bestandheid tegen sulfaten, beperking van het alkali-gehalte of hogere aanvangssterkte [57]. Het BENOR-keurmerk biedt gebruikers de garantie dat het cement voldoet aan strikte kwaliteitsnormen en een constante kwaliteit levert. De Belgische overheid stelt cement met het BENOR-keurmerk bovendien vrij van ontvangstcontroles, wat het vertrouwen in de betrouwbaarheid en degelijkheid van dit keurmerk benadrukt [62].



Figuur 2-12: NBN [63]



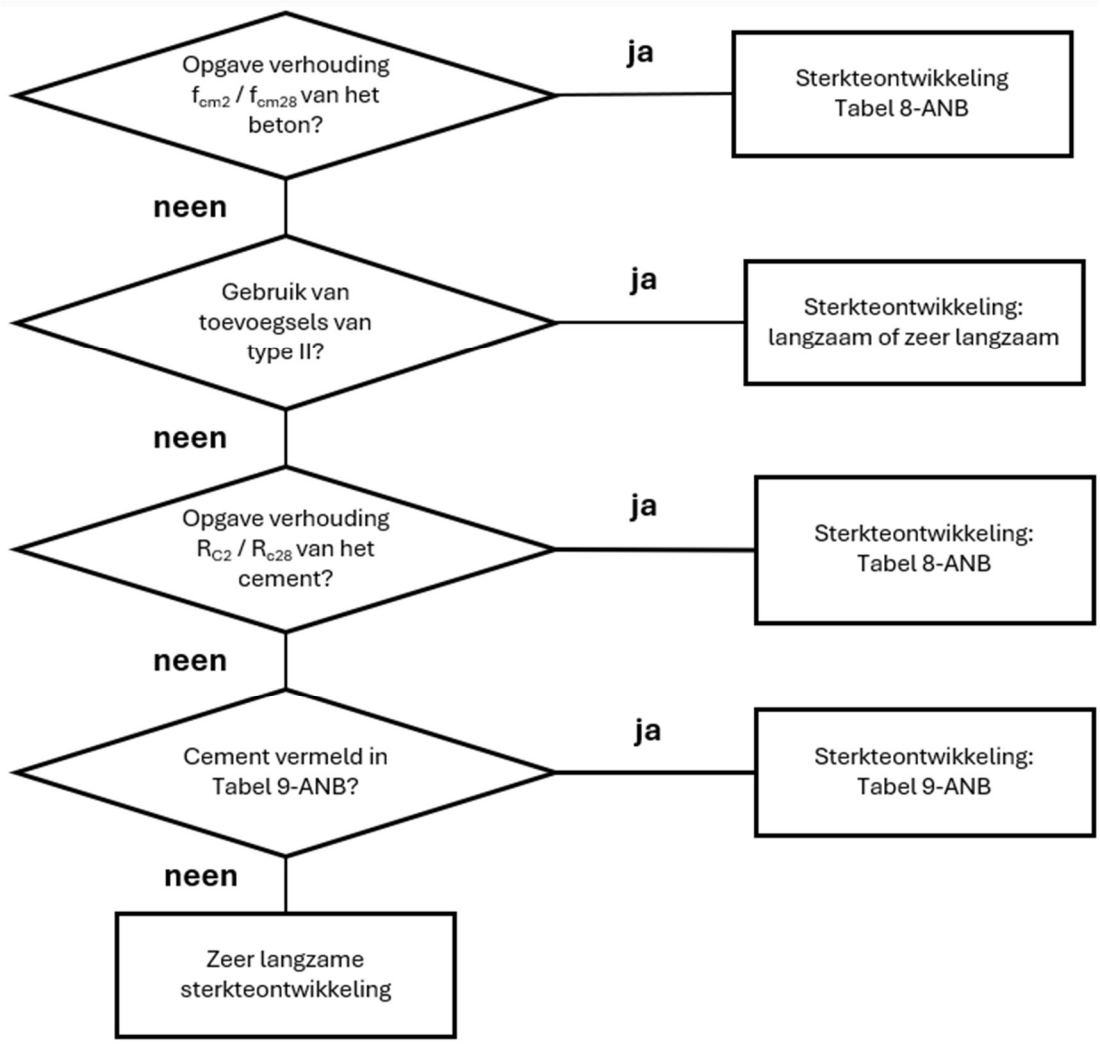
Figuur 2-13: Het BENOR-keurmerk [64]

2.1.1.4 Ontkistingstijden en nabehandelen

In dit hoofdstuk worden de ontkistingstijdstippen en nabehandelingstechnieken besproken voor beton. Dit wordt aangekaart omdat het toch een belangrijke eigenschap is die in rekening moet worden gebracht. Voor beton bestaan er gevestigde normeringen, waarbij gebruik wordt gemaakt van de normen NBN EN 13670 en NBN B15-400 [57].

Voor de bepaling van de sterkteontwikkeling wordt gebruik gemaakt van de flowchart weergegeven in Figuur 2-14. In de eerste stap wordt gecontroleerd of de verhouding f_{cm2}/f_{cm28} beschikbaar is. Aangezien deze informatie niet beschikbaar is, wordt hierop “neen” geantwoord. Vervolgens wordt nagegaan of er gebruik wordt gemaakt van toevoegingen van type II. Toevoegingen van type II, zoals gedefinieerd in NBN EN 206, omvatten vliegas, silicastof en GGBS [57].

In dit geval wordt GGBS gebruikt, waardoor het antwoord op deze stap “ja” is. Dit resulteert in een sterkteontwikkeling die als langzaam of zeer langzaam wordt gekenmerkt. Dit wordt echter waargenomen wanneer GGBS wordt gebruikt in het hydratatieproces van cement in combinatie met water.



Figuur 2-14: Bepaling van sterkteontwikkeling [65]

Voor de bepaling van de minimale ontkistingstermijn wordt in dit geval gekeken naar de laatste kolom van de tabel. Voor horizontale bekistingen met behoud van stutten zou een minimale wachttijd van 8 dagen gelden.

Tabel 2-1: ANB - minimale ontkistingstermijn [65]

Ontkistingstermijn voor een gemiddelde temperatuur T van het beton ≥ 20 °C			
Snelle sterkte-ontwikkeling van het beton	Gemiddelde sterkte-ontwikkeling van het beton	Langzame sterkte-ontwikkeling van het beton	Beschouwde bekistingselementen
2 dagen	2 dagen	4 dagen	Verwijdering van verticale bekistingen (kolommen, pijlers, wanden, zijvlakken van balken)
4 dagen	5 dagen	8 dagen	Verwijdering van horizontale bekistingen met behoud van de stutten
9 dagen	10 dagen	14 dagen	Verwijdering van alle stutten op voorwaarde dat de enige uitgeoefende belasting het eigengewicht van het ontkiste element is

2.1.1.5 Recyclagemogelijkheden

Beton, waarin Portlandcement als bindmiddel fungeert, is op zichzelf niet direct recycleerbaar tot nieuw cement. Toch bestaan er verschillende methoden om cementgebonden materialen opnieuw te benutten [66].

Een van de meest gangbare manieren om betonafval te recycleren is door het te breken en de resulterende fracties te hergebruiken als gerecycleerde granulaten [67]. Deze granulaten kunnen worden ingezet als vervanger van natuurlijke aggregaten in nieuw beton, zij het met beperkingen op het gebied van sterkte en duurzaamheid. Daarnaast vindt gerecycleerd beton toepassing in funderingsmaterialen voor wegenbouw en in ophogingen, waar de technische eisen minder streng zijn.

Een andere benadering richt zich op het herwinnen van cementsteen uit betonafval. Traditioneel gezien is dit een uitdaging, aangezien gehydrateerd cement chemisch gebonden is en moeilijk opnieuw kan worden gebruikt als actief bindmiddel . Toch worden nieuwe technologieën ontwikkeld die het mogelijk maken om cementsteen te activeren of op te nemen in alternatieve bindmiddelen, zoals geopolymeren [68]. Daarnaast kan betonafval een rol spelen in CO_2-reductiestrategieën door middel van hercarbonatatie, een proces waarbij betonfragmenten opnieuw CO_2 absorberen uit de atmosfeer, wat bijdraagt aan koolstofopslag en een duurzamer materiaalgebruik [69].

Hoewel de recyclagemogelijkheden van cement en beton nog niet volledig geoptimaliseerd zijn, wordt in de bouwsector steeds meer ingezet op circulaire ontwerpprincipes. Door modulaire bouwtechnieken en slimme materiaalkeuzes kunnen betonnen structuren zo worden ontworpen dat ze aan het einde van hun levensduur eenvoudiger kunnen worden gedemonteerd en hergebruikt. Dergelijke innovaties, in combinatie met verdere ontwikkelingen in cementvervangers en alternatieve bindmiddelen, dragen bij aan een toekomst waarin beton niet langer een lineair, maar een circulair bouwmateriaal wordt.

2.1.2 Alkalisch geactiveerd materiaal

2.1.2.1 Oorsprong

Activering hoogovenslak

Arthur Oscar Purdon is een Britse chemicus die belangrijke bijdragen geleverd heeft voor alternatieve cementmaterialen, met name op het gebied van geopolymeren. Purdon's onderzoek naar het activeren van hoogovenslak met behulp van caustische alkaliën, leidde tot de ontwikkeling van een nieuw type cement namelijk: "Le Purdociment" [71].

Purdon begon zijn onderzoek naar hoogovenslak in 1922, toen hij zich bij het Belgische bedrijf SOFINA voegde. Hij ontdekte dat de eigenschappen van slak verbeterd konden worden door het toevoegen van caustische alkaliën, zoals natriumhydroxide (NaOH) of kaliumhydroxide (KOH). Dit leidde tot een intensievere activatie dan bij het gebruik van kalk of Portlandcement. Vóór deze ontdekking werd slak vaak gecombineerd met kalk om een relatief langzaam uithardend materiaal te vormen. Purdon ontdekte dat de toevoeging van NaOH de structuur van slak afbrak en het mogelijk maakte om te reageren met water en andere chemicaliën, zoals natriumcarbonaat (Na_2CO_3) of $Ca(OH)_2$, om een alkalisch geactiveerd bindmiddel te vormen. Deze reactie is vergelijkbaar met moderne geopolymeren, waarbij een gelachtige stof wordt gevormd die de deeltjes bindt en een duurzaam, gehard materiaal creëert.

De ontwikkeling van Le Purdociment in de naoorlogse periode was een direct resultaat van Purdon's onderzoek. Het cement, dat uit meer dan 90 % slak bestond, werd geproduceerd zonder portlandcementklinker en was kosten effectiever. Dit maakte het een concurrerend alternatief voor conventioneel cement. Om de productie stop te zetten, bood CIMBEL (een verenging die de belangen van de Belgische cementfabrikanten verdedigde) een grote som geld aan de hoofdaandeelhouder. Dit bod werd in 1957 geaccepteerd. Na de overname werd de productie van Purdocement volledig stopgezet. Het bedrijf ging uiteindelijk in liquidatie. Purdocement verdween daarmee volledig van de markt. Toch werden er tal van gebouwen vervaardigt uit deze Purdocement zoals weergegeven in Figuur 2-15 en Figuur 2-16.



Figuur 2-15: De hoek van Breydelstraat 9 en Avenue Oudergem 15, Brussel [70]



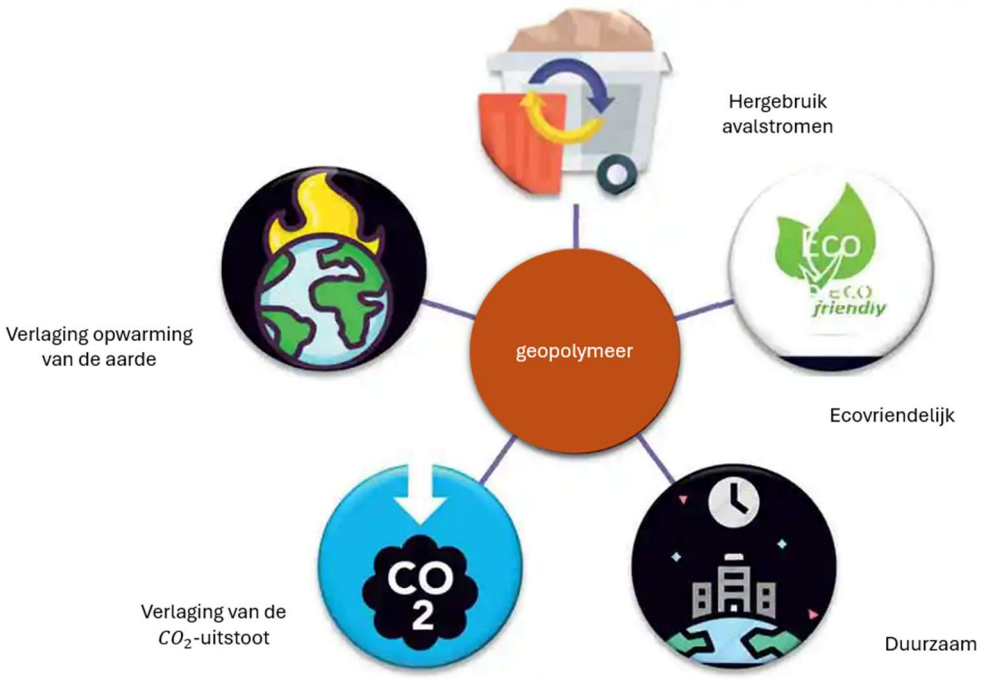
Figuur 2-16: Parking 58, Brussel [70]

Geopolymeren

In 1972 richtte Joseph Davidovits het onderzoeksbedrijf Cordi SA op (later Cordi-Géopolymère genoemd). Tijdens zijn zoektocht naar hitte- en vuurresistente materialen ontwikkelde hij een nieuwe klasse van anorganische bindmiddelen: de geopolymeren [72], [73]. Een deel van zijn inspiratie kwam uit de studie van oude bouwtechnieken. Davidovits stelde dat in de oudheid, zoals bij de bouw van de Egyptische piramides, mogelijk gebruik werd gemaakt van een soort vroeg cement of kunststeen [74].

Geopolymeren zijn anorganische polymeren, opgebouwd uit een netwerk van niet-organische moleculen [75]. Het vertoont overeenkomsten met veldspaten. Veldspaten zijn mineralen die van nature in gesteenten voorkomen. Geopolymeer materialen worden echter synthetisch vervaardigd, en het productieproces vertoont gelijkenissen met dat van thermohardende organische polymeren, die na uitharding een vaste structuur verkrijgen. Vanwege deze overeenkomst worden deze materialen "geopolymeren" genoemd, omdat ze anorganische tegenhangers zijn van conventionele organische polymeren.

Een geopolymeer is een alkalisch geactiveerd aluminosilicaatbindmiddel, dat bestaat uit twee hoofdcomponenten: een alkalische activator en een precursor (een reactief poeder) [76]. Het syntheseproces begint wanneer aluminosilicaatmaterialen worden geactiveerd door alkalische oplossingen [77]. De alkalische activator speelt hierbij een cruciale rol door silicium- (Si) en aluminiumdeeltjes (Al) uit de precursor op te lossen. Bij deze oplossing ontstaan nieuwe, harde stoffen zoals calciumsilicaat en aluminiumhydraat via een proces van neerslagvorming [78]. Een gedeelte van de natriumhydroxide komt terug, waardoor het verder uithardt en sterk wordt.



Figuur 2-17: De voordelen van geopolymeer [79]

Geopolymeren dragen bij aan een aanzienlijke verlaging van de CO_2-uitstoot en worden beschouwd als een duurzaam en ecovriendelijk alternatief voor traditionele bindmiddelen. Ze bieden een hoge weerstand tegen zouten, chemicaliën en brand, wat ze bijzonder geschikt maakt voor toepassingen in veeleisende omgevingen. Bovendien maakt de productie gebruik van diverse industriële reststromen, wat leidt tot efficiënter en milieubewuster materiaalgebruik [76]. Ondanks deze voordelen bestaat er momenteel nog geen specifieke normering voor geopolymeren, waardoor onderzoeksmethoden en toepassingsrichtlijnen nog verder geoptimaliseerd moeten worden zoals weergegeven in Figuur 2-17.

2.1.2.2 Toepassing

Een opvallend praktijkvoorbeeld van geopolymeerbeton is het Global Change Institute (GCI) van de University of Queensland, Australië [80]. Dit gebouw zoals weergegeven in Figuur 2-18, is het eerste publieke bouwwerk ter wereld waarin geopolymeerbeton structureel is toegepast. Het ontwerp, in samenwerking met HASSELL, Bligh Tanner en Wagners, bevat drie vrijdragende vloeren met in totaal 33 prefab panelen weergegeven in Figuur 2-19 van Earth Friendly Concrete (EFC), een geopolymeerbeton op basis van vliegas en slak.



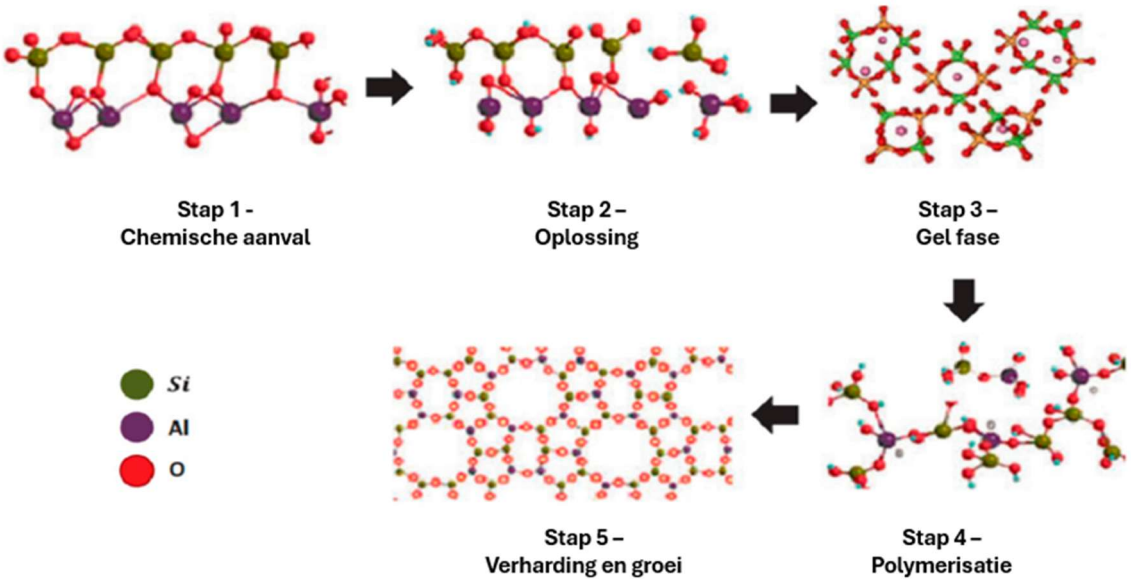
Figuur 2-18: Het gebouw van Queenslands University GCI[80]



Figuur 2-19: Een prefab deel van hoogovenslak/ vliegas gebaseerd geopolymeer [80]

2.1.2.3 Chemische samenstelling

In het algemeen kan het geopolymerisatie proces weergegeven worden zoals in afbeelding Figuur 2-20. Er zal steeds dieper ingegaan worden op deze stappen om het chemisch proces uit te leggen dat in werking treed [81].

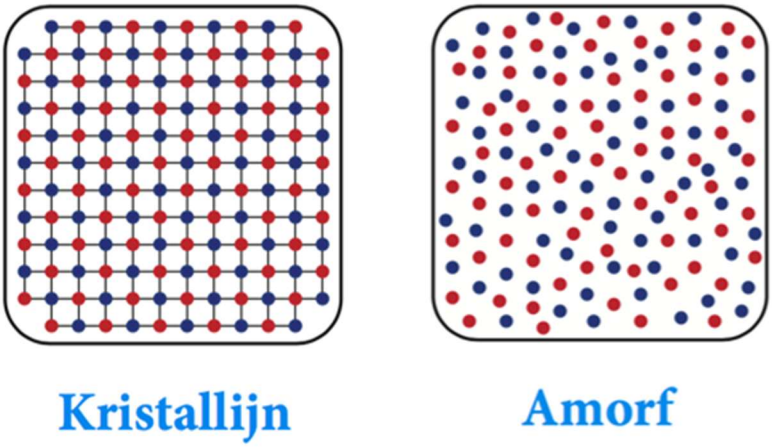


Figuur 2-20: Het geopolymerisatie proces [82]

Stap 1 – Chemische aanval

In de eerste fase ondergaat het aluminosilicaatrijke poeder een chemische aanval door NaOH of KOH in een sterk basische oplossing (pH > 10) [83]. Deze sterk basische oplossing breekt de structuur van de poederdeeltjes af, waarbij vooral de amorfe componenten worden aangetast. Hierdoor worden de aluminium- en silicium houdende bindingen (zoals Si–O-Si) en (Si-O-Al) verbroken. Dit leidt tot de afbraak van de oorspronkelijke (vaak gedeeltelijk kristallijne) structuur en het vrijkomen van reactieve aluminaat- en silicaatmonomeren in de oplossing [84].

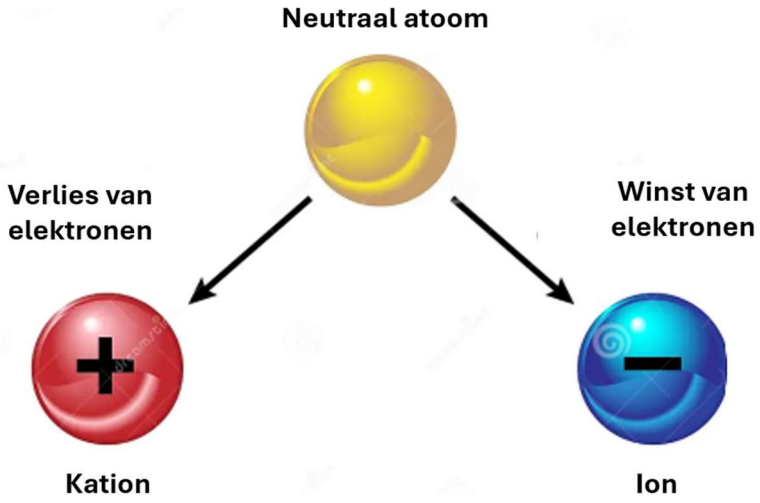
De structuur van geopolymeren kan amorf of gedeeltelijk gekristalliseerd zijn, afhankelijk van de manier waarop ze worden gesynthetiseerd [84]. Een amorf materiaal heeft geen geordende, regelmatige kristalstructuur zoals weergegeven in Figuur 2-21. De atomen zijn willekeurig gerangschikt, wat kan bijdragen aan de hogere reactiviteit. In sommige gevallen kunnen geopolymeren gedeeltelijk gekristalliseerd zijn, wat betekent dat sommige delen van het materiaal een geordende kristallijne structuur hebben, terwijl andere delen amorf blijven. Dit kan de eigenschappen van het materiaal, zoals sterkte en stabiliteit, beïnvloeden.



Figuur 2-21: Verschil tussen kristallijn en een amorfe structuur [85]

Stap 2 – Oplossing

De Si en Al componenten lossen gedeeltelijk op in de alkalische oplossing. De negatieve lading van de $[AlO_4]$- eenheden vormt echter een uitdaging voor de stabiliteit van het netwerk. Al heeft in deze tetraëdrische eenheid vier bindingen, terwijl het normaal drie bindingen vormt, wat resulteert in een negatieve lading op de zuurstofatomen. Deze negatieve lading kan het netwerk instabiel maken, tenzij er een manier is om deze lading te neutraliseren zoals weergegeven in Figuur 2-22. Hier spelen de positieve alkalimetalen kationen (zoals Na^+, K^+, Li^+ en Cs^+) een cruciale rol.



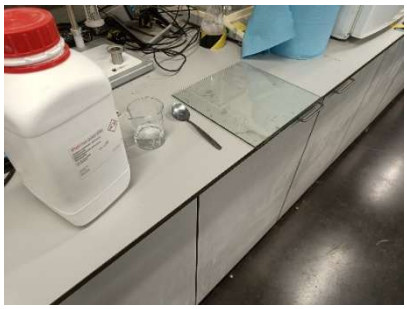
Figuur 2-22: Neutraal atoom [86]

De alkalimetalen kationen bevinden zich tussen de $[AlO_4]$- en $[SiO_4]$- eenheden in de poriën van het geopolymeer. Ze neutraliseren de negatieve lading van de $[AlO_4]$- eenheden, wat zorgt voor een stabieler netwerk [82]. Deze positieve ionen fungeren als een soort “lijm” die de verschillende tetraëdrische eenheden bij elkaar houdt en ervoor zorgt dat het geopolymeer zijn structuur behoudt. Zonder de juiste hoeveelheid positieve kationen kunnen de negatieve ladingen niet effectief gecompenseerd worden, wat resulteert in een instabiel materiaal.

Weergave oplossing van Al

Uit een eenvoudig experiment kan worden bevestigd dat deze bewering klopt (zie Figuur 2-23). Het experiment toont aan dat aluminium oplost in natronloog. Uit een eenvoudig experiment blijkt dat wanneer NaOH-korrels op aluminium worden gelegd, er geen reactie plaatsvindt(zie Figuur 2-24). Pas wanneer de NaOH-korrels met water worden gemengd, ontstaat natronloog (zie Figuur 2-25). Wanneer deze natronloog in contact komt met aluminium, is het zichtbaar dat het aluminium oplost [87].

$$2\mathrm{AI} + 2\ \mathrm{NaOH} + 6\ \mathrm{H_2O}\ \text{->}\ 2\mathrm{Na^+} + 2\ \mathrm{AI(OH_4)^-} + 3\mathrm{H_2}$$



Figuur 2-23: De proefopstelling



Figuur 2-24: Pure NaOH



Figuur 2-25: NaOH + H_2O

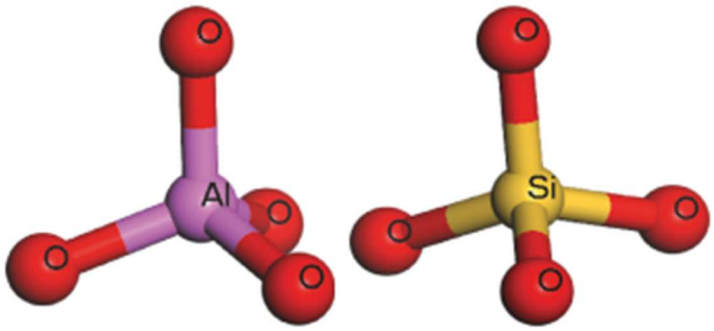
Stap 3 – Gel fase

In deze fase beginnen de opgeloste componenten een gelachtige substantie te vormen. De opgeloste silica- en alumina-eenheden komen tevoorschijn en reageren met elkaar, wat resulteert in de vorming van een gel [88]. De structuur in de gel is nog niet volledig gecondenseerd, maar bevat al de eerste tekenen van een driedimensionaal netwerk van tetraëdrische eenheden van aluminaat- en silicaatgroepen. Dit is essentieel voor het verkrijgen van de gewenste eigenschappen van het geopolymeer in latere fasen. Het proces van cross-linking begint in deze fase, waarbij de tetraëdrische eenheden met elkaar verbonden worden via gedeelde zuurstofatomen [89].

Stap 4 – Polymerisatie

De gel ondergaat een condensatiereactie en begint te polymeriseren tot een solide netwerk. Tijdens dit proces worden watermoleculen verwijderd uit de gel, en de tetraëdrische eenheden worden met elkaar verbonden via gedeelde zuurstofatomen [90]. Deze polymerisatie resulteert in de vorming van een stabiel, driedimensionaal netwerk dat de basis vormt voor de mechanische sterkte van het geopolymeer.

Geopolymeren zijn anorganische polymeren die, in tegenstelling tot organische polymeren (zoals plastic), geen koolstofatomen bevatten in hun chemische structuur [91]. In plaats daarvan bestaan ze uit elementen zoals Si, Al, zuurstof (O) en alkalimetalen (Na, K, Li, Cs). De structuur van geopolymeren is opgebouwd uit een driedimensionaal netwerk van tetraëdrische eenheden van aluminaat-tetraëder ([AlO_4]) en silicaat-tetraëder ([SiO_4]) waarbij de atomen met elkaar verbonden zijn door zuurstofatomen zoals weergegeven in Figuur 2-26 [81]. Deze zuurstofatomen vormen een tetraëdrische geometrie (vierzijdige piramide zoals weergegeven in Figuur 2-27), wat bijdraagt aan de sterkte en stabiliteit van het materiaal.





Figuur 2-26: Tetraëdrische eenheden AlO4 en SiO4 [92]

Figuur 2-27: Tetraëder [93]

Stap 5 – Verharding en groei

De geopolymeer structuur verhardt en ontwikkelt mechanische sterkte. Het netwerk dat is gevormd door de polymerisatie, blijft zich versterken en stabiliseren. Positieve kationen zoals Na^+ of K^+ helpen de negatieve ladingen van de aluminaat-eenheden te neutraliseren, waardoor het geopolymeer zijn mechanische eigenschappen en chemische stabiliteit verder ontwikkelt. Dit resulteert in een hard, sterk materiaal dat geschikt is voor toepassingen zoals bouwmaterialen. De juiste hoeveelheid positieve kationen is essentieel voor de neutralisatie van de negatieve ladingen en voor het bevorderen van de juiste chemische reacties die het netwerk ondersteunen [91]. Zonder de juiste hoeveelheid kationen kan het geopolymeer te vloeibaar blijven en zich niet goed condenseren, wat de uiteindelijke eigenschappen van het materiaal beïnvloedt.

fosfaat-geactiveerde geopolymeren

Fosfaat-geactiveerde geopolymeren zijn een opkomend type geopolymeren waarbij de activering plaatsvindt door middel van fosfaat-gebaseerde verbindingen, zoals fosforzuur (H_3PO_4) of fosfaatzouten, in plaats van de meer gangbare alkalische activators zoals NaOH of Na_2SiO_3 [91] . Deze fosfaatverbindingen initiëren het proces van polymerisatie in aluminosilicaatstructuren. Tijdens dit proces vormen fosfaten sterke bindingen met aluminium en silicium in de matrix, wat resulteert in een stabiele netwerkstructuur met unieke eigenschappen [94].

Fosfaat-geactiveerde geopolymeren onderscheiden zich door hun uitstekende hittebestendigheid en chemische resistentie [95], [96]. Het netwerk dat ontstaat door fosfaatactivatie is minder gevoelig voor zure omstandigheden dan het netwerk van alkalisch geactiveerde geopolymeren, die juist beter bestand zijn tegen basische omgevingen. Daarnaast kunnen de mechanische en fysische eigenschappen, zoals druksterkte en flexibiliteit, worden aangepast door variaties in samenstelling en productiemethode. Door deze eigenschappen worden fosfaat-geactiveerde geopolymeren onderzocht voor gespecialiseerde toepassingen in extreme omstandigheden. Voorbeelden hiervan zijn hitteschilden en hittebestendige bekledingen, corrosiebestendige materialen voor industriële installaties en chemisch inerte materialen die geschikt zijn voor gebruik in zure of agressieve omgevingen. Een belangrijk voordeel van fosfaat-geactiveerde systemen is dat ze mogelijk minder agressief en milieuvriendelijker zijn in vergelijking met sterk alkalische activators, wat voordelen biedt op het gebied van veiligheid en verwerkbaarheid.

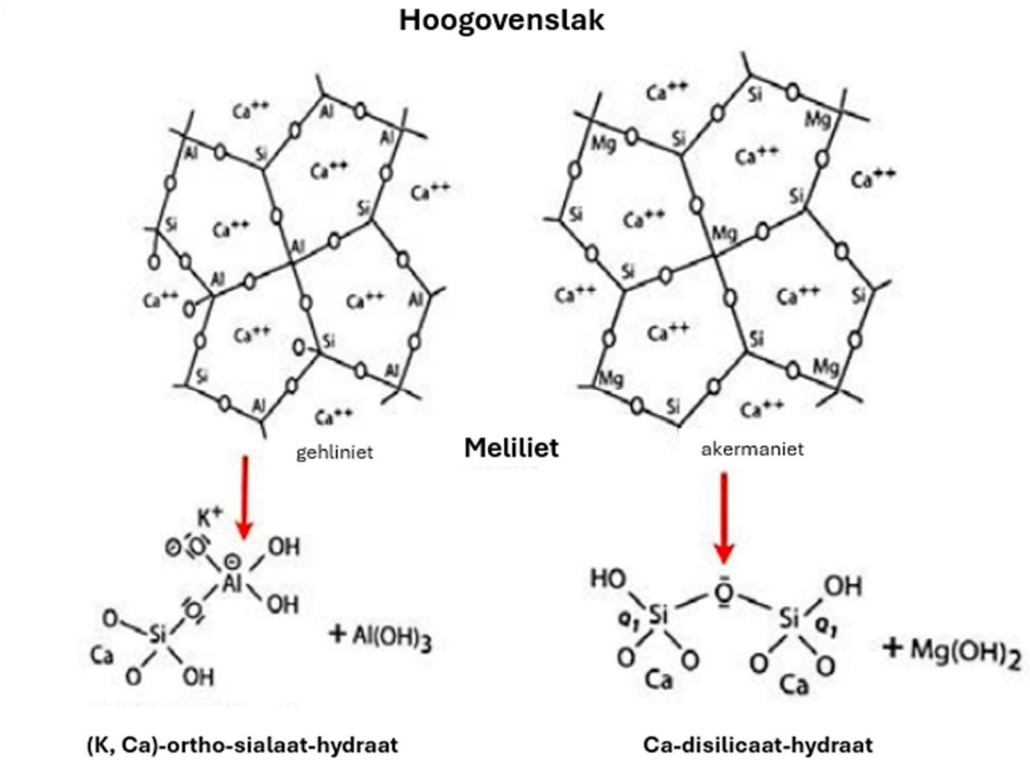
2.1.2.4 Alkali geactiveerd materiaal tegenover geopolymeren

Het is belangrijk te benadrukken dat geopolymeren niet hetzelfde zijn als AAM [97]. AAM worden gekarakteriseerd door hun hydratatieproces en zijn geen polymeren. Geopolymeren zijn polymeren en geen hydraten. Termen zoals alkali-aluminosilicaatgels (NASH) of CASH, die betrekking hebben op hydratatieproducten, zijn daarom niet van toepassing op geopolymeren.

De hoogovenslak bestaat uit een glasachtige stof die "meliliet" wordt genoemd. Dit is een vaste oplossing van gehliniet (Ca-silico-aluminaat) en akermaniet (Mg-silicaat). Wanneer deze twee mineralen worden blootgesteld aan alkalinisatie (niet activatie), depolymeriseren[2] ze onder invloed van de alkali.

De gehliniet wordt omgezet in (K, Ca)-ortho-sialaat-hydraat, een klein molecuul, en de neerslag[3] van aluminiumhydroxide $Al(OH)_3$ zoals weergegeven in Figuur 2-28.

Akermaniet ondergaat depolymerisatie tot het kleine molecuul Ca-disilicaat-hydraat (dat het C-S-H is in de cementchemie), plus de neerslag van $Mg(OH)_2$.

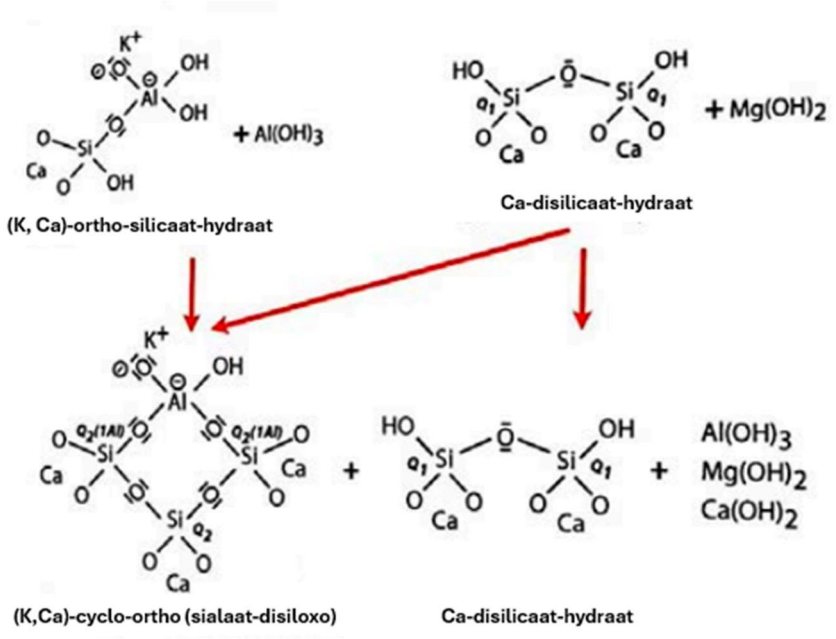


Figuur 2-28: De 1ste stap van de hoogovenslak alkalisatie [97]

[2] Depolymerisatie: is een chemisch proces waarbij een polymeer wordt afgebroken tot een monomeer of een mengsel van monomeren.

[3] Neerslag: is een vaste stof die door een chemische reactie in een oplossing wordt gevormd en afzinkt naar de bodem van het reactievat

De twee kleine moleculen reageren met elkaar en vormen samen een complexere structuur die bestaat uit een ringstructuur met daarin 3 Si-atomen , 1 Al-atoom , 1 kaliumatoom (K) en 3 calciumatomen (Ca), oftewel een (K, Ca)-cyclo-ortho (sialaat-disiloxo) zoals (links) weergegeven in Figuur 2-29. Daarnaast ontstaat ook calcium-disiloxonaat-hydraat (C-S-H), samen met de neerslag van $Al(OH)_3$, $Mg(OH)_2$ en $Ca(OH)_2$.

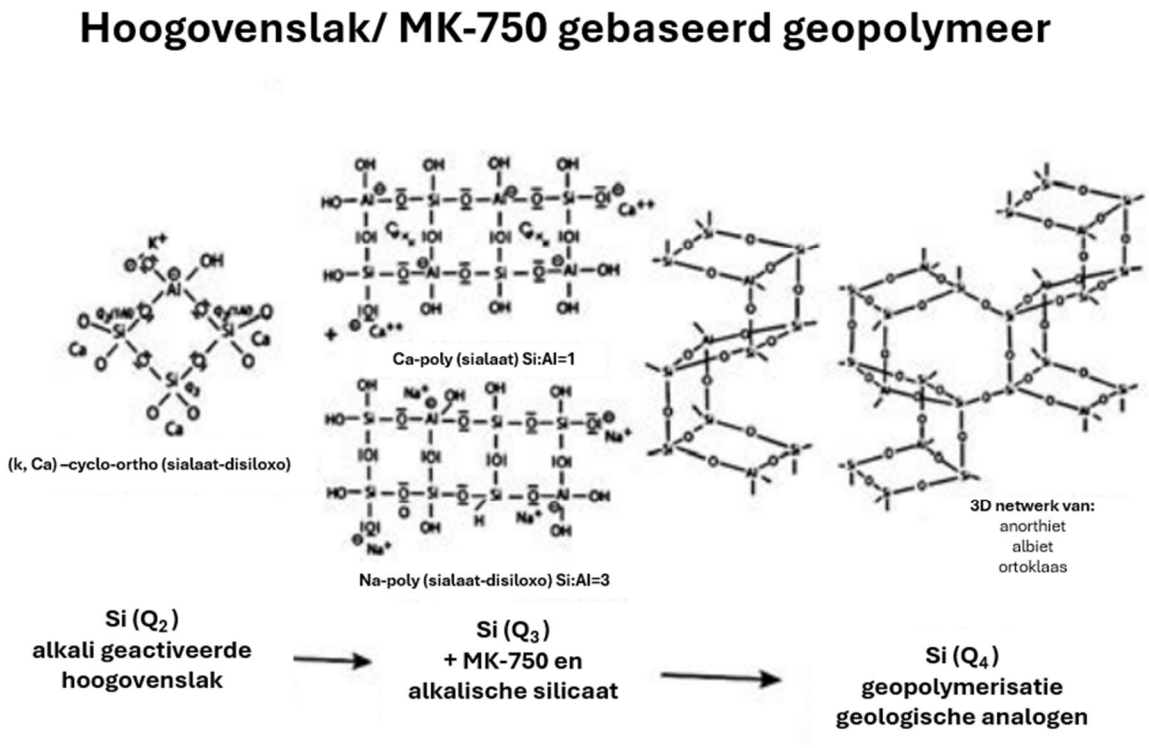


Figuur 2-29: De onstabiele structuur van alkali geactiveerde hoogovenslak [97]

Het probleem dat hierbij ontstaat, is het volgende: het alkalimetalen-ion K^+ (en ook Na^+) bevindt zich aan de buitenkant van de ringstructuur . Dit betekent dat deze kationen zich zeer snel kunnen verplaatsen wanneer ze in contact komen met water. Dit leidt tot uitloging en resulteert in slechte duurzaamheid op lange termijn. Dit is precies wat men vaak ziet bij AAS (alkali-geactiveerde slak). Het is géén geopolymeer en vormt niet het eindproduct van echte geopolymerisatie.

Om de geopolymerisatie voort te zetten tot een écht geopolymeer bindmiddel, moet er een netwerkvormend element worden toegevoegd dat kan reageren met de vrije kationen (K^+ en Na^+).

Om van een alkali geactiveerd slak naar een stabiel driedimensionaal geopolymeernetwerk te komen kan er MK-750 (metakaolien) toegevoegd worden (zoals weergegeven in Figuur 2-30). Eerst ontstaan onstabiele cyclische oligomeren met Si(Q^2)-structuren als resultaat van de alkalische activatie van hoogovenslak. Bij toevoeging van MK-750 vormen zich vervolgens tweedimensionale lintpolymeren met Si(Q^3), die uiteindelijk verder uitgroeien tot een stabiel, vertakt 3D-geopolymeer met een Si(Q^4)-structuur.



Figuur 2-30: De verharding door polycondensatie [97]

Metakaolien speelt een cruciale rol in het verkrijgen van een stabiele 3D-geopolymeerstructuur door extra reactief Al_2O_3 en SiO_2 te leveren. Dit bevordert de vorming van een netwerk van tetraëdrische eenheden (SiO_4 en AlO_4), die met vrije kationen (Na^+, K^+) en hydroxiden in oplossing reageren. Zo ontstaat een stabiel, driedimensionaal geopolymeernetwerk waarin ook vrije alkaliën worden opgenomen, wat uitloging vermindert en de duurzaamheid verhoogt. Dit beperkt de uitloging van deze ionen en draagt bij aan een verhoogde duurzaamheid van het materiaal. Geopolymeren vertonen hierdoor materiaaleigenschappen die vergelijkbaar zijn met die van PC.

In tegenstelling hiermee presteren AAM slechter, vooral bij carbonatatie. Hun kationen migreren snel bij contact met water, wat leidt tot percolaatvorming en verzwakking op lange termijn. Dergelijke AAM's vormen geen echte geopolymeren en missen hun stabiliteit.

Onderzoek toont aan dat geopolymeren al na zeven dagen uitharding bij kamertemperatuur waterbestendig zijn zonder sterkteverlies, iets wat bij AAM's niet het geval is. Dit verschil is ook analytisch aantoonbaar: Nucleaire magnetische resonantie (NMR) laat een Si:Al-verhouding van 3:1 zien bij geopolymeren (tegenover 2:1 bij AAM's), en FT-IR detecteert karakteristieke Si-O-Al-bindingen die in AAM's ontbreken.

2.1.3 Vergelijking alkalisch geactiveerd materiaal en portlandcement

2.1.3.1 Technische voordelen

AAM biedt aanzienlijke voordelen ten opzichte van Portlandcement, zowel op technisch als ecologisch vlak. Dankzij de hoge druk- en treksterkte is AAM-beton bijzonder duurzaam en geschikt voor veeleisende constructieve toepassingen.

Energieverbruik

Op ecologisch vlak scoort AAM-beton bijzonder goed. De CO_2-uitstoot tijdens de productie is tot 7 % lager dan bij conventioneel cement [98]. Dit komt doordat AAM gebruikmaakt van secundaire grondstoffen zoals vliegas en hoogovenslak, wat tevens bijdraagt aan het verminderen van afvalstromen en het behoud van natuurlijke hulpbronnen. Daarmee levert AAM een belangrijke bijdrage aan een circulaire en duurzame bouwsector.

Thermische weerstand

Een ander belangrijk voordeel is de weerstand tegen temperatuurschommelingen. Geopolymeren blijven stabiel bij temperaturen tot boven de 1000 °C, wat ze geschikt maakt voor toepassingen in brandgevoelige of industriële omgevingen [98]. Portlandcement kan bij brand intern exploderen door waterdampopbouw waar bij AAM-beton het water geleidelijk verdampt [99]. Daarnaast biedt geschuimd AAM-beton een goede thermische isolatie door de aanwezigheid van ingesloten lucht [100].

Chemische weerstand

Hoewel Portlandcement beschikt over goede mechanische eigenschappen en een voorspelbare, gestandaardiseerde sterkteontwikkeling, heeft het ook enkele nadelen. Het is gevoelig voor chemische aantasting, bijvoorbeeld door sulfaten en chloriden, en verliest zijn sterkte bij temperaturen boven de 600 °C [101]. AAM daarentegen biedt vaak een hogere mechanische sterkte, is uitstekend bestand tegen chemische invloeden en behoudt zijn prestaties zelfs bij hoge temperaturen [102]. Bovendien is AAM zeer resistent tegen chemische aantasting door zuren, zouten, alkaliën en sulfaten ten opzichte van PC.

Uitharding

Wat betreft de uitharding zijn er duidelijke verschillen tussen Portlandcement en AAM. Portlandcement heeft een voorspelbare en goed begrepen uithardingsperiode, waarbij de initiële bindingstijd typisch tussen de 30 minuten en 2 uur ligt, en de eindbindingstijd tussen de 3 en 6 uur [103], [104]. AAM daarentegen heeft een snellere bindingstijd, die sterk afhankelijk is van de samenstelling, activators en uithardingsomstandigheden [105].

Tabel 2-2: Verschillen tussen portlandcement en AAM

	Portlandcement	AAM
Grondstoffen	Kalksteen en klei	Industriële restmaterialen, activators
Energieverbruik	Hoog (verhitting klinker)	Laag (lage temperaturen)
Mechanische sterkte	Goed	Zeer goed
Thermische weerstand	Matig (sterkteverlies bij >600 °C)	Hoog (tot 1000 °C)
Chemische weerstand	Matig (gevoelig voor sulfaten/chloriden)	Hoog (resistent tegen zuren en sulfaten)
Uitharding	Gestandaardiseerd en voorspelbaar	Variabel en afhankelijk van de samenstelling

2.1.3.2 Uitdagingen van AAM

Hoewel AAM aanzienlijke voordelen biedt op vlak van duurzaamheid en prestaties, zijn er ook enkele belangrijke beperkingen die de grootschalige toepassing ervan kunnen belemmeren.

Een eerste uitdaging is de beperkte beschikbaarheid van geschikte afvalmaterialen. De wereldwijde vraag naar cement is enorm, terwijl industriële restproducten zoals vliegas en hoogovenslak slechts in beperkte mate beschikbaar zijn [106]. Hierdoor is het moeilijk om op grote schaal te produceren en aan de vraag te voldoen.

Daarnaast vormt de variabiliteit van afvalmaterialen een risico voor de kwaliteit en prestaties van AAM [107]. Aangezien de chemische samenstelling van industriële bijproducten sterk kan verschillen per bron, heeft dit invloed op de verwerkbaarheid, sterkte en duurzaamheid van het uiteindelijke product. Het ontwikkelen van gestandaardiseerde mengsels wordt daardoor een complexe uitdaging.

Een ander nadeel is het gevoelige productieproces [108]. De vorming van geopolymeren vereist precieze doseringen en het gebruik van chemische stoffen zoals NaOH en Na_2SiO_3. Deze stoffen zijn niet alleen kostbaar, maar kunnen ook gevaarlijk zijn voor mens en milieu bij onjuist gebruik. Dit vraagt om strikte veiligheidsmaatregelen en gespecialiseerde kennis bij de verwerking.

AAM vormt een veelbelovend alternatief voor conventioneel cement. Toch vereisen deze obstakels gerichte aandacht, verdere innovatie en beleidssteun om brede toepassing mogelijk te maken.

2.1.3.3 Chemische samenstelling

Portlandcement en geopolymeren verschillen fundamenteel op chemisch vlak, zowel in samenstelling als in reactiemechanisme. Deze verschillen zijn bepalend voor hun gedrag, eigenschappen en milieuprestaties.

Portlandcement bestaat voornamelijk uit CaO, SiO_2, Al_2O_3 en Fe_2O_3, die samen de kerncomponenten van het materiaal vormen [55], [81], [109]. Het typische chemische profiel van portlandcement bevat een hoog gehalte aan CaO (ongeveer 60-67 %), wat resulteert uit de verbranding van kalksteen en klei bij hoge temperaturen [55]. Bij de hydratatie van Portlandcement ontstaat C-S-H, dat verantwoordelijk is voor de mechanische sterkte, en $Ca(OH)_2$ als bijproduct. Deze calciumbasis maakt Portlandcement geschikt voor hydraulische binding, maar draagt ook bij aan de vorming van kalkuitbloeiing en de gevoeligheid voor chemische aanvallen, zoals die veroorzaakt door sulfaten [110], [111].

Geopolymeren worden vervaardigd uit alumino-silicaatrijke materialen in combinatie met een alkalische activator. De belangrijkste chemische componenten van geopolymeren zijn SiO_2 (die doorgaans respectievelijk 30-50 %) en Al_2O_3 (die 10-25 % van de samenstelling uitmaken). In tegenstelling tot Portlandcement bevat AAM-binding weinig tot geen calciumoxide. Het reactiemechanisme van geopolymeren, bekend als polycondensatie, leidt tot de vorming van een amorf aluminosilicaat netwerk. Dit netwerk is chemisch inert, wat resulteert in een hogere weerstand tegen chemische aanvallen zoals zure omgevingen en sulfaten.

Tabel 2-3: Vergelijking van de chemische eigenschappen

	Portlandcement	**AAM**
Primaire reactieve stoffen	CaO en SiO_2, (gebrande kalksteen en klei)	Aluminosilicaten (bv. vliegas, slakken, etc.)
Reactieve stof	C_2S, C_3S, C_3A, C_4AF	Aluminiumsilicaatstructuur (Al-Si keten)
Activeringsmiddel	Water	Alkalische activator (bv. Na_2SiO_3 en NaOH)
Hauptoxiden	CaO, SiO_2, Al_2O_3 en Fe_2O_3,	SiO_2, Al_2O_3, kleine hoeveelheden Fe_2O_3
Primaire hydratatieproducten	C-S-H en $Ca(OH)_2$	Geen hydratatie; polymerisatie van aluminosilicaten
CO_2-uitstoot	Hoger, door ontleding van kalksteen	Lager, hergebruik materialen enkel van activators
Water-behoefte	Hoger, voor hydratatie en verwerkbaarheid	Lager, omdat er geen hydratatie proces is
Structuur-vorming	Langzamere hydratatiereacties	Snelle polymerisatie en binding door activators
Sterkte-ontwikkeling	Langzaam over langere tijd	Vroeg bij kamertemperatuur

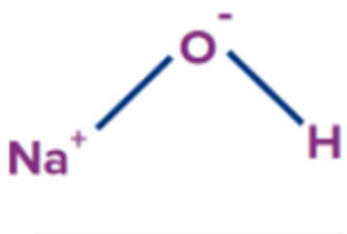
2.2 Alkalische activator

2.2.1 Natriumhydroxide

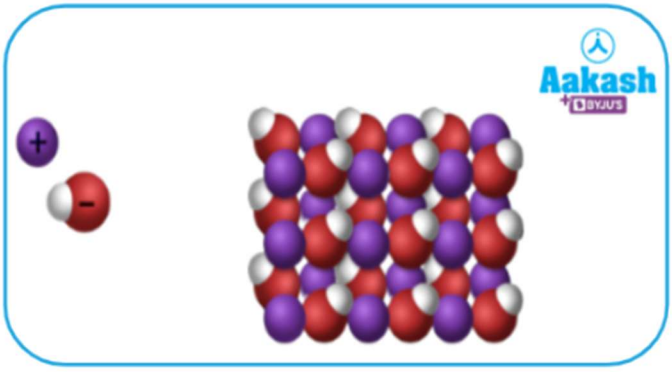
2.2.1.1 Algemeen

Natriumhydroxide (NaOH), ook wel bijtende soda genoemd, is een witte, geurloze vaste stof met sterke reactiviteit [112]. In zijn kristallijne vorm wordt NaOH als elektrisch neutraal beschouwd omdat de positieve natriumionen (Na^+) en negatieve hydroxide-ionen (OH^-) in het kristalrooster in balans zijn zoals weergegeven in . Bij contact met water reageert NaOH hevig, waarbij veel warmte vrijkomt. Dit maakt het essentieel om voorzichtig om te gaan met deze verbinding. Daarnaast is het hygroscopisch, wat betekent dat het gemakkelijk vocht uit de lucht aantrekt.

De molaire massa van natriumhydroxide is 39.997 g/mol, en de chemische formule is NaOH zoals weergegeven in Figuur 2-31 en Figuur 2-31: De chemische samenstelling van NaOH [113]. Het is extreem goed oplosbaar in water, met een maximale oplosbaarheid van 1090 g per liter. Dit vermogen om in grote hoeveelheden op te lossen draagt bij aan de veelzijdigheid van de stof in chemische processen. Met een pH-waarde van 14 is het bovendien een van de sterkste basen en wordt het veel gebruikt voor neutralisatiereacties. Deze combinatie van eigenschappen maakt het een essentiële chemische stof.



Figuur 2-31: De chemische samenstelling van NaOH [113]



Figuur 2-32: **De kristallijne structuur van NaOH** [113]

2.2.1.2 Productieproces

Chlooralkali-proces (elektrolyse van NaCl-oplossing)

Het meest gebruikte productieproces voor het vervaardigen van NaOH is weergegeven in Figuur 2-33. Hierbij wordt natriumchloride (NaCl), beter bekend als keukenzout, opgelost in water tot een geconcentreerde oplossing (pekel) [114]. NaCl wordt gewonnen via zoutwinning, bijvoorbeeld uit zeewater. Door elektrolyse wordt NaCl in componenten gesplitst waarbij NaOH, chloorgas (Cl_2) en waterstofgas (H_2) worden geproduceerd. Daarnaast ontstaan bijproducten zoals zoutzuur (HCl) en natriumhypochloriet (NaClO), ook wel bekend als javel, wordt gevormd.

Er gebeurt oxidatie aan de anode zijde. Verzadigde pekel wordt in de eerste kamer van de cel gebracht, waar de chloride-ionen (2 Cl^-) (bij de anode worden geoxideerd. Ze verliezen elektronen en vormen Cl_2 zoals weergegeven in vergelijking (2-12):

$$2\,Cl^- \leftrightarrow Cl_2 + 2\,e^- \qquad (2\text{-}12)$$

Er vindt reductie plaats aan de kathode (C) zijde weergegeven in vergelijking (2-13). Positieve waterstofionen, afkomstig van watermoleculen, worden gereduceerd door de elektronen die door de elektrolytische stroom worden geleverd. Dit resulteert in de vorming van H_2, terwijl OH^- in de oplossing vrijkomen:

$$2\,H_2O + 2\,e^- \rightarrow H_2 + 2\,OH^- \qquad (2\text{-}13)$$

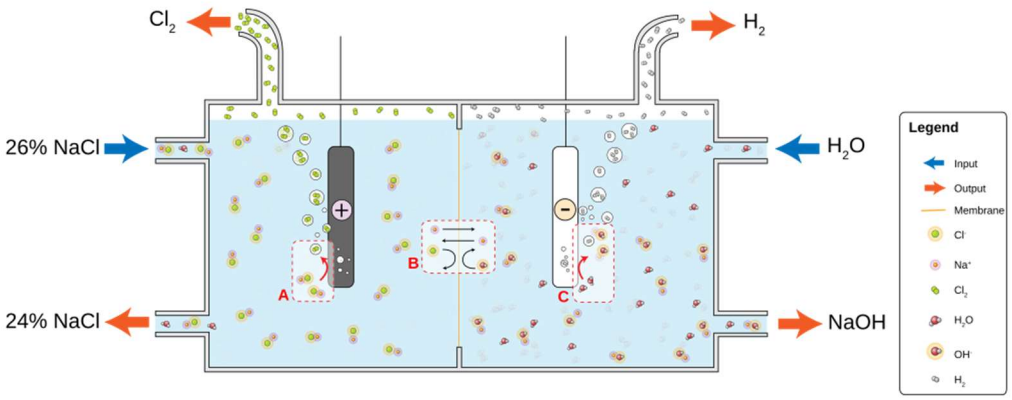
Het ionen-selectieve membraan (B) laat Na^+ migreren naar de tweede kamer, waar ze reageren met de OH^- en NaOH vormen weergegeven in (2-15).

$$Na^+ + OH^- \rightarrow NaOH \qquad (2\text{-}14)$$

De totale reactie voor de elektrolyse is weergegeven in (2-15):

$$2NaCl + 2H_2O \rightarrow H_2 + Cl_2 + 2NaOH \qquad (2\text{-}15)$$

Vervolgens wordt de NaOH-oplossing die uit de elektrolyse komt behandeld door het water te verdampen. Ten slotte wordt het verder gedroogd en verwerkt tot poeder



Figuur 2-33: Elektrolyse van NaCl-oplossing [115]

2.2.1.3 Natronloog

Wanneer NaOH in water oplost, dissocieert het in Na+ en OH- ionen. Het symbool (s) geeft aan dat de stof zich in een vaste toestand bevindt. Het symbool (aq) geeft aan dat de stof in water is opgelost zoals weergegeven in vergelijking (2-16) [116].

$$\mathrm{NaOH\,(s)} \rightarrow \mathrm{Na^{+}(aq) + OH^{-}(aq) + warmte} \qquad \text{(2-16)}$$

Deze reactie is exotherm, wat betekent dat er warmte vrijkomt, wat kan leiden tot spatten of zelfs het koken van de oplossing. Dit is een belangrijk veiligheidsaspect bij het bereiden van natronloog. NaOH wordt beschouwd als een sterke base en zal volledig dissociëren in een waterige oplossing. De warmte die vrijkomt, ontstaat doordat de ionen die vrijkomen (Na^+ en OH^-) zich omringen met watermoleculen. Dit proces heet hydratatie. Tijdens de hydratatie komen de deeltjes in een stabielere (lagere) energietoestand, en dat energieverschil wordt afgegeven als warmte.

2.2.2 Natriumsilicaat

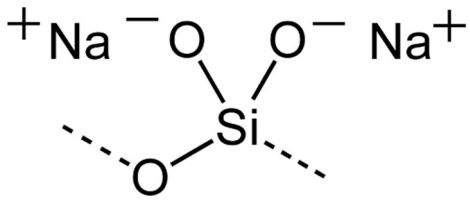
2.2.2.1 Algemeen

Natriumsilicaat (Na_2SiO_3), ook wel waterglas genoemd, is een witte of lichtgrijze vaste stof en een viskeuze, heldere vloeistof met een sterk alkalisch karakter. In vaste toestand bestaat Na_2SiO_3 uit een netwerk van Na^+-ionen en gestructureerde silicaatgroepen (SiO_3^{2-}), zoals weergegeven Figuur 2-34 [117].

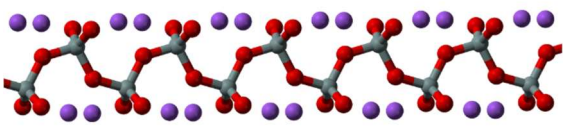
Deze ionenstructuur is elektrisch neutraal doordat de positieve lading van de natriumionen de negatieve lading van de silicaatgroepen compenseert. Daarnaast is in het moleculmodel een tetraëdrische structuur zichtbaar, kenmerkend voor de opbouw van de silicaatgroepen weergegeven in Figuur 2-35.

Dankzij zijn sterke hechtingsvermogen, alkalische eigenschappen en goede oplosbaarheid, wordt natriumsilicaat veel toegepast als bindmiddel, bij waterglasbehandelingen en in uiteenlopende industriële processen zoals de productie van coatings, reinigingsmiddelen en waterzuiveringsproducten.

In de civiele techniek wordt natronwaterglas ingezet voor het waterdicht maken van bouwputten en tunnels, waarbij het fungeert als een chemische afsluitlaag [118]. Hier ook wel beter bekend als waterglasinjectie. Ook wordt het toegepast als anti-roestgel ter bescherming van metalen oppervlakken [119]. Door de combinatie van hoge reactiviteit, oplosbaarheid en chemische stabiliteit is natriumsilicaat een veelzijdige en industriële waardevolle verbinding.



Figuur 2-34: De chemische samenstelling van Na_2SiO_3 [120]



Figuur 2-35: Het moleculemodel van Na_2SiO_3 [120]

2.2.2.2 Productieproces

Solvay-proces

Kalksteen wordt verhit in een kalkoven om CaO te produceren zoals weergegeven in vergelijking (2-17) [121]. CO_2 komt vrij tijdens dit proces. Dit kan van het proces komen eerder gezien in vergelijking (2-1). De vrijgekomen CO_2 zal hergebruikt worden doorheen dit proces.

$$CaCO_3 \xrightarrow{\text{hitte}} CaO + CO_2 \tag{2-17}$$

Ammoniakgas wordt geproduceerd door stikstof (N_2) uit lucht en waterstofgas (H_2) onder hoge (200-400 atm) en temperatuur (400-650 °C) te combineren in aanwezigheid van een ijzerkatalysator. Dit proces staat bekend als het Haber-Boschproces weergegeven in vergelijking (2-18) [122].

$$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3 \tag{2-18}$$

In dit proces wordt een natriumchloride-oplossing (pekeling) verzadigd met ammoniakgas, gevolgd door CO_2 weergegeven in vergelijking (2-19) [121]. Daarna wordt de oplossing afgekoeld. Het natriumbicarbonaat ($NaHCO_3$) slaat neer als een vaste stof omdat het slecht oplosbaar is in water.

$$NaCI + NH_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow NaHCO_3 + NH_4CI \tag{2-19}$$

Het natriumbicarbonaat wordt dan gefilterd, gedroogd en verhit in kalkoven weergegeven in vergelijking (2-20). De vrijgekomen CO_2 wordt dan opnieuw gebruikt in het proces.

$$2NaHCO_3 \xrightarrow{\text{hitte}} Na_2CO_3 + CO_2 + H_2O \tag{2-20}$$

Verhitting van Na_2CO_3 en SiO_2 komend uit kwarts van zand weergegeven in vergelijking (2-21) [123].

$$Na_2CO_3 + SiO_2 \text{ –> } Na_2SiO_3 + CO_2 \tag{2-21}$$

Wanneer Na_2SiO_3 in water oplost, reageert het met H_2O, waarbij hydrogensilicaation ($HSiO_3^-$) en OH^- worden gevormd weergegeven in vergelijking (2-22) en (2-23) [124]. Deze OH^--ionen maken de oplossing basisch, wat resulteert in een pH-waarde die groter is dan 7. De aanwezigheid van hydroxide-ionen speelt een cruciale rol in de oplosbaarheid van de grondstoffen en reguleert de pH-waarde, die essentieel is voor het stimuleren van polycondensatiereacties.

$$Na_2SiO_3(s) \xrightarrow{\text{water}} 2Na^+(aq) + {SiO_3}^{2-}(aq) \tag{2-22}$$

$${SiO_3}^{2-}(aq) + H_2O \leftrightarrow {HSiO_3}^-(aq)\ OH^-(aq) \tag{2-23}$$

2.3 Reactieve grondstoffen

Ondervonden uit een studie van Srinivasreddy et al. [125] En Migunthanna et al. [126]. Is gebleken dat de combinatie van twee of drie soorten materialen voor de productie van geopolymeren resulteer in bekomen van een meer efficiënt en cement soortige binder. Door het verlagen van de porositeit en vergroten van de microstructuur

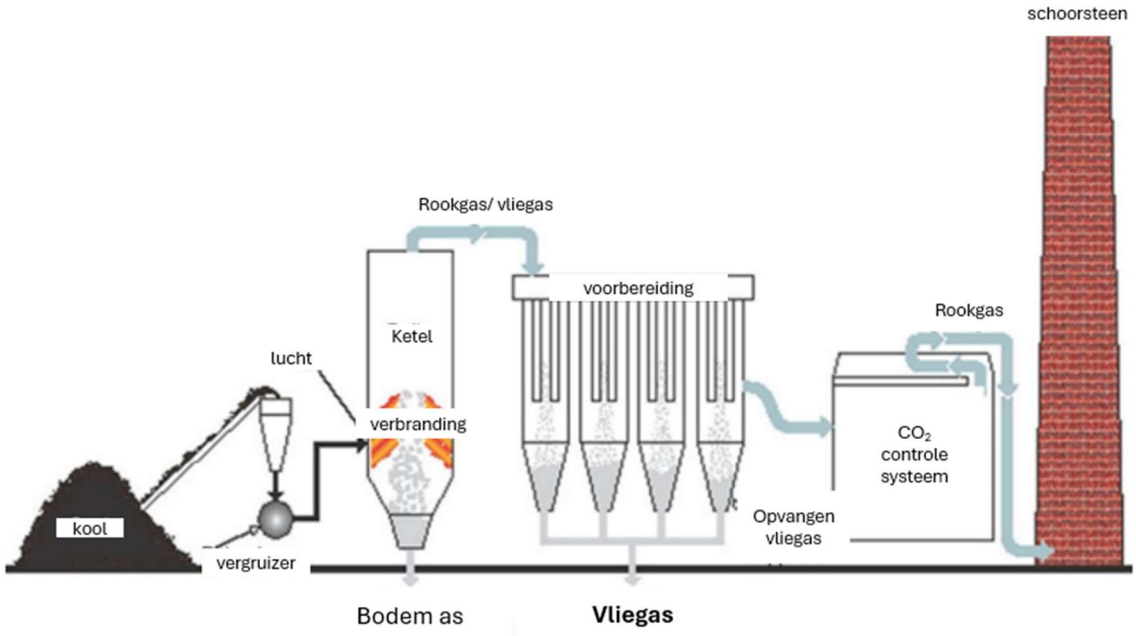
2.3.1 Vliegas van steenkool

2.3.1.1 Algemeen



Figuur 2-36: Uitzicht vliegas steenkool [127]

Vliegas is een bijproduct van de verbranding van steenkool in energiecentrales [128]. Tijdens het verbrandingsproces worden kleine, vaste deeltjes samen met de rookgassen uit de verbrandingskamer meegevoerd. Deze deeltjes worden vervolgens opgevangen met behulp van filtersystemen (zoals elektrostatische precipitatoren [129]) voordat de rookgassen via de schoorstenen worden uitgestoten zoals weergegeven in Figuur 2-37. Het opgevangen vertoont een zwarte kleur zoals weergegeven in Figuur 2-36. De samenstelling van vliegas varieert afhankelijk van het type steenkool dat wordt verbrand, maar bevat doorgaans een mengsel van oxiden zoals SiO_3, Al_2O_3, CaO en Fe_2O_3. Deze componenten komen voor in zowel amorfe als kristallijne vorm.

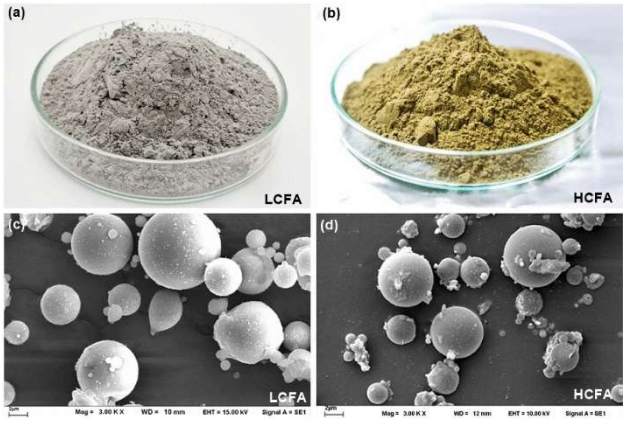


Figuur 2-37: Het verbrandingsproces van steenkool [128]

2.3.1.2 Soorten nargelang normering

Vliegas wordt volgens chemische samenstelling vaak onderverdeeld in twee hoofdtypen: laagcalcium vliegas en hoogcalcium vliegas [130]. Laagcalcium vliegas, ook wel Klasse F genoemd volgens ASTM C618, bevat minder dan 18 % CaO en wordt meestal geproduceerd uit bitumineuze of antraciet steenkool [131]. Dit type vliegas heeft een hoger gehalte aan SiO_2, Al_2O_3 en Fe_2O_3 en staat bekend om zijn langzamere reactievermogen, wat leidt tot materialen met minder krimp en potentieel hogere duurzaamheid [132], [133]. Echter, de uitharding van laagcalcium vliegas vereist vaak hogere temperaturen en langere uithardingstijden. Visueel is dit type vliegas meestal grijs van kleur zoals (links) weergegeven in Figuur 2-38.

Hoogcalcium vliegas, ofwel Klasse C, bevat meer dan 18 % CaO en is afkomstig van de verbranding van ligniet of sub-bitumineuze steenkool. Dit type vliegas reageert sneller bij activatie, wat gunstig kan zijn voor het versnellen van de sterkteontwikkeling van bijvoorbeeld geopolymeren. Een nadeel is echter dat het ook tot grotere krimp kan leiden [134]. Hoogcalcium vliegas heeft vaak een roodachtige tint, wat het visueel onderscheidt van de laagcalciumvariant, zoals (rechts) zichtbaar is in Figuur 2-38.



Figuur 2-38: Laag calcium en hoog calcium vliegas [135]

In Europa geldt de norm NBN EN 450-1:2012 voor vliegas in beton. Deze norm legt de definities, specificaties en conformiteitscriteria vast voor vliegas afkomstig uit steenkoolverbranding dat als toevoegmateriaal in beton wordt gebruikt [57].

Waar ASTM C618 vliegas verdeelt in Klasse F (laagcalcium) en Klasse C (hoogcalcium) op basis van het CaO-gehalte, doet NBN EN 450-1 dit niet strikt. In de Europese context wordt vliegas met een hoog calciumgehalte eerder kritisch beoordeeld of zelfs uitgesloten, vooral vanwege het effect op de duurzaamheid en verwerkbaarheid van beton.

Vliegas-geopolymeren bieden goede stabiliteit en kunnen bijdragen aan duurzamere bouwmaterialen [136] . Ze vereisen echter vaak verhitting bij hoge temperaturen voor de uitharding, omdat het reactie- en solidificatieproces bij kamertemperatuur relatief langzaam is [137]. Het gebruik van een alkalische activator kan het proces versnellen, maar het blijft belangrijk dat de reactie onder gecontroleerde thermische omstandigheden plaatsvindt om optimale prestaties te garanderen. Toch staat de toepassing van vliegas onder druk in Europa, doordat veel landen zoals het Verenigd Koninkrijk en Duitsland hun steenkoolcentrales geleidelijk sluiten om te voldoen aan klimaatdoelstellingen [138], [139].

2.3.2 Vliegas van huisvuil verbrandingsinstallatie

2.3.2.1 Algemeen



Figuur 2-39: Uitzicht van MSWI vliegas

Vliegas van huishoudafvalverbranding (MSWI) is een bijproduct van het verbranden van huishoudelijk afval in speciaal ontworpen verbrandingsinstallaties. Dit vliegas heeft een variabele samenstelling, afhankelijk van het type afval dat wordt verbrand, maar bevat vaak anorganische materialen zoals silicaat, calciumverbindingen, aluminiumoxiden. Daarnaast kunnen er ook zware metalen in voorkomen zoals lood, cadmium en kwik [140]. De textuur is doorgaans grijs tot zwart, zoals weergegeven in Figuur 2-39, maar kan variëren afhankelijk van de aard van het verbrande materiaal.

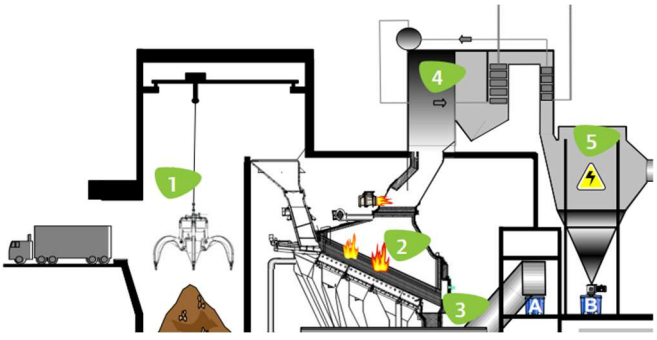
Het gebruik van MSWI-vliegas in AAM wordt beperkt door de milieutechnische risico's die gepaard gaan met de aanwezigheid van zware metalen. Indien deze toxische componenten onvoldoende worden geneutraliseerd of verwijderd, kunnen ze uitlogen, wat risico's inhoudt voor mens en milieu [143]. Daarnaast maakt de wisselende samenstelling van MSWI-vliegas het moeilijk om een uniform en betrouwbaar eindproduct te garanderen.

Alsook zijn de benodigde behandelingsprocessen om schadelijke componenten te verwijderen kostbaar en complex [144]. Voorbeelden van deze processen omvatten chemische zuivering en thermische behandelingen, die noodzakelijk zijn om het vliegas veilig en geschikt te maken voor gebruik in de bouwsector.

In een lokaal voorbeeld, zoals bij de verbrandingsinstallatie IVM te Eeklo (zie Figuur 2-40), wordt het vliegas dat vrijkomt tijdens het verbrandingsproces opgevangen. De rookgassen worden eerst naar een stoomketel geleid, waarna het vliegas door een elektrofilter wordt gevangen om deeltjes uit de rookgassen te verwijderen zoals weergegeven in (5) Figuur 2-41. Het opgevangen vliegas wordt vervolgens getransporteerd naar een verwerkingsbedrijf, zoals Renewi, waar het ondergaat een behandelproces om de schadelijke stoffen te verwijderen [145]. Deze behandeling zorgt ervoor dat het vliegas minder schadelijk is voor het milieu wanneer het wordt geloosd. Hoewel dit proces de milieueffecten van het vliegas vermindert, brengt de extra verwerking kosten met zich mee en maakt het de toepassing van het vliegas in geopolymeren complexer.



Figuur 2-40: MSWI van IMV Eeklo [141]



Figuur 2-41: Deel van productieproces MSWI [142]

2.3.3 Gecalcineerde klei

2.3.3.1 Metakaolien

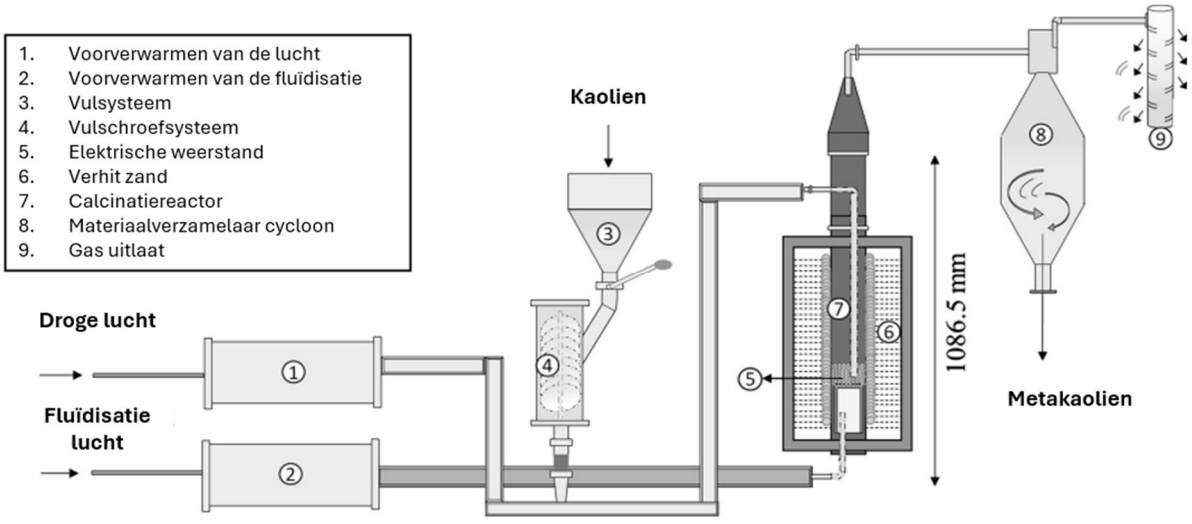
Algemeen



Figuur 2-43: Uitzicht van metakaolien [147]

Metakaolien wordt verkregen door kaolien te calcineren[4]. Kaolien is een kleimineraal dat voornamelijk bestaat uit kaoliniet ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) [148]. Tijdens dit proces wordt kaolien verhit tot een temperatuur tussen 600 en 900 °C, waarbij het gedehydroxyleerd wordt en zijn kristallijne structuur verliest. Hierdoor ontstaat metakaolien, een amorf materiaal dat zeer reactief is en rijk aan SiO_2 en Al_2O_3. Deze eigenschappen maken het bijzonder geschikt als een precursor in AAM. Visueel is metakaolien te herkennen aan zijn lichtgrijze tot crèmekleurige poedervorm, wat een indicatie is van de zuiverheid en calcinatiegraad van het materiaal zoals weergegeven in Figuur 2-43 [149].

Metakaolien wordt vaak verkozen boven andere grondstoffen vanwege zijn hoge zuiverheid. Het bestaat vrijwel volledig uit aluminosilicaten en bevat weinig onzuiverheden die de polymerisatie kunnen verstoren, in tegenstelling tot vliegas of hoogovenslak, die sterk in samenstelling kunnen variëren. De voorspelbaarheid en consistentie van metakaolien maken het een ideaal materiaal voor fundamentele studies naar de chemische en structurele processen van geopolymerisatie. Een typisch productieproces, zoals schematisch weergegeven in Figuur 2-42 omvat onder meer een verwarmde fluidisatie-reactor waarbij hete lucht en zand worden gebruikt om een gelijkmatige temperatuurverdeling te verzekeren tijdens de calcinatie van het kaolien. Hierbij wordt het materiaal continu gevoed en na verhitting gescheiden van de gasstroom via een cycloon.



Figuur 2-42: Het productieproces van metakaolien [146]

[4] Calcineren is proces waarbij een materiaal sterk wordt verhit zonder dat het smelt, om een chemische of fysische verandering teweeg te brengen.

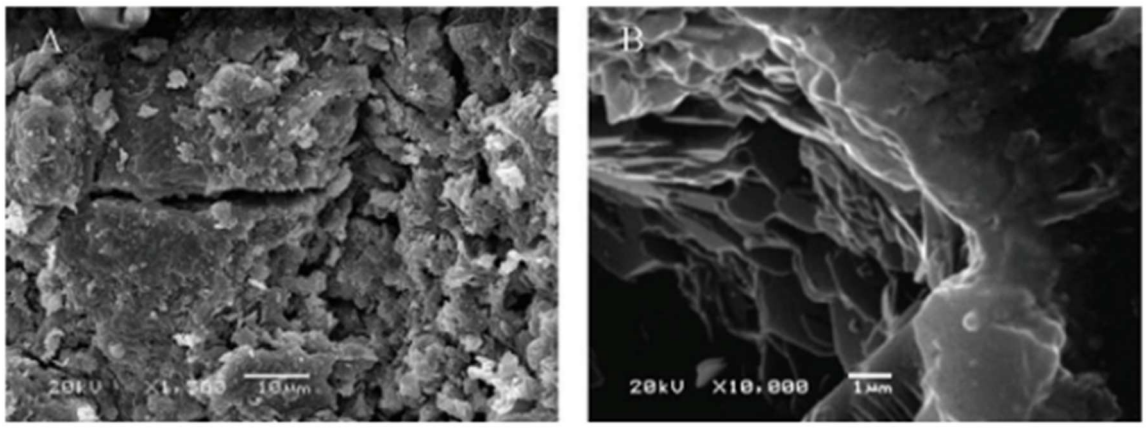
Invloed op de eigenschappen van AAM

Metakaolien is een belangrijk bestanddeel in de ontwikkeling van AAM bindmiddelen, vooral vanwege zijn hoge reactiviteit en chemische zuiverheid. Door activering met een alkalische oplossing vormt metakaolien een amorfe structuur die in staat is een sterk en thermisch stabiel bindmateriaal te ontwikkelen [150]. Geopolymeren op basis van metakaolien vertonen doorgaans een fijne microstructuur en uitstekende mechanische en thermische eigenschappen [151].

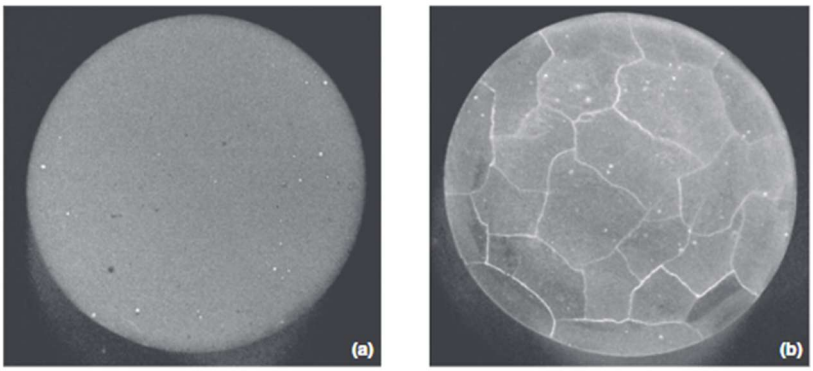
Bovendien blijkt dat bij het gebruik van een GGBS, metakaolien vaak noodzakelijk is om een efficiënte geopolymerisatie te bevorderen. Dit komt doordat metakaolien een zeer reactief poeder is, rijk aan SiO_2 en Al_2O_3, die als essentiële bouwstenen dienen voor de vorming van het geopolymeer netwerk zoals eerder beschreven in hoofdstuk 2.1.2.4. Een belangrijke overweging bij het gebruik ervan is echter dat het materiaal gevoelig kan zijn voor krimp tijdens uitharding bij kamertemperatuur, wat de dimensionale stabiliteit negatief kan beïnvloeden zoals weergegeven in Figuur 2-44.

Scanning elektromicroscopie (SEM) toont aan dat metakaolien-geopolymeren een dichte, homogene microstructuur bezitten zoals weergegeven in Figuur 2-44. Deze structuur draagt niet alleen bij aan de mechanische sterkte, maar verhoogt ook de gevoeligheid voor droogkrimp. Tijdens de uitharding bij kamertemperatuur kunnen hoge capillaire spanningen ontstaan tussen natte en droge zones binnen het microporennetwerk. Deze spanningen kunnen microscheuren veroorzaken, wat de dimensionale stabiliteit negatief beïnvloedt, zoals ook zichtbaar is Figuur 2-45b .

De mate van droogkrimp wordt beïnvloed door verschillende onderling samenhangende factoren. Een belangrijke rol is weggelegd voor het water dat zich in de hydratatiesfeer van kationen zoals Na^+ en K^+ bevindt. Een lagere waterinhoud in deze omgeving kan leiden tot een verhoogde krimp, terwijl een hogere waterinhoud juist een stabiliserend effect heeft. Daarnaast speelt de ladingsdichtheid en de hoeveelheid van deze kationen een significante rol; een hogere concentratie kan de kans op krimp tijdens het uithardingsproces vergroten. Tot slot beïnvloedt de stabiliteit van de ionenparen die zich vormen tussen de kationen en het AlO_4^--tetraëder binnen de gelstructuur in sterke mate de gevoeligheid voor droogkrimp. Wanneer deze interacties stabiel zijn, draagt dat bij aan een meer dimensionaal stabiele structuur, terwijl instabiele bindingen juist leiden tot verhoogde krimpgevoeligheid.



Figuur 2-44: SEM microfoto's van metakaolien geopolymeer [151]

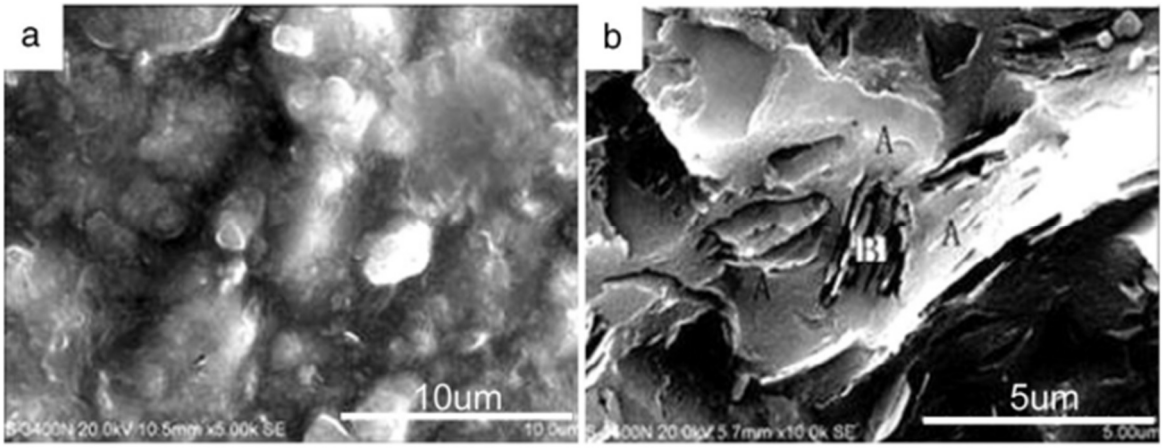


Figuur 2-45: (a) Voor het drogen (b) Na het drogen [150]

De uithardingstemperatuur speelt een cruciale rol in zowel de reactiekinetiek als de uiteindelijke prestaties van geopolymeren. Bij een lage temperatuur van 20 °C verloopt de reactie zeer traag [152]. De metakaoliendeeltjes lossen langzaam op, waardoor de vorming van geopolymeergel beperkt blijft. Hierdoor behoudt het materiaal een gelachtige consistentie en lage sterkte, omdat er onvoldoende aluminosilicaatgelformatie plaatsvindt en er veel vrije vloeistof in het systeem aanwezig blijft zoals weergegeven in Figuur 2-46a.

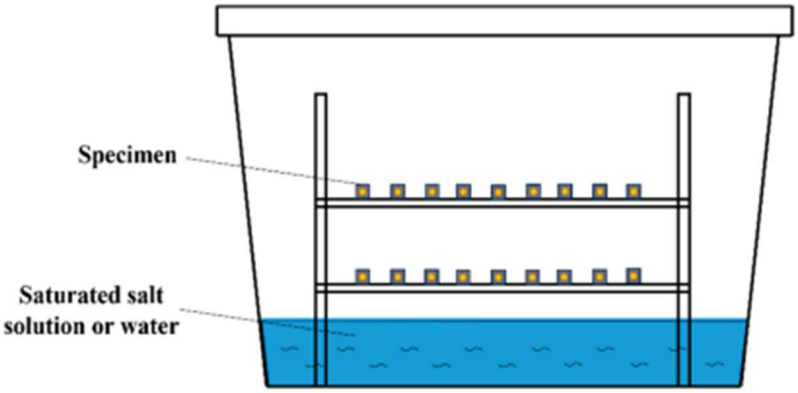
Wanneer de uithardingstemperatuur wordt verhoogd naar een bereik tussen 40 °C en 60 °C, verbetert de oplosbaarheid van silicium en aluminium aanzienlijk. Dit versnelt de gelvorming en bevordert de ontwikkeling van een compactere en mechanisch sterkere structuur. De druksterkte die bij deze temperaturen wordt bereikt is dan ook duidelijk hoger dan bij kamertemperatuur zoals weergegeven in Figuur 2-46b.

Wordt de temperatuur echter verder verhoogd tot boven de 60 °C dan verloopt de reactie te snel. De alumina-precursoren die vrijkomen bij het oplossen van metakaolien reageren vrijwel onmiddellijk, waardoor de geopolymeer slurry snel stolt. In dit proces worden onopgeloste metakaoliendeeltjes ingekapseld in het geopolymeergel, wat verdere reactie verhindert. Dit belemmert de vorming van een homogeen en sterk netwerk, en veroorzaakt tegelijkertijd chemische krimp en microscheuren. Als gevolg hiervan is de uiteindelijke druksterkte bij deze hoge temperaturen lager dan bij een uithardingstemperatuur van 60 °C.



Figuur 2-46: (a) Verhard bij 20 °C (b) Verhard bij 40 °C

Om structurele problemen zoals krimp en de vorming van microdefecten te beperken, is het van groot belang dat de uithardingsomstandigheden zorgvuldig worden gecontroleerd en geoptimaliseerd. Een effectieve aanpak begint bij het aanpassen van de mengselsamenstelling, waarbij bijvoorbeeld de Si/Al-verhouding wordt afgestemd op het gewenste reactiegedrag en de beoogde structurele eigenschappen. Daarnaast speelt de regulering van zowel de uithardingstemperatuur als de uithardingstijd een cruciale rol in het beheersen van de reactiekinetiek en het voorkomen van ongewenste spanningen in het materiaal. Ten slotte draagt het handhaven van een geschikte relatieve luchtvochtigheid tijdens het uithardingsproces bij aan het beperken van uitdroging en de bijbehorende krimpverschijnselen [152]. Een gecontroleerde uitdroging kan, zoals weergegeven in Figuur 2-47, worden gerealiseerd. Indien de relatieve luchtvochtigheid (RH) te hoog is, kan deze worden verlaagd door het toevoegen van zoutoplossing. Door deze factoren zorgvuldig af te stemmen, kan de dimensionele stabiliteit van geopolymeren aanzienlijk worden verbeterd.



Figuur 2-47: De uithardingsopstelling van de proefstukken [152]

Metakaolien wordt niet alleen gewaardeerd vanwege zijn zuiverheid, maar ook vanwege zijn hoge reactiviteit. Dit maakt het een waardevolle grondstof, waar eigenschappen zoals sterkte, thermische stabiliteit en duurzaamheid cruciaal zijn. De productie van metakaolien vereist echter specifieke procesomstandigheden en brengt hogere kosten met zich mee in vergelijking met industriële bijproducten, wat de toepassing ervan op grote schaal kan beperken. Desondanks blijft het een essentieel materiaal voor het begrijpen en ontwikkelen van geavanceerde geopolymeertechnologieën.

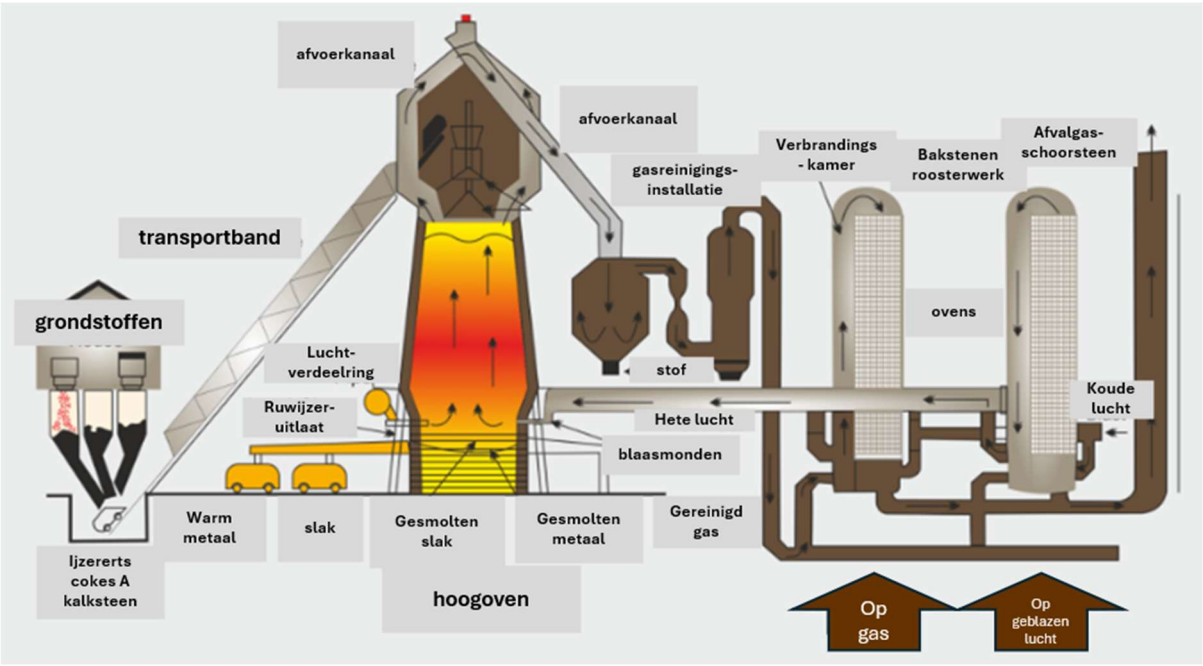
2.3.4 Gemalen gegranuleerd hoogovenslak

2.3.4.1 Algemeen



Figuur 2-49: Uitzicht van GGBS [154]

Gegranuleerd hoogovenslak is een bijproduct van de productie van ijzer in hoogovens [155], [156]. Tijdens dit proces worden ijzererts, kalksteen en cokes verhit tot temperaturen rond de 1500 °C. Terwijl het vloeibare ijzer naar de bodem van de oven zakt, vormt zich daarboven een laag gesmolten slak, zoals te zien is in Figuur 2-48. Deze slak bestaat uit niet-metallische componenten zoals SiO_2, CaO, MgO en Al_2O_3. De slak wordt vervolgens afgetapt en snel gekoeld, meestal via watergranulatie, om kristallisatie te voorkomen en zo een glasachtige structuur te verkrijgen. Dit proces staat bekend als granuleren, en is essentieel voor het behoud van de reactiviteit van het materiaal in latere toepassingen. Hoe sneller de afkoeling verloopt hoe amorfer de structuur blijft. Na afkoeling wordt de slak vermalen tot een fijn poeder, wat resulteert in gemalen gegranuleerd hoogovenslak (GGBS). Deze vermalingsstap is cruciaal, omdat het de specifieke oppervlakte vergroot en daarmee de reactiviteit van het materiaal aanzienlijk verhoogt. Net als vliegas en andere minerale toevoegingen kan GGBS dienen als alternatieve grondstof voor bindmiddelen in AAM. Het gebruik ervan draagt bij aan de vermindering van de CO_2-uitstoot, aangezien het een reststroom is. De kleur van GGBS varieert van beige tot donker of zelfs wit zoals weergegeven in Figuur 2-49. De kleur is afhankelijk van factoren zoals het vochtgehalte, de chemische samenstelling en de efficiëntie van het granulatieproces Wanneer het gemalen is, heeft het meestal een witte kleur.

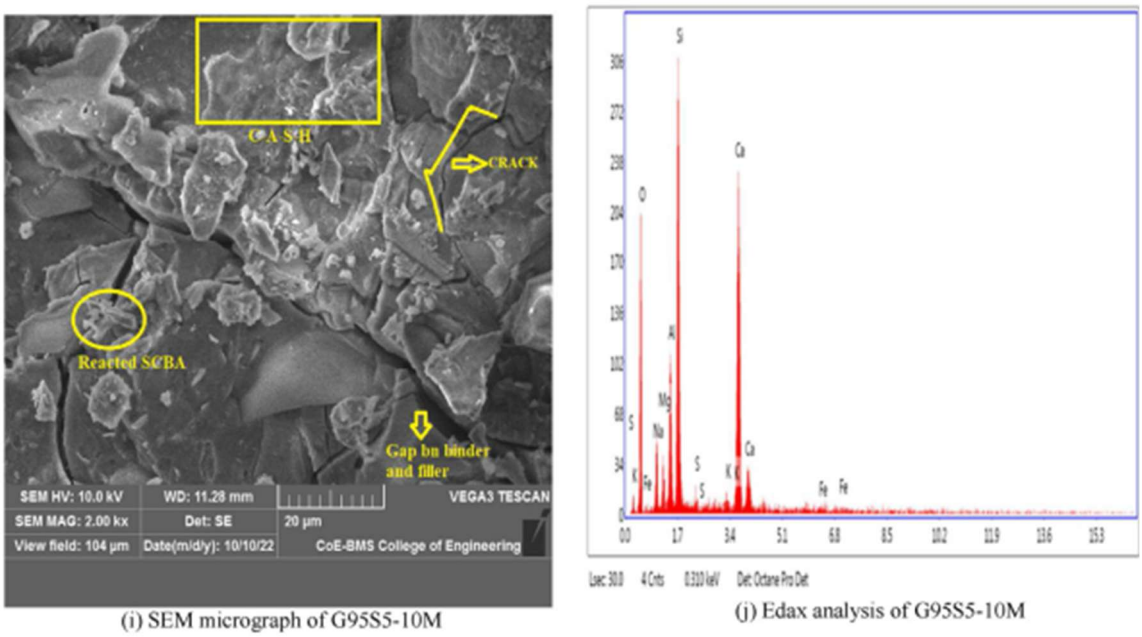


Figuur 2-48: Het productieproces van ijzer [153]

Het gebruik van GGBS in geopolymeren kan ook economisch voordelig zijn, omdat het vaak goedkoper is dan het gebruik van volledig portlandcement, vooral in regio's waar hoogovenslak beschikbaar is als restproduct [157]. Het gebruik van dit bijproduct helpt ook de behoefte aan stortplaatsen te verminderen, wat bijdraagt aan het verminderen van de belasting op het milieu

2.3.4.2 Invloed op de eigenschappen van AAM

Het gebruik van gegranuleerde hoogovenslak in geopolymeren biedt verschillende voordelen. Het poeder reageert goed met alkalische activators, wat essentieel is voor het creëren van de AAM bindingen. Deze reactie zorgt voor de vorming van een sterk en duurzaam materiaal. Geopolymeren die zijn gebaseerd op GGBS vertonen vaak uitstekende mechanische eigenschappen, zoals hoge druksterkte en chemische resistentie. Dit maakt ze ideaal voor gebruik in agressieve omgevingen, zoals waterbehandelingsinstallaties, rioolsystemen en andere toepassingen waar beton vaak wordt blootgesteld aan schadelijke chemicaliën en hoge vochtigheid. Door de dichtere structuur zoals weergegeven in Figuur 2-50, is het beter bestand tegen zuren, chloriden, sulfaten en alkaliën [158], [159], [160].



(i) SEM micrograph of G95S5-10M

(j) Edax analysis of G95S5-10M

Figuur 2-50: SEM microscopische foto [160]

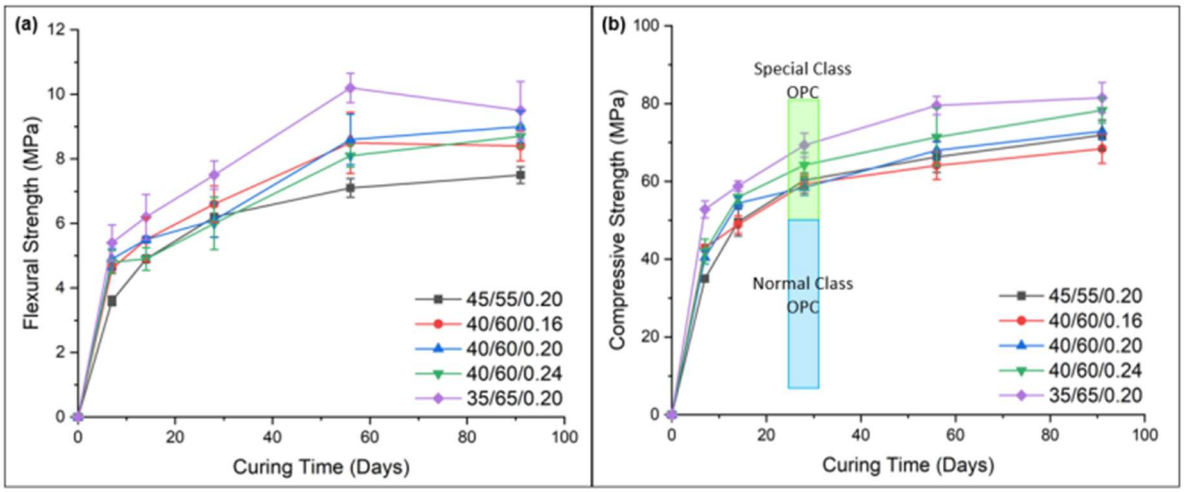
.

Tijdens het uithardingsproces blijkt GGBS de mechanische eigenschappen te verbeteren en de microstructuur te bevorderen door het hoge Ca-gehalte [161]. GGBS bezit puzzolane eigenschappen en ontwikkelt bindingseigenschappen wanneer het reageert met een alkalische activator. Deze reactie verloopt snel en bevordert de vorming van sterke bindingen.

Een cruciaal aspect van GGBS AAM-systemen is de hoge reactiviteit, voornamelijk te danken aan de grote hoeveelheid CaO. Wanneer GGBS wordt geactiveerd met een alkalische oplossing, versnelt de reactie in vergelijking met laag-calcium precursoren zoals vliegas of metakaolien [162] . Deze versnelling wordt veroorzaakt door het vrijkomen van calciumionen (Ca^{2+}), die de vorming van een amorfe aluminosilicaatgel stimuleren. Dit versnelt de polycondensatie en versterkte polymerisatie binnen het AAM-proces.

In tegenstelling tot traditionele hydratatiereacties, zoals die in Portlandcement, leidt de aanwezigheid van calcium in GGBS-geopolymeren niet tot de vorming van klassieke hydratatieproducten zoals C-S-H-gel, maar versterkt het juist de polymerisatie van het AAM-netwerk. Het resultaat is dat GGBS-geopolymeren al na één tot drie dagen bij kamertemperatuur een significante sterkte kunnen ontwikkelen [163]. Deze snelle initiële sterkteontwikkeling maakt GGBS bijzonder geschikt voor toepassingen waarbij een snelle uitharding en vroege belasting vereist zijn.

GGBS-geopolymeren ontwikkelen doorgaans hogere uiteindelijke sterkte dan geopolymeren die uitsluitend zijn gebaseerd op vliegas of andere bijproducten zoals weergegeven in Figuur 2-51. Dit komt doordat de voortdurende reactie van GGBS met alkaliën de vorming van sterkere aluminosilicaten bevordert, wat bijdraagt aan de lange termijn sterkteontwikkeling [164].



Figuur 2-51: (a) Buigtreksterkte (b) Druksterkte [164]

Daarnaast heeft GGBS-AAM-beton een verbeterde weerstand tegen thermische schokken, vorst-dooi-cycli en brandbestendigheid, wat de structurele integriteit in ongunstige omstandigheden verbetert [165].

2.3.5 Gerecycleerd baksteenpoeder

2.3.5.1 Algemeen



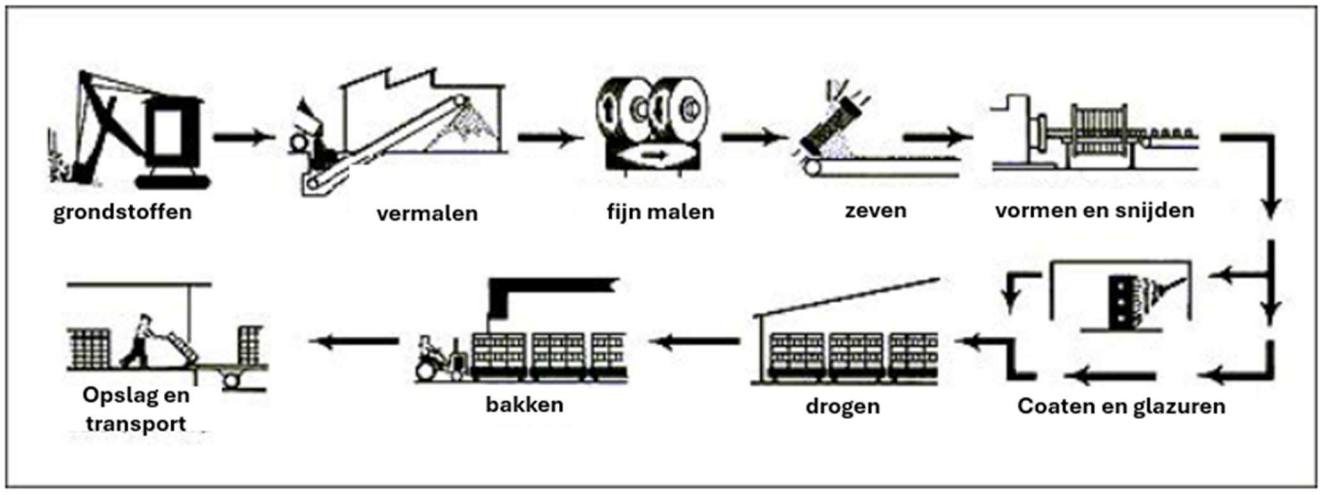
Figuur 2-52: Uitzicht van RBP

Het gerecycleerd baksteenpoeder (RBP) is een secundaire grondstof die ontstaat tijdens het productieproces van bakstenen [167]. Het poeder wordt gevormd door stof dat vrijkomt tijdens de bewerking en afwerking van de bakstenen weergegeven in Figuur 2 53. Dit stof wordt opgevangen door afzuigsystemen om de werkomgeving te verbeteren en stofemissies te beperken. baksteenpoeder varieert afhankelijk van de herkomst en de samenstelling van de gebruikte bakstenen, maar het heeft meestal een grijze of rode tint, afhankelijk van de baksteenkwaliteit zoals weergegeven in Figuur 2-52.

Het opgevangen poeder vormt een fijn materiaal dat bestaat uit SiO_2, Al_2O_3 en CaO. Deze chemische samenstelling is vergelijkbaar met andere minerale bijproducten zoals vliegas, wat RBP interessant maakt als gedeeltelijke vervanging van traditionele bindmiddelen in AAM toepassingen. Het amorf gehalte van RBP ligt tussen 19,6 % en 33 %, wat aanzienlijk lager is dan dat van vliegas en hoogovenslak, die respectievelijk tussen de 50 % en 90 % amorf materiaal bevatten [166], [167]. Dit lagere amorf gehalte resulteert in een verminderde reactiviteit van RBP in geopolymeren.

Het gebruik van RBP in geopolymeren biedt aanzienlijke voordelen voor zowel de bouwsector als het milieu. Door het hergebruik van RBP kan de vraag naar primaire grondstoffen worden verminderd, wat bijdraagt aan een circulaire en duurzame economie. Alsook wordt de hoeveelheid afval die naar stortplaatsen gaat beperkt. Dit draagt bij aan een vermindering van de milieubelasting.

Daarnaast biedt het gebruik van RBP ook economische voordelen. RBP is vaak goedkoper dan conventionele materialen zoals nieuw cement of andere puzzolanen, waardoor het de kosten van grondstoffen in de productie van geopolymeren verlaagt.



Figuur 2-53: Het productieproces van een baksteen [168]

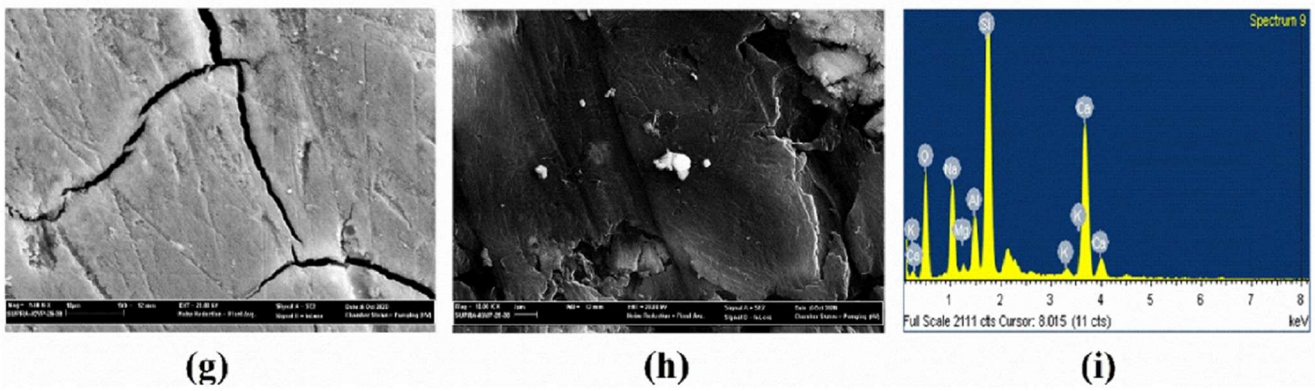
2.3.5.2 Gebruik in AAM

Het poeder heeft een fijne deeltjesverdeling en bevat aanzienlijke hoeveelheden amorfe silica en alumina, wat essentieel is voor geopolymerisatie. Deze eigenschappen maken RBP geschikt als netwerkvormer in geopolymeer bindmiddelen, waarbij het effectief kan reageren met vrije Na^+ en K^+ om deze in een stabiele geopolymeerstructuur vast te leggen.

Echter, het gebruik van 100 % RBP leidt tot een zeer lage druksterkte. Desondanks biedt RBP voordelen zoals het verminderen van volumekrimp en het beperken van oppervlaktescheuren na thermische blootstelling [169]. Een optimale dosering, bijvoorbeeld 40 % RBP gecombineerd met GGBS kan de mechanische sterkte verbeteren en tegelijkertijd de autogene krimp aanzienlijk verminderen.

Mengsels van RBP met GGBS vertonen een compactere microstructuur met minder ongereageerde deeltjes en hogere sterkte in vergelijking met mengsels met vliegas zoals weergegeven in Figuur 2-54. Dit komt door de vorming van calciumrijke producten (zoals C-A-S-H) naast de geopolymeer fase, bevestigd via EDX-analyse. Microbarsten werden bij alle monsters vastgesteld, vooral door krimp als gevolg van de hoge wateropname van RBP.

Vanwege de poreuze aard van RBP en de aanwezigheid van reactief SiO_2 en Al_2O_3 is de waterabsorptie relatief hoog. In sommige gevallen is een waterabsorptie van 14 % vastgesteld [170]. Deze verhoogde wateropname kan gunstig zijn voor het verminderen van zelfkrimp in beton, aangezien het extra water beschikbaar stelt voor interne genezing.



Figuur 2-54: (g) (mag = 5K)_RBP40-GGBS60 (h) (mag = 10K)_RBP40-GGBS60 (i) EDX_RBP40-GGBS60

2.3.6 Gerecycleerd betonpuinpoeder

2.3.6.1 Algemeen



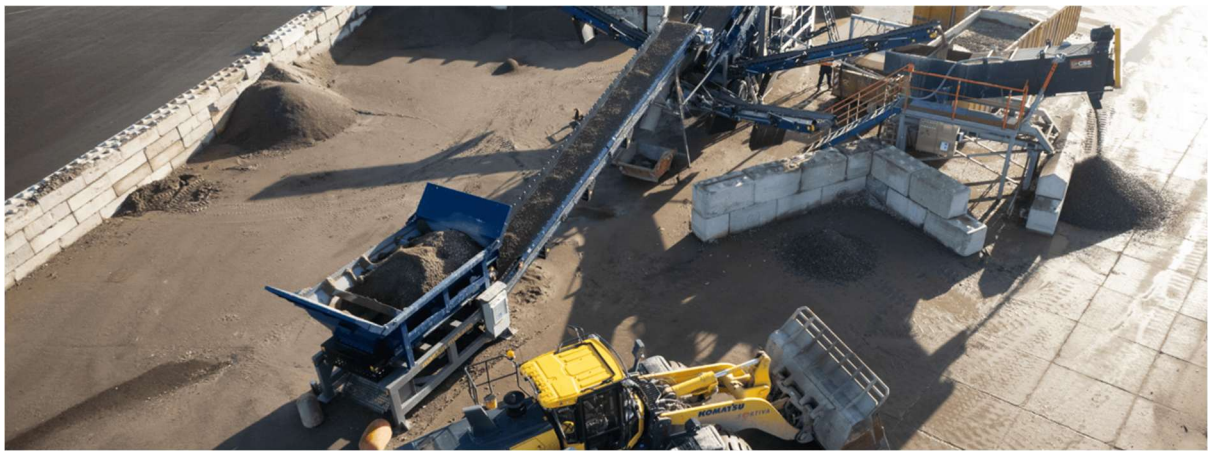
Figuur 2-55: Uitzicht van RCP

Gerecycleerd betonpuinpoeder (RCP) is een secundaire grondstof die wordt verkregen uit gesloopt beton. Het productieproces van RCP begint met het mechanisch breken van betonpuin in kleinere fracties met behulp van een puinbreker zoals weergegeven in Figuur 2-56. Vervolgens worden deze fracties gezeefd tot de gewenste korrelgrootte met een geavanceerde zeefinstallatie. Hierna ondergaat het materiaal een wasbehandeling om verontreinigingen zoals stof en kleefresten te verwijderen. Het resultaat is een schoon, uniform betongranulaat, dat nadien verder wordt vermalen tot een fijn poeder. Dit restmateriaal bestaat hoofdzakelijk uit SiO_2, CaO en diverse andere minerale componenten. De kleur varieert van licht- tot donkergrijs, afhankelijk van de samenstelling van het oorspronkelijke beton zoals weergegeven in Figuur 2-55.

Dankzij de fijne structuur en chemische samenstelling reageert RCP goed met alkalische activators, wat leidt tot de vorming van een stabiele en duurzame AAM-structuur.

RCP speelt een belangrijke rol in het verduurzamen van de bouwsector door de ecologische voetafdruk van bouwprojecten te verkleinen en het hergebruik van sloopmateriaal te bevorderen. Het productieproces, met moderne breek-, zeef- en reinigingstechnieken, levert een hoogwaardige secundaire grondstof die de levenscyclus van beton verlengt.

Daarnaast is RCP economisch voordelig, omdat het goedkoper is dan traditionele bindmiddelen zoals cement of vliegas, wat kostenbesparingen oplevert in de betonproductie.



Figuur 2-56: Het productieproces van het gerecycleerde betonpuinpoeder [171]

2.3.6.2 Gebruik in AAM

Geopolymeren op basis van RCP kunnen uitstekende mechanische en chemische eigenschappen aanbieden, waardoor ze ideaal zijn voor toepassingen die duurzaamheid, bestendigheid en een lange levensduur vereisen. Het gebruik van RCP kan de prestaties van het eindproduct verbeteren, met geopolymeren die vergelijkbare of zelfs betere eigenschappen vertonen dan conventioneel beton, zoals verhoogde sterkte en chemische weerstand.

Polymerisatie & Microstructuur: Tot 75 % vervanging van vliegas (FA) en GGBS door gerecycleerd poeder (zoals RCP of RPP) heeft weinig invloed op de microstructuur. Bij 100 % vervanging met RCP ontstaat echter een losse structuur.

Vervanging van FA door gerecycleerd poeder geeft betere sterkte- en krimpweerstand dan vervanging van GGBS.

RCP is echter minder geschikt als netwerkvormer. Het bevat veel CaO en relatief weinig SiO_2 en Al_2O_3, wat het minder reactief maakt voor het vormen van een geopolymeer netwerk. In plaats daarvan draagt het bij aan C-S-H vorming, zoals bij traditioneel cement. RCP is daardoor beter te gebruiken als vulstof of voor het verbeteren van de mechanische sterkte, maar minder effectief voor het neutraliseren van vrije kationen.

Vanwege de fijne deeltjesgrootte en de grote is de waterabsorptie relatief hoog.

2.4 Waterabsorptie van poeders

2.4.1 Algemeen

De waterabsorptie van poeders kleiner dan 0,125 mm (125 µm) wordt bepaald volgens NBN EN 1097-6:2022, deel 6 van de testmethoden voor mechanische en fysische eigenschappen van granulaten [57]. Deze norm beschrijft de conusmethode voor de bepaling van de waterabsorptie. Deze methode kent beperkingen vanwege de subjectieve visuele beoordeling van de verzadigd-oppervlakte-droge (SSD) toestand, wat kan worden beïnvloed door verschillende fysische krachten die het gedrag van poeders beïnvloeden [172].

Het gedrag van poeders wordt in belangrijke mate bepaald door de interactie tussen verschillende krachten, zoals zwaartekracht, van der Waals-krachten, capillaire krachten, elektrostatische krachten en interne wrijving [173]. Deze krachten beïnvloeden hoe poeders zich gedragen in verschillende omstandigheden, zoals bij het storten, samendrukken, of in contact met vloeistoffen.

Zwaartekracht trekt poederdeeltjes naar beneden en beïnvloedt hoe ze zich opstapelen of verdichten [174]. Dit is vooral van belang bij het storten of comprimeren van poeder in bijvoorbeeld een vorm. Bij grotere deeltjes overheerst zwaartekracht, maar bij fijnere poeders (zoals <125 µm) is het effect kleiner, waardoor andere krachten meer invloed krijgen. Ook zorgt de zwaartekracht ervoor dat de deeltjes zich stapelen, wat invloed heeft op de dichtheid van het poeder en de hoeveelheid lucht tussen de deeltjes.

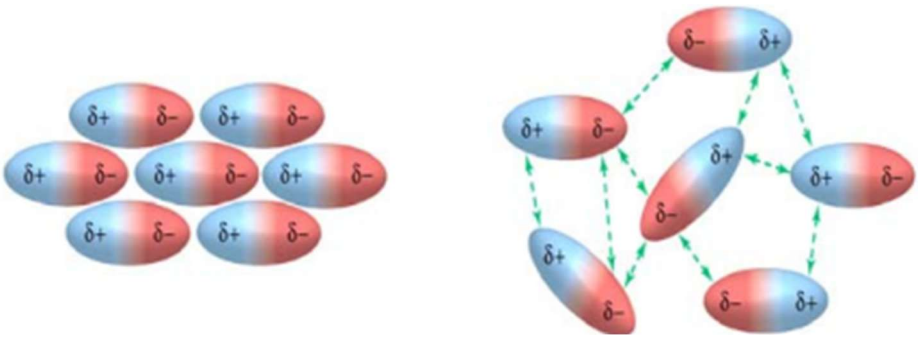
Van der Waals-krachten zijn zwakke, fysische aantrekkingskrachten die ontstaan door tijdelijke fluctuaties in de elektrische ladingen van atomen of moleculen zoals weergegeven in Figuur 2-57 [172]. Ze worden belangrijker naarmate de deeltjes kleiner zijn, en kunnen bij poeders <10 µm leiden tot agglomeratie of het samenklonteren van de deeltjes. Dit kan de stroombaarheid en de homogeniteit van het poeder negatief beïnvloeden.

Capillaire krachten zorgen ervoor dat water zich tussen de poriën en spleten van het poeder verplaatst [175]. Ze bepalen in grote mate hoeveel water wordt opgenomen en beïnvloeden zo de eigenschappen van het poeder, dat stroperiger of samenhangender kan worden. Ook kunnen deze krachten het drogen en klonteren van deeltjes bevorderen doordat water de deeltjes bijeen trekt.

Fijne poeders kunnen elektrisch geladen raken door wrijving, bijvoorbeeld bij het mengen of zeven. Afhankelijk van de lading kunnen deeltjes elkaar aantrekken of afstoten, wat leidt tot verstoringen in stroming of homogeniteit.

De wrijving tussen deeltjes wordt bepaald door hun vorm, grootte en oppervlaktestructuur. Ruwere of hoekige deeltjes (zoals bij gebroken betonpuin of baksteen) geven meer interne wrijving, wat een negatieve invloed heeft op stroombaarheid en compactie.

Door de invloed van verschillende fysische krachten is het gedrag van fijne poeders (<125 µm) complex en lastig visueel te beoordelen. Hierdoor blijkt de conusmethode voor het bepalen van de waterabsorptie onbetrouwbaar, aangezien deze sterk afhankelijk is van subjectieve waarneming van de SSD-toestand. Om deze beperkingen te vermijden, wordt in dit onderzoek gekozen voor een alternatieve benadering met de vries-dooimethode, waarbij de waterabsorptie wordt bepaald door het zorgvuldig wegen van natte en gedroogde monsters.



Figuur 2-57: Schematische voorstelling van der Waals-krachten [176]

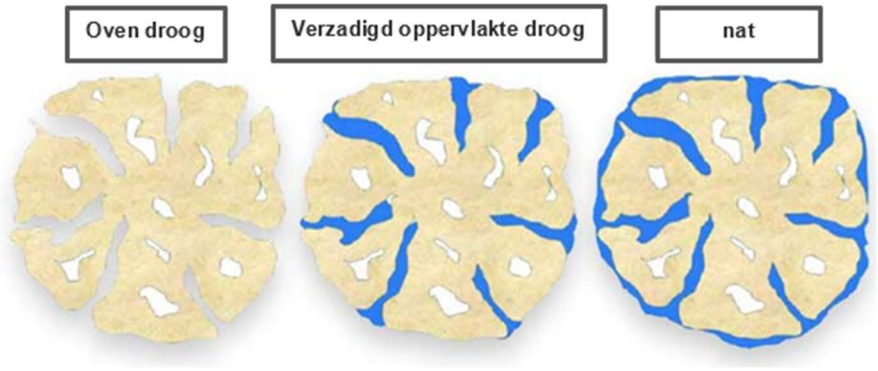
Om de waterabsorptie van vulstofdeeltjes nauwkeuriger te bepalen, is een alternatieve methode ontwikkeld die gebaseerd is op het gedrag van water op het oppervlak van deeltjes [67]. Het idee is dat deeltjes aan elkaar blijven kleven zolang er een laagje water aanwezig is op hun oppervlak zoals weergegeven in Figuur 2-58. Dit fenomeen wordt gebruikt om het moment te bepalen waarop de SSD toestand wordt bereikt.

De SSD-toestand treedt op wanneer het oppervlak van de deeltjes net droog genoeg is om geen zichtbare waterlaag meer te hebben, maar er nog wel voldoende water in de poriën aanwezig is. Wanneer de deeltjes niet meer aan elkaar kleven, kan worden aangenomen dat het oppervlak droog is en de SSD-toestand is bereikt. Deze verandering in cohesie vormt een duidelijke indicator die gebruikt kan worden om de waterabsorptie te berekenen.

De waterabsorptie van vulstofdeeltjes wordt bepaald door bij verschillende watergehaltes telkens het verschil in massa te meten tussen een nat monster en hetzelfde monster na volledige droging. De uiteindelijke waterabsorptie (W) wordt berekend zoals weergegeven in vergelijking (2-24). Het resultaat wordt uitgedrukt als een percentage van de droge massa, wat inzicht geeft in hoeveel water de deeltjes hebben opgenomen. Door deze methode wordt het mogelijk om nauwkeuriger te bepalen hoeveel water vulstofdeeltjes kunnen vasthouden, wat essentieel is voor het optimaliseren van mengsels en het weergeven van de correcte water over binder factor.

$$W\,[\%] = \frac{m_{SSD} - m_{droog}}{m_{droog}} \cdot 100 \qquad (2\text{-}24)$$

waarbij m_{SSD}: massa nat, oppervlakte droog [g];
m_{droog}: massa, volledig gedroogde monster [g].



Figuur 2-58: Verschillende vochtcondities. [177]

2.5 Zand

2.5.1 Algemeen



Figuur 2-59: Uitzicht zand [178]

Zand is een cruciaal bestanddeel van beton en AAM mengsels [179]. Het dient niet alleen als vulmateriaal, maar is ook belangrijk voor de stevigheid, stabiliteit en duurzaamheid van het verharde mengsel. Een goede korrelstructuur draagt bij aan een optimale verdeling van krachten binnen het materiaal en helpt krimp en vervorming tijdens het uitharden te beperken.

Voor een goede mechanische verankering in het mengsel is vooral de vorm van de zandkorrels van belang. Hoekige korrels zijn hierbij het meest geschikt, omdat ze beter in elkaar grijpen en zo een sterker en stabieler netwerk vormen. Dit in tegenstelling tot afgeronde korrels, zoals die vaak voorkomen in natuurlijk rivier- of zeezand, die een minder sterke binding geven en de sterkte van het beton kunnen verminderen.

De herkomst van zand is van invloed op de samenstelling en kwaliteit. Zand uit natuurlijke bronnen, zoals zeezand of rivierbeddingen, kan verontreinigingen bevatten zoals zout of organisch materiaal. Daarom is het belangrijk dat dergelijk zand grondig wordt gewassen voordat het wordt gebruikt in een mengsel.

Daarnaast zijn er ook kunstmatig geproduceerde zandtypes, zoals CEN-standaardzand, die specifiek zijn ontworpen voor consistente prestaties en nauwkeurige testresultaten.

Bij de keuze van zand moet ook rekening worden gehouden met de ecologische impact. De winning van natuurlijk zand, zoals zeezand, kan leiden tot milieuschade zoals erosie, verlies van mariene habitats en veranderingen in kustlijnen. Dit maakt het gebruik van lokaal gewonnen of gerecycled zand aantrekkelijker vanuit duurzaamheidsperspectief.

CEN-zand biedt op dit vlak voordelen: het is vaak een bijproduct van industriële processen en draagt bij aan afvalreductie en circulair gebruik van grondstoffen. Daarnaast verkleint het gebruik van lokaal beschikbaar zand de transportbehoefte, wat leidt tot een lagere CO_2-uitstoot.

2.5.1.1 CEN-standaardzand

Algemeen



Figuur 2-60: CEN zand

CEN-zand (zoals weergegeven in Figuur 2-60) is een kunstmatig samengesteld zand dat wordt geproduceerd volgens de Europese norm NBN EN 196-1 [57]. Dit type zand is bedoeld voor gebruik in standaardmortels bij druksterkteproeven van cement. Omdat er geen natuurlijk zand bestaat dat exact voldoet aan de vereiste korrelverdeling, wordt CEN-zand samengesteld uit verschillende industriële fracties. Deze worden nauwkeurig gezeefd en in vaste verhoudingen gemengd.

De korrelgrootte van CEN-zand ligt tussen 0,08 mm en 2,00 mm, met een strikt gecontroleerde verdeling [180]. De productie ervan vereist hoge nauwkeurigheid: dagelijks worden de eigenschappen gecontroleerd en maandelijks worden druksterkteproeven uitgevoerd op zowel nieuwe als oudere batches. Externe keuringsinstanties voeren bovendien vergelijkende testen uit.

CEN-zand wordt geleverd in porties van (1350 ± 5) gram (g) en vormt een vast onderdeel van de standaardreceptuur voor morteltests: (450 ± 2) g cement, (225 ± 1) g water en één portie zand. Dankzij deze standaardisatie kunnen testresultaten internationaal worden vergeleken, ongeacht verschillen in lokale grondstoffen.

Gebruik in AAM

Zand heeft een aanzienlijke invloed op de prestaties van AAM mengsels [181]. Korrelgrootte en -verdeling beïnvloeden de werkbaarheid en de microstructuur van het AAM. Grover zand kan de verwerking bemoeilijken en leiden tot minder homogene structuren, terwijl fijner zand een hogere dichtheid en sterkere binding met de AAM-matrix bevordert.

De hoeveelheid zand speelt ook een rol: een te hoog gehalte grof zand kan de sterkte van het eindproduct verlagen, terwijl fijner zand de sterkte juist kan verhogen door een groter contactoppervlak met de reactieve componenten.

De samenstelling van het zand is eveneens van belang. Zeezand bevat vaak een hoog gehalte aan SiO_2, wat gunstig is voor de AAM-reactie. Echter, verontreinigingen zoals zouten kunnen een negatieve invloed hebben. Ze kunnen de chemische stabiliteit aantasten of corrosie veroorzaken, vooral in gewapende toepassingen. Daarom moet zeezand goed worden gewassen voordat het wordt ingezet.

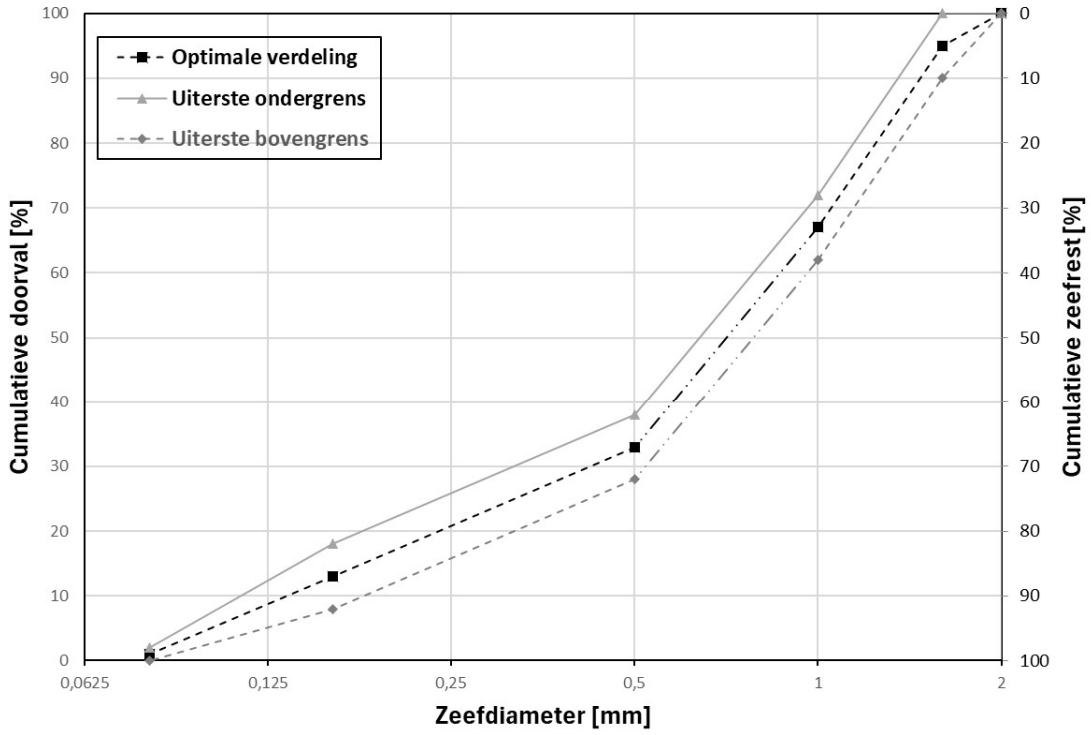
CEN-zand, afkomstig uit gecontroleerde industriële processen, is doorgaans vrij van verontreinigingen en heeft een voorspelbare korrelverdeling, wat het ook geschikt maakt voor toepassingen in onderzoek naar AAM materialen.

Zandgebruik in cementtesten volgens NBN EN 196-1

Cement wordt in de praktijk nooit in zuivere vorm toegepast, maar altijd geblend met toeslagmaterialen zoals zand, omdat een puur cementpasta bij uitharding sterk krimpt en gemakkelijk teveel scheurt [181]. In laboratoriumtesten wordt daarom standaard CEN-zand gebruikt om de cementprestaties realistisch en reproduceerbaar te bepalen. Zonder dit vulmiddel zouden sterkteproeven onrealistisch hoge waarden tonen en zou krimp- en scheurvorming de metingen verstoren. Door wereldwijd één standaardzand toe te passen, worden testresultaten eerlijk vergelijkbaar gehouden en blijft de kwaliteitsevaluatie van cement uniform en betrouwbaar. De optimale korrelverdeling voor de bepaling van het CEN standaard zand kan teruggevonden worden in Tabel 2-4 alsook visueel zichtbaar op de grafiek weergegeven in Figuur 2-61.

Tabel 2-4: Maaswijdte verdeling van CEN referentie zand [57]

Vierkante maaswijdte [mm]	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Cumulatieve zeefrest [%]	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1



Figuur 2-61: Optimale korrelverdeling volgens CEN standaard zand

2.5.1.2 Zeezand

Algemeen



Figuur 2-62 Uitzicht zeezand

Zeezand ontstaat door de voortdurende erosie van rots- en gesteentemateriaal langs kusten [182]. Het wordt getransporteerd door golven en stromingen en uiteindelijk afgezet op zeebodems en stranden (zoals weergegeven in Figuur 2-62. Voor gebruik in bouwtoepassingen wordt zeezand doorgaans gewonnen via baggerwerkzaamheden, waarbij speciaal materieel het zand van de zeebodem opzuigt. Het gewonnen zand wordt vervolgens via leidingen of schepen naar opslagdocks gebracht (zie Figuur 2-63). Hier wordt het zand gewassen en gezeefd om organisch materiaal, schelpresten en fijn slib te verwijderen.

Kenmerkend voor zeezand is de afgeronde korrelvorm, ontstaan door de schurende werking van water, en een relatief smalle korrelverdeling. Chemisch bestaat het voornamelijk uit kwarts (siliciumdioxide), met soms een klein aandeel kalkhoudende schelpen. Een belangrijke uitdaging bij het gebruik van zeezand in AAM is de aanwezigheid van zoutionen, zoals chloriden, die corrosie van wapening kunnen bevorderen en de alkaligevoeligheid van vezels kunnen verhogen. Daarom is grondige reiniging onmisbaar.

Na bewerking kan zeezand dienen als fijn granulaat in AAM-mengsels. De afgeronde korrels verbeteren de verwerkbaarheid doordat ze minder wrijving tussen korrels veroorzaken dan hoekige rivierzandkorrels. Mechanisch zorgt een goed gedoseerd zeezandgehalte voor een dichte korrelstapel, wat de druksterkte verhoogt en de permeabiliteit verlaagt. Dit maakt het materiaal beter bestand tegen chemische aantasting en vorst-dooicycli. Daarnaast kan het hoge silica-gehalte in zeezand bijdragen aan secundaire puzzolane reacties in AAM, mits de korrels voldoende geactiveerd worden door het alkalische milieu.

Het is belangrijk te benadrukken dat zand, en in het bijzonder zeezand, een steeds schaarser wordende grondstof is. Door de intensieve winning raken natuurlijke zandvoorraden uitgeput, wat op termijn de beschikbaarheid beperkt. Daarom wordt er gezocht naar alternatieve materialen en duurzame vervangers voor zand in bouwtoepassingen.



Figuur 2-63: Baggeren van het zeezand te Nieuwpoort, België [183]

2.6 Toevoegsels

2.6.1 Vezels

Vezels worden in AAM mengsels toegevoegd om de algehele prestaties te verbeteren [182]. Ze dragen bij aan de versterking van de matrix door de verdeling van interne krachten te verbeteren en de scheurvorming te beperken. Vezels kunnen in twee hoofdgroepen worden onderverdeeld: natuurlijke vezels en synthetische vezels. Natuurlijke vezels, zoals plantaardige vlasvezels, hebben de voordelen van duurzaamheid en hernieuwbaarheid. Synthetische vezels kunnen verder worden onderverdeeld in microvezels en macrovezels. Het type vezel en de lengte ervan spelen een cruciale rol in de effectiviteit van vezelversterking in het AAM mengsels.

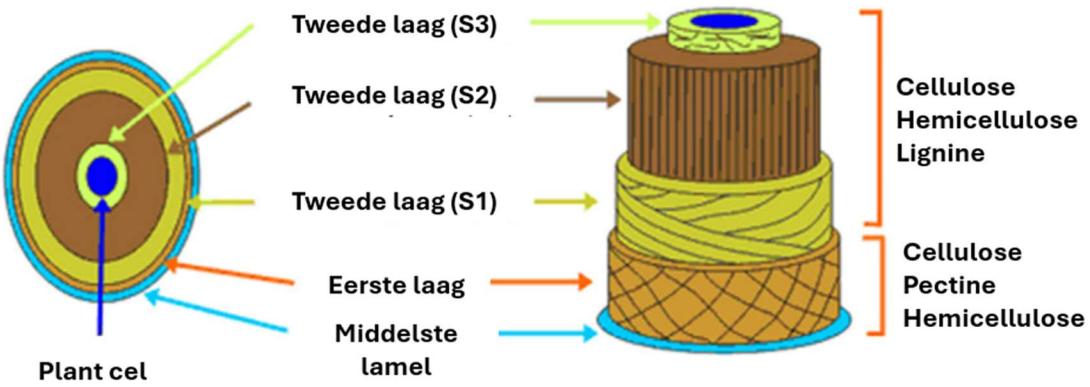
2.6.1.1 Plantaardige vezels

Algemeen

Natuurlijke vezels zoals vlas, hennep, jute en kokos zijn waardevolle materialen oor duurzame wapening in bouwmaterialen vanwege hun hernieuwbare karakter, lage dichtheid en milieuvriendelijke eigenschappen. Ze vormen een aantrekkelijk alternatief voor synthetische vezels of staal, vooral wanneer een lagere milieubelasting en lichtgewicht oplossingen gewenst zijn. Daarnaast verbeteren natuurlijke vezels de taaiheid, beperken ze scheurvorming en verhogen ze de energieabsorptiecapaciteit van composieten.

Plantaardige vezels bestaan uit een complexe celstructuur (zoals weergegeven in Figuur 2-64) met een dunne primaire celwand en een dikkere secundaire celwand, waarvan de middelste laag (de zogenaamde middelste lamel) bepalend is voor de mechanische eigenschappen van de vezel [184], [185]. Cellulose vormt hierin de microfibrillen die zorgen voor de sterkte van de vezel, terwijl hemicellulose en lignine als bindmiddelen functioneren die de vezels samenhouden en bijdragen aan stijfheid en waterafstotendheid.

De samenstelling van natuurlijke vezels varieert, maar de belangrijkste bestanddelen zijn cellulose, hemicellulose en lignine, aangevuld met kleinere hoeveelheden pectine, wassen en andere stoffen. Vezels met een hoger cellulosegehalte en een lagere microfibrillenhoek hebben doorgaans betere sterkte-eigenschappen.



Figuur 2-64: Laagindeling van natuurlijke vezel [184]

Gebruik in AAM

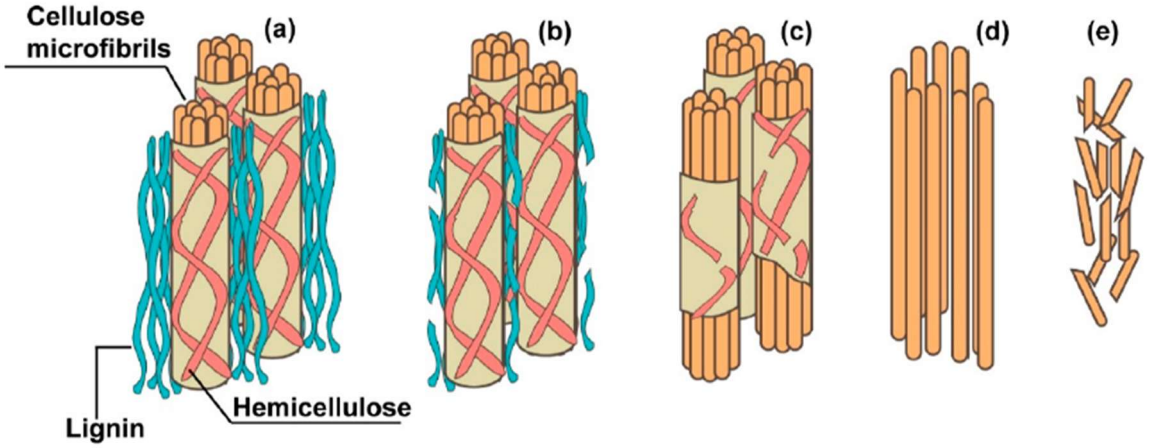
Natuurlijke vezels bieden voordelen zoals een hoge sterkte-gewichtsverhouding, goede taaiheid, lage dichtheid, biologische afbreekbaarheid en lage kosten, waardoor ze aantrekkelijke en duurzame alternatieven zijn voor synthetische vezels in AAM.

De afbraak van natuurlijke vezels in een AAM-matrix vindt voornamelijk plaats door alkalische degradatie (zoals weergegeven in Figuur 2-65). Hoewel cellulose chemisch en biologisch relatief resistent is tegen afbraakprocessen zoals hydrolyse en oxidatie, is hemicellulose erg gevoelig voor afbraak onder invloed van alkalische, thermische en biologische omstandigheden. De amorfe componenten, zoals hemicellulose en amorfe cellulose, degraderen het snelst in een alkalische omgeving, wat leidt tot verlies van de integriteit van de vezelcelwand en een verminderde hechting tussen vezel en matrix.

In AAM-matrixen is de afbraak van natuurlijke vezels relatief minder uitgesproken dan in traditionele cementmatrices. Dit komt mede door een betere hechting van cellulosevezels aan de matrix en minder agressieve alkalische omstandigheden. De afbraak verloopt gefaseerd: eerst degraderen lignine en hemicellulose, daarna worden de cellulose microfibrillen gestript, en uiteindelijk kan ook cellulose afbreken. Desondanks blijft de mechanische sterkte van de vezels in de eerste fasen behouden, omdat cellulose goed bestand is tegen afbraak.

Daarnaast verbetert de aanwezigheid van cellulose in AAM-composieten de dichtheid van de matrix, vermindert het de porositeit, verhoogt het de taaiheid, en zorgt het voor een goede vezel-matrixverbinding zonder significante degradatie. Hemicellulose en lignine dragen juist bij aan porositeit en hun afbraak vermindert de polymerisatiegraad van het composietmateriaal.

De samenstelling van plantaardige vezels varieert sterk, wat invloed heeft op de mate van degradatie: vezels met een lager cellulosegehalte, zoals stro, degraderen sneller dan vezels met een hoog cellulosegehalte, zoals katoen en vlas.

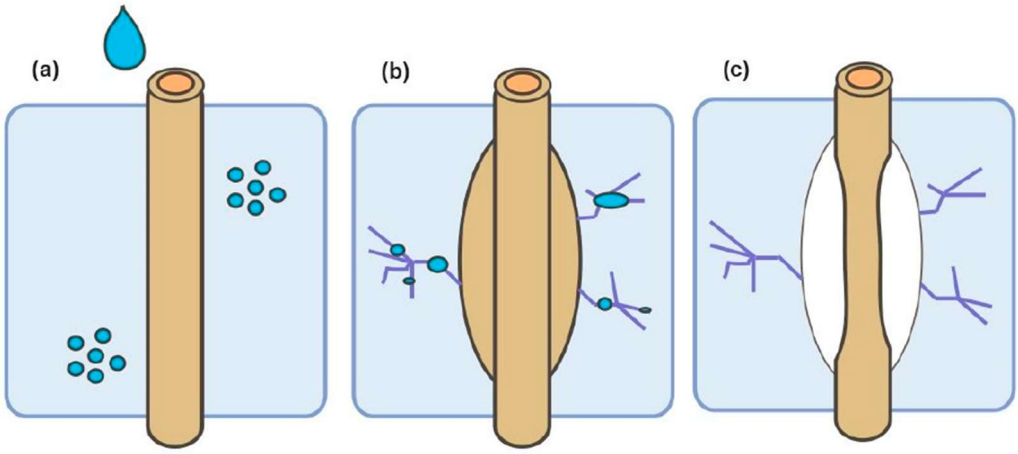


Figuur 2-65: Schematische diagram van de alkalische afbraak van plantaardige vezels (a) Samenstellingen van vezel; (b) afbraak van vezel; (c) afbraak van hemicellulose; (d) los schilferen van cellulose microfibrillen; (e) falen van cellulose microfibrillen [186]

Een van de grootste nadelen van natuurlijke vezels is hun hygroscopisch karakter (zoals weergegeven in Figuur 2-66) [186]. Door de aanwezigheid van hydroxylgroepen (OH-groepen) in cellulose, hemicellulose en lignine hebben deze vezels een sterke affiniteit voor water. Vooral hemicellulose is gevoelig voor vochtopname, wat leidt tot zwelling van de vezels, met name in de dwarsrichting, waar een uitzetting van 40–60 % kan optreden, tegenover slechts 2–3 % in de lengte.

Deze vochtopname veroorzaakt dimensionale veranderingen en spanningen aan het vezel-matrixgrensvlak in AAM. Dit kan leiden tot het ontstaan van microbarsten in de matrix en een verminderde hechting tussen vezel en matrix. Het geabsorbeerde water vormt waterstofbruggen met de hydroxylgroepen van de vezels, waardoor de hechting verder verzwakt en vezelonthechting optreedt.

Als gevolg hiervan vermindert de mechanische sterkte en stijfheid van het composiet, ontstaan er meer holtes, en treedt vaak vezel-uittrekking op als faalmechanisme. Daarnaast zijn natuurlijke vezels in de sterk alkalische omgeving van AAM gevoelig voor chemische aantasting, waarbij met name hemicellulose en lignine degraderen. Dit tast de structurele integriteit van de vezels aan en kan hun bijdrage aan de mechanische eigenschappen van het composiet aanzienlijk verminderen.



Figuur 2-66: Effect van water op het vezel-matrixgrensvlak van de plantaardige vezels: ()a Water diffundeer in composite; (b) Vezels zwellen na vochtopname, wat leidt to microbarsten in de matrix; (c) Uiteindelijk treedt onthechting op tussen vezel en matrix [185]

Om de prestaties van natuurlijke vezels in AAM te verbeteren, worden diverse modificatietechnieken toegepast. Chemische behandelingen zoals alkalisatie, acetylering en silanisatie verminderen het aantal vrije hydroxylgroepen op het vezeloppervlak, waardoor de vochtopname afneemt en de hechting aan de matrix verbetert. Daarnaast worden fysische methoden, zoals thermische of plasmabehandelingen, ingezet om de vezel-matrixinteractie verder te optimaliseren.

Een andere benadering is het gebruik van hybride composieten, waarbij natuurlijke vezels worden gecombineerd met synthetische of anorganische vezels. Dit maakt het mogelijk om de voordelen van beide vezeltypen te benutten en tegelijkertijd hun nadelen te compenseren, wat leidt tot verbeterde materiaaleigenschappen.

Omtrent het gebruik van natuurlijke vezels in binders zijn er geen normeringen beschikbaar.

a) Vlasvezels



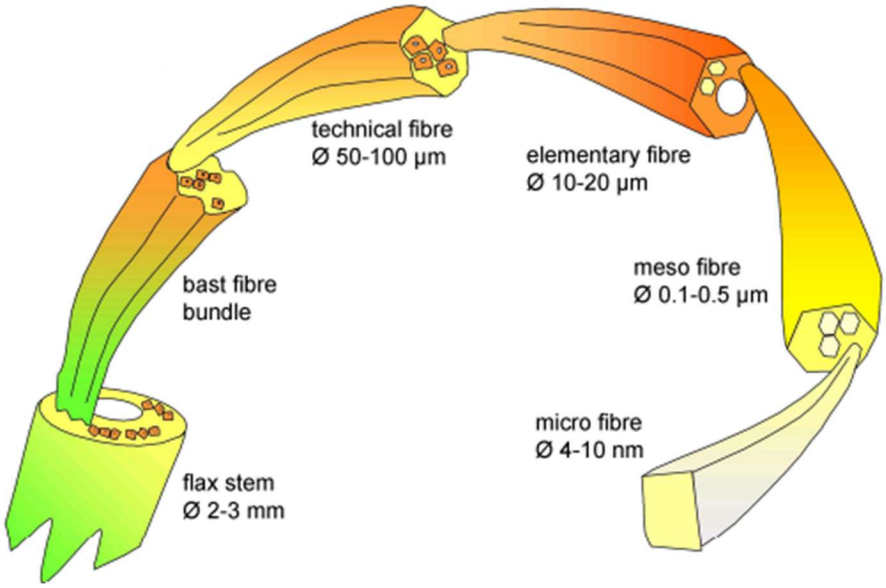
Figuur 2-67: Vlasvezel

Vlasvezels (zoals weergegeven in Figuur 2-67), afkomstig van de vlasplant, worden steeds vaker toegepast in AAM vanwege hun uitstekende mechanische eigenschappen en milieuvriendelijkheid [187], [188]. Ze staan bekend om hun hoge treksterkte, flexibiliteit en goede hechting aan de matrix, wat bijdraagt aan een verbeterde structurele integriteit van het materiaal. Door hun effectiviteit in het beperken van scheurvorming en het verminderen van krimp verhogen vlasvezels de duurzaamheid en taaiheid van AAM-composieten.

Vlasvezels verhogen de flexibiliteit van het materiaal, verminderen brosheid en verbeteren de weerstand tegen mechanische belastingen, wat de levensduur verlengt. Hun lage milieubelasting door efficiënte teelt maakt ze tot een aantrekkelijk alternatief voor conventionele versterkingen.

Vlasvezel bestaan uit bastvezelbundels (zoals weergegeven in Figuur 2-68), waarbij de technische vezel een kleiner onderdeel vormt van deze bundel. Een technische vezel bestaat uit meerdere elementaire vezels, ook wel ultieme of enkele vezels genoemd. Deze elementaire vezels zijn individuele cellen binnen de bastvezel. De hiërarchie van vezelniveaus speelt een belangrijke rol in het bepalen van de mechanische eigenschappen van vlasvezels. Het samenspel tussen de elementaire vezels binnen een technische vezel zorgt voor de karakteristieke sterkte en flexibiliteit van vlasvezels. Het begrijpen van deze vezelopbouw is essentieel voor het optimaliseren van hun prestaties in composietmaterialen.

Dankzij deze gunstige combinatie van mechanische prestaties en ecologische voordelen zijn vlasvezels een veelbelovende versterkingsoptie voor duurzame bouwmaterialen op basis van AAM.



Figuur 2-68: Opbouw van een vlasvezel [189]

b) Hennepvezel



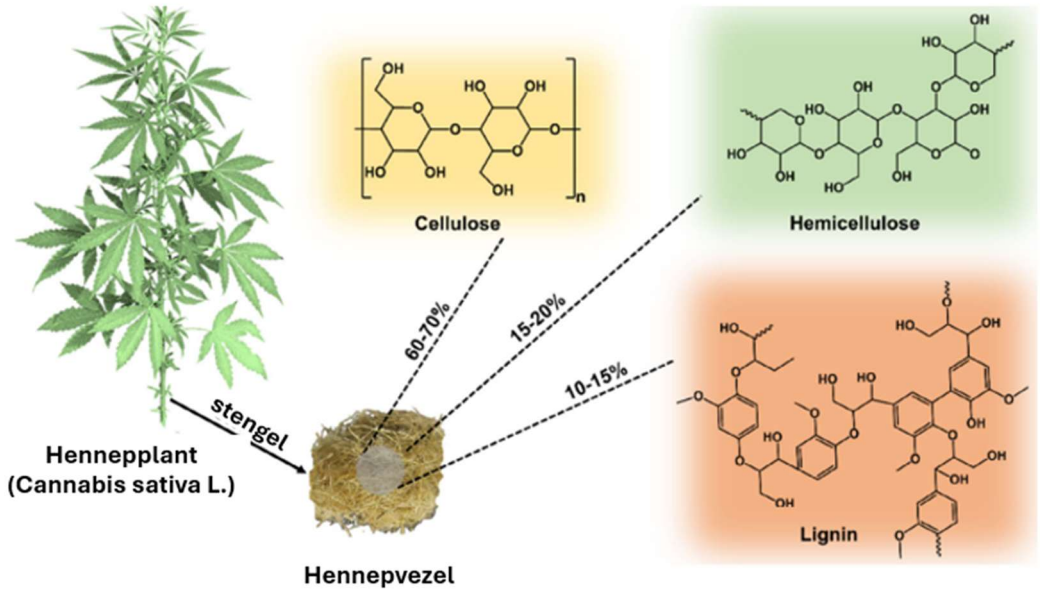
Figuur 2-69: Hennepvezel [190]

Ook de hennepvezels (zoals weergegeven in Figuur 2-69), afkomstig van de hennepplant, worden steeds vaker toegepast in AAM vanwege hun gunstige mechanische eigenschappen en duurzaamheid [191]. Ze kenmerken zich door een hoge treksterkte, lage dichtheid en goede flexibiliteit, waardoor ze bijdragen aan het versterken van de structurele integriteit van het composiet. In AAM verbeteren hennepvezels de treksterkte, taaiheid en stijfheid van het materiaal en beperken ze scheurvorming, wat de duurzaamheid aanzienlijk verhoogt.

Naast hun mechanische bijdrage bieden hennepvezels extra voordelen op het gebied van thermische en akoestische isolatie. Deze eigenschappen maken hennep bijzonder geschikt voor toepassingen in de bouwsector waar naast structurele prestaties ook comfort en energie-efficiëntie van belang zijn.

De technische vezel van hennep bestaat uit meerdere elementaire vezels (zoals weergegeven in Figuur 2-70), die elk afzonderlijk bijdragen aan de sterkte en flexibiliteit van de bundel. Deze hiërarchische vezelstructuur speelt een cruciale rol in de prestaties van hennepvezels binnen composieten.

Dankzij hun lage milieu-impact – mede door een teelt die weinig water, meststoffen en pesticiden vereist – vormen hennepvezels een ecologisch aantrekkelijk alternatief voor synthetische versterkingsmaterialen. Hun toepassing in AAM draagt bij aan het verminderen van cementgebruik en daarmee van de CO_2-uitstoot, wat ze tot een waardevolle keuze maakt voor duurzame bouwoplossingen.



Figuur 2-70: Schematische weergave van de verschillende chemische componenten van een hennepvezel afkomstig uit de stengel van de hennepplant [191]

2.6.1.2 Synthetische vezel

Algemeen

Synthetische vezels (zie **Figuur 2-71**) zijn kunstmatig vervaardigde vezels, meestal afkomstig van petrochemische polymeren [192], [193]. Ze bevatten een hoge kwaliteit, sterkte en duurzaamheid. Binnen dit onderzoek ligt de focus vooral op PP, een veelgebruikte vezelsoort die een goede balans biedt tussen mechanische prestaties, chemische bestendigheid en kostenefficiëntie.

PP-vezels zijn er in verschillende typen, waarbij vooral onderscheid wordt gemaakt tussen microvezels en macrovezels. Microvezels hebben een kleine diameter, vaak minder dan 20 µm. Macrovezels zijn dikker en langer, met diameters van tientallen tot honderden µm.

PP-vezels zijn bovendien bestand tegen de alkalische omgeving van AAM, wat hun duurzaamheid ten goede komt. Hun lage dichtheid draagt bij aan het lichtgewicht karakter van het composiet. Ondanks deze voordelen is de productie van PP-vezels energie-intensief en leidt deze tot een hogere CO_2-uitstoot. Daarnaast zijn PP-vezels niet biologisch afbreekbaar en kunnen ze bijdragen aan milieuvervuiling, bijvoorbeeld door de vorming van microplastics.

Daarom wordt in de praktijk en in onderzoek vaak gekozen voor hybride composieten waarin synthetische vezels zoals polypropyleen worden gecombineerd met natuurlijke vezels. Op deze manier kunnen de mechanische voordelen van synthetische vezels worden benut, terwijl de duurzaamheid en milieuvriendelijkheid van natuurlijke vezels bijdragen aan een meer gebalanceerd en milieuvriendelijk eindproduct.

Normen en richtlijnen

Er zijn verschillende normen die het gebruik van vezels in beton en AAM mengsels reguleren. De norm NBN EN 14488-7 beschrijft bijvoorbeeld de eisen voor het gebruik van vezels in beton, terwijl NBN EN 14889 specifiek betrekking heeft op de prestaties van vezels voor beton [57]. Deze normen bieden richtlijnen voor de keuze van vezels op basis van hun diameter, lengte en andere mechanische eigenschappen. In dit onderzoek is de invloed van vezels op de mechanische eigenschappen van AAM mengsels dan ook uitvoerig onderzocht, met bijzondere aandacht voor de normen NBN EN 14488-7 en NBN EN 14889 [57].



Figuur 2-71: Synthetische PP micro- en macrovezels [194]

a) Polypropyleen Macrovezel

Algemeen



Figuur 2-72: Uitzicht van PP macrovezel

Macrovezels (zoals weergegeven in Figuur 2-72), met een diameter van tientallen tot honderden µm worden vaak toegepast als vervanging voor temperatuur- en krimpwapening of als structurele wapening in beton en spuitbeton [195], . In AAM mengsels spelen deze vezels een cruciale rol bij het verbeteren van de resterende buigsterkte na scheurvorming. Door hun aanzienlijke lengte en diameter dragen macrovezels bij aan een verhoogde buigsterkte, treksterkte, impactweerstand en algemene duurzaamheid van het materiaal. Hierdoor zijn ze bijzonder geschikt voor toepassingen die een verhoogde weerstand tegen mechanische belastingen vereisen, zoals industrievloeren, prefabelementen en spuitbeton.

De meest gebruikte macrovezels zijn synthetisch, waarbij PP vanwege zijn chemische inertie en goede hechting aan cement- en AAM-matrices de voorkeur heeft. Ook polyethyleen (PE) en nylon komen voor, terwijl staalvezels technisch gezien ook tot de macrovezels behoren, maar vaak als aparte categorie worden behandeld. Daarnaast is er groeiende interesse in natuurlijke macrovezels zoals hennep, vlas en kokos, vanwege hun hernieuwbare aard en lagere milieu-impact.

Het productieproces van synthetische macrovezels (zoals weergegeven in Figuur 2-73) begint met het smelten van polymeerpellets, gevolgd door extrusie via een matrijs om filamenten te vormen. Deze filamenten worden gekoeld, uitgerekt voor versterking en vervolgens op lengtes van 30 tot 60 mm gesneden. Om de hechting aan de matrix te verbeteren, krijgen de vezels vaak een oppervlaktebehandeling, bijvoorbeeld een reliëfstructuur of coating. De effectiviteit van macrovezels in het verbeteren van mechanische eigenschappen wordt ondersteund door normen zoals ASTM C1609 en NBN EN 14845, die hun waarde in beton en AAM mengsels bevestigen.



Figuur 2-73: Productieproces van de PP-vezels [196]

a) Polypropyleen microvezel

Algemeen



Figuur 2-74: Uitzicht van PP microvezels [197]

Microvezels (zoals weergegeven in Figuur 2-74), met een diameter vaak kleiner dan 20 µm, worden voornamelijk ingezet om de scheurvorming in beton en AAM te beheersen [193], [198], . Door hun kleine afmetingen verspreiden microvezels zich gelijkmatig door het mengsel en vormen ze een fijnmazig netwerk dat helpt bij het verminderen van micro- en haarscheurtjes in de vroege stadia van het uitharden. Dit draagt bij aan een betere duurzaamheid en verhoogt de levensduur van het materiaal.

PP-microvezels zijn een veel gebruikte type vanwege hun chemische inertie, goede dispergeerbaarheid en kostenefficiëntie. Deze vezels verbeteren de krimpbestendigheid en beperken het ontstaan van scheuren door droogte- en temperatuurspanningen. Hierdoor wordt het risico op voortijdige schade aan de AAM-matrix aanzienlijk verminderd.

Microvezels worden vaak toegevoegd in lage doseringen, typisch tussen 0,1 % en 0,3 % van het volume, en hebben een lengte variërend van enkele millimeters tot ongeveer 12 mm. Hun kleine diameter en korte lengte zorgen ervoor dat ze de verwerkbaarheid van het mengsel minimaal beïnvloeden, waardoor ze makkelijk te verwerken zijn in diverse toepassingen.

De effectiviteit van PP microvezels bij het verbeteren van de scheurweerstand en duurzaamheid van beton en AAM-composieten wordt erkend in verschillende normen en richtlijnen, waaronder ASTM C1116 en NBN EN 14845. Hierdoor vormen microvezels een belangrijk onderdeel van moderne vezelversterkte AAM-technologieën, vooral in toepassingen waar het beheersen van fijne scheurvorming cruciaal is.

2.6.2 Plastificeerder

2.6.2.1 Algemeen



Figuur 2-75: Sika ViscoCrete 20 HE [199]

Superplastificeerders, vaak bestaande uit polyelektrolytische molecuulketens met geladen groepen, zijn onmisbaar in zowel traditioneel beton als in AAM. In water ioniseren deze groepconstructies en hechten ze zich met hun negatieve lading aan de positief geladen deeltjesoppervlakken van bindmiddelen zoals GGBS of geactiveerde pozzolanen [200]. Door de aangetrokken lading ontstaat elektrostatische afstoting tussen de deeltjes, waardoor klontering wordt voorkomen en een gelijkmatige verspreiding mogelijk wordt. Dit verlaagt de wrijving binnen het mengsel en resulteert in een veel vlottere verwerkbaarheid zonder extra water toe te voegen.

In cementgebonden systemen zijn polycarboxylaat-ether (PCE) superplastificeerders, zoals die in producten als Sika ViscoCrete® 20 HE (weergegeven in Figuur 2-75), bijzonder effectief [201]. Ze bieden een hoge mate van waterreductie en behouden hun dispersievermogen langdurig. In AAM-mengsels daarentegen zorgt de zeer hoge pH (vaak boven 12) voor een snelle afbraak van de PCE-ketens. De polymeren degraderen, verliezen hun geladen uiteinden en daarmee hun vermogen om de deeltjes dispergeren, waardoor de aanvankelijk soepel verwerkbare mengsels al na korte tijd stroef worden.

Vanwege deze instabiliteit van conventionele PCE's in alkalische omgevingen is er een duidelijke behoefte aan nieuw ontwikkelde, alkalistabiele dispersiemiddelen. De volgende generatie superplastificeerders moet niet alleen chemisch resistent zijn bij pH-waarden boven 12, maar ook een blijvend waterreducerend effect hebben en tegelijkertijd voldoen aan duurzaamheidscriteria, bijvoorbeeld door inzet van bio-gebaseerde of recycleerbare polymeren. Zulke innovaties zijn cruciaal om de verwerkbaarheid en lange-termijnprestaties van geavanceerde AAM-composieten te optimaliseren.

3 TESTPROGRAMMA

3.1 Gebruikte materialen

3.1.1 GGBS

De gebruikte GGBS is specifiek ECO2cem (zoals weergegeven op Figuur 3-1, Figuur 3-2 en in Bijlage Q), geproduceerd door het bedrijf Ecocem op de productie-installatie gelegen aan Graanweg 22A, 4782 PP Moerdijk. Alle voorschriften met betrekking tot de beoordeling en verificatie van de prestatiebestendigheid, zoals beschreven in Annex ZA van de norm NBN EN 15167-1:2006, voor de prestaties worden nageleefd. Daarnaast wordt de productiecontrole in de fabriek door de fabrikant uitgevoerd om de prestatiebestendigheid van het bouwproduct te waarborgen.
Het product werd opgeslagen in het laboratorium voor bouwmaterialen te Brugge, in een droge omgeving bij kamertemperatuur, met een gemiddelde temperatuur van ongeveer 20 °C.



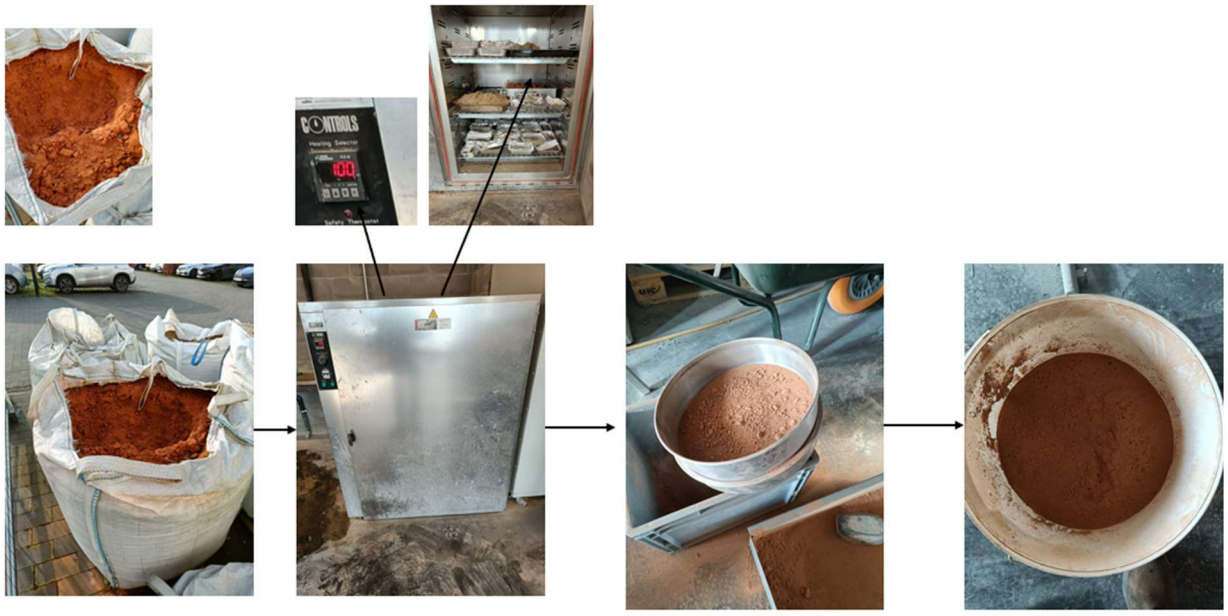
Figuur 3-1: Opslag van het GGBS in het labo bouwkunde, KU Leuven Brugge



Figuur 3-2: Uitzicht GGBS

3.1.2 RBP

Het gebruikte RBP werd verkregen als bijproduct van het baksteenproductieproces. Het product werd geleverd door het bedrijf Ploegsteert. Dit werd in bigbacks opgeslagen in een vochtige buitenomgeving. Het buiten opgeslagen product was in eerste instantie niet bruikbaar. Daarom werd het eerst in een oven geplaatst en gedurende ± 24 uur op 100 °C gedroogd. Na het drogen werd het poeder uit de oven gehaald en enkele uren afgekoeld. Nadat het afgekoeld was, werd het mengsel gezeefd met een zeef met een opening van 125 µm. Vervolgens werd het poeder bewaard in een afgesloten emmer met nodige labeling. (zoals weergegeven in Figuur 3-3 en Figuur 3-4)



Figuur 3-3: Proces voor het vervaardigen van het bruikbaar RBP



Figuur 3-4: Uitzicht RBP

3.1.3 RCP

De gebruikten RCA-filtercake gewassen slurry is een mengsel van RCA dat wordt verkregen door oud beton te breken en te verwerken voor hergebruik in nieuwe betonmengsels, waarbij de filtercake, een vast materiaal dat ontstaat na filtratie van een vloeistof, wordt gewassen om onzuiverheden te verwijderen, resulterend in een suspensie van water en fijne deeltjes (zoals weergegeven in Figuur 3-5 en Figuur 3-6).



Figuur 3-5: Proces voor het vervaardigen van het bruikbaar RCP



Figuur 3-6: Uitzicht RCP

3.1.4 CEM I portlandcement

Het gebruikte cement voor deze vergelijkende studie was CEM I 52,5 R HES van Holcim (zoals weergegeven in Figuur 3-7, Figuur 3-8 en in Bijlage P. Deze cementsoort werd gekozen op basis van beschikbaarheid. Ook is belangrijk te vermelden dat dit cement een Benor-keurmerk bevat wat resulteert in een kwalitatief product. Het product werd luchtdicht verpakt en opgeslagen in het laboratorium voor bouwmaterialen te Brugge, in een droge omgeving bij kamertemperatuur (ongeveer 20 °C).



Figuur 3-7: Holcim CEM I 52,5 R HES



Figuur 3-8: Uitzicht CEM I 52,5 R HES

3.1.5 Leidingwater

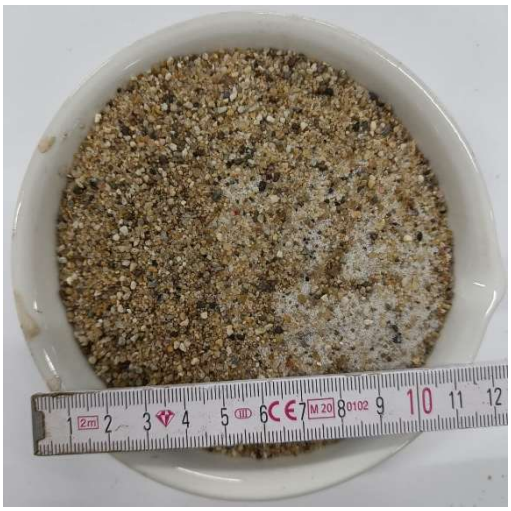
Volgens de norm NBN EN 196-1:2016, in hoofdstuk 5.3, wordt verplicht gedestilleerd water te gebruiken [57]. Tijdens dit onderzoek wordt de normering voor cement als basis gehanteerd, aangezien er nog geen specifieke normering voor AAM beschikbaar is. Er werd gebruik gemaakt van leidingwater, waarvan de chemische samenstelling is weergegeven in Bijlage E. De aanwezigheid van onzuiverheden in het leidingwater heeft slechts een beperkte invloed op de resultaten, aangezien water geen essentiële rol speelt in de AAM reactie. Deze reactie vereist geen water en is bovendien geen hydratatiereactie, waardoor het gebruik van gedistilleerd water in dit geval niet nodig is.

3.1.6 CEN referentie zand en zeezand

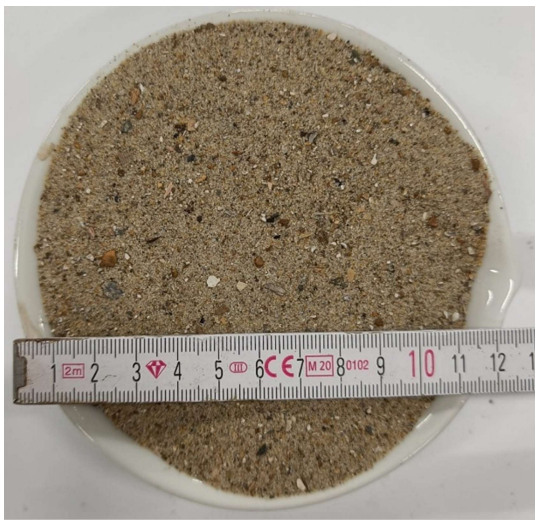
Volgens de norm NBN EN 196-1:2016, wordt in hoofdstuk 5.1.2 CEN-zand gebruikt met specifieke eigenschappen (weergegeven in Figuur 3-9 en Figuur 3-10). Vanwege economische overwegingen werd onderzocht of het beschikbare zeezand als vervanger gebruikt kon worden [57]. Volgens de norm moet het CEN-zand voldoen aan bepaalde deeltjesgroottes, zoals weergegeven in Tabel 2-4. Om dit te verifiëren, werd een zeefproef uitgevoerd. Er was echter geen documentatie beschikbaar over het zeezand. Enkel op basis van het uitzicht werd vermoed dat het om zeezand ging (zoals weergegeven in Figuur 3-11).



Figuur 3-9: Opslag van het CEN-zand in het labo bouwkunde, KU Leuven Brugge



Figuur 3-10: uitzicht CEN-zand



Figuur 3-11: Uitzicht zeezand

3.1.7 Natronwaterglas

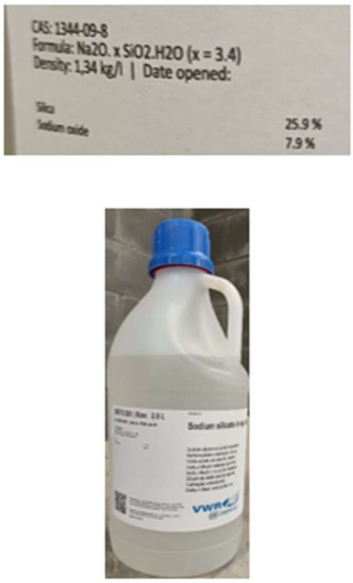
De chemische producten werden onder droge omstandigheden opgeslagen. Aangezien deze producten gevaarlijk zijn, zijn ze niet geschikt voor onbevoegde personen. Informatie over het productieproces kon niet openbaar worden gemaakt.

Binnen dit onderzoek werden twee varianten van natronwaterglas gebruikt, dit steeds met een verschillende Na_2O, SiO_2 en H_2O gehalte. Dit is het gevolg van een tekort aan het oorspronkelijk gebruikte type, waardoor het noodzakelijk werd om een tweede variant in te zetten. Er zal bij bespreking van resultaten steeds duidelijk vermeld worden welke variant werd gebruikt.

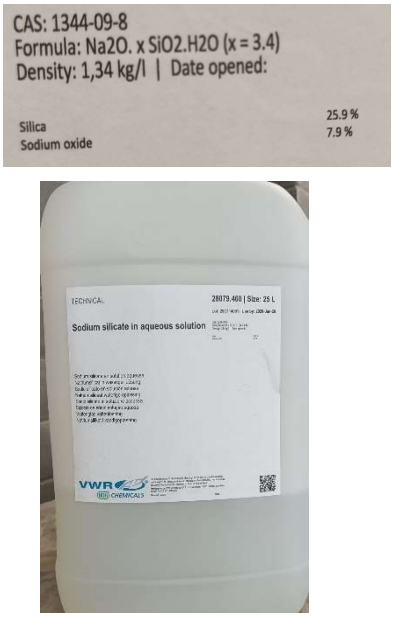
- **Natronwaterglas A**: Na_2O: 8,5 %, SiO_2: 27,6 %, H_2O: 63,9 % (zie Figuur 3-12)
- **Natronwaterglas B**: Na_2O: 7.9 %, SiO_2: 25.9 %, H_2O: 66.2 % (zie Figuur 3-13)
- **Natronwaterglas C**: Na_2O: 7.9 %, SiO_2: 25.9 %, H_2O: 66.2 % (zie Figuur 3-14)



Figuur 3-12: Natronwaterglas A



Figuur 3-13: Natronwaterglas B



Figuur 3-14: Natronwaterglas C

Merk op dat Natronwaterglas C van dezelfde fabrikant is alsook het zelfde productnummer heeft maar toch een andere samenstelling zoals weergegeven in Bijlage S. Natronwaterglas A en B werden gebruikt tijdens de pasta fase. Natronwaterglas c werd gebruikt tijdens de mortelfase en ook verder bij toevoeging van de vezels.

3.1.8 Natriumhydroxide

Om ongewenste reacties te voorkomen, moet het luchtdicht worden opgeslagen zoals weergegeven in Figuur 3-15. De technische gegevens zijn terug te vinden in Bijlage R.



Figuur 3-15: Natriumhydroxide

3.1.8.1 Veiligheidsmaatregelen

Het werken met deze stof vereist een goed geventileerde ruimten [202]. Het is essentieel dat de stof goed geëtiketteerd en afgesloten bewaard wordt.

Een deeltjesfilter P2 (witte kleurcode) masker moet worden gedragen om het inademen van de sof te voorkomen (zie Figuur 3-16). Er werd gebruik gemaakt van een FFP2 masker die ontworpen is als wegwerpmasker met een geïntegreerde P2-filtratiecapaciteit [203].

Om contact met de huid te voorkomen wordt er beschermende kledij gedragen [202]. Ter bescherming van de handen zijn nitrilrubber handschoenen essentieel. Daarnaast is gebruik van een chemische veiligheidsbril vereist, omdat contact met ogen ernstige letsel kan veroorzaken zoals permanente blindheid.

Contact met de stof kan leiden tot ernstige irritatie, chemische brandwonden en onomkeerbare schade, zoals blindheid. Daarnaast kan ook de huid en slijmvliezen ernstig worden aangetast.



Figuur 3-16: Persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM's)[204]

3.1.9 Voorbereiding van alkalische oplossing

Tijdens het produceren van natronloog is het enorm belangrijk rekening te houden met de veiligheidsmaatregelen zoals beschreven in hoofdstuk 3.1.8.1. De nodige hoeveelheden worden afgewogen tot op 0,1 g nauwkeurig zoals te zien op Figuur 3-31. Het is essentieel om dit proces langzaam uit te voeren en de nodige voorzorgsmaatregelen te treffen, waaronder het dragen van de juiste persoonlijke beschermingsmiddelen. Bovendien moet NaOH altijd aan water worden toegevoegd om de veiligheid te garanderen en de heftige reactie te beheersen (zie Figuur 3-18). Het mengsel wordt daarna in een jerrycan gegoten, die is gemaakt van polyethyleen. Dit materiaal is bestand tegen zowel de chemische samenstelling als de warmte die tijdens het proces vrijkomt (zie Figuur 3-19).



Figuur 3-17: Het afwegen



Figuur 3-18: Het veilig vermengen en bewaren



Figuur 3-19: De warmte productie

Na ongeveer 24 uur afkoeling wordt de NaOH-oplossing toegevoegd aan de Na_2SiO_3-oplossing om de reactiekinetiek van het AAM beter te beheersen [97]. Door de oplossing eerst te laten afkoelen, wordt de exotherme reactie afgeremd, wat zorgt voor een stabieler en beter controleerbaar mengsel dat gunstig is voor de activatie en uiteindelijke eigenschappen van het AAM.

3.1.10 Vezels

3.1.10.1 Vlasvezel

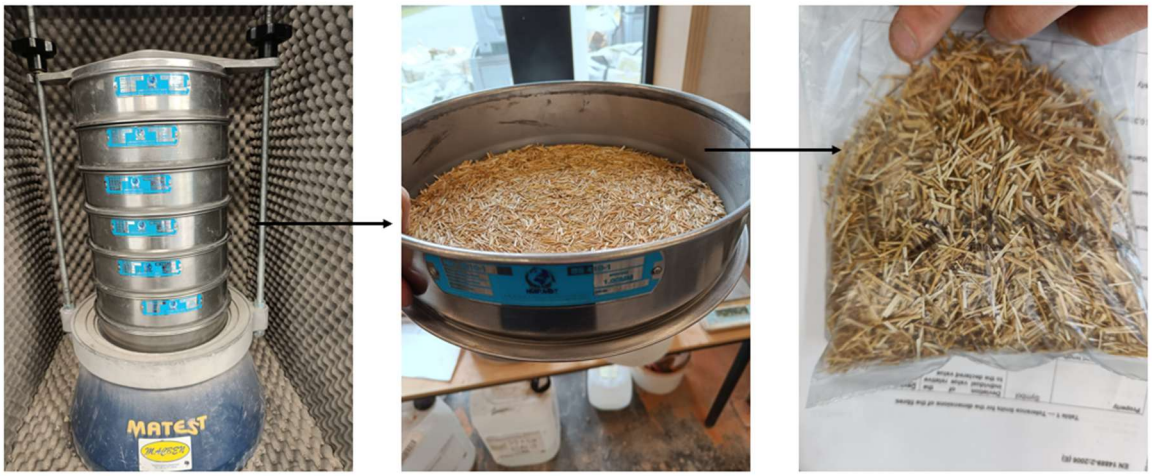
De vlasvezels werden opgeslagen in het labo: “Nieuwe Materialen” van KU Leuven in Brugge (zoals weergegeven in Figuur 3-20). De vezels zijn afkomstig van het bedrijf Wavalin, dat verantwoordelijk is voor de hoogwaardige productie van vlasvezels. De vlasteelt in België en Noord-Frankrijk biedt ideale omstandigheden voor de productie dankzij het gunstige klimaat en de specifieke grondomstandigheden. Het teeltproces begint met het zaaien van vlas tussen half maart en half april. Na een groeiperiode van ongeveer 100 dagen is het vlas volgroeid en klaar voor de oogst. De oogst wordt efficiënt uitgevoerd met behulp van geavanceerde machines die ervoor zorgen dat de lange vezels optimaal behouden blijven. Na de oogst wordt het vlas op het veld gerooid, waarna het rotproces, dat essentieel is voor het loskomen van de vezels, wordt gestart. Dit proces wordt zorgvuldig gemonitord om de kwaliteit van het vlas te garanderen. Vervolgens wordt het vlas opgerold en opgeslagen, en de verdere verwerking vindt plaats in gespecialiseerde faciliteiten.



Figuur 3-20: De opslag van de vlasvezels in het labo materiaalkunde, Brugge

Hoewel de vlasvezels werden gesorteerd met zeven met maaswijdtes van 500 µm, 1 mm en 2 mm die oorspronkelijk bedoeld voor het zeven van granulaten, is deze methode niet ideaal voor vezelachtig materiaal (zie Figuur 3-21). Deze aanpak werd toegepast om toch een zekere variatie in vezeldiameter te creëren binnen het onderzoek. Zo kon het effect van verschillende vezeldiktes op de eigenschappen van het AAM-systeem worden geëvalueerd, ondanks de beperkingen van de gebruikte zeefmethode.

Bij deze methode werd het materiaal dat niet door een bepaalde zeef viel, maar wel door de daaropvolgende met grotere maaswijdte, toegewezen aan een specifieke diametercategorie. Zo vallen de vezels die op de 0,5 mm-zeef blijven liggen binnen de categorie van 500 µm tot 1 mm; die op de 1 mm-zeef binnen 1 mm tot 2 mm; en die op de 2 mm-zeef binnen 2 mm tot 4 mm. Voor het gemak werden deze groepen aangeduid als respectievelijk 500 µm, 1 mm en 2 mm.



Figuur 3-21: Zeefproces van de vlasvezels

Ten slotte werden ze bewaard per vezelsoort zoals weergegeven in Figuur 3-22, Figuur 3-23 en Figuur 3-24.



Figuur 3-22: Vlasvezels 500 µm



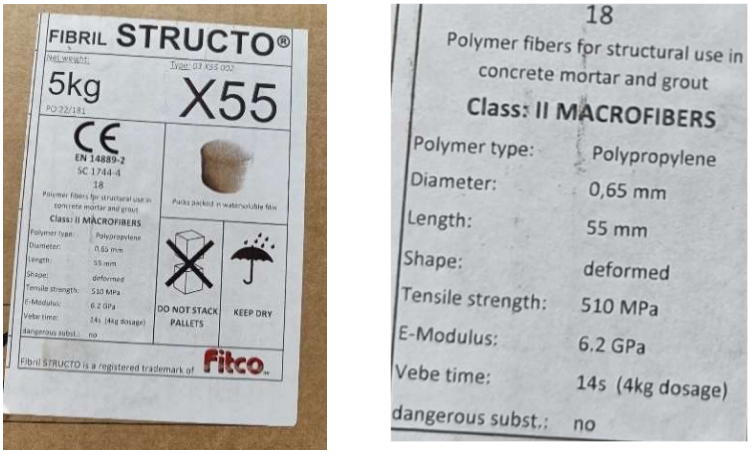
Figuur 3-23: Vlasvezel 1 mm



Figuur 3-24: Vlasvezel 2 mm

3.1.10.2 Macrovezels

De gebruikte macrovezels zijn afkomstig uit de voorraad van het Bouwlabo te Brugge (zoals weergegeven in Figuur 3-25 en Figuur 3-26). Voor de experimenten werd gekozen voor de beschikbare synthetische vezels van het merk Structo, met een nominale lengte van 50 mm. Deze vezels zijn specifiek ontworpen voor gebruik in beton- en morteltoepassingen. De vezels zijn vervaardigt conform NBN EN 14889-2, waarin de definities, specificatie en conformiteit van polymeervezels worden omschreven [57].



Figuur 3-25: Technische gegevens macrovezels



Figuur 3-26: uitzicht PP-macrovezels

3.2 Mengselontwerp en onderzoeksprogramma

3.2.1 Mengselontwerp

3.2.1.1 Alkalische activator

In eerder onderzoek werden volgende verhoudingen bekomen die resulteerden in de hoogste sterkte. [205]. Er werd hier rekening gehouden met een Na_2O / binder (precursor) verhouding van 8 %, een molaire massa verhouding van SiO_2 / Na_2O = 1,38 en een water / binder (w/b) = 0,4. Er werden verschillende mengsel samengesteld. Dit met als doel het optimale mengsel te verkrijgen.

$$\mathbf{x} = \frac{\mathbf{Na_2O}}{\mathbf{b}} = \mathbf{8}\ \%$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Modulus\ (M)} = \frac{\mathbf{molaire\ massa\ van\ SiO_2}}{\mathbf{molaire\ massa\ van\ Na_2O}} = \mathbf{1,38}$$

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{w}}{\mathbf{b}} = \mathbf{0,4}$$

Pasta

Voor de bepaling van de benodigde hoeveelheid werd uitgegaan van de schijnbare volumemassa van cement, die 1250 kg/m³ bedraagt (oftewel 1,25 kg/l). Omdat de Vicat-mal wordt gevuld zonder verdichting, is het gebruik van de schijnbare volumemassa hier passend. Het volume van de Vicat-mal, zoals weergegeven in hoofdstuk 3.2.4.3 werd vermenigvuldigd met deze dichtheid, wat resulteerde in een benodigde hoeveelheid van 430 g.

Rekening houdend met een verlies van 10 %, werd dit aangepast naar 473 g. Uiteindelijk werd besloten om 400 g precursor te gebruiken voor deze fase. Hierbij werd gebruik gemaakt van een kubusmal met afmetingen van 20 x 20 x 20 mm³. Elke mal bevatte zes kubusvormen, en met deze hoeveelheid konden twee mallen volledig worden gevuld.

De inhoud van het natrium silicaat wordt vastgesteld. Deze is eenvoudig terug te vinden op verpakking. Merk op dat er zoals vermeld in hoofdstuk 2.2.2.1, door een tekort verschillende natronwaterglas gebruikt zijn. De hoeveelheid water in het natriumsilicaat is eenvoudig te berekenen. Dit door het gehalte SiO_2 en Na_2O af te trekken van 100 %.

De benodigde hoeveelheid natriumsilicaat wordt terug bepaald aan de hand van vaste verhoudingen weergegeven op de verpaking. Het proces is stap voor stap doorlopen, van vergelijking (3-1) tot (3-5), waarbij de volledige formule uiteengezet is in vergelijking (3-6).

$$\mathbf{Na_2O} = \frac{\mathbf{m_{Na_2O}}}{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{b} = \ \mathbf{0,0799 \times 400\ g = 31,96\ g} \tag{3-1}$$

$$\mathbf{n_{Na_2O}} = \frac{\mathbf{m_{Na_2O}}}{\mathbf{M_{Na_2O}}} = \frac{\mathbf{31,96\ g}}{\mathbf{61,979\ g/mol}} = \mathbf{0,5157\ mol} \tag{3-2}$$

$$\mathbf{m_{SiO_2}} = \frac{\mathbf{n_{SiO_2}}}{\mathbf{n_{Na_2O}}} \cdot \mathbf{n_{Na_2O}} = \mathbf{1,377 \times 0,5157\ mol = 0,71012\ mol} \tag{3-3}$$

$$\mathbf{m_{SiO_2}} = \mathbf{n_{SiO_2}} \cdot \mathbf{M_{SiO_2}} = \mathbf{0,71012\ mol \times 60,084\ \frac{g}{mol} = 42,667\ g} \quad (3\text{-}4)$$

$$\mathbf{NS} = \frac{\mathbf{m_{SiO_2}}}{(\%\ \mathbf{SiO_2\ in\ NS}) \cdot \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{100}}} = \frac{\mathbf{42,667\ g}}{\mathbf{0,259}} = \mathbf{164,7\ g} \quad (3\text{-}5)$$

$$\mathbf{NS} = \frac{\frac{\mathbf{m_{Na_2O}}}{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{b} \cdot \frac{\mathbf{M_{SiO_2}}}{\mathbf{M_{Na_2O}}} \cdot \frac{\mathbf{n_{SiO_2}}}{\mathbf{n_{Na_2O}}}}{(\%\ \mathbf{SiO_2\ in\ NS}) \cdot \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{100}}} = \mathbf{164,7\ g} \quad (3\text{-}6)$$

Vervolgens kan de hoeveelheid natriumhydroxide bepaald worden. Het proces is stap voor stap doorlopen, van vergelijking (3-7) tot (3-12), waarbij de volledige formule uiteengezet is in vergelijking (3-13).

$$\mathbf{n\ Na_2O_{(NH)}} = \mathbf{n\ Na_2O_{(totaal)}} - \mathbf{n\ Na_2O_{(NS)}} \quad (3\text{-}7)$$

$$\mathbf{n\ Na_2O_{(NS)}} = \frac{\mathbf{m\ Na_2O_{(NS)}}}{\mathbf{M\ Na_2O_{(NS)}}} = \frac{\mathbf{NS} \cdot (\%\ \mathbf{Na_2O\ in\ NS})}{\mathbf{M\ Na_2O_{(NS)}}} \cdot \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{100}} = \frac{\mathbf{164,7\ g \times 0,079}}{\mathbf{61,98\frac{g}{mol}}} = \mathbf{0.2099\ mol} \quad (3\text{-}8)$$

$$\mathrm{n\ Na_2O_{(NH)}} = \mathrm{n\ Na_2O_{(totaal)}} - \mathrm{n\ Na_2O_{(NS)}} = 0{,}5157\ \mathrm{mol} - 0{,}2099\ \mathrm{mol} = 0{,}3058\ \mathrm{mol} \quad (3\text{-}9)$$

$$\mathbf{Na_2O} + \mathbf{H_2O} \rightarrow \mathbf{2\ NaOH} \quad (3\text{-}10)$$

$$\mathbf{n\ Na_2O} = \mathbf{2\ n\ NaOH} \qquad \mathbf{2 \times 0,3058\ mol = 0,6116\ mol} \quad (3\text{-}11)$$

$$\mathbf{NH} = \mathbf{n\ NaOH} \cdot \mathbf{M\ NaOH} = \mathbf{0,6116\ mol \times 39,9969\ \frac{g}{mol} = 24,5\ g} \quad (3\text{-}12)$$

$$\mathbf{NH} = \left(\mathbf{n\ Na_2O_{(totaal)}} - \frac{\mathbf{m_{\ Na_2O\ (NS)}}}{\mathbf{M_{\ Na_2O}}}\right) \cdot \mathbf{2} \cdot \mathbf{M\ (NaOH) = 24,5\ g} \quad (3\text{-}13)$$

Ten slotte kan het watergehalte bepaald worden. Het proces is stap voor stap doorlopen, van vergelijking (3-14) tot (3-15), waarbij de volledige formule uiteengezet is in vergelijking (3-16).

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{w}}{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{b} = \mathbf{0,4 \times 400\ g = 160\ g} \quad (3\text{-}14)$$

$$\mathbf{w_{(NS)}} = (\%\ \mathbf{w\ in\ NS}) \cdot \mathbf{NS} = \mathbf{0,662 \times 164,7\ g = 109\ g} \quad (3\text{-}15)$$

$$\mathbf{H_2O} = \frac{\mathbf{w}}{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{b} - (\%\ \mathbf{w\ in\ NS}) \cdot \mathbf{NS} = \mathbf{160\ g - 109\ g = 51\ g} \quad (3\text{-}16)$$

Hier wordt er dus een hoeveelheid van 164,7 natronwaterglas, een hoeveelheid van 24,5 g NaOH en een hoeveelheid water van 51 g.

Mortel

Voor het bepalen van het mortel gehalte werden de hoeveelheden behouden en omgerekend. Allereerst werd de totale nodige hoeveelheid berekend om een mal van 40 x 40 x 160 mm³ te vullen. Hiervoor werd weer gebruik gemaakt van het eigen gewicht van cementmortel, dat 1900 kg/m³ bedraagt. Met een volume van de grootste te vullen mal zoals weergegeven in hoofdstuk 3.2.4.3. Wordt er bekomen dat er voor het vullen van 1 balk ongeveer 486,4 g nodig is. Dit komt overeen met de eerste berekening waarbij 400 g precursor en 240,1 g alkalische activator nodig is. Daarom wordt er met rekening houden dat er een gedeelte gebruikt wordt voor de mini-slump test 640,1 g x 4 = 2560,55 g gemaakt. Hiermee kan de mini-slump test uitgevoerd worden, een mal bestaande uit 3 balken gevuld worden en is er rekening gehouden met verlies. Het mengselontwerp nargelang het variërende zandgehalte is weergegeven in Tabel 3-1.

Tabel 3-1: Mengselontwerp van de mortel

Mengsel	Zand [%]	Zand [g]	GGBS [g]	RBP [g]	Alkalische activator [g]
16-A	67	1715,6	316,8	211,2	316,98
16-B	55	1408,3	432	288	432,25
16-C	50	1280,3	480	320	480,27
16-D	33	845,0	643,2	428,8	643,57
16-E	25	640,1	720	480	720,41
16-F	15	384,1	816	544	816,46
16	0	0,0	960	640	960,55

Voor de toevoeging van vezels werd gekozen voor drie verschillende doseringen: 3 kg/m³, 6 kg/m³ en 9 kg/m³. Deze doseringen zijn gebaseerd op bevindingen uit eerder onderzoek. Op basis van de schijnbare dichtheid van 2190 kg/m³, bepaald voor mengsel 16-C (zie hoofdstuk 4.3.1.1), kon het benodigde vezelgewicht per mengsel nauwkeurig worden berekend, zoals weergegeven in Tabel 4.2. Aangezien de totale massa van mengsel 16-C gelijk is aan 2,56057 kg, komt dit overeen met een volume van 0,001169 m³ (2,56057 kg ÷ 2190 kg/m³). Door dit volume te vermenigvuldigen met de gewenste vezeldosering, wordt de benodigde vezelhoeveelheid verkregen. Bijvoorbeeld, bij 3 kg/m³ resulteert dit in ongeveer 3,5 g vezels. De vezels werden als extra component toegevoegd, zonder vervanging van andere materialen in het mengsel. Deze werkwijze werd toegepast voor alle onderzochte vezeltypes.

Tabel 3-2: Gebruikte vezelhoeveelheden

Mengsel	Vezel gewichts-hoeveelheid [kg/m³]	Vezelhoeveelheid [g]	Zand [g]	GGBS [g]	RBP [g]	Alkalische activator [g]
16-C-1	3	3,5	1280,3	480	320	480,27
16-C-2	6	7,0	1280,3	480	320	480,27
16-C-3	9	9,0	1280,3	480	320	480,27

3.2.2 Mengmethode

3.2.2.1 Mixer

De mixer is vervaardigd volgens op NBN EN 196-1:2016, , die de methode voor sterktebepaling van cement vastlegt [57].

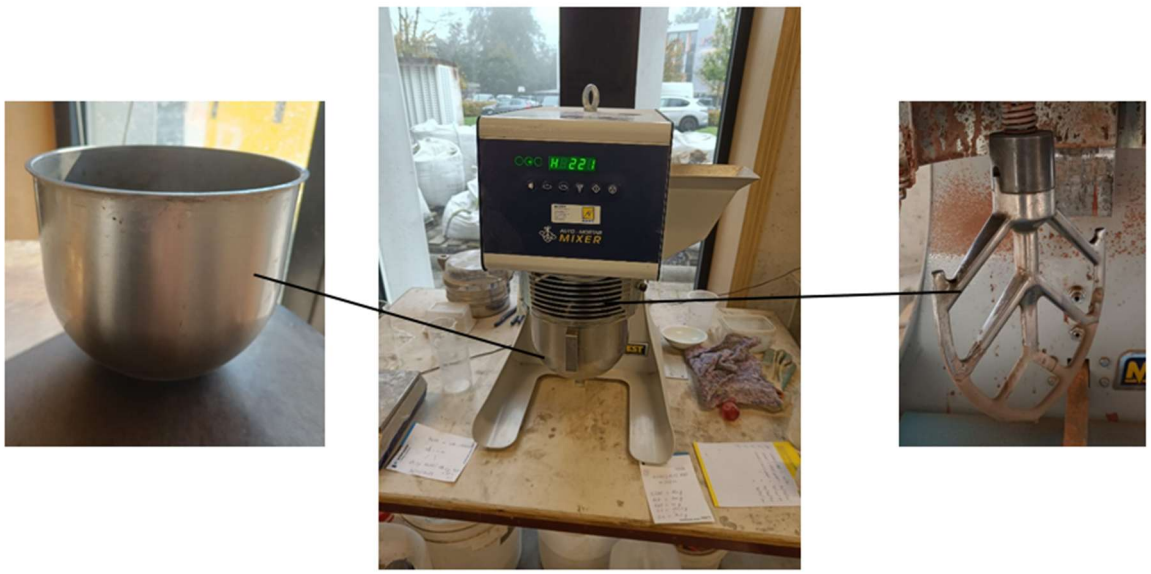
De mixer bestaat uit een roestvrijstalen kom met een capaciteit van ongeveer 5 liter, voorzien van een systeem waarmee deze tijdens het mengen stevig aan het mixerframe kan worden bevestigd. Dit systeem maakt tevens een nauwkeurige en vergrendelbare hoogteverstelling van de kom mogelijk ten opzichte van de menger, wat de speling tussen de menger en de kom optimaliseert.

De mixerkop en de kom vormen een set die altijd samen gebruikt dienen te worden zoals weergegeven in Figuur 3-27. Een speling van (3 ± 1) mm is vereist wanneer de mixerkop in de lege kom zo dicht mogelijk tegen de wand wordt geplaatst. Deze speling moet regelmatig worden gecontroleerd door lichte druk op het mes uit te oefenen en te bevestigen dat er geen merkbare speling is tussen de verbinding van het mes en de motor as.

De mixer dient te werken met de snelheden die in Tabel 3-3 zijn aangegeven.

Tabel 3-3: Snelheden van mixerkop

	Rotatie [min^{-1}]	**Planetaire beweging [min^{-1}]**
Lage snelheid (LS)	140 ± 5	62 ± 5
Hoge snelheid (HS)	285 ± 10	125 ± 10



Figuur 3-27: Opstelling van de mixer

De gebruikte mengmethode is gebaseerd op eerdere onderzoeken, waarin werd aangetoond dat een gecontroleerde en consistente mengprocedure cruciaal is voor het verkrijgen van betrouwbare resultaten bij het testen van cementpasta's en vulstoffen [206].

Er werden drie verschillende mengprocedures gehanteerd voor de vervaardiging van pasta, mortel en mortel met vezels. Bij deze procedures werd er zorgvuldig rekening gehouden met het verkrijgen van een zo homogeen mogelijk mengsel, terwijl de mengtijd zo kort mogelijk werd gehouden. Dit is belangrijk omdat een te lange mengtijd kan leiden tot de vorming van luchtbellen, wat de kwaliteit van het mengsel kan beïnvloeden.

Pasta

Deze mengprocedure werd bekomen van voorgaande onderzoeken. In de beschreven procedure werden alle vulstoffen eerst gedurende 2 minuten gemengd op lage snelheid (LS) om een uniforme samenstelling te verkrijgen.

Daarna werd gedurende nog eens 2 minuten op LS gemengd, waarbij een alkalische oplossing over een periode van 30 s werd toegevoegd. Dit wordt gedaan door het kijkluik te openen en een lepel voor de sensor te houden zoals weergegeven in Figuur 3-28. Het moment van toevoegen van de alkalische oplossing werd gemarkeerd als het "zero time[5]".

Daarna werd de menging voortgezet op hoge snelheid (HS) voor 2 minuten om een goede homogeniteit van het mengsel te waarborgen.

Mortel

Deze procedure werd zelf samengesteld op basis van EN 196-1 en voorgaande onderzoeken [57]. Alle vulstoffen werden eerst gedurende 2 minuten gemengd op lage snelheid (LS) om een uniforme samenstelling te verkrijgen.

Daarna werd gedurende nog eens 2 minuten op LS gemengd, waarbij een alkalische oplossing over een periode van 30 s werd toegevoegd. Het moment van toevoegen van de alkalische oplossing werd gemarkeerd als het "zero time".

Er werd opnieuw gemengd op LS, waarbij het zand werd toegevoegd in periode van 30 s; Dit wordt geleidelijk via de trechter aan de zijkant van de mixer aangebracht zoals weergegeven in Figuur 3-29. Het is essentieel dat het zand gelijkmatig via de trechter wordt toegevoegd gedurende deze 30 s, om de homogeniteit van het mengsel te waarborgen

Daarna werd de menging voortgezet op hoge snelheid (HS) voor 2 minuten om een goede homogeniteit van het mengsel te waarborgen. Dit geeft een totale mengtijd van 8minuten.

Mortel met vezels

Deze procedure werd zelf samengesteld op basis van EN 1961-1 en voorgaande onderzoeken [57]. Alle vulstoffen werden eerst gedurende 2 minuten gemengd op lage snelheid (LS) om een uniforme samenstelling te verkrijgen.

Daarna werd gedurende nog eens 1 minuut op LS gemengd, waarbij een alkalische oplossing over een periode van 30 s werd toegevoegd. Het moment van toevoegen van de alkalische oplossing werd gemarkeerd als het "zero time".

---

[5] Zero time: het moment waarop de alkalische activator wordt toegevoegd aan de reactieve grondstoffen, waardoor de reacties starten.

Er werd opnieuw gemengd op LS, waarbij het zand werd toegevoegd in periode van 30 s. Het is essentieel dat het zand gelijkmatig via de trechter wordt toegevoegd gedurende deze 30 s, om de homogeniteit van het mengsel te waarborgen

Er werd gedurende 1 minuut op LS gemengd, waarbij de vezels werden toegevoegd in een periode van 60 s. Deze vergde echter wel hulp van doorduwen zoals weergegeven in Figuur 3-30.

Ten slotte werd de menging voortgezet op HS voor 2 minuten om een goede homogeniteit van het mengsel te waarborgen. Dit geeft een totale mengtijd van 8 minuten.



Figuur 3-28: De toevoeging van de activator



Figuur 3-29: De toevoeging van het zand

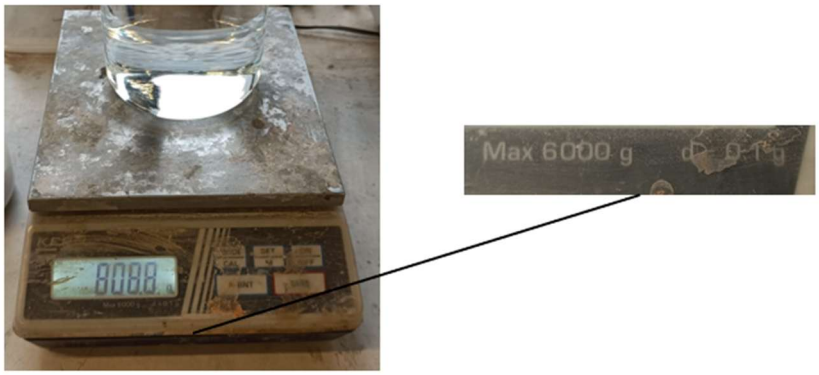


Figuur 3-30: De toevoeging van de vezels

3.2.2.2 Laboruimte en weegschaal

Het laboratorium waar het mengsel wordt bereid, dient een constante temperatuur van (20 ± 2) °C en een relatieve luchtvochtigheid van minimaal 50 % te hebben.

Voor het afwegen dient een weegschaal te worden gebruikt met een nauwkeurigheid van ± 1 g (zie Figuur 3-31). Er werd gebruik gemaakt van een weegschaal die tot wel 0,1g nauwkeurig kon wegen met een maximum gewicht van 6000 g. De vloeibare componenten worden afgemeten met behulp van een maatcilinder, waarbij een pipet wordt ingezet voor het nauwkeurig overbrengen van de vloeistof.



Figuur 3-31: De gebruikte weegschaal

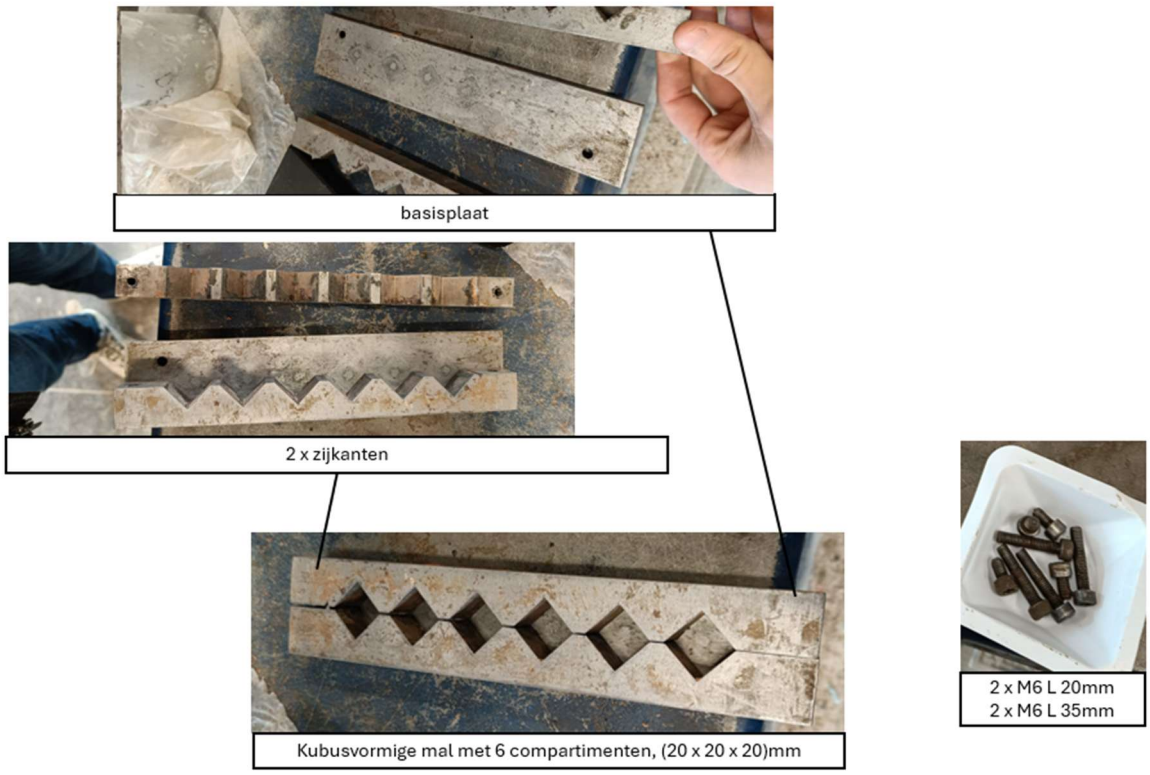
3.2.3 Vulproces

3.2.3.1 Gebruikte mallen

Kubus mal

Voor het bepalen van de optimale samenstelling van de AAM-pasta zijn kubusvormige mallen gebruikt, ontworpen om de materiaalverspilling tot een minimum te beperken. Deze mallen zijn gebaseerd op NBN EN 196-1:2016 [57].

De mal bestaat uit zes componenten, zodat zes kubusvormige proefstukken kunnen worden vervaardigd met afmeting van 20 x 20 x 20 mm³ (zie Figuur 3-32). De mallen zijn vervaardigd uit staal. Elke mal beschikt over een basisplaat die stevig en vast is verbonden met de andere onderdelen. De montage is zodanig dat er geen zichtbare lekkage optreedt tijdens het vullen. Daarom is het essentieel om de onderdelen na ontkisting grondig te reinigen met een plamuurmes om een effen oppervlak te verkrijgen. Indien nodig restanten te verwijderen met een doek. De basisplaat bied voldoende contact maken met het verdichtingsapparaat en bezit voldoende stijfheid om secundaire trillingen te voorkomen.



Figuur 3-32: Benodigdheden voor de kubusvormige mal

Prismatische balk mal

De uitvoering is ook gebaseerd op NBN EN 196-1:2016 [57]. Aangezien deze norm oorspronkelijk is ontwikkeld voor testproeven van cement, worden er enkele aanpassingen gedaan om de procedure geschikt te maken voor AAM.

De mal dient te bestaan uit drie horizontale componenten, zodat drie prismatische proefstukken kunnen worden vervaardigd met een lengte van (160 ± 1) mm, een breedte van (40 ± 0,2) mm en een hoogte van (40,1 ± 0,1) mm. De mallen zijn vervaardigd uit staal met een dikte van 10 mm. Het is essentieel dat elk intern deel van de mal een Vickers-hardheid heeft van minimaal HV 200; een Vickers-hardheid van HV 400 wordt echter aanbevolen voor optimale prestaties. De mal dient zodanig te zijn ontworpen dat ontkisting mogelijk is zonder schade aan te brengen aan de proefstukken. Elke mal moet beschikken over een basisplaat die stevig en vast is verbonden met de andere onderdelen. De montage moet zodanig zijn dat er geen zichtbare lekkage optreedt tijdens het vullen. Daarom is het essentieel om de onderdelen na ontkisting grondig te reinigen met een plamuurmes om een effen oppervlak te verkrijgen. Indien nodig restanten te verwijderen met een doek. De basisplaat moet voldoende contact maken met het verdichtingsapparaat en voldoende stijfheid bezitten om secundaire trillingen te voorkomen. Elk onderdeel van de mal dient te zijn gemarkeerd om de naleving van specifieke toleranties te waarborgen. Dit was echter niet het geval bij de mallen weergegeven in Figuur 3-34.

Vanwege het beperkte aantal beschikbare mallen conform NBN EN 196-1, zoals weergegeven in Bijlage F en Figuur 3-33, werden andere mallen gebruikt die ruim beschikbaar waren maar ontworpen volgens de NF P15-434 norm, weergegeven in Bijlage G en Figuur 3-34. Deze mallen vertonen vergelijkbare afmetingen en vormen, wat hun inzetbaarheid in deze context mogelijk maakt.



Figuur 3-33: De mal volgens EN196-1



Figuur 3-34: De mal volgens NF P15-434

3.2.3.2 Triltafel

De triltafel is ook vervaardigt volgens NBN EN 196-1:2016 [57].

Het apparaat bestaat uit een rechthoekige tafel die stevig is verbonden met twee lichte armen, welke op een draaipunt zijn gemonteerd op een nominale afstand van 800 mm (zie Figuur 3-35). In het midden van de onderzijde van de tafel bevindt zich een uitstekende pen met een afgeronde kop. Onder deze pen is een kleine stop met een vlakke bovenkant geplaatst. In rustpositie is de lijn die normaal staat op het contactpunt tussen pen en stop verticaal. Wanneer de pen op de stop rust, is het bovenste vlak van de tafel horizontaal, zodat het niveau van elk van de vier hoeken niet meer dan 1,0 mm afwijkt van het gemiddelde niveau. De tafel heeft afmetingen die gelijk zijn aan of groter zijn dan die van de malbasisplaat. Klemmen zijn aanwezig voor een stevige bevestiging van de mal aan de tafel.

De nok wordt aangedreven door een elektromotor van ongeveer 250 W via een reductieoverbrenging, met een constante snelheid van één omwenteling per seconde (s). Er is een controlesysteem met een teller aanwezig dat ervoor zorgt dat één periode van schokken (60 ± 3) s precies 60 schokken omvat. De positie van de mal op de tafel is zodanig dat de lengterichting van de compartimenten in lijn ligt met de richting van de armen en loodrecht op de rotatie as van de nok. Het apparaat is stevig gemonteerd op een betonnen blok met een massa van ongeveer 600 kg en een volume van circa 0,25 m³, wat zorgt voor een geschikte werkhoogte voor de mal. De gehele onderkant van het betonnen blok rust op een elastische pad, bijvoorbeeld van natuurrubber, die een effectieve isolatie biedt om externe trillingen te voorkomen die de verdichting kunnen beïnvloeden. De basis van het apparaat is met ankerbouten stevig bevestigd aan de betonnen fundering, waarbij een dunne laag mortel tussen de basis van het apparaat en de betonfundering wordt aangebracht om een volledige en trillingvrije contact te garanderen. Hier werd het apparaat echter op een tafel geplaatst en niet verankerd.

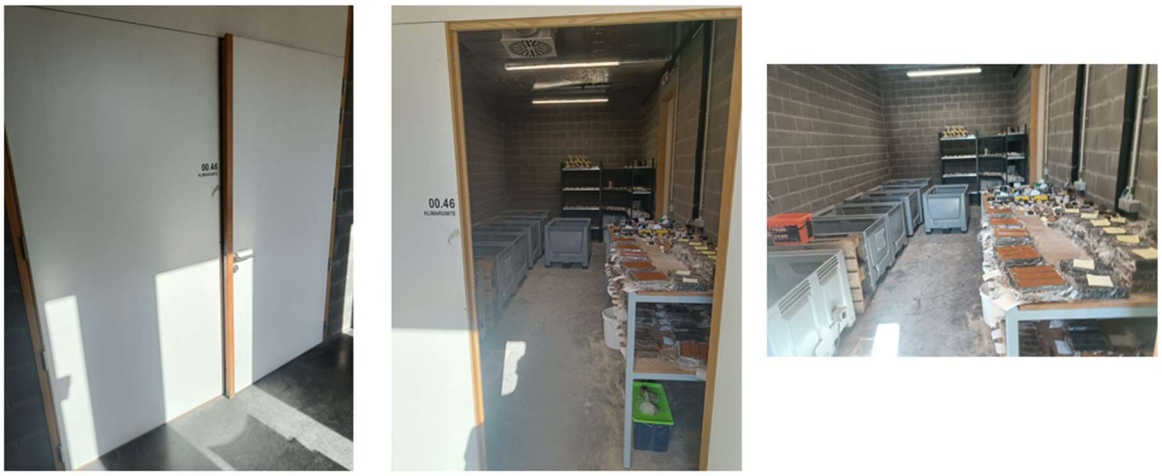


Figuur 3-35: Opstelling van de triltafel

3.2.3.3 Opslag

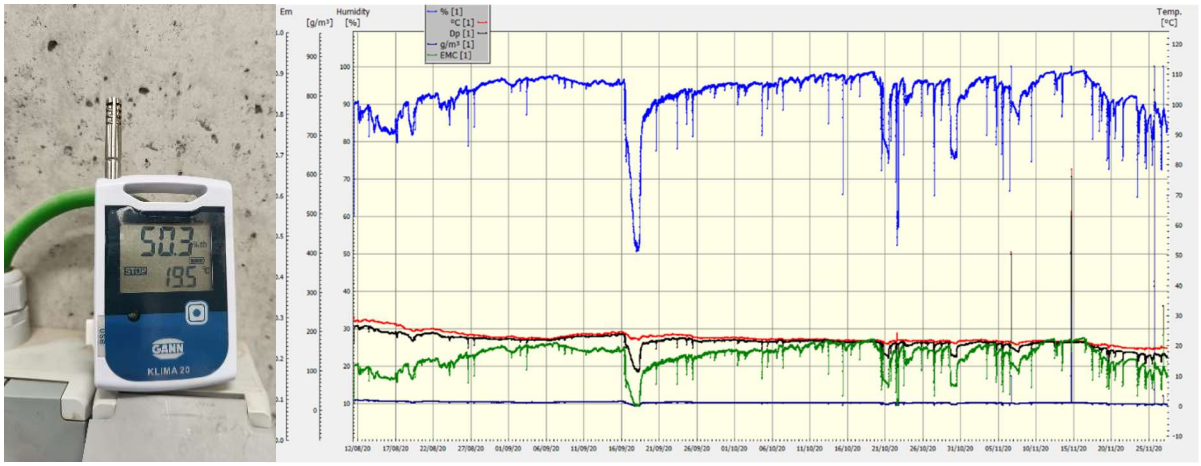
Ter opslag van de proefstukken werd er gebruik gemaakt van een klimaatruimte (zie Figuur 3-36). Deze werd ook vervaardigt volgens NBN EN 196-1:2016 [57].

De klimaatruimte voor de opslag van de proefstukken behoord op een temperatuur van (20 ± 1) °C en een relatieve luchtvochtigheid niet minder dan 90 % te zijn. Omdat deze hoge luchtvochtigheid niet altijd gegarandeerd kon worden, werden de proefstukken afgedekt met plasticfolie.



Figuur 3-36: De klimaatruimte

De temperatuur en luchtvochtigheid kunnen continu worden gemonitord met behulp van de Gann Klima 20 datalogger. Dit apparaat is speciaal ontworpen voor langdurige klimaatbewaking en slaat gemeten waarden op in de interne geheugen met datum en tijdstempel. Metingen werden uitgevoerd met een interval van 20 minuten gedurende een periode van zes maanden. Vervolgens werd met de nodige software de date grafiek bekomen weergegeven in Figuur 3-37.



Figuur 3-37: Monitoring van de klimaatruimte

3.2.4 Onderzoeksprogramma

3.2.4.1 Waterabsorptie

Uitvoering

Allereerst wordt het poeder 24 uur ondergedompeld in water om ervoor te zorgen dat de poriën volledig verzadigd zijn in een ruim vat of emmer (zie Figuur 3-38). Het vat wordt afgesloten met plasticfolie om mogelijke verontreiniging tijdens het verzadigingsproces te voorkomen.

Na 24 uur kon de natte grondstof uit het vat gehaald worden. Vervolgens werd gebruik gemaakt van een koffiefilter met een poriegrootte variërend tussen de 10 en 30 micrometer (zie Figuur 3-39). De filter maakte het mogelijk om het water volledig van de grondstof te scheiden, zonder verlies van materiaal (zie Figuur 3-40). Na het filtreren werd het mengsel zorgvuldig opgeschept en overgebracht naar een glazen kom voor verdere verwerking (zie Figuur 3-42). Deze methode zorgde voor een efficiënte scheiding en behoud van het monster.



Figuur 3-38: Het verzadigingsproces



Figuur 3-39: Opstelling met een koffiefilter



Figuur 3-40: Scheiding van de grondstof en het water

Voor de stapsgewijze droging werd gebruik gemaakt van een microgolf. Met een maximaal wattage van 900 Wattage (W) zoals weergegeven op Figuur 3-41.



Figuur 3-41: De gebruikte microgolf



Figuur 3-42: De glazen schaal met het nat mengsel

Gedurende het proces werd een stapsgewijs gedroogd en afgekoeld. In een eerste opwarmfase, waarbij het mengsel nog te nat is om monster te nemen, werd er een langdurige periode opgewarmd zoals weergegeven in Tabel 3-4. Tijdens dit proces kookte het water als het ware uit het mengsel.

Tabel 3-4: Waarden microgolfgebruik

	Tijd [min]	Vermogen [W]
Opwarmfase 1		
Opwarmen	10	900
Afkoelen	10	
Opwarmfase 2		
Opwarmen	2	600
Afkoelen	5	

Indien het monster nog te nat is hoort er verder opgewarmd te worden. Dit is zichtbaar aan de weerspiegeling in het licht zoals weergegeven in Figuur 3-43. Wanneer het proefmonster voldoende droog is zoals weergegeven in Figuur 3-44, kan naar opwarmfase 2 worden overgeschakeld. Vanaf deze fase startte ook de proefafname.



Figuur 3-43: Een te nat monster voor proefafname



Figuur 3-44: Een voldoende droog monster voor proefafname

De proefafname gebeurde in PVC-buisjes met telkens een interne diameter van 20 mm en een lengte van 200 mm. De proefafname gebeurde door het mengsel in 4 gelijke lagen aan te brengen en per laag verdichten (zie Figuur 3-45 en Figuur 3-46). Na het verdichten van de laatste laag werd de proefbuis afgesloten met een rubber (zie Figuur 3-47). Deze rubber voorkomt het verlies van het monster en zorgt voor een goede afsluiting.



Figuur 3-45: Het aanbrengen in lagen



Figuur 3-46: Het verdichten per laag



Figuur 3-47: Een afgesloten proefmonster

Vervolgens werden de PVC-staaltjes, die genomen waren per vochtgehalte, gedurende 24 uur bewaard in de diepvries bij (-18 ± 1) °C. Dit kwam overeen met de stand zoals weergegeven in Figuur 3-48.



Figuur 3-48: Monitoring van de diepvries

3.2.4.2 Consistentie (mini-slump test) (gebaseerd op NBN EN 1015-3)

Ontstaan en evolutie



Figuur 3-49: Duff A. Abrams [207]

De slump test, uitgevoerd met de kegel van Abrams, is ontstaan aan het begin van de 20e eeuw als een manier om de verwerkbaarheid van beton te meten [208], [209]. Het werd ontwikkeld door Duff A. Abrams, een Amerikaanse ingenieur en onderzoeker die werkte aan de samenstelling en de eigenschappen van beton (zie Figuur 3-49).

De slump test werd wereldwijd meer geaccepteerd als een standaardpraktijk voor de betonindustrie vanwege de eenvoud, lage kosten en het gebruiksgemak. De test meet voornamelijk de viscositeit. Hoewel het aanvankelijk zeer populair was, werd later erkend dat de test minder geschikt is voor geavanceerdere toepassingen, zoals zelfverdichtend beton. In Europa wordt de slump test beschreven in NBN EN 12350-2 [57]. Deze norm werd voor het eerst gepubliceerd in 1982 onder de naam: “ NBN B 15-233:1982” en sindsdien aangepast om aan de technologische ontwikkelingen in de betonindustrie te voldoen [210].

Het principe achter de traditionele slump test is relatief eenvoudig. Het beton wordt in een conische mal geplaatst, die vervolgens wordt opgetild. Na het verwijderen van de mal valt het beton en de mate van "slump" of inzinking wordt gemeten door het verschil in hoogte tussen het oorspronkelijke en het ingezakte beton. Deze inzinking geeft een indicatie van de verwerkbaarheid van het beton: hoe groter de inzinking, hoe vloeibaarder en gemakkelijker te verwerken het beton is.

Naarmate de betonindustrie zich verder ontwikkelde, ontstond er de behoefte aan meer geavanceerde testmethoden voor betonmengsels die vloeibaarder waren dan de traditionele betonsoorten. De traditionele slump test, die oorspronkelijk werd ontwikkeld om de consistentie van conventioneel beton te meten, bleek niet geschikt voor het beoordelen van mengsels die veel vloeibaarder waren, zoals zelfverdichtend beton (SCC). Deze betonsoorten, die een zeer lage viscositeit hebben, vereisen een andere benadering om hun verwerkbaarheid en stroming te evalueren.

Daarom werd de slump-flow test ontwikkeld [211]. Deze test werd geïntroduceerd om de flow-eigenschappen van zelfverdichtend beton te meten, aangezien de traditionele slump test niet in staat was om de specifieke kenmerken van deze mengsels adequaat te beoordelen. De slump-flow test maakt gebruik van een schoktafel, waarbij het betonmengsel wordt gegoten in een conische mal en vervolgens wordt gemeten hoe ver het mengsel zich verspreidt. Dit geeft een duidelijke indicatie van de stroming, cohesie en verwerkbaarheid van betonmengsels met een hogere vloeiing. De test is daardoor minder gevoelig voor variaties in de samenstelling van het beton en biedt een betrouwbaardere beoordeling van mengsels die de capaciteit van de traditionele slump test overschrijden.

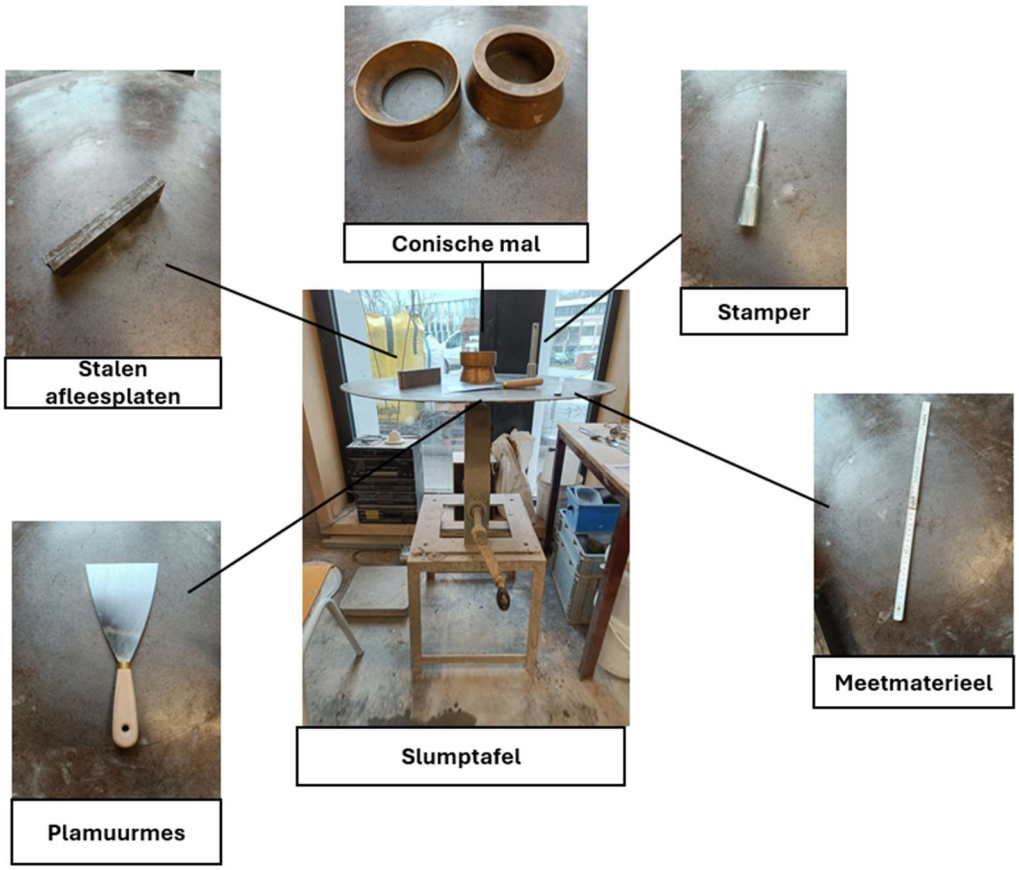
De mini slump flow test is een aangepaste versie van de traditionele slump flow test, die wordt gebruikt om de verwerkbaarheid en vloeibaarheid van cementpasta te meten. Deze test is vooral geschikt voor het beoordelen van de consistentie van pasta's met een lage viscositeit, die in staat zijn te stromen zonder dat externe vibratie nodig is. In tegenstelling tot de standaard slump test, waarbij een conusvormige mal wordt gebruikt, maakt de mini slump test gebruik van een kleinere mal. Dit resulteert in een kleinere hoeveelheid materiaal en een snellere uitvoering van de test.

Mini slump test

Uitvoering

Bij gebrek aan een specifieke norm voor de mini-slump test, is de methode gebaseerd op NBN EN 1015-3, waarin de consistentiebepaling van verse metselmortel wordt beschreven [57]. Aangezien deze norm oorspronkelijk is ontwikkeld voor testproeven van metselmortel worden er enkele aanpassingen gedaan om de procedure geschikt te maken voor AAM.

De mini slump test is een variant van de traditionele slump flow test en wordt gebruikt om de consistentie te bepalen (zie Figuur 3-50). Consistentie is een maat voor de vloeibaarheid en/of natheid van en geeft de vervormbaarheid van een mortel aan wanneer deze wordt blootgesteld aan een bepaald type belasting. In tegenstelling tot de standaard slump test, waarbij een conusvormige mal wordt gebruikt, maakt de mini slump test gebruik van een kleinere, aangepaste mal, wat resulteert in een lagere hoeveelheid materiaal. Door de kleinere hoeveelheid materiaal die nodig is voor de test, is het ook een efficiëntere methode in vergelijking met de traditionele slump flow test.



Figuur 3-50: Benodigdheden voor de mini-slump test

De mal hoort te zijn vervaardigt uit roestvrij staal of messing.

Het heeft een hoogte van (50 ± 0,5) mm terwijl deze een hoogte hoort te zijn van (60 ± 0,5) mm , een interne diameter aan de onderzijde van (100 ± 0,5) mm en een interne diameter aan de bovenzijde van (70 ± 0,5) mm. De interne vlakken en de randen van de mal zijn glad. De minimale wanddikte van de mal bedraagt 2,0 mm. De afmetingen van de mal waren echter volgens ASTM C1437. Er werd ervoor gekozen toch met deze mal verder te werken.

Pasta

Allereerst werd de tafel en de mal zorgvuldig ingesmeerd met een laag AAM-olie. Deze laag werd opengesmeerd met een doek om een egaal oppervlak te creëren (zie Figuur 3-51).

Vervolgens werd de pasta in één keer in de mal gegoten, waarbij gestreefd werd naar een gelijkmatige vulling (zie Figuur 3-52). Na het gieten werd de mal gedurende 30 s in rust gelaten om het materiaal te stabiliseren (zie Figuur 3-53). Na deze 30 s werd de mal voorzichtig opgetild, waarbij het materiaal begon te vloeien (zie Figuur 3-54). Alle resterende materiaalresten die aan de mal kleefden, werden zorgvuldig verwijderd door middel van schrapen met een plamuurmes dit gedeelte werd in het midden neergelaten om zo weinig moeilijk invloed te hebben op de test.

Ten slotte werd er 10 minuten gewacht tot het mengsel stopte met vloeien (zie Figuur 3-55).

Er werd kruiselings gemeten (zie Figuur 3-56). De grootste diameter en de diameter haaks daarop werden gemeten. Het gemiddelde van de twee werd berekend. Als één van de twee meer dan 10 % verschillen van het gemiddelde dan werd de test opnieuw uitgevoerd opnieuw.

De optimale diameter is 230 mm voor AAM. Komt van een collega zijn onderzoek

De testprocedure vereist dat de proef twee keer wordt uitgevoerd per mengsel. Zorg er bij de tweede test voor dat de toestellen grondig gereinigd zijn om nadelige invloeden van resterend materiaal te voorkomen.

Mortel

Allereerst werd ook hier de tafel en de mal zorgvuldig ingesmeerd met een laag AAM-olie. Deze laag werd opengesmeerd met een doek om een egaal oppervlak te creëren (zie Figuur 3-57 en Figuur 3-58).

De mortel wordt in twee lagen aangebracht. Na het aanbrengen van elke laag moet de verdichting plaatsvinden door 25 korte slagen met een verdichtingsstok (zie Figuur 3-59). Vervolgens wordt het overtollige materiaal afgevlakt (zie Figuur 3-60). Na 15 s wordt de mal langzaam omhoog getild. Hierna wordt de vloeitafel 15 keer geschud door aan het wiel te draaien, met een frequentie van ongeveer één keer per seconde (zie Figuur 3-61). Let op: deze stap is alleen van toepassing op mortel waarin zand aanwezig is; het is niet van toepassing op pasta zonder zand. Dit bootst de verdichting van de mortel na en zorgt voor een optimalere verdeling van de substantie. Er werd ook hier kruiselings gemeten (zie Figuur 3-62). De grootste diameter en de diameter haaks daarop werden gemeten. Het gemiddelde van de twee werd berekend. Als één van de twee meer dan 10 % verschillen van het gemiddelde dan werd de test opnieuw uitgevoerd opnieuw.

Ook hier hoort de proef tweemaal uitgevoerd te worden.



Figuur 3-51: Insmeren met olie en overtollig verwijderen



Figuur 3-52: Het vullen van de mal



Figuur 3-53: Laten stabiliseren van het mengsel



Figuur 3-54: Opheffen van de mal



Figuur 3-55: Stabiliseren van de stroming



Figuur 3-56: Meten van de bekomen diameters haaks op elkaar



Figuur 3-57: Tafel insmeren en overtollig verwijderen



Figuur 3-58: De mal ook insmeren en vullen



Figuur 3-59: Tot 25 maal aanstappen



Figuur 3-60: Afstrijken van overtollig materiaal en stabiliseren van het mengsel



Figuur 3-61: Nabootsen van verdichting door 15 keer te draaien



Figuur 3-62: Meten van de bekomen diameters haaks op elkaar

3.2.4.3 Bindingstijd en consistentie: Vicat-test (gebaseerd op NBN EN 196-3)

Ontstaan en evolutie



Figuur 3-63: Louis Vicat

De Vicat-test werd ontwikkeld in de 19e eeuw door de Franse ingenieur Louis Vicat (zie Figuur 3-63). Dit is een gestandaardiseerde methode om de consistentie en bindingstijd van cementpasta's te bepalen. Vicat was een pionier op het gebied van hydraulisch cement en ontdekte dat het meten van de weerstand van een cementpasta tegen een indringend object een effectieve manier was om het verhardingsproces te monitoren. Hij ontwierp een apparaat bestaande uit een verticale metalen naald die vrij beweegt onder invloed van de zwaartekracht. De diepte van de penetratie van deze naald in de cementpasta geeft een indicatie van de consistentie.

Het oorspronkelijke ontwerp werd verder verfijnd met een gestandaardiseerde mal en een schaalverdeling, waardoor metingen reproduceerbaar werden. Naarmate het onderzoek vorderde, bleek dat omgevingsfactoren zoals temperatuur, luchtvochtigheid en mengverhoudingen een significante invloed hebben op de testresultaten. Om deze reden werden laboratoriumomstandigheden gestandaardiseerd. Een cruciale toevoeging aan de opstelling was het gebruik van een waterbad. Dit waterbad heeft meerdere functies: het reguleert de temperatuur, zodat de test bij een constante temperatuur (meestal (20 ± 1) °C) kan worden uitgevoerd, en voorkomt uitdroging van de cementpasta. Hierdoor kan de hydratatiereactie volledig en consistent plaatsvinden.

De Vicat-test meet twee belangrijke momenten in het verhardingsproces: de aanvang van binding, wanneer de pasta voldoende weerstand biedt om niet meer als vloeibaar te worden beschouwd, en de eindbinding, het moment waarop de pasta zo goed als volledig is uitgehard. De mallen en andere onderdelen van de testopstelling worden vervaardigd uit specifieke materialen om te voorkomen dat deze de meetresultaten beïnvloeden.

Tegen het einde van de 19e en het begin van de 20e eeuw werden de procedures voor de Vicat-test internationaal gestandaardiseerd, waaronder in de Europese norm EN 196-3. Deze norm beschrijft de standaardmethoden voor het testen van cement. Omdat de test wordt uitgevoerd met een alternatief bindmiddel namelijk geopolymeren in plaats van cement, worden enkele uitvoeringsstappen aangepast om rekening te houden met de specifieke eigenschappen van dit materiaal.

Uitvoering

De uitvoering is gebaseerd op NBN EN 196-3:2016, waarin de bepaling van de bindingstijd en volumestabiliteit is vastgelegd [57]. Aangezien deze norm oorspronkelijk is ontwikkeld voor testproeven van cement, worden er enkele aanpassingen gedaan om de procedure geschikt te maken voor AAM.

De mal moet vervaardigd zijn uit rubber of kunststof (zie Figuur 3-64). Het moet een hoogte van (40 ± 0,2) mm hebben. De interne diameter aan de onderzijde bedraagt (75 ± 10) mm. En de interne diameter aan de bovenzijde moet groter zijn dan 65 mm en kleiner dan 85 mm. De glazen basisplaat moet minstens 2,5 mm dik zijn. De mal die in het laboratorium werd gebruikt, werd gecontroleerd met een schuifmaat. Deze heeft een hoogte van 40 mm en een interne diameter aan de onderzijde van 80 mm. En een interne diameter aan de bovenzijde van 70 mm. De glazen basisplaat heeft een dikte van 5 mm. De mal en basisplaat voldoen aan de gestelde norm.

Om de benodigde hoeveelheid mengsel voor de test correct te kunnen bepalen, moest eerst het totale volume van de Vicat-mal worden berekend. Dit werd gedaan door het verschil te nemen tussen twee kegelvormige volumes: een grote kegel en een kleinere kegel die daaruit werd verwijderd.
De straal van de onderste, grotere kegel is 50 mm. En de straal van de bovenste, kleinste kegel is 35 mm. De hoogte van de resterende (bovenste) kegelvormige uitsparing is aanvankelijk onbekend, maar kan worden berekend op basis van de verhouding tussen de stralen en de gekende hoogte van 200 mm:

$$\frac{(60\ \text{mm} + \text{x})}{50\ \text{mm}} = \frac{\text{x}}{35\ \text{mm}} \quad \rightarrow \quad \text{x} = \ 140\ \text{mm}$$

Dus een totale lengte van 200mm bedraagt.
Het volume (V) van de mal wordt vervolgens berekend als het verschil tussen de volumes van de twee kegels, volgens de formule:

$$\text{V} = \frac{1}{3} \cdot \text{h}_0 \cdot \pi \cdot {\text{r}_0}^2 - \frac{1}{3} \cdot \text{h}_1 \cdot \pi \cdot {\text{r}_1}^2$$

$$\text{V} \ = \frac{1}{3} \times 200\ \text{mm} \times \pi \times 50\ \text{mm}^2 - \frac{1}{3} \times 140\text{mm} \times \pi \times 35\ \text{mm}^2 = 344\,004{,}4\ \text{mm}^3$$
$$= 0{,}000344\ \text{m}^3$$

waarbij V: volume [mm³];
h_0: hoogte van de grootste kegel [mm];
r_0: straal van de grootste kegel [mm];
h_1: hoogte van de kleinste kegel [mm];
r_1: straal van de kleinste kegel [mm].

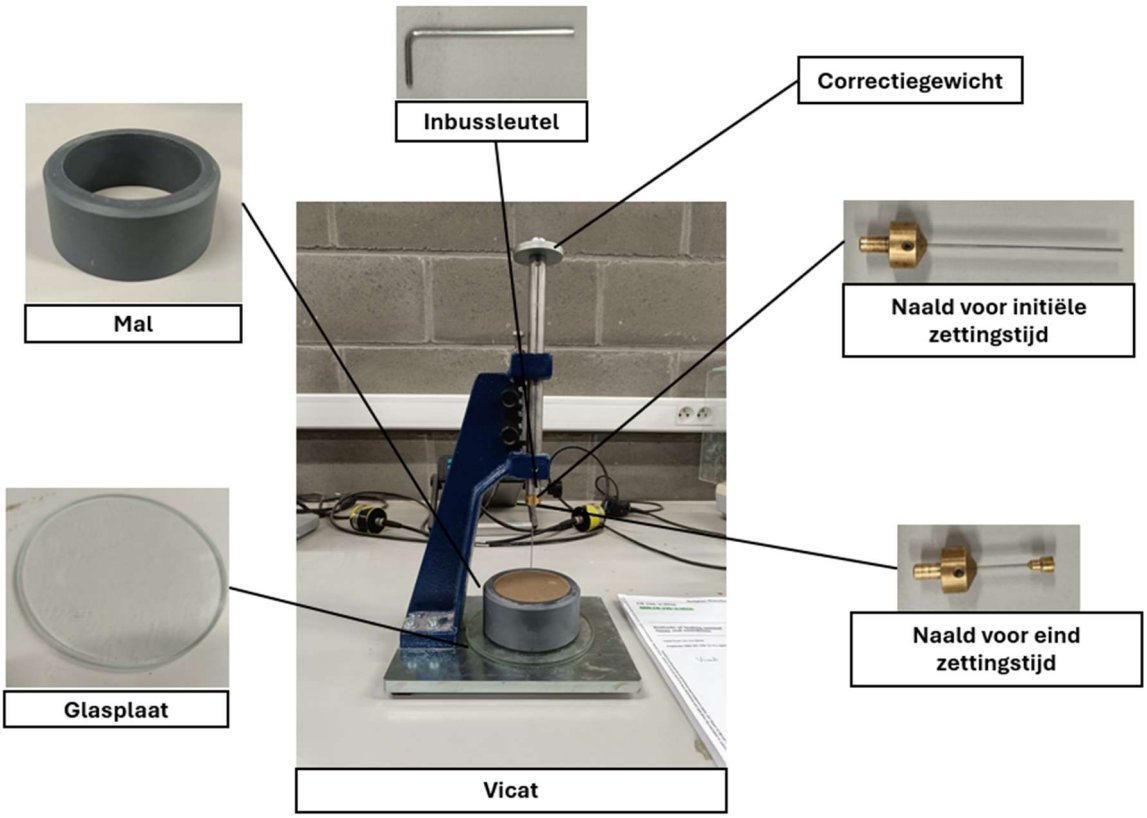
Zo werd een totaal volume van 0,000344 m³ bekomen, wat overeenkomt met de inhoud die nodig is om de mal voor de vicat-test volledig te vullen.

Er is slechts één correctiegewicht vereist wanneer de massa van de naalden, zowel met als zonder het bevestigingsdeel, altijd hetzelfde is, namelijk (9,0 ± 0,5) g. De initiële naald, met een gewicht van 14,0 g, en de eindnaald, met een gewicht van 14,5 g, voldoen aan deze eis.

Gedurende de proef werd steeds dezelfde mal gebruikt om randverschijnselen en uitdrogingvariaties te voorkomen.

Initiële bindingstijd

Hier wordt gebruik gemaakt van de naald voor initiële bindingstijd zoals te zien in Figuur 3-64. Voor het vullen wordt de glasplaat en de mal ingesmeerd met een geschikte olie voor AAM. Vervolgens wordt de mal tot overmaat gevuld. Luchtbellen worden verwijderd door zachtjes met de hand tegen de mal te tikken. Daarna wordt het overtollige materiaal met een zaagbeweging van een plamuurmes verwijderd en de restanten worden afgeveegd met een doek.



Figuur 3-64: Benodigdheden voor de manuele Vicat-test

De naald wordt voorzichtig verlaagd totdat deze in direct contact komt met de pasta. In deze positie wordt 1 à 2 s gewacht om te voorkomen dat de beweegbare delen van het apparaat onverwachte beginsnelheden krijgen of geforceerd versnellen bij het starten van de beweging. Vervolgens wordt de naald snel losgelaten, zodat deze kan penetreren in het mengsel.

Zodra de penetratie is gestopt, of na maximaal 30 s na het loslaten van de naald, afhankelijk van welke situatie zich eerst voordoet, wordt de verkregen waarde afgelezen. Deze waarde is de afstand tussen de top van de naald en de glasplaat. Het is essentieel om de naald na elke penetratie grondig schoon te maken, omdat AAM een zeer kleverig materiaal is zoals te zien op Figuur 3-65, vergelijkbaar met lijm.

De penetraties worden steeds uitgevoerd op minstens 8 mm afstand van de rand van de mal, minstens 5 mm van een andere penetratie en minstens 10 mm van de voorgaande penetratie. Dit wordt gecontroleerd met een vouwmeter. Het proces dient om de 10 minuten herhaald te worden. Zodra de AAM-pasta begint te verstijven en er geen materiaal meer aan de naald kleeft zoals te zien op Figuur 3-66, wordt het tijdsinterval tussen metingen verkort naar 2 minuten om een zo nauwkeurig als mogelijk resultaat te bekomen.

De tijd tussen 'zero time' en het moment waarop de afstand tussen de top van de naald en de glasplaat (6 ± 3) mm bedraagt, wordt genoteerd als de initiële bindingstijd, afgerond op de dichtstbijzijnde 5 minuten.



Figuur 3-65: Klevende AAM-pasta



Figuur 3-66: Verstijvende AAM-pasta

Eind bindingstijd

Hier wordt gebruik gemaakt van de naald voor eind bindingstijd zoals te zien in Figuur 3-64. Na het bekomen van de initiële bindingstijd wordt de gevulde mal omgedraaid zodat de eindbindingstijd wordt gemeten op het vlak dat oorspronkelijk in contact was met de glasplaat. Ook hier wordt de naald voorzichtig verlaagd totdat deze in direct contact komt met de pasta. In deze positie wordt 1 à 2 s gewacht om te voorkomen dat de beweegbare delen van het apparaat onverwachte beginsnelheden krijgen of geforceerd versnellen bij het starten van de beweging. Vervolgens wordt de naald snel losgelaten, zodat deze kan penetreren in het mengsel.

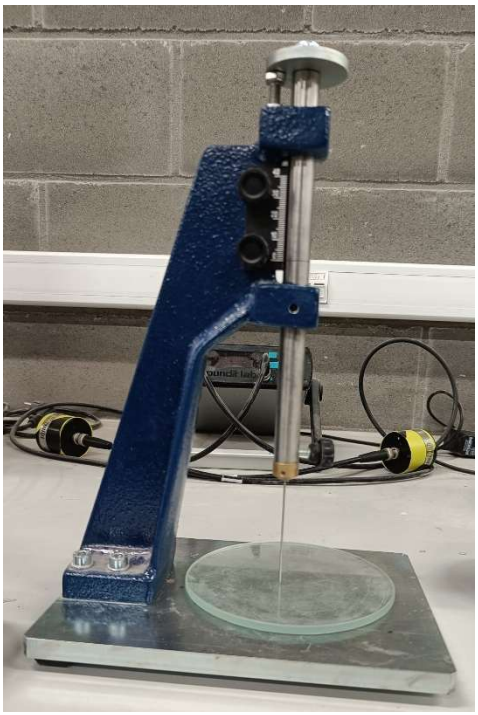
Zodra de penetratie is gestopt, of na maximaal 30 s na het loslaten van de naald, afhankelijk van welke situatie zich eerst voordoet, wordt de verkregen waarde afgelezen. Deze waarde is de penetratiediepte gemeten vanaf de bovenzijde van het mengsel. Ook hier is het essentieel om de naald na elke penetratie grondig schoon te maken.

De metingen werden voortgezet totdat de penetratie slechts 0,5 mm of minder was. Het tijdsverschil tussen dit punt en zero time werd geregistreerd als de eindbindingstijd.

De tijd tussen 'zero time' en het moment waarop slechts 0,5 mm penetratie in het mengsel optreedt, wordt genoteerd als de eindbindingstijd, afgerond op de dichtstbijzijnde 5 minuten. Dit is het moment waarop de ringaansluiting voor het eerst faalt in penetratie en geen afdruk achterlaat in het mengsel. Deze bevinding wordt bevestigd door de penetratie te herhalen op twee verschillende posities.

Beschikbare toestellen

Er bevond zich de mogelijkheid te werken met een manueel Vicat apparaat weergegeven op Figuur 3-67 en een geautomatiseerde vicatronic weergegeven op Figuur 3-68. Voor de geautomatiseerde Vicatronic werd nodige materialen en de juiste software gezocht en besteld.



Figuur 3-67: Manuele Vicat



Figuur 3-68: Automatische Vicatronic

3.2.4.4 Druksterkte: drukproef (gebaseerd op NBN EN 196-1)

Ontstaan en evolutie

De drukproef om de sterkte van materialen zoals beton te meten, werd voor het eerst systematisch gebruikt en gedocumenteerd door John Smeaton in de late 18e eeuw, voornamelijk voor het testen van de sterkte van cement en beton (zie Figuur 3-69) [212]. Smeaton wordt vaak beschouwd als de "vader van de civiele techniek" vanwege zijn werk in het verbeteren van cement. Hij voerde experimenten uit met cement en maakte gebruik van drukproeven om de sterkte ervan te testen, wat cruciaal was voor de ontwikkeling van moderne bouwmaterialen.

Hoewel Smeaton een belangrijke pionier was in het testen van de sterkte van cement, werd de drukproef zoals we die vandaag kennen pas veel later gestandaardiseerd. In het begin van de 20e eeuw speelde de Amerikaanse ingenieur Duff Abrams een essentiële rol in de verdere ontwikkeling van betononderzoek (zie Figuur 3-70) [213]. Tussen 1910 en 1920 voerde Abrams diepgaand experimenteel werk uit naar de relatie tussen de water-cementverhouding en de uiteindelijke druksterkte van beton. Zijn bevindingen vormden de basis voor het zogenaamde Wet van Abrams, die stelt dat, bij gelijke omstandigheden, een lagere water-cementverhouding resulteert in een hogere betonsterkte.

Abrams ontwierp ook praktische testmethoden die tot op heden gebruikt worden, waaronder de bekende slump test om de verwerkbaarheid van beton te beoordelen. Zijn werk leidde tot de eerste wetenschappelijk onderbouwde richtlijnen voor het ontwerpen van betonmengsels en vormde de basis voor de modernisering en standaardisering van betonproeven wereldwijd.

Dus, hoewel Smeaton de eerste was die het concept van druktesten van cement introduceerde, werd de drukproef zoals we die nu gebruiken later gestandaardiseerd en verfijnd door onderzoekers zoals Abrams.



Figuur 3-69: John Smeaton [214]



Figuur 3-70: Duff Abrams [215]

Uitvoering

De uitvoering is gebaseerd op NBN EN 196-1:2016 [57]. Aangezien deze norm oorspronkelijk is ontwikkeld voor testproeven van cement, worden er enkele aanpassingen gedaan om de procedure geschikt te maken voor AAM.

De testmachine zoals weergegeven in Figuur 3-71 voor het bepalen van de druksterkte moet voldoen aan strikte mechanische en geometrische eisen om nauwkeurige en reproduceerbare resultaten te garanderen. Allereerst moet de verticale as van de ram exact samenvallen met de verticale as van de machine. Tijdens het belasten moet de beweging van de ram volledig langs deze verticale as plaatsvinden. Bovendien moet het resulterende krachtensysteem door het middelpunt van het teststuk lopen, om een gelijkmatige belasting te waarborgen.

Het oppervlak van de onderste machineplaat moet loodrecht staan op de verticale as van de machine en deze oriëntatie behouden gedurende de gehele test. Het middelpunt van de bolvormige zitting van de bovenste plaat moet samenvallen met het snijpunt van de verticale as van de machine en het vlak van het onderste oppervlak van de bovenste drukplaat, met een tolerantiewaarde van ± 1 mm. Deze bovenste plaat moet vrij kunnen uitlijnen bij contact met het proefstuk, maar mag tijdens de belasting zijn positie ten opzichte van de onderste plaat niet wijzigen.

De machine moet voorzien zijn van drukplaten vervaardigd uit wolfraamcarbide of, als alternatief, uit doorgehard staal met een Vickers-hardheid van minimaal HV 600. Deze platen moeten ten minste 10 mm dik zijn, (40,0 ± 0,1) mm breed en (40,0 ± 0,1) mm lang. De vlakheid van het contactoppervlak met het proefstuk mag, volgens EN ISO 1101, niet meer dan 0,01 mm afwijken. De oppervlakteafwerking, zoals gedefinieerd in EN ISO 1302, mag niet gladder zijn dan N3 en niet ruwer dan N6.

Indien gewenst mogen er twee hulpplaten worden gebruikt, eveneens van wolfraamcarbide of doorgehard staal met een Vickers-hardheid (HV) van minimaal HV 600 en een minimale dikte van 10 mm, op voorwaarde dat ze aan dezelfde eisen voldoen als de hoofdplaten. Er moet een voorziening aanwezig zijn om deze hulpplaten te centreren ten opzichte van de belastingsas, met een nauwkeurigheid van ± 0,5 mm. Daarnaast moet uitlijning van de platen onderling mogelijk zijn met een tolerantie van maximaal ± 0,5 mm.

De testmachine mag uitgerust zijn met meerdere belasting bereiken. Hierbij moet de hoogste waarde van het laagste bereik ongeveer gelijk zijn aan 1/5 van de hoogste waarde van het daaropvolgende bereik. Het toestel moet beschikken over een automatisch regelsysteem voor de belastingssnelheid, evenals over apparatuur voor het registreren van de meetresultaten.

De bolvormige zitting van de machine mag licht gesmeerd worden om een juiste positionering van de drukplaat bij contact met het proefstuk te vergemakkelijken. Echter, dit mag slechts in die mate gebeuren dat geen beweging van de plaat optreedt onder belasting. Smeermiddelen die effectief blijven onder hoge druk zijn hiervoor niet geschikt.

Tot slot verwijzen de termen 'verticaal', 'onderste' en 'bovenste' naar conventionele testmachines die normaal in verticale stand functioneren. Desondanks zijn ook machines toegestaan waarvan de as niet verticaal is uitgelijnd, mits aan alle andere eisen wordt voldaan.



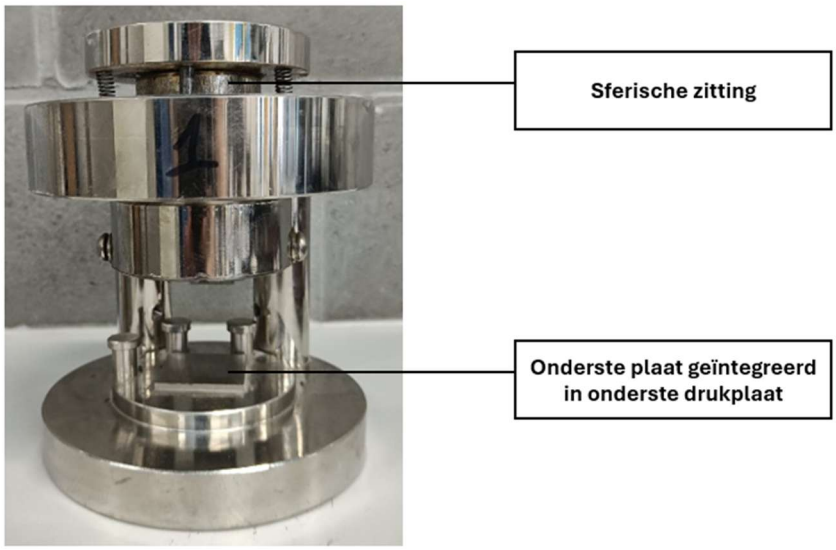


Figuur 3-71: De drukproefmachine

Wanneer het gebruik van een tussenstuk zoals weergegeven in Figuur 3-72 vereist is bij het uitvoeren van drukproeven, wordt deze geplaatst tussen de drukplaten van de machine om de belasting over te brengen op de drukvlakken van het mortelproefstuk. Binnen dit tussenstuk wordt een onderste plaat gebruikt, die eventueel geïntegreerd kan zijn in de onderste drukplaat van de machine.

De bovenste drukplaat ontvangt de belasting van de bovenste drukplaat van de machine via een tussenliggende sferische zitting. Deze zitting maakt deel uit van een samenstelling die verticaal moet kunnen schuiven zonder merkbare wrijving, en waarbij de beweging nauwkeurig wordt geleid. Het is van cruciaal belang dat het tussenstuk schoon wordt gehouden en dat de sferische zitting vrij kan bewegen, zodat de bovenplaat zich aanvankelijk aanpast aan de vorm van het proefstuk en vervolgens tijdens de test gefixeerd blijft.

De sferische zitting mag worden gesmeerd, maar slechts in beperkte mate, zodat er tijdens de belasting geen beweging van de drukplaat kan optreden. Smeermiddelen die effectief zijn onder hoge druk zijn niet geschikt. Het verdient de voorkeur dat de samenstelling zich automatisch terugstelt naar de oorspronkelijke positie nadat het proefstuk is verbrijzeld.



Figuur 3-72: Tussenstuk voor de drukproef

Voor het uitvoeren van de drukproef op AAM-pasta werd gebruikgemaakt van een adapter (tussenstuk). Een praktisch probleem deed zich echter voor: de adapter kon niet voldoende verlaagd worden om rechtstreeks contact te maken met het proefstuk van 20 × 20 × 20 mm³, zoals aangeduid met de gele pijl in Figuur 3-73. Om dit probleem op te lossen, werden twee draagkrachtige metalen platen op maat geslepen om voldoende hoogte te creëren en zo de adapter geschikt te maken voor de proefopstelling.



Figuur 3-73: Optredend probleem tijdens het gebruik van een adapter voor de kubussen 20 x 20 x 20 mm³

De drukproef wordt uitgevoerd op de twee helften van het prisma die zijn overgebleven na de buigsterkteproef. Beide prismadelen worden afzonderlijk getest. Plaats elk prismadeel zodanig op de drukplaten van de machine dat ze lateraal binnen een marge van ±0,5 mm zijn gecentreerd, en longitudinaal zo dat het uiteinde van het prismadeel ongeveer 10 mm uitsteekt voorbij de drukplaten of eventuele hulplaten. Let op dat het gedeelte dat zich aan de bovenkant van de mal bevond tijdens drogen ook hier niet op een van de vlakken komt zoals te zien op het einde van hoofdstuk 3.2.4.5. De belasting wordt geleidelijk verhoogd met een snelheid van (2400 ± 200) N/s gedurende de volledige belasting toepassing tot aan het moment van breuk. Als stopcriterium werd gekozen voor een belastingval van 20 %, wat betekent dat de machine automatisch stopt zodra het proefstuk 20 % van zijn maximale draagkracht heeft verloren.

De druksterkte wordt berekend volgens formule in vergelijking (3-17)

$$\mathrm{R_C} = \frac{F_\mathrm{C}}{\mathrm{A}} \tag{3-17}$$

waarbij $\mathrm{R_C}$: de totale druksterkte [N/mm²];
F_C: de maximale belasting bij drukbreuk [N];
A: de oppervlakte van de drukplaten 40 x 40 mm².

3.2.4.5 Buigsterkte: driepuntsbuigproef (gebaseerd op NBN EN 196-1)

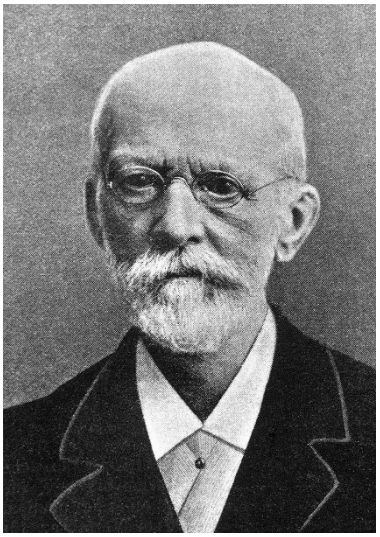
Ontstaan en evolutie

Hoewel de exacte oorsprong van de driepuntsbuigproef moeilijk te traceren is, is het aannemelijk dat deze testmethode zich geleidelijk heeft ontwikkeld met de vooruitgang in de materiaalkunde en civiele techniek. In de 19e eeuw, met de opkomst van de industriële revolutie en de groeiende behoefte aan betrouwbare bouwmaterialen, werden systematische tests zoals de driepuntsbuigproef geïntroduceerd om de prestaties van materialen te evalueren [216].

August Wöhler (1819–1914), een Duitse ingenieur, voerde in de tweede helft van de 19e eeuw experimenten uit met herhaalde belastingen op metalen (zie Figuur 3-74) [219]. Zijn werk leidde tot de ontwikkeling van Wöhler-curves, die de relatie beschrijven tussen de spanning amplitude en het aantal belastingcycli tot falen. Deze bevindingen zijn essentieel voor het begrijpen van het gedrag van materialen onder wisselende belastingen en hebben indirect bijgedragen aan de ontwikkeling van testmethoden zoals de driepuntsbuigproef.

Karl Culmann (1821–1881), een andere Duitse ingenieur, wordt beschouwd als de grondlegger van de grafische statica (zie Figuur 3-75) [220]. Zijn publicatie in 1855 over grafostatische methoden heeft bijgedragen aan het begrip van spanningen en vervormingen in structuren. Hoewel zijn werk niet direct betrekking heeft op de driepuntsbuigproef, heeft het wel bijgedragen aan de theoretische basis die ten grondslag ligt aan moderne testmethoden.

In de loop van de 20e eeuw zijn testmethoden zoals de driepuntsbuigproef verder gestandaardiseerd en verfijnd. Dit heeft geleid tot nauwkeurigere en reproduceerbare resultaten, wat essentieel is voor de moderne materiaalkunde en constructietechniek.



Figuur 3-74: August Wöhler [217]



Figuur 3-75: Karl Culmann [218]

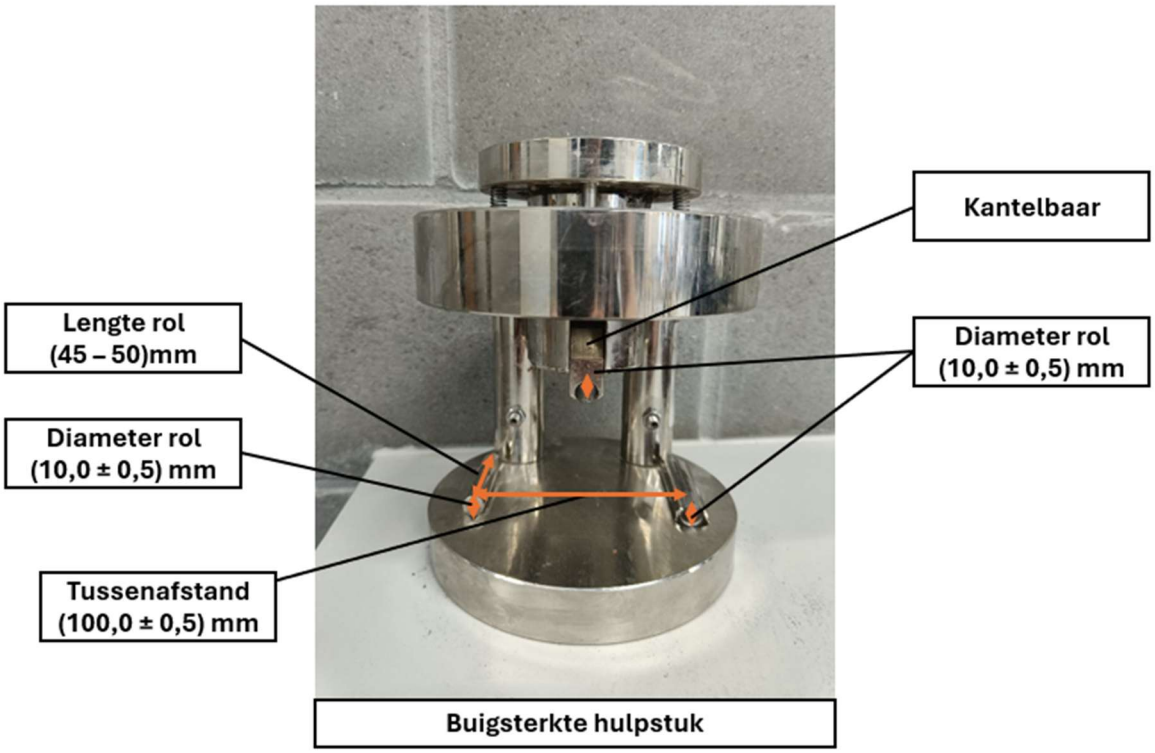
Uitvoering

De uitvoering is gebaseerd op NBN EN 196-1:2016 [57]. Aangezien deze norm oorspronkelijk is ontwikkeld voor testproeven van cement, worden er enkele aanpassingen gedaan om de procedure geschikt te maken voor AAM.

De buigsterkte van het materiaal kan bepaald worden met geschikt hulpstuk in een drukproefmachine. De meetopstelling moet voldoen aan specifieke technische vereisten. Zo moet het toestel in staat zijn om een belasting tot 10 kN toe te passen met een nauwkeurigheid van ±1,0 % van de gemeten belasting, binnen het bovenste vier vijfde van het gebruikte meetbereik. De snelheid van belastingaanbrenging moet liggen tussen (50 ± 10) N/s.

Het buigtoestel moet bestaan uit twee stalen steunrollen met een diameter van (10,0 + 0,5) mm, die op een afstand van (100,0 + 0,5) mm van elkaar zijn geplaatst. Een derde stalen belastingrol met dezelfde diameter wordt centraal tussen de steunrollen gepositioneerd, conform de opstelling weergegeven in Figuur 3-76. De lengte van alle drie de rollen moet tussen 45 mm en 50 mm liggen.

Belangrijk is dat de drie verticale vlakken door de assen van de rollen parallel zijn, evenwijdig blijven tijdens de proef, gelijkmatig verdeeld zijn, en loodrecht staan op de lengterichting van het proefstuk. Om een gelijkmatige belastingverdeling over de breedte van het teststuk te garanderen en torsiespanning te vermijden, moeten minstens één van de steunrollen en de belastingrol licht kunnen kantelen.



Figuur 3-76: Onderdeel voor de buigsterkteproef

De instellingen die worden ingevoerd in de drukproefmachine zoals weergegeven in Figuur 3-77 zijn essentieel voor een correcte uitvoering van de test. Voor meer details over het toestel zelf wordt verwezen naar hoofdstuk 3.2.4.4.

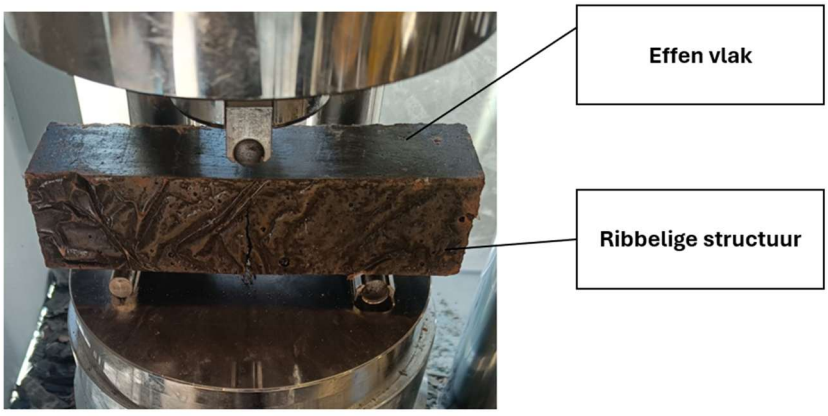
Eerst worden de breedte en hoogte van het proefstuk ingevoerd, gevolgd door de afstand tussen de onderste en bovenste rollen. Aangezien er slechts één bovenste rol is, wordt deze waarde ingesteld op 0 mm. De machine berekent vervolgens automatisch het oppervlak van het proefstuk.

De belastingssnelheid wordt ingesteld op (50 ± 10) N/s, conform de eerder vermelde norm. De startbelasting is ingesteld op 0,1 kN. Als stopcriterium werd gekozen voor een belastingval van 20 %, wat betekent dat de machine automatisch stopt zodra het proefstuk 20 % van zijn maximale draagkracht heeft verloren.



Figuur 3-77: Instellingen voor de drukproefmachine

Het prisma wordt in het toestel geplaatst met één van de zijvlakken op de steunrollen, waarbij de lengterichting loodrecht staat op de steunen. Er moet zorgvuldig op worden toegezien dat niet het bovenste oppervlak van in de mal gedroogde mengsel belast wordt, aangezien dit tijdens het uitharden bedekt was met folie en daardoor een oneffen of geribbelde structuur kan hebben, wat de testresultaten nadelig kan beïnvloeden (zie Figuur 3-78). De belasting wordt vervolgens verticaal aangebracht via de belastingrol op het tegenoverliggende zijvlak van het prisma. Deze belasting wordt geleidelijk opgevoerd tot het proefstuk breekt. Na de breuk blijven de twee helften van het prisma afgedekt met een vochtige doek om het vochtgehalte te behouden totdat ze worden getest op druksterkte.



Figuur 3-78: Opstelling van het proefstuk tijdens de buigproef

De uiteindelijke buigsterkte wordt ten slotte berekend zoals weergegeven in vergelijking (3-18).

$$R_f = \frac{1{,}5 \cdot F_f \cdot l}{(b_1)^3} \tag{3-18}$$

waarbij R_f: de totale buigsterkte [N/mm²];
b_1: is de zijde van de vierkante doorsnede van het prisma [mm];
F_f: is de maximale belasting bij buigbreuk [N];
l: is de afstand tussen de steunpunten [mm].

3.2.4.6 Korrelverdeling: zeefproef (gebaseerd op NBN EN 933-1)

De zeefproef wordt uitgevoerd op te bekijken of het zeezand kan gebruikt worden ter vervanging van het CEN-zand.

Uitvoering

De proefafnames zijn uitgevoerd volgens EN 932-2:1999, waarin de methoden voor het verdelen van laboratoriummonsters van toeslagmaterialen worden beschreven. [57].

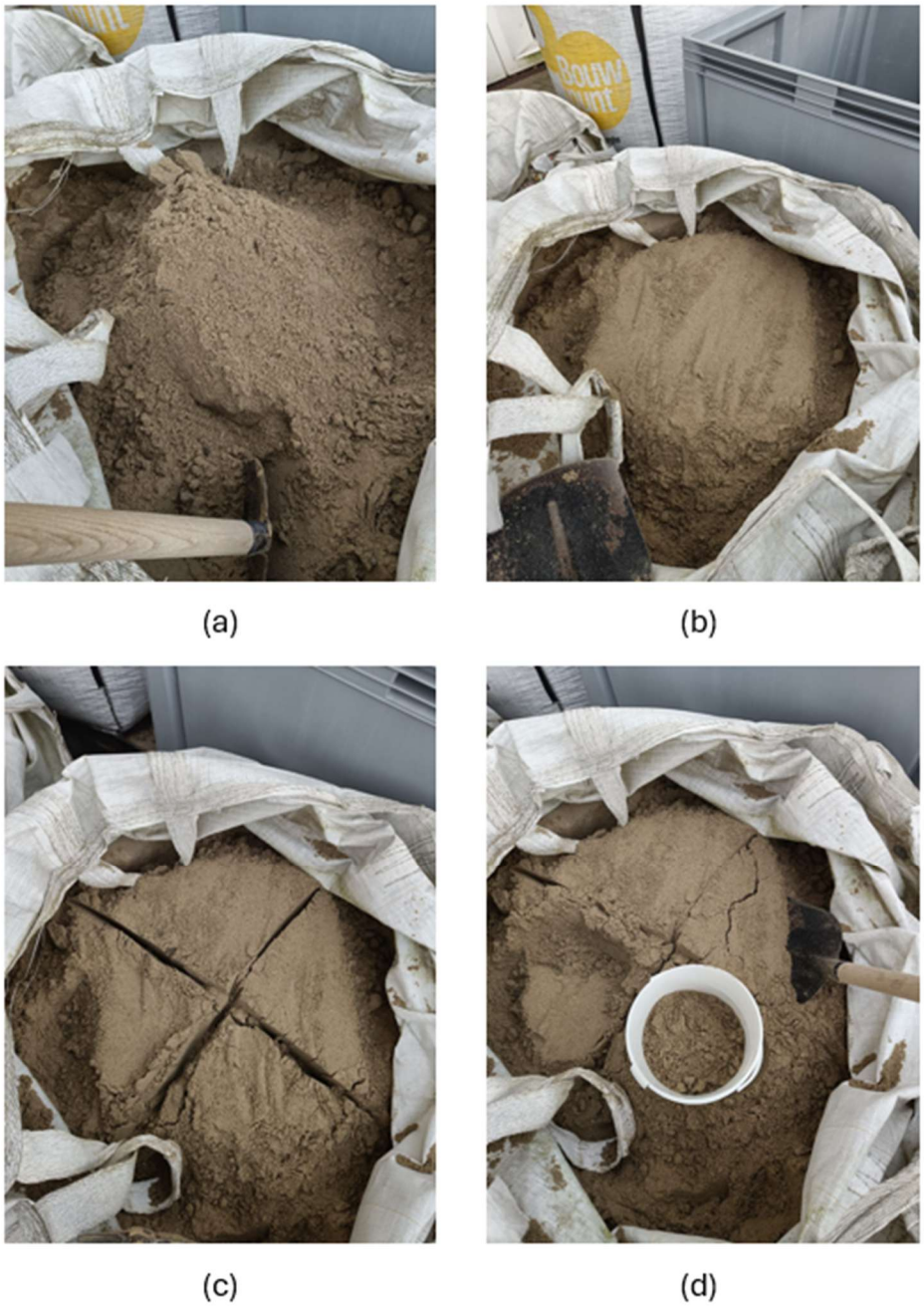
Voor het reduceren van het laboratoriummonster wordt gebruikgemaakt van de kwartiermethode. Het mengsel wordt grondig gemengd door het materiaal op te hopen tot een kegelvorm zoals weergegeven in Figuur 3-79a. Deze kegel wordt met behulp van een schop omgekeerd tot een nieuwe kegel. Deze handeling wordt in totaal drie keer uitgevoerd.

Bij het vormen van elke kegel wordt het materiaal telkens boven op de top van de nieuwe kegel gestort, zodat het aggregaat langs alle zijden gelijkmatig naar beneden stroomt. Op deze manier ontstaat een homogene verdeling van de verschillende korrelgroottes binnen het monster.

Na het vormen van de derde kegel wordt deze afgeplat tot een gelijkmatige, platte hoop door de schop herhaaldelijk verticaal in de top te steken zoals weergegeven in Figuur 3-79b. Vervolgens wordt deze vlakke hoop in vier gelijke delen verdeeld door er twee loodrecht op elkaar staande diagonalen over te trekken zoals weergegeven in Figuur 3-79c.

Twee tegenoverliggende kwarten worden verwijderd en afgevoerd zoals weergegeven in Figuur 3-79d. De twee resterende kwarten worden samengevoegd tot een nieuw monster, dat dient als het representatieve testmonster.

Deze methode garandeert dat het verkregen monster een goede afspiegeling is van het oorspronkelijke laboratoriummonster, dankzij de grondige menging en de willekeurige verkleining van het monster.



Figuur 3-79: Uitvoering kwartiers methode

De zeeftoren en de bijhorende zeven zijn vervaardigd conform de norm NBN EN 933-2.

Zeven met een nominale maaswijdte van 4 mm of groter moeten zijn uitgerust met een geperforeerde plaat met vierkante openingen die voldoet aan de eisen van ISO 3310-2 zoals weergegeven in Figuur 3-80. Voor zeven met een nominale maaswijdte kleiner dan 4 mm moet gebruik worden gemaakt van metaaldraadgaas dat voldoet aan ISO 3310-1 zoals weergegeven in Figuur 3-82.

Testzeven met een geperforeerde metalen plaat en een nominale maaswijdte van 4 mm of meer bieden een betere zeefnauwkeurigheid dan metalen draadgaas met dezelfde nominale opening. Dit komt doordat de fabricagetoleranties bij geperforeerde platen nauwkeuriger zijn.

Om geluidsoverlast tijdens het zeven te beperken, is de zeeftoren opgesteld in een geluidsabsorberende kast, zoals afgebeeld in Figuur 3-81.



Figuur 3-81: Zeeftoren



Figuur 3-80: Zeef volgens ISO 3310-2



Figuur 3-82: Zeef volgens ISO 3310-1

De uitvoering van de zeefproef is gebaseerd op EN 933-1:2012, waarin de methode voor de bepaling van de korrelverdeling van toeslagmaterialen met behulp van zeven wordt beschreven [57].

Voor de uitvoering van de zeefproef op zandfractie 0/4 is een minimale monstermassa van 0,2 kg vereist. Om de betrouwbaarheid van de resultaten te waarborgen en eventuele meetfouten uit te sluiten, wordt de proef tweemaal per grondstof uitgevoerd. Om voldoende materiaal te voorzien voor de proef, werd ongeveer 1 kg zand genomen, wat ruim boven de vereiste hoeveelheid ligt.

Het monster wordt eerst gedroogd in een oven bij een temperatuur van (110 ± 5) °C, totdat een constante massa is bereikt. Dit betekent dat het gewicht bij opeenvolgende wegingen niet langer significant verandert. Na het drogen wordt het monster uit de oven gehaald en afgekoeld tot kamertemperatuur. De massa van het volledig gedroogde en afgekoelde monster wordt aangeduid als M_1.

Het gedroogde monster wordt in de zeeftoren gegoten. Deze toren bestaat uit een reeks op elkaar gemonteerde zeven, die van boven naar beneden zijn gerangschikt in afnemende maaswijdte, met een deksel bovenaan en een opvangpan onderaan.

De zeeftoren wordt vervolgens mechanisch geschud. Daarna worden de zeven één voor één verwijderd, beginnend met de zeef met de grootste maaswijdte. Elke afzonderlijke zeef wordt vervolgens handmatig nageschud, waarbij er ervoor wordt gezorgd dat er geen materiaal verloren gaat, door gebruik te maken van een opvangpan en deksel.

De effectiviteit van het mechanisch zeven wordt beïnvloed door verschillende factoren, zoals het type aggregaat, de zeefduur, de hoeveelheid materiaal op elke zeef, en de instellingen van het schudmechanisme (zoals amplitude en frequentie). Het is daarom van belang dat de mechanische zeefduur zorgvuldig wordt gekozen.

Bij het wisselen van zeef moet al het doorgelaten materiaal volledig op de volgende zeef in de kolom worden overgebracht voordat met het zeven op die zeef wordt doorgegaan.

De zeefbewerking wordt als voltooid beschouwd wanneer verdere zeven gedurende 1 minuut niet leidt tot een massatoename van het achtergebleven materiaal op een zeef van meer dan 1,0 % van de massa.

Noteer de verschillende massa's op een proefgegevensformulier. Bereken voor elke zeef de achtergehouden massa als percentage van de oorspronkelijke droge massa M_1. Vervolgens wordt het cumulatieve percentage van de oorspronkelijke droge massa berekend dat door elke zeef is gepasseerd, met uitzondering van de zeef van 0,063 mm. Het fijnmateriaal percentage (f) dat door de 0,063 mm zeef gaat, wordt berekend volgens de vergelijking weergegeven in vergelijking (3-19).

$$f = \frac{100 \cdot P}{M_1} \tag{3-19}$$

waarbij M_1: de droge test massa [g];
P: massa in opvangpan na zeving [g].

De korrelverdeling moet voldoen aan de percentages zoals weergegeven in Tabel 2-4 volgens NBN EN 196-1: 2016.

3.2.4.7 Schijnbare dichtheid (gebaseerd op EN 1015-6)

De bepaling was nodig om het vezelgehalte te kunnen berekenen. Hiervoor werd de proef uitgevoerd volgens EN 1015-6:1998, waarin de schijnbare dichtheid van verse mortel wordt beschreven [57].

Er wordt gebruik gemaakt van een meetvat bestaande uit een cilindrische kom met een inwendige diameter van circa 125 mm, vervaardigd uit metaal dat bestand is tegen corrosie door mortel en dat voldoende dimensionale stabiliteit biedt zoals weergegeven in Figuur 3-83.

De inhoud van het meetvat bedraagt ongeveer 1 liter en wordt bepaald met een nauwkeurigheid van 0,1 %. De massa van het lege meetvat (m_1) wordt vastgesteld met een nauwkeurigheid van 1 gram.



Figuur 3-83: Meetvat voor de schijnbare dichtheid

Er dienen minstens twee metingen uitgevoerd te worden om de reproduceerbaarheid van de resultaten te waarborgen. In dit geval werd echter een fout gemaakt: in plaats van de correcte vloeibaarheidswaarde van de standaard slump flow te gebruiken, werd de mini-slump vloeibaarheidswaarde toegepast. Hierdoor is met onzekerheid volgende methode aangenomen: dat bij een uitvloei groter dan 200 mm de methode volgens normgedeelte 7.2.3 van toepassing is.

Voor de bepaling van de volumieke massa van de mortel wordt het meetvat op de volgende wijze gevuld: Met behulp van een schep wordt de mortel aangebracht in het vat, waarbij erop gelet wordt dat deze vanuit het midden naar de randen toe vloeit. Het vat wordt gevuld totdat de mortel boven de rand uitkomt. Vervolgens wordt het overtollige materiaal afgeschraapt met een plamuurmes, zodat het morteloppervlak vlak is en exact gelijk ligt met de bovenrand van het vat. De rand van het vat wordt vervolgens gereinigd met een vochtige doek. Tot slot wordt de totale massa (m_2) van het met mortel gevulde vat bepaald, met een nauwkeurigheid van 1 gram

4 ONDERZOEKSRESULTATEN EN ANALYSE

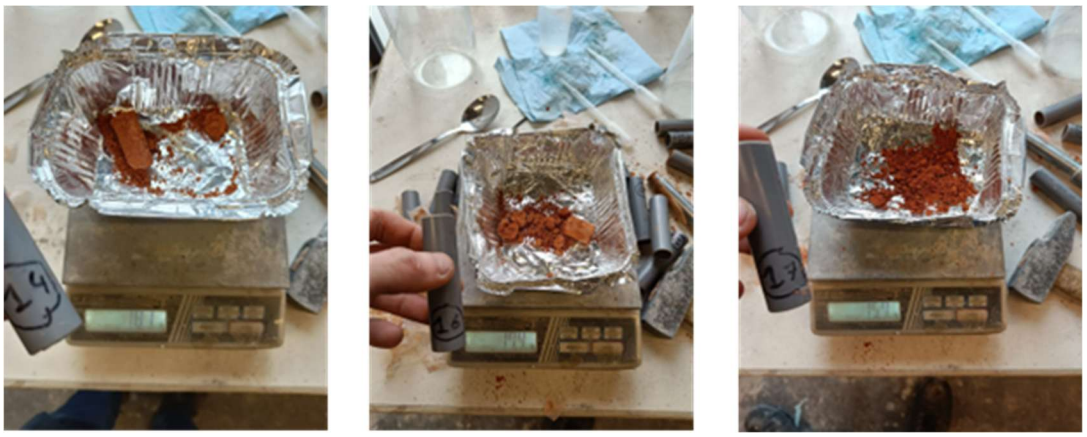
4.1 Waterabsorptie poeder

De resultaten gaven aan dat de waterabsorptie van RBP varieerde tussen 16,5 % en 19 % zoals weergegeven in Tabel 4-1.

Tabel 4-1: Vriesmethode RBP watergehaltes

Nr.	Massa leeg bakje [g]	Massa leeg bakje + nat monster [g]	Massa leeg bakje + droog monster [g]	Watergehalte [%]	Massa leeg bakje + luchtdroog monster [g]
1	6,4	33,4	25,7	39,90	25,7
2	6,1	34	26,1	39,50	26,3
3	5,2	33,8	26	37,50	26,1
4	5,3	33,5	26,2	34,93	26,3
5	6,4	35,4	27,6	36,79	27,7
6	5,3	31,2	24,5	34,90	24,7
7	5,3	28,8	23,2	31,28	23,2
8	5,3	25,9	20,9	32,05	21,21
9	6,3	23,6	19,6	30,08	19,6
10	6,2	24,8	20,5	30,07	20,6
11	5,3	19,4	16,7	23,68	16,7
12	5,4	20,8	17,9	23,20	17,8
13	6,8	20,9	18,3	22,61	18,2
14	5,1	18,1	16	19,27	16
15	5,7	16,5	15,3	12,50	15,3
16	5,2	17,4	15,6	17,31	15,7
17	5,8	16,4	14,9	16,48	15
18	6,2	18,8	17,9	7,69	17,9
19	6,6	18,5	17,5	9,17	17,5
20	5,5	20,6	20,5	0,67	20,5

De geselecteerde waarden zijn gekozen als uiterste grenzen omdat deze het duidelijkst konden worden vastgesteld aan de hand van de beschikbare foto's. De SSD-toestand werd bereikt op het moment dat het mengsel visueel niet langer aan elkaar kleefde als gevolg van het bevroren water dat vrijkomt bij verzadiging. Op basis van observatie kan met redelijke zekerheid worden gesteld dat deze toestand zich bevindt tussen de waarden van proefnummer 14 en 17, zoals weergegeven in Figuur 4-1.

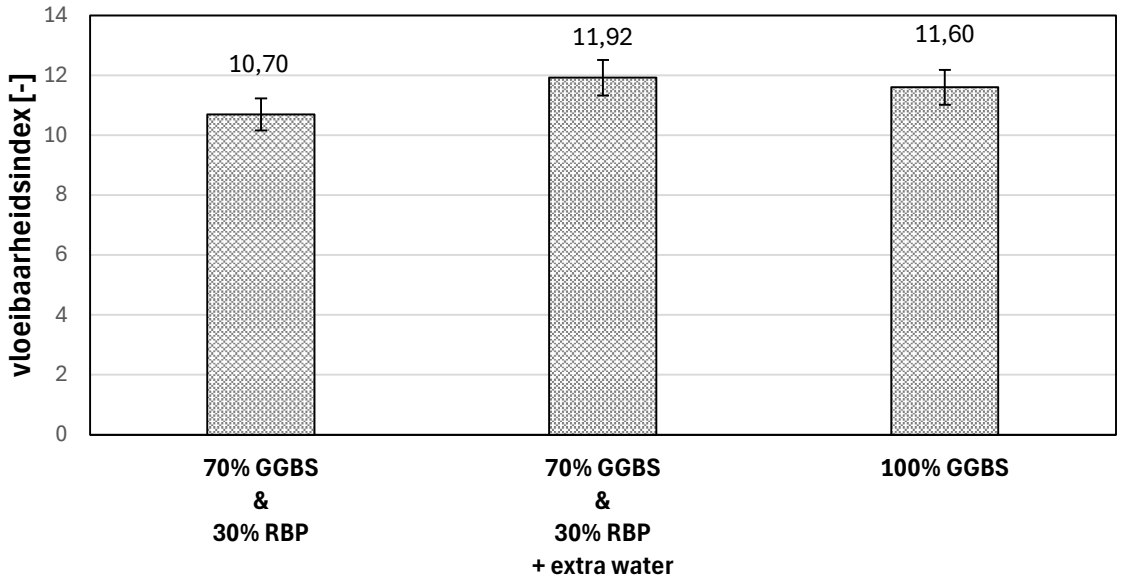


Figuur 4-1: Weging van testafname 14, 16 en 17 tijdens de vriesmethode

Om de invloed van waterabsorptie op de verwerkbaarheid van het mengsel beter te begrijpen, werden drie verschillende proefmengsels getest. De eerste proef bestond uit 100 % GGBS, het mengsel uit 70 % GGBS en 30 % RBP, en de derde proef werd uitgevoerd met de ingerekende waterabsorptiepercentage van 17 % in het RBP-mengsel , waarbij extra water werd toegevoegd om het waterabsorptiepercentage te bevestigen.

Tijdens de mini slump test werd de consistentie van elk mengsel geëvalueerd. De testresultaten (zoals weergegeven in Figuur 4-2) lieten zien dat hogere waterabsorptie resulteerde in een duidelijke afname van de vloei-eigenschappen door de toevoeging van 30 % RBP.

Door extra water toe te voegen aan het mengsel met 30 % RBP, werd geprobeerd de verwerkbaarheid te herstellen. Het is duidelijk te stellen uit deze resultaten dat we waterabsorptie van RBP tussen de 16.5 % en 17 % ligt wat een goede eerste indicatie geeft voor verdere onderzoeken. In dit onderzoek werd echter geen rekening gehouden met de verschillende waterabsorptie omdat er nog geen methode beschikbaar was om deze vast te stellen.



Figuur 4-2: Invloed van waterabsorptie RBP: vloeibaarheidsindex

4.2 Kleur en uitbloei

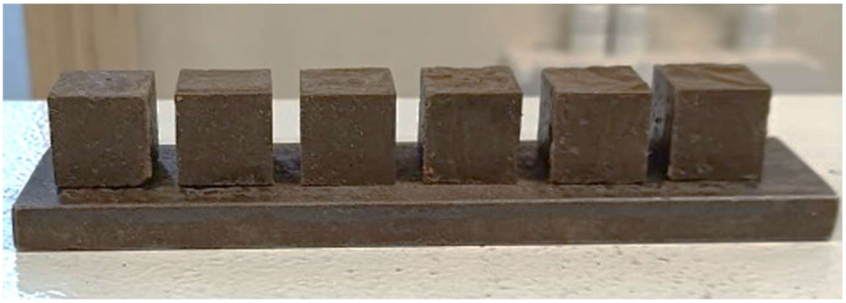
4.2.1 Kleurverandering mengsel

De mallen werden telkens ontkist na 20 tot 24 uur. Bij een hoog percentage aan RBP vertoonden AAM blokjes een intens rode kleur, wat te wijten is aan de aanwezigheid van Fe_2O_3 in het baksteenpoeder (zie Figuur 4-3 en Figuur 4-5). Wanneer het aandeel RCP in het mengsel verhoogd werd, veranderde de kleur naar een grijzere tint, veroorzaakt door het hogere Ca-gehalte en de kalkrijke aard (zie Figuur 4-4 en Figuur 4-6).

Opvallend was het gedrag van Mengsel 16, dat bestond uit 60 % GGBS en 40 % RBP. Na 1 dag uitharden vertoonde dit mengsel nog steeds een uniforme rode kleur, wat kenmerkend is voor baksteenpoeder. Echter, na 7 dagen uitharding onder plastic folie in de klimaatruimte, veranderde de kleur van het mengsel opvallend naar zwart. Om het antwoord op deze vraag te begrijpen, moet eerst worden gekeken waarom RBP in eerste instantie een rode kleur heeft en waarom deze kleur daarna verandert.



Figuur 4-3: Uitzicht na 1 dag



Figuur 4-4: Uitzicht na 7 dagen

In klei komt ijzer meestal voor als ijzer(III)ionen (Fe^{3+}), vooral ingebouwd in de structuur van kleimineralen zoals goethiet (FeOOH) [221]. Dit ijzer in de vorm van goethiet speelt een cruciale rol in de kleurverandering van klei tijdens het bakproces. Wanneer klei wordt verhit, ondergaat goethiet een dehydratatiereactie bij temperaturen van ongeveer 250 – 300 °C, waarbij het H_2O vrijkomt en ijzer(III)oxide (Fe_2O_3), oftewel hematiet, wordt gevormd zoals weergegeven in vergelijking (4-1) [222].

$$2\,\mathrm{FeOOH} \rightarrow \mathrm{Fe_2O_3} + \mathrm{H_2O} \qquad (4\text{-}1)$$

Het proces houdt in dat de FeOOH, dat oorspronkelijk als een ijzer-oxyhydroxide aanwezig is, bij verhitting zijn watermoleculen verliest en omgezet wordt in Fe_2O_3, wat een intens rode kleur heeft.

In het geval van het AAM-mengsel gebeurt er een andere reactie die de kleur van het mengsel verandert. Dit mengsel bevindt zich in een sterk basische omgeving, waarin ijzer(III)-oxiden, zoals Fe_2O_3, kunnen reageren. De H_2 die in de reactie wordt gevormd, is een product van de reductie van H_2O in de basische omgeving zoals weergegeven in vergelijking (4-2) [223].

$$2\,H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2\,OH^- \tag{4-2}$$

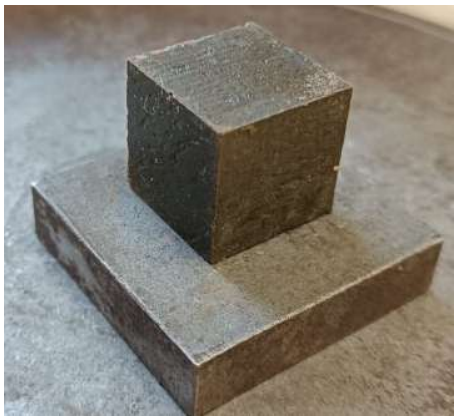
Wanneer er voldoende waterstofgas beschikbaar is kan het reageren met Fe_2O_3 en leiden tot de vorming van Fe_3O_4 (magnetiet), een zwarte ijzeroxide zoals weergegeven in vergelijking (4-3).

$$3\,Fe_2O_3 + H_2 \rightarrow 2\,Fe_3O_4 + H_2O \tag{4-3}$$

De reductie van Fe_2O_3 tot Fe_3O_4 draagt bij aan de kleurverandering van het mengsel, waarbij de oorspronkelijke rode kleur (van Fe_2O_3) wordt vervangen door een donkere, zwarte kleur (van Fe_3O_4) [224]



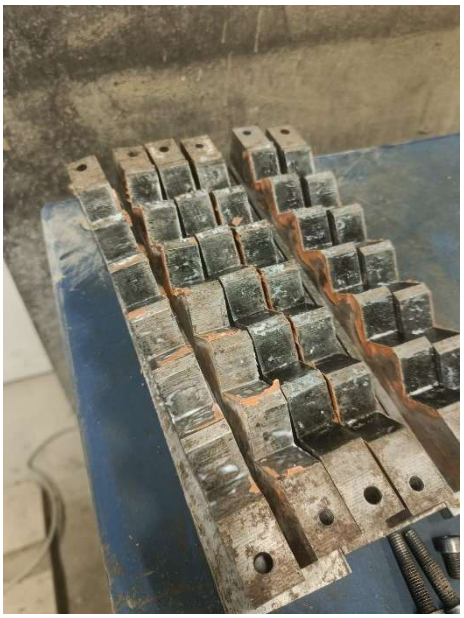
Figuur 4-5: Uitzicht na 1 dag in detailfoto



Figuur 4-6: Uitzicht na 7 dagen in detailfoto

4.2.2 Kleurverandering mallen

Het was duidelijk dat er een groene/zwarte kleur achterbleef na het ontkisten, zoals weergegeven in Figuur 4-7. Deze kleur werd niet veroorzaakt door een reactie van de ontkistingsolie met de ijzeren mallen, aangezien alle delen op de foto waren ingesmeerd. De grijze zones, waar geen mengsel was aangebracht, vertoonden echter geen verkleuring. Ook werd deze verkleuring gevormd op hard kunststof kisten.



Figuur 4-7: Groene of zwarte kleuraanslag op mallen

Wanneer natronwaterglas in geopolymeren in contact komt met ijzeren mallen, kan er een chemische reactie optreden die leidt tot een groen-zwarte verkleuring van het ijzeroppervlak [225]. Natronwaterglas is een sterk basisch materiaal dat Na_2O en SiO_2 bevat. In een basische omgeving, vooral wanneer water aanwezig is, kan natronwaterglas reageren met het ijzer in de mallen weergegeven in (4-4). Deze reactie veroorzaakt de vorming van $Fe(OH)_2$ en ijzer-silicaatcomplexen, wat resulteert in de karakteristieke groene of zwarte kleur.

$$Fe + Na_2SiO_3 + O_2 + H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + FeNa_2SiO_3 \quad (4\text{-}4)$$

Deze reactie leidt tot de vorming van ijzer(II)hydroxide en ijzer-silicaatcomplexen, die verantwoordelijk zijn voor de verkleuring van het oppervlak. Dit proces lijkt op het chemische tuin-fenomeen, waarbij metaalzouten in contact komen met een silicaatoplossing, wat de groei van kleurrijke structuren veroorzaakt. Dit kan verklaren waarom de verkleuring niet alleen op ijzeren mallen maar ook op kunststof oppervlakken verschijnt.

4.2.3 Uitbloei

Uitbloei is een veelvoorkomend probleem bij AAM, vooral wanneer deze gebaseerd zijn op RCP [226]. RCP bevat doorgaans relatief weinig reactieve Al- en Si-componenten (zoals weergegeven in Bijlage C) , die essentieel zijn voor de vorming van een stabiel gelnetwerk. Hierdoor blijven grotere hoeveelheden vrije alkaliën, zoals NaOH, ongebonden in het systeem. Dit verhoogt de kans op uitbloei, aangezien de vrije alkaliën kunnen uitlogen naar het oppervlak. In tegenstelling tot klassieke geopolymeren, waarin vrije alkaliën grotendeels worden gebonden in het aluminosilicaatnetwerk, blijven in AAM vaak aanzienlijke hoeveelheden vrije alkaliën aanwezig, zoals besproken in hoofdstuk 2.1.2.4. Dit verhoogt de kans op uitbloei aanzienlijk.

In het onderzochte mengsel van puur RCP met een alkalische activator werd uitbloei waargenomen, veroorzaakt door een combinatie van een overschot aan vrije alkaliën (24,5 mol %) en een hoge capillaire wateropname. Deze factoren vergemakkelijken de migratie van de vrije alkaliën via poriën en microbarsten naar het oppervlak. Daar reageren ze met CO_2 uit de lucht en H_2O, wat resulteert in de vorming van Na_2CO_3 zoals weergegeven in (4-5). Deze zoutkristallen slaan neer als witte uitbloei aan het oppervlak.

$$2\ NaOH + CO_2 + H_2O \rightarrow Na_2CO_3 + 2\ H_2O \qquad (4\text{-}5)$$

Deze uitbloei (oftewel natriumzout) is niet alleen visueel storend zoals weergegeven in Figuur 4-8, maar kan ook leiden tot micro structurele schade, verlies van sterkte en in sommige gevallen scheurvorming door de druk die kristallisatie van de zoutkristallen uitoefent op de matrix.



Figuur 4-8: Weergave van de uitbloei

Naast de materiaalsamenstelling speelt ook het mengproces een cruciale rol bij het ontstaan van uitbloei. Wanneer NaOH, water en Na_2SiO_3 gelijktijdig met het bindmiddel worden toegevoegd, ontstaat er geen homogeen en goed gereageerd activatiesysteem. Dit zorgt ervoor dat er meer vrije alkaliën in het mengsel achterblijven. Door de activator echter 24 uur vooraf te mengen en te laten afkoelen, kunnen de chemische reacties volledi ger verlopen, wat de hoeveelheid vrije alkaliën verlaagt en de kans op uitbloei aanzienlijk vermindert.

Een effectieve manier om uitbloei verder te beperken, is de toevoeging van secundaire bindmiddelen zoals MK of GGBS. Bij toevoeging van 20 % MK daalt het gehalte aan vrije alkaliën aanzienlijk tot 10,2 mol %, door de vorming van N-A-S-H-gels, ondanks een lichte toename in porositeit. GGBS verlaagt op zijn beurt de porositeit en wateropname door de vorming van C-A-S-H gels, maar reduceert het alkali-gehalte slechts beperkt tot 19,9 mol %. Bovendien bestaat bij het gebruik van GGBS het risico op interne kristalvorming en scheurvorming, waardoor MK als de meest geschikte toevoeging wordt beschouwd om uitbloei in RCP-gebaseerde AAM effectief tegen te gaan, zeker wanneer het mengproces correct en voorafgaand wordt uitgevoerd.

4.3 Pasta

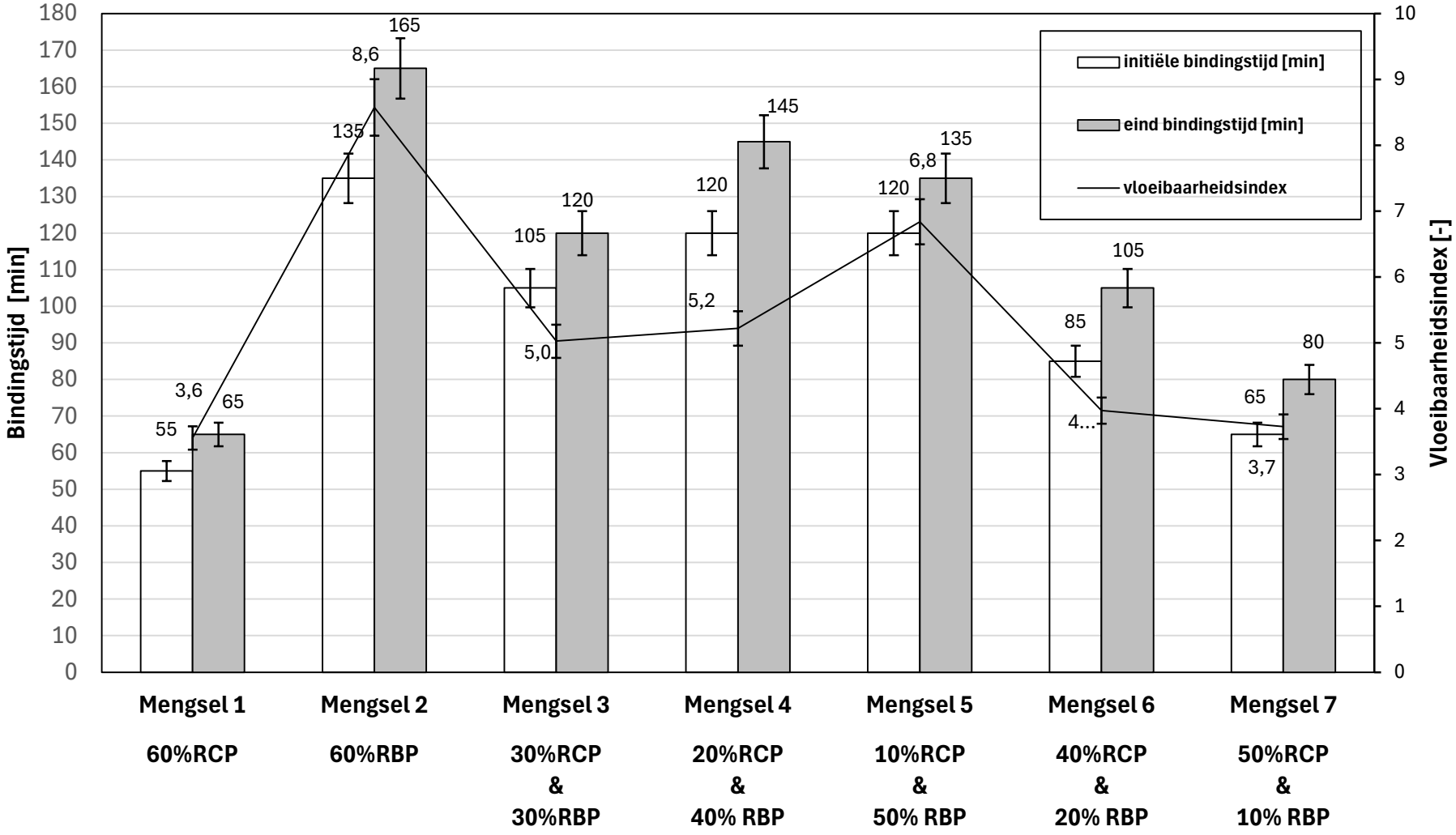
Dit deel beschrijft de eerste fase van het onderzoek, waarin gezocht werd naar een optimale verhouding tussen GGBS, RBP en RCP om een AAM-pasta te vormen. In totaal werden 31 mengsels opgesteld, zoals weergegeven in Bijlage H. De gehaltes aan GGBS varieerden tussen uiterste waarden van 40 % en 70 %; buiten deze grenzen bleek er geen meerwaarde te zijn. Daarnaast werden ook mengsels samengesteld met 100 % van elke afzonderlijke grondstof, om zo de uiterste materiaaleigenschappen te kunnen bepalen. Merk op dat deze mengsels zijn samengesteld tijdens de beginfase van het onderzoek, waarbij een foutieve methode werd gebruikt voor de bepaling van de hoeveelheden NaOH, Al_2O_3 en H_2O. Toevallig werd natronwaterglas gebruikt met dezelfde chemische samenstelling, waardoor grote afwijkingen werden vermeden. Daarnaast werd een foutieve mengprocedure toegepast, waarbij NaOH en Al_2O_3 op het moment van 'zero time' direct aan elkaar werden toegevoegd. Dit leidde tot een minder stabiele structuur, wat de resultaten negatief beïnvloedde. De proeven werden uitgevoerd op kleine kubussen 20 × 20 × 20 mm³, wat eveneens resulteerde in matig betrouwbare resultaten. Daarom kunnen deze resultaten niet als definitief of representatief worden beschouwd. Om het verdere verloop van het onderzoek niet te hinderen, werd echter besloten om mengsel 16, dat de beste prestaties vertoonde, als uitgangspunt voor het vervolgonderzoek te gebruiken. De vloeibaarheidsindex (D) wordt bepaald volgens de formule weergegeven in vergelijking (4-6) [227]. De vloeibaarheid wordt weergegeven via deze formule om een duidelijker beeld te geven.

$$D = \frac{(d_1 \cdot d_2) - {d_0}^2}{{d_0}^2} \tag{4-6}$$

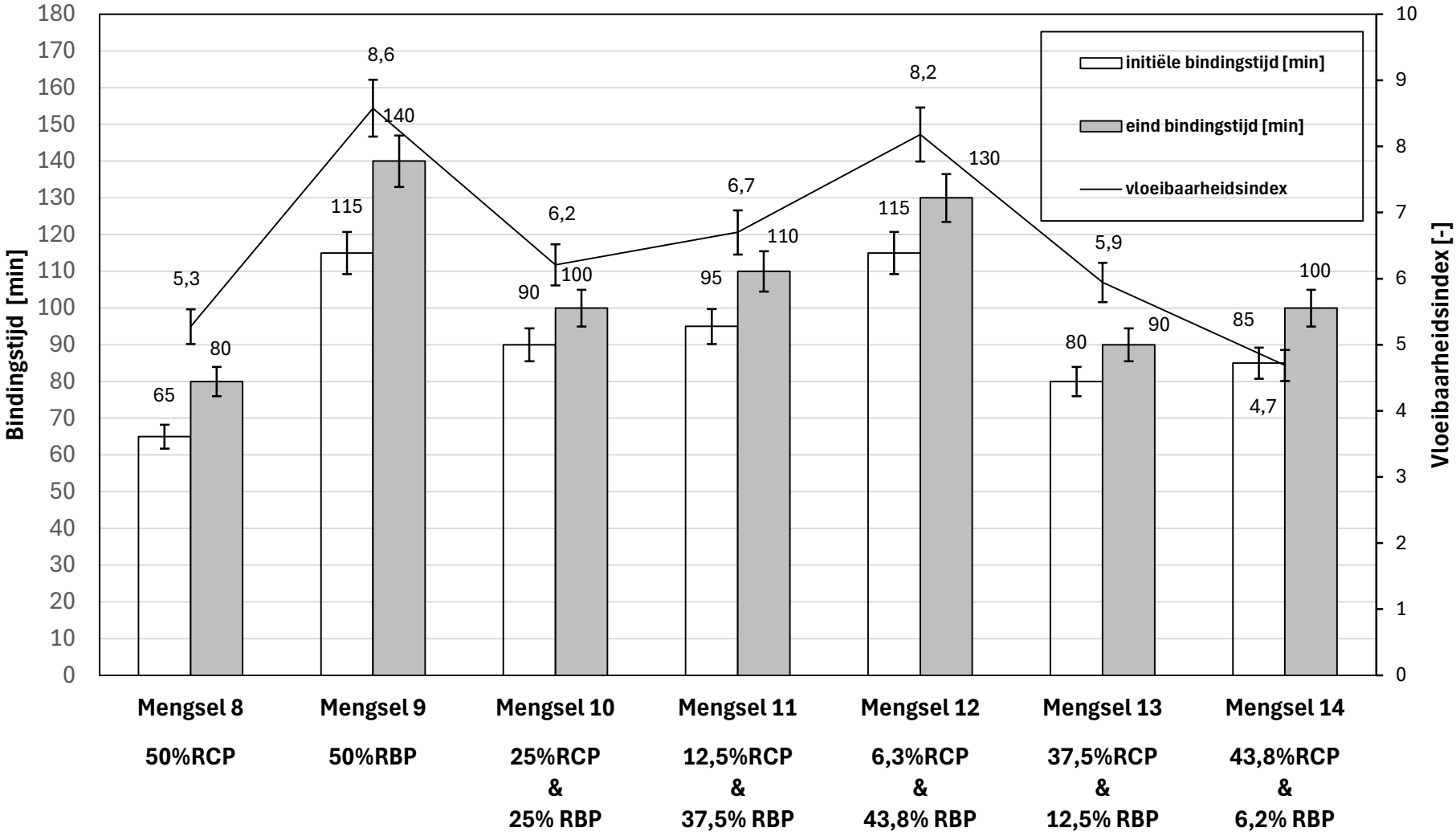
waarbij d_1: de maximale gemeten diameter [mm]
d_2: de diameter haaks op d_1 [mm]
d_0: de diameter van de mini slump kegel die gelijk is aan 100mm.

4.3.1 Verse eigenschappen

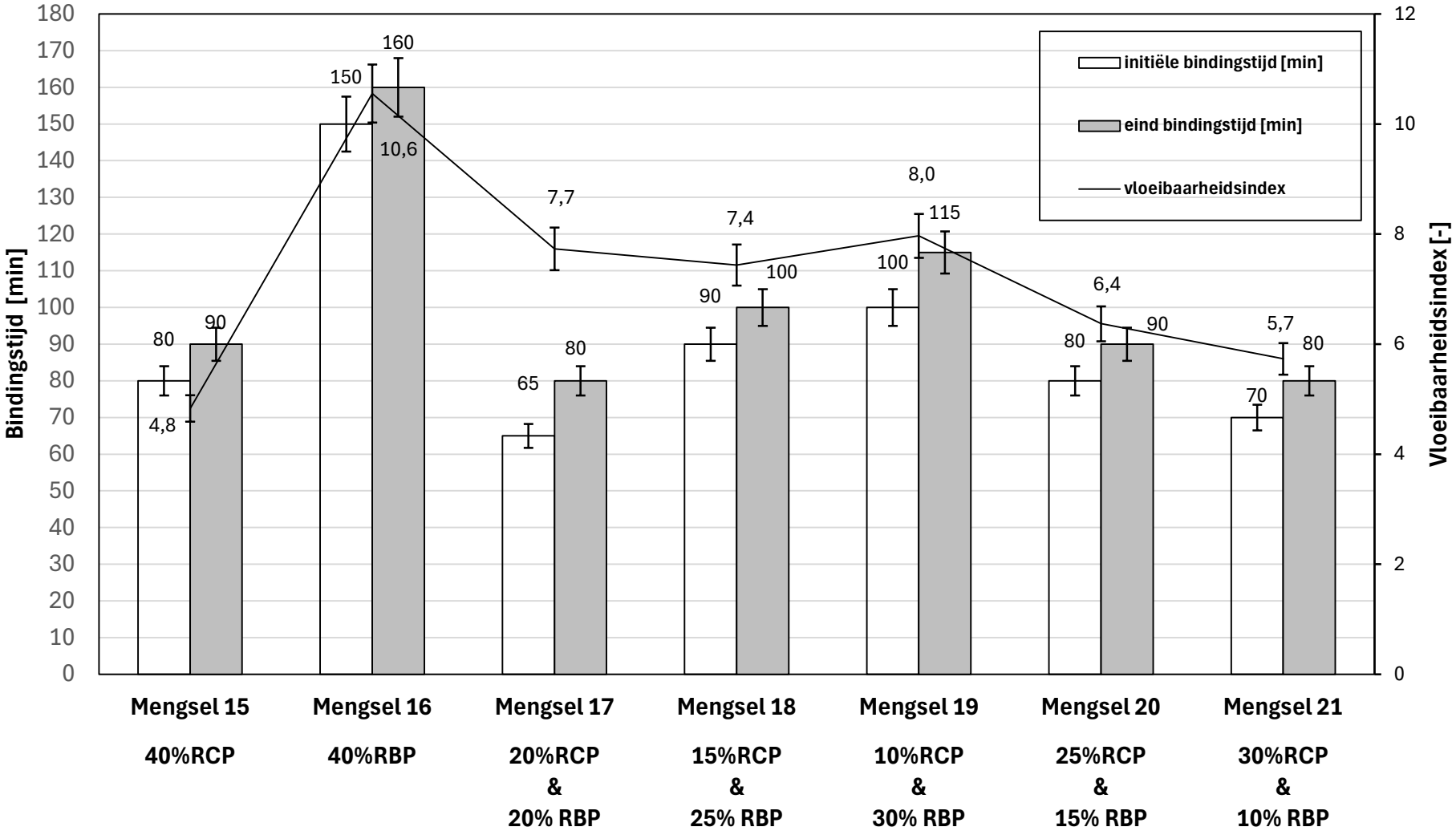
De resultaten van de pasta's worden hieronder weergegeven op pagina 117 tot 121 en in Bijlage I. In deze beginfase van het onderzoek werd een ontkistingsolie gebruikt die bedoeld is voor cementbeton, en dus niet de meest geschikte olie voor deze toepassing. Ook speelde de temperatuur een belangrijke rol: de Vicat-test werd uitgevoerd nabij een raam, waardoor de temperatuur sterk kon schommelen. Bovendien werden bij enkele metingen twee verschillende mallen gebruikt om het werktempo te verhogen. Alsook werd er geen gebruik gemaakt van een watermal. Hierdoor kunnen de resultaten niet als volledig betrouwbaar worden beschouwd, maar ze bieden wel een eerste indicatie voor de keuze van het optimale mengsel waarmee verder gewerkt zal worden binnen het onderzoek.



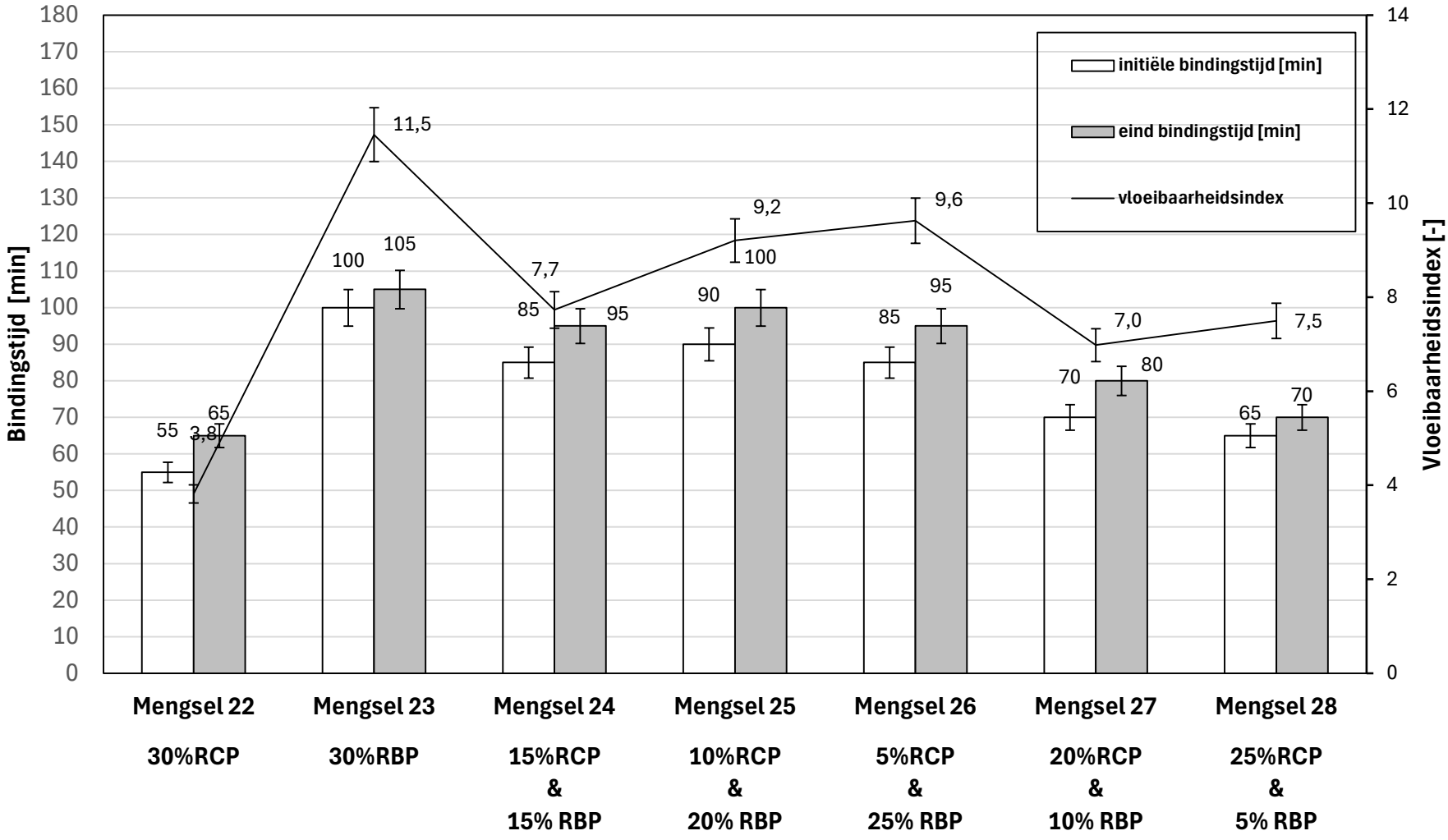
Figuur 4-9: Bindingstijden en vloeibaarheidsindexen van de AAM-pasta's met 40 % GGBS



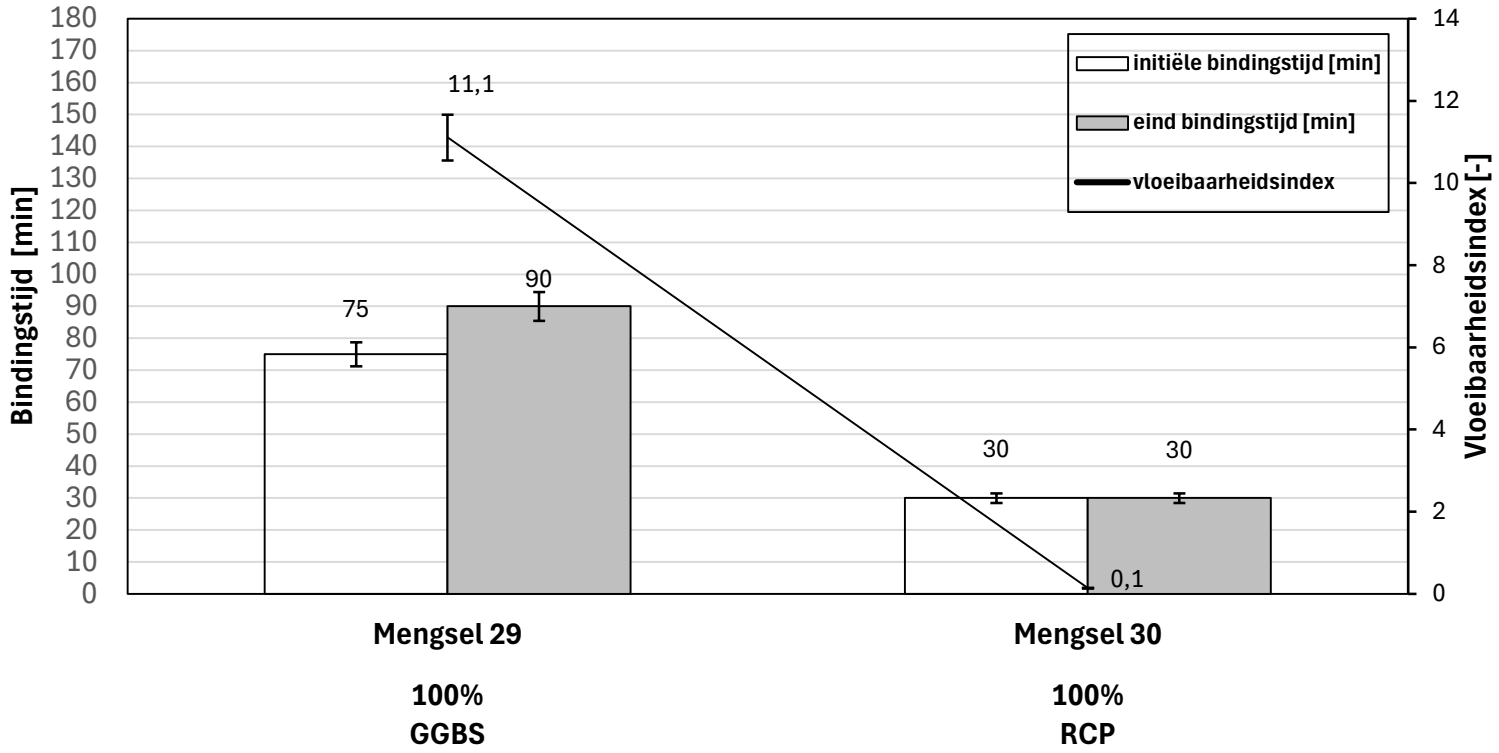
Figuur 4-10: Bindingstijden en vloeibaarheidsindex van de AAM-pasta's met 50 % GGBS



Figuur 4-11: Bindingstijden en vloeibaarheidsindexen van de AAM-pasta's met 60 % GGBS



Figuur 4-12: Bindingstijden en vloeibaarheidsindexen van de AAM-pasta's met 70 % GGBS



Figuur 4-13: Bindingstijden en vloeibaarheidsindexen van de AAM-pasta's met 100 % GGBS

Geen Resultaten voor 100 % RBP Mengsel

Voor het mengsel met 100 % RBP werden geen resultaten verkregen. De gemeten bindingstijd bereikte 345 minuten, maar op dat moment was de binding nog steeds niet gestart. De test werd daarom stopgezet, omdat het proces te lang duurde om verder te volgen. Deze trage reactie kan verklaard worden door de lage amorfiteit en het tekort aan reactieve stoffen in het RBP, zoals beschreven in hoofdstuk 2.3.5.1 en in Bijlage C.

De bindingstijden van baksteenpoeder kunnen als nietig worden verklaard. Deze test werd na 5 uur en 45min gestopt door het nog steeds niet zetten van het mengsel. Na 3 dagen begon het mengsel echter te zetten. Ook is duidelijk dat door gebruik van RCP het mengsel minder zal kunnen vloeien.

Bindingstijd van 100 % GGBS

GGBS heeft een relatief snelle bindingstijd. Dit komt door de hoge reactiviteit en amorfiteit van het materiaal, wat de reactie versnelt.

Vloeibaarheid en bindingstijd van 100 % RCP

Figuur 4-13 toont aan dat RCP een duidelijk lagere vloeibaarheidsindex heeft en een snellere bindingstijd vertoont. Eerder onderzoek heeft echter aangetoond dat de bindingstijd juist langzaam zou moeten zijn. Dit roept de vraag op wat aan de basis kan liggen van deze verschillen.

Vergelijking met Voortgaand Onderzoek

In voortgaand onderzoek werd een initiële bindingstijd van 105 minuten en een vloeibaarheidsindex van 2,24 gemeten voor 100 % RCP. In huidig onderzoek werd echter een initiële bindingstijd van 30 minuten en een vloeibaarheidsindex van 0,1 bereikt, zoals te zien in Figuur 4-13. Om de oorzaak van deze afwijking te achterhalen, worden enkele belangrijke parameters vergeleken.

In het voortgaande onderzoek werden de volgende waarden gebruikt [228]: L/S verhouding: 0,34; Modulus (M): 3,3 en een w/b verhouding: 0,27.

In dit onderzoek zijn de volgende waarden berekend:

L/S verhouding:

$$\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{S}} = \frac{\mathrm{m}\,(\mathrm{Na^2SiO^3}) + \mathrm{m}\,(\mathrm{NaOH})}{\mathrm{m}\,(\mathrm{RCP})} = \frac{(164{,}7\ \mathrm{g} + 24{,}5\ \mathrm{g})}{400\ \mathrm{g}} = 0{,}473 \tag{4-7}$$

Modulus (M):

$$\mathrm{M} = \frac{\text{aantal mol } \mathrm{SiO_2}}{\text{aantal mol } \mathrm{Na_2O}} \tag{4-8}$$

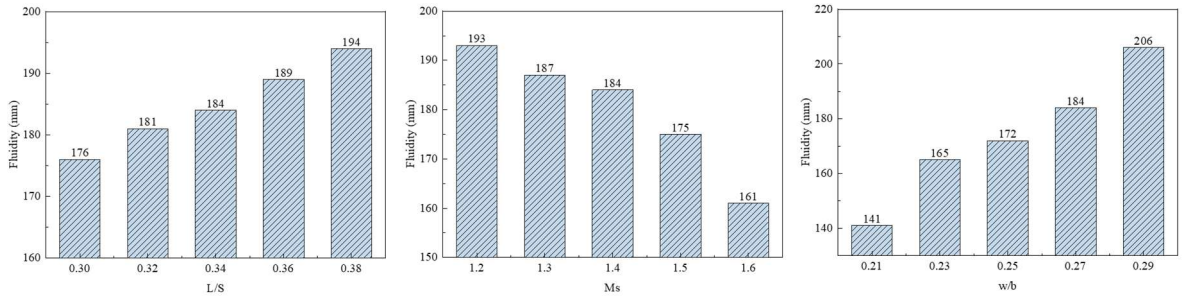
$$\text{Aantal mol } \mathrm{SiO_2}(\mathrm{n\ SiO_2}) = \frac{\text{massa fractie van } \mathrm{SiO_2}}{\text{massa fractie van } \mathrm{SiO_2}} = \frac{42{,}667\ \mathrm{g}}{60{,}084\ \mathrm{g/mol}} = 0{,}71012\ \mathrm{mol} \tag{4-9}$$

$$\text{Aantal mol } \mathrm{Na_2O}(\mathrm{n\ Na_2O}) = \frac{\text{massa fractie van } \mathrm{Na_2O}}{\text{molaire massa van } \mathrm{Na_2O}} = \frac{31{,}96\ \mathrm{g}}{61{,}979\ \mathrm{g/mol}} = 0{,}5157\ \mathrm{mol} \tag{4-10}$$

$$\mathrm{M} = \frac{0{,}71012\ \mathrm{mol}}{0{,}5157\ \mathrm{mol}} = 1{,}377 \tag{4-11}$$

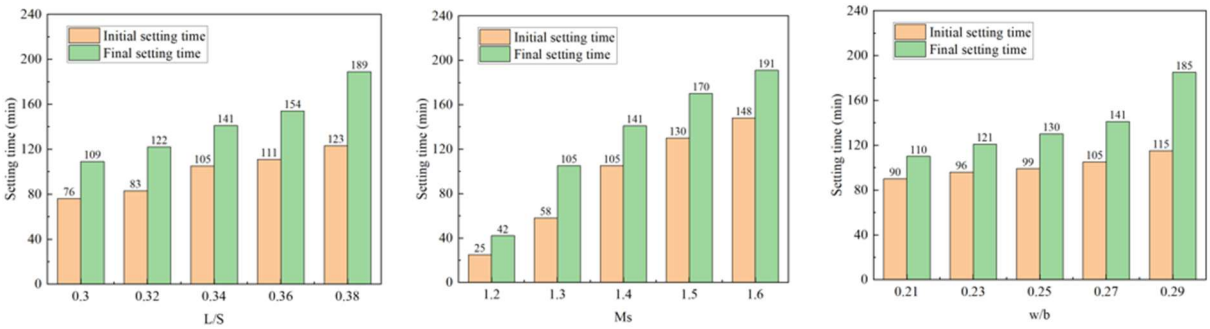
w/b = 0,4

Volgens de resultaten uit het voortgaande onderzoek zouden deze waarden in dit onderzoek een betere vloeibaarheid moeten veroorzaken zoals weergegeven in Figuur 4-14. Dit was echter niet het geval, wat de vraag oproept waarom deze afwijking zich heeft voorgedaan.



Figuur 4-14: Resultaten voor de vloeibaarheid van GGBS en RCP gebaseerd AAM, (a) L/s , (b) Ms, (c) w/b [228]

Alsook tonen de resultaten uit het voortgaande onderzoek dat de waarden in dit onderzoek een latere optredende bindingstijd moeten veroorzaken zoals weergegeven in Figuur 4-15. Dit was echter niet het geval, wat de vraag oproept waarom deze afwijking zich heeft voorgedaan.



Figuur 4-15: Resultaten voor de bindingstijd van GGBS en RCP gebaseerd AAM, (a) L/s , (b) Ms, (c) w/b [228]

Een mogelijke oorzaak van de afwijking is de wijze waarop de stoffen werden toegevoegd. In deze fase van het onderzoek werd NaOH en Al_2O_3 direct op het moment van 'zero time' aan elkaar toegevoegd. Dit resulteerde in een hogere warmteontwikkeling van maar liefst 28,8 °C, terwijl een alkalische activator die op voorhand werd samengevoegd een temperatuur van ongeveer 20 °C had na 24 uur. Deze hogere temperatuur kan de reactie verstoren en onstabiel maken wat resulteert in sneller harden, maar een minder stevige structuur.

4.3.1.1 Schijnbare dichtheid

Voor mengsel 16 met 50 % zand werd de schijnbare dichtheid tweemaal gemeten. De bekomen waarden waren respectievelijk 2174 kg/m³ en 2199 kg/m³, wat resulteert in een gemiddelde van 2187 kg/m³. Na afronding wordt de schijnbare dichtheid vastgesteld op 2190 kg/m³.

4.3.2 Effect van olie en ontkistingstijd

4.3.2.1 Ontkistingsmiddel

Tijdens de eerste fase van het onderzoek werd het ontkistingsmiddel MasterFinish RL 322 gebruikt, dat specifiek is ontworpen voor cementbeton. Al snel werd duidelijk dat dit middel geheel niet functioneerde bij het ontkisten van AAM-mengsels. Het ontkistingsmiddel reageert met cement uit het beton en vormt zo een filmlaag tussen het mengsel en de bekisting. AAM missen deze reactie, waardoor de ontkistingsolie haar functie niet kan vervullen.

Uiteindelijk werd een specifiek ontkistingsmiddel, genaamd **Marginel 335** (zoals weergegeven in Figuur 4-16 en Bijlage V), geïdentificeerd en getest. De visuele testen toonden aan dat dit middel zeer effectief is. De mengsels vertoonde een egaal en vlak oppervlak zoals te zien op Figuur 4-17. Dit maakte Marginel 335 tot een uitstekende keuze voor toepassingen met AAM.



Figuur 4-16: Ontkistingsmiddel geschikt voor AAM (Marginel 335)

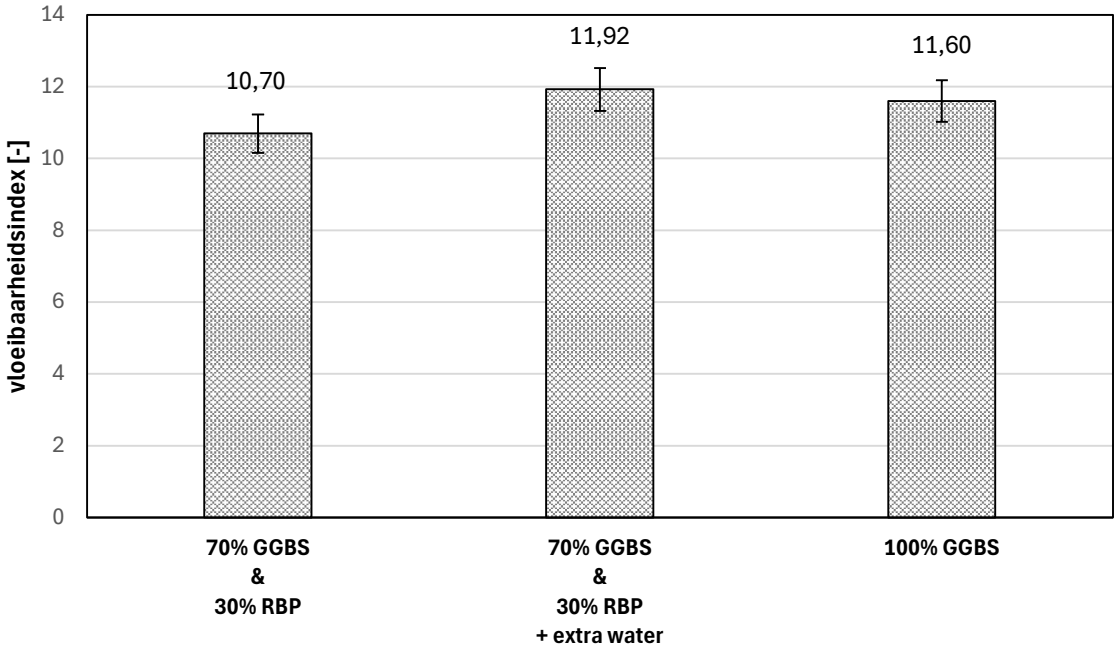


Figuur 4-17: Vormvaste kubussen

4.3.2.2 Invloed van ontkistingsolie

Volgens de norm NBN EN 1015-3:1999, moet de schijf van de tafel worden afgekuist met een vochtige doek en licht worden ingesmeerd met een minerale olie zonder hars en met een zeer lage viscositeit. Aangezien er in dit geval gewerkt wordt met een AAM, werd in vraag gesteld of gewone beton ontkistingsolie hiervoor geschikt is.

Uit een kleinschalig onderzoek bleek dat het gebruik van een ontkistingsolie die specifiek geschikt is voor AAM-beton de beste keuze is. Deze olie wordt immers ook in de praktijk toegepast en gaf de beste vloeibaarheid, zoals weergegeven in Figuur 4-18 en Bijlage J.



Figuur 4-18: Invloed van het gebruik van ontkistingsolie op de mini-slump test resultaten

Uiteindelijk werd beslist om gebruik te maken van de AAM ontkistingsolie. Na het aanbrengen werd de olie lichtjes afgewreven, aangezien een te dikke olielaag de resultaten negatief beïnvloedt, zoals zichtbaar in Figuur 4-19 en Figuur 4-20.

Als optimale procedure werd bepaald dat vanaf het zero time-punt een wachttijd van 5 minuten werd gehanteerd alvorens het mengsel in de mal te gieten. Vervolgens werd de mal 7 minuten na zero time opgeheven, en werd de diameter van het mengsel 17 minuten na zero time gemeten.



Figuur 4-19: Geschikte ontkistingsolie voor AAM, zonder het overtollige weg te wrijven

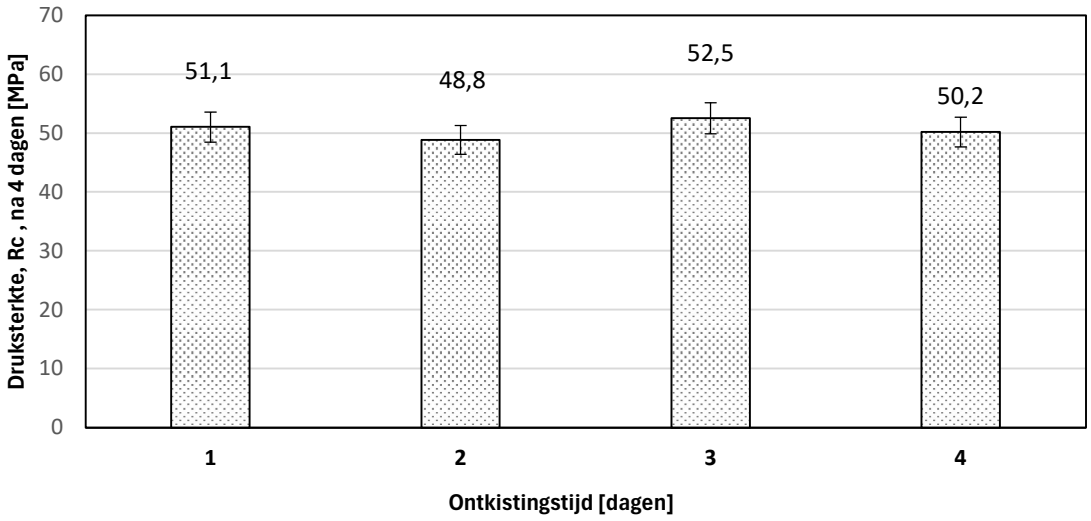


Figuur 4-20: Geschikte ontkistingsolie voor AAM, met het overtollige weg te wrijven

4.3.2.3 Invloed van ontkistingstijdstippen

Deze testen werden uitgevoerd op kubussen van 20 x 20 x 20 mm³. Dit maak de resultaten onvoldoende nauwkeurig om voortgaand onderzoek op te baseren.

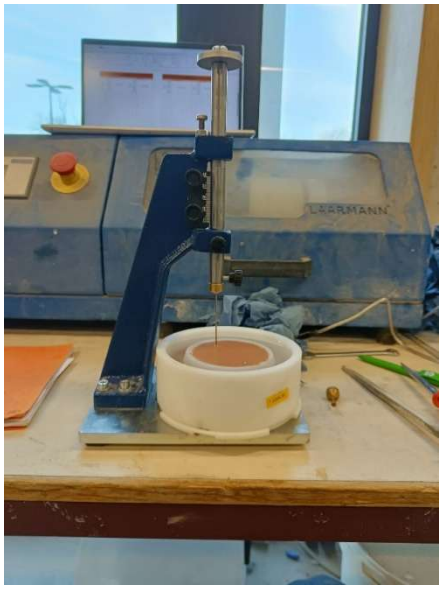
Er werd onderzocht of een latere ontkistingstijd een invloed heeft op de mechanische sterkte van het AAM. Daarbij werd specifiek nagegaan of het mogelijk is om mengsels te produceren op vrijdag en pas de daaropvolgende maandag te ontkisten. Uit de resultaten, weergegeven in Figuur 4-21. blijkt dat ontkisting op vrijdag geen merkbaar voordeel oplevert ten opzichte van een latere ontkisting. Visuele observaties toonden aan dat ontkisting na 1 dag moeilijker verliep, met een nog kleverige structuur en een lastig te reinigen mal. Na 3 dagen daarentegen was het ontkisten aanzienlijk eenvoudiger en liet de mal zich veel gemakkelijker reinigen.



Figuur 4-21: Invloed van de ontkistingstijd op de druksterkte

4.3.3 Verharding onder water

4.3.3.1 Vicat test met watermal



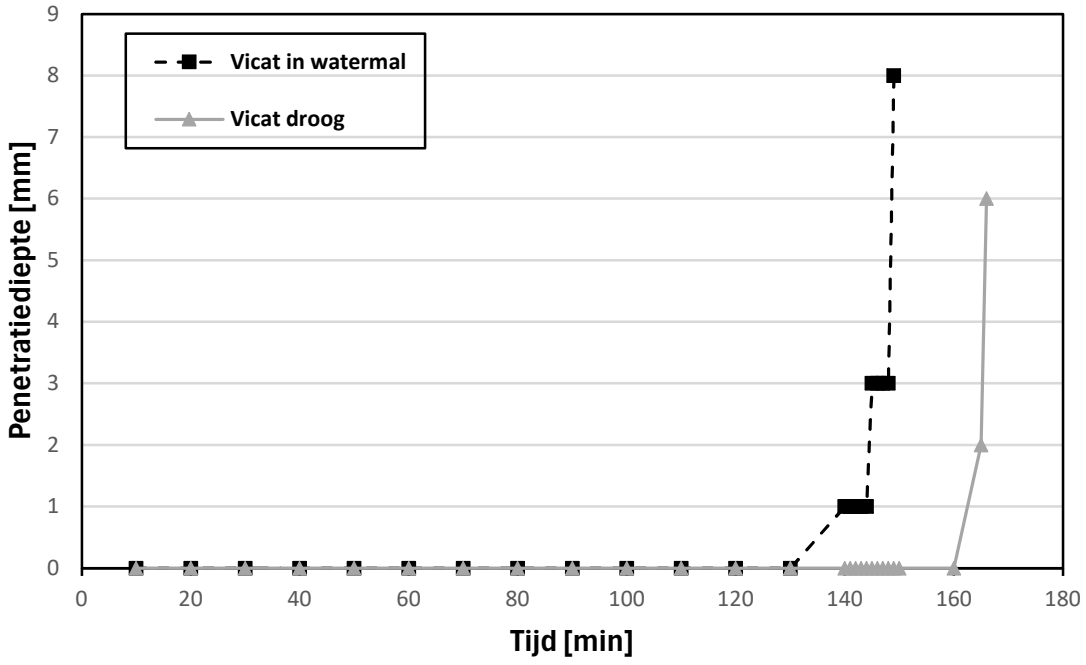
Figuur 4-23: Gebruik van een watermal

Volgens de norm NBN EN 196-3:2016, moet de mal tijdens de Vicat-test in een waterbad geplaatst worden zoals weergegeven in Figuur 4-23 Dit gebeurt om een constante temperatuur van het proefstuk te waarborgen en om temperatuurschommelingen tijdens het uitharden uit te sluiten. Een stabiele temperatuur is essentieel voor een nauwkeurige meting van de bindingstijden.

Uit de resultaten weergegeven in Figuur 4-22 en Bijlage L blijkt duidelijk het effect van het gebruik van een watermal op de Vicat-test bij AAM's. De grafiek toont dat wanneer een watermal gebruikt wordt (blauwe lijn), de verharding pas laat op gang komt, namelijk rond 160 minuten, maar dan extreem snel toeneemt. Dit wijst op een abrupte en onnatuurlijke verharding.

Bij de test zonder watermal start de verharding al rond 130 minuten en verloopt deze geleidelijk, wat past bij het typische gedrag van AAM's. De naaldpenetratie vermindert stapsgewijs, wat een realistischer beeld geeft van het bindproces.

De snelle verharding bij gebruik van een watermal kan verklaard worden door uitloging van NaOH en Na_2SiO_3 in het waterbad. Deze componenten zijn essentieel voor de activatie van AAM's. Hun verlies verstoort het reactieproces en leidt tot een versneld en vertekend resultaat.



Figuur 4-22: Invloed op het gebruik van een watermal bij Vicat-test

4.3.3.2 Mechanische invloed waterverharding

Het is algemeen bekend dat uitloging bij AAM's leidt tot een verminderde sterkteontwikkeling zoals weergegeven in hoofdstuk 2.1.3. Om dit te bewijzen werd onderzocht of AAM's kunnen verharden in water zonder dat dit nadelige effecten veroorzaakt. Hiervoor werd eenzelfde mengsel op hetzelfde moment gegoten, waarbij één proefstuk droog in de klimaatruimte kon binden en verharden en het andere onder water werd geplaatst na het mengen om er te binden en verharden zoals weergegeven in Figuur 4-24 en Figuur 4-25 .

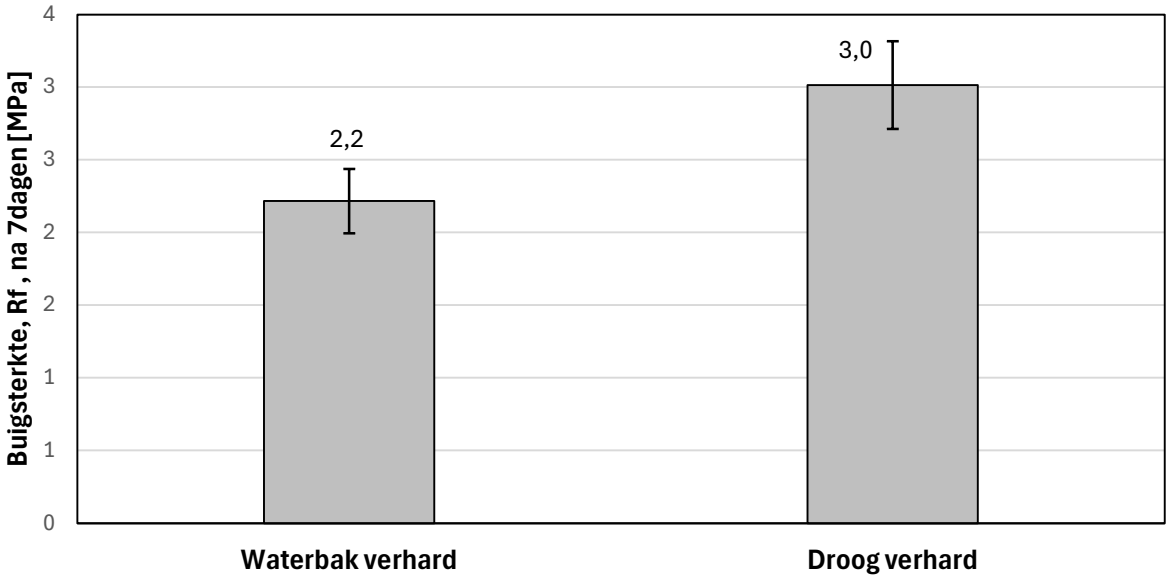


Figuur 4-24: In water gebonden en verhard



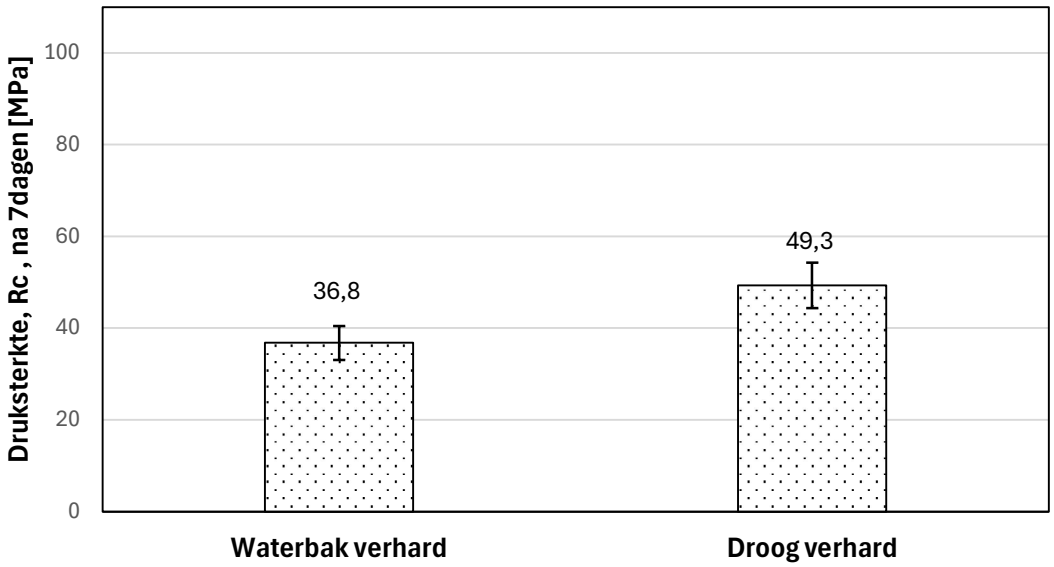
Figuur 4-25: Droog gebonden en verhard

Uit Figuur 4-26 en Bijlage M blijkt dat de buigsterkte van het onder water verhard proefstuk aanzienlijk lager is dan die van het droog verhard exemplaar.



Figuur 4-26: Invloed op de buigsterkte van onder water verharding van AAM

Ook de druksterkte vertoont een duidelijke negatieve beïnvloeding, zoals weergegeven in Figuur 4-27.



Figuur 4-27: Invloed op de druksterkte van onder water verharding van AAM

Uit de testresultaten blijkt dat AAM's in principe in staat zijn om onder water te verharden, wat betekent dat het bindproces niet volledig stilvalt in een natte omgeving. Echter, deze verharding gaat gepaard met aanzienlijke nadelen. Zoals uitgebreid besproken in hoofdstuk 2.1.3, leidt uitloging van cruciale componenten zoals NaOH en Na_2SiO_3 in contact met water tot een verstoring van het activatieproces. Dit resulteert in aanzienlijk lagere mechanische prestaties, waaronder een sterk verminderde druk- en buigsterkte.

Hoewel binding technisch mogelijk is onder water, zijn de gevolgen dermate negatief dat deze werkwijze niet aanvaardbaar is voor praktische toepassingen. Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat verharding van AAM's onder water moet worden vermeden.

Dit heeft ook directe implicaties voor het uitvoeren van de Vicat-test. Volgens de norm EN 196-3:2016 wordt bij traditionele cementen de mal tijdens de test in een waterbad geplaatst om temperatuurschommelingen te vermijden. Bij AAM's leidt dit echter tot uitloging van de actieve bestanddelen, waardoor het meetresultaat niet representatief is voor het werkelijke bindgedrag van het materiaal. Daarom mag bij Vicat-tests op AAM's geen gebruik worden gemaakt van een watermal. Enkel testen in droge omstandigheden bieden een betrouwbaar en reproduceerbaar beeld van de bindingstijden.

4.3.4 Druksterkte

4.3.4.1 Kleverigheid van AAM

AAM heeft een zeer plakkerige structuur, waardoor na een druktest hardnekkige restanten achterblijven op zowel de drukplaat als het oppervlak van het specimen. In vergelijking met cement vertoont AAM een aanzienlijk sterkere hechting, vooral bij druksterktetesten na één dag. Na zeven dagen is de kleverigheid doorgaans veel minder, aangezien de structuurvorming dan al grotendeels voltooid is.

Om betrouwbare meetresultaten te verzekeren, is het essentieel om na elke druktest alle restanten grondig te verwijderen. Dit kan soms handmatig gebeuren, bijvoorbeeld met een schuurspons, om het oppervlak volledig schoon te maken. Achtergebleven materiaal van eerdere tests kan immers een onregelmatig contactvlak veroorzaken, wat de nauwkeurigheid van volgende druktesten negatief beïnvloedt. Het zorgvuldig plaatsen en gebruiken van deze stelplaten is essentieel bij testen van kleine kubussen 20 x 20 x 20 mm³. Bij onzorgvuldig gebruik bestaat het risico dat de adapter beschadigd raakt of volledig kapot gedrukt wordt.



Figuur 4-28: Restanten bij een druktest na 1 dag

4.3.4.2 Accuraatheid test

In een eerste fase werden de kubussen gedrukt zoals weergegeven in Figuur 4-29 , maar deze leverden zeer variabele resultaten op. Daarom werd besloten gebruik te maken van een adapter met stelplaten (zie Figuur 4-30). Voor een correct gebruik van de adapter is het belangrijk deze eerst te testen om de werking en nauwkeurigheid te controleren, en om na te gaan of onderhoud nodig is.

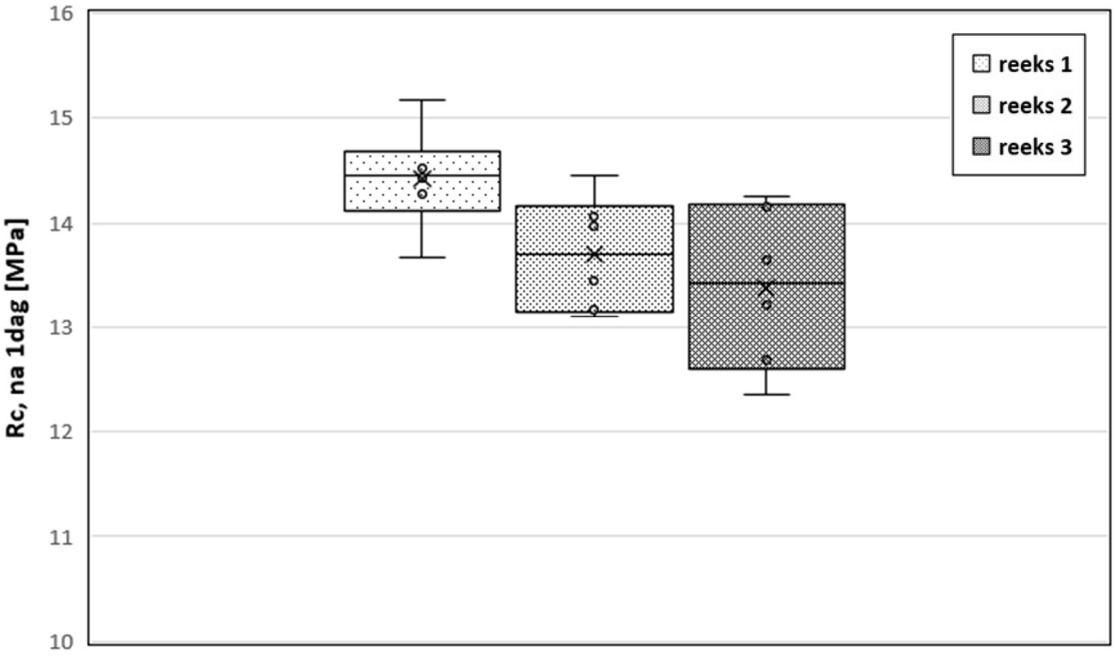


Figuur 4-29: Drukplaat



Figuur 4-30: Adapter 1

Figuur 4-31, blijkt dat bij eenzelfde mengsel een maximaal verschil van slechts 2 MPa optreedt,



Figuur 4-31: Drukproeven op eenzelfde reeksen voor de controle van adapter 1

wat aantoont dat de adapter geschikt is voor verder gebruik.

4.3.5 Samenvatting

Tijdens de eerste testfase bleek dat verschillende aspecten van het testproces nog geoptimaliseerd moesten worden om betrouwbare en reproduceerbare resultaten te verkrijgen. Het gebruik van kubusvormige proefstukken van 20 x 20 x 20 mm³ leverde sterk variabele en weinig representatieve resultaten op. Hoewel deze kleine kubussen onvoldoende nauwkeurige informatie bieden om definitieve conclusies te trekken, bleken ze wel bruikbaar als eerste verkennende methode om kennis te maken met het materiaalgedrag.

Om het materiaalverbruik tot een minimum te beperken, werd in deze fase bewust gekozen voor kleine proefstukken. Ondanks de beperkingen werd, wegens tijdsdruk, een voorlopige keuze voor een mengsel gebaseerd op deze resultaten.

Uit de verkregen gegevens bleek dat mengsel 16 een initiële bindingstijd van 150 minuten en een eindzettingstijd van 160 minuten had, zoals weergegeven in Figuur 4-11. Deze verwerkbaarheidstijden worden als voldoende beschouwd voor praktisch transport en verwerking op een werf. Daarnaast toonde mengsel 16 een vloeibaarheidsindex van 10,6, wat wijst op een uitstekende vloeibaarheid. Dit is positief, zeker omdat in latere fasen nog zand en vezels aan het mengsel zullen worden toegevoegd. Deze stoffen verlagen doorgaans de vloeibaarheid door de waterabsorptie.

In een daaropvolgende fase, bij de verwerking van mortels, werden mengsels op vrijdag aangemaakt en pas op maandag ontkist. De testresultaten van deze opstelling bleken echter onvoldoende betrouwbaar en zijn daarom niet geschikt om als basis voor verdere besluitvorming te dienen.

Daarnaast werd vastgesteld dat de Vicat-test, zoals voorgeschreven voor traditioneel cement, niet zonder aanpassing toepasbaar is op AAM's. Het gebruik van watermallen tijdens deze test leidt tot uitloging van essentiële reactieve componenten zoals NaOH en Na_2SiO_3, wat het uithardingsproces verstoort en de resultaten vertekent. Hierdoor is deze methode ongeschikt voor een correcte bepaling van de bindingstijden van AAM's.

4.4 Mortel

In deze fase werd nauwkeuriger te werk gegaan on eerdere fouten te vermijden. Zo werden de activators NaOH en Na_2SiO_3 voortaan steeds 24 uur op voorhand gemengd, om een stabielere reactie en consistentere verwerking te garanderen. Bovendien werd overgestapt op grotere proefstukken van 40 x 40 x 160 mm³, wat leidde tot betrouwbaardere en representatievere testresultaten.

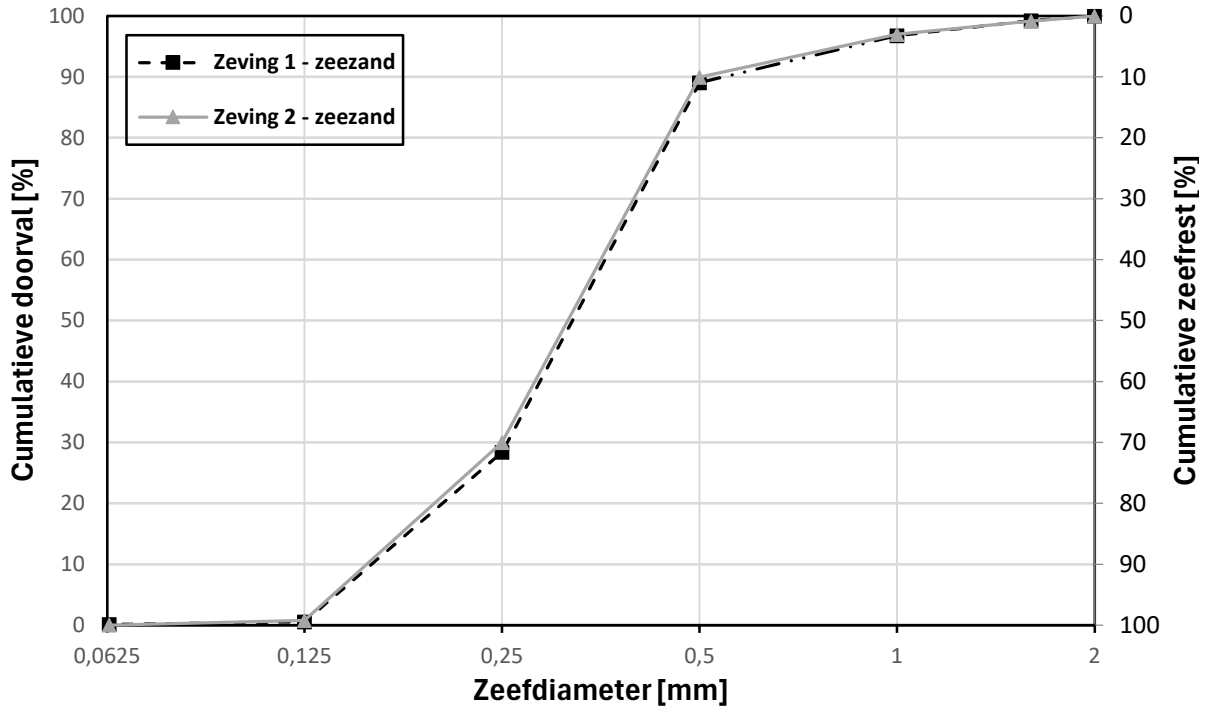
Ook werd de correcte ontkistingsolie toegepast, wat zorgde voor een vlottere ontkisting en minder schade aan de proefstukken. Dankzij deze verbeteringen kunnen de verkregen resultaten als betrouwbaar worden beschouwd en vormen ze een solide basis voor verdere onderzoeksfasen.

Zoals eerder vermeld, werd hierbij verder gewerkt met mengsel 16, dat in de vorige fase als het meest geschikt werd geïdentificeerd.

4.4.1 Zand

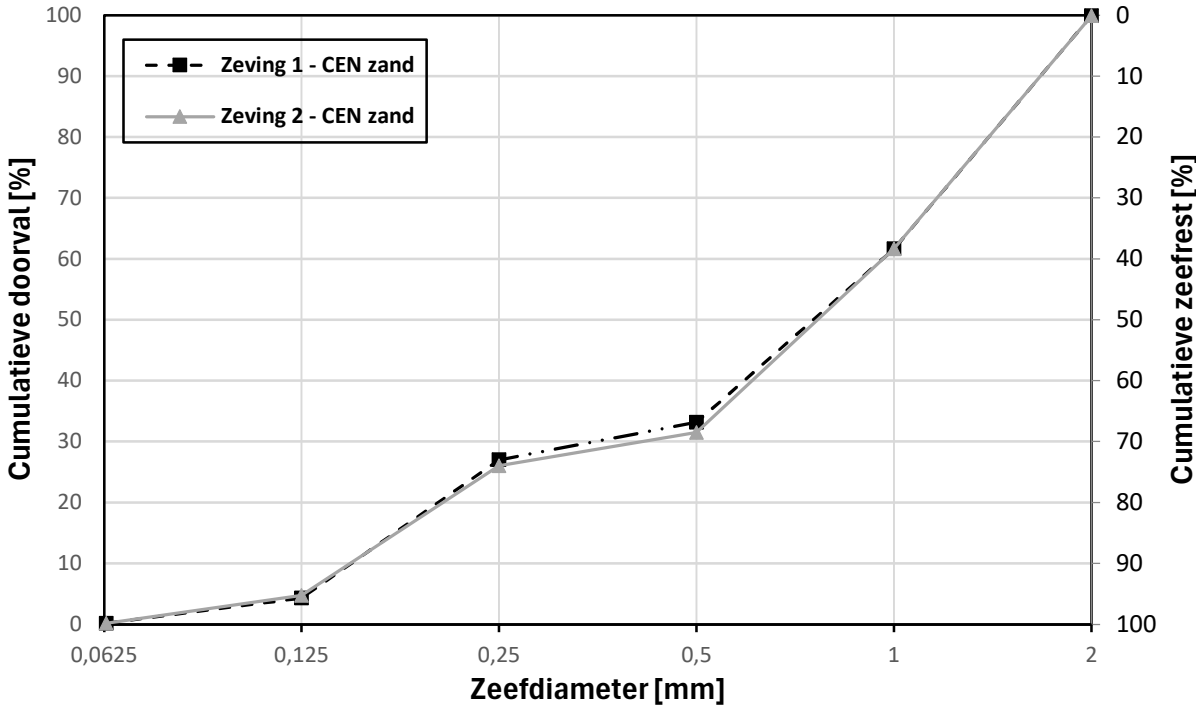
4.4.1.1 Zeefproef

Aanvankelijk werd gekozen voor gewoon zeezand omwille van de lagere kostprijs ten opzichte van gecertificeerd CEN-zand. Om na te gaan of dit een geschikt alternatief kon vormen, werd een zeefanalyse uitgevoerd op beide zandsoorten. Per zandtype werden twee testen uitgevoerd, waarbij de herhaalbaarheid werd gecontroleerd volgens EN 933-1:2012. Zoals weergegeven in 0. Figuur 4-32 toont de korrelverdeling van het zeezand.



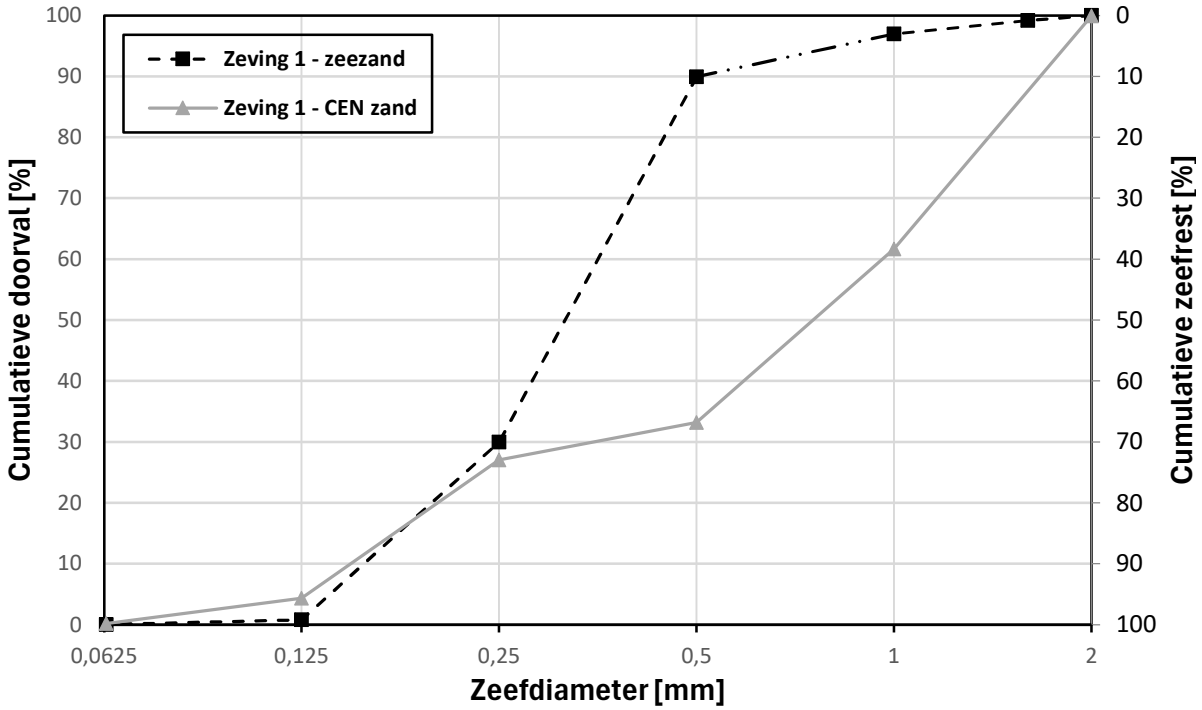
Figuur 4-32: Korrelverdeling van het zeezand

Figuur 4-33 toont de resultaten van het CEN-zand.



Figuur 4-33: Korrelverdeling van het CEN zand

Uit de resultaten van de zeefproef blijkt echter dat de korrelverdeling van het zeezand niet voldoet aan de vereisten voor CEN-zand zoals weergegeven in Figuur 4-34. De afwijkingen in granulometrie maken het zand ongeschikt voor gestandaardiseerde testen waarbij CEN-zand vereist is. Daarom werd besloten om in het verdere verloop van het onderzoek uitsluitend CEN-zand te gebruiken, om zo betrouwbare en conforme testresultaten te bekomen.

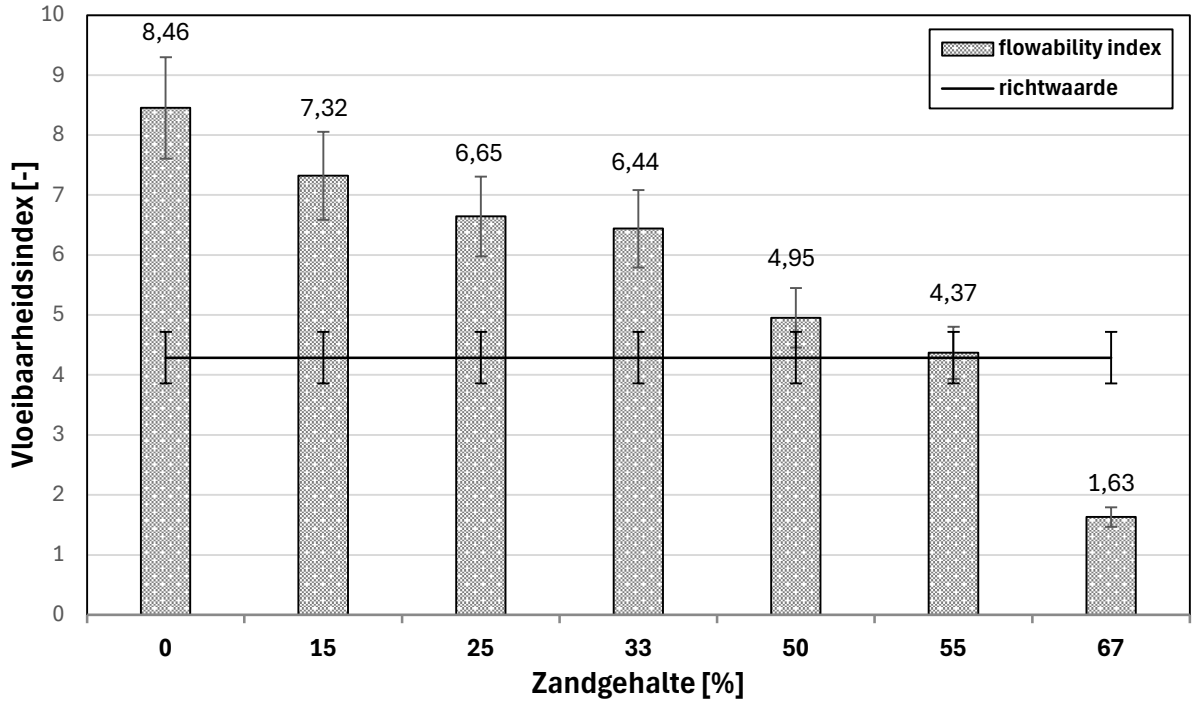


Figuur 4-34: Korrelvergelijking tussen het zeezand en het CEN zand

4.4.2 Verse eigenschappen

Door tijdsbeperkingen werd enkel de vloeibaarheid van de mengsels bepaald. Er werd een streefwaarde van 230 mm gehanteerd, rekening houdend met een toekomstige toevoeging van grovere toeslagmaterialen bij de ontwikkeling van AAM-beton.

Bij de resultaten zoals weergegeven in Figuur 4-35 is een duidelijke invloed op de vloeibaarheid naarmate het zandgehalte toeneemt. Hier is een duidelijke verlaging naarmate het zandgehalte stijgt. Dit is vooral te leiden door de waterabsorptie van het zand.



Figuur 4-35: Invloed van het zandgehalte op de vloeibaarheidsindex

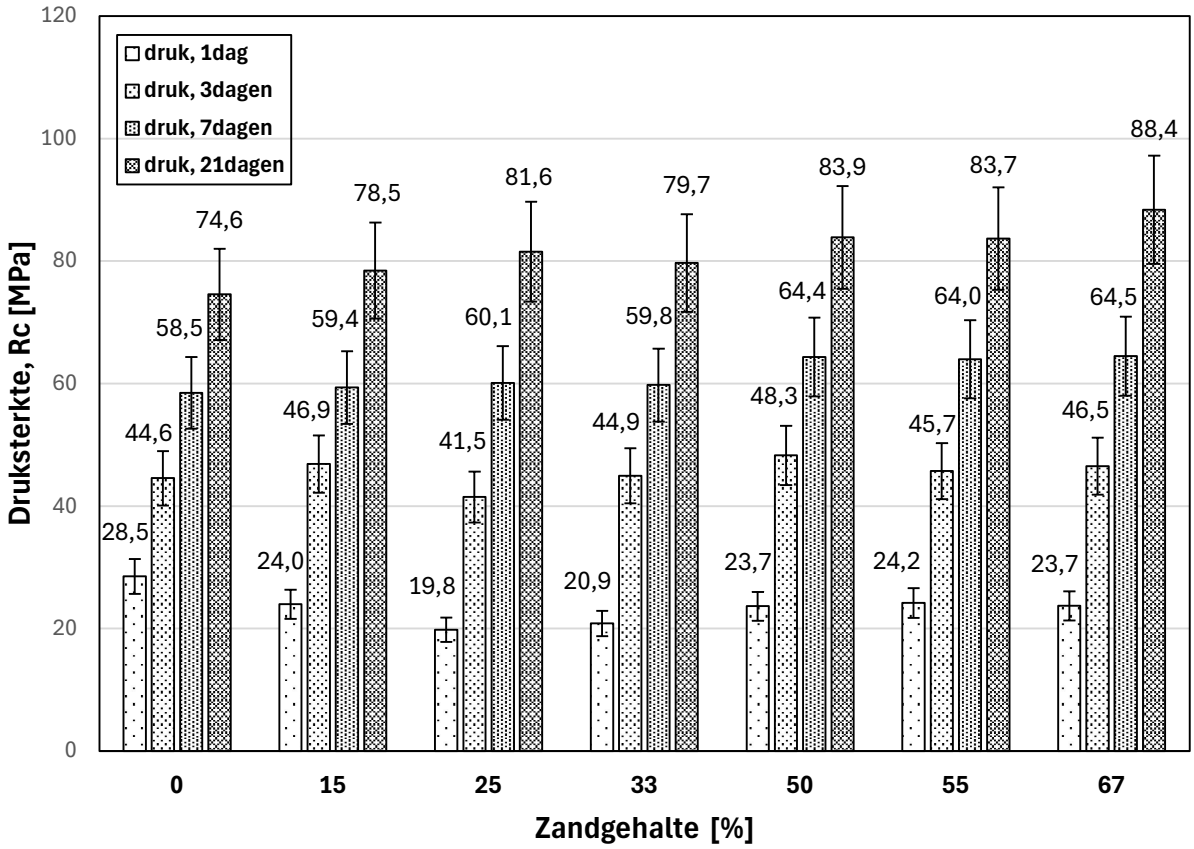
4.4.3 Mechanische eigenschappen

Uit de resultaten zoals weergegeven in Figuur 4-36 blijkt dat een toename van het zandgehalte leidt tot een consistente stijging van de druksterkte over alle uithardingstijden heen. Zo stijgt de sterkte op 21 dagen van 74,59 MPa bij 0 % zand tot 88,40 MPa bij 67 %. De meest uitgesproken toename wordt waargenomen tussen dag 1 en dag 7, wat wijst op snelle structuurvorming tijdens deze periode.

Opmerkelijk is dat het mengsel zonder zand (0 %) op dag 1 de hoogste beginsterkte vertoont. Dit duidt op een snelle initiële reactie van de pasta in afwezigheid van inert materiaal. Op langere termijn zijn het echter de mengsels met ≥ 33 % zand die superieure sterktes leveren. De zanddeeltjes verbeteren de korrelverdeling en mechanische verankering, wat resulteert in een dichtere, sterkere structuur. Bij lage zandgehaltes ontbreekt deze ondersteuning, wat leidt tot een lagere verdichting en dus verminderde sterkte op langere termijn.

Vanaf een zandgehalte van 50 % lijkt de sterkte-evolutie te stabiliseren. De druksterktes op 21 dagen liggen voor 50 %, 55 % en 67 % zand zeer dicht bij elkaar (respectievelijk 83,88 MPa, 83,69 MPa en 88,40 MPa), wat erop wijst dat de optimale vulgraad vermoedelijk in dit bereik

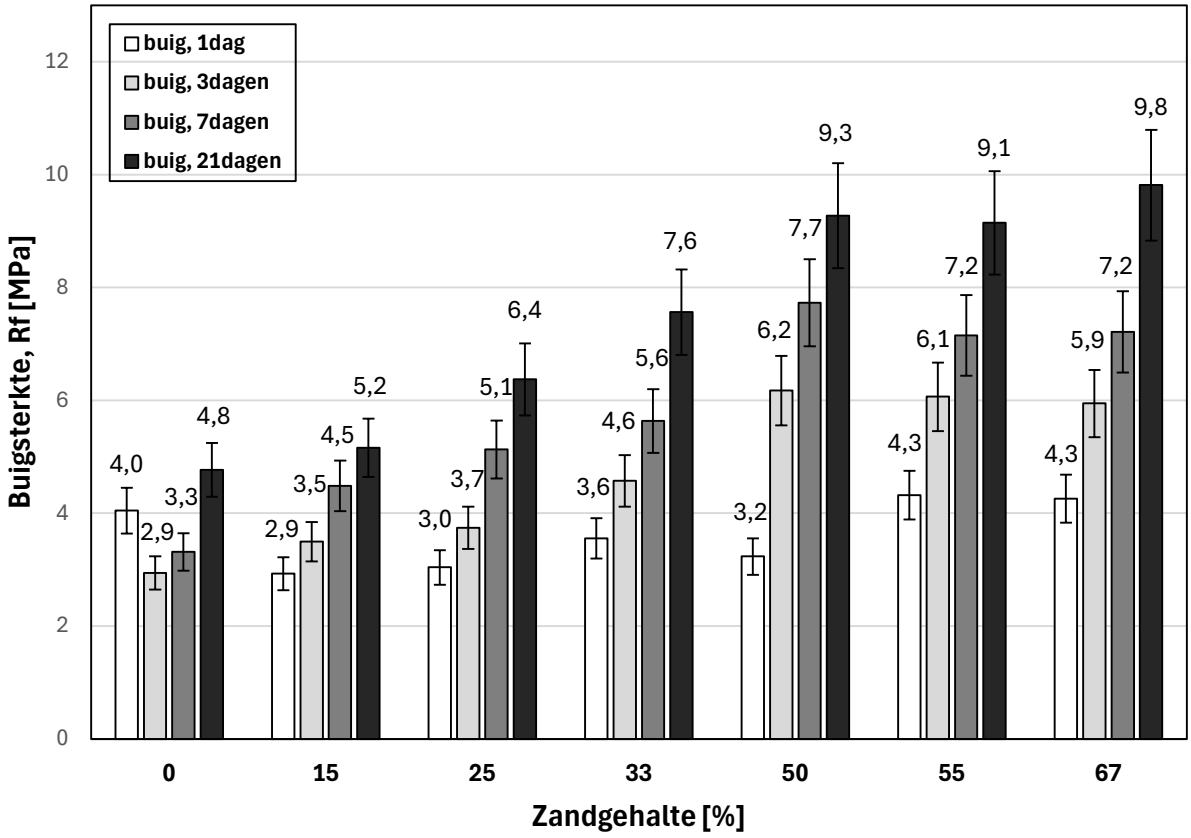
ligt. Een verdere toename van het zandgehalte boven de 50 % resulteert dus niet meer in een significante sterktetoename.



Figuur 4-36: Invloed van het zandgehalte op de druksterkte

Uit Figuur 4-37 blijkt dat het zandgehalte een duidelijke significante invloed heeft op de buigsterkte, vooral op langere termijn. In het algemeen neemt de buigsterkte toe naarmate het zandgehalte stijgt, met de hoogste waarden bij 50 % tot 67 % zand. Op 21 dagen loopt de buigsterkte op van 4,77 MPa bij 0 % zand tot 9,82 MPa bij 67 % zand, een verdubbeling van de sterkte. Dit bevestigt dat zand niet alleen een rol speelt in de druksterkte, maar ook bijdraagt aan de buigweerstand van het materiaal.

Opvallend is dat de buigsterkte op dag 1 relatief hoog is bij 0 % zand (4,05 MPa) en vervolgens daalt bij toevoeging van zand tot 25 %. Dit suggereert dat de pasta zonder toeslagstoffen snel verhardt en in het begin sterker is in buigspanning, mogelijk door een homogeen netwerk van reactieproducten. Vanaf 33 % zand begint de buigsterkte opnieuw sterk toe te nemen, wat erop wijst dat de aanwezigheid van voldoende zand de mechanische verankering en spreiding van interne spanningen verbetert. Dit effect wordt duidelijker na 7 en 21 dagen, waarbij mengsels met ≥ 50 % zand de hoogste buigsterktes bereiken.

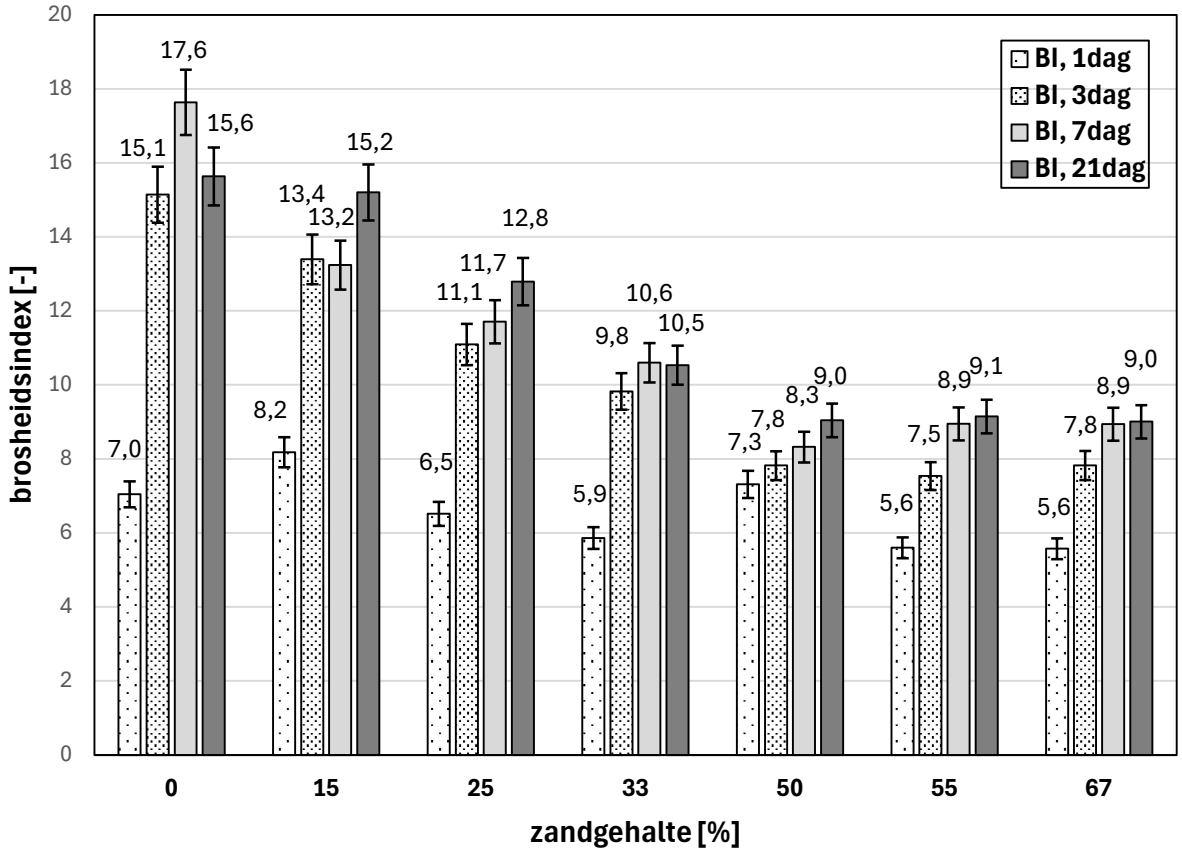


Figuur 4-37: Invloed van het zandgehalte op de buigsterkte

Figuur 4-38 toont het verloop van de BI bij verschillende zandgehaltes en uithardingstijden. Een dalende trend is duidelijk zichtbaar bij toenemend zandgehalte, vooral tussen 0 % en 33 %. De hoogste waarde wordt gemeten bij 0 % zand op dag 7 (BI = 17,64), wat wijst op een uitgesproken bros gedrag. Dit kan worden toegeschreven aan het feit dat het mengsel uitsluitend uit pasta bestaat, zonder de structurele ondersteuning van inert vulmateriaal.

Bij hogere zandgehaltes wordt de brosheid duidelijk gereduceerd. Mengsels met 50 % tot 67 % zand vertonen op dag 21 BI-waarden rond 8 à 9. Deze afname wijst op een gunstiger verhouding tussen druk- en buigsterkte: het materiaal wordt taaier en minder gevoelig voor plotseling breukgedrag. Dit kan worden verklaard doordat het zand in de microstructuur spanningsconcentraties helpt te spreiden en barst initiatie afremt.

Daarnaast valt op dat bij lage zandgehaltes de BI sterk stijgt tussen dag 1 en dag 7. Dit impliceert dat de pasta snel uithardt, met een snelle stijging in druksterkte zonder gelijke toename in buigsterkte. Bij hogere zandgehaltes verloopt deze verhouding stabieler, wat wijst op een meer gecontroleerde en evenwichtige sterkteontwikkeling.



Figuur 4-38: Invloed van het zandgehalte op de brosheidsindex

4.4.4 Samenvatting

De resultaten tonen aan dat het zandgehalte een cruciale rol speelt in zowel de verse als uitgeharde eigenschappen van het AAM. Zand fungeert niet alleen als vulstof, maar draagt actief bij aan de structuur, spanningsverdeling en sterkteontwikkeling. Op basis van de balans tussen vloeibaarheid, druksterkte, buigsterkte en brosheid werd 50 % zand als optimaal beschouwd. Dit percentage biedt een goede combinatie van verwerkbaarheid en mechanische prestaties, en werd daarom geselecteerd als uitgangspunt voor de verdere ontwikkeling van AAM-beton.

4.5 Toevoeging van vezels

In deze laatste fase van het onderzoek werden aan mengsel 16-C, dat een zandgehalte van 50 % had, vezels toegevoegd om de scheurvorming en brosheid verder te verminderen. Deze samenstelling is terug te vinden in Tabel 3-1.

Alvorens de juiste gewichtshoeveelheid van 3 kg/m³, 6 kg/m³ en 9 kg/m³ moest er een dichtheid van de mortel bepaald worden. Deze gaf een totale van 2190 kg/m³ voor mengsel 16-C zoals weergegeven op pagina 123. Op deze manier konden volgende gewichten uitgerekend worden zoals weergegeven in onderstaande berekening wat ook eerder werd aangehaald in Tabel 3-2.

$$\text{hoeveelheid} = 3\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1}{2190}\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \times 2{,}56057\,\text{kg} \;\; = 0{,}0035\text{kg} = 3{,}5\text{g}$$

4.5.1 Vlasvezels

Hoewel vlasvezels werden gezeefd met zeven met maaswijdtes van 500 µm, 1 mm en 2 mm, die oorspronkelijk bedoeld zijn voor granulaten, dient opgemerkt te worden dat deze methode niet ideaal is voor vezelachtig materiaal. De resultaten geven dan ook eerder een indicatie van de vezelverdeling dan een exacte classificatie. Bij de toegepaste methode werd al het materiaal dat groter was dan de maaswijdte van een bepaalde zeef, maar kleiner dan die van de volgende, in een specifieke categorie ondergebracht. Zo variëren de vezels die op de 500 µm-zeef blijven liggen tussen 500 µm en 1 mm; die op de 1 mm-zeef tussen 1 mm en 2 mm; en op de 2 mm-zeef tussen 2 mm en 4 mm. Voor de eenvoud zijn deze categorieën aangeduid met de termen 500 µm, 1 mm en 2 mm.

Een interessant neveneffect werd waargenomen tijdens de proeven. De van nature minder aangename geur van het AAM-mengsel werd merkbaar verbeterd door de aanwezigheid van de natuurlijke vezels.

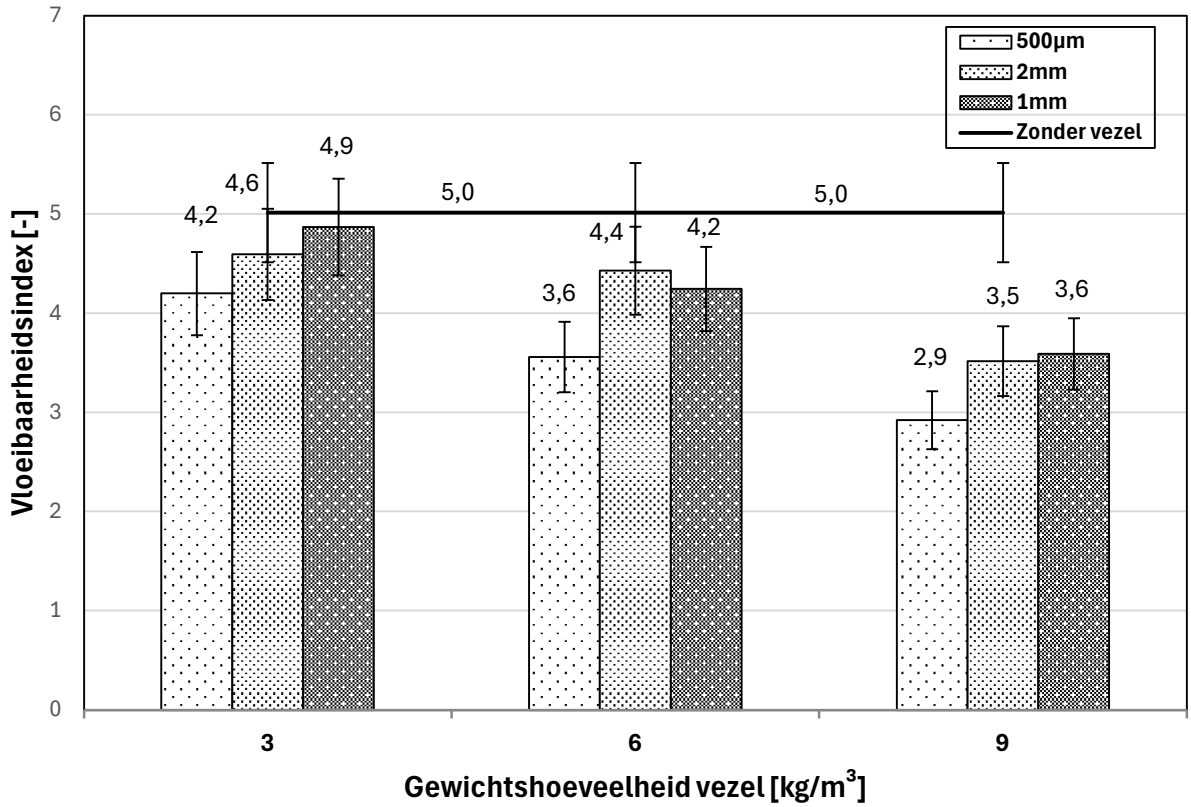
4.5.1.1 Verse eigenschappen

Zoals weergegeven in de Figuur 4-39 is er een duidelijke invloed van de vlasvezel op de vloeibaarheid van het mengsel. Deze afname in vloeibaarheid is grotendeels te wijten aan de waterabsorptie van de vezels, die het vrij beschikbare water in het mengsel vermindert. Hierdoor wordt het mengsel stijver en minder makkelijk verwerkbaar.

Daarnaast kan de daling in de vloeibaarheidsindex ook worden toegeschreven aan de fysieke interactie tussen de vezels en de matrix: bij hogere vezelgehaltes kan er sprake zijn van vezelverstrengeling en verhoogde interne wrijving, wat eveneens de vloeibaarheid negatief beïnvloedt.

Dunnere vezels (zoals 500 µm) verlagen de vloeibaarheid sterker dan dikkere vezels, vermoedelijk door hun groter specifiek oppervlak dat meer wrijving en binding veroorzaakt in het mengsel.

Merk op dat in Figuur 4-39 ook de referentielijn wordt weergegeven van het mengsel zonder vezeltoevoeging. Naarmate er meer vlasvezels worden toegevoegd, daalt de vloeibaarheid van het mengsel verder ten opzichte van deze referentielijn.



Figuur 4-39: Invloed van de vlashoeveelheid en diameter op de vloeibaarheidsindex

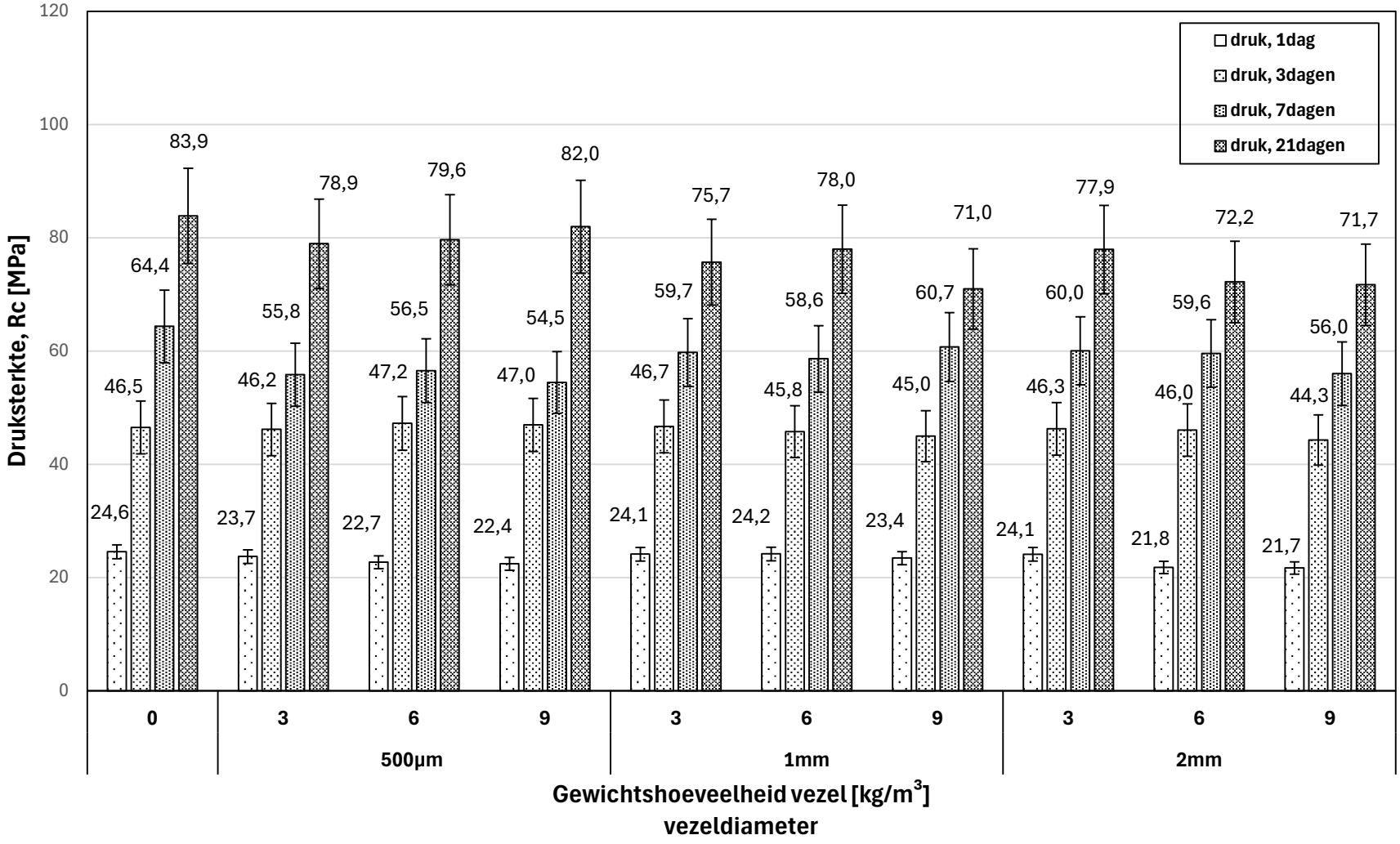
4.5.1.2 Mechanische eigenschappen

E Na 7 dagen werd een verminderde druksterkte vastgesteld bij mengsels met vlasvezels, voornamelijk door luchtinsluitingen en een zwakke hechting tussen vezel en AAM, wat de spanningsoverdracht belemmert [229]. Aangezien vlasvezels nauwelijks bijdragen aan druksterkte, leidt hun toevoeging tot een daling naarmate meer AAM vervangen wordt.

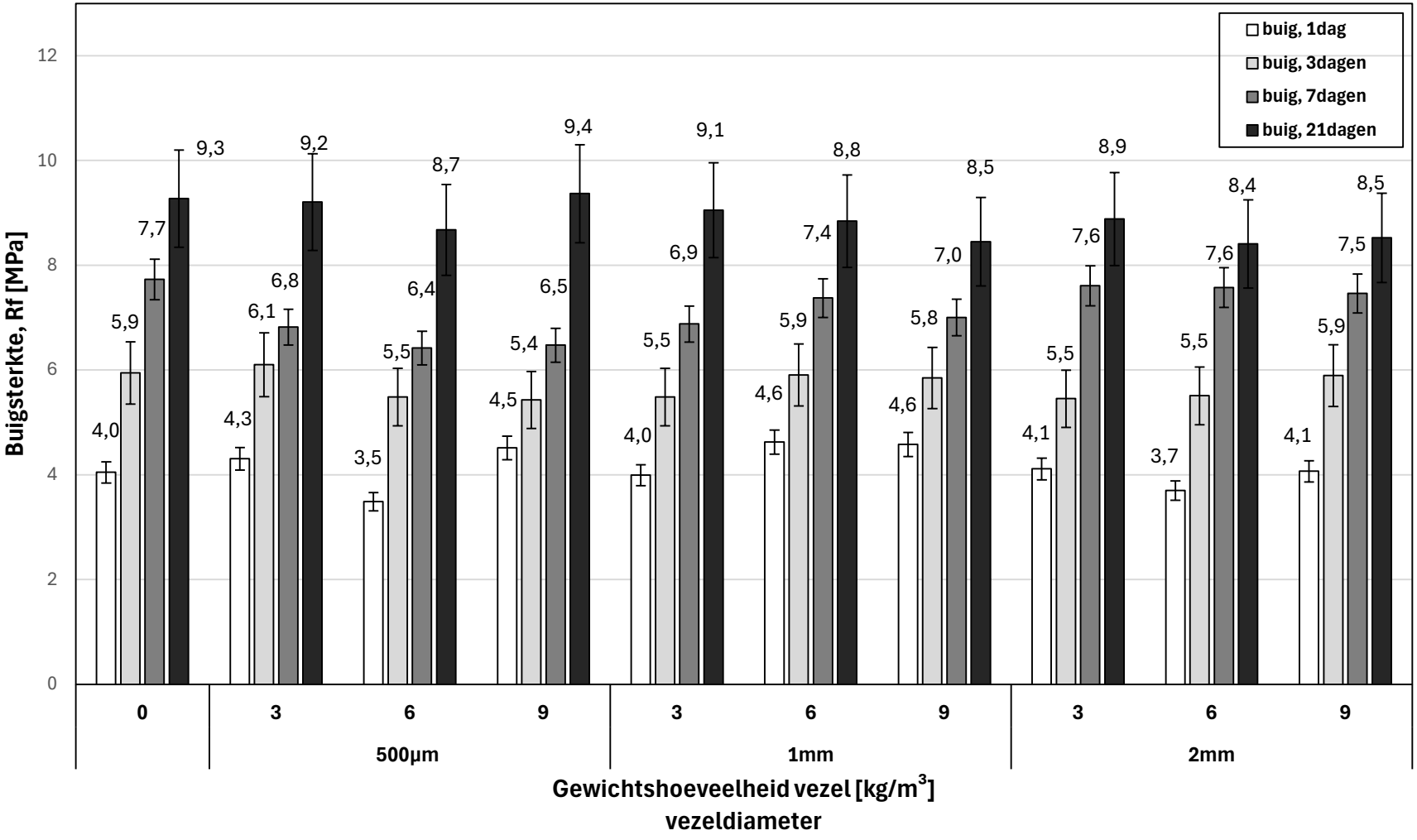
Een mogelijke manier om dit negatieve effect te minimaliseren, is het toepassen van een voorbehandeling van de vlasvezels, waarbij niet-cellulose houdende componenten zoals lignine, pectine en wassen verwijderd worden. Hierdoor zou de vezeloppervlakte schoner en reactiever worden, wat kan leiden tot een betere hechting met de AAM-bindfase.

Voorbehandeling van de vezels (bv. verwijderen van lignine en wassen) kan de hechting verbeteren. Toch blijven de druksterktes hoog: zelfs in de minst gunstige configuratie werd 55 MPa bereikt, wat ruim boven de norm ligt. Het negatieve effect van vlasvezels op druksterkte is daarom technisch verwaarloosbaar, zeker gezien hun andere voordelen (zoals taaiheid en scheurbeperking).

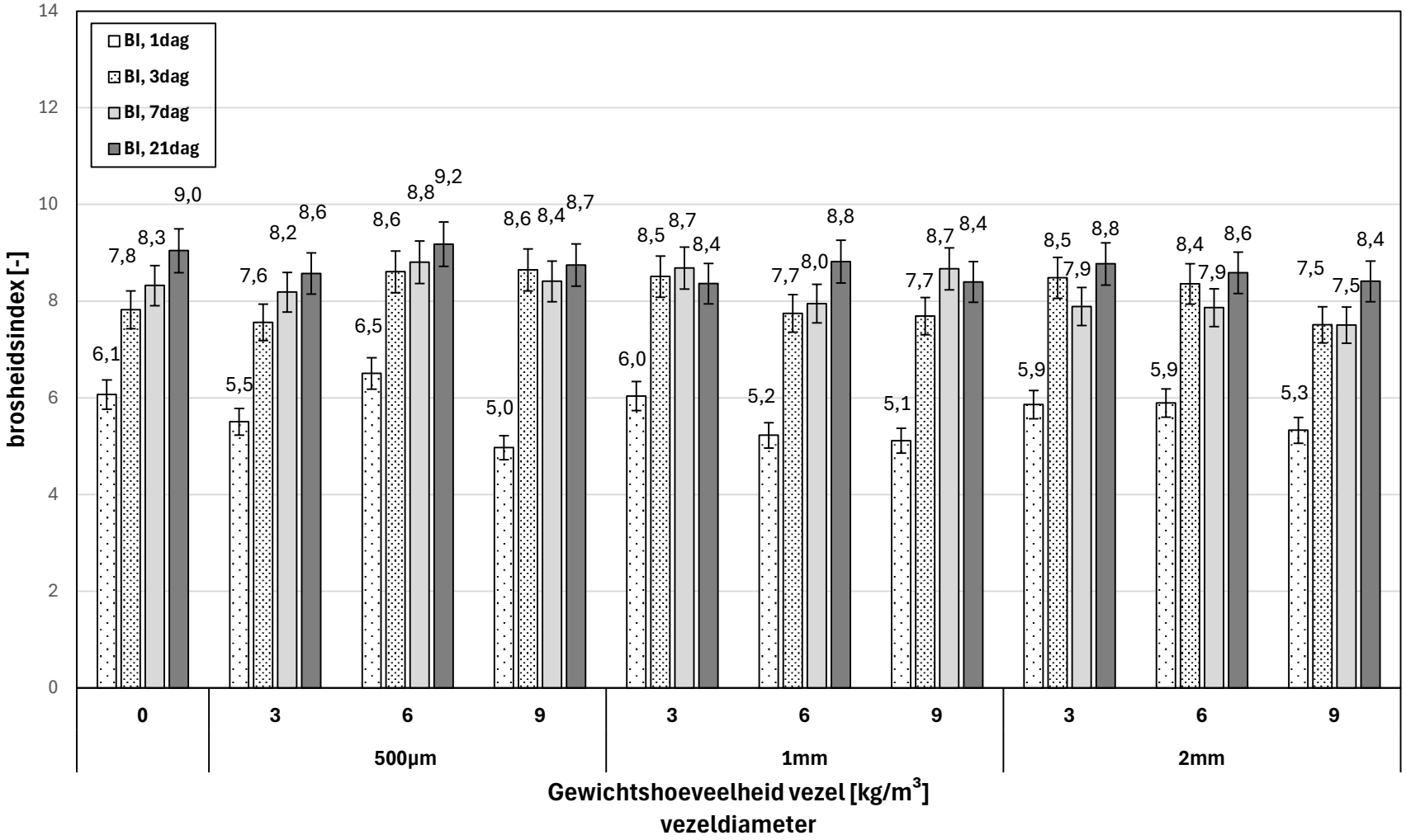
Er is een duidelijke toename in buigsterkte waarneembaar na 1 dag. Dit komt doordat het geopolymerisatieproces dan nog volop actief is. In deze fase functioneert het AAM als een soort lijm die zich sterk hecht aan de vezels. Dit effect is vooral merkbaar bij een hogere vezelinhoud: bijvoorbeeld bij 500 µm vezels zijn er meer individuele vezels aanwezig dan bij vezels met een diameter van 2 mm, wat zorgt voor meer hechtingspunten. Na 7 dagen, wanneer het "lijmende" karakter van het AAM afneemt, is er een duidelijke daling in de buigsterkte te zien. Dit komt door de vorming van luchtbellen en een zwakkere microstructuur veroorzaakt door de vezelinbreng.



Figuur 4-40: Invloed van de vlashoeveelheid en diameter op de druksterkte



Figuur 4-41: Invloed van de vlashoeveelheid en diameter op de buigsterkte



Figuur 4-42: Invloed van de vlashoeveelheid en diameter op de brosheidsindex

De brosheidsindex blijft na toevoeging van vezels grotendeels gelijk. Dit lijkt op het eerste gezicht opmerkelijk, aangezien vezels doorgaans de ductiliteit van het materiaal verhogen. De verklaring hiervoor ligt in de aard van de brosheidsindex zelf: deze houdt voornamelijk rekening met de verhouding tussen buigsterkte en splijtsterkte, en niet met de vervormingscapaciteit van het materiaal na het bereiken van de maximale sterkte In het algemeen geldt dat een hogere BI wijst op brosser gedrag. Uit de resultaten blijkt dat de BI bij alle onderzochte mengsels toeneemt naarmate de uithardingstijd vordert – een verwacht gevolg van de verharding van de AAM-matrix. Na 21 dagen liggen de BI-waarden van vrijwel alle mengsels met vezels tussen 8,3 en 9,2, wat zo goed als gelijk is als het referentiemengsel.

Hoewel vlasvezels normaal gesproken toegevoegd worden om het breukgedrag te verzachten en dus de brosheid te verlagen, blijkt uit de metingen dat dit effect beperkt is. Alleen bij fijne vezels (500 µm) en lage dosering is er op dag 1 een duidelijk lagere brosheidsindex (4,97), wat wijst op een gunstige invloed in het vroege stadium. Dit voordeel neemt echter af met de tijd, vermoedelijk doordat de vezels onvoldoende bijdragen aan de buigsterkte in verhouding tot de stijgende druksterkte. Mogelijke verklaringen hiervoor zijn een beperkte hechting tussen vezels en matrix of een suboptimale vezelverdeling. De resultaten suggereren dat vlasvezels in deze toepassing niet significant bijdragen aan het verminderen van de brosheid op lange termijn, hoewel ze mogelijk wel andere voordelen bieden zoals scheuroverbrugging of een verbeterde taaiheid die in deze index niet tot uiting komen.

Hoewel de numerieke waarde van de brosheidsindex nauwelijks verandert, is het explosieve breukgedrag zoals dat vaak voorkomt bij ongewapende AAM materialen duidelijk verminderd. In een mengsel zonder vezels is een duidelijk explosief breekkarakter te zien zoals weergegeven in Figuur 4-43. Wanneer de vezel worden toegevoegd bied dit een duidelijk weerstand biedend effect zoals weergegeven in Figuur 4-44. De vezels zorgen voor een meer gecontroleerde breuk en remmen de scheurvoortplanting, wat leidt tot een veiliger faalgedrag.



Figuur 4-43: Mengsel zonder vezel



Figuur 4-44: Mengsel met vezel

4.5.2 Macrovezel

Er werd besloten een beschikbare macrovezel te gebruiken als extra onderzoek. Hierbij werd een beschikbaar macrovezel van 50 mm lengte gebruikt met dank hiervoor aan Brecht Vandevyvere.

4.5.2.1 Verse eigenschappen

Bij toevoeging van macrovezels is er een duidelijke vermindering van de vloeibaarheid waarneembaar. Deze afname is echter niet uitsluitend toe te schrijven aan waterabsorptie door de vezels, zoals vaak het geval is bij microvezels. In plaats daarvan lijkt het effect eerder veroorzaakt te worden doordat de macrovezels als een soort "interne wapening" fungeren die de AAM-pasta lokaal vasthouden. Ze beperken de vrije stroming van het mengsel doordat ze de beweging van de pasta belemmeren en deze als het ware onderling "verankeren". Dit wordt weergegeven in Figuur 4-45.

Daarnaast speelt ook de fysieke aard van de macrovezels een rol. Door hun lengte en relatief hoge gewichtshoeveelheid belemmeren ze het glad afwerken van het oppervlak, wat extra handelingen vereist bij de toepassing. Deze effecten zijn visueel weergegeven in Figuur 4-46.

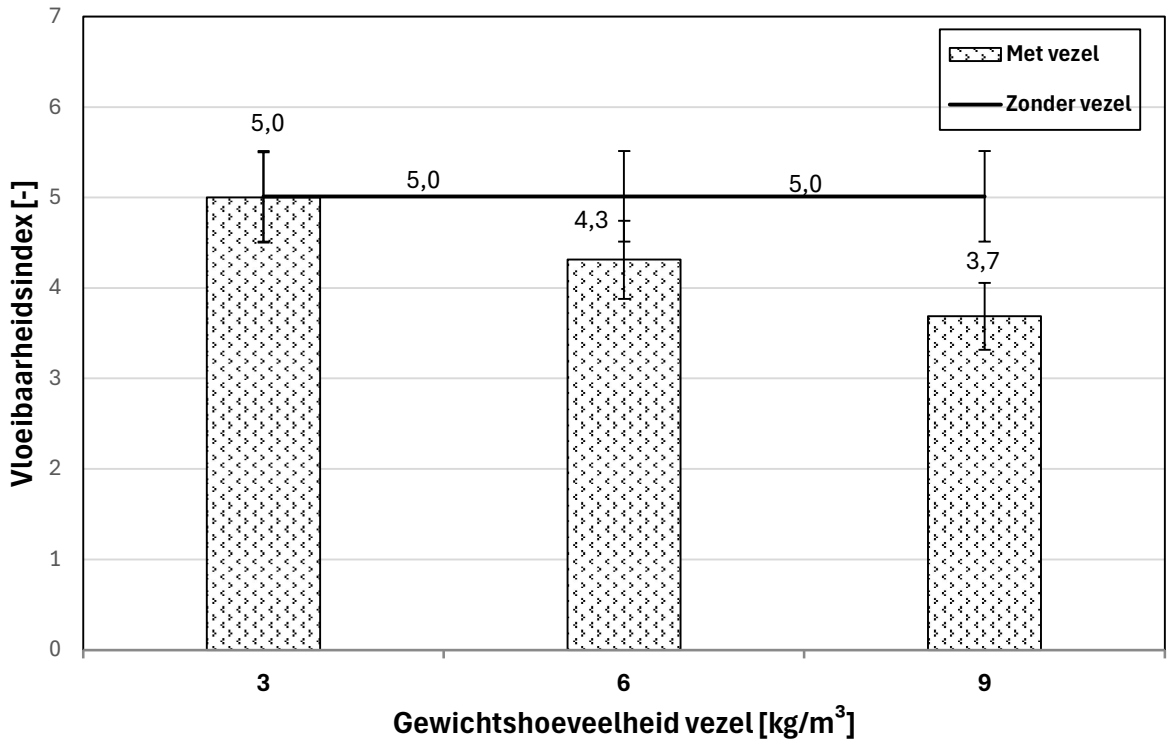


Figuur 4-45: Verwerkbaarheid van PP-vezel met een gewichtshoeveelheid van 9kg/m³



Figuur 4-46: Afwerkbaarheid van PP-vezel met een gewichtshoeveelheid van 9kg/m³

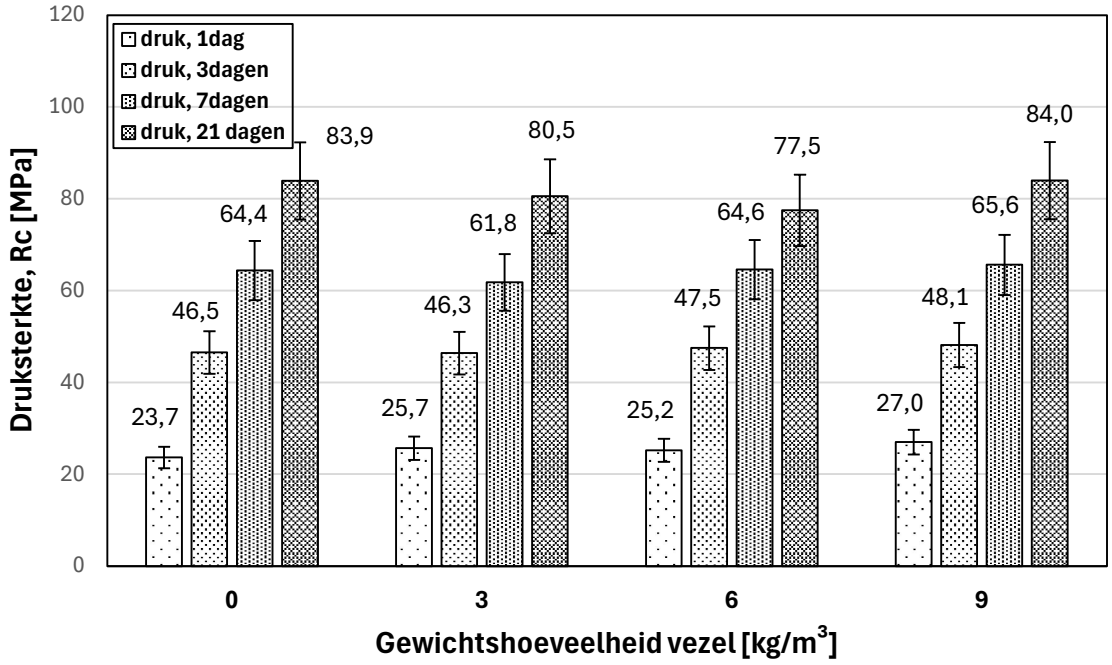
De daling in vloeibaarheid is waarneembaar in Figuur 4-47, waar de spreiding van de verse mortel met en zonder macrovezels wordt vergeleken. De verminderde spreiding bij toenemende macrovezel inhoud illustreert de afname in verwerkbaarheid ondanks een gelijkblijvend vloeistofgehalte. Dit fenomeen dient dan ook eerder toegeschreven te worden aan mechanische verstoring van de stroming dan aan een verandering in water-beschikbaarheid.



Figuur 4-47: Invloed van de gewichtshoeveelheid van PP-vezels op de vloeibaarheidsindex

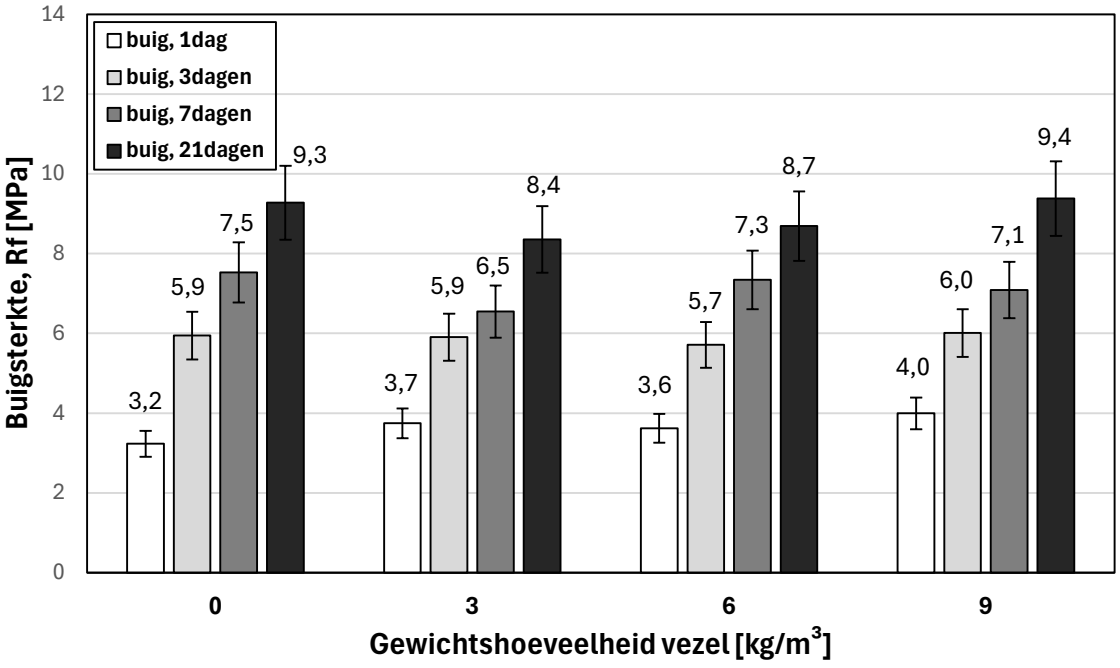
4.5.2.2 Mechanische eigenschappen

Bij de toevoeging van macrovezels is een lichte daling in druksterkte, of in sommige gevallen een gelijkblijvend niveau, waarneembaar zoals weergegeven in Figuur 4-48. Dit effect is te wijten aan het feit dat macrovezels slechts in beperkte mate bijdragen aan het opnemen van drukspanningen, terwijl ze de compactheid van de matrix negatief kunnen beïnvloeden. Ze verstoren de homogene verdeling van de pasta, kunnen luchtinsluitingen bevorderen en leiden tot een minder dichte structuur, wat resulteert in een lagere druksterkte. Ondanks deze lichte afname blijft de druksterkte binnen aanvaardbare grenzen voor structurele toepassingen.



Figuur 4-48: Invloed van de gewichtshoeveelheid van PP-vezels op de druksterkte

Na 1 dag uitharding is een verhoogde buigsterkte waarneembaar op Figuur 4-49, bij mengsels met macrovezels ten opzichte van mengsels zonder vezels. Dit wordt verklaard door de actieve geopolymerisatie in deze vroege fase, waarbij het zich sterk hecht aan de vezels en deze als microverankering functioneren. Na verloop van tijd (7 dagen en verder) neemt de buigsterkte echter af in vergelijking met het referentiemengsel zonder vezels. Deze daling wordt mogelijk veroorzaakt door een verminderde matrixcompactheid, de aanwezigheid van luchtinsluitingen rond de vezels en een verstoorde microstructuur. Hoewel de buigsterkte lager ligt, resulteert de vezelinbreng wel in een minder bros en gecontroleerde breukgedrag.



Figuur 4-49: Invloed van de gewichtshoeveelheid van PP-vezels op de buigsterkte

Opvallend is dat bij mengsels met macrovezels zelfs na een sterkteverlies van 20 %, visueel geen duidelijke breuk waarneembaar was zoals weergegeven in Figuur 4-51 ten opzicht van een mengsel zonder vezels waar brosse breuk optreed zoals weergegeven in Figuur 4-50. Het proefstuk bleef als één geheel intact, zonder open scheuren of losgekomen delen. Dit wijst op een aanzienlijk verbeterd scheurcontrolemechanisme en verhoogde taaiheid dankzij de vezels, ondanks de lagere gemeten buigsterkte op latere tijdstippen.



Figuur 4-50: Mengsel zonder vezel na de buigsterkteproef



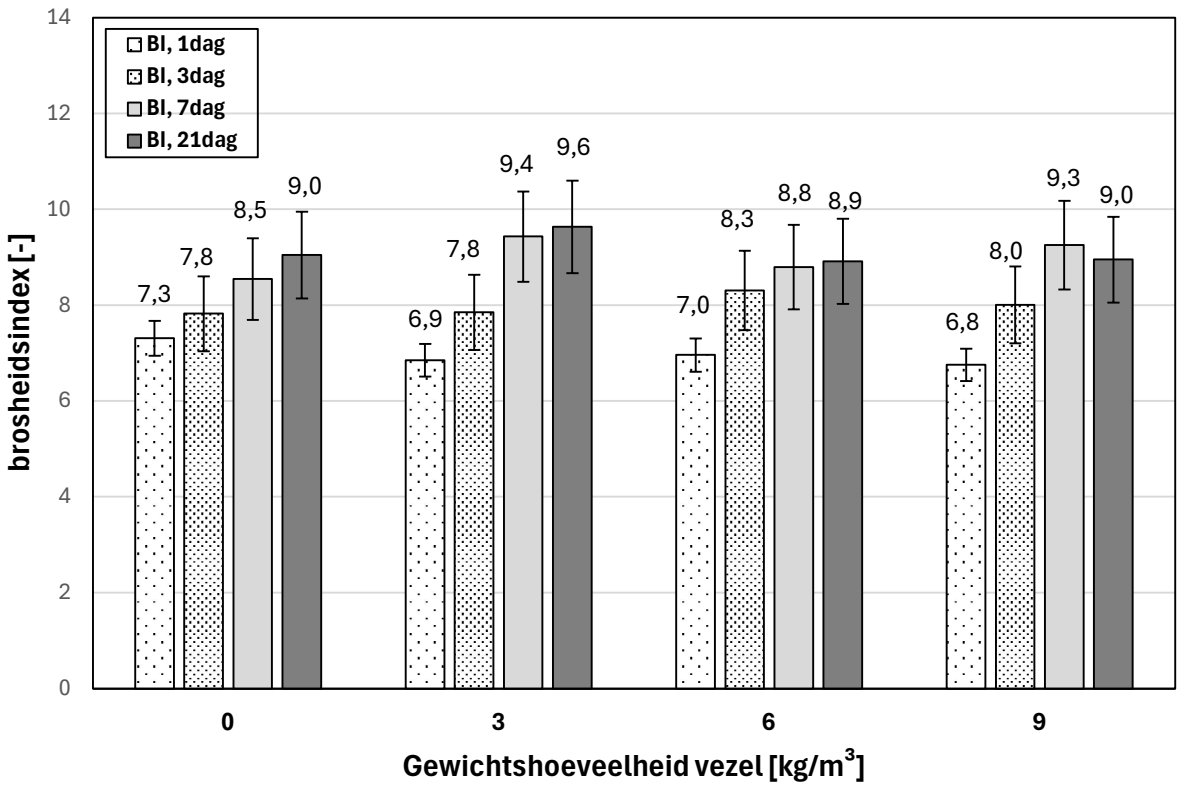
Figuur 4-51: Mengsel met PP-vezel na de buigsterkteproef

Hoewel het mengsel met macrovezels een hogere brosheidsindex vertoonde dan het mengsel zonder vezels (respectievelijk 9,2 tegenover 8,5) wat zou moeten resulteren in een hogere brosheid, werd tijdens de druk- en buigproeven een opvallend verschil in breukgedrag waargenomen op Figuur 4-52. Waar het niet-versterkte mengsel bij falen abrupt en volledig uiteenspatte, bleef het vezelversterkte proefstuk opmerkelijk genoeg structureel intact. Zelfs bij een belasting waarbij meer dan 20 % van de pieksterkte werd overschreden, was visueel nauwelijks schade zichtbaar, en bleef de balk als één geheel behouden zoals eerder aangetoond.

Deze observatie duidt op de scheurbeperkende werking van de macrovezels. Na het ontstaan van een scheur zorgen de vezels voor een mechanische overbrugging, waardoor de verdere uitbreiding van scheuren en fragmentatie wordt afgeremd. Dit gedrag is typerend voor macrovezel versterkte systemen en leidt tot een verhoogde taaiheid en energieabsorptiecapaciteit, ondanks dat dit niet tot uiting komt in klassieke sterkteverhoudingen.

Bovendien blijkt uit de resultaten dat reeds bij een relatief lage dosering van 3 kg/m³ PP-macrovezels een merkbaar verschil optreedt in breukmechanisme. Dit benadrukt dat zelfs kleine hoeveelheden vezels kunnen leiden tot aanzienlijk veiliger en gecontroleerder falen van het materiaal, wat in toepassingen met verhoogde veiligheidseisen of risico op dynamische belasting als positief moet worden beschouwd.

Samenvattend kan gesteld worden dat de brosheidsindex op zichzelf onvoldoende is om het gedrag van vezelversterkte AAM correct te beschrijven. Aanvullende parameters, zoals residuele buigsterkte, taaiheidindex of energieabsorptie, zijn noodzakelijk om het effect van macrovezels op het breukgedrag volledig te kunnen evalueren.



Figuur 4-52: Invloed van de gewichtshoeveelheid van PP-vezels op de brosheidsindex

4.5.3 Samenvatting

De BI, die gedefinieerd wordt als de verhouding tussen druk- en buigsterkte, is een nuttige parameter voor het inschatten van bros gedrag in traditionele, homogene materialen. In vezelversterkte mengsels geeft deze index echter slechts een beperkt beeld. De BI houdt immers geen rekening met post-piekgedrag, vervormingscapaciteit of het energieabsorberend vermogen van het materiaal. Factoren waarin macrovezels juist een belangrijke rol spelen. Een stijging in BI betekent in dit geval dus niet noodzakelijk dat het materiaal ook werkelijk brosser faalt.

In de eerste fase van het uithardingsproces, met name tussen dag 1 en dag 7, is de geopolymerisatie nog sterk actief. Tijdens deze periode fungeert de AAM als een soort lijm die zich hecht rond de vezels, wat zorgt voor een goede aanhechting en een verhoogde samenhang binnen de matrix. Dit verlijmend effect draagt bij aan de initiële mechanische sterkte. Na ongeveer 7 dagen neemt dit effect geleidelijk af, waardoor het materiaal een brosser karakter vertoont. De verminderde hechting leidt tot een minder efficiënte spanningsoverdracht tussen vezels en matrix.

5 CONCLUSIE

5.1 Invloed van de vezels

Uit dit onderzoek blijkt dat de toevoeging van natuurlijke vezels, in het bijzonder vlasvezels en PP-macrovezels, aan AAM op basis van gerecycleerd bouw- en slooppuin een meetbare invloed heeft op zowel de verse als de mechanische eigenschappen van het materiaal.

Op vlak van verwerkbaarheid is er een duidelijke daling in vloeibaarheid waarneembaar bij toevoeging van vezels, zowel bij macrovezels als bij natuurlijke vezels. In het geval van PP-macrovezels is deze afname vooral toe te schrijven aan een mechanisch effect: de langere, stijvere vezels vormen een netwerkstructuur in de mortel die de pasta als het ware vasthoudt en de stroming actief belemmert.

Bij vlasvezels is het effect op de vloeibaarheid eveneens merkbaar, zij het om een andere reden. De fijne, sterk vertakte structuur van vlasvezels vergroot het specifiek oppervlak aanzienlijk, waardoor er meer pasta nodig is om de vezels volledig te omhullen. Bovendien kunnen vlasvezels, ondanks voorafgaande voorbehandeling, in beperkte mate water opnemen. In combinatie met hun vezelnetwerk zorgen deze factoren voor een verminderde vloei en minder plastische verwerking.

Wat betreft de mechanische eigenschappen leidt vezelversterking tot beperkte maar interessante effecten. De toevoeging van vlasvezels en macrovezels resulteert in een lichte initiële toename in buigsterkte, voornamelijk binnen de eerste 24 uur. Deze stijging kan worden toegeschreven aan de actieve geopolymerisatie, waarbij de pasta sterk hecht aan de vezels en als een lijm functioneert. In deze vroege fase (dag 1 tot dag 7) is de matrix nog plastisch en reageert intens, waardoor de vezels effectief bijdragen aan de spanningsverdeling.

Na deze periode neemt de buigsterkte echter weer af of blijft gelijk in vergelijking met mengsels zonder vezels. Dit wijst op het ontstaan van negatieve neveneffecten, zoals een toename in porositeit, luchtinsluitingen en een verminderde matrixcompactheid door de aanwezigheid van vezels. Voor de druksterkte is er zelfs een lichte daling waarneembaar bij vezeltoevoeging, wat eveneens te wijten is aan de verstoring van de homogene matrixstructuur.

De BI toont numeriek weinig verschil tussen mengsels met en zonder vezels. Toch werd tijdens de mechanische testen een duidelijk verschil in breukgedrag vastgesteld. Mengsels zonder vezels vertoonden een typisch explosief, abrupt faalgedrag wat kenmerkend is voor brosse AAM. In contrast bleef het mengsel met vlasvezels structureel veel beter intact en bij macrovezel zelf volledig intact. Dit wijst op een grotere scheurbestendigheid en een meer geleidelijke spanningsafbouw dankzij vezelbrugvorming.

De huidige meetmethode voor brosheid, gebaseerd op de BI (= druk/buigsterkteverhouding), houdt echter geen rekening met dit visuele en structurele breukgedrag. Hierdoor wordt de invloed van vezels op de taaiheid en het energie absorberend vermogen onvoldoende weergegeven.

De integratie van vlasvezels en macrovezels in AAM op basis van bouw- en sloopafval interessante verbeteringen kan bieden op vlak van veiligheid, duurzaamheid en scheurcontrole. Toch blijft verdere studie noodzakelijk. Aangezien bestaande meetmethoden zoals de brosheidsindex onvoldoende inzicht geven in het daadwerkelijke faalgedrag,

zijn alternatieve testmethodes nodig om de taaiheid, scheurverloop en post-piekgedrag nauwkeuriger te evalueren en numeriek weer te geven. Dergelijke testen zijn momenteel echter nog niet beschikbaar binnen de faciliteiten van het laboratorium.

5.2 AAM als alternatief van portlandcement

Hoewel AAM een veelbelovend alternatief vormen voor traditionele cementgebonden systemen, vereisen ze een fundamenteel andere aanpak op het vlak van mengontwerp, verwerking en praktische toepassing. Een directe vergelijking tussen Portlandcementmortel en AAM-mortel toont aan dat de verwerkingseigenschappen sterk verschillen zoals weergegeven in Figuur 5-1 en Figuur 5-2.



Figuur 5-1: Portlandcement met 67 % zand



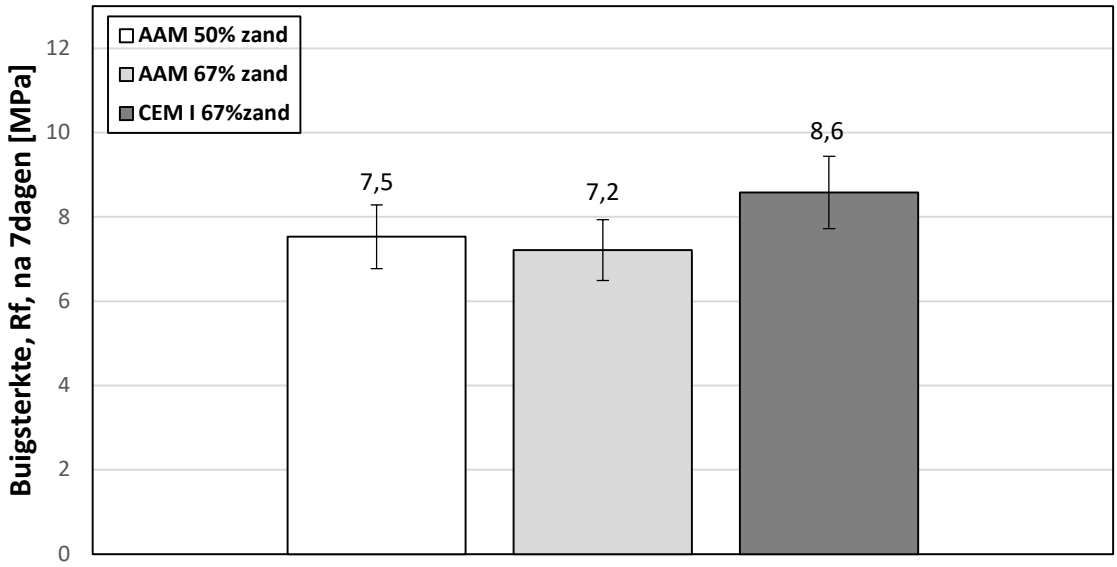
Figuur 5-2: AAM met 67 %zand

In klassieke cementmortels zorgt een zandgehalte van 67 % (conform de norm) voor een plastisch en homogeen mengsel met goede verwerkbaarheid. Het materiaal is eenvoudig te mengen en laat weinig residu achter, wat het reinigen vergemakkelijkt.

AAM daarentegen gedraagt zich eerder als een lijm: de activator bindt sterk aan zanddeeltjes, waardoor het mengsel bij 67 % zand zijn plastische karakter verliest en moeilijk verwerkbaar wordt. Een lager zandgehalte is noodzakelijk voor voldoende werkbaarheid.

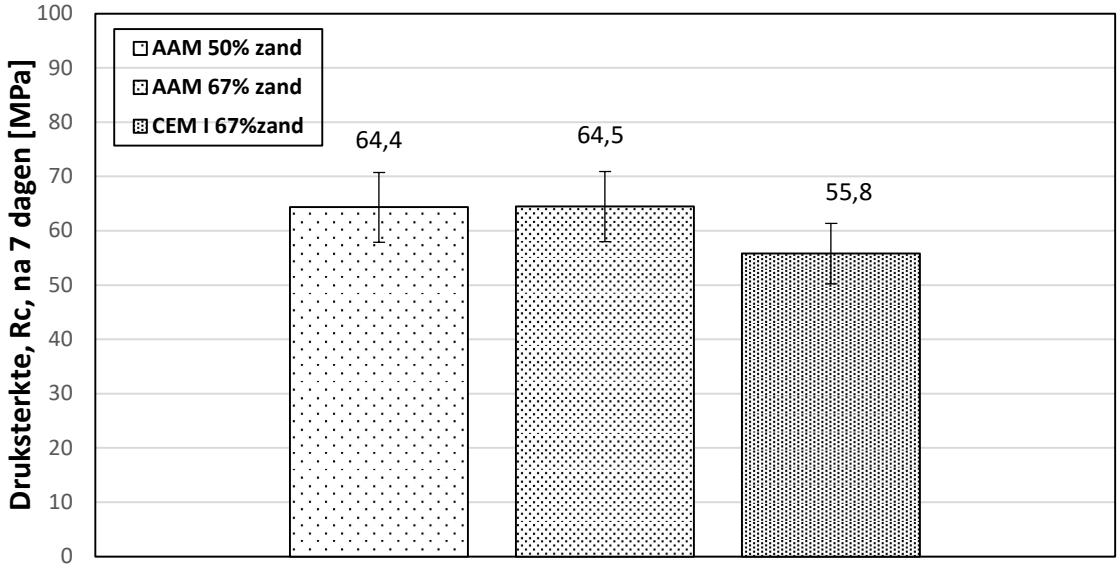
Op basis van de resultaten in Figuur 5-3 kan worden gesteld dat AAM veelbelovende mechanische eigenschappen vertoont in vergelijking met traditionele Portlandcementmortel, specifiek op vlak van buigsterkte. Hoewel de aard en structuur van beide bindmiddelen sterk verschillen, blijkt dat AAM (mits geoptimaliseerd mengontwerp) competitieve prestaties kan leveren.

Voor een eerlijke vergelijking werd het AAM-mengsel vergeleken met Portlandcementmortel onder hun respectieve optimale omstandigheden. Bij Portlandcement werd gewerkt met een zandgehalte van 67 %, conform de norm, wat resulteerde in een goede verwerkbaarheid en een homogeen mengsel. Voor AAM werd gekozen voor een lager zandgehalte van 50 %, aangezien dit in eerdere proeven de beste verwerkbaarheid en homogeniteit opleverde. Ondanks het lagere vulstofgehalte toonde het AAM-mengsel in deze configuratie vergelijkbare buigsterktewaarden dan de traditionele cementmortel. Dit wijst op het potentieel van AAM als volwaardig alternatief voor cementgebonden bindmiddelen, op voorwaarde dat de samenstelling zorgvuldig wordt afgestemd op het materiaalgedrag.



Figuur 5-3: Vergelijking van de buigsterkte na 7 dagen tussen AAM en portlandcement

Naast de eerder besproken verwerkbaarheid en buigsterkte, is ook de druksterkte van de AAM-systemen veelbelovend. Zoals weergegeven in Figuur 5-4, toont het AAM-mengsel met 50 % zand een druksterkte van 64,4 MPa, wat vergelijkbaar is met de 64,5 MPa van het AAM-mengsel met 67 % zand, en aanzienlijk hoger dan de 55,8 MPa van de referentie op basis van CEM I met 67 % zand.



Figuur 5-4: Vergelijking van de druksterkte na 7 dagen tussen AAM en portlandcement

Daarnaast brengt de kleverige, bijna harsachtige aard van AAM praktische uitdagingen met zich mee voor grootschalige toepassingen. Mengapparatuur, stortkokers, mengkommen en andere verwerkingsmiddelen moeten na gebruik veel grondiger worden gereinigd dan bij cementgebonden materialen. Het sterk hechtende karakter van AAM maakt het verwijderen van residu arbeidsintensiever en tijdrovender, wat op industriële schaal de efficiëntie en inzetbaarheid van bestaande apparatuur kan beperken.

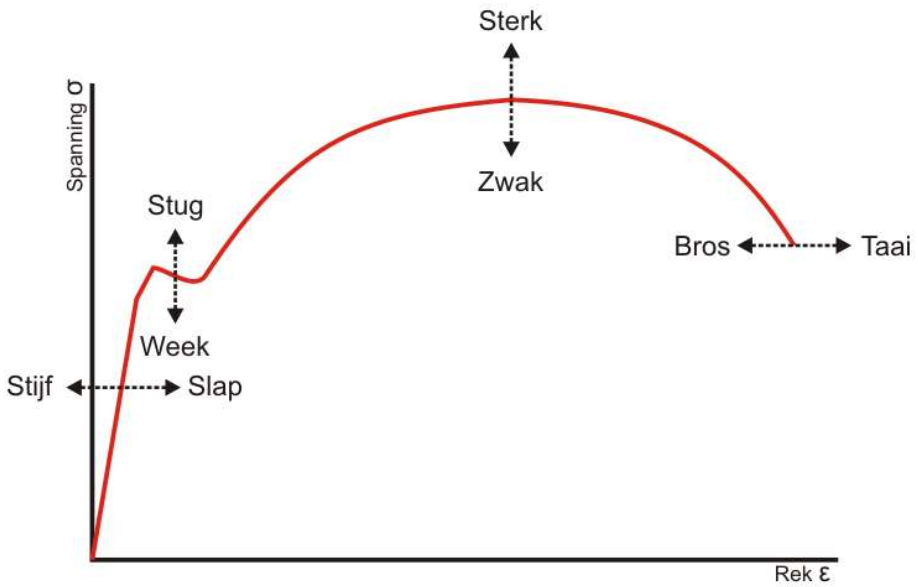
6 VOORSTEL VOOR VERDER ONDERZOEK

6.1 Spanning-rekdiagram

Om een beter inzicht te krijgen in het bros gedrag en de invloed van vezels, biedt het opstellen van een spanning-rekdiagram een duidelijke meerwaarde zoals weergegeven in Figuur 6-1. Dit diagram geeft de relatie weer tussen spanning en rek, wat belangrijk is om de mechanische eigenschappen van het materiaal, zoals de breuksterkte en het faalgedrag, te begrijpen. Bij vezelversterkte AAM-materialen kan dit diagram ook de invloed van de vezels op de scheurweerstand en taaiheid inzichtelijk maken.

Om een betrouwbaar spannings-rekdiagram te verkrijgen, is het essentieel om een geschikte beproevingsmethode te vinden. Extensometers of rekstrookjes kunnen de rek meten, maar bieden geen informatie over de lokale vervorming of scheurvorming. Daarom kan het gebruik van Beeldcorrelatie (DIC), waarmee de rek over het gehele oppervlak van het materiaal wordt gemeten, van cruciaal belang zijn om een gedetailleerd en nauwkeurig diagram te verkrijgen.

De uitdaging ligt in het correct synchroniseren van de krachtmeting en de deformatie om zo een representatief spannings-rekdiagram te verkrijgen. Dit kan alleen worden bereikt door het gebruik van geavanceerde testapparatuur die zowel de globale als lokale eigenschappen van het materiaal meet. Verder onderzoek zal zich moeten richten op het ontwikkelen van beproevingsmethoden die deze gegevens effectief combineren, zodat het volledige gedrag van vezelversterkte AAM-materialen nauwkeurig kan worden vastgelegd.



Figuur 6-1: Indeling van een spanning-rekdiagram [230]

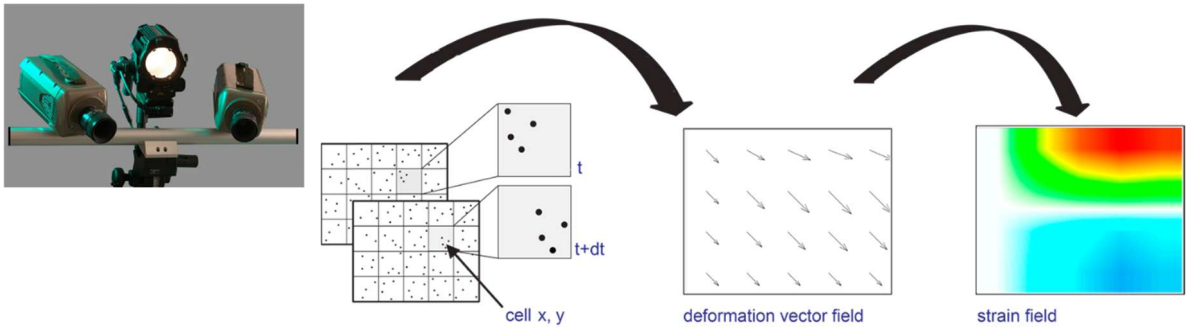
6.1.1 Beeldcorrelatie

DIC is een geavanceerde, niet-destructieve meettechniek waarmee de lokale vervormingen van een materiaaloppervlak zeer nauwkeurig kunnen worden bepaald tijdens belasting. De techniek maakt gebruik van twee gesynchroniseerde camera's en een lichtbron om continu het oppervlak van een specimen op te nemen (zie Figuur 6-2). Hiervoor wordt het proefstuk vooraf gemarkeerd met een willekeurig stippenpatroon (vaak een zwarte spray op een witte ondergrond), wat de software in staat stelt om verplaatsingen en rekverdelingen over het volledige oppervlak te detecteren.

Tijdens het experiment vergelijkt de DIC-software de verplaatsing van deze stippen tussen opeenvolgende beeldframes en genereert daaruit een volledig driedimensionaal vervormingsveld. In tegenstelling tot klassieke rekstrookjes, die slechts lokale rek op één punt meten, maakt DIC het mogelijk om het volledige rekveld in kaart te brengen. Dit is bijzonder waardevol bij materialen zoals AAM, waarbij scheurinitiatie en -voortplanting lokaal kunnen variëren.

De belangrijkste uitdaging bij het gebruik van DIC in mechanische testen is het koppelen van deze optisch gemeten vervormingen aan de bijbehorende krachten, gemeten via een load cell. Om een betrouwbaar spanning-rekdiagram op te stellen, moeten namelijk zowel de rek als de bijbehorende spanning op exact hetzelfde moment worden geregistreerd. Dit vereist een nauwkeurige synchronisatie tussen het DIC-systeem en het krachtmeetsysteem. In de praktijk betekent dit dat beide systemen moeten worden aangestuurd door een gemeenschappelijk triggersignaal of via een geïntegreerd data-acquisitiesysteem (DAQ) dat gelijktijdige tijdstempels toekent.

Indien deze koppeling succesvol wordt gerealiseerd, maakt DIC het mogelijk om nauwkeurige spanning-rekcurves op te stellen, waarbij bovendien lokale variaties in rek zichtbaar worden gemaakt. Dit is vooral nuttig in het geval van bros gedrag of scheurvorming, waar standaard meetmethodes vaak tekortschieten. DIC biedt daarmee niet alleen een alternatief voor rekstrookjes, maar ook een veel diepgaander inzicht in het mechanische gedrag van materialen zoals vezelversterkte AAM.



Figuur 6-2: Uitvoeringsproces van beelcorrelatie [231]

6.1.2 Extensometers

Extensometers zijn nuttig voor het meten van rek in materialen, vooral bij trek- of drukproeven (zie Figuur 6-3). Ze bieden waardevolle informatie over de rekgrens en elasticiteitsmodulus van vezelversterkte AAM-materialen. Bij het toevoegen van vezels, zoals vlas of macrovezels, kunnen extensometers helpen om te bepalen hoe goed deze vezels het materiaal versterken en het breukgedrag beïnvloeden. Ze meten de globale rek van het materiaal, wat belangrijk is voor het vaststellen van de sterkte en vervormingseigenschappen.

Echter, extensometers hebben beperkingen: ze kunnen alleen de rek op de plaats waar ze zijn gemonteerd meten, wat geen gedetailleerde informatie geeft over lokale vervorming of scheurvorming. Bij materialen zoals vezelversterkte AAM-materialen, waar de rek lokaal sterk kan variëren, biedt DIC een completer beeld door de rek over het hele oppervlak te meten.

Desondanks zijn extensometers nog steeds belangrijk voor het verkrijgen van basisgegevens over mechanische eigenschappen en het verifiëren van de impact van vezels op de sterkte van het materiaal. In combinatie met DIC kunnen extensometers helpen om een dieper inzicht te krijgen in het mechanische gedrag van vezelversterkte AAM-materialen.



Figuur 6-3: Extensometers [232]

6.2 Eenvoudige controlevorming van het geopolymeer mechanisme

Om te verifiëren of de geopolymerisatie succesvol is verlopen en het materiaal inderdaad een geopolymeer is in plaats van een AAM-materiaal, is het nodig om een eenvoudige testmethode te ontwikkelen. De huidige apparaten die nodig zijn voor chemische analyses zijn echter vaak te duur voor routinematig gebruik. Het ontwikkelen van goedkopere testmethoden is noodzakelijk voor de verdere toepassing van geopolymeren in de bouwindustrie.

6.3 Vorst-dooi invloed op AAM op basis van bouw- en slooppuin

Het is essentieel om te onderzoeken hoe geopolymeren, specifiek op basis van bouw- en slooppuin, reageren op vries-dooi cycli. Deze informatie helpt te begrijpen hoe deze materialen bestand zijn tegen klimaatveranderingen en mogelijke schade door herhaaldelijke bevriezing en ontdooiing. De invloed van vries-dooi op de duurzaamheid van AAM-materialen moet verder geëvalueerd worden voor praktischer gebruik.

6.4 Nood aan geopolymeer normen

Het ontwikkelen van geopolymeer normen is uitermate belangrijk voor de verdere implementatie van geopolymeren in de bouwsector. De NBN normen zouden als basis kunnen dienen voor een breed scala aan geopolymeren, aangezien er veel verschillende methoden zijn om een geopolymeer te produceren. Wanneer er een algemene norm is, vergemakkelijkt dit verder onderzoek en de industrieel gebruik van geopolymeren.

6.5 Recyclage van AAM-beton

De recyclage van AAM-beton is een belangrijk onderwerp, vooral als het gaat om de duurzaamheid en milieueffecten van deze materialen. Het is van belang om te onderzoeken of AAM-beton een gevaarlijk materiaal vormt voor het milieu en de gezondheid, met name bij de afbraak of verwerking van het materiaal. Verder onderzoek naar de impact van AAM-beton op het milieu is noodzakelijk om de veiligheid en de langetermijn oplossingen te waarborgen.

6.6 Gebruik van andere vezelsoorten

Er is ook interesse in het gebruik van andere vezels in AAM-materialen, zoals menselijk haar. Dit kan een duurzame en goedkope alternatieve bron van vezels zijn voor versterking van geopolymeren. Onderzoek naar het effect van dergelijke vezels op de mechanische eigenschappen en het breukgedrag van geopolymeren zou nieuwe mogelijkheden kunnen openen voor circulaire bouwmaterialen.

6.7 Vermoeiingsgedrag van AAM

Het vermoeiingsgedrag van geopolymeren is een belangrijk aspect om te onderzoeken, vooral wanneer deze materialen in structuren worden gebruikt die onder repetitieve belasting staan. Het vermogen van geopolymeren om vermoeiing te weerstaan, is cruciaal voor hun langetermijn prestatie en betrouwbaarheid in bouwtoepassingen. Verdere testen en analyses zijn nodig om inzicht te krijgen in hoe deze materialen zich gedragen onder langdurige, herhaalde belastingen.

Referentielijst

[1] Energieambassadeur Nijmegen, “Broeikaseffect, hoe zit het eigenlijk met CO2,” 16 mei 2021. Accessed: Oct. 29, 2024. [Online]. Available: https://energieambassadeurnijmegen.nl/blog/2021/05/16/broeikaseffect-hoe-zit-het-eigenlijk-met-co2/

[2] De duurzame adviseurs, “7 zichtbare gevolgen van wereldwijde CO2-uitstoot,” De duurzame adviseurs. Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: https://deduurzameadviseurs.nl/co2-uitstoot-gevolgen/

[3] Vlaamse milieumaatschappij, “Zeespiegelstijging.” Accessed: Oct. 29, 2024. [Online]. Available: https://klimaat.vmm.be/themas/zeespiegelstijging#section-0

[4] Nationaal Crisiscentrum, “Hittegolf & Droogte.” Accessed: Oct. 29, 2024. [Online]. Available: https://crisiscentrum.be/nl/risicos-belgie/natuurlijke-risicos/hittegolf

[5] J. De Vente, S. De Baets, J. Poesen, G. Govers, O. Fysische, and R. Geografie, “Wordt Spanje een woestijn ?” Accessed: May 22, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/265677642_Wordt_Spanje_een_woestijn

[6] WWF, “Bosbranden & ontbossing”, Accessed: Oct. 29, 2024. [Online]. Available: https://www.wwf.nl/wat-we-doen/focus/bossen/bosbranden

[7] F. Boekhorst, C. Savona-Ventura, T. Mahmood, and S. Mukhopadhyay, “The effects of climate change and environmental pollution on human reproduction: A scientific review commissioned by the European Board and College of Obstetrics and Gynaecology (EBCOG),” *European Journal of Obstetrics and Gynecology and Reproductive Biology*, vol. 301, pp. 19–23, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.ejogrb.2024.07.030.

[8] Europese Unie, “Europese green deal - onze doelstellingen bereiken,” 2021. Accessed: May 22, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/869824/EGD_brochure_NL.pdf

[9] AmCham EU, “Europese Green Deal.” Accessed: Nov. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.amchameu.eu/policy-areas/european-green-deal

[10] J. Chen, Y. Wang, Q. Shi, X. Peng, and J. Zheng, “An international comparison analysis of CO2 emissions in the construction industry,” *Sustainable Development*, vol. 29, no. 4, pp. 754–767, Jul. 2021, doi: 10.1002/sd.2172.

[11] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei, and A. Bahadori, “Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry,” Jul. 15, 2013, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.10.049.

[12] Y. Wang, Z. Wang, D. Lei, C. Zang, and D. Guo, “Technology verification of Portland cement clinker production driven by concentrated solar energy directly,” *Renew Energy*, vol. 232, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.121064.

[13] P. Cong, R. Du, H. Gao, and Z. Chen, “Comparison and assessment of carbon dioxide emissions between alkali-activated materials and OPC cement concrete,” Oct. 01, 2024, *KeAi Communications Co.* doi: 10.1016/j.jtte.2023.07.011.

[14] L. K. Turner and F. G. Collins, “Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 43, pp. 125–130, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023.

[15] N. Rijkdommen, A. Belgium, L. De Sm, and S. Bogaert, “Onderzoek duurzame bevoorrading: gebruik lokale oppervlaktedelfstoffen of import van minerale grondstoffen Dienst Natuurlijke Rijkdommen,” 2009.

[16] R. Dreesen *et al.*, “In het voetspoor van Camerman: de opmars van de Franse steen in België,” 2012.

[17] Febelcem, “De cementproductie.” Accessed: Dec. 27, 2024. [Online]. Available: https://www.febelcem.be/nl/cement-beton/de-cementproductie/

[18] geologyscience, “Kalksteen.” Accessed: Apr. 05, 2025. [Online]. Available: https://nl.geologyscience.com/rotsen/sedimentair-gesteente/kalksteen/

[19] Artimar, “Kalksteen”, Accessed: Apr. 05, 2025. [Online]. Available: https://artimar.be/kalksteen

[20] Bouwencyclopedie, “Klei”, Accessed: Apr. 07, 2025. [Online]. Available: https://bouwencyclopedie.nl/term/definition/Klei

[21] Wikipedia, “Klei.” Accessed: Apr. 07, 2025. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Klei

[22] YBMC, “Rode klei – leem poeder ultra fijn”, Accessed: Apr. 07, 2025. [Online]. Available: https://ybmc.nl/product/rode-klei-leem-poeder-ultra-fijn/

[23] Wikipedia, “cementoven antoing.” Accessed: Feb. 26, 2025. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Cementoven_Antoing

[24] Departement omgeving - Vlaamse Overheid, “Inzet minerale grondstoffen blijft vrij constant,” Departement omgeving, Vlaamse Overheid. Accessed: Dec. 27, 2024. [Online]. Available: https://indicatoren.omgeving.vlaanderen.be/indicatoren/inzet-minerale-grondstoffen?

[25] Vlaanderen, “Vlaamse delfstoffen - Klei en leem.” Accessed: Apr. 07, 2025. [Online]. Available: https://www.vlaanderen.be/ik-doorgrond-vlaanderen/vlaamse-delfstoffen-klei-en-leem

[26] A. Jacobs, K. Vrancken, J. Van Dessel, and W. Adams, “Algemene verspreiding Beste Beschikbare Technieken (BBT) voor de ontginning van zand, grind, leem en klei.” [Online]. Available: http://www.emis.vito.be

[27] Bouwkroniek, “Gescheiden inzameling bouw- en sloopafval verplicht vanaf 1 juli.” Accessed: Dec. 23, 2024. [Online]. Available: https://bouwkroniek.be/management/gescheiden-inzameling-bouw--en-sloopafval-verplicht-vanaf-1-juli-51619

[28] Odylhouse, “De milieu-impact van de woningbouw- en bouwsector toegelicht.” Accessed: Dec. 23, 2024. [Online]. Available: https://odylhouse.com/nl/impact-woningbouwsector

[29] OVAM, “Gescheiden inzameling bouw- en sloopafval verplicht vanaf 1 juli”, Accessed: Dec. 23, 2024. [Online]. Available: https://ovam.vlaanderen.be/nl/w/gescheiden-inzameling-bouw-en-sloopafval-verplicht-vanaf-1-juli

[30] C. Luangcharoenrat, S. Intrachooto, V. Peansupap, and W. Sutthinarakorn, “Factors influencing construction waste generation in building construction: Thailand’s perspective,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 13, Jul. 2019, doi: 10.3390/su11133638.

[31] Energieverlijk, “Circulaire economie.” Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: https://www.energievergelijk.nl/onderwerpen/circulaire-economie

[32] P. Office of the European Union L- and L. Luxembourg, “Regulation (EU) 2024/1781 of the european parliament and of the council of establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC (Text with EEA relevance),” Jun. 2024. [Online]. Available: http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj

[33] E. Commission, “Impacts of circular economy policies on the labour market Final report and Annexes,” 2018.

[34] Buildwise, “Circulaire economie.” Accessed: Apr. 05, 2025. [Online]. Available: https://www.buildwise.be/nl/themas/duurzaam-bouwen/circulaire-economie/

[35] Vlaanderen Circulaier Bouwen, “Circulaire economie in de Vlaamse bouwsector-kansen en uitdagingen.” Accessed: May 22, 2025. [Online]. Available: https://bouwen.vlaanderen-circulair.be/src/Frontend/Files/userfiles/files/Vlaanderen%20Circulair%20whitepaper%20circulair%20bouwen.pdf

[36] United Nations, “Goal 12: Ensure sustainable consumption and production patterns.” [Online]. Available: https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-consumption-production/

[37] S. Waterbley and V. Van Het Directiecomité, “Financiering van de circulaire economie.”

[38] A. Kustirini, Antonius, and P. Setiyawan, “Confinement Effectiveness on the Strength and Ductility from Geopolymer Concrete,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2024. doi: 10.1088/1755-1315/1321/1/012018.

[39] Jiabin Li, “Portland Cement Lecture 2 [Collegepresentatie]. KU Leuven,” 2023.

[40] Febelcem, “Historisch overzicht Mortel of bindmiddel van metselwerk.” Accessed: Dec. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.febelcem.be/nl/cement-beton/historisch-overzicht/#:~:text=In%201824%20nam%20de%20Engelsman,Portlandsteen%20(Zuid%2DEngeland).

[41] Wikipedia, “ Portlandsteen.” Accessed: Dec. 15, 2024. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Portlandsteen#:~:text=Portlandsteen%20is%20een%20witte%20zandhoudende,is%20afgezet%20in%20het%20Jura.

[42] Wikipedia, “Dorset.” Accessed: Dec. 15, 2024. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Dorset

[43] MA-trading, “Portland Cement Klinker.” Accessed: Dec. 15, 2024. [Online]. Available: https://ma-trading.nl/product/portland-cement-klinker/

[44] Wikipedia, “Cement clinker.” Accessed: Dec. 23, 2024. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Cement_clinker

[45] Ecocem, “Cement - Raising ambitions reducing emissions.”

[46] enastasiam146712, “structuur van sedimentair kalksteen rots met schelpen Pro Foto”, Accessed: Dec. 15, 2024. [Online]. Available: https://nl.vecteezy.com/foto/25015592-structuur-van-sedimentair-kalksteen-rots-met-schelpen

[47] Wikipedia, “Schalie (gesteente).” Accessed: Dec. 15, 2024. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Schalie_(gesteente)

[48] Wikipedia, “Klei.” Accessed: Dec. 15, 2024. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Klei

[49] Betonlexicon, “Calcinatie.” Accessed: Dec. 16, 2024. [Online]. Available: https://www.betonlexicon.nl/C/Calcinatie

[50] M.V.A. Florea, “Secondary materials applied in cement-based products : treatment, modelling and environmental interaction,” 2014, doi: 10.6100/IR772902.

[51] Y. Ye *et al.*, “Effect of nano-magnesium oxide on the expansion performance and hydration process of cement-based materials,” *Materials*, vol. 14, no. 13, Jul. 2021, doi: 10.3390/ma14133766.

[52] M. D. A. Thomas and K. J. Folliard, “Concrete aggregates and the durability of concrete”.

[53] Betonlexicon, “Alkali-silicareactie.” Accessed: Dec. 17, 2024. [Online]. Available: https://www.betonlexicon.nl/A/Alkali-silicareactie

[54] G. Diamantopoulos *et al.*, “The Role of Titanium Dioxide on the Hydration of Portland Cement: A Combined NMR and Ultrasonic Study,” *Molecules*, vol. 25, no. 22, Nov. 2020, doi: 10.3390/MOLECULES25225364.

[55] H. F. W. taylor, “Cement chemistry”.

[56] Jaibin Li, “Portland Cement Lecture 2, betontechnologie [Collegepresentatie]. KU Leuven,” 2023.

[57] NBN, “NBN EN normen.” Accessed: May 22, 2025. [Online]. Available: https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/all-standards?lang=nl&_gl=1*1xiojg6*_up*MQ..*_gs*MQ..&gclid=Cj0KCQjwlrvBBhDnARIsAHEQgOQHML7QQrOAogQB-YY1KjRFXaEx6YsHrxIJvCsAOoPwzT6RH2cqQ9EaAl98EALw_wcB&gbraid=0AAAADsB_83qMuF8GJcg2g9tRDbAy6R-_

[58] Betonhuis communicatie, “Cementnormen: EN 197-1, EN 197-5 en EN 197-6.”

[59] Febelcem, “Kwaliteit van cement”, Accessed: Dec. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.febelcem.be/nl/cement-beton/kwaliteit-van-cement/

[60] FOD Economie, “De CE-markering en de prestatieverklaring.” Accessed: Apr. 05, 2025. [Online]. Available: https://economie.fgov.be/nl/themas/ondernemingen/specifieke-sectoren/bouw/bouwproducten/de-verhandeling-van

[61] Benor, “Trouw aan kwaliteit.” Accessed: Apr. 05, 2025. [Online]. Available: https://www.benor.be/nl/benor-vzw/benor-label/

[62] Febelcem, “Kwaliteit van cement.” Accessed: Apr. 05, 2025. [Online]. Available: https://www.febelcem.be/nl/cement-beton/kwaliteit-van-cement/

[63] ugent, “NBN”, Accessed: Dec. 15, 2024. [Online]. Available: https://ea18.ugent.be/static/services/io-digitaal/nbn.html

[64] Benor, “Benor-label.” Accessed: Dec. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.benor.be/nl/benor-vzw/benor-label/

[65] N. Hulsbosch, “TV 285-"Uitvoering van betonconstructies" Regels van de kunst.” [Online]. Available: https://www.buildwise.be/nl/publicaties/technische-voorlichtingen/285/

[66] Factsheet Betonwegen, “Betonwegen worden gemaakt met lokale grondstoffen, hebben een lange levensduur en zijn 100% recycleerbaar”.

[67] O.B.B.C., “recyclage van bouwpuin.” Accessed: Apr. 05, 2025. [Online]. Available: https://www.obbc.be/nl/historiek

[68] T. Ye, J. Xiao, Z. Duan, and S. Li, “Geopolymers made of recycled brick and concrete powder – A critical review,” May 02, 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127232.

[69] Change Inc., “Beton repareert zichzelf door CO2 uit de lucht te halen.” Accessed: Apr. 05, 2025. [Online]. Available: https://www.change.inc/infra/beton-repareert-zichzelf-door-co2-uit-de-lucht-te-halen-36549

[70] A. Buchwald, M. Vanooteghem, E. Gruyaert, H. Hilbig, and N. De Belie, “Purdocement: application of alkali-activated slag cement in Belgium in the 1950s,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 48, no. 1–2, pp. 501–511, 2015, doi: 10.1617/s11527-013-0200-8.

[71] A. Buchwald, M. Vanooteghem, E. Gruyaert, H. Hilbig, and N. De Belie, “Purdocement: application of alkali-activated slag cement in Belgium in the 1950s,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 48, no. 1–2, pp. 501–511, 2015, doi: 10.1617/s11527-013-0200-8.

[72] D. Jia, · Peigang He, M. Wang, and S. Yan, “Springer Series in Materials Science 311 Geopolymer and Geopolymer Matrix Composites.” [Online]. Available: http://www.springer.com/series/856

[73] About Joseph, “ Joseph Davidovits.” Accessed: Apr. 08, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Joseph-Davidovits

[74] joseph davidovits, “the PYRAMIDS.” Accessed: Apr. 08, 2025. [Online]. Available: https://archive.org/details/pyramidsenigma00davi/page/n5/mode/2up

[75] J. P. Hos, P. G. Mccormick, and L. T. Byrne, “Investigation of a synthetic aluminosilicate inorganic polymer.”

[76] Dr.-Ing. Anja Buchwald, “Geopolymeer binder - en hun bijdrage voor het halen van het Betonakkoord”.

[77] P. Nath and P. K. Sarker, “Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature,” *Cem Concr Compos*, vol. 55, pp. 205–214, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.08.008.

[78] D. Khale and R. Chaudhary, “Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review,” *J Mater Sci*, vol. 42, no. 3, pp. 729–746, Feb. 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0401-4.

[79] P. and H. Dr. T.Ch.Madhavi and A. P. (Sr G. Rameshwaran P.M, “Geopolymer Concrete - The Eco Friendly Alternate to Concrete,” https://www.nbmcw.com/. Accessed: Dec. 13, 2024. [Online]. Available: https://www.nbmcw.com/product-technology/construction-chemicals-waterproofing/concrete-admixtures/geopolymer-concrete-the-eco-friendly-alternate-to-concrete.html

[80] Geopolymer institute, “World’s first public building with structural Geopolymer Concrete.” Accessed: Apr. 08, 2025. [Online]. Available: https://www.geopolymer.org/news/worlds-first-public-building-with-structural-geopolymer-concrete/

[81] D. Jia, · Peigang He, M. Wang, and S. Yan, “Springer Series in Materials Science 311 Geopolymer and Geopolymer Matrix Composites.” [Online]. Available: http://www.springer.com/series/856

[82] C. Sotelo-Piña, E. N. Aguilera-González, and A. Martínez-Luévanos, “Geopolymers: Past, Present, and Future of Low Carbon Footprint Eco-Materials,” in *Handbook of Ecomaterials*, Springer International Publishing, 2018, pp. 1–21. doi: 10.1007/978-3-319-48281-1_54-1.

[83] M. I. M. Alzeer, H. Nguyen, C. Cheeseman, and P. Kinnunen, “Alkali-Activation of Synthetic Aluminosilicate Glass With Basaltic Composition,” *Front Chem*, vol. 9, Aug. 2021, doi: 10.3389/fchem.2021.715052.

[84] Ugent, “NBN”, Accessed: Dec. 15, 2024. [Online]. Available: https://ea18.ugent.be/static/services/io-digitaal/nbn.html

[85] Betase BV, “Materiaalkunde in een notendop.” Accessed: Apr. 08, 2025. [Online]. Available: https://www.betase.nl/materiaalkunde-in-een-notendop/

[86] Shutterstock, “neutraal atoom.” Accessed: Apr. 08, 2025. [Online]. Available: https://www.shutterstock.com/nl/image-vector/cations-anions-neutral-atom-becomes-ion-1230166834

[87] chemieleerkracht, “Reactie van natriumhydroxidekorrels en aluminium.” Accessed: Dec. 14, 2024. [Online]. Available: http://chemieleerkracht.blackbox.website/index.php/reactie-van-natriumhydroxidekorrels-en-aluminium/

[88] P. Cong and Y. Cheng, “Advances in geopolymer materials: A comprehensive review,” Jun. 01, 2021, *Chang’an University*. doi: 10.1016/j.jtte.2021.03.004.

[89] Chemieleerkracht, “Bereiding van een tijdelijke crosslinked polymeer.” Accessed: Apr. 09, 2025. [Online]. Available: http://chemieleerkracht.blackbox.website/index.php/bereiding-van-een-tijdelijke-crosslinked-polymeer/

[90] Y. Liao *et al.*, “Preparation and adsorption properties of microsphere geopolymers derived from calcium carbide slag and fly ash,” *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-85749-x.

[91] D. Jia, · Peigang He, M. Wang, and S. Yan, “Springer Series in Materials Science 311 Geopolymer and Geopolymer Matrix Composites.” [Online]. Available: http://www.springer.com/series/856

[92] L. Chen, K. Liu, P. Han, B. Yang, and L. Feng, “Effects of Li2O on Structure and Viscosity of CaO-Al2O3-Based Mold Fluxes,” *J Chem*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6674453.

[93] Wikipedia, “Regelmatig viervlak.” Accessed: Apr. 08, 2025. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Regelmatig_viervlak

[94] N. Yang *et al.*, “Phosphate activated geopolymer-based coating with high temperature resistance for sub-ambient radiative cooling,” *Sustain Cities Soc*, vol. 100, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.scs.2023.104992.

[95] N. Yang *et al.*, “Phosphate activated geopolymer-based coating with high temperature resistance for sub-ambient radiative cooling,” *Sustain Cities Soc*, vol. 100, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.scs.2023.104992.

[96] H. Zeng *et al.*, “Comparative study on the preparation of phosphate-based geopolymers using different activators,” *Constr Build Mater*, vol. 437, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137000.

[97] J. Davidovits, “Why Alkali-activated materials (AAM) are not geopolymers?”, doi: 10.13140/RG.2.2.34337.25441.

[98] L. K. Turner and F. G. Collins, “Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 43, pp. 125–130, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023.

[99] A. Y. F. Ali, S. A. Ahmed, and M. S. El-Feky, “Alkali-activated concrete with expanded polystyrene: A lightweight, high-strength solution for fire resistance and explosive protection,” *Journal of Building Engineering*, vol. 99, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.jobe.2024.111648.

[100] Z. Zhang, J. L. Provis, A. Reid, and H. Wang, “Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete,” *Cem Concr Compos*, vol. 62, pp. 97–105, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.03.013.

[101] Wouter Bottle, “Invloed van versnelde koeling op betonstructuren blootgesteld aan brand,” 2012.

[102] R. P. Singh, K. R. Vanapalli, K. Jadda, and B. Mohanty, “Durability assessment of fly ash, GGBS, and silica fume based geopolymer concrete with recycled aggregates against acid and sulfate attack,” *Journal of Building Engineering*, vol. 82, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2023.108354.

[103] Pavement interactive, “Portland Cement Setting Time”, Accessed: Dec. 01, 2024. [Online]. Available: https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/cement-tests/portland-cement-setting-time/

[104] Advancing standard transforming market, “Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle,” Oct. 01, 2021, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/C0191-21.

[105] H. Eghbaljoo *et al.*, “Analysis of polychlorinated biphenyls (PCBs) in edible oils using the QuEChERS/GC-MS method: A health risk assessment study,” *Heliyon*, vol. 9, no. 11, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e21317.

[106] Arjan Wijdeveld and Kim Gommans, “Alternatieve en eventueel duurzamere bouwmaterialen en/of componenten voor cement”.

[107] W. K. Part, M. Ramli, and C. B. Cheah, “An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products,” Feb. 15, 2015, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.065.

[108] de bouwencyclopedie, “geopolymeer beton.” Accessed: Apr. 09, 2025. [Online]. Available: https://bouwencyclopedie.nl/term/definition/Geopolymeer%20beton

[109] H. (België and N. V. / Fabriek Obourg, “CEM I 52,5 N (ng) Hoogperformant cement.” [Online]. Available: www.holcim.be

[110] “Aantasting van beton door sulfaten.” [Online]. Available: www.cementenbeton.nl

[111] Febelcem, “Uitbloeiing en uitslag.”

[112] National Libarary of Medicine, “Sodium Hydroxide.” Accessed: Dec. 22, 2024. [Online]. Available: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/14798

[113] Aakash, “structure of sodium hydroxide.” Accessed: Dec. 22, 2024. [Online]. Available: https://www.aakash.ac.in/important-concepts/chemistry/sodium-hydroxide

[114] Lennetch, “Membrane cell process for chlor alkali production.” Accessed: Dec. 22, 2024. [Online]. Available: https://www.lenntech.nl/applications/membrane-cell-process-for-chlor-alkali-production.htm

[115] Wikipedia, “Chloralkali membrane.svg.” Accessed: Apr. 11, 2025. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Chloralkali_membrane.svg

[116] Studeersnel, “De oploswarmte van natriumhydroxide en deinvloed van de hoeveelheid water hierop.” Accessed: Dec. 22, 2024. [Online]. Available: https://www.studeersnel.nl/nl/document/universiteit-utrecht/basis-scheikunde-vwo3/de-oploswarmte-van-natriumhydroxide-en-de-invloed-van-de-hoeveelheid-water-hierop/80032443

[117] Comptox, “Sodium silicate.” Accessed: Apr. 11, 2025. [Online]. Available: https://comptox.epa.gov/dashboard/chemical/details/DTXSID7029669

[118] Joostdevree, “Waterglasinjectie.” Accessed: Apr. 11, 2025. [Online]. Available: https://www.joostdevree.nl/shtmls/waterglasinjectie.shtml

[119] DVC watergroep, “Achtergrond informatie over anti-roest Gel (natron waterglas)”.

[120] Wikipedia, “Natriumsilicaat.” Accessed: Apr. 11, 2025. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Natriumsilicaat

[121] Chem-libretexts, “5.13: Industriële chemische reacties - Het Solvay-proces.” Accessed: Dec. 24, 2024. [Online]. Available: https://chem-libretexts-org.translate.goog/Bookshelves/Environmental_Chemistry/Green_Chemistry_and_the_Ten_Commandments_of_Sustainability_(Manahan)/05%3A_Chemical_Reactions-_Making_Materials_Safely_and_Sustainable/5.13%3A_Industrial_Chemical_Reactions_-_The_Solvay_Process?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=nl&_x_tr_hl=nl&_x_tr_pto=sc

[122] Britannica, “Haber-Bosch-proces.” Accessed: Dec. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.britannica.com/technology/Haber-Bosch-process

[123] E. Ningsih, S. R. Juliastuti, R. Darmawan, N. Hendrianie, and O. Rachmaniah, “Initial extraction of sodium silicate from sidoarjo mud by alkaline fusion and water leaching,” *Heliyon*, vol. 9, no. 6, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17095.

[124] Chemicalaid, “SiO3 + H2O = HSiO3 + OH - Chemical Equation Balancer.” Accessed: Dec. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.chemicalaid.com/tools/equationbalancer.php?equation=SiO3+%2B+H2O+%3D+HSiO3+%2B+OH&hl=en

[125] K. Srinivasreddy, S. Bala Murugan, B. B. Jindal, and K. S. Vali, “Experimental study on the properties of ternary blended geopolymer rich mortar,” *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 7, no. 2, Apr. 2022, doi: 10.1007/s41062-022-00757-4.

[126] J. Migunthanna, P. Rajeev, and J. Sanjayan, “Waste Clay Bricks as a Geopolymer Binder for Pavement Construction,” Jun. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/su14116456.

[127] Wikipedia, “Vliegas.” Accessed: Apr. 11, 2025. [Online]. Available: https://af.wikipedia.org/wiki/Vliegas

[128] A. Mahmood *et al.*, “Geopolymers and fiber-reinforced concrete composites in civil engineering,” Jul. 01, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/polym13132099.

[129] Intesiv filter, “elektrostatische precipitators.” Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: https://www.intensiv-filter-himenviro.com/nl/oplossingen/elektrostatische-precipitatoren/

[130] T. Hemalatha and A. Ramaswamy, “Fly ash cement,” in *Handbook of Fly Ash*, Elsevier, 2021, pp. 547–563. doi: 10.1016/B978-0-12-817686-3.00016-5.

[131] “Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,” Aug. 01, 2022, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/C0618-22.

[132] Boral resources, “Fly ash types and benefits.”

[133] “Alexander Ivens Van vliegasbeton tot geopolymeerbeton,” 2007.

[134] V. Goenawan, Antoni, and D. Hardjito, “A Preliminary Study on Cracking Tendency of Cement Paste Incorporating High Calcium Fly Ash,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 815, pp. 158–163, Nov. 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.815.158.

[135] P. Chindaprasirt and U. Rattanasak, “Calcium wastes as an additive for a low calcium fly ash geopolymer,” *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-43586-w.

[136] X. Y. Zhuang *et al.*, “Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications,” Jul. 01, 2016, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.03.019.

[137] O. K. Wattimena, Antoni, and D. Hardjito, “A review on the effect of fly ash characteristics and their variations on the synthesis of fly ash based geopolymer,” in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Sep. 2017. doi: 10.1063/1.5003524.

[138] NOS Nieuws, “Laatste Britse kolencentrale van het net.” Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: https://nos.nl/artikel/2539128-laatste-britse-kolencentrale-van-het-net

[139] MARC seijlhouwer, “Kolencentrale in Duitsland sluit na zes jaar alweer zijn deuren om plaats te maken voor waterstof.” Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: https://www.change.inc/energie/kolencentrale-in-duitsland-sluit-na-zes-jaar-alweer-zijn-deuren-om-plaats-te-maken-voor-waterstof-36803

[140] J. Liu, L. Hu, L. Tang, and J. Ren, “Utilisation of municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash with metakaolin for preparation of alkali-activated cementitious material,” *J Hazard Mater*, vol. 402, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123451.

[141] IVM, “Werken bij IVM.” Accessed: Apr. 16, 2025. [Online]. Available: https://www.ivmmilieubeheer.be/werken-bij-ivm

[142] IVM, “IVM folder Restafval verwerken met zorg voor het milieu”.

[143] Vlaamse milieu maatschappij, “Zware metalen.” Accessed: Apr. 15, 2025. [Online]. Available: https://vmm.vlaanderen.be/feiten-cijfers/lucht/overzicht-per-vervuilende-stof/zware-metalen

[144] taylor & Francis, “Immobilization and volume reduction of heavy metals in municipal solid waste fly ash using nano-size calcium and iron-dispersed reagent.” Accessed: Apr. 15, 2025. [Online]. Available: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10962247.2015.1077175

[145] “Op naar een meer circulaire, groenere wereld Renewi plc Duurzaamheidsrapport 2021.”

[146] J. M. Inocente, F. Elyseu, L. J. Jaramillo Nieves, J. Jiusti, M. Cargnin, and M. Peterson, “Production and characterization of high-reactivity metakaolins calcined in flash reactor,” *Appl Clay Sci*, vol. 213, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.clay.2021.106247.

[147] Mikrosilika trade, “metakaolin.” Accessed: Apr. 15, 2025. [Online]. Available: https://mikrosilika-trade.com/en/metakaolin/

[148] B. B. Jindal, T. Alomayri, A. Hasan, and C. R. Kaze, “Geopolymer concrete with metakaolin for sustainability: a comprehensive review on raw material’s properties, synthesis, performance, and potential application,” Feb. 01, 2023, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s11356-021-17849-w.

[149] Sikacrete, “Sikacrete® M-100 Metakaolin Powder product description.” [Online]. Available: https://usa.sika.com/en/group/SikaCorp/termsandconditions.html

[150] Carsten Kuenzel, Luc J. Vandeperre, Shane Donatello, Aldo R. Boccaccini, and Chris Cheeseman, “Ambient Temperature drying shrinkage and cracking in metakaolin-based geopolymers”.

[151] M. M. A. B. Abdullah, L. Y. Ming, H. C. Yong, and M. F. M. Tahir, “Clay-Based Materials in Geopolymer Technology,” in *Cement Based Materials*, InTech, 2018. doi: 10.5772/intechopen.74438.

[152] B. H. Mo, H. Zhu, X. M. Cui, Y. He, and S. Y. Gong, “Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers,” *Appl Clay Sci*, vol. 99, pp. 144–148, 2014, doi: 10.1016/j.clay.2014.06.024.

[153] Tempsens, “Enhancing Efficiency of Blast Furnace Applications Using Pyrometer.” Accessed: Apr. 17, 2025. [Online]. Available: https://tempsens.com/blog/enhancing-efficiency-of-blast-furnace-applications-using-pyrometer/

[154] Wikipeadia, “Ground granulated blast-furnace slag.” Accessed: Dec. 27, 2024. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_granulated_blast-furnace_slag

[155] Ecocem, “Eco2cem (GGBS).” Accessed: Dec. 27, 2024. [Online]. Available: https://www.ecocemglobal.com/nl-be/producten-projecten/eco2cem-ggbs/

[156] joostdevree, “hoogovenslak.” Accessed: Apr. 18, 2025. [Online]. Available: https://www.joostdevree.nl/shtmls/hoogovenslak.shtml

[157] Euroslag, “Granulated blastfurnace slag.”

[158] M. Sapna Rathod and G. Hombal Asst Professor, “A Comparative Study on Strength and Durability Aspects of fly ash- GGBS based Geopolymer Concrete over Conventional Concrete.” [Online]. Available: www.ijert.org

[159] O. A. Mohamed, R. Al Khattab, and W. Al Hawat, “Effect of relative GGBS/fly contents and alkaline solution concentration on compressive strength development of geopolymer mortars subjected to sulfuric acid,” *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-09682-z.

[160] T. H.M. and S. Unnikrishnan, “Mechanical Strength and Microstructure of GGBS-SCBA based Geopolymer Concrete,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 7816–7831, May 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.05.051.

[161] A. Saludung, Y. Ogawa, and K. Kawai, “Microstructure and mechanical properties of FA/GGBS-based geopolymer,” in *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, Aug. 2018. doi: 10.1051/matecconf/201819501013.

[162] Y. Chen, S. Wu, H. Huang, F. Rao, and L. Yang, “Effect of Calcium on the Setting Time and Mechanical Property of a Red Mud–Blast Furnace Slag-Based Geopolymer,” *Materials*, vol. 17, no. 17, Sep. 2024, doi: 10.3390/ma17174409.

[163] A. Nadarajah, N. A. Mohd Nasir, N. Abu Bakar, and N. A. Safiee, “Fly ash-GGBS blended geopolymer mortar for early engineering characteristic at ambient temperature,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 7, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.asej.2024.102821.

[164] V. Wong *et al.*, “Long-term strength evolution in ambient-cured solid-activator geopolymer compositions,” *Minerals*, vol. 11, no. 2, pp. 1–22, Feb. 2021, doi: 10.3390/min11020143.

[165] L. B. de Oliveira, A. R. G. de Azevedo, M. T. Marvila, E. C. Pereira, R. Fediuk, and C. M. F. Vieira, “Durability of geopolymers with industrial waste,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00839.

[166] J. Hu, W. Ahmed, and D. Jiao, “A Critical Review of the Technical Characteristics of Recycled Brick Powder and Its Influence on Concrete Properties,” Nov. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/buildings14113691.

[167] K. L. Aughenbaugh, P. Stutzman, and M. C. G. Juenger, “Identifying glass compositions in fly ash,” *Front Mater*, vol. 3, Jan. 2016, doi: 10.3389/fmats.2016.00001.

[168] MSSA, “Brick & Cement Industry.” Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: https://www.metalspraysupplies.com/metal-spray-industry-applications/brick-manufacturing?showall=1

[169] J. Migunthanna, P. Rajeev, and J. Sanjayan, “Investigation of waste clay brick as partial replacement of geopolymer binders for rigid pavement application,” *Constr Build Mater*, vol. 305, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124787.

[170] F. Chen, K. Wu, L. Ren, J. Xu, and H. Zheng, “Internal curing effect and compressive strength calculation of recycled clay brick aggregate concrete,” *Materials*, vol. 12, no. 11, Jun. 2019, doi: 10.3390/ma12111815.

[171] GP Groot recycling, “Van betonpuin naar hoogwaardige grondstof met zeefmachine.” Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: https://www.gpgrootrecycling.nl/van-betonpuin-naar-hoogwaardige-grondstof-met-zeefmachine/

[172] O. Mejlhede and O. Mejlhede Jensen, “General rights Measurement of the saturated surface dry state of fines Measurement of the saturated surface dry state of fines,” 2019.

[173] J. Tomas, “Adhesion of ultrafine particles-A micromechanical approach,” *Chem Eng Sci*, vol. 62, no. 7, pp. 1997–2010, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.ces.2006.12.055.

[174] D. S. Shah, K. K. Moravkar, D. K. Jha, V. Lonkar, P. D. Amin, and S. S. Chalikwar, “A concise summary of powder processing methodologies for flow enhancement,” Jun. 01, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16498.

[175] L. Yang, M. Sega, and J. Harting, “Capillary-bridge forces between solid particles: Insights from lattice Boltzmann simulations,” *AIChE Journal*, vol. 67, no. 9, Sep. 2021, doi: 10.1002/aic.17350.

[176] Will de wolf, “Krachten tussen deeltjes.”

[177] S. Yiğit Hunce, E. Soyer, and Ö. Akgiray, “Characterization of Granular Materials with Internal Pores for Hydraulic Calculations Involving Fixed and Fluidized Beds,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 55, no. 31, pp. 8636–8651, Aug. 2016, doi: 10.1021/acs.iecr.6b00953.

[178] Grondverzet, “Geel zand .” Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: https://grondverzet.nu/geel-zand-kopen/

[179] A. M. . Neville, *Properties of concrete*. Pearson, 2012.

[180] Normensand, “CEN Standard Sand according to EN 196-1.” Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: https://www.normensand.de/en/products/cen-standard-sand-en-196-1/

[181] J. L. Provis and J. S. J. Van Deventer, “RILEM State-of-the-Art Reports State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM.” [Online]. Available: http://www.springer.com/series/8780

[182] M. Amran *et al.*, “Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review,” Jan. 01, 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jobe.2021.103638.

[183] Group de cloedt, “NHM Nieuwpoort.” Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: https://www.nhm.be/nl/Aggregates/Activities/5499/offshore-winning-europa

[184] T. H. Mokhothu and M. J. John, “Review on hygroscopic aging of cellulose fibres and their biocomposites,” Jun. 29, 2015, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.06.027.

[185] M. M. Camargo, E. A. Taye, J. A. Roether, D. T. Redda, and A. R. Boccaccini, “A review on natural fiber-reinforced geopolymer and cement-based composites,” Oct. 02, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/ma13204603.

[186] M. M. Camargo, E. A. Taye, J. A. Roether, D. T. Redda, and A. R. Boccaccini, “A review on natural fiber-reinforced geopolymer and cement-based composites,” Oct. 02, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/ma13204603.

[187] M. Ramesh and C. Deepa, “Mechanical properties of natural and synthetic fiber reinforced hybrid composites,” in *Hybrid Natural Fiber Composites: Material Formulations, Processing, Characterization, Properties, and Engineering Applications*, Elsevier, 2021, pp. 309–325. doi: 10.1016/B978-0-12-819900-8.00013-1.

[188] M. M. Camargo, E. A. Taye, J. A. Roether, D. T. Redda, and A. R. Boccaccini, “A review on natural fiber-reinforced geopolymer and cement-based composites,” Oct. 02, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/ma13204603.

[189] Frederik Goethals, “Leverbaarheid 2.1: Rapport over 100% natuurlijke vezels en vezelmodificatie voor thermohardende composiettoeppasingen,” 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/331648994_Reviewing_the_Development_of_Natural_Fiber_Poly

[190] Willems baling equiqment, “Hennepvezels.” Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: https://www.willemsbaling.nl/nl/toepassingen/hennepvezels

[191] A. K. Both, D. Choudhry, and C. L. Cheung, “Valorization of hemp fibers into biocomposites via one-step pectin-based green fabrication process,” *J Appl Polym Sci*, vol. 140, no. 10, Mar. 2023, doi: 10.1002/app.53586.

[192] A. Lakshmi, P. Pandit, Y. Bhagwat, and G. Nayak, “A Review on Efficiency of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete,” in *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022, pp. 799–812. doi: 10.1007/978-981-16-2826-9_50.

[193] Sika Nederland, “Vezeltechnologie: verbeter de eigenschappen met vezels.” Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: https://nld.sika.com/nl/bouw/beton/vezeltechnologie.html

[194] Sika Nederland, “Vezeltechnologie: verbeter de eigenschappen met vezels.” Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: https://nld.sika.com/nl/bouw/beton/vezeltechnologie.html

[195] Arnon. Bentur and Sidney. Mindess, *Fibre reinforced cementitious composites*. CRC Press, 2014.

[196] VN Polyfiber, “Definitie van Polypropylene vezels.” Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: https://vnpolyfiber.com/what-is-polypropylene-staple-fiber/

[197] NTEC Group, “Polypropyleen PP Synthetische Betonvezels.” Accessed: May 24, 2025. [Online]. Available: http://nl.ntecmono.net/synthetic-fiber-rein-forcement/polypropylene-pp-synthetic-concrete-fibers.html

[198] P. Kabele, P. Kabele, and M. Stemberk, “STOCHASTIC MODEL OF MULTIPLE CRACKING PROCESS IN FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES,” 2005. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/241430843

[199] Grano direct, “Sika Viscocrete 20HE - High Range Water Reducer.” Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: https://www.granodirect.com.au/sika-viscocrete-20he---high-range-water-reducer

[200] 26(7), 707–714. Applications of superplasticizers in concrete." Cement and Concrete Composites, “Applications of superplasticizers in concrete." Cement and Concrete Composites, 26(7), 707–714.”.

[201] S. Partschefeld, A. Tutal, T. Halmanseder, J. Schneider, and A. Osburg, “Investigations on Stability of Polycarboxylate Superplasticizers in Alkaline Activators for Geopolymer Binders,” *Materials*, vol. 16, no. 15, Aug. 2023, doi: 10.3390/ma16155369.

[202] Gestis, “natriumhydroxide.” Accessed: Nov. 16, 2024. [Online]. Available: https://gestis.dguv.de/data?name=001270

[203] pbm, “pbmdiscounter.” Accessed: Nov. 16, 2024. [Online]. Available: https://pbmdiscounter.nl/advies-uitleg/wanneer-ffp2-stofmasker

[204] SMEETS, “persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM’s).” Accessed: Dec. 22, 2024. [Online]. Available: https://www.smeetsbedrijfskleding.nl/pbm/

[205] Axel Six, “Mechanical performance of eco-friendly geopolymer with construction and demolition waste,” 2022.

[206] J. Vitse, D. Zhang, and J. Li, “Effect of Increasing Slag Content on the Workability and Mechanical Properties of CDW-GGBS Based Geopolymer Composites,” in *RILEM Bookseries*, vol. 55, Springer Science and Business Media B.V., 2025, pp. 62–70. doi: 10.1007/978-3-031-70277-8_8.

[207] Steve morgan associates consulting engineers, “10 Most famous civil engineers of al time.”

[208] globalgilson, “Concrete slump testing.” Accessed: Dec. 25, 2024. [Online]. Available: https://www.globalgilson.com/blog/concrete-slump-guide?srsltid=AfmBOoqbO5EaiwGCNfLt7o4hhtmbESAYFNEMI1hnoLClg44XMpeQVZSG

[209] Duff A. Abrams, “Design of concrete mixtures.” Accessed: Dec. 25, 2024. [Online]. Available: https://archive.org/details/designofconcrete00abrarich/page/n1/mode/2up?ref=ol&view=theater&q=test

[210] NBN, “NBN B 15-233:1982 Betonspecie - Bepaling van de consistentie - Uitspreiding op de schoktafel.” Accessed: Dec. 25, 2024. [Online]. Available: https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=347386&p40_language_code=nl&p40_detail_id=110514&lang=nl

[211] The constructor - building ideas, “Slump flow test op zelfverdichtend beton voor verwerkbaarheid”, Accessed: Dec. 25, 2024. [Online]. Available: https://test.theconstructor.org/concrete/slump-flow-test-on-self-compacting-concrete/6031

[212] American society of civil engineers, “John Smeaton.” Accessed: May 01, 2025. [Online]. Available: https://www.asce.org/about-civil-engineering/history-and-heritage/notable-civil-engineers/john-smeaton

[213] Openlibrary, “Duff A. Abrams.” Accessed: May 01, 2025. [Online]. Available: https://openlibrary.org/authors/OL2541111A/Duff_A._Abrams

[214] Wikipedia, “John Smeaton.” Accessed: May 01, 2025. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/John_Smeaton

[215] Concrete Society Lib, “Duff Abrams.” Accessed: May 01, 2025. [Online]. Available: https://x.com/concretelibrary/status/1121336579690254337

[216] B. Cotterell, “The past, present, and future of fracture mechanics.” [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/engfracmech

[217] Wikipedia, “ August Wöhler.” Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/August_W%C3%B6hler

[218] Wikipedia, “Carl Culmann.” Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Carl_Culmann

[219] discoverengineering, “Fatigue Analysis in Structures.” Accessed: May 01, 2025. [Online]. Available: https://www.discoverengineering.org/fatigue-analysis-in-structures

[220] Encyclopedia, “Culmann, Karl.” Accessed: May 01, 2025. [Online]. Available: https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/culmann-karl

[221] J. Zhang, H. Dong, D. Liu, T. B. Fischer, S. Wang, and L. Huang, “Microbial reduction of Fe(III) in illite-smectite minerals by methanogen Methanosarcina mazei,” *Chem Geol*, vol. 292–293, pp. 35–44, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.chemgeo.2011.11.003.

[222] S. Gialanella, F. Girardi, G. Ischia, I. Lonardelli, M. Mattarelli, and M. Montagna, “On the goethite to hematite phase transformation,” *J Therm Anal Calorim*, vol. 102, no. 3, pp. 867–873, Dec. 2010, doi: 10.1007/s10973-010-0756-2.

[223] R. Shekhar *et al.*, “Understanding the mechanism for the low-temperature reduction of Fe2O3 to Fe in alkaline electrolytes,” Nov. 18, 2024. doi: 10.26434/chemrxiv-2024-dd895.

[224] S. Krehula and S. Musi}, “Formation of Magnetite in Highly Alkaline Media in the Presence of Small Amounts of Ruthenium*.”

[225] V. Ponomar, J. Yliniemi, E. Adesanya, K. Ohenoja, and M. Illikainen, “An overview of the utilisation of Fe-rich residues in alkali-activated binders: Mechanical properties and state of iron,” Jan. 01, 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129900.

[226] J. Tan, Ö. Cizer, B. Vandevyvere, J. De Vlieger, H. Dan, and J. Li, “Efflorescence mitigation in construction and demolition waste (CDW) based geopolymer,” *Journal of Building Engineering*, vol. 58, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.105001.

[227] J. Tan, I. Luc Boehme Assessor -KU Leuven dr Veerle Vandeginste Assessor -KU Leuven Ir Jeroen Vrijders Assessor -BBRI, B. Ir Matthias Van Damme Assessor - Stadsbader nv, and B. dr Jorge de Brito, “Recycling construction and demolition waste (CDW) through geopolymer technology,” 2022.

[228] Dongsheng Zhang, “A briefintroduction to CDW based geopolymeer,” Nov. 2024.

[229] G. Lazorenko, A. Kasprzhitskii, A. Kruglikov, V. Mischinenko, and V. Yavna, “Sustainable geopolymer composites reinforced with flax tows,” *Ceram Int*, vol. 46, no. 8, pp. 12870–12875, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.01.184.

[230] Tosec, “Spanning-rek diagram.” Accessed: May 01, 2025. [Online]. Available: https://tosec.nl/nl/wiki/spanning-rek-diagram/

[231] Jasper Vitse, “Vervolg uitleg onderzoek [Powerpoint presentatie]. KU Leuven”.

[232] ABM Van Zijl, “Compressometer-Extensometer tbv. E-Modulus.” Accessed: May 22, 2025. [Online]. Available: https://www.abmbv.nl/nl/artnr/cont55c0222h/compressometer-extensometer-tbv.-e-modulus

Bijlagen

Bijlage A	GGBS
Bijlage B	M92
Bijlage C	Karakteristieken RCP & RBP
Bijlage D	Adapter drukproef
Bijlage E	Leidingwater samenstelling
Bijlage F	mal volgens EN 191-1
Bijlage G	mal volgens NF P15-434
Bijlage H	Pasta samenstelling
Bijlage I	Resultaten bindingstijd en consistentietijd pasta
Bijlage J	Invloed ontkistingsolie
Bijlage K	Invloed ontkistingstijd
Bijlage L	Invloed watermal op Vicat-test
Bijlage M	Invloed onder water binding & uitharding
Bijlage N	Mortel samenstelling & mortel met vezel samenstelling
Bijlage O	Resultaten zeefproef
Bijlage P	Technische fiche CEM I 52,5 R HES
Bijlage Q	Productcertificaat ECO_2CEM
Bijlage R	Technische fiche NaOH
Bijlage S	Technische fiche Na_2SiO_3
Bijlage T	Buigsterkte resultaten
Bijlage U	Druksterkte resultaten
Bijlage V	Ontkistingsmiddel Marginel 335

Bijlage A GGBS

temcon solutions gmbh

Product information

temSlag®

Ultra-fine, white blast furnace sand powders

Characterization

temSlag® are specially ground and processed, ultra-fine, white blast furnace slag powders, produced from selected blast furnace slags.
temSlag® are latent hydraulic binders or additives that hydrate independently under alkaline or sulphate stimulation and form strengths. Cement can be replaced in hydraulic binders, which can significantly reduce CO_2 emissions.
temSlag® is ideally suited as accelerator for geopolymers.

Typical Properties

temSlag®		S	HG	UHG
Colour			white to old white	
Colour values L*-a*-b*		89 / 0,5 / 4	88 / 0,5 / 5,7	87 / 0,7 / 6,4
Spec. Surface according to Blaine g/m²		~4.500	~9.500	~12.000
Typical particle size distribution				
<1 µm		7%	12%	16%
D50		7,5 µm	5 µm	3 µm
D95		22 µm	17 µm	9,5 µm
Activity index %	1d	>65	>65	>70
	2d	>75	>75	>80
	7d	>85	>90	>95
	28d	>105	>110	>115
Typical chemical composition M-%				
SiO2			37-38%	
Al2O3			10-11%	
Fe2O3			<0.5%	
Tall			40-43%	
MgO			6,5-7,5%	
SO3			<0.2%	
K2O			<1.0%	
Na2O			<0.5%	
TiO2			<1.0%	
Too			<0.5%	
S			~1,0%	
Characteristic values for blast furnace slag				
CaO + MgO + SiO2			~86%	
(CaO + MgO) / SiO2			~1.3	

Bijlage B M92

temcon solutions gmbh

Product information

---

temPozz® M92

Characterization

temPozz® M92 is a metakaolin and is produced from a purified and concentrated kaolin by calcination. The white and largely amorphous aluminosilicate reacts rapidly with portlandite ($Ca(OH)_2$) to form cement-like C-A-S-H phases. It is a pozzolanic additive in conjunction with Portland cement.
When used in geopolymers, **temPozz® M92** is known for a very long open time and maintains good rheology with exceptionally high filler addition, while achieving extremely high mechanical strength.

Chemical composition

SiO_2	52-56 %
Al_2O_3	41-45 %
Fe_2O_3	< 1.0%
CaO	< 0.5%
Loss on ignition	< 0,5 %

Characteristics

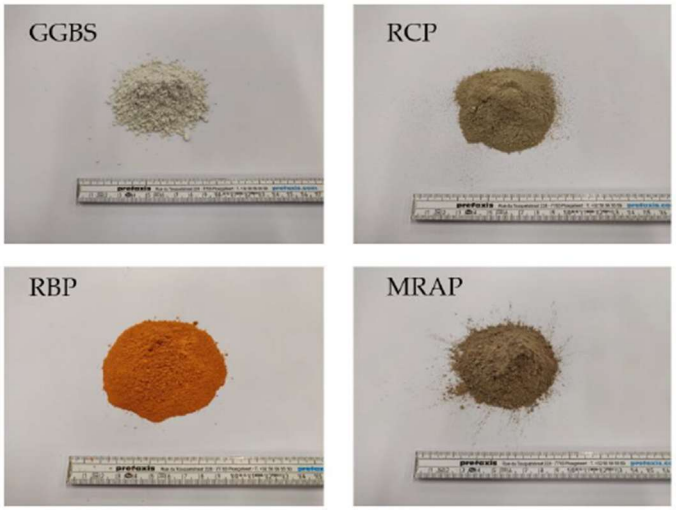
Reactivity	very high
Chapelle (Ca binding capacity)	> 1400 mg/g
Geopolymer method (Davidovits)	103,5°C after 25 min.
Colour	almost white
Colour values L*a*b*	92*0,7*2,4
Bulk density	300-400
Specific gravity	2.5-2.6 g/cm³
Typical particle size distribution (Mastersizer 3000)	
d10	< 1 µm
D50	< 3 µm
D95	< 10 µm

Principle of activity

Portland cement releases ~25% calcium hydroxide ($Ca(OH)_2$) during its hardening. As an alkalinity reserve in the cement stone, it contributes to the protection of the reinforcement. In case of a soluble attack (acid, sulfate, even neutral water), it is preferentially attacked. It is therefore a weak point in many construction chemical applications.
The special ability of **temPozz® M92** is its capability to bind large amounts of this soluble hydrated lime in the form of stable C-A-S-H phases. The speed of this reaction is classified as "very fast" and scope as "extremely high". Both can be tested by chemical and structural methods. With hydrated lime and water, the mixture begins to solidify within a few hours.
By converting the water-soluble phase portlandite into stable hydrate phases, final strengths, tightness of the microstructure and durability can be positively influenced, already in the first hours of hydration.
The particularly high fineness of **temPozz® M92** ensures a very fine distribution in the fresh mortar/concrete. This improves availability during hydration.
Due to its strength contribution, **temPozz® M92** is suitable for the (partial) substitution of Portland cement and thus contributes to reducing CO2 emissions.

Bijlage C KARAKTERISTIEKEN RCP & RBP

PSD and XRF of powders



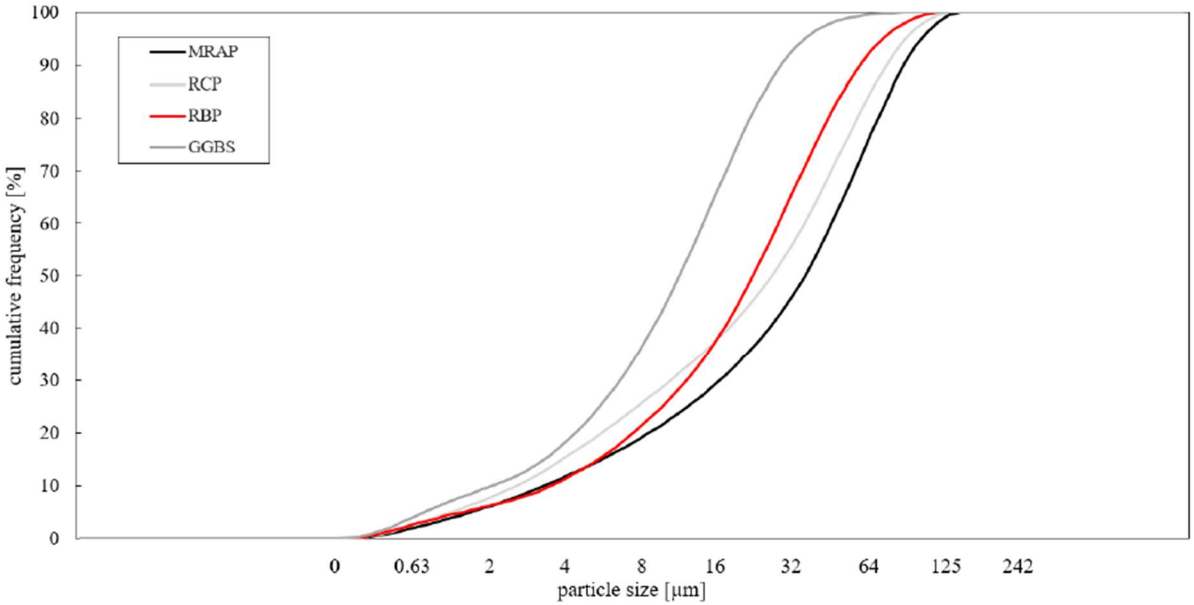


Table 1 Chemical composition of precursors (wt.%).

Precursors	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Others
MRAP	53.7	8.83	4.59	26.5	1.60	1.94	0.75	2.1
GGBS	33.3	12.6	0.41	40.4	8.28	0.74	0.63	3.6
RBP	63.2	13.0	4.58	10.8	1.83	2.72	1.89	2.0
RCP	38.3	7.02	5.41	42.4	1.59	1.21	0.42	3.7

MRAP = Mixed Recycled Aggregate Powder
GGBS = Ground Granulated Blast Furnace Slag
RBP = Recycled Brick Powder
RCP = Recycled Concrete Powder

Table 2 Precursor particle size properties

Precursors	Specific surface [m^2/g]	D10 [µm]	D50 [µm]	D90 [µm]
MRAP	0.84	2.73	40.0	112
GGBS	1.48	1.60	11.0	31.3
RBP	0.96	2.93	23.4	70.9
RCP	1.07	2.04	28.5	92.9

MRAP = Mixed Recycled Aggregate Powder
GGBS = Ground Granulated Blast Furnace Slag
RBP = Recycled Brick Powder
RCP = Recycled Concrete Powder

Bijlage D ADAPTER DRUKPROEF

E170 : Compression device

STANDARDS : EN 196-1, ASTM C349

Compression device to test mortar portion of prisms 40.1x40x160 mm broken in flexure.

To be used with a concrete compression machine foreseen of low capacity measuring range (mod. C097-01, C097-02) or with a flexural frame.

Dimensions: Ø 153xh182 mm.

Weight: 12 kg approx.

Accessory :

E170-11 Centering plug



E170

BAG-MacBen BV
Oosdijkpark 12,
B 9100 Sint Niklaas
T: +32 3 771 48 04 info@macben.eu
www.macben.eu

BAG-MacBen
Smederijstraat 2,
NL 4814 DR Breda
T: +31 765 30 23 73 sales@macben.nl
www.macben.eu

Bijlage E LEIDINGWATER SAMENSTELLING

Laboratorium Farys
Stropstraat 1
9000 Gent
09 240 02 62

VERSLAG DRINKWATERONDERZOEK

2024

LEVERINGSGEBIED 2: Levering water-link-De Watergroep-Evides

Parameter	Eenheid	Maximaal toelaatbare waarde volgens BVR[1] 20.01.2023	Gemiddelde waarde [2]	Standaardafwijking
1,2-dichloorethaan	µg/l	3	<0,5	-
Alkaliteit	mg/l HCO3	-	222	85
Aluminium	µg/l Al	200	26	21
Ammonium	mg/l NH4	0,50	<0,05	-
Antimoon	µg/l Sb	10	<1	-
Arseen	µg/l As	10	<1	-
Benzeen	µg/l	1,0	<0,3	-
Benzo(a)pyreen	µg/l	0,01	<0,01	-
Bisfenol-A	µg/l	2,5	<0,1	-
Boor	mg/l B	1,5	0,04	0,02
Bromaat	µg/l	10	1,2	2,6
Broomdichloormethaan	µg/l	60	5	3,7
Cadmium	µg/l Cd	5	<0,8	-
Calcium	mg/l Ca	-	86	32
Chloraat	µg/l ClO3	700	84	61
Chloride	mg/l Cl	250	44,2	28,1
Chloriet	µg/l ClO2	700	<1	-
Chroom	µg/l Cr	50	<1	-
Clostridium perfringens	/100 ml	0	0	-
Colibacterien	/100 ml	0	0	-
Cyanide	µg/l CN	50	<6	-
E. coli	/100 ml	0	0	-
Intestinale enterokokken	/100 ml	0	0	-
Fluoride	mg/l F	1,5	0,17	0,1
Fosfor	µg/l P	-	<65	-
Gehalogeneerde azijnzuren (HAA5)	µg/l	60	6,7	6,8
Geleidingsvermogen voor elektriciteit	µS/cm (20°C)	2500 en GAV[3]	559	147
Geur	-	GAV[3]	GAV	-
Ijzer	µg/l Fe	200	<10	-
Kalium	mg/l K	-	4,5	2,8
Kleur	mg/l Pt/Co	20 en GAV[3]	<2,3	-
Koper	mg/l Cu	2	0,02	0,03
Kwik	µg/l Hg	1	<0,2	-
Lood	µg/l Pb	10	<1	-
Magnesium	mg/l Mg	-	11,1	4,8
Mangaan	µg/l Mn	50	<2	-
Natrium	mg/l Na	200	28,7	13,4
Nikkel	µg/l Ni	20	<5	-
Nitraat	mg/l NO3	50	10,7	3,2
Nitriet	mg/l NO2	0,5	<0,02	-
Organische koolstof totaal (NPOC)	mg/l	-	1,6	0,8
Perchloraat	µg/l	13	<1	-
Pesticiden totaal	µg/l	0,5	<0,3	-
PFAS (som 20)	µg/l	0,1	<0,05	-
PFAS -totaal	µg/l	0,5	<0,1	-
Polycyclische aromatische koolwaterstoffen	µg/l	0,1	NA[4]	-
Seleen	µg/l Se	20	<1	-
Smaak	-	GAV[3]	GAV	-
Som tetrachlooretheen en trichlooretheen	µg/l	10	NA[4]	-
Sulfaat	mg/l SO4	250	65	21
Telling kolonies bij 22°C	/1 ml	GAV[3]	GAV	-
Temperatuur	°C	25	15	4
Totale Hardheid	°F	minimum 10	26,1	10
Trifluorazijnzuur (TFA)	µg/l	-	<4,5	-
Trihalomethanen	µg/l	100	19,4	13,4
Troebelingsgraad	-	GAV[3]	GAV	-
Uranium	µg/l	30	0,7	0,5
Vinylchloride	µg/l	0,50	<0,5	-
Vrije Chloorresten	µg/l Cl	250	<60	-
Waterstofionenconcentratie	pH	6,5-9,5	7,8	0,2
Zink	µg/l Zn	5000	27	19
(1) Besluit Vlaamse regering over de kwaliteit, kwantiteit en levering van water bestemd voor menselijke consumptie				
(2) Gemiddelde waarde niet bestemd voor ionenbalans				
(3) CAV: Geen abnormale verandering				
(4) NA: Niet aantoonbaar				
(5) 1: Levering Vivaqua-WPC Mainvault				
2: Leveringen Leveringen water-link-De Watergroep-Evides				
3: Levering water-link				
4: Winning Stad Ronse-Levering Vivaqua-WPC Mainvault				
5: WPC Oudenaarde				
6: WPC Beersel-Levering Vivaqua				
7: Levering De Watergroep				
8: WPC Oostende				

Bijlage F **MAL VOLGENS** EN 191-1

E102 : Three gang mould

STANDARDS : EN 196-1, EN ISO 679

Three gang mould for 40.1x40x160 mm prisms.

Manufactured from steel with hardness of inside walls over HV 200, it meets the dimensional tolerances to EN 196/1 Standard. All surfaces are grinded and all parts are marked with an identification number for a correct assembling. A part-number is engraved on each mould and a Certificate of Conformity is supplied along with.

Weight : 8560 g.



E102

Accessories :

- **E106** Feed hopper for E102, E103, E105 moulds
- **E102-02** Large and small scrapper
- **E102-03** Glass plate 220x190x6 mm
- **S200-11** Straight edge

BAG-MacBen BV
Oosterschelpark 17,
B 9100 Sint-Niklaas
T: +32 3 771 48 04 info@macben.eu
www.macben.eu

BAG-MacBen
Smederijstraat 2
NL 4814 DB Breda
T: +31 765 30 23 73 sales@macben.nl
www.macben.eu

Bijlage G **MAL VOLGENS** NF P15-434

E107 : Three gang prism mould

STANDARDS : NF P15-434, DIN 1164

Three gang prism mould to produce 40x40x160 mm specimens. Made from steel 55 HRB. Complete with 6 inserts.

Weight: 8 Kg approx.

Spare parts :

E107-01 : Contact points



E107

BAG-MacBen BV
Oesjachtpark 12,
B 9100 Sint Niklaas
T: +32 3 771 48 04 info@macben.eu
www.macben.eu

BAG-MacBen
Smederijstraat 2,
NL 4614 DB Bergen
T: +31 765 30 23 73 sales@macben.eu
www.macben.eu

Bijlage H PASTA SAMENSTELLING

Inhoud waterglas		
α = silica	[%]	0,079
β = sodium oxide	[%]	0,259
γ = water	[%]	0,662

molaire massa		
NaOH	[g/mol]	39,997
Na2O	[g/mol]	61,979
H2O	[g/mol]	18,015
SiO2	[g/mol]	60,083

molaire massa		
H	[g/mol]	1,008
O	[g/mol]	15,999
Na	[g/mol]	22,990
Si	[g/mol]	28,085

Nummer	Mixdesign	Precursor [g]	Hoogovenslak [%]	Filtercake [%]	Masonry brick powder [%]	Hoogovenslak [g]	Filtercake [g]	Masonry brick powder [g]	SS [g]	SH [g]	H2O [g]	Na2O/b	SiO2/Na2O	w/b
1	G-8%-1,38-0,4	400	40	60	-	160	240	-	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
2	G-8%-1,38-0,4	400	40	-	60	160	-	240	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
3	G-8%-1,38-0,4	400	40	30	30	160	120	120	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
4	G-8%-1,38-0,4	400	40	20	40	160	80	160	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
5	G-8%-1,38-0,4	400	40	10	50	160	40	200	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
6	G-8%-1,38-0,4	400	40	40	20	160	160	80	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
7	G-8%-1,38-0,4	400	40	50	10	160	200	40	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
8	G-8%-1,38-0,4	400	50	50	-	200	200	-	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
9	G-8%-1,38-0,4	400	50	-	50	200	-	200	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
10	G-8%-1,38-0,4	400	50	25	25	200	100	100	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
11	G-8%-1,38-0,4	400	50	12,5	37,5	200	50	150	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
12	G-8%-1,38-0,4	400	50	6,3	43,8	200	25	175	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
13	G-8%-1,38-0,4	400	50	37,5	12,5	200	150	50	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
14	G-8%-1,38-0,4	400	50	43,8	6,3	200	175	25	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
15	G-8%-1,38-0,4	400	60	40	-	240	160	-	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
16	G-8%-1,38-0,4	400	60	-	40	240	-	160	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
17	G-8%-1,38-0,4	400	60	20	20	240	80	80	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
18	G-8%-1,38-0,4	400	60	15	25	240	60	100	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
19	G-8%-1,38-0,4	400	60	10	30	240	40	120	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
20	G-8%-1,38-0,4	400	60	25	15	240	100	60	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
21	G-8%-1,38-0,4	400	60	30	10	240	120	40	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
22	G-8%-1,38-0,4	400	70	30	-	280	120	-	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
23	G-8%-1,38-0,4	400	70	-	30	280	-	120	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
24	G-8%-1,38-0,4	400	70	15	15	280	60	60	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
25	G-8%-1,38-0,4	400	70	10	20	280	40	80	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
26	G-8%-1,38-0,4	400	70	5	25	280	20	100	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
27	G-8%-1,38-0,4	400	70	20	10	280	80	40	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
28	G-8%-1,38-0,4	400	70	25	5	280	100	20	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
29	G-8%-1,38-0,4	400	100	0	0	400	0	0	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
30	G-8%-1,38-0,4	400	0	100	0	0	400	0	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40
31	G-8%-1,38-0,4	400	0	0	100	0	0	400	164,7	24,5	50,9	8%	1,38	0,40

Bijlage I RESULTATEN BINDINGSTIJD EN CONSISTENTIETIJD PASTA

12				13				14			
(50% GGBS & 6,3% RCP & 43,8%RBP)				(50% GGBS & 37,5% RCP & 12,5%RBP)				(50% GGBS & 43,8% RCP & 6,2%RBP)			
Mini slump flow				Mini slump flow				Mini slump flow			
d1	303	[mm]		d1	264	[mm]		d1	240	[mm]	
d2	303	[mm]		d2	263	[mm]		d2	237	[mm]	
dg	303	[mm]		dg	263,5	[mm]		dg	238,5	[mm]	
vloeibaarheid index	8,1809			vloeibaarheid index	5,9432			vloeibaarheid index	4,688		
Vicat test				Vicat test				Vicat test			
initial setting time	115	[min]		initial setting time	80	[min]		initial setting time	85	[min]	
final setting time	130	[min]		final setting time	90	[min]		final setting time	100	[min]	

15				16				17			
(60% GGBS & 40% RCP)				(60% GGBS & 40%RBP)				(60% GGBS & 20% RCP & 20%RBP)			
Mini slump flow				Mini slump flow				Mini slump flow			
d1	241	[mm]		d1	346	[mm]		d1	298	[mm]	
d2	242	[mm]		d2	334	[mm]		d2	293	[mm]	
dg	241,5	[mm]		dg	340	[mm]		dg	295,5	[mm]	
vloeibaarheid index	4,8322			vloeibaarheid index	10,5564			vloeibaarheid index	7,7314		
Vicat test				Vicat test				Vicat test			
initial setting time	80	[min]		initial setting time	150	[min]		initial setting time	65	[min]	
final setting time	90	[min]		final setting time	160	[min]		final setting time	80	[min]	

18				19				20			
(60% GGBS & 15% RCP & 25% RBP)				(60% GGBS & 10% RCP & 30% RBP)				(60% GGBS & 25% RCP & 15% RBP)			
Mini slump flow				Mini slump flow				Mini slump flow			
d1	294	[mm]		d1	300	[mm]		d1	270	[mm]	
d2	287	[mm]		d2	299	[mm]		d2	273	[mm]	
dg	290,5	[mm]		dg	299,5	[mm]		dg	271,5	[mm]	
vloeibaarheid index	7,4378			vloeibaarheid index	7,97			vloeibaarheid index	6,371		
Vicat test				Vicat test				Vicat test			
initial setting time	90	[min]		initial setting time	100	[min]		initial setting time	80	[min]	
final setting time	100	[min]		final setting time	115	[min]		final setting time	90	[min]	

21				22				23			
(60% GGBS & 30% RCP & 10% RBP)				(70% GGBS & 30% RCP)				(70% GGBS & 30% RBP)			
Mini slump flow				Mini slump flow				Mini slump flow			
d1	262	[mm]		d1	220	[mm]		d1	359	[mm]	
d2	257	[mm]		d2	219	[mm]		d2	347	[mm]	
dg	259,5	[mm]		dg	219,5	[mm]		dg	353	[mm]	
vloeibaarheid index	5,7334			vloeibaarheid index	3,818			vloeibaarheid index	11,4573		
Vicat test				Vicat test				Vicat test			
initial setting time	70	[min]		initial setting time	55	[min]		initial setting time	100	[min]	
final setting time	80	[min]		final setting time	65	[min]		final setting time	105	[min]	

24			
(70% GGBS & 15% RCP & 15% RBP)			
Mini slump flow			
d1	298	[mm]	
d2	293	[mm]	
dg	295,5	[mm]	
vloeibaarheid index	7,7314		
Vicat test			
initial setting time	85	[min]	
final setting time	95	[min]	

25			
(70% GGBS & 10% RCP & 20% RBP)			
Mini slump flow			
d1	317	[mm]	
d2	322	[mm]	
dg	319,5	[mm]	
vloeibaarheid index	9,2074		
Vicat test			
initial setting time	90	[min]	
final setting time	100	[min]	

26			
(70% GGBS & 5% RCP & 25% RBP)			
Mini slump flow			
d1	326	[mm]	
d2	326	[mm]	
dg	326	[mm]	
vloeibaarheid index	9,6276		
Vicat test			
initial setting time	85	[min]	
final setting time	95	[min]	

27			
(70% GGBS & 20% RCP & 10% RBP)			
Mini slump flow			
d1	282	[mm]	
d2	283	[mm]	
dg	282,5	[mm]	
vloeibaarheid index	6,9806		
Vicat test			
initial setting time	70	[min]	
final setting time	80	[min]	

28			
(70% GGBS & 25% RCP & 5% RBP)			
Mini slump flow			
d1	294	[mm]	
d2	289	[mm]	
dg	291,5	[mm]	
vloeibaarheid index	7,4966		
Vicat test			
initial setting time	65	[min]	
final setting time	70	[min]	

29			
(100% GGBS)			
Mini slump flow			
d1	352	[mm]	
d2	344	[mm]	
dg	348	[mm]	
vloeibaarheid index	11,1088		
Vicat test			
initial setting time	75	[min]	
final setting time	90	[min]	

30			
(100% RCP)			
Mini slump flow			
d1	113	[mm]	
d2	101	[mm]	
dg	107	[mm]	
vloeibaarheid index	0,1413		
Vicat test			
initial setting time	30	[min]	
final setting time	30	[min]	

31			
(100% RBP)			
Mini slump flow			
d1	237	[mm]	
d2	236	[mm]	
dg	236,5	[mm]	
vloeibaarheid index	4,5932		
Vicat test			
initial setting time		[min]	
final setting time		[min]	

Bijlage J INVLOED ONTKISTINGSOLIE

zonder ontkistingsolie							
16				16			
(60% GGBS & 40%RBP)				(60% GGBS & 40%RBP)			
Mini slump flow				Mini slump flow			
d1	322	[mm]		d1		[mm]	
d2	319	[mm]		d2		[mm]	
dg	320,5	[mm]		dg	0	[mm]	
vloeibaarheid index	9,2718			vloeibaarheid index	-1		
RH	43,6	%		RH		%	
T	22,6	°C		T		°C	

ontkistingsolie beton, afgekuist							
16				16			
(60% GGBS & 40%RBP)				(60% GGBS & 40%RBP)			
Mini slump flow				Mini slump flow			
d1	326	[mm]		d1		[mm]	
d2	328	[mm]		d2		[mm]	
dg	327	[mm]		dg	0	[mm]	
vloeibaarheid index	9,6928			vloeibaarheid index	-1		
RH	48	%		RH		%	
T	22,3	°C		T		°C	

ontkistingsolie geopolymeerbeton, niet afgekuist							
16				16			
(60% GGBS & 40%RBP)				(60% GGBS & 40%RBP)			
Mini slump flow				Mini slump flow			
d1	328	[mm]		d1		[mm]	
d2	328	[mm]		d2		[mm]	
dg	328	[mm]		dg	0	[mm]	
vloeibaarheid index	9,7584			vloeibaarheid index	-1		
RH	55,4	%		RH		%	
T	22	°C		T		°C	

Bijlage K INVLOED ONTKISTINGSTIJD

Druksterkte: Rc, na 4dag																		
mengsel	natron watergl ass	formule	Vermenging natronloog en Natronwatergl as	kubus 1 Rc,4 [Mpa]	kubus 2 Rc,4 [Mpa]3	kubus 3 Rc,4 [Mpa]4	kubus 4 Rc,4 [Mpa]2	kubus 5 Rc,4 [Mpa]	kubus 6 Rc,4 [Mpa]	gemiddelde [Mpa]	ondergrens 10% [Mpa]	bovengrens 10% [Mpa]	datum zero time	zero time	testdatum	testtijdstip	uitvoerder	extra informatie	Kolom1
16	C	Jasper	24h voordien	58,13	49,77	55,12	44,39	54,53	47,88	51,06	45,95	56,16	16/12/2024	11:45	20/12/2024	11:30	Thibault	na 1dag ontkist	met tussenstuk 1
16	C	Jasper	24h voordien	40,65	54,12	47,49	52,71	51,45	49,24	48,84	43,96	53,73	16/12/2024	11:45	20/12/2024	11:40	Thibault	na 2dag ontkist	met tussenstuk 1
16	C	Jasper	24h voordien	45,80	56,31	56,42	54,19	58,13	49,88	52,52	47,27	57,77	16/12/2024	11:45	20/12/2024	11:46	Thibault	na 3dag ontkist	met tussenstuk 1
16	C	Jasper	24h voordien	52,78	49,04	48,58	50,82	58,18	49,78	50,20	45,18	55,22	16/12/2024	11:45	20/12/2024	11:52	Thibault	na 4dag ontkist	met tussenstuk 1

Bijlage L INVLOED WATERMAL OP VICAT-TEST

Legende		
tijd	=	start vanaf zero time

Mengsel 16					
Vicat_watermal					
initiële zettingstijd			eindzettingstijd		
tijd [min]	afstand van bodemplaat tot naald [mm]	commentaar	tijd [min]	diepte penetratie vanaf bovenzijde [mm]	commentaar
10	0		168	4	
20	0		170	3	
30	0		171	3	
40	0		172	3	
50	0		173	2,5	
60	0		174	2	
70	0		175	1,5	
80	0		176	1	
90	0		177	1	
100	0		178	1	
110	0		179	1	
120	0		180	0,5	
130	0				
140	0				
150	0				
160	0				
165	2				
166	6				

Mengsel 16					
Vicat_zonder watermal					
initiële zettingstijd			eindzettingstijd		
tijd [min]	afstand van bodemplaat tot naald [mm]	commentaar	tijd [min]	diepte penetratie vanaf bovenzijde [mm]	commentaar
10	0		155	1	
20	0		156	1	
30	0		157	1	
40	0		158	0,5	
50	0				
60	0				
70	0				
80	0				
90	0				
100	0				
110	0				
120	0				
130	0				
140	1				
141	1				
142	1				
143	1				
144	1				
145	3				
146	3				
147	3				
148	3				
149	8				

Bijlage M INVLOED ONDER WATER BINDING & UITHARDING

Druksterkte: Rc, na 7dagen																		
mengse	zandge halte [%	Silica [%	form	Vermenging natronloog en Natronwaterg	kubus 1 Rc,7 [Mpa	kubus 2 Rc,7 [Mpa]	kubus 3 Rc,7 [Mpa	kubus 4 Rc,7 [Mpa	kubus 5 Rc,7 [Mpa]	kubus 6 Rc,7 [Mpa]	gemiddel de [Mpa	ondergr ens 10% [Mp	boveng rens 10% [Mp	datum zero time	zero time	testdatum	testtijds tip	uitvoerde	extra informatie
16	0	25,9	juist	24h voordien	42,02	29,58	24,41	45,09	42,72	36,88	36,78	33,10	40,46	28/03/2025	14:20	4/04/2025	15:03	Thibault	onder water gebonder
16	0	25,9	juist	24h voordien	50,11	39,06	51,20	53,53	49,19	52,94	51,39	46,25	56,53	28/03/2025	14:30	4/04/2025	15:15	Thibault	droog gebonden & uitg

Buigsterkte: Rf,na 7dagen																
mengse	zandge halte [%	Silica [%	form	Vermenging natronloog en Natronwaterg	Rf [Mpa	Rf [Mpa]2	Rf [Mpa	gemiddel de [Mpa	ondergr ens 10% [Mp	boveng rens 10% [Mp	datum zero time	zero time	testdatum	testtijds tip	uitvoerde	extra informatie
16	0	25,9	juist	24h voordien	1,422	3,139	2,086	2,1	1,877	2,295	28/03/2025	14:20	4/04/2025	15:00	Thibault	onder water gebonder
16	0	25,9	juist	24h voordien	2,921	3,446	2,676	3,0	2,713	3,316	28/03/2025	14:30	4/04/2025	15:10	Thibault	droog uitgehard

Bijlage N MORTEL SAMENSTELLING & MORTEL MET VEZEL SAMENSTELLING

molaire massa		
NaOH	[g/mol]	39,997
Na2O	[g/mol]	61,979
H2O	[g/mol]	18,015
SiO2	[g/mol]	60,083

molaire massa		
H	[g/mol]	1,008
O	[g/mol]	15,999
Na	[g/mol]	22,990
Si	[g/mol]	28,085

Inhoud waterglas		
α = silica	[%]	0,079
β = sodium oxide	[%]	0,259
γ = water	[%]	0,662

Nummer	Mixdesign	binder (ook activator): sand	sand content (%)	precursor + activator	Precursor [g]	GGBS [%]	RBP [%]	GGBS [g]	RBP [g]	zand [g]	alkalische activator [g]	SS [g]	SH [g]	H2O [g]
16	**G-8%-1,37-0,4**		0	640,1	400	60	40	**240**	**160**	0,0	**240,14**	164,748	24,463	50,926
16-A	**G-8%-1,37-0,4**	1/2	67	845,0	528	60	40	**316,8**	**211,2**	**1715,6**	**316,98**	217,467	32,291	67,223
16-B	**G-8%-1,37-0,4**	4/5	55	1152,2	720	60	40	**432**	**288**	**1408,3**	**432,25**	296,546	44,033	91,667
16-C	**G-8%-1,37-0,4**	1	50	1280,3	800	60	40	**480**	**320**	**1280,3**	**480,27**	329,496	48,925	101,853
16-D	**G-8%-1,37-0,4**	2	33	1715,6	1072	60	40	**643,2**	**428,8**	**845,0**	**643,57**	441,524	65,560	136,483
16-E	**G-8%-1,37-0,4**	3	25	1920,4	1200	60	40	**720**	**480**	**640,1**	**720,41**	494,243	73,388	152,779
16-F	**G-8%-1,37-0,4**	5 2/3	15	2176,5	1360	60	40	**816**	**544**	**384,1**	**816,46**	560,142	83,173	173,150
16-G	**G-8%-1,37-0,4**		0	2560,5	1600	60	40	**960**	**640**	**0,0**	**960,55**	658,991	97,850	203,706
16-H	**G-8%-1,37-0,4**		0	2560,5	1600	60	40	**960**	**640**	**0,0**	**960,55**	658,991	97,850	203,706

Nummer	Mixdesign	binder (ook activator): sand	sand content (%)	precursor + activator	Precursor [g]	GGBS [%]	RBP [%]	GGBS [g]	RBP [g]	zand [g]	alkalische activator [g]	vezel hoeveelheid [kg/m³]	vezels [g]	SS [g]	SH [g]	H2O [g]
16-C-1	**G-8%-1,37-0,4**	1	50	1280,3	800	60	40	**480**	**320**	**1280,3**	**480,27**	3,00	**3,5**	329,496	48,925	101,853
16-C-2	**G-8%-1,37-0,4**	1	50	1280,3	800	60	40	**480**	**320**	**1280,3**	**480,27**	6,00	**7,0**	329,496	48,925	101,853
16-C-3	**G-8%-1,37-0,4**	1	50	1280,3	800	60	40	**480**	**320**	**1280,3**	**480,27**	9,00	**10,5**	329,496	48,925	101,853

Bijlage O RESULTATEN ZEEFPROEF

Zeving 1 - zeezand

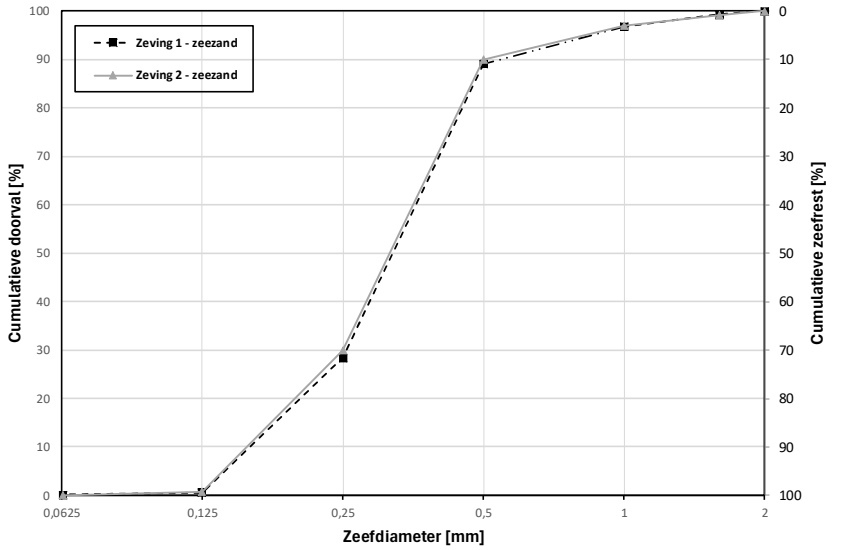
M1	250	g								
zeefopenig [mm]	massa lege zeef [g]	massa op zeef na 5min [g]	massa op zeef na nog 1min [g]	totaal massa zand op zeef [g]	verschil na 1min zeven [g]	verschil na 1min zeven maximum [g]	percentage op zeef [%]	cumulative percentage op zeef [%]	cumulatief doorval [%]	repeatability
2	1010,9	1010,9	1010,9	0	0	10,109	0,00	0,00	100,00	0
1,6	1024	1026	1026,1	2,1	-0,1	10,261	0,84	0,84	99,16	0,382709549
1	921,7	927,3	927,2	5,5	0,1	9,272	2,19	3,03	96,97	0,719963268
0,5	865,9	883,7	883,5	17,6	0,2	8,835	7,02	10,05	89,95	1,262674984
0,25	758,7	910,1	909,1	150,4	1	9,091	59,97	70,02	29,98	1,924389304
0,125	788,7	860,3	861,9	73,2	-1,6	8,619	29,19	99,20	0,80	0,373561357
0,063	785	786,4	786,9	1,9	-0,5	7,869	0,76	99,96	0,04	0,0838492
pan	760,1	760,1	760,2	0,1	-0,1	7,602	0,04	100,00	0,00	0
totaal	250,8									
f	0,04									
afwijking	-0,32	<	1							

D10	0,164412568	mm
D50	0,333444149	mm
D90	0,503409091	mm

Zeving 2 - zeezand

M1	250	g									
zeefopenig [mm]	massa lege zeef [g]	massa op zeef na 5min [g]	massa op zeef na 1min [g]	totaal massa zand op zeef [g]	verschil na 1min zeven [g]	verschil na 1min zeven maximum [g]	percentage op zeef [%]	cumulative percentage op zeef [%]	cumulatief doorval [%]	repeatability	cumulatief doorval vorige test [%]
2	1011,1	1011,1	1011,1	0	0	10,111	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1,6	1024,1	1026,1	1026	1,9	0,1	10,26	0,76	0,76	99,24	0,36	99,64
1	921,8	928	927,9	6,1	0,1	9,279	2,44	3,20	96,80	0,74	99,26
0,5	865,9	885,7	885,2	19,3	0,5	8,852	7,72	10,92	89,08	1,31	98,69
0,25	758,6	910,5	910,2	151,6	0,3	9,102	60,66	71,59	28,41	1,89	98,11
0,125	788,3	857	857,8	69,5	-0,8	8,578	27,81	99,40	0,60	0,32	99,68
0,063	785	785,9	786,1	1,1	-0,2	7,861	0,44	99,84	0,16	0,17	99,83
pan	760,1	760,2	760,5	0,4	-0,3	7,605	0,16	100,00	0,00	0,00	100,00
totaal	249,9										
f	0,16										
afwijking	0,04	<	1								

D10	0,167248201	mm
D50	0,338967678	mm
D90	0,55984456	mm



Zeving 1 - CEN zand

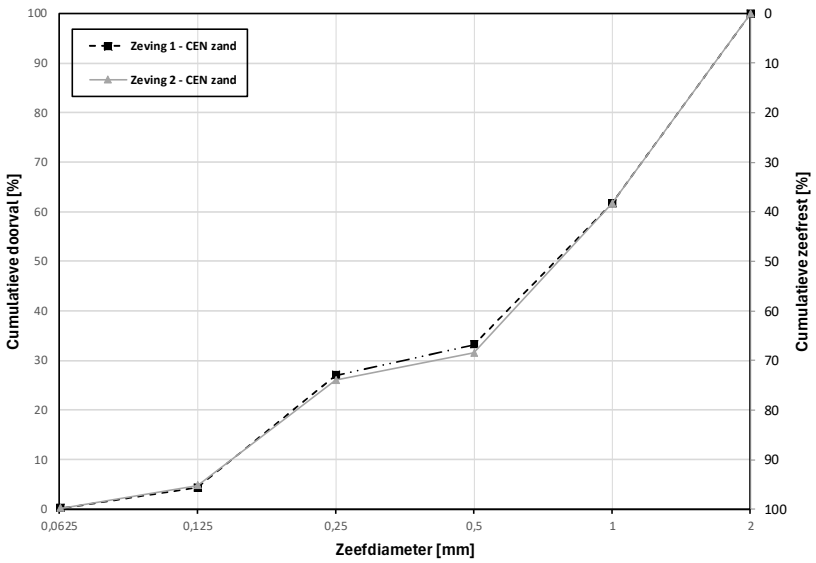
M1	250	g								
zeefopenig [mm]	massa lege zeef [g]	massa op zeef na 5min [g]	massa op zeef na nog 1min [g]	totaal massa zand op zeef [g]	verschil na 1min zeven [g]	verschil na 1min zeven maximum [g]	percentage op zeef [%]	cumulative percentage op zeef [%]	cumulatief doorval [%]	repeatability
2	1010,5	1010,8	1010,7	0,2	0,1	10,107	0,08	0,08	99,92	0,118533414
1	921,9	1018	1017,9	96	0,1	10,179	38,26	38,34	61,66	2,042120297
0,5	865,3	936,6	936,7	71,4	-0,1	9,367	28,46	66,80	33,20	1,977917336
0,25	758,9	774,6	774,4	15,5	0,2	7,744	6,18	72,98	27,02	1,865123732
0,125	788	844,9	844,9	56,9	0	8,449	22,68	95,66	4,34	0,856184771
0,063	892,8	902,9	903,2	10,4	-0,3	9,032	4,15	99,80	0,20	0,187305614
pan	758,5	759	759	0,5	0	7,59	0,20	100,00	0,00	0
totaal	250,9									
f	0,2									
afwijking	-0,36	<	1							

D10	0,156173111	mm
D50	1,17983871	mm
D90	1,497969188	mm

Zeving 2 - CEN zand

M1	250	g									
zeefopenig [mm]	massa lege zeef [g]	massa op zeef na 5min [g]	massa op zeef na 1min [g]	totaal massa zand op zeef [g]	verschil na 1min zeven [g]	verschil na 1min zeven maximum [g]	percentage op zeef [%]	cumulative percentage op zeef [%]	cumulatief doorval [%]	repeatability	cumulatief doorval vorige test [%]
2	1010,3	1010,7	1010,6	0,3	0,1	10,106	0,12	0,12	99,88	0,14	99,92
1	921,4	1017,4	1017,5	96,1	-0,1	10,175	38,23	38,35	61,65	2,04	61,66
0,5	865,1	940,9	940,9	75,8	0	9,409	30,15	68,50	31,50	1,95	33,20
0,25	758,4	778,7	772,2	13,8	6,5	7,722	5,49	73,99	26,01	1,84	27,02
0,125	789,9	850,8	843,3	53,4	7,5	8,433	21,24	95,23	4,77	0,90	4,34
0,063	893	904,2	904,5	11,5	-0,3	9,045	4,57	99,80	0,20	0,19	0,20
pan	760	760,5	760,5	0,5	0	7,605	0,20	100,00	0,00	0,00	0,00
totaal	251,4										
f	0,2										
afwijking	-0,56	<	1								

D10	0,195841739	mm
D50	0,391151685	mm
D90	3,164130435	mm



TECHNISCHE FICHE

HOLCIM

CEM I 52,5 R HES

SNEL HOOGPERFORMANT CEMENT

HOLCIM (BELGIË) N.V. | FABRIEK OBOURG

ZAKKEN BULK

Het product

Het cement CEM I 52,5 R HES is een portlandcement volgens EN 197-1 dat als enig hoofdbestanddeel portlandklinker (K) bevat. Het klinkergehalte bedraagt minstens 95%.

Voordelen van CEM I 52,5 R HES

- Zeer snelle verharding
- Zeer hoge sterkte op zeer korte termijn en hoge sterkte op middellange termijn



Toepassingsgebied

Gebruiksgeschiktheid volgens de betonnorm(en)

De norm NBN B15-001 (2024) legt geen bijzondere eisen op wat de specifieke gebruiksgeschiktheid betreft. Dit cement mag in alle omgevingsklassen gebruikt worden, mits respect van de samenstellingseisen van het ermee vervaardigd beton.

Aanbevolen toepassingsgebieden (Holcim)

- Beton in chemisch niet agressief milieu (omgevingsklassen E0, EI en EE), dat een zeer snelle ontkisting, behandeling en ingebruikname vraagt.
- Beton voor middelmatige of hoge sterkteklassen.
- Voorgespannen beton.
- Beton storten in de winterperiode.
- Prefabricatie van betonproducten.

Tegenindicaties (Holcim)

- Beton in agressief milieu (omgevingsklassen EA2 en EA3).
- Beton voor massieve constructies.
- Indien er een risico bestaat op alkali-silicareactie (potentieel reactieve granulaten en blootstelling aan vochtig milieu).

Land	Referentie-documenten	Benaming	Merk
België	TRA 600 NBN B12-110 PTV 603	CEM I 52,5 R HES	BENOR
Nederland	BRL 2601	CEM I 52,5 R	KOMO

Technische kenmerken

Mechanische en fysische eigenschappen[1]

	Eenheden	Resultaten	Eisen Norm(en)
Waterbehoefte Begin binding Einde binding	% hh:mm hh:mm	32 3:15 4:00	- ≥ 0:45 ≤ 12:00
Stabiliteit	mm	< 1	≤ 10
Druksterkte • 1 dag • 2 dagen • 28 dagen	 N/mm² N/mm² N/mm²	 30 45 68	 ≥ 20 ≥ 30 ≥ 52,5
Specifieke oppervlakte Blaine	cm²/g	5390	-
Absolute volumemassa	kg/m³	3150	-
Zeefrest 200 µm	%	< 0,5	≤ 3,0
C-waarde	-	1,15	-

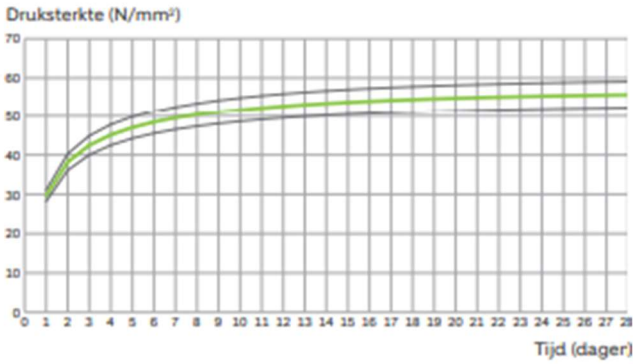
Chemische samenstelling[1]

	Resultaten (%)	Eisen (%) Norm(en)
CaO	64,3	-
SiO_2	18,7	-
Al_2O_3	4,8	-
Fe_2O_3	4,6	-
MgO	1,1	-
Na_2O-eq	0,58	≤ 0,94[2]
SO_3	3,4	≤ 4,0
Cl^-	0,07	≤ 0,10
Gloeiverlies	1,8	≤ 5,0
Onoplosbare rest	0,2	≤ 5,0

[1] Opmerking: de resultaten weergegeven in de tabellen zijn gebaseerd op gemiddelde waarden en zijn louter indicatief. Zij hebben dus geen contractuele waarde. Holcim (België) N.V. kan er dus op geen enkele wijze verantwoordelijk voor worden gesteld.

[2] Opmerking: gewaarborgde maximum waarde (voor de berekening van de alkalibalans van een beton).

Druksterkte van beton



Deze figuur geeft de evolutie van de druksterkte weer van een standaardbeton[3], gemeten in ons laboratorium, op kubussen van 150 mm zijde, aangemaakt met het cement CEM I 52,5 R HES.

De voornaamste eigenschappen van het beton zijn:

- Een continue korrelverdeling: kalksteen 4/20 + grof rivierzand.
- Cementgehalte: 350 kg/m³
- W/C-factor: 0,48
- Slump van ongeveer 150 mm bij 0,35% van een PCE hulpstof.

[3] Opmerking: omdat de sterkte van beton afhangt van verschillende factoren, is de curve op de figuur niet noodzakelijk representatief voor de evolutie van de sterkte van eender welk beton aangemaakt met CEM I 52,5 R HES.

Het cement CEM I 52,5 R HES is CE-gemarkeerd als CEM I 52,5 R. Door de CE-markering neemt de fabrikant de verantwoordelijkheid voor de conformiteit van het product met de prestaties die hij opneemt in zijn Prestatieverklaring (DoP). Daarnaast is het cement drager van een aantal vrijwillige kwaliteitsmerken die waarborgen dat het product overeenstemt met de technische specificaties opgenomen in de bijhorende certificatierichtlijnen (zie tabel onderaan eerste pagina).

De Prestatieverklaring (DoP) evenals het veiligheidsinformatieblad (SDS) zijn beschikbaar op onze website **www.holcim.be**

©2024 – Holcim (België) N.V. Alle rechten voorbehouden. Op alle bestellingen / leveringen zijn onze algemene verkoopvoorwaarden van toepassing.

Holcim (België) N.V.
Robert Schumanlaan 71
B-1401 Nijvel
Tel. + 32 67 87 66 01
Technical helpdesk:
bel-tsc@holcim.com
www.holcim.be

Bijlage Q PRODUCTCERTIFICAAT ECO_2CEM

CERTIFICAAT

kiwa

KOMO® productcertificaat

nummer : K22420/09 uitgegeven : 2018-10-15
vervangt : K22420/08 geldig tot : Onbepaald
d.d.: 1 september 2014

Gemalen gegranuleerde hoogovenslak

Gemalen gegranuleerde hoogovenslak, ECO2cem

Certificaathouder:

Ecocem Benelux B.V.

Verklaring van Kiwa:
Dit productcertificaat is op basis van BRL 9325 "Gemalen gegranuleerde hoogovenslak voor gebruik in beton, mortel en injectiemortel" 2011-11-18, inclusief wijzigingsblad d.d. 2014-12-31 afgegeven conform het Kiwa Reglement voor Productcertificatie.

Het kwaliteitssysteem en de productkenmerken behorende bij gemalen gegranuleerde hoogovenslak worden periodiek gecontroleerd.

Op basis daarvan verklaart Kiwa dat het gerechtvaardigd vertrouwen bestaat, dat het door de certificaathouder geleverde gemalen gegranuleerde hoogovenslak bij aflevering voldoet aan de in dit productcertificaat vastgelegde technische specificatie, mits gemalen gegranuleerde hoogovenslak voorzien is van het KOMO®-merk op een wijze als aangegeven in dit productcertificaat.
De essentiële kenmerken, zoals vastgelegd in de van toepassing zijnde Europese norm, maken geen onderdeel uit van deze verklaring.

Luc Leroy
Kiwa

Dit productcertificaat is opgenomen in het overzicht op de website van Stichting KOMO: www.komo.nl
Advies: raadpleeg www.kiwa.nl om na te gaan of dit productcertificaat geldig is.

Kiwa Nederland B.V.
Sir Winston Churchilllaan 273
2288 EA Rijswijk
Postbus 70, 2280 AB Rijswijk
T +31(0)88 998 4440
E bmc@kiwa.nl
W www.kiwa.nl

Bedrijf:
Ecocem Benelux B.V.
Plaza 22
4780 LX Moerdijk

Productielocatie:
Graanweg 22A
4782 PP Moerdijk

Beoordeeld is:
- **kwaliteitssysteem**
- **Periodieke controle**

TECHNISCHE SPECIFICATIES:

Onderwerp:
Gemalen gegranuleerde hoogovenslak voor gebruik in beton, mortel en injectiemortel wordt verkregen door afkoeling van gesmolten hoogovenslak, bijvoorbeeld in water of stoom. Hierdoor ontstaat een glasachtig gegranuleerd materiaal dat daarna gedroogd en vermalen wordt tot fijn poeder.

Productkenmerken
Het gemalen gegranuleerde hoogovenslak voldoet aan de in BRL 9325 vastgelegde producteisen.

Certificatiemerk:
Nevenstaand certificatiemerk, met een afmeting van ten minste 8 x 8 mm, moet zijn afgebeeld op de afleveringsbonnen van gemalen gegranuleerde hoogovenslak.

Verplichte aanduidingen:
- de naam, de handelsnaam of andere wijze van identificatie van de leverancier;
- de naam en de plaats van de locatie waar de gemalen gegranuleerde hoogovenslak is geproduceerd;
- het chloridegehalte indien dit groter is dan 0,1 %.

WENKEN VOOR DE AFNEMER

Inspecteer bij aflevering of:
- geleverd is wat is overeengekomen;
- het merk en de wijze van merken juist zijn;
- de producten geen zichtbare gebreken vertonen als gevolg van transport en dergelijke.

Indien u op grond van het hiervoor gestelde tot afkeuring overgaat, neem dan contact op met:
- Ecocem Benelux B.V.

en zo nodig met:
- Kiwa Nederland B.V.

Raadpleeg voor de juiste wijze van opslag, transport en verwerking de verwerkingsvoorschriften van de certificaathouder.

In het kader van dit productcertificaat vindt geen controle plaats van de juistheid van de prestaties van de essentiële kenmerken.

De uitspraken in dit productcertificaat mogen niet worden gebruikt ter vervanging van de CE-markering en/of de bijbehorende verplichte Prestatieverklaring.

Bijlage R TECHNISCHE FICHE NaOH

Certificate of Analysis **Page 1 of 1**

ThermoFisher SCIENTIFIC

Version	00
Molecular weight	40.00
Molecular Formula	H Na O
CAS No	1310-73-2
Linear Formula	NaOH
Flash Point (°C)	

Certificate of Analysis

Products are processed under ISO 9001:2015 quality management systems and samples are tested for conformance to the noted specifications. Certain data may have been supplied by third parties. We disclaim the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, and the accuracy of third party data or information associated with the product. Products are for research and development use only. Products are not for direct administration to humans or animals. It is the responsibility of the final formulator or end user to determine suitability, and to qualify and/or validate each product for its intended use.

Catalog Number	45113	**Quality Test / Release Date**	06/30/2023
Lot Number	A0454435	**Suggested retest date**	06/30/2028
Description	Sodium hydroxide,extra pure,micropearls		
Country of Origin	FRANCE		
Declaration of Origin	synthetic		

BSE/TSE	
Chemical	

Result name	Specifications	Test Value
Appearance (Color)	White	White
Appearance (Form)	Pearls	Pearls
Titration with HCl	>=97.5 % (NaOH)	98.8 % (NaOH)
Titration with HCl	=<2.5 % (Na2CO3)	=<2.5 % (Na2CO3)
Particle size	20 to 40 mesh	20 to 40 mesh



C. Wygaerts, QA Manager Issued: 08-24-2023

Acros Organics BV
ENA23, zone1, nr 1350, Janssen Pharmaceuticalaan 3a, B-2440 Geel, Belgium
Tel +32 14/57.52.11 - Fax+32 14/59.34.34 Internet: https://www.thermofisher.com
1 Reagent Lane, Fair Lawn, NJ 07410, USA Fax 201-796-1329

Bijlage S TECHNISCHE FICHE NA_2SIO_3

VWR BDH CHEMICALS

Certificate of Analysis

Material	28079.460
Material description	Sodium silicate in aqueous solution
Grade	TECHNICAL
Lot	25C114001
Expires end of	2026-Jan-29
CAS Number	1344-09-8
Molecular formula	Na2O. x SiO2.H2O (x = 3.4)

Characteristics	Specifications	Measured values
Silica	25.6 - 27.6 %	25.9 %
Sodium oxide	7.5 - 8.5 %	7.9 %

Signature

We certify that this batch conforms to the specifications listed above.

This document has been produced electronically and is valid without a signature.

Isabelle Habay, Head of Laboratory - Briare
VWR International S.A.S.; Z.I. de Vaugereau; FR-45250 Briare; France

For Professional use in Laboratory or Manufacturing. Not for use as an Active Pharmaceutical Ingredient or Food or Animal Feed. Suitability and intended use of the product remains the responsibility of the user. 269D91.75490A-1809E30A

VWR International LLC, Radnor Corporate Center, Building One, Suite 200, 100 Matsonford Road, Radnor, PA 19087, USA
VWR International bv, Haasrode Research Park Zone 2020, Geldenaaksebaan 464, 3001 Leuven, Belgium

Bijlage T BUIGSTERKTE RESULTATEN

Buigsterkte: Rf, na 21dagen																			
mengsel	vezelsoc	vezeldiame	vezelgehal	vezellen	zandgehalte [%]	natronwaterglass	formule	Vermenging natronloog en Natronwaterglas	Rf 1, [Mpa	Rf 2, [Mpa	Rf 3, [Mpa	gemiddelde [Mpa]	ondergrens 10% [Mp	bovengrens 10% [Mp	datum zero time	zero tim	testdatum	testtijdstip	uitvoerder	extra informatie
16-C-1	macro	1mm	3kg/m³	15mm	50	C	juist	24h voordien	9,03	8,32	9,52	8,96	8,06	9,85	24/03/2025	15:30	14/04/2025	13:45	Thibault	
16-C-1	macro		3kg/m³	50mm	50	C	juist	24h voordien	8,03	8,40	8,64	8,36	7,52	9,19	26/03/2025	12:00	16/04/2025	12:00	Thibault	
16-C-2	macro		6kg/m³	50mm	50	C	juist	24h voordien	8,37	8,95	8,75	8,69	7,82	9,56	26/03/2025	13:00	16/04/2025	13:00	Thibault	
16-C-3	macro		9kg/m³	50mm	50	C	juist	24h voordien	9,32	9,65	9,18	9,38	8,44	10,32	26/03/2025	13:30	16/04/2025	13:32	Thibault	
16-C-1	vlas	1mm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	8,98	8,74	9,44	9,05	8,15	9,96	24/03/2025	11:15	14/04/2025	10:45	Thibault	
16-C-2	vlas	1mm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	9,39	8,47	8,67	8,84	7,96	9,73	24/03/2025	13:00	14/04/2025	12:55	Thibault	
16-C-3	vlas	1mm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	8,92	8,49	7,95	8,45	7,61	9,30	24/03/2025	14:15	14/04/2025	13:15	Thibault	
16-C-1	vlas	2mm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	8,99	8,86	8,81	8,89	8,00	9,77	26/03/2025	8:30	16/04/2025	8:30	Thibault	
16-C-2	vlas	2mm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	8,70	8,02	8,51	8,41	7,57	9,25	26/03/2025	10:00	16/04/2025	10:00	Thibault	
16-C-3	vlas	2mm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	8,43	8,41	8,74	8,53	7,67	9,38	26/03/2025	10:30	16/04/2025	10:00	Thibault	
16-C-1	vlas	500qm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	8,82	9,34	9,47	9,21	8,29	10,13	26/03/2025	14:30	16/04/2025	14:13	Thibault	
16-C-2	vlas	500qm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	9,01	9,14	7,88	8,68	7,81	9,54	26/03/2025	15:00	16/04/2025	14:45	Thibault	
16-C-3	vlas	500qm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	9,43	9,25	9,42	9,37	8,43	10,31	26/03/2025	15:00	16/04/2025	14:45	Thibault	
16					0	C	juist	24h voordien	5,14	5,68	4,40	4,77	4,29	5,25	5/03/2025	12:30	26/03/2025	12:30	Thibault	
16-F					15	C	juist	24h voordien	5,58	4,69	5,22	5,16	4,64	5,68	5/03/2025	11:00	26/03/2025	11:00	Thibault	
16-E					25	C	juist	24h voordien	6,28	6,60	6,25	6,37	5,74	7,01	4/03/2025	8:30	25/03/2025	7:35	Thibault	
16-D					33	C	juist	24h voordien	7,22	8,08	7,39	7,57	6,81	8,32	4/03/2025	9:30	25/03/2025	8:00	Thibault	
16-B					55	C	juist	24h voordien	9,08	8,95	9,42	9,15	8,23	10,06	5/03/2025	9:00	26/03/2025	9:00	Thibault	
16-A					67	C	juist	24h voordien	6,38	6,57	5,90	6,28	5,65	6,91	4/03/2025	13:00	25/03/2025	13:15	Thibault	
16-C					50	C	juist	24h voordien	9,21	9,51	9,10	9,27	8,35	10,20	27/03/2025	13:15	17/04/2025	13:25	Thibault	
16-A					67	C	juist	24h voordien	10,43	9,78	9,23	9,82	8,83	10,80	27/03/2025	14:15	17/04/2025	13:55	Thibault	herdaan want resultaat was zo laag en extra angestampt

Buigsterkte: Rf, na 7dagen

mengsel	vezelsoo	vezeldia	vezelgehal	vezellen	zandgehalte [%]	natronwaterglass	formule	Vermenging natronloog en Natronwaterglas	Rf 1, [Mpa	Rf 2, [Mpa	Rf 3, [Mpa	gemiddelde [Mpa]	ondergrens 10% [Mp	bovengrens 10% [Mp	datum zero time	zero tim	testdatum	testtijdstip	uitvoerder	extra informatie
16-C-1	vlas	1mm	3kg/m³	varia	50	C	juist	24h voordien	7,27	6,56	6,82	6,88	6,19	7,57	24/03/2025	10:45	18/03/2025	10:50	Thibault	uurverschil dus 1 uur vroeger getes
16-C-2	vlas	1mm	6kg/m³	varia	50	C	juist	24h voordien	7,49	7,31	7,33	7,37	6,64	8,11	24/03/2025	12:15	31/03/2025	12:10	Thibault	uurverschil dus 1 uur vroeger getes
16-C-3	vlas	1mm	9kg/m³	varia	50	C	juist	24h voordien	7,32	6,58	7,11	7,00	6,30	7,70	11/03/2025	14:00	18/03/2025	14:00	Ahmad	
16-C-3	vlas	1mm	9kg/m³	varia	50	C	juist	24h voordien	7,07	7,14	7,05	7,09	6,38	7,79	24/03/2025	13:30	31/03/2025	13:45	Thibault	uurverschil dus 1 uur vroeger getes
16-C-1	vlas	2mm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	7,93	7,22	7,68	7,61	6,85	8,37	27/03/2025	16:00	3/04/2025	17:40	Katlyn	
16-C-2	vlas	2mm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	7,90	7,32	7,50	7,58	6,82	8,33	27/03/2025	16:30	3/04/2025	18:15	Katlyn	
16-C-3	vlas	2mm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	7,65	7,09	7,65	7,46	6,72	8,21	28/03/2025	8:15	04/04/205	8:02	Thibault	
16-C-1	vlas	500qm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	6,69	7,37	6,40	6,82	6,14	7,50	28/03/2025	8:30	04/04/205	8:17	Thibault	
16-C-2	vlas	500qm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	6,50	6,24	6,53	6,42	5,78	7,06	28/03/2025	9:15	04/04/205	9:00	Thibault	
16-C-3	vlas	500qm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	6,41	7,15	5,87	6,47	5,83	7,12	28/03/2025	9:30	04/04/205	9:10	Thibault	
16-C-1	vlas	var	3kg/m³	15mm	50	C	juist	24h voordien	7,10	7,19	6,71	7,00	6,30	7,70	21/03/2025	11:00	28/03/2025	10:50	Thibault	
16-C-1	macro	var	3kg/m³	50mm	50	C	juist	24h voordien	6,49	7,25	5,91	6,55	5,89	7,20	28/03/2025	12:00	04/04/205	12:05	Thibault	
16-C-2	macro	var	6kg/m³	50mm	50	C	juist	24h voordien	7,70	7,16	7,17	7,34	6,61	8,08	28/03/2025	12:15	04/04/205	12:20	Thibault	
16-C-3	macro	var	9kg/m³	50mm	50	C	juist	24h voordien	7,09	7,49	6,69	7,09	6,38	7,80	28/03/2025	14:45	04/04/205	12:50	Thibault	
16-C-1	macro		3kg/m³	15mm	50	C	juist	24h voordien	7,78	7,70	7,16	7,55	6,79	8,30	24/03/2025	15:15	31/03/2025	15:15	Thibault	
16-C-3	macro		9kg/m³	50mm	50	C	juist	24h voordien	7,85	7,73	7,82	7,80	7,02	8,58	17/03/2025	8:00	24/03/2025	8:30	Thibault	
16					0	C	juist	24h voordien	3,38	3,53	3,04	3,32	2,99	3,65	4/03/2025	12:00	12/03/2025	13:00	Thibault	
16-F					15	C	juist	24h voordien	4,33	4,49	4,64	4,49	4,04	4,93	5/03/2025	10:15	12/03/2025	8:45	Thibault	
16-E					25	C	juist	24h voordien	5,16	5,22	5,02	5,13	4,62	5,65	4/03/2025	8:00	11/03/2025	8:30	Thibault	
16-D					33	C	juist	24h voordien	5,73	5,99	5,20	5,64	5,07	6,20	4/03/2025	9:00	11/03/2025	8:50	Thibault	
16-C					50	C	juist	24h voordien	7,50	7,56	7,54	7,53	6,78	8,28	27/03/2025	13:30	3/04/2025	13:28	Thibault	
16-B					55	C	juist	24h voordien	7,19	7,32	6,95	7,15	6,44	7,87	5/03/2025	8:30	12/03/2025	8:20	Thibault	
16-A					67	C	juist	24h voordien	6,62	7,58	7,44	7,21	6,49	7,94	4/03/2025	11:15	11/03/2025	11:15	Thibault	
16-A					67	C	juist	24h voordien	7,76	7,35	7,91	7,67	6,90	8,44	27/03/2025	14:00	3/04/2025	13:45	Thibault	

Buigsterkte: Rf, na 3dagen

mengsel	vezelsoo	vezeldiame	vezelgehal	vezellen	zandgehalte [%]	natronwaterglass	formule	Vermenging natronloog en Natronwaterglas	Rf 1, [Mpa	Rf 2, [Mpa	Rf 3, [Mpa	gemiddelde [Mpa]	onderg rens 10% [Mp	bovengr ens 10% [Mpa	datum zero time	zero tim	testdatum	testtijdstip	uitvoerder	extra informatie
16-C-1	macro	var	3kg/m³	50	50	C	juist	24h voordien	6,34	5,64	5,73	5,91	5,31	6,50	1/04/2025	7:45	4/04/2025	7:50	Thibault	
16-C-2	macro	var	6kg/m³	50	50	C	juist	24h voordien	5,68	5,42	6,04	5,71	5,14	6,29	1/04/2025	8:30	4/04/2025	8:31	Thibault	
16-C-3	macro	var	9kg/m³	50	50	C	juist	24h voordien	5,79	6,02	6,22	6,01	5,41	6,61	1/04/2025	8:45	4/04/2025	8:45	Thibault	
16					0	C	juist	24h voordien	3,02	2,85	2,96	2,94	2,65	3,24	31/03/2025	13:00	3/04/2025	13:00		
16-F					15	C	juist	24h voordien	3,35	3,62	3,52	3,50	3,15	3,85	25/03/2025	16:00	28/03/2025	15:45	Thibault	
16-E					25	C	juist	24h voordien	4,04	4,39	3,45	3,74	3,37	4,12	25/03/2025	10:30	28/03/2025	10:25	Thibault	
16-D					33	C	juist	24h voordien	4,77	4,33	4,62	4,57	4,12	5,03	25/03/2025	10:15	28/03/2025	10:10	Thibault	
16-B					55	C	juist	24h voordien	6,17	6,25	6,11	6,17	5,56	6,79	25/03/2025	9:45	28/03/2025	9:50	Thibault	
16-A					67	C	juist	24h voordien	6,41	6,10	5,69	6,07	5,46	6,67	25/03/2025	8:45	28/03/2025	9:00	Thibault	
16-C					50	C	juist	24h voordien	6,40	5,55	5,89	5,95	5,35	6,54	31/03/2025	13:15	3/04/2025	13:15	Thibault	
16-C-1	vlas	1mm	3kg/m³	varia	50	C	juist	24h voordien	5,74	5,65	5,07	5,49	4,94	6,03	14/04/2025	11:00	17/04/2025	11:00	Thibault	
16-C-2	vlas	1mm	6kg/m³	varia	50	C	juist	24h voordien	5,65	6,44	5,64	5,91	5,32	6,50	14/04/2025	11:15	17/04/2025	11:10	Thibault	
16-C-3	vlas	1mm	9kg/m³	varia	50	C	juist	24h voordien	6,00	5,78	5,76	5,85	5,26	6,43	14/04/2025	11:30	17/04/2025	11:25	Thibault	
16-C-1	vlas	2mm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	5,60	5,03	5,72	5,45	4,91	6,00	14/04/2025	11:45	17/04/2025	11:40	Thibault	
16-C-2	vlas	2mm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	5,17	5,49	5,87	5,51	4,96	6,06	14/04/2025	12:00	17/04/2025	11:55	Thibault	
16-C-3	vlas	2mm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	5,75	5,72	6,21	5,90	5,31	6,49	14/04/2025	12:15	17/04/2025	12:10	Thibault	
16-C-1	vlas	500qm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	6,46	5,72	6,13	6,10	5,49	6,71	14/04/2025	8:15	17/04/2025	8:15	Thibault	
16-C-2	vlas	500qm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	5,43	5,73	5,30	5,49	4,94	6,04	14/04/2025	8:45	17/04/2025	8:42	Thibault	
16-C-3	vlas	500qm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	5,32	5,54	6,77	5,43	4,89	5,97	14/04/2025	9:45	17/04/2025	9:40	Thibault	

Buigsterkte: Rf, na 1dag

mengsel	vezelsoo	vezeldia	vezelgehal	vezellen	zandgehalte [%]	natronwaterglass	formule	Vermenging natronloog en Natronwaterglas	Rf 1, [Mpa	Rf 2, [Mpa	Rf 3, [Mpa	gemiddelde [Mpa]	onderg rens 10% [Mp	bovengrens 10% [Mp	datum zero time	zero tim	testdatum	testtijdstip	uitvoerder	extra informatie
16-C-1	macro	var	3kg/m³	50	50	C	juist	24h voordien	3,63	3,71	3,90	3,75	3,37	4,12	3/04/2025	12:37	4/04/2025	12:35	Thibault	
16-C-2	macro	var	6kg/m³	50	50	C	juist	24h voordien	3,76	3,69	3,41	3,62	3,26	3,98	3/04/2025	11:55	4/04/2025	11:50	Thibault	
16-C-3	macro	var	9kg/m³	50	50	C	juist	24h voordien	5,97	4,00	3,99	4,00	3,60	4,40	16/04/2025	12:45	17/04/2025	12:40	Thibault	
16-C-1	vlas	1mm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	4,10	3,64	4,24	3,99	3,60	4,39	27/03/2025	14:30	28/03/2025	14:35	Thibault	
16-C-2	vlas	1mm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	4,51	4,48	4,88	4,63	4,16	5,09	27/03/2025	15:00	28/03/2025	14:55	Thibault	
16-C-3	vlas	1mm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	4,58	4,71	4,45	4,58	4,12	5,04	27/03/2025	15:30	28/03/2025	15:20	Thibault	
16-C-1	vlas	2mm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	4,10	4,04	4,20	4,11	3,70	4,52	3/04/2025	10:53	4/04/2025	10:50	Thibault	
16-C-2	vlas	2mm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	3,75	3,89	3,46	3,70	3,33	4,07	3/04/2025	11:08	4/04/2025	11:05	Thibault	
16-C-3	vlas	2mm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	4,12	4,01	3;758	4,07	3,66	4,47	3/04/2025	11:23	4/04/2025	11:20	Thibault	
16-C-1	vlas	500qm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	4,13	4,47	4,31	4,31	3,88	4,74	3/04/2025		4/04/2025	7:40	Thibault	
16-C-2	vlas	500qm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	3,24	3,64	3,58	3,49	3,14	3,84	3/04/2025	10:20	4/04/2025	10:15	Thibault	
16-C-3	vlas	500qm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	4,58	4,41	4,56	4,51	4,06	4,97	3/04/2025	10:40	4/04/2025	10:35	Thibault	
16					0	C	juist	24h voordien	1,96	2,16	1,93	2,02	1,82	2,22	16/04/2025	12:30	17/04/2025	12:25	Thibault	
16-F					15	C	juist	24h voordien	3,20	2,61	2,99	2,93	2,64	3,22	31/03/2025	12:00	1/04/2025	12:00	Thibault	
16-E					25	C	juist	24h voordien	3,07	2,89	3,17	3,04	2,74	3,35	31/03/2025	10:30	1/04/2025	10:30	Thibault	
16-D					33	C	juist	24h voordien	3,78	3,56	3,33	3,56	3,20	3,91	31/03/2025	10:00	1/04/2025	10:00	Thibault	
16-B					55	C	juist	24h voordien	4,73	3,98	4,26	4,32	3,89	4,75	31/03/2025	9:30	1/04/2025	9:25	Thibault	
16-A					67	C	juist	24h voordien	4,33	4,44	4,01	4,26	3,83	4,68	31/03/2025	8:45	1/04/2025	8:45	Thibault	
16-C					50	C	juist	24h voordien	3,27	3,01	3,42	3,24	2,91	3,56	3/04/2025	14:54	1/04/2025	14:45	Thibault	
16-C					50	C	juist	24h voordien	4,17	4,11	3,86	4,05	3,64	4,45	16/04/2025	13:45	17/04/2025	13:45	Thibault	herdaan want resultaat leek zeer l

Bijlage U DRUKSTERKTE RESULTATEN

Druksterkte: Rc, na 21dagen																						
mengsc	vezelsoc	vezeldiame	vezelgehal	vezellen	zandgehalte [%]	natronwaterglass	formule	Vermenging natronloog en Natronwaterglas	kubus 1 Rc,7 [Mpa	kubus 2 Rc,7 [Mpa	kubus 3 Rc,7 [Mpa	kubus 4 Rc,7 [Mp	kubus 5 Rc,7 [Mpa	kubus 6 Rc,7 [Mp	gemiddelde [Mp	ondergrens 10% [Mp	bovengrens 10% [Mp	datum zero time	zero ti	testdatum	testtijd stip	uitvoerde	extra informatie
16					0	C	juist	24h voordien	84,86	79,08	71,33	70,79	75,64	76,10	74,59	67,13	82,05	5/03/2025	12:30	26/03/2025	12:35	Thibault	
16-F					15	C	juist	24h voordien	75,71	86,12	68,70	81,67	78,53	80,05	78,46	70,61	86,31	5/03/2025	11:00	26/03/2025	11:05	Thibault	
16-E					25	C	juist	24h voordien	81,70	83,67	81,58	79,44	82,77	80,15	81,55	73,40	89,71	4/03/2025	8:30	25/03/2025	7:45	Thibault	
16-D					33	C	juist	24h voordien	79,76	85,16	78,87	78,14	79,79	76,52	79,71	71,74	87,68	4/03/2025	9:30	25/03/2025	8:10	Thibault	
16-B					55	C	juist	24h voordien	81,11	90,06	83,07	84,21	80,25	83,42	83,69	75,32	92,05	5/03/2025	9:00	26/03/2025	9:05	Thibault	
16-A					67	C	juist	24h voordien	57,01	56,15	57,58	58,06	60,20	56,88	57,65	51,88	63,41	4/03/2025	13:00	25/03/2025	13:20	Thibault	
16-C					50	C	juist	24h voordien	91,24	84,27	80,22	82,72	82,06	82,77	83,88	75,49	92,27	27/03/2025	13:15	17/04/2025	13:30	Thibault	
16-C-1	vlas	1mm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	73,03	76,87	75,98	76,47	77,32	74,56	75,71	68,13	83,28	24/03/2025	11:15	14/04/2025	10:53	Thibault	
16-C-2	vlas	1mm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	79,10	78,71	77,52	74,42	80,19	78,03	78,00	70,20	85,79	24/03/2025	13:00	14/04/2025	12:55	Thibault	
16-C-3	vlas	1mm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	70,34	72,30	67,55	73,74	71,69	70,25	70,98	63,88	78,08	24/03/2025	14:15	14/04/2025	13:20	Thibault	
16-C-1	macro	1mm	3kg/m³	15mm	50	C	juist	24h voordien	89,49	82,15	86,05	85,88	85,20	82,89	85,28	76,75	93,80	24/03/2025	15:30	14/04/2025	13:50	Thibault	
16-C-1	vlas	2mm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	81,09	77,77	79,82	73,38	68,49	77,62	77,93	70,14	85,73	26/03/2025	8:30	16/04/2025	8:35	Thibault	
16-C-2	vlas	2mm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	73,92	72,93	65,36	69,92	77,02	74,08	72,20	64,98	79,42	26/03/2025	10:00	16/04/2025	10:05	Thibault	
16-C-3	vlas	2mm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	72,83	67,19	73,99	67,41	73,36	75,46	71,71	64,54	78,88	26/03/2025	10:30	16/04/2025	10:35	Thibault	
16-C-1	macro		3kg/m³	50mm	50	C	juist	24h voordien	78,34	83,15	81,63	79,29	78,73	82,03	80,53	72,48	88,58	26/03/2025	12:00	16/04/2025	12:05	Thibault	
16-C-2	macro		6kg/m³	50mm	50	C	juist	24h voordien	73,51	75,83	76,26	77,32	80,69	81,30	77,48	69,73	85,23	26/03/2025	13:00	16/04/2025	13:05	Thibault	
16-C-3	macro		9kg/m³	50mm	50	C	juist	24h voordien	79,76	88,23	81,91	87,52	84,05	82,45	83,99	75,59	92,38	26/03/2025	13:30	16/04/2025	13:37	Thibault	
16-C-1	vlas	500qm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	80,26	81,19	80,61	79,63	77,21	74,81	78,95	71,05	86,84	26/03/2025	14:30	16/04/2025	14:15	Thibault	
16-C-2	vlas	500qm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	81,39	77,66	78,45	75,53	80,82	84,05	79,65	71,68	87,61	26/03/2025	15:00	16/04/2025	14:50	Thibault	
16-C-3	vlas	500qm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	81,79	81,76	82,05	80,40	81,28	84,49	81,96	73,76	90,16	26/03/2025	15:30	16/04/2025	15:05	Thibault	
16-A					67	C	juist	24h voordien	91,03	84,12	86,85	86,64	90,19	91,57	88,40	79,56	97,24	27/03/2025	14:15	17/04/2025	14:00	Thibault	herdaan want re

Druksterkte: Rc, na 7dagen

mengse	vezelsoo	dia	vezelgehal	vezellen	zandgehalte [%]	natronwaterglass	formule	Vermenging natronloog en Natronwaterglas	kubus 1 Rc,7 [Mpa	kubus 2 Rc,7 [Mpa	kubus 3 Rc,7 [Mpa	kubus 4 Rc,7 [Mp	kubus 5 Rc,7 [Mpa	kubus 6 Rc,7 [Mp	gemiddelde [Mp	ondergrens 10% [Mp	bovengrens 10% [Mp	datum zero time	zero tir	testdatum	testtijd stip	uitvoerde	extra informati
16-C-1	vlas	1mm	3kg/m³	varia	50	C	juist	24h voordien	60,13	59,99	58,73	60,62	60,71	58,32	59,75	53,77	65,72	24/03/2025	10:45	31/03/2025	10:53	Thibault	
16-C-2	vlas	1mm	6kg/m³	varia	50	C	juist	24h voordien	61,91	56,46	59,52	59,67	55,31	58,93	58,63	52,77	64,50	24/03/2025	12:15	31/03/2025	12:15	Thibault	
16-C-3	vlas	1mm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	61,41	61,71	59,37	60,20	58,56	63,04	60,71	54,64	66,79	11/04/2025	14:15	18/03/2025	14:00	Ahmad	
16-C-3	vlas	1mm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	54,76	55,31	54,98	57,77	57,59	55,89	56,05	50,45	61,66	24/03/2025	13:30	31/03/2025	13:50	Thibault	
16-C-1	vlas	2mm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	61,76	64,66	54,11	60,93	60,04	58,79	60,05	54,04	66,05	27/03/2025	16:00	3/04/2025	17:35	Katlyn	
16-C-2	vlas	2mm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	61,72	57,37	58,27	63,65	57,65	58,86	59,59	53,63	65,55	27/03/2025	16:30	3/04/2025	18:15	Katlyn	
16-C-3	vlas	2mm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	54,56	57,32	60,65	54,43	56,26	52,81	56,01	50,41	61,61	28/03/2025	8:15	04/04/205	8:10	Thibault	
16-C-1	vlas	500qm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	52,21	55,81	57,51	56,24	55,54	57,61	55,82	50,24	61,41	28/03/2025	8:30	04/04/205	8:22	Thibault	
16-C-2	vlas	500qm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	52,38	55,08	57,11	59,09	58,05	57,54	56,54	50,89	62,20	28/03/2025	9:15	04/04/205	9:00	Thibault	
16-C-3	vlas	500qm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	54,33	53,13	53,10	53,47	54,86	57,85	54,46	49,01	59,90	28/03/2025	9:30	04/04/205	9:15	Thibault	
16-C-1	macro	var	3kg/m³	50mm	50	C	juist	24h voordien	61,93	59,64	61,90	62,83	61,61	62,65	61,76	55,58	67,94	28/03/2025	12:00	04/04/205	12:10	Thibault	
16-C-2	macro	var	6kg/m³	50mm	50	C	juist	24h voordien	62,26	66,27	63,56	60,35	67,75	67,31	64,58	58,12	71,04	28/03/2025	12:15	04/04/205	12:26	Thibault	
16-C-3	macro	var	9kg/m³	50mm	50	C	juist	24h voordien	64,41	65,98	63,55	68,76	66,26	64,65	65,60	59,04	72,16	28/03/2025	12:45	04/04/205	12:55	Thibault	
16-C-1	vlas	var	3kg/m³	15mm	50	C	juist	24h voordien	60,84	62,33	60,67	60,89	60,36	61,16	61,04	54,94	67,15	21/03/2025	11:00	28/03/2025	11:00	Thibault	
16-C-1	macro		3kg/m³	15mm	50	C	juist	24h voordien	59,79	64,84	60,97	65,01	62,55	62,23	62,57	56,31	68,82	24/03/2025	15:15	31/03/2025	15:22	Thibault	
16-C-3	macro		9kg/m³	50mm	50	C	juist	24h voordien	63,31	62,41	64,11	65,49	63,29	62,33	63,49	57,14	69,84	17/03/2025	8:00	24/03/2025	8:50	Thibault	
16					0	C	juist	24h voordien	57,72	58,53	53,91	59,33	61,02	60,51	58,50	52,65	64,35	4/03/2025	12:00	12/03/2025	13:10	Thibault	spattende stukk
16-F					15	C	juist	24h voordien	56,76	57,74	61,74	59,33	60,82	59,93	59,39	53,45	65,33	5/03/2025	10:15	12/03/2025	8:50	Thibault	
16-E					25	C	juist	24h voordien	58,24	62,01	60,81	57,55	63,22	58,82	60,11	54,10	66,12	4/03/2025	8:00	11/03/2025	8:45	Thibault	
16-D					33	C	juist	24h voordien	60,23	57,76	57,21	60,16	62,15	61,08	59,76	53,79	65,74	4/03/2025	9:00	11/03/2025	9:00	Thibault	
16-C					50	C	juist	24h voordien	61,86	62,42	65,66	67,17	63,87	65,16	64,35	57,92	70,79	27/03/2025	13:30	3/04/2025	13:35	Thibault	
16-B					55	C	juist	24h voordien	65,38	65,96	62,15	62,06	65,32	63,09	63,99	57,59	70,39	5/03/2025	8:30	12/03/2025	8:30	Thibault	
16-A					67	C	juist	24h voordien	63,96	60,60	64,27	67,23	66,24	64,65	64,49	58,04	70,94	4/03/2025	11:15	11/03/2025	11:25	Thibault	
16-A					67	C	juist	24h voordien	61,65	64,15	64,85	63,08	66,25	66,98	64,49	58,04	70,94	27/03/2025	14:00	11/03/2025	13:50	Thibault	

Druksterkte: Rc, na 3dagen

mengs	vezelsoo	vezeldia	vezelgehal	vezellen	zandgehalte [%]	natronwaterglass	formule	Vermenging natronloog en Natronwaterglas	kubus 1 Rc,7 [Mpa	kubus 2 Rc,7 [Mpa	kubus 3 Rc,7 [Mpa	kubus 4 Rc,7 [Mp	kubus 5 Rc,7 [Mpa	kubus 6 Rc,7 [Mp	gemiddelde [Mp	ondergrens 10% [Mp	bovengrens 10% [Mp	datum zero time	zero tir	testdatum	testtijd stip	uitvoerde	extra informatie
16-C-1	vlas	1mm	3kg/m³	varia	50	C	juist	24h voordien	46,25	47,98	47,19	46,28	45,56	46,87	46,69	42,02	51,36	14/04/2025	11:00	17/04/2025	11:03	Thibault	
16-C-2	vlas	1mm	6kg/m³	varia	50	C	juist	24h voordien	46,41	46,18	45,15	43,66	46,84	46,40	45,77	41,20	50,35	14/04/2025	11:15	17/04/2025	11:15	Thibault	
16-C-3	vlas	1mm	9kg/m³	varia	50	C	juist	24h voordien	43,93	43,56	46,57	44,74	45,65	45,43	44,98	40,48	49,48	14/04/2025	11:30	17/04/2025	11:30	Thibault	
16-C-1	vlas	2mm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	45,84	45,85	47,62	46,34	46,01	45,89	46,26	41,63	50,88	14/04/2025	11:45	17/04/2025	11:45	Thibault	
16-C-2	vlas	2mm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	45,79	45,60	46,78	47,25	45,24	45,63	46,05	41,44	50,65	14/04/2025	12:00	17/04/2025	12:00	Thibault	
16-C-3	vlas	2mm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	46,39	43,79	42,91	44,86	44,15	43,62	44,29	39,86	48,72	14/04/2025	12:15	17/04/2025	12:15	Thibault	
16-C-1	vlas	500qm	3kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	46,54	45,90	46,52	47,72	43,95	46,35	46,16	41,54	50,78	14/04/2025	8:15	17/04/2025	8:15	Thibault	
16-C-2	vlas	500qm	6kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	48,00	45,54	46,09	47,95	47,86	47,91	47,23	42,50	51,95	14/04/2025	8:45	17/04/2025	8:46	Thibault	
16-C-3	vlas	500qm	9kg/m³	var	50	C	juist	24h voordien	46,67	47,76	48,76	46,57	46,01	45,98	46,96	42,26	51,65	14/04/2025	9:45	17/04/2025	9:44	Thibault	
16-C-1	macro	var	3kg/m³	50	50	C	juist	24h voordien	45,10	45,75	45,74	46,93	45,59	48,99	46,35	41,71	50,98	1/04/2025	7:45	4/04/2025	7:55	Thibault	
16-C-2	macro	var	6kg/m³	50	50	C	juist	24h voordien	47,14	48,20	47,48	46,09	49,05	46,87	47,47	42,72	52,22	1/04/2025	8:30	4/04/2025	8:35	Thibault	
16-C-3	macro	var	9kg/m³	50	50	C	juist	24h voordien	46,15	49,60	48,46	47,60	48,84	48,11	48,13	43,32	52,94	1/04/2025	8:45	4/04/2025	8:50	Thibault	
16					0	C	juist	24h voordien	44,09	44,38	47,10	45,95	42,95	42,86	44,56	40,10	49,01	31/03/2025	13:00	31/03/2025	13:05		
16-F					15	C	juist	24h voordien	46,49	46,19	43,63	48,30	47,48	49,23	46,89	42,20	51,58	25/03/2025	16:00	28/03/2025	15:50	Thibault	
16-E					25	C	juist	24h voordien	41,06	42,95	40,42	41,17	41,93	41,55	41,51	37,36	45,66	25/03/2025	10:30	28/03/2025	10:30	Thibault	
16-D					33	C	juist	24h voordien	44,90	45,66	45,23	44,46	44,71	44,72	44,95	40,45	49,44	25/03/2025	10:15	28/03/2025	10:15	Thibault	
16-B					55	C	juist	24h voordien	48,69	48,69	48,22	47,49	48,70	47,91	48,29	43,46	53,11	25/03/2025	9:45	28/03/2025	10:00	Thibault	
16-A					67	C	juist	24h voordien	45,02	45,21	43,74	47,60	47,34	45,36	45,71	41,14	50,28	25/03/2025	8:45	28/03/2025	9:10	Thibault	
16-C					50	C	juist	24h voordien	44,75	47,73	45,74	47,30	46,26	47,30	46,51	41,86	51,17	31/03/2025	13:15	3/04/2025	13:20	Thibault	

Druksterkte: Rc, na 1dag

mengs	vezelsoo	diameter	vezelgehal	vezellen	zandgehalte [%]	Silica [%]	natronwaterglass	Vermenging natronloog en Natronwaterglas	kubus 1 Rc,7 [Mpa	kubus 2 Rc,7 [Mpa	kubus 3 Rc,7 [Mpa	kubus 4 Rc,7 [Mp	kubus 5 Rc,7 [Mpa	kubus 6 Rc,7 [Mp	gemiddelde [Mp	ondergrens 10% [Mp	bovengrens 10% [Mp	datum zero time	zero ti	testdatum	testtijd stip	uitvoerde	extra informatie
16-C-1	macro	var	3kg/m³	50	50	25,9	C	24h voordien	24,92	24,52	26,12	26,59	15,43	26,19	25,67	23,10	28,23	3/04/2025	12:37	4/04/2025	12:40	Thibault	
16-C-2	macro	var	6kg/m³	50	50	25,9	C	24h voordien	25,15	24,62	25,53	25,27	24,08	26,57	25,20	22,68	27,72	3/04/2025	11:55	4/04/2025	11:55	Thibault	
16-C-3	macro	var	9kg/m³	50	50	25,9	C	24h voordien	27,13	27,63	25,99	27,73	25,74	27,71	26,99	24,29	29,69	16/04/2025	12:45	17/04/2025	12:45	Thibault	
16-C-1	vlas	500qm	3kg/m³	var	50	25,9	C	24h voordien	23,58	23,87	23,20	23,56	23,91	24,12	23,71	21,34	26,08	3/04/2025	7:30	4/04/2025	7:30	Thibault	
16-C-2	vlas	500qm	6kg/m³	var	50	25,9	C	24h voordien	22,52	21,84	22,53	23,00	23,12	23,12	22,69	20,42	24,96	3/04/2025	10:20	4/04/2025	10:20	Thibault	
16-C-3	vlas	500qm	9kg/m³	var	50	25,9	C	24h voordien	21,71	22,18	23,56	22,79	22,76	21,67	22,44	20,20	24,69	3/04/2025	10:40	4/04/2025	10:40	Thibault	
16-C-1	vlas	1mm	3kg/m³	var	50	25,9	C	24h voordien	24,89	23,23	23,87	23,04	24,33	25,34	24,12	21,71	26,53	27/03/2025	14:30	28/03/2025	14:40	Thibault	
16-C-2	vlas	1mm	6kg/m³	var	50	25,9	C	24h voordien	24,06	23,62	23,62	24,58	24,31	24,82	24,17	21,75	26,58	27/03/2025	15:00	28/03/2025	15:00	Thibault	
16-C-3	vlas	1mm	9kg/m³	var	50	25,9	C	24h voordien	23,26	24,22	23,17	23,50	23,04	23,38	23,43	21,08	25,77	27/03/2025	15:30	28/03/2025	15:25	Thibault	
16-C-1	vlas	2mm	3kg/m³	var	50	25,9	C	24h voordien	24,10	24,94	23,60	24,46	24,24	23,29	24,10	21,69	26,51	3/04/2025	10:53	4/04/2025	10:53	Thibault	
16-C-2	vlas	2mm	6kg/m³	var	50	25,9	C	24h voordien	22,55	22,87	22,20	21,96	20,86	20,36	21,80	19,62	23,98	3/04/2025	11:08	4/04/2025	11:08	Thibault	
16-C-3	vlas	2mm	9kg/m³	var	50	25,9	C	24h voordien	22,22	22,31	21,91	20,60	21,77	21,27	21,68	19,51	23,85	3/04/2025	11:23	4/04/2025	11:25	Thibault	
16					0	25,9	C	24h voordien	29,89	26,86	29,89	28,40	28,11	27,98	28,52	25,67	31,37	16/04/2025	12:30	17/04/2025	12:30	Thibault	spattende stukk
16-F					15	25,9	C	24h voordien	24,31	23,19	22,76	25,31	23,67	24,64	23,98	21,58	26,38	31/03/2025	12:00	1/04/2025	12:05	Thibault	
16-E					25	25,9	C	24h voordien	20,85	19,28	19,16	19,76	20,26	19,60	19,82	17,83	21,80	31/03/2025	10:30	1/04/2025	10:40	Thibault	
16-D					33	25,9	C	24h voordien	20,77	19,41	20,64	21,04	21,19	22,07	20,85	18,77	22,94	31/03/2025	10:00	1/04/2025	10:05	Thibault	
16-B					55	25,9	C	24h voordien	23,20	24,15	23,28	24,83	24,90	24,90	24,21	21,79	26,63	31/03/2025	9:30	1/04/2025	9:30	Thibault	
16-A					67	25,9	C	24h voordien	23,96	23,42	23,72	24,00	23,11	24,20	23,74	21,36	26,11	31/03/2025	8:45	11/03/2024	8:50	Thibault	
16-C					50	25,9	C	24h voordien	24,09	23,63	23,72	23,58	22,88	24,02	23,65	21,29	26,02	3/04/2025	14:54	11/03/2024	14:50	Thibault	
16-C					50	25,9	C	24h voordien	24,56	23,93	24,12	25,53	24,97	24,31	24,57	22,11	27,02	16/04/2025	13:45	17/04/2025	13:50	Thibault	

Bijlage V **ONTKISTINGSMIDDEL MARGINEL 335**

Marginel®

Biologisch afbreekbaar ontkistingsmiddel



TOEPASSING

Marginel® is ontwikkeld in het kader van de bescherming van mens en milieu. Daardoor is een betonontkistingsmiddel ontwikkeld uit grondstoffen afkomstig van plantaardige oliën en dierlijke vetten geëmulgeerd in water. Het tot stand komen van een nieuwe productielijn is hiervan het resultaat.

Marginel® is gemakkelijk biologisch afbreekbaar volgens OECD 301B (CO_2 ontwikkelingstoets), afbraak > 60% binnen 10 dagen. (TNO rapport nr IMW-93-0051-01). De OECD-test geeft inzicht in de volledige afbraak van **Marginel®**, en is dus niet te vergelijken met de CEC-proef, waarbij enkel de primaire afbreekbaarheid wordt gemeten. Door een unieke wijze van produceren is de homogeniteit van de emulsie gedurende een langere tijd gewaarborgd.

Marginel® is eenvoudig te verspuiten en aan te brengen dankzij de lage viscositeit.
Marginel® geeft, na het ontkisten, een mooie egale kleur aan het betonoppervlak.
Marginel® heeft geen nadelige invloed op de hechting van eventueel later aan te brengen afwerklagen. (Koning & Bienfait B.V., Amsterdam, rapport 248223)

Marginel® is toepasbaar op houten beksitingen (gelakt en ongelakt), stalen bekistingen, rubberen bekistingen en verwarmde bekistingen.

VOORDELEN

- Luchtbelvrije beton
- Egalere "kleur" van beton
- Meer dan 90 % hernieuwbare grondstoffen
- Arbo vriendelijk
- Schonere werkomgeving
- Reukloos
- Snel biologisch afbreekbaar

GEBRUIKSAANWIJZING

De ondergrond moet steeds schoon zijn (vrij van stof en betonresten) en mag vochtig zijn (geen vrij water).

Marginel® is goed te vernevelen met behulp van een nevelspuit (spuitdruk 3 – 4 bar), waarmee een dunne egale film kan worden aangebracht.

Verzinkte leidingen en spuiten kunnen niet gebruikt worden.

PRODUCTEIGENSCHAPPEN

Productnaam	**Marginel®**
Verbruik	20 à 30 m^2 / liter
Vol. Massa bij 15°C	0,970 kg/l (water = 1,00)
Droogtijd (bij 20°C)	15 – 30 minuten
Vorm	Vloeibaar
Kleur	Wit
Geur	Licht
Vlampunt	> 100 °C
Stol-/vriespunt	- 5 °C
Kin. Viscositeit (40°C)	1 mm^2/s

Marginel®

Biologisch afbreekbaar ontkistingsmiddel

FIPAH-CLASSIFICATIE ONTKISTINGSMIDDELEN *

	A	B	C
Hernieuwbare grondstoffen van plantaardige en dierlijke oorsprong (exclusief water)	> 90 %	> 25 % en < 90 %	< 25 %
Gevaarszinnen (Hazards)	Geen	H304 en EUH 066	Andere
Vlampunt	> 100 °C	> 62 °C en < 100 °C	< 62 °C
Aromaten	< 0,01 %	< 2 %	> 2 %

* Demula adviseert om de website www.fipah.be (Federatie van invoerders en producenten voor hulpstoffen voor beton) te raadplegen voor verdere informatie betreffende de classificatie van ontkistingsmiddelen.

TESTRAPPORTEN

- Snelle biologische afbreekbaarheid
  TNO-rapport nr. IMW-93-0051-01
- Acute giftigheid, inname via mond, LD_{50} > 2 g/kg
  TNO-rapport nr. 354060/32
- Niet irriterend of corrosief voor de huid
  TNO-rapport nr. 354061/22
- Veroorzaakt geen allergie voor de huid
  TNO-rapport nr. 354063/15
- Is niet irriterend voor de ogen
  TNO-rapport nr. 354069/18
- Acute giftigheid, inname via de huid, LD_{50} > 2 g/kg
  TNO-rapport nr. 354084/07
- Acute giftigheid, bij inhalatie, LC_{50} > 3,15 g/m³
  TNO-rapport nr. 450001.006

VERPAKKING EN OPSLAG

HOUDBAARHEID:
Tot 6 maanden houdbaar na productiedatum in afgesloten originele verpakking, vorstvrij en buiten bereik van rechtstreeks zonlicht.

VERPAKKING:
leverbaar in bussen, vaten, containers

OPSLAG:
Gelieve de MSDS-fiche de raadplegen. Bij twijfel vraag raad aan uw Demula-adviseur.

MILIEU- EN GEZONDHEIDSASPECTEN

Demula adviseert alvorens over te gaan tot het gebruik van **Marginel®** het veiligheidsinformatieblad grondig te raadplegen, omwille van een correct gebruik met betrekking tot veiligheid, toxicologische effecten, alsmede voor informatie over de juiste transportmodaliteiten, opslag en gebruik.

April 2020. Alle voorafgaande informatie betreffende dit product vervalt hierbij.
De informatie en adviezen op deze fiche vermeld worden verstrekt op basis van onze huidige kennis en ervaring met het product. In geen enkel geval aanvaarden wij enige aansprakelijkheid of bieden wij garantie in verband met de verwerking ervan. Proeven door zelf uit te voeren geven uitsluitsel omtrent de juiste omstandigheden onder dewelke het product moet gebruikt en verwerkt worden. Bij twijfel kan u ons steeds contacteren voor eventueel bijkomend advies.

FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
W. de Croylaan 56
3001 HEVERLEE, België
info.iiw@kuleuven.be
www.iiw.kuleuven.be