

Studie naar het gebruik van zandvliegasmengsel in zandcementtoepassingen

Tom DESMET
Benji HALLAERT

Promotor: prof. Dr.-Ing. Jiabin Li
Begeleider: ing. Zeger Sierens
Co-promotor: Diederik De Pauw, Viabuild

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

Academiejaar 2019-2020

© 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 Campus Brugge, Spoorwegstraat 12, B-8200 Brugge, +32 50 66 48 00 of via e-mail iiw.brugge@kuleuven.be.

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

Voorwoord

Dit voorwoord omvat een aantal dankbetuigingen aan personen en instanties die dit thesisonderzoek mede mogelijk hebben gemaakt.

Allereerst is er de Vlaamse firma Viabuild met als verpersoonlijking de heer Diederik De Pauw die naast dit onderzoeksonderwerp ook zijn expertise en het nodige materiaal ter beschikking stelde.

Vervolgens willen wij ook KU Leuven campus Brugge en zijn labomedewerkers bedanken voor het ter beschikking stellen van de benodigde materialen en apparaten om deze thesis tot een goed einde te brengen. In het bijzonder willen we onze interne promotor, ing. Zeger Sierens, bedanken voor zijn actieve medewerking, bezorgdheid en opbouwende feedback tijdens dit thesisjaar.

Ook willen we Hanna Debruyne, Sinitha Ferier, Ewout Vanden Bussche en Thibaut Vansteelant bedanken voor het leggen van een stevige fundering waarop deze thesis gebouwd is.

Het nalezen van een thesis vereist de hoogste concentratie en daarom bedanken wij Lindsay Desmet.

Een thesis tot een goed einde brengen gebeurt met vallen en opstaan. We bedanken onze familie en vrienden voor het helpen relativeren van optredende problemen en om ons te gepaste tijde een duwtje in de rug te geven.

Het was een cadeau om samen te werken met gedreven en gepassioneerde mensen tijdens de zoektocht naar een verbetering van de mengsels uit 2019.

We kunnen dan ook met trots zeggen dat alle mogelijke mengseloptimalisaties overlopen zijn en de voornaamste verbeteringen, namelijk de toevoeging van calciumhydroxide en de toevoeging van natriumhydroxide, concreet theoretisch onderzocht werden.

Als gevolg van het Covid19-virus kon een groot deel van de praktische testen niet worden uitgevoerd.

Ten slotte bedanken we elkaar. De samenwerking verliep op een zeer aangename manier en we vulden elkaar aan waar nodig. Het onderzoek heeft onze band nog sterker gemaakt dan ze al was.

Tom Desmet

Benji Hallaert

Mei 2020

Samenvatting

Zand is een zeer belangrijk basismateriaal binnen de bouwkunde. Het wordt al een lange tijd intensief ontgonnen en verwerkt in bouwkundige toepassingen. Er wordt ook steeds meer en meer gebouwd, dus de vraag naar zand stijgt. Dit zorgt ervoor dat er nu een tekort aan zand zit aan te komen. De uitdaging van nu is het vinden van een zandervanger die voldoet aan de kwaliteiten die zand ons levert.

Wegenbouwbedrijf Viabuild, ging deze uitdaging aan en belandde bij een site te Sambreville waar 200 000 m³ zandvliegasmengsel ligt opgeslagen. Deze site werd aangekocht met als doel het afvalmateriaal te verwerken als zandervanger. Dit thesisonderwerp werd in 2017-2018 opgestart door Viabuild. Hanna Debruyne en Sinitha Ferrier gingen op zoek naar het meest interessante bouwproduct om het zandvliegasmengsel in te verwerken. Zij hebben besloten dat de toepassing van het zandvliegasmengsel het meest voordelig kan worden gebruikt in zandcement. In 2018-2019 gingen Ewout Vanden Bussche en Thibaut Vansteelant op zoek naar een zo economisch mogelijk mengsel, binnen de toepassing zandcement, met partiële zandvervanging door het zandvliegasmengsel. Finaal werden twee mengselontwerpen met een financieel voordeel naar voor geschoven.

Deze thesis zet de zoektocht naar het meest interessante mengselontwerp verder. Het doel van deze thesis is het oplossen van enkele cruciale vragen zoals: "Waarom wordt een hogere druksterkte behaald bij verwerking van het zandvliegasmengsel?" en "Waarom wordt nalevering in druksterkte als gevolg van deze verwerking waargenomen?". Theoretisch onderzoek en in mindere mate praktische testen zullen deze vragen moeten oplossen. De antwoorden op de vragen zullen leiden naar het vinden van belangrijke parameters die aangepast kunnen worden met als doel de mengsels te optimaliseren.

Het theoretisch onderzoek heeft geleid tot zeer relevante en interessante conclusies. In het onderzoek werden de belangrijkste chemische aspecten van het puzzolaan vliegasmengsel bestudeerd. Dit zijn de hydratatiereacties, de puzzolane reacties en het effect van de zuurtegraad. Door bestudering van de puzzolane reacties werd geconcludeerd dat deze niet optimaal worden gebruikt, omdat er niet genoeg calciumhydroxide wordt aangeboden aan de vliegasmengsel. Dit heeft geleid tot het ontwerp van enkele mengselontwerpen met een toevoeging van een bepaalde hoeveelheid calciumhydroxide. Deze mengsels werden ontworpen op basis van een financiële analyse. De toevoeging van calciumhydroxide is dus een eerste optimalisatievoorstel.

Het theoretisch onderzoek rond de zuurtegraad of pH-waarde heeft uitgewezen dat de puzzolane werking van de vliegasmengsel optimaal wordt benut bij een zeer hoge pH-waarde (>13). De kans bestaat dat de mengsels deze pH-waarde nooit halen en de puzzolane werking dus niet optimaal wordt benut. Een mogelijke oplossing hiervoor is het toevoegen van een zeer sterke base aan het mengsel, zoals NaOH. Dit is een tweede optimalisatievoorstel.

De twee optimalisatiemogelijkheden dienen nog gefundeerd te worden op experimentele data. Ook dienen ze getest te worden op hun financiële maakbaarheid. Volgens ons hebben deze twee optimalisatievoorstellen een goede kans van slagen. Vanuit ons perspectief en het uitgevoerde theoretisch onderzoek betwijfelen we dat er naast deze voorstellen nog andere parameters zijn die aangepast kunnen worden om de mengsels te optimaliseren.

Abstract

Sand is a very important material in construction. It has been mined intensively for a long time and processed in architectural applications. There is also more and more construction these days, so the demand for sand is only increasing. This means that there is now a shortage of sand coming. Today's challenge is to find a sand substitute that meets the qualities that sand provides us.

Road construction company Viabuild, which uses sand intensively, accepted this challenge and ended up buying a site in Sambreville, Wallonia where 200,000 m³ of sand fly ash mixture is stored. This site was purchased with the aim of processing the waste material on the site as a sand substitute. In that way, the problem of the scarcity of sand is already partly solved, the mountain of waste in Sambreville is reduced and the cost of the sand product is reduced. The latter is because the sand can be replaced by the sand fly ash mixture, which is more beneficial.

This thesis topic started in 2017-2018 by Viabuild. Hanna Debruyne and Sinitha Ferier conducted research to find the most interesting construction product in which the sand fly ash mixture can be used. They investigated several applications such as concrete, mortar and sand cement. Due to the fact that a high replacement percentage was obtained for sand cement and the fact that it is produced very intensively by ViaBuild, the application of sand cement turned out to be the most interesting. In 2018-2019, Ewout Vanden Bussche and Thibaut Vansteelant looked for the most economical mixture possible, within the sand cement application, in which sand is partially replaced by the sand fly ash mixture. In the end two final mixture designs were made in 2019. Both of them delivered a financial advantage and the imposed requirements for compressive strength of sand cement were achieved.

This thesis is a continuation of the thesis from 2019. Being the third in the row, the emphasis is now shifted from the practical part to the theoretical part. The mixtures that were made by T. Vansteelant and E. Vanden Bussche had a sand replacement percentage of 30% and 50% while staying above the needed compression strength of 2 MPa and 3 MPa. 2 MPa is the minimum compressive strength at 7 days and the 3 MPa is the minimum compressive strength at 28 days imposed by SB250 (road construction) for sand cement. The question now is: "How is it possible that the compressive strength remains above the required compressive strength and is even increased by replacing sand with the sand fly ash mixture?". There is also a later delivery of compressive strength in the longer term, how is that possible? Something has to happen to ensure this binding effect and it is exactly that which is the subject of this thesis.

So the aim of this thesis is to investigate the theoretical aspect of the actions in the sand cement mixtures of 2019 and to investigate all possible improvements. In 2019, there was a need for more understanding about the increase in compressive strength in the short and long term after the addition of the sand fly ash mixture. The knowledge about the processes that took place both chemically and physically was limited to assumptions. This thesis focuses on understanding these processes and finding the crucial parameters. These parameters can then be used to optimize the mixtures.

Theoretically

The main processes, namely hydration and pozzolanic effect, are exposed. It becomes clear that the pozzolanic effect of the fly ash depends on the reaction products of the hydration of the silicates of the cement. In addition to the hydration of the silicates of the cement, there is also hydration of aluminates and ferrite. The latter two do not contribute to the pozzolanic effect of the fly ash. So on the chemical level, the binding effect is the result of the hydration of aluminates, silicates and ferrite on the one hand and of the pozzolanic activity as a result of the hydration of these silicates on the other hand.

Because calcium hydroxide plays a crucial role in the pozzolanic effect of the fly ash, it is researched in greater detail. This research shows that adding calcium hydroxide to the mixture, to make better use of the pozzolanic effect of the fly ash, is a very interesting possibility.

In addition to the chemical processes and the importance of calcium hydroxide, another specific property of pozzolanic action is also researched in greater detail. It is the case that pozzolanic effect gives the most effect at a high pH value (> 13). There is a real chance that the pozzolanic effect within the sand cement mixture will not be utilized in full, because the pH value remains too low. The addition of sodium hydroxide can make the mixture more basic and can thus help the mixture obtain more pozzolanic effect. This is a second interesting possibility.

These two options should both be experimentally tested individually and possibly in combination. It is necessary to check the effectiveness of adding calcium hydroxide on the one hand and sodium hydroxide on the other hand. For both optimization options, the question is: "Which quantity should at least be added to meet the requirements for sand cement?". This while keeping in mind whether or not the financial benefit increases. These options are of course only useful if the financial benefit exceeds the financial benefit of the mixtures obtained in 2019.

The first option, namely the addition of calcium hydroxide; the addition content based on a financial analysis is quantified theoretically. This means that the maximum amount of calcium hydroxide that can be added to the mixture to be financially more advantageous than the mixtures determined in 2019 is determined. As mentioned before, experimental testing should be carried out to see whether the requirements for compressive strength with this maximum content are met or not. If so, the question automatically arises: "How much can the calcium hydroxide amount drop to continue meeting the requirements?". Due to circumstances (Covid19) these experimental tests could not be executed. This could be very interesting to be examined in a following research.

The amount that can be added for the second possibility, the addition of sodium hydroxide, is not quantified in this study. This means that this research of the second improvement proposal is limited to a theoretical explanation. A theoretical study of the maximum content of sodium hydroxide that can be added to the mixture to be more financially advantageous than in 2019 followed by experimental tests, such as with the first possibility, is again necessary here and therefore still has to be carried out. This theoretical study and experimental tests could not be done this research year due to the same circumstances.

A final chemical aspect investigated is the difference between the use of CEM I and CEM III.

The physical aspect of the actions of the fly ash, the filler effect, is researched and it soon becomes clear that there's more to this aspect than it seems at first sight. As a result of a theoretical study, it could be stated that a significant proportion of the mixture must consist out of fine material in order to obtain any filler effect and thus to obtain an increase in compressive strength. The sand fly ash mixture consists out of only 10% to 14% fine material. The filler effect will therefore not offer any significant benefit within this study. So no proposals for optimization of the sand cement mixtures based on the filler effect are made.

Practically

As mentioned before, many of the proposed experimental tests have not been carried out due to the Covid19-crisis. The only experimental tests that have been carried out in a limited way are tests on the difference between the use of CEM I and CEM III. Mixtures are made that highlight this property. These mixtures are then poured into cement mortar bars and tested on compressive strength at specific times. These compressive strengths are then compared with reference mixtures via the Strength Activity Index (SAI).

In general, it can be stated that the small amount of results was difficult to interpret and process. This is because there are significant differences in compressive strength per mixture and per time. The reasons for this are the poor workability due to the addition of the sand fly ash mixture in cement mortar and the uneven compaction with the jolting apparatus. It is recommended to perform similar tests but adapted to sand cement proctor cylinders. The workability plays a much less decisive role in proctor tests, because differences in workability are smoothed by compaction in a much firmer manner.

This does not prevent that a limited conclusion can be formulated for the tests on the difference between the use of CEM I and CEM III. The results for those tests were clear. The use of CEM I leads to a greater compressive strength than CEM III, which is also expected. The explanation for this can be found in their compositions. In the thesis of 2019, the results showed that there is no significant difference between the results for CEM I and CEM III. This may be due to the fact that a relatively low percentage of cement was used in the sand cement mixtures used for the proctor tests. Due to these low quantities, the difference between the two cements could not be seen significantly.

Conclusion

We can conclude that the effects of the fly ash within a sand fly ash mixture are as good as fully exposed. Its theoretical aspects were thoroughly investigated and the necessary things were concluded. These conclusions are then used to propose two optimizations of the sand cement mixtures.

The two optimization options, addition of calcium hydroxide and sodium hydroxide, still need to be founded on experimental data. They also need to be tested for their financial workability. On the one hand, the question is: "What is the lowest amount for each hydroxide that needs to be added to meet the sand cement requirements?" on the other hand, the question is: "Which of the two hydroxides provides the greatest financial benefit?". There is no point in designing a mixture that does not exceed the financial benefit from 2019.

We believe that these two optimization proposals have a good chance of success. From our perspective and the theoretical research conducted, we doubt that there are in addition to these proposals any other parameters that can be adjusted to optimize the mixtures.

Clearly, this research is not finished yet. It is up to our successors to continue this investigation.

Keywords: Sand fly ash mixture, Sand cement, Financial benefit, Natrium hydroxide, Calcium hydroxide

INHOUD

Voorwoord	i
Samenvatting	ii
Abstract	iii
Symbolenlijst	ix
Oxidatienotaties	x
Lijst met afkortingen	xi
Figurenlijst	xii
Tabellenlijst	xiv
1 Inleiding	1
1.1 Situering.....	1
1.2 Onderzoeksvraag.....	2
1.3 Methodologie.....	2
2 De twee mengselontwerpen uit 2019	4
3 Karakterisatie zandvliegasmengsel	6
3.1 Eerste chemische analyse.....	6
3.2 Korrelverdeling.....	7
4 Theoretisch onderzoek	8
4.1 Cement: focus op chemie	8
4.1.1 Portlandcement.....	8
4.1.1.1 Chemische reacties bij productie.....	8
4.1.1.2 Bestanddelen en hun aandeel.....	9
4.1.1.3 Hydratatiereacties.....	9
4.1.2 Verharding.....	11
4.1.3 Soorten.....	12
4.1.3.1 CEM I.....	14
4.1.3.2 CEM III.....	14
4.1.3.3 CEM I vs. CEM III.....	15
4.1.4 SCM's.....	16
4.1.4.1 Vliegas – SCM.....	16
4.2 Chemische werkingen binnen zandcementmengsels door toevoeging van vliegas	17
4.2.1 Hydratatie.....	17
4.2.2 Puzzolane werking.....	18
4.2.3 Samenvattend.....	19
4.3 Calciumhydroxide	20
4.3.1 Hoe zorgt de calciumhydroxide samen met de vliegas voor de bijkomende sterkteontwikkeling?.....	20
4.3.2 Van waar haalt de vliegas de calciumhydroxide om de puzzolane reactie te laten optreden?.....	21

4.3.2.1	Tweede chemische analyse	22
4.3.3	Welke hoeveelheid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zorgt voor een optimale sterkteontwikkeling?	23
4.3.3.1	Soort puzzolaan	23
4.3.3.2	Hoeveelheid puzzolaan	23
4.3.3.3	Hoeveelheid SiO_2 en Al_2O_3	23
4.3.3.4	Kalk/ puzzolaan ratio	23
4.3.3.5	Lengte van curing	24
4.3.3.6	Specifieke oppervlakte	25
4.3.3.7	Watergehalte	26
4.3.3.8	Temperatuur	26
4.3.3.9	pH-waarde	27
4.3.4	Toevoeging van calciumhydroxide	27
4.4	pH-waarde.....	28
4.4.1	Invloed	28
4.4.2	Mechanisme	28
4.4.3	Probleem en mogelijke oplossing	30
4.4.3.1	De tweede verbetering NaOH	32
4.4.4	Nalevering van de puzzolane reactie	32
4.5	Filler effect.....	32
4.5.1	Werking.....	33
4.5.1.1	Cementhydratatie	33
4.5.1.2	Oppervlaktelading fijnen	34
4.5.1.3	Kleinere fractie, grotere oppervlakte.....	35
4.5.2	Gevolg van filler effect	35
4.5.3	Tweede effect van de filler.....	36
4.5.4	Verdunning	36
4.5.5	Filler effect in dit onderzoek.....	37
5	Labotesten - theoretisch	38
5.1	Test op cementmortelproefstukken.....	38
5.1.1	Principe.....	38
5.1.2	Labo -en materiaaleisen	38
5.1.3	Mixer	39
5.1.4	Mallen	39
5.1.5	Jolting apparaat	40
5.1.6	Apparaat voor het bepalen van de druksterkte	40
5.1.7	Bestanddelen en samenstelling van de cementmortel.....	41
5.1.8	Bereiding van de cementmortel.....	41
5.1.9	Bereiding van de proefstukken	42
5.1.10	Behandeling van de proefstukken na bereiding	42
5.1.11	Momenten van testen	42
5.1.12	Eigenlijke test: druksterkte.....	42
5.2	Strength Activity Index (SAI).....	43
5.3	Proctortest.....	43
5.3.1	Drukproef	44
6	Labotesten - praktisch.....	46
6.1	Watergehalte.....	46
6.1.1	Zandvliegasmengsel.....	46
6.1.2	Natuurlijk zand 0/2	47
6.2	Karakterisatie materialen.....	47
6.2.1	Kalksteenpoeder (Calcitec 2001 M)	47
6.2.2	Natuurlijk zand 0/2	48

6.3	Cementmortelbalkjes - Strength Activity Index	48
6.3.1	Referentiemengsels.....	50
6.3.1.1	Praktische denkwijze	50
6.3.1.2	Samenstelling mengsels.....	50
6.3.1.3	Labotesten: resultaten	51
6.3.1.4	Conclusie	51
6.3.1.5	Verklaring.....	51
6.3.2	Puzzolane werking	52
6.3.2.1	Praktische denkwijze	52
6.3.2.2	Samenstelling mengsels.....	52
6.3.2.3	Labotesten	53
6.3.3	Filler effect	54
6.3.3.1	Praktische denkwijze	54
6.3.3.2	Samenstelling mengsels.....	54
6.3.3.3	Labotesten	55
6.3.4	CEM I vs. CEM III	56
6.3.4.1	Praktische denkwijze	56
6.3.4.2	Samenstelling mengsels.....	56
6.3.4.3	Labotesten: resultaten	57
6.3.4.4	Conclusie	57
6.3.4.5	Verklaring.....	58
6.3.5	Besluit	58
6.4	Proctortest - toevoeging van calciumhydroxide	59
6.4.1	Praktische denkwijze	59
6.4.2	Mengsels T. Vansteelant & E. Vanden Bussche.....	59
6.4.3	Doel	60
6.4.4	Methode.....	60
6.4.5	Mengselontwerp op basis van financiële analyse	60
6.4.5.1	Referentiemengsel	61
6.4.5.2	Mengselontwerpen T. Vansteelant & E. Vanden Bussche.....	61
6.4.5.3	Mengselvoorstellen met kalktoevoeging	62
6.4.6	Financiële analyse	66
6.4.7	Bespreking financiële analyse	68
6.4.7.1	4,95% overtreffen	68
6.4.7.2	2,79% overtreffen	68
6.4.7.3	Conclusie financiële analyse	68
7	Algemene conclusie	70
	Referenties.....	73
	Bijlagen.....	76

Symbolenlijst

p	Druksterkte proctorcilinder	[N/mm ²]
A_c	Oppervlakte proctorcilinder	[mm ²]
F	Maximale drukkracht proctorcilinder	[N]
F_c	Maximale drukkracht cementmortelbalkje	[N]
R_c	Druksterkte cementmortelbalkje	[N/mm ²]
ζ	Zeta potentiaal	[mV]

Oxidatienotaties

Brutoformule oxide	Oxidenotatie
CaO	C
SiO ₂	S
Al ₂ O ₃	A
Fe ₂ O ₃	F
MgO	M
K ₂ O	K
Na ₂ O	N
SO ₃	\bar{S}
CO ₂	\bar{C}
H ₂ O	H
3CaO·SiO ₂	C ₃ S
2CaO·SiO ₂	C ₂ S
3CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A
4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ ·H ₂ O	CASH
CaO·SiO ₂ ·H ₂ O	CSH
Ca(OH) ₂	CH
Si(OH) ₄	SH
3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
CaO·Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	CAH

[1] [2]

Lijst met afkortingen

A/V	Oppervlakte/volume-ratio
B1	Batch 1
B2	Batch 2
CEN	Comité Européen de Normalisation
FE	Filler effect
PW	Puzzolane werking
REF	Referentie
SAI	Strength Activity Index
SB250	Standaardbestek 250
SCM	Supplementaire cementgebonden materialen
VA	Vliegas
VC	Verschil CEM I en CEM III
W/C	Water/cement-ratio
ZVM	Zandvliegasmengsel

Figurenlijst

Figuur 1.1 Site te Sambreville.....	1
Figuur 3.1 Zeefcurve vliegas B1 [6]	7
Figuur 3.2 Zeefcurve vliegas B2 [6]	7
Figuur 4.1 Snelheid van de hydratatiereacties [1]	10
Figuur 4.2 Druksterkte in functie van de tijd per bestanddeel [1].....	11
Figuur 4.3 Druksterkte in functie van de tijd van standaardbeton CEM I 52,5 [9]	14
Figuur 4.4 Druksterkte in functie van de tijd van standaardbeton CEM III/A 32,5 [10].....	15
Figuur 4.5 Druksterkte in functie van het zandvervangingspercentage [6]	20
Figuur 4.6 Gereageerde $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in functie van het aantal dagen [15].....	24
Figuur 4.7 Hoeveelheid gereageerde $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in functie van de curingtijd [15]	24
Figuur 4.8 Hoeveelheid gereageerde $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in functie van de specifieke oppervlakte van de puzzolaan [15].....	25
Figuur 4.9 Hoeveelheid gereageerde CaO in functie van de tijd [15]	26
Figuur 4.10 Druksterktes van mengsels met verschillende kalkgehaltenes [15].....	27
Figuur 4.11 3D-structuur SiO_2 [20].....	29
Figuur 4.12 Structuur aan oppervlak SiO_2 [21].....	29
Figuur 4.13 Mechanisme hydrolyse SiO_2 [21]	30
Figuur 4.14 Hydratatie van cement [26].....	33
Figuur 4.15 Warmte-evolutie bij hydratatie van cement [27]	33
Figuur 4.16 Zeta-potentiaal geladen kern [28]	34
Figuur 4.17 A/V- ratio [30]	35
Figuur 4.18 Sterkteontwikkeling door fijnen [31]	36
Figuur 4.19 Dunnere CSH-laag [33]	36
Figuur 5.1 Mixer om cementmortelbalkjes te maken [35].....	39
Figuur 5.2 Mal waarin cementmortelbalkjes worden gevormd [35]	39
Figuur 5.3 Afstrijkplaatjes voor het maken van cementmortelbalkjes [35]	40
Figuur 5.4 Jolting apparaat voor het verdichten van cementmortelbalkjes [35]	40
Figuur 5.5 Apparaat voor het bepalen van de druksterkte [35].....	41
Figuur 6.1 Nylonkous om de massa zandvliegasmengsel te beschermen	46
Figuur 6.2 Droge indruk van gemaakte mortel.....	49

Figuur 6.3 Resultaten drukttesten E. Vanden Bussche en T. Vansteelant [6]59

Tabellenlijst

Tabel 2.1 Mengselontwerp 1 T. Vansteelant en E. Vanden Bussche [6].....	4
Tabel 2.2 Mengselontwerp 2 T. Vansteelant en E. Vanden Bussche [6].....	4
Tabel 3.1 Chemische analyse zandvliegasmengsel [7]	6
Tabel 4.1 Snelheid van ontwikkeling hydratatiewarmte per bestanddeel en de hoeveelheid ervan [1] [2].....	11
Tabel 4.2 Sterkte -en warmteontwikkeling per bestanddeel [1] [2].....	12
Tabel 4.3 Samenstelling van de verschillende cementsoorten [1].....	13
Tabel 4.4 Chemische samenstelling CEM I 52,5 [9]	14
Tabel 4.5 Chemische samenstelling CEM III/A 32,5 [10]	15
Tabel 4.6 pH-waardes verschillende oplossingen [15].....	31
Tabel 5.1 Snelheden van de mixer [35]	39
Tabel 5.2 Korrelverdeling standaardzand [35]	41
Tabel 5.3 Voorwaarden keuze proctormallen [37].....	43
Tabel 5.4 Gegevens Procedure #1 [37].....	44
Tabel 6.1 Bepaling watergehalte zandvliegasmengsel	46
Tabel 6.2 Bepaling watergehalte natuurlijk zand 0/2.....	47
Tabel 6.3 Korrelverdeling Calcitec 2001 M [40]	47
Tabel 6.4 Korrelverdeling natuurlijk zand 0/2.....	48
Tabel 6.5 Samenstelling mengsel REF1.....	50
Tabel 6.6 Samenstelling mengsel REF2.....	50
Tabel 6.7 Resultaten mengsels REF1 en REF2	51
Tabel 6.8 Samenstelling mengsel PW1	52
Tabel 6.9 Samenstelling mengsel PW2.....	53
Tabel 6.10 Samenstelling mengsel PW3.....	53
Tabel 6.11 Samenstelling mengsel PW4	53
Tabel 6.12 Samenstelling mengsel FE1	54
Tabel 6.13 Samenstelling mengsel FE2	54
Tabel 6.14 Samenstelling mengsel FE3	55
Tabel 6.15 Samenstelling mengsel FE4	55
Tabel 6.16 Samenstelling mengsel VC1	56

Tabel 6.17 Samenstelling mengsel VC2.....	56
Tabel 6.18 Resultaten mengsels VC1 en VC2.....	57
Tabel 6.19 Referentiemengsel [6].....	61
Tabel 6.20 Mengselontwerp 1 T. Vansteelant en E. Vanden Bussche [6].....	61
Tabel 6.21 Mengselontwerp 2 T. Vansteelant en E. Vanden Bussche [6].....	62
Tabel 6.22 Mengselvoorstel 1 - mengsel 3.70	62
Tabel 6.23 Mengselvoorstel 2 - mengsel 3.80	63
Tabel 6.24 Mengselvoorstel 3 - mengsel 4.80	63
Tabel 6.25 Mengselvoorstel 4 - mengsel 4.90.01	64
Tabel 6.26 Mengselvoorstel 5 - mengsel 4.90.02	64
Tabel 6.27 Mengselvoorstel 6 - mengsel 5.90.01	65
Tabel 6.28 Mengselvoorstel 7: mengsel 5.90.02	65
Tabel 6.29 Financiële analyse mengselvoorstellen met toevoeging van calciumhydroxide...67	
Tabel 6.30 Kostprijs per component	67

1 INLEIDING

1.1 Situering

Zand is een zeer belangrijk basismateriaal binnen de bouwkunde. Het wordt al een lange tijd intensief ontgonnen en verwerkt in bouwkundige toepassingen. Er wordt ook steeds meer en meer gebouwd, dus de vraag naar zand stijgt. Dit zorgt ervoor dat er nu een tekort aan zand zit aan te komen. Vlaanderen is hierdoor zeer afhankelijk van import van bouwzand. De uitdaging van nu is het vinden van een zandvervanger die voldoet aan de kwaliteiten die zand ons levert. [3] [4] [5]

Wegenbouwbedrijf Viabuild, die zand intensief gebruikt, ging deze uitdaging aan en kocht een site te Sambreville waar 200 000 m³ zandvliegasmengsel ligt opgeslagen. Deze is er gekomen als gevolg van jarenlange verbranding van kolen in de jaren 1940-1950, dit met als doel elektriciteit op te wekken. Bij de verbranding komen enerzijds bodemmassen (de assen die bij de verbranding op de bodem van de verbrandingsketel achterblijven) vrij en anderzijds vliegassen (de assen die uit de rookgassen worden gefilterd en worden opgeslagen). De as van het zandvliegasmengsel zijn dus de vliegassen.



Figuur 1.1 Site te Sambreville

Deze site werd aangekocht met als doel het afvalmateriaal die aanwezig is op de site te verwerken als zandvervanger. Op die manier wordt het probleem van de schaarste van het zand al deels opgelost, wordt de afvalberg te Sambreville kleiner én wordt de kostprijs van het zandproduct gereduceerd. Dit laatste is omdat zand gedeeltelijk vervangen kan worden door het zandvliegasmengsel, wat voordeliger uitkomt.

Dit thesisonderwerp werd in 2017-2018 opgestart door Viabuild. Deze thesis is de derde in de rij. De eersten in deze rij van drie waren Hanna Debruyne en Sinitha Ferier. Zij hebben basistesten uitgevoerd op verschillende bouwproducten zoals beton, mortel en zandcement. Door het feit dat er bij zandcement een hoog zandvervangingspercentage werd bekomen en door het feit dat zandcement zeer intensief geproduceerd wordt door ViaBuild, werd er verder gewerkt met deze toepassing. Een bijkomend argument om met zandcement verder te gaan is het feit dat er in de streek rond Sambreville quasi geen zand te vinden is, het zijn daar vooral kleigronden. Een zandvervanger zou dus welgekomen zijn. In 2018-2019 gingen Ewout Vanden Bussche en Thibaut Vansteelant op zoek naar een zo economisch mogelijk zandcementmengsel waarin zand vervangen wordt door het zandvliegasmengsel. Finaal werden door E. Vanden Bussche en T. Vansteelant twee mengselontwerpen naar voor

geschoven. Beide zijn marktwaardig en leveren een financieel voordeel op waarbij de opgelegde eisen voor druksterkte van zandcement worden behaald.

Als derde in de rij wordt nu de nadruk van het praktische gedeelte verlegd naar het theoretische gedeelte. De mengsels die door T. Vansteelant en E. Vanden Bussche naar voren werden geschoven hebben een zandvervangingspercentage van 30% en 50%, hierbij werd telkens boven de norm van 2 MPa en 3 MPa gebleven. 2 MPa is de minimale druksterkte voor zandcement op 7 dagen en 3 MPa is de minimale druksterkte voor zandcement op 28 dagen, deze waarden zijn door de wegenbouw in SB250 vastgelegd. De onderzoeksvraag die nu gesteld wordt luidt: “Hoe kan het dat de druksterkte boven de norm blijft en zelf verhoogt door het vervangen van zand door het zandvliegasmengsel?”. Ook is er een nalevering in druksterkte op langere termijn, hoe kan dat? Er moet iets gebeuren dat voor dit bindend effect zorgt en het is juist dat wat onderwerp is voor deze thesis.

Er wordt ingezet op het begrijpen van de processen die plaatsvinden op zowel chemisch als fysisch vlak. Door begrip van zaken kan er worden ingespeeld op cruciale parameters met als doel het mengsel te optimaliseren en op die manier materiaal en geld uit te sparen.

1.2 Onderzoeksvraag

De bijkomende sterkteontwikkeling van zandcement door toevoeging van het zandvliegasmengsel in het begin (op korte termijn) en door nalevering (op lange termijn) ligt hoogstwaarschijnlijk bij twee mogelijke oorzaken. Ten eerste is er een mogelijke puzzolane werking en ten tweede is er een mogelijk filler effect.

De onderzoeksvragen die hieruit volgen luiden: “Heeft het zandvliegasmengsel een puzzolane werking en hoe wordt deze geactiveerd?” en “Wat is het aandeel van de fillerwerking?”. Kortom: “Hoe zorgt het zandvliegasmengsel als gedeeltelijke zandvervanger voor een bijdrage op vlak van druksterkte van zandcement?”.

1.3 Methodologie

De manier waarop de zoektocht naar antwoorden verloopt, gaat als volgt. Enerzijds is er een theoretisch onderzoek en anderzijds is er een praktisch deel (labotesten).

Als gevolg van uitzonderlijke omstandigheden (Covid19) blijft een groot aandeel van het praktisch deel onuitgevoerd. Dit zorgt ervoor dat de focus nog meer op het theoretische deel ligt.

Binnen het theoretisch onderzoek zijn twee zaken van groot belang, namelijk de puzzolane werking en het filler effect. De nadruk wordt gelegd op het begrijpen van deze twee verschijnselen zodat deze gelinkt kunnen worden aan dit onderzoek. Daarnaast worden ook nog andere zaken bestudeerd die van belang zijn binnen dit onderzoek. De verworven informatie uit dit theoretisch onderzoek wordt in een volgende fase gebruikt om de onderzoeksvragen te beantwoorden en de processen (chemisch en fysisch) bloot te leggen.

Er worden twee soorten labotesten uitgevoerd.

De eerste testen worden uitgevoerd aan de hand van cementmortelproefstukken (druksterkte bepalen) en daaropvolgend de Strength Activity Index. Het doel van deze labotesten is het staven van drie zaken uit het theoretisch onderzoek. Hieruit volgt een beter inzicht in bepaalde parameters die van belang zijn in het uiteindelijke mengsel. De samenstelling van de proefstukken worden telkens op die manier aangepast dat een bepaald aspect wordt uitgelicht. Deze drie delen/aspecten zijn de puzzolane werking, het filler effect en een extra parameter CEM I vs. CEM III. Dit laatste is om een vreemde bevinding uit de thesis van 2019 te onderzoeken. E. Vanden Bussche en T. Vansteelant bekwamen quasi dezelfde druksterktes voor CEM I als voor CEM III. Dit is vreemd want CEM I zou steeds een beter resultaat (hogere druksterkte) moeten opleveren. Dit wordt met deze testen verder onderzocht. Op basis van de bekomen druksterktes uit alle testen kan aan de hand van de verhouding van de waarde van het testmengsel op de waarde van het referentiemengsel een Strength Activity index bepaald worden. Dit is een maat voor de sterkteontwikkeling van het mengsel in functie van de samenstelling van dat mengsel. Wanneer de waarden van de verschillende mengsels naast elkaar worden gelegd, worden deze waarden vergeleken en worden de juiste conclusies getrokken.

Het uiteindelijke doel van de verworven kennis uit het theoretisch onderzoek en de eerste labotesten is het begrijpen van het gedrag van de mengsels uit 2019 en op zoek gaan naar de parameters waarop kan worden ingespeeld om deze mengsels te verbeteren.

Al snel wordt duidelijk dat toevoeging van de hoeveelheid calciumhydroxide een verbetering binnen het mengsel kan teweegbrengen. Het toevoegen van calciumhydroxide zou de puzzolane werking bevorderen en zou dus een positieve invloed hebben op de uiteindelijke druksterkte. Later wordt ook duidelijk dat de toevoeging van natriumhydroxide voor een tweede verbetering van het mengsel kan zorgen. Het zou net als calciumhydroxide de puzzolane werking bevorderen, maar op een andere manier. De eerste verbeteringsmogelijkheid is dus toevoeging van calciumhydroxide en de tweede verbeteringsmogelijkheid is toevoeging van natriumhydroxide.

Bij de eerste voorgestelde verbetering, namelijk de toevoeging van $\text{Ca}(\text{OH})_2$, wordt het toevoegingsgehalte op basis van een financiële analyse gekwantificeerd en de bijhorende mengsels ontworpen. De tweede voorgestelde verbetering van het mengsel, de toevoeging van natriumhydroxide, wordt in dit onderzoek niet gekwantificeerd. Dit wil zeggen dat dit onderzoek op vlak van het tweede verbeteringsvoorstel zich beperkt tot een theoretische uiteenzetting.

Toevoeging van calciumhydroxide vormt de basis voor de tweede reeks testen. Deze tweede reeks testen worden uitgevoerd aan de hand van proctorproefstukken. De mengsels uit 2019, van E. Vanden Bussche en T. Vansteelant, die niet voldeden aan de norm worden onder de loep genomen. Er wordt gespeeld met het toevoegen van calciumhydroxide om een groter aandeel puzzolane werking te verkrijgen en op die manier de druksterkte te verhogen. Deze mengsels hebben een lager cementgehalte dan de finale mengsels van E. Vanden Bussche en T. Vansteelant. Het zal bij deze testen dus kwestie zijn van een financieel voordeel te halen uit het verlagen van het cementgehalte en het verhogen van het calciumhydroxidegehalte.

2 DE TWEE MENGSELONTWERPEN UIT 2019

Dit zijn de twee marktwaardige mengselontwerpen die door T. Vansteelant en E. Vanden Bussche in 2019 naar voren werden geschoven.

Mengselontwerp 1:

Tabel 2.1 Mengselontwerp 1 T. Vansteelant en E. Vanden Bussche [6]

Voorstel I: 30% VA - 90 kg/m³			
Dichtheid (kg/m³)	2068		
	Proctor (%)	Aandeel (kg/m ³)	Prijs (€/m ³)
Zand	58,43	1208,35	1,21
Vliegas	25,04	517,87	0,00
Water	12,10	250,31	0,90
Cement	4,42	91,49	7,78
Centrale	/	/	7,24
Totaal	100,00	2068,02	17,12

Mengselontwerp 2:

Tabel 2.2 Mengselontwerp 2 T. Vansteelant en E. Vanden Bussche [6]

Voorstel II: 50% VA - 100 kg/m³			
Dichtheid (kg/m³)	2025		
	Proctor (%)	Aandeel (kg/m ³)	Prijs (€/m ³)
Zand	41,46	839,57	0,84
Vliegas	41,46	839,57	0,00
Water	12,02	243,41	0,88
Cement	5,06	102,47	8,71
Centrale	/	/	7,09
Totaal	100,00	2025,00	17,51

Het eerste mengsel heeft een zandvervangingspercentage van 30 procent en een cementgehalte van 90 kg/m³. Het andere mengsel bestaat voor 50 procent uit vliegas en bevat 100 kg/m³ cement.

De mengsels zijn respectievelijk 5,0% en 2,8% goedkoper dan het referentiemengsel (Tabel 6.19) dat in de centrales van Viabuild verwerkt wordt. De totale verwerkingstijd van de vliegassen bedraagt dan respectievelijk 31 en 19 jaar. [6]

3 KARAKTERISATIE ZANDVLIEGASMENGSEL

3.1 Eerste chemische analyse

De belangrijkste bestanddelen van het zandvliegasmengsel zijn de volgende: 43,37% SiO₂, 22,57% Al₂O₃ en 4,38% Fe₂O₃. De volledige eerste chemische analyse is te zien in Tabel 3.1. Deze werd uitgevoerd in de thesis van 2018. Later in deze tekst zal duidelijk worden dat een tweede chemische analyse aan de orde zal zijn. [7] [6]

Tabel 3.1 Chemische analyse zandvliegasmengsel [7]

Technical Support Lab : TSL

Etude : KU Leuven département Brugge : collaboration thèse usage des cendres (Viabuild)
 Réf : 18CF09
 Client : RMX division: Office BE

1. Essais chimiques

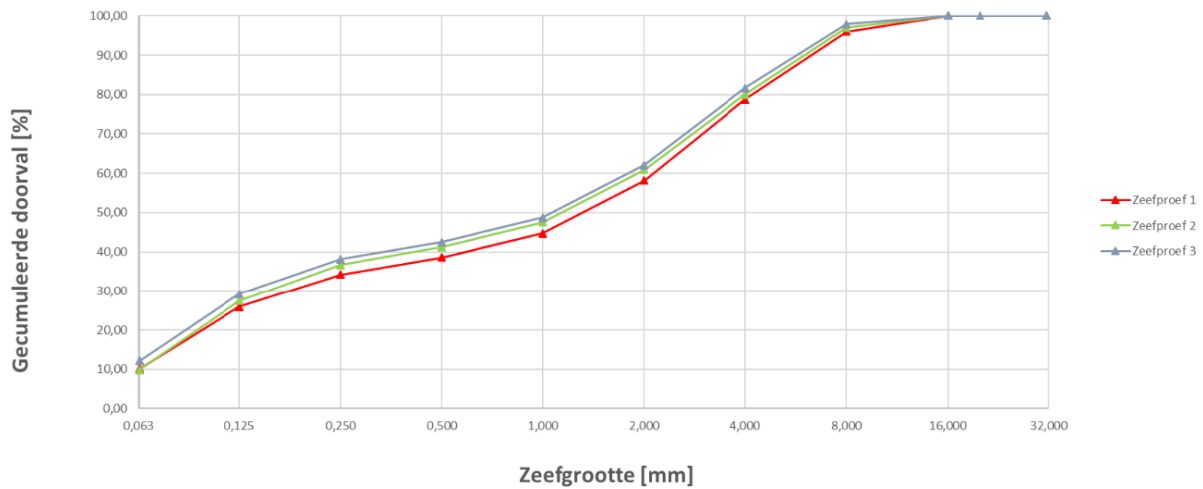
Qualité	MELANGE CENDRES + SABLE FIN		Certification EN 197-1
Origine	KU LEUVEN DEPARTEMENT BRUGES		
Date	18/01/2018		Imposition
Référence étude	18CF09		
Référence échantillon	18-0049		
	Méthode d'essai		
SiO ₂ (%)	EN 196-2	43,37	
Al ₂ O ₃ (%)	EN 196-2	22,57	
Fe ₂ O ₃ (%)	EN 196-2	4,38	
CaO (%)	EN 196-2	0,50	
MgO (%)	EN 196-2	1,42	
Na ₂ O (%) (indicatif)	EN 196-2	0,55	
K ₂ O (%) (indicatif)	EN 196-2	2,85	
S SO₃ total (%)	EN 196-2	0,36	
Mn ₂ O ₃ (%)	EN 196-2	0,08	
TiO ₂ (%)	EN 196-2	0,90	
P ₂ O ₅ (%)	EN 196-2	0,16	
Cl (%)	EN 196-2	0,00	
SrO (%)	EN 196-2	0,02	
PF950 °C (%)	EN 196-2	21,21	PF>7,0% : Non conforme
Somme (%)		98,37	
Na ₂ O eq (%)	EN 196-2	2,43	
CO ₂ (%)	EN 162-2	0,00	
CaO Libre (%)	EN 451-1	0,00	CaOI <1,0%: Conforme
RI(HCL/KOH) (%)	EN 196-2	31,92	
SiO ₂ RINS (%)	EN 196-2	51,88	
Silice réactive (%)	EN 197-1	26,81	Silice réactive >25% : Conforme
CaO réactive (%)	EN 197-1	0,25	CaOréactif < 10% : Conforme

C organique

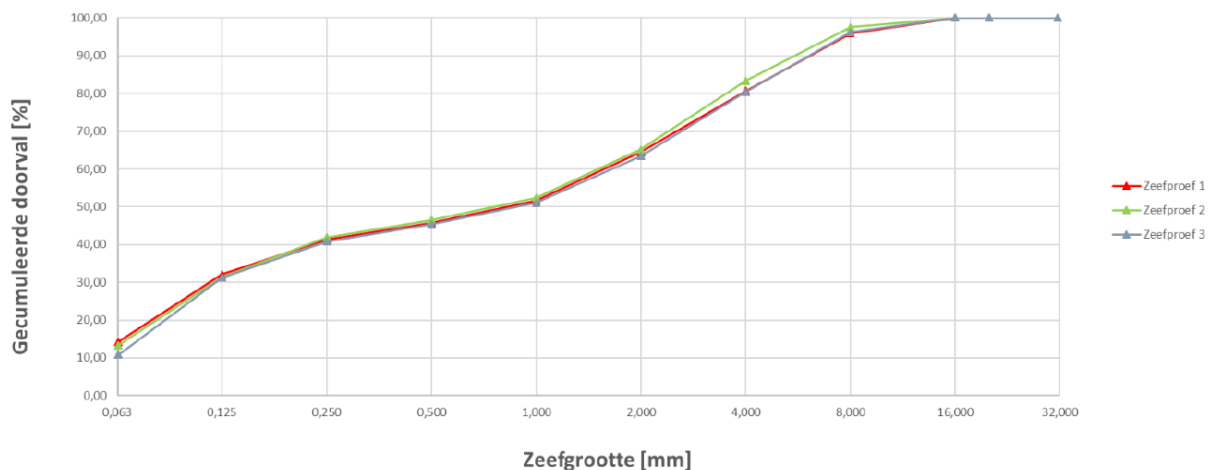
18,59%

3.2 Korrelverdeling

In 2019, de thesis van E. Vanden Bussche en T. Vansteelant, werden twee batchen (B1 en B2) zandvliegasmengsel onder de loep genomen op vlak van korrelverdeling.



Figuur 3.1 Zeefcurve vliegas B1 [6]



Figuur 3.2 Zeefcurve vliegas B2 [6]

Volgende zaken werden geconcludeerd.

Het zandvliegasmengsel, die over de gehele site als vrij homogeen beschouwd mag worden, bestaat uit 10% tot 14% fijnen (diameter van de korrel kleiner dan $63 \mu\text{m}$) en 86% tot 90% grovere korrels (diameter van de korrel groter dan $63 \mu\text{m}$). Deze grovere korrels bestaan uit 48% tot 49% zand ($63 \mu\text{m} - 2 \text{mm}$) en 37% tot 42% overige grove korrels (=grind). [6]

De uniformiteitscoëfficiënt ligt hoger dan 4, dit wijst op een goede gradering van het zandvliegasmengsel. [6]

Voor de eenvoud worden de fijnen als vliegas en de niet-fijnen als zand beschouwd. Het mengsel bestaat dus uit 10% tot 14% vliegas en 86% tot 90% zand.

4 THEORETISCH ONDERZOEK

4.1 Cement: focus op chemie

Cement is een hydraulisch bindmiddel. Het is een fijngemalen, anorganisch poeder dat na vermenging met water een pasta oplevert die na een bepaalde tijd gaat verharderen. Dit verharderen is een gevolg van verschillende chemische reacties en processen. Het hoofdaandeel van de optredende chemische reacties zijn hydratatiereacties. Na verharding behoudt het zijn sterkte en stabiliteit, zelfs onder water. [1] [2] [6]

Er bestaat de dag van vandaag een zeer groot spectrum aan cementsoorten. 162 types worden binnen Europa geproduceerd en gebruikt. NBN EN 197-1 hanteert de 27 meest gebruikte types. Eén ding hebben de types cement allemaal gemeen: Portlandcement vormt steeds de basis van het cement. [1] [2] [6]

4.1.1 Portlandcement

Portlandcement wordt geproduceerd aan de hand van twee maalprocessen en één verbrandingsproces. Calcium en silica vormen daarbij een groot aandeel van het materiaal die nodig is voor de productie van dit cement. Kalksteen, krijt, mergel en zeeschelpen zorgen voor calcium (Ca). Klei en schalie zorgen voor silica (Si). Na de drie processen wordt een klinker bekomen: de Portlandklinker. Na vermaling van deze klinker wordt een poeder bekomen die Portlandcement genoemd wordt. [1] [2]

4.1.1.1 Chemische reacties bij productie

De chemische reacties die optreden bij de productie van Portlandcement worden hieronder opgelijst. Merk op dat Ca en Si op vele plaatsen aanwezig zijn. Wat tussen haakjes staat is de oxidatienotatie van het reactieproduct.

- Reagentia
 - Kalksteen: $\text{CaO} + \text{CO}_2$
 - Klei: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$
- Reactieproducten
 - Kalksteen en klei
 - $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S)
 - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S)
 - $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_2A)
 - $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) [1] [2]
- Eigenlijke optredende reacties
 - $2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S)
 - $3\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow 3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S)
 - $3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)
 - $4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) [8]

4.1.1.2 Bestanddelen en hun aandeel

De bestanddelen van Portlandcement zijn de volgende. Bij cementbestanddelen wordt vaak een oxidenotatie gehanteerd. Opnieuw wordt deze telkens tussen haakjes weergegeven indien van belang. De oxide-afkortingen werden reeds opgelijst na de symbolenlijst.

- Primaire bestanddelen
 - $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S , alliet)
 - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S , belliet)
 - $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A , celliet)
 - $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF , ferriet)
- Secundaire bestanddelen
 - MgO
 - TiO_2
 - Mn_2O_3
 - K_2O
 - Na_2O [1] [2]

De mate waarin de bestanddelen voorkomen in het Portlandcement worden hieronder uiteengezet.

- C_3S en C_2S : 80% van de primaire bestanddelen
- C_3A en C_4AF : 20% van de primaire bestanddelen
- Secundaire bestanddelen: kleine hoeveelheden [1] [2]

Nauwkeuriger bekeken wordt het dit.

- $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S): 55%
- $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S): 18%
- $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A): 10%
- $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF): 8%
- $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$: 6% [1] [2]

4.1.1.3 Hydratatiereacties

Zonder water kan het Portlandcement niet binden met granulaten. Water zorgt ervoor dat het cementpoeder met dat water reageert. De reacties tussen het cement en water worden de hydratatiereacties genoemd. Deze reacties zorgen ervoor dat het de cementpasta na verloop van tijd gaat opstijven en verharden. Hydratatie is een exotherm proces, er is dus warmteontwikkeling. [1] [2]

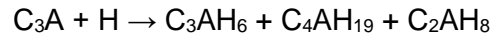
Het woord hydratatiereacties wordt hier met een reden steeds in het meervoud geplaatst. Portlandcement is een heterogeen materiaal, d.w.z. dat het cement een mix is van verschillende componenten (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF ...). Deze componenten gaan elk op hun eigen tempo gaan reageren met water. Ze ondergaan dus allemaal gelijktijdig een hydratatiereactie maar bij de ene component gebeurt dat sneller dan bij de andere. [1] [2]

De notatie van de reactievergelijkingen wordt hier voor de eenvoud beperkt tot de oxidatienotatie, de hydratatiereacties die van tel zijn in de probleemstelling binnen deze thesis worden later uitgebreider uitgewerkt.

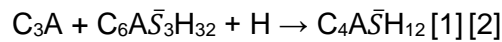
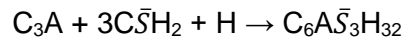
- Hydratatie van silicaten – C_3S en C_2S
$$2\text{C}_3\text{S} + 6\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3 + 3\text{CH}$$
$$2\text{C}_2\text{S} + 4\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3 + \text{CH}$$

Het gevormde C-S-H ($C_3S_2H_3$) bestaat uit zeer fijne deeltjes (met een uiteenlopende opbouw) van de grootteorde $< 1\mu m$. Het gevormde CH is een kristallijn materiaal met een vaste opbouw. De hydratatie van C_2S verloopt veel trager dan de hydratatie van C_3S . C_2S is dus een minder reactief bestanddeel. [1] [2]

- Hydratatie van aluminaten - C_3A

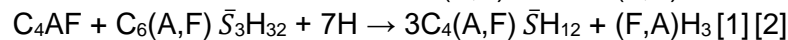
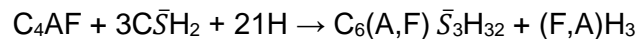


De hydratatie van aluminaten verloopt veel sneller dan de hydratatie van silicaten. Het opstijven van de pasta wordt vooral bekomen als rechtstreeks gevolg van de hydratatie van aluminaten. Naast bovenstaande hoofdreactie treden nog twee andere reacties op. Deze reacties treden op bij aanwezigheid van gips. Toevoeging van gips wordt toegepast om de reactie van C_3A te vertragen of om de tijd tussen vloeibare cementpasta en opstijving te beïnvloeden.



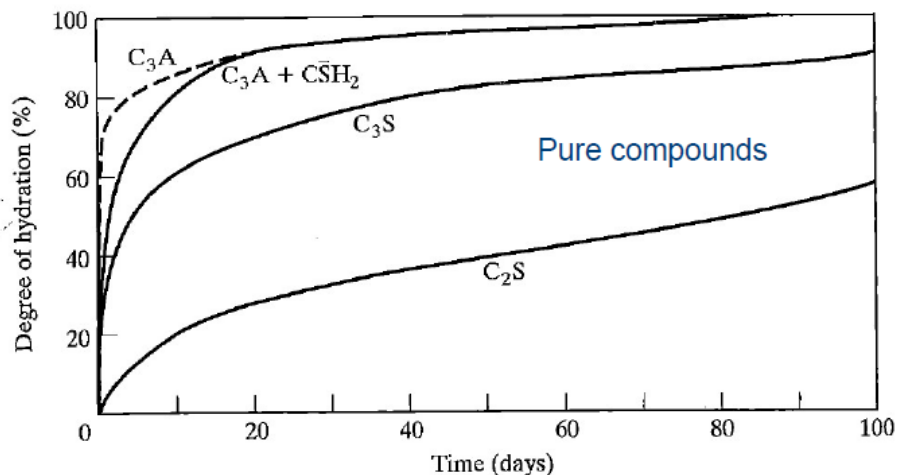
- Hydratatie van ferriet – C_4AF

De hydratatieproducten die bekomen worden door hydratatie van ferriet zijn gelijkaardig aan deze van C_3A . Hydratatie van ferriet verloopt trager en zorgt voor minder warmteontwikkeling. Hoe groter het aandeel ijzer, hoe trager de hydratatie verloopt.



- Vergelijking

Zoals gezegd verloopt de hydratatiereactie bij het ene bestanddeel trager dan bij het andere. In volgorde van dalende reactiesnelheid: $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$. [1] [2]



Figuur 4.1 Snelheid van de hydratatiereacties [1]

Het ene bestanddeel gaat meer hydratiewarmte ontwikkelen dan het andere.

Tabel 4.1 Snelheid van ontwikkeling hydratatiwarmte per bestanddeel en de hoeveelheid ervan [1] [2]

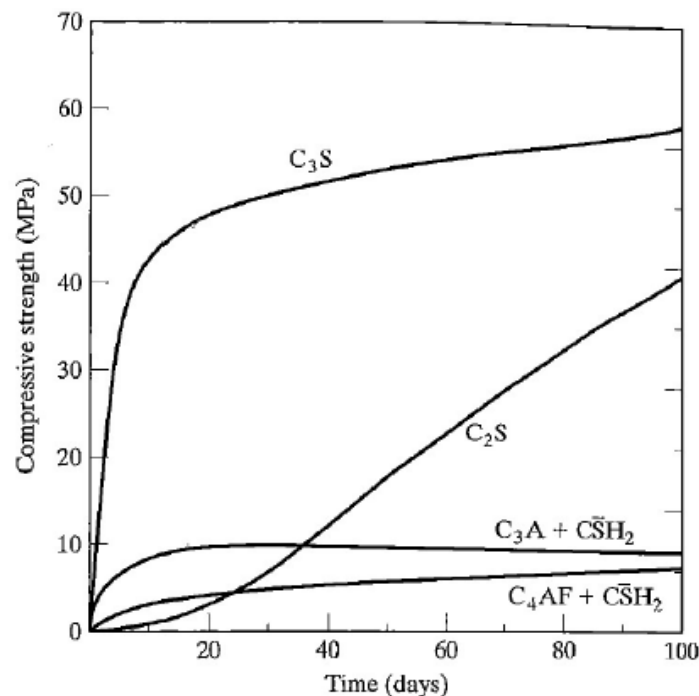
Bestanddeel	Ontwikkeling hydratatiwarmte	Hoeveelheid warmte
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S)	Gemiddeld	Hoog
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S)	Traag	Eerst laag, dan hoog
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)	Snel	Zeer hoog
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)	Gemiddeld	Gemiddeld

De hoeveelheden van de bestanddelen hebben een grote invloed op de eigenschappen van het cement. Dus: variëren in hoeveelheden van de componenten heeft een wijziging in eigenschappen van het cement tot gevolg.

4.1.2 Verharding

Het proces om van cementpoeder een uitgeharde cementspecie te maken gebeurt in vijf stappen. Deze stappen zijn setting, verharding, hydratatie, sterkteontwikkeling en stabiliteitsontwikkeling. [1] [2]

Bij de stap verharding zijn enkele zaken op te merken. Verharding is het ontwikkelen van sterkte. De silicaten spelen hierbij de belangrijkste rol, ze zijn belangrijker dan de aluminaten op dat vlak. C_3S draagt bij aan de sterkteontwikkeling in de eerste 3 à 4 weken. Hierna dragen C_3S én C_2S bij aan de sterkteontwikkeling. Deze informatie is van belang om het cement na sterktetesten tot de juiste klasse toe te wijzen. [1] [2]



Figuur 4.2 Druksterkte in functie van de tijd per bestanddeel [1]

Tabel 4.2 geeft een overzicht van het aandeel in warmte- en sterkteontwikkeling van het cement.

Tabel 4.2 Sterkte -en warmteontwikkeling per bestanddeel [1] [2]

Bestanddeel	Effect op cement	
	Sterkte	Warmte
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S)	Hoog	Hoog
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S)	Eerst laag, dan hoog	Laag
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)	Laag	Zeer hoog
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)	Laag	Gemiddeld

4.1.3 Soorten

Zoals reeds gezegd zijn er zeer veel soorten cement. De meest gebruikte worden hieronder in een klein overzicht aangegeven. Er zijn 27 cementsoorten die het vaakst gebruikt worden. Deze laatste zijn opgesplitst in vijf soorten CEM's. [1] [2]

- Cement
 - 27 vaak gebruikte cementsoorten
 - CEM I: Portlandcement (maximaal 5% andere stoffen)
 - CEM II: Portland composietcement (minimaal 65% andere stoffen)
 - CEM III: Hoogoven -/ Portlandcement
 - CEM IV: Puzzolaancement (niet toepasbaar in België)
 - CEM V: Composietcement (mengsel van bovenstaande CEM's)
 - 7 sulfaatbestendige cementsoorten
 - 3 hoogovencementsoorten met lage sterkte in een vroeg stadium
 - 2 sulfaatbestendige hoogovencementsoorten met lage sterkte in een vroeg stadium [1] [2]

CEM I is het zuivere Portlandcement. CEM I bestaat uit 95-100% Portlandcementklinker en 0-5% andere bestanddelen. De andere CEM's verschillen in chemische opbouw en eigenschappen na en tijdens verharding/hydratie. De opbouw van de bestanddelen bepaalt dus het CEM-type. [1] [2]

De CEM's die nuttig blijken te zijn in het mengsel binnen deze probleemstelling zijn CEM III/A 32,5 en CEM I 52,5. Uiteraard heeft CEM I een beduidend hogere kostprijs dan CEM III. [6]

Tabel 4.3 geeft de samenstelling weer per cementtype.

Tabel 4.3 Samenstelling van de verschillende cementsoorten [1]

Hoofdtypen	Aanduiding van de 27 producten (gewone cementsoorten)		Samenstelling (gehalten in massaprocent) ^{a)}											
			Hoofdbestanddelen										Nevenbestanddelen	
			Klinker	Hoogovenslak	Microsilica	Puzzolanen		Vliegas		Gebrande leesteen	Kalksteen			
						Natuurlijke	Gebrande natuurlijke	Siliciumhoudend	Calciumhoudend		L	LL		
K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Portlandcement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portlandslakcement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandmicrosilicacement	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandpuzzolaancement	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandvliegasement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portlandleesteenement	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Portlandkalksteenement	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portlandcomposietcement ^{c)}	CEM II/A-M	80-94	←----- 6-20 -----→							-	-	-	0-5
CEM II/B-M		65-79	←----- 21-35 -----→							-	-	-	0-5	
CEM III	Hoogovenement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Puzzolaancement ^{c)}	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11-35 -----→				-	-	-	0-5		
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36-55 -----→				-	-	-	0-5		
CEM V	Composietcement ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18-30 -----→			-	-	-	0-5		
		CEM V/B	20-38	31-50	-	←----- 31-50 -----→			-	-	-	0-5		

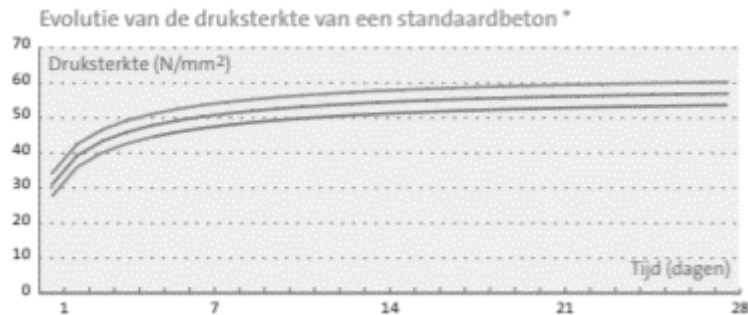
^{a)} De waarden in de tabel zijn uitgedrukt ten opzichte van de som van hoofd- en nevenbestanddelen.
^{b)} Het gehalte microsilica mag niet meer dan 10% bedragen.
^{c)} In het geval van Portlandcomposietcement CEM II/A-M en CEM II/B-M, Puzzolaancementen CEM IV/A en CEM IV/B en Composietcement CEM V/A en CEM V/B, moeten de hoofdbestanddelen, anders dan klinker, in de aanduiding van het cement vermeld zijn.

Tabel II.1/9 : De 27 producten van de familie van gewone cementsoorten

4.1.3.1 CEM I

CEM I bestaat uit 95% of meer Portlandcement en maximaal 5% andere stoffen. [1]

- CEM I 52,5
Dit cementtype is gekend om zijn zeer snelle verharding en hoge sterkte op korte termijn. De chemische samenstelling en de druksterkte in functie van de tijd worden in Figuur 4.3 en Tabel 4.4 weergegeven. [9]



Figuur 4.3 Druksterkte in functie van de tijd van standaardbeton CEM I 52,5 [9]

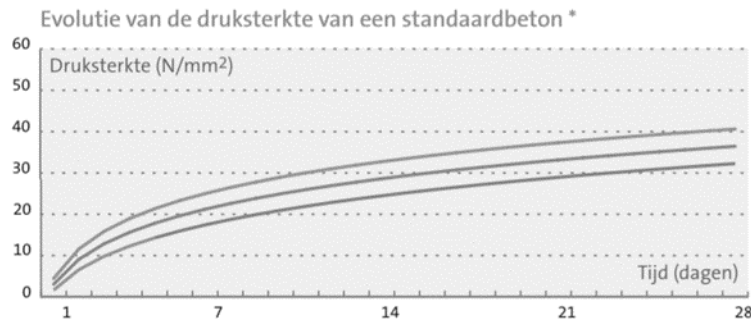
Tabel 4.4 Chemische samenstelling CEM I 52,5 [9]

CEM I 52,5	Resultaten (%)	Eisen (%)
CaO	62,8	-
SiO ₂	18,7	-
Al ₂ O ₃	5,7	-
Fe ₂ O ₃	4,2	-
MgO	1,0	-
Na ₂ O	0,44	-
K ₂ O	0,63	-
SO ₃	3,7	≤ 4,0
Cl ⁻	0,06	≤ 0,10
Gloeiverlies	1,2	≤ 5,0
Onoplosbare rest	0,2	≤ 5,0

4.1.3.2 CEM III

CEM III is een hoogoven -/ Portlandcementmengsel bestaande uit 35-64% portlandcementklinker, 36-65% hoogovenslak en maximaal 5% andere stoffen. [1]

- CEM III/A 32,5
Dit cementtype is gekend om zijn goede sterkte op lange termijn, tragere verharding en de lage hydratatiwarmte. De chemische samenstelling en de druksterkte in functie van de tijd worden in Figuur 4.4 en Tabel 4.5 weergegeven. [10]



Figuur 4.4 Druksterkte in functie van de tijd van standaardbeton CEM III/A 32,5 [10]

Tabel 4.5 Chemische samenstelling CEM III/A 32,5 [10]

CEM III/A 32,5	Resultaten (%)	Eisen (%)
CaO	52,0	-
SiO ₂	25,8	-
Al ₂ O ₃	8,1	-
Fe ₂ O ₃	2,6	-
MgO	4,4	-
Na ₂ O	0,37	-
K ₂ O	0,59	-
Na ₂ O-éq	0,76	≤ 0,90
SO ₃	3,2	≤ 4,0
Cl ⁻	0,06	≤ 0,10
Gloeiverlies	0,9	≤ 5,0
Onoplosbare rest	0,4	≤ 5,0

4.1.3.3 CEM I vs. CEM III

Waar CEM I zuiver portlandcement is, is CEM III Hoogoven -/ Portlandcement. CEM III is dus CEM I met vervanging van gegranuleerde hoogovenslak.

In chemische samenstelling verschillen de twee types van elkaar. De meest voorname en belangrijkste oxiden zijn CaO en SiO₂. De hoeveelheden CaO en SiO₂ per CEM verschillen beduidend van elkaar. [6]

Daarnaast bevat CEM III meer Al₂O₃ dan CEM I en bevat CEM I meer Fe₂O₃ dan CEM III. De hoeveelheden Al₂O₃ en Fe₂O₃ zijn wel beduidend lager dan de hoeveelheden van CaO en SiO₂.

Op basis van kostprijs is CEM III een stuk voordeliger dan CEM I. Dit is een financiële factor die doorslaggevend zal zijn. CEM III wordt dus steeds geprefereerd.

4.1.4 SCM's

Er wordt vaak gespeeld met deze types cement. In die zin dat er vaak materialen worden toegevoegd aan het Portlandcement om andere eigenschappen te bekomen, de kosten te reduceren, de uitstoot te doen dalen of de hoeveelheid afval te beperken. Deze materialen noemt men supplementaire cementgebonden materialen (Supplementary Cementitious Materials, SCM). Wat alle SCM's gemeenschappelijk hebben is dat de korrelgrootte ervan even fijn of zelfs fijner is dan de korrelgrootte van het Portlandcement. Hieronder worden de meest gekende SCM's samen met hun afkorting weergegeven. [1] [2]

- Gegranuleerde hoogovenslak (S)
- Siliciumdamp (D)
- Natuurlijke puzzolanen (P)
- Natuurlijk gecalcineerde puzzolanen (Q)
- Siliciumhoudende vliegas (V)
- Calciumhoudende vliegas (W)
- Verbrande schalie (T)
- Kalksteen (L, LL) [1] [2]

De combinatie van Portlandcement (K) met een SCM geeft dus telkens een ander type cement. V en W zijn beide vliegas-SCM's.

4.1.4.1 Vliegas – SCM

De vliegassen die als SCM's kunnen worden gebruikt zijn poederkoolvliegassen. Deze as is een fijn poeder met een korreldiameter van kleiner dan 130 micrometer. De assen hebben een bolvormige en glasachtige structuur als gevolg van een opeenvolging van snelle opwarming en afkoeling. [7] [11]

Deze assen worden bekomen door het verhitten van steenkool met energieopwekking als doel. Bij de verhitting wordt het meeste deel van het materiaal meegezogen met de rookgassen. Ze worden met filters uit de rookgassen gescheiden. [7] [11]

Poederkoolvliegassen kunnen in twee soorten worden opgesplitst: siliciumhoudende vliegassen en calciumhoudende vliegassen. De siliciumhoudende vliegassen hebben puzzolane eigenschappen, de calciumhoudende vliegassen hebben hydraulische én puzzolane eigenschappen. Het hebben van puzzolane eigenschappen wil zeggen dat het in aanwezigheid van water chemisch gaat reageren met Ca(OH)_2 . Dit heeft een bindend effect als gevolg. De oorzaak van dit effect is de aanwezigheid van kalk in de vorm van CaO . [7] [11]

- Siliciumhoudend vliegas (V)
 - SiO_2 , Al_2O_3
 - Puzzolane eigenschappen [1] [2]
- Calciumhoudend vliegas (W)
 - CaO , SiO_2 en Al_2O_3
 - Puzzolane en hydraulische eigenschappen [1] [2]

In de thesis van 2019 werd vastgesteld dat de vliegas binnen de probleemstelling van deze thesis siliciumhoudend vliegas is.

Het percentage vliegas (V, W) die kan worden toegevoegd ligt gebruikelijk tussen de 6% en 35%. De meest gebruikte mengsels met vliegas als SCM zijn volgende mengsels (CEM II). [1] [2]

- K+V: Portland - fly ash cement (type II)
 - CEM II/A-V: K(80-94%), V(6-20%) en andere(0-5%)
 - CEM II/B-V: K(65-79%), V(21-35%) en andere(0-5%) [1] [2]
- K+W: Portland - fly ash cement (type II)
 - CEM II/A-W: K(80-94%), W(6-20%) en andere(0-5%)
 - CEM II/B -W: K(65-79%), W(21-35%) en andere(0-5%) [1] [2]

Ter verduidelijking: in dit onderzoek wordt vliegas niet gebruikt als SCM, maar als zandvervangend materiaal.

4.2 Chemische werkingen binnen zandcementmengsels door toevoeging van vliegas

De twee mengselontwerpen van zandcement die in 2019 door T. Vansteelant en E. Vanden Bussche naar voor werden geschoven leveren een financieel voordeel op voor de productie ervan. De samenstelling en de belangrijkste aspecten ervan werden reeds in hoofdstuk 2 aangegeven.

Deze twee mengsels worden nu bestudeerd met de focus op de werkingen die er in optreden. Uit voorkennis en bijkomende inzichten kan worden gesteld dat er twee chemische werkingen optreden, namelijk hydratatie en puzzolane werking. Beiden dragen bij tot de verstijving/bindig en de sterkteontwikkeling van het zandcement.

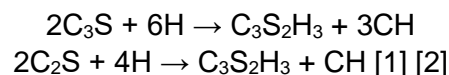
Er wordt vaak gebruik gemaakt van oxide-afkortingen bij het uitschrijven van chemische reacties binnen cement. Deze oxide-afkortingen werden reeds opgelijst na de symbolenlijst.

4.2.1 Hydratatie

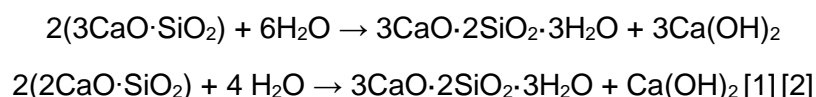
Hydratatiereacties werden reeds uitgebreid besproken in 4.1.1.3. Vertrekkend vanuit de chemische analyse kan worden gesteld dat hydratatie van silicaten (C_3S en C_2S), aluminaten (C_3A) en ferriet (C_4AF) de belangrijkste hydratatiereacties vormen binnen dit onderzoek. [6]

De hydratatiereacties van silicaten, aluminaten en ferriet zijn als volgt. De oxidatienotatie en uitgewerkte notatie stellen uiteraard hetzelfde voor.

- Silicaten
 - Oxidatienotatie

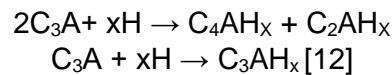


- Uitgewerkte notatie

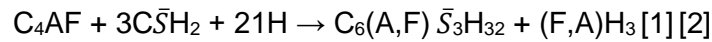


Het zijn voornamelijk de calciumsilicaathydraten (CSH) die het bindend effect opleveren.

- Aluminaten
 - Oxidatienotatie



- Ferriet
 - Oxidatienotatie



Elk van deze hydratatiereacties dragen bij tot de sterkteontwikkeling van het mengsel.

4.2.2 Puzzolane werking

Stoffen die puzzolane eigenschappen bezitten reageren chemisch met calciumhydroxide ($Ca(OH)_2$). Dit leidt tot een bindend effect. De reactie gaat enkel door in aanwezigheid van water. Een stof bezit puzzolane eigenschappen als ze silica en/of alumina bevatten. [13] [14] [15]

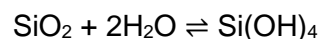
In praktijk wordt Portlandcement vervangen door puzzolanen in de vorm van SCM's. Dit kan gaan tot 40% van het oorspronkelijk Portlandcementgehalte. Het gebruik van puzzolanen als vervangingsproduct heeft positieve gevolgen. Zo vergroot de druksterkte op langere termijn beduidend, dit is de zogenaamde nalevering. Op korte periode ligt de druksterkte wel lager ten opzichte van het gebruik van zuiver Portlandcement. Dit wijst erop dat het effect van de puzzolane werking later te zien is dan het effect van de hydratatiereacties. [14] [15]

Een ander voordeel van het gebruik van puzzolanen is dat het de weerstand van het cement tegen indringing van agressieve stoffen verhoogt. Hierdoor stijgt de duurzaamheid. [14]

Toepassing op het zandcementmengsel: naast hydratatiereacties speelt de puzzolane werking dus ook een belangrijke rol. [15]

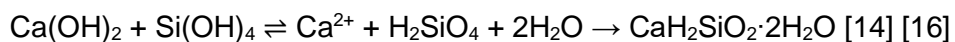
De eerste puzzolane reactie vertrekt vanuit de grote hoeveelheid SiO_2 (43,37%) die aanwezig is in het zandvliegasmengsel. [14] [15]

De SiO_2 wordt in aanwezigheid van water omgezet in een $Si(OH)_4$ -oplossing.



Deze $Si(OH)_4$ gaat reageren met $Ca(OH)_2$ die bekomen werd uit de hydratatiereacties. [14] [15]

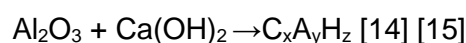
De uiteindelijke eerste puzzolane reactie (uit silica) is, in uitgewerkte notatie, dan als volgt.



De tweede puzzolane reactie vertrekt vanuit de wat kleinere hoeveelheid Al_2O_3 (22,57%) die aanwezig is in het zandvliegasmengsel. [14] [15]

Naast siliciumoxide zet ook deze aluminiumoxide een tweede puzzolane reactie in werking. Al_2O_3 gaat namelijk ook gaan reageren met $Ca(OH)_2$ die bekomen werd uit de hydratatiereacties. [14] [15]

De tweede puzzolane reactie (uit alumina) is, in uitgewerkte notatie, als volgt.



De reactievergelijking wordt op deze manier genoteerd aangezien de gevormde calciumaluminahydraten kunnen voorkomen in verschillende fasen, dit wil zeggen in verschillende verhoudingen van C, A en H. Enkele voorbeelden zijn C_4AH_{14} en C_2AH_6 .

Beide puzzolane reacties dragen bij tot de sterkteontwikkeling van het mengsel.

4.2.3 Samenvattend

De hydratatie van de silicaten is de belangrijkste hydratiereactie binnen het mengsel omdat ze, door vorming van calciumhydroxide, rechtstreeks aanzet geeft tot de puzzolane werking.

Naast de hydratatie van silicaten zijn er ook nog een bijkomende hydrataties van aluminaten en ferriet. Deze hydratiereacties zijn echter minder relevant voor de werking van de puzzolane reacties.

Het is de calciumhydroxide, voortkomend uit de hydratatie van de silicaten, die de aanzet geeft voor de start van de puzzolane reacties van zowel de alumina en de silica die in het zandvliegasmengsel aanwezig zijn.

De eerste chemische analyse geeft aan dat er 0,50% calciumoxide in het zandvliegasmengsel aanwezig is. De mogelijkheid bestaat dus dat een gering deel van de benodigde calciumhydroxide rechtstreeks vanuit het mengsel verkregen wordt en niet enkel uit de hydratiereactie. Een tweede chemische analyse zal hierover meer duidelijkheid moeten scheppen. Dit wordt verder besproken in 4.3.2.

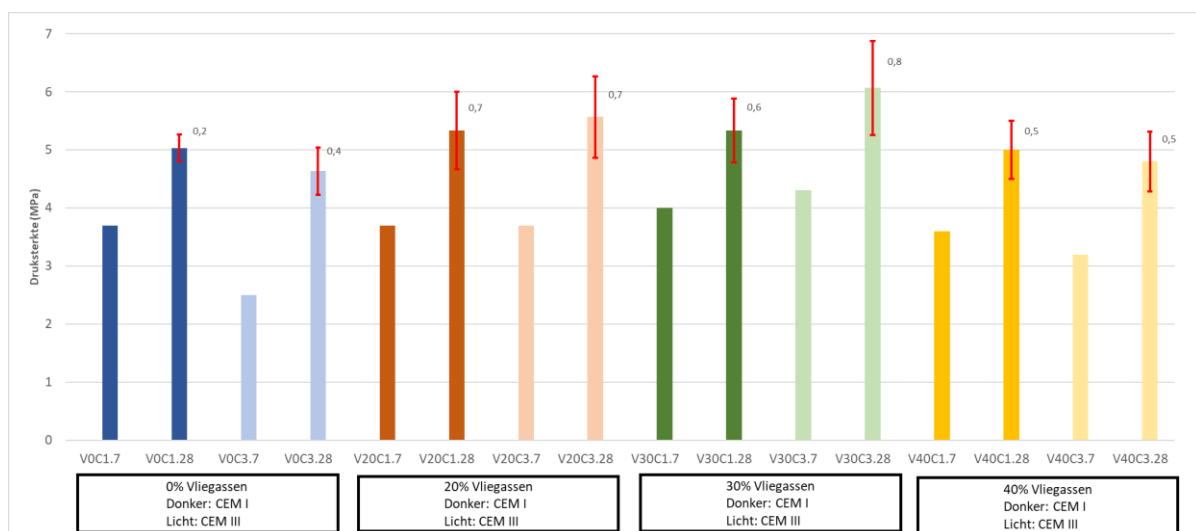
4.3 Calciumhydroxide

Zoals eerder vermeld heeft de vliegias een hoeveelheid aan calciumhydroxide of gebluste kalk nodig om een puzzolane werking te laten optreden. Hierbij kunnen drie vragen worden gesteld. Allereerst: “Hoe zorgt calciumhydroxide samen met de vliegias voor een sterkteontwikkeling bij het uitgeharde mengsel?”. Ten tweede: “Van waar haalt de vliegias de calciumhydroxide om de puzzolane reactie te laten optreden?”. Ten derde: “Welke hoeveelheid calciumhydroxide zorgt voor een optimale sterkteontwikkeling?”.

Opgemerkt kan worden dat calciumhydroxide of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de sleutel zal zijn om de puzzolane werking te begrijpen en de mogelijkheden van de vliegias optimaal te benutten. Het beantwoorden van de drie bovenstaande vragen zal hierin een grote stap in de juiste richting zijn.

4.3.1 Hoe zorgt de calciumhydroxide samen met de vliegias voor de bijkomende sterkteontwikkeling?

Om op deze vraag te antwoorden wordt verwezen naar 4.2. Het is algemeen geweten dat bij de hydratatie van cement calciumsilicaathydraten en calciumaluminaathydraten (CSH en CAH) worden gevormd. Het zijn deze reactieproducten die zorgen voor de sterkteontwikkeling van het uitgeharde mengsel. [15]



Figuur 4.5 Druksterkte in functie van het zandvervangingspercentage [6]

Op Figuur 4.5 zijn de resultaten voor druksterkte voor verschillende mengsels te zien uit de thesis van 2019. Er wordt gekeken naar de evolutie van de druksterkte op 7 en 28 dagen naarmate het vervangingsgehalte van zand door het zandvliegiasmengsel toeneemt. Opmerkelijk is dat het uitgeharde mengsel met vliegias een hogere druksterkte behaalt dan de uitgeharde mengsels zonder vliegias.

Dit kan worden verklaard door het feit dat vliegiasmengsel door zijn puzzolane werking bijkomende calciumsilicaathydraten en calciumaluminaathydraten (CSH en CAH) vormt na toevoeging van $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Hierin ligt de sterkte van de puzzolane werking, namelijk in het feit dat het dezelfde reactieproducten voortbrengt als de reactieproducten van de oorspronkelijke hydratatiereactie van cement. Voor de reactievergelijkingen wordt verwezen naar 4.2. [15]

Allereerst vinden bij de uitharding van het cement de originele hydratatiereacties en dus vorming van de sterkte-ontwikkelende reactieproducten CSH en CAH (of CASH) plaats. Ten

tweede worden in een later stadium (op lange termijn) de secundaire reactieproducten van de puzzolane reactie gevormd, dit heet nalevering. Deze reactieproducten zullen zich vooral vormen in de holtes die ontstaan zijn bij de cementhydratatie. De puzzolane reacties zullen zorgen voor een compacter en sterker uitgehard mengsel door de opvulling van deze holtes. [15]

De mate van de toegevoegde sterkteontwikkeling door de puzzolane werking zal afhangen van de puzzolane reactiviteit van het gebruikte materiaal, in dit onderzoek vliegias. Hierover meer in 4.3.3.

De daling van de druksterkte bij een groter vervangingsgehalte kan dan weer worden verklaard door het verdunningsprincipe beschreven in 4.5.4.

4.3.2 Van waar haalt de vliegias de calciumhydroxide om de puzzolane reactie te laten optreden?

Zoals aangehaald heeft de vliegias een hoeveelheid calciumhydroxide nodig om een puzzolane reactie te laten optreden. De grote vraag is nu van waar de vliegias de calciumhydroxide haalt om de reactie te laten optreden.

Een eerste voor de hand liggende mogelijkheid is dat de calciumhydroxide die vrijkomt uit hydratatiereacties van het cement wordt gebruikt. Dit is te zien in onderstaande reactievergelijkingen.



De bovenstaande reactievergelijkingen zijn de hydratatiereacties van C_3S en C_2S van cement. De calciumsilicaten (C_3S en C_2S) vormen bij toevoeging van water ten eerste calciumsilicaathydraten die zorgen voor de sterkte van het uitgehard mengsel. Ten tweede wordt ook een hoeveelheid aan calciumhydroxide gevormd, ook wel portlandiet genoemd. Er is dus een zeer grote waarschijnlijkheid dat de vliegias deze vrijgekomen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gebruikt om de puzzolane werking te laten optreden. Ook is op te merken aan de reactievergelijkingen dat het bestanddeel C_3S van cement drie keer meer $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produceert dan het bestanddeel C_2S . Een cement met een hoog C_3S -gehalte zal dus een gunstig effect hebben op de puzzolane werking.

Een tweede mogelijkheid is dat het zandvliegiasmengsel een zekere hoeveelheid calciumhydroxide bevat en dat deze wordt gebruikt om de puzzolane werking te laten plaatsvinden. Hiervoor wordt verwezen naar de chemische analyse van het zandvliegiasmengsel die werd uitgevoerd door S. Ferrier en H. Debruyne. Deze chemische analyse werd reeds besproken in 3.1.

De eerste chemische analyse geeft hiervoor echter een grote onwaarschijnlijkheid weer. Het CaO -gehalte aanwezig in het mengsel is namelijk 0,5%. En het gehalte aan vrije CaO is zelfs 0%. Het vrije CaO -gehalte wijst op de hoeveelheid aan calciumoxide dat bereid is om te binden.

De mogelijkheid dat de puzzolane reactie een hoeveelheid kalk gebruikt uit het zandvliegias mengsel kan echter nog niet volledig worden uitgesloten. De chemische analyse in 3.1 toont enkel de bestanddelen van het mengsel in hun oxidevorm. Kalk kan echter andere vormen aannemen, zoals calciumcarbonaat, die niet worden afgebeeld op deze chemische analyse. Hiervoor wordt verwezen naar de kalkcyclus die hieronder uiteengezet wordt. [17]

- 1) $\text{CaCO}_3 \rightarrow [\text{bij } 900 \text{ }^\circ\text{C}] \text{CaO} + \text{CO}_2\uparrow (\text{gas})$
- 2) $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$
- 3) $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$
- 4) $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$

De verschillende stappen worden verklaard:

- 1) CaCO_3 wordt ontgonnen en verhit tot $900 \text{ }^\circ\text{C}$. CaCO_3 wordt omgezet in ongebluste kalk (CaO) mits vrijkomen van CO_2 .
- 2) Door het toevoegen van water wordt de ongebluste kalk 'geblust' en wordt het dus 'gebluste kalk' of calciumhydroxide.
- 3) + 4) Stap drie en vier kunnen samen worden besproken. Wanneer calciumhydroxide bindt met koolstofdioxide en water, wordt opnieuw calciumcarbonaat (CaCO_3 , kalksteen) gevormd. De kalkcyclus is dus een cyclus omdat er begonnen wordt met calciumcarbonaat en geëindigd wordt met calciumcarbonaat. [17]

De reden dat de chemische analyse een zeer geringe hoeveelheid aan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vertoont kan worden verklaard door het feit dat de regen zorgt voor het blussen van de aanwezige CaO in het zandvliegasmengsel. De berg zandvliegasmengsel ligt er namelijk al een zeer lange tijd, het lijkt dus logisch dat de CaO dat aanwezig geweest zou kunnen zijn al lang geblust is en dus omgezet is in $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Een bedenking bij deze hypothese is dat er een puzzolane reactie zou moeten optreden in de berg. Wanneer kalk aanwezig zou zijn onder de vorm van $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in het mengsel in de berg heeft het mengsel alle nodige attributen om een puzzolane reactie te laten optreden. Namelijk; puzzolanen (SiO_2 en Al_2O_3), calciumhydroxide en water (regen). Puzzolane reacties treden echter niet op in de berg. Dit wijst erop dat de aanwezigheid van $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in grote hoeveelheden zeer onwaarschijnlijk is.

Een derde mogelijkheid is dat de kalk aanwezig in het mengsel gereageerd heeft met CO_2 en water en is omgezet is in CaCO_3 (kalksteen). In dit geval wijst de kalkcyclus erop dat de kalk in deze vorm zeer moeilijk kan worden gebruikt voor puzzolane reacties, aangezien deze moet verhit worden naar $900 \text{ }^\circ\text{C}$ om te worden omgezet naar CaO en vervolgens bruikbare $\text{Ca}(\text{OH})_2$. [17]

Wanneer bovenstaande hypothesen worden gevolgd zou vrij direct kunnen worden uitgesloten dat de calciumhydroxide, gebruikt voor de puzzolane reactie, afkomstig is van het zandvliegasmengsel zelf. Het zijn echter slechts hypothesen en kunnen dus geen volledige uitsluiting berechten.

Het enige wat de hypothesen en de eventuele uitsluiting kan bewijzen, is een tweede chemische analyse. Deze analyse zal duidelijkheid moeten geven over de kalk die aanwezig is in het mengsel, maar deze keer in alle mogelijke vormen. Het zal dus moeten aantonen als er al dan niet CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ of CaCO_3 aanwezig is in het mengsel. Enkel via deze weg kan op gegronde manier wel of geen uitsluiting worden gegeven.

4.3.2.1 Tweede chemische analyse

De tweede chemische analyse werd dit onderzoekjaar niet uitgevoerd.

4.3.3 Welke hoeveelheid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zorgt voor een optimale sterkteontwikkeling?

De hoeveelheid waarmee een puzzolaan zal binden is afhankelijk van zijn puzzolane reactiviteit. De reactiviteit van het puzzolaan zal dus de doorslag geven over welke hoeveelheid calciumhydroxide zal binden met een bepaalde hoeveelheid van het desbetreffende puzzolaan. Niet alleen de hoeveelheid van de binding, maar ook de snelheid waarmee de puzzolane reactie optreedt, is afhankelijk van de puzzolane reactiviteit. Door de complexiteit van de reacties en metingen van gebonden $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is het zeer moeilijk een numerieke waarde toe te kennen aan de puzzolane reactiviteit. Deze blijft dan ook een kwalitatieve grootheid. Wel zijn enkele eigenschappen gekend waarvan de puzzolane reactiviteit afhankelijk zijn. Deze worden hieronder opgelijst. [15]

4.3.3.1 Soort puzzolaan

Allereerst is de puzzolane reactiviteit afhankelijk van de soort en afkomst van de puzzolaan. Zo hebben verschillende soorten puzzolanen een andere reactiviteit. De natuurlijke puzzolanen hebben bijvoorbeeld een lagere puzzolane reactiviteit dan artificiële puzzolanen. Vliegias is een artificieel puzzolaan.

In een ander voorbeeld wordt gezegd dat zeolitische puzzolanen een hogere reactiviteit hebben dan glasachtige puzzolanen. Dit heeft echter meer uitleg nodig. Een zeoliet is een microporeuze aluminosilicaat-mineraal. Het is dus opgebouwd uit silicium-, aluminium- en zuurstofatomen. Een glasachtig puzzolaan kan echter worden getransformeerd in een zeolitische puzzolaan door diagenese. Diagenese is een verzamelnaam voor alle natuurlijke processen die een sediment ondergaat na afzetting. [18]

Een voorbeeld van diagenese is cementatie. Cementatie komt voor bij een sediment dat door water wordt geïnfiltreerd. De opgeloste stoffen in het water slaan neer in het sediment en kristalliseren in de holten. Hierdoor stijgt de dichtheid en daalt de porositeit. [15] [19]

Een ander voorbeeld van diagenese is compactie. Door bovenliggende lagen stijgt de lithostatische druk in de grond waardoor de onderliggende lagen worden gecompacteerd. [26]

4.3.3.2 Hoeveelheid puzzolaan

Hoe groter de hoeveelheid aan puzzolaan, hoe groter de hoeveelheid calciumhydroxide waarmee de puzzolaan kan binden. [15]

4.3.3.3 Hoeveelheid SiO_2 en Al_2O_3

Zoals reeds vermeld is het de siliciumdioxide en aluminiumoxide in de vliegias die samen met de calciumhydroxide en water verantwoordelijk is voor de puzzolane werking binnen het mengsel. De reactiviteit van het puzzolaan is dus in grote mate afhankelijk van zijn gehalte aan siliciumdioxide en aluminiumoxide. Dit gehalte is op zijn beurt afhankelijk van de soort en oorsprong van de puzzolaan.

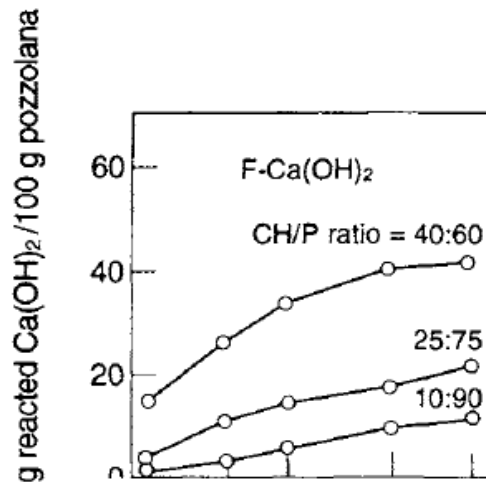
In de chemische analyse (3.1) is te zien dat het betreffende vliegias een siliciumdioxide-gehalte van 43,37% en een aluminiumoxide-gehalte van 20,57% heeft. Deze gehalten zijn relatief hoog wat een positieve invloed heeft op de reactiviteit van ons vliegias. [15]

4.3.3.4 Kalk/ puzzolaan ratio

De puzzolane reactie heeft $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nodig om op te treden. De reactiviteit is dus in grote mate afhankelijk van de hoeveelheid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ beschikbaar in het mengsel, meer bepaald de verhouding tussen de calciumhydroxide en de puzzolaan. Wanneer deze ratio stijgt, stijgt de

puzzolane reactiviteit en dus de puzzolane reactie. Dit heeft echter zijn limitaties. Hierover meer in 4.3.4.

De verhoogde reactiviteit wordt aangetoond op Figuur 4.6. Drie curves zijn te zien waarbij telkens de hoeveelheid gereageerde Ca(OH)_2 wordt uitgezet in functie van het aantal dagen uitharden. Elke curve representeert resultaten van een mengsel met een verschillend kalk/puzzolaan ratio.

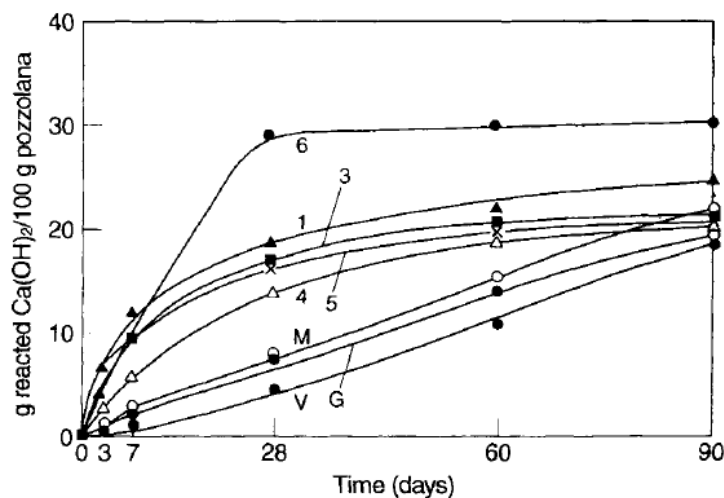


Figuur 4.6 Gereageerde Ca(OH)_2 in functie van het aantal dagen [15]

Het is duidelijk te zien dat de mengsels met een grotere kalk/puzzolaan ratio hogere waarden vertonen wat betreft de gereageerde Ca(OH)_2 . Dit bewijst dat een hoger gehalte aan calciumhydroxide een positieve invloed heeft op de puzzolane reacties. [15]

4.3.3.5 Lengte van curing

De hoeveelheid aan gebonden Ca(OH)_2 is zeer afhankelijk van de curingtijd van het uithardende mengsel. De puzzolane reacties zijn over het algemeen trage reacties die hun maximale potentieel halen na een relatief lange tijd na het maken van het mengsel. Figuur 4.7 wijst hierop.



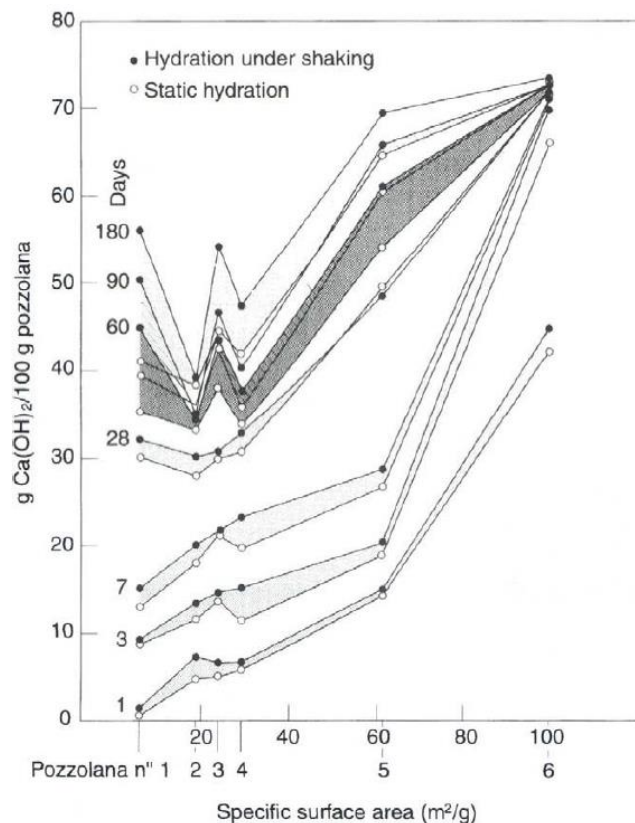
Figuur 4.7 Hoeveelheid gereageerde Ca(OH)_2 in functie van de curingtijd [15]

De grafiek geeft de hoeveelheden gereageerde Ca(OH)_2 weer in functie van de curingtijd. Krommen 1 tot 6 zijn zes verschillende natuurlijke puzzolanen. De lijn M, G en V zijn drie soorten vlieggas. Op de grafiek is te zien dat de puzzolane reactiviteit van de natuurlijke puzzolanen na 90 dagen zo goed als tenietgedaan is. De vliegassen daarentegen reageren nog volop met Ca(OH)_2 . Dit wil zeggen dat de vliegassen na 90 dagen hun volledige puzzolane potentieel nog niet hebben behaald. In dit onderzoek zou dit betekenen dat de proeven best worden uitgevoerd op proefstukken die een langere curingtijd hebben ondergaan dan 90 dagen. Jammer genoeg zal de tijdsdruk dit niet toelaten. [15]

4.3.3.6 Specifieke oppervlakte

De literatuur [15] suggereert dat de puzzolane reactiviteit afhankelijk is van de specifieke oppervlakte van de puzzolane korrels. Zoals gezien in 4.5.1.3 betekent dit dat hoe kleiner de korrelfractie van de puzzolaan, hoe hoger de reactiviteit ervan is. [15]

Figuur 4.8 toont aan dat de specifieke oppervlakte van de korrel vooral een invloed gevende factor is op korte termijn. De grafiek geeft de resultaten weer voor de gereageerde Ca(OH)_2 met de puzzolaan op verschillende curingtijden en dit in functie van de specifieke oppervlakte van de puzzolaan. Wat vooral opvalt is het feit dat wanneer het puzzolaan een zeer hoge specifieke oppervlakte heeft, het puzzolaan al na drie dagen curing gereageerd is met zijn maximale hoeveelheid Ca(OH)_2 . De specifieke oppervlakte heeft dus vooral invloed op de reactiesnelheid van de puzzolane reactie. Al is er ook een stijging in maximale hoeveelheid reagerende Ca(OH)_2 met toenemende specifieke oppervlakte te zien. De specifieke oppervlakte heeft dus een invloed op zowel de reactiesnelheid als de maximale hoeveelheid reagerende calciumhydroxide. [15]



Figuur 4.8 Hoeveelheid gereageerde Ca(OH)_2 in functie van de specifieke oppervlakte van de puzzolaan [15]

4.3.3.7 Watergehalte

Zoals geweten uit de thesis van 2019 is het watergehalte in het mengsel een zeer belangrijk gegeven voor de sterkteontwikkeling van het mengsel. Het watergehalte is echter ook een zeer belangrijk gegeven voor de puzzolane reactiviteit. De reactievergelijkingen van de puzzolane reacties leren ons dat de puzzolane werking naast siliciumdioxide en calciumhydroxide ook water nodig heeft om op te treden. In de literatuur is te zien dat een verhoging van het watergehalte een verhoging van de snelheid van de puzzolane reactievergelijking inhoudt. [15]

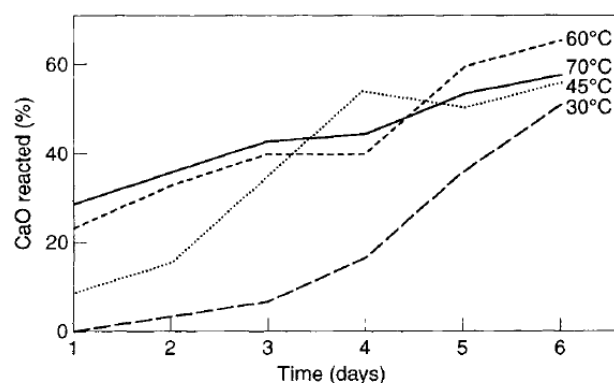
In tegenstelling tot bovenstaande stelling zal een verhoging van het watergehalte inhouden dat het volledige mengsel minder sterk wordt door een hogere W/C-factor. Het watergehalte zal in dit onderzoek dus behouden worden op het optimale watergehalte dat werd bepaald in 2019, namelijk 14%. Deze thesis gaf wel aan dat het op voorhand mengen van een deel van het water met de puzzolaan positieve resultaten oplevert. Dit kan worden verklaard door het feit dat de puzzolane reacties op deze manier beter en sneller kunnen optreden door de bereikbaarheid van water. Zonder het op voorhand mengen zou een bepaalde hoeveelheid siliciumdioxide bepaalde delen van het puzzolaan niet genoeg kunnen oplossen tot siliciumhydroxide, dit door een gebrek aan water. Dit wordt op deze manier verholpen door het op voorhand mengen van het water met het mengsel. [15]

4.3.3.8 Temperatuur

De literatuur [15] leert ons dat een verhoogde temperatuur zorgt voor een sterke verhoging in reactiesnelheid van de puzzolane reacties. Ook de maximaal reagerende hoeveelheid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ wordt in lichte mate beïnvloed door de temperatuur. Deze versnelde reactiviteit kan worden verklaard door de grotere reactiviteit van de microsilica-deeltjes. Deze bevindingen worden afgebeeld op Figuur 4.9. De resultaten voor hoeveelheid reagerende CaO wordt voor verschillende mengsels met vlieggas afgebeeld in functie van curingtijd. De verschillende mengsels ondergaan een curing bij verschillende temperaturen.

De grafiek geeft weer dat de temperatuur vooral een grote invloed heeft op de reactiviteit op korte termijn. Na één dag curing is al een aanzienlijke hoeveelheid CaO gereageerd bij de mengsels bij 60 °C en 70°C, daar de mengsels bij 30°C en 45°C nog zeer weinig reactie aantonen na één dag.

De grafiek geeft echter wel aan dat voorbij een bepaalde temperatuur de maximale hoeveelheid aan reagerende CaO daalt. Het opdrijven van de temperatuur bij curing kent dus zijn grenzen. [15]



Figuur 4.9 Hoeveelheid gereageerde CaO in functie van de tijd [15]

4.3.3.9 pH-waarde

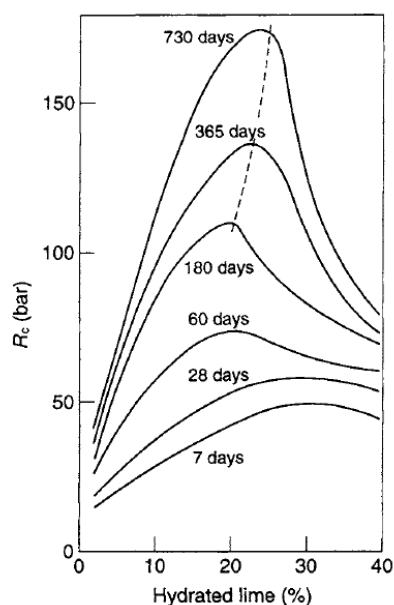
De grote invloed van de pH-waarde van de oplossing wordt uitgebreid besproken in 4.4.

4.3.4 Toevoeging van calciumhydroxide

Elk van de punten uit 4.3.3 zijn factoren die meespelen in de hoeveelheid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ waar de vliegase maximaal mee kan reageren. De literatuur [15] geeft aan dat sommige puzzolane een reactiviteit hebben die het toelaat te reageren met 45% tot 75% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ van de massa van het puzzolaan zelf. Dit wil zeggen dat elke 100 gram puzzolaan in het mengsel kan reageren met 45 tot 75 gram $\text{Ca}(\text{OH})_2$ om reactieproducten te vormen die zorgen voor sterkteontwikkeling. [15]

Het zandcementmengsel binnen dit onderzoek zal volgens deze informatie nooit zijn maximale puzzolane potentieel kunnen waarmaken. Dit aangezien het betreffende vliegase volgens de eerste chemische analyse een weinig kalkhoudend puzzolaan is. Dit moet door een tweede chemische analyse bevestigd of ontkracht worden. Let wel dat zolang er geen tweede chemische analyse is gebeurd, hierover geen sluitende conclusie getrokken kan worden. Indien de tweede chemische analyse bevestigd dat de vliegase een weinig kalkhoudend puzzolaan is, kan worden besloten dat de calciumhydroxide dat ter beschikking wordt gesteld tot de puzzolaan vooral afkomstig is van de hydratatiereacties van het cement. In het zandcementmengsel is het cementgehalte echter vrij beperkt in vergelijking met bijvoorbeeld het cementgehalte van beton. Ook is het de bedoeling dit cementgehalte te reduceren om een zo financieel voordelig mogelijk mengsel te ontwerpen. Indien de benodigde calciumhydroxide vrijkomt uit het cement bij hydratatie zal er dus relatief weinig calciumhydroxide ter beschikking worden gesteld aan de puzzolaan. Dit omdat het cementgehalte relatief laag is. Hierdoor zal de reactiviteit van de puzzolaan niet maximaal worden benut.

Het toevoegen van een extra hoeveelheid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kan hier dus de oplossing zijn. In 4.3.3 werd al aangehaald dat een verhoging in de kalk/puzzolaan-ratio volgt in een verhoging van de reactiviteit van de puzzolaan. Een verhoging in de reactiviteit van de puzzolaan wijst op zijn beurt op een hogere sterkteontwikkeling van het uitgeharde mengsel. Ook te zien op Figuur 4.10. [15]



Figuur 4.10 Druksterktes van mengsels met verschillende kalkgehaltenes [15]

Figuur 4.10 uit de literatuur [15] geeft de resultaten voor druksterkte bij mengsels met verschillende gehalten aan calciumhydroxide weer. Er is te zien dat de toevoeging van de calciumhydroxide zorgt voor een verhoging van de druksterkte. Hierbij zijn twee opmerkingen. De eerste opmerking is het feit dat het fenomeen zijn limieten kent. Voorbij een bepaald gehalte aan calciumhydroxide is er terug een reductie in de druksterkte van het mengsel te zien. Dit kan enerzijds worden verklaard door het verdunningseffect, besproken bij het filler effect, want $\text{Ca}(\text{OH})_2$ heeft namelijk ook een kleine fractie. Anderzijds kan de reductie in druksterkte worden verklaard door een verandering in samenstelling van de reactieproducten van de puzzolane reactie. De Ca/Si-verhouding van de reactieproducten zal namelijk stijgen, wat kan leiden tot een reductie in druksterkte. Een tweede opmerking is het feit dat de grafiek opnieuw aangeeft dat de effecten van de puzzolane reacties zich pas echt tonen in een later stadium van de curing. Na 60 dagen is een piek te zien bij een bepaald gehalte aan calciumhydroxide. Daar voor is echter ook een lichte stijging te zien in de druksterkte, maar geen aanzienlijk stijgingen zoals te zien bij de grafieken na 60 dagen en later. [15]

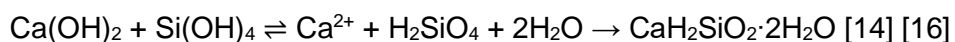
Een proef lijkt zich hier gepast om de puzzolaan binnen dit onderzoek te testen bij een verhoging van het gehalte aan calciumhydroxide. Er wordt vertrokken vanuit de mengsels uit de thesis van 2019 die niet voldeden aan de opgelegde eisen en er wordt er een hoeveelheid calciumhydroxide toegevoegd. Zo kan de maximale hoeveelheid toegevoegde calciumhydroxide worden bepaald aan de hand van een financiële analyse. Deze testen met een toevoeging van calciumhydroxide worden uitgebreider besproken in 6.4.

4.4 pH-waarde

4.4.1 Invloed

In 4.3.3 werden de eigenschappen die de reactiviteit van een puzzolaan beïnvloeden besproken. Er is echter nog één eigenschap die een grote invloed kan hebben op de reactiviteit van een puzzolaan, namelijk de pH-waarde van het nog niet verharde mengsel waarin het zich bevindt. Hiernaar wordt verder gerefereerd als ‘de oplossing’.

Om te beginnen wordt het chemisch mechanisme van de puzzolane werking uit 4.2.2 erbij gehaald. Er is te zien dat deze uit twee delen bestaat. Allereerst moet de siliciumdioxide-structuur oplossen in het waterig milieu. Nadien kan de opgeloste $\text{Si}(\text{OH})_4$ reageren met $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en water om de uiteindelijke reactieproducten te vormen.

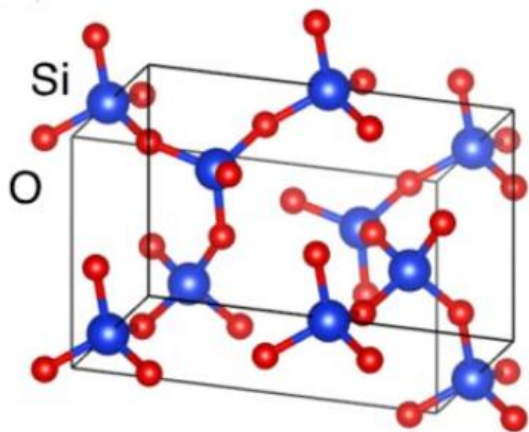


De pH-waarde zal vooral de effectiviteit van de eerste stap van de puzzolane werking beïnvloeden, namelijk het oplossen (=de hydrolyse) van de SiO_2 -structuur in de waterige oplossing.

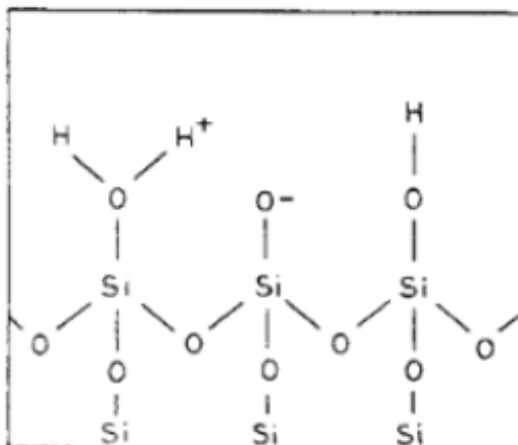
4.4.2 Mechanisme

In 4.4.1 wordt besproken dat de eerste stap van de puzzolane werking, namelijk de hydrolyse van SiO_2 , wordt beïnvloed door de pH-waarde van de oplossing. De vraag is dan ook hoe de pH-waarde de puzzolane werking beïnvloedt.

Allereerst wordt de structuur en het oppervlak van de SiO_2 -korrel in vliegias bestudeerd.



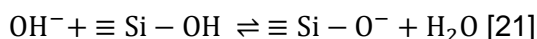
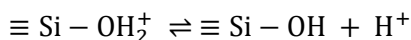
Figuur 4.11 3D-structuur SiO₂ [20]



Figuur 4.12 Structuur aan oppervlak SiO₂ [21]

Figuur 4.11 toont de structuur van een SiO₂-korrel. Elk siliciumatoom is gebonden aan vier zuurstofatomen waarvan er twee gemeenschappelijk worden gesteld met andere siliciumatomen. Op deze manier is de tetraëdrische moleculaire structuur opgebouwd. [20]

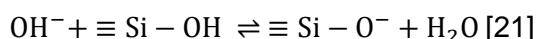
Op Figuur 4.12 is het oppervlak van de SiO₂-korrel te zien. Het oppervlak kan zijn opgebouwd uit drie verschillende soorten structuren van ≡Si-O bindingen. Namelijk een neutrale structuur, een positief geladen structuur en een negatief geladen structuur; respectievelijk ≡Si-OH, ≡Si-OH₂⁺ en ≡Si-O⁻. Deze drie structuren zijn gerelateerd volgens volgende zuurbase-reacties:



Een pH-waarde is een uitdrukking van de molaire concentratie van de H⁺-ionen en OH⁻-ionen in een waterige oplossing. Een zuur milieu wordt gekenmerkt door een hoge concentratie aan H⁺-ionen, terwijl een basisch milieu wordt gekenmerkt door een hoge concentratie aan OH⁻-ionen. Wanneer een oplossing een pH-waarde heeft onder 7 is er sprake van een zure oplossing. Dit wil zeggen dat de oplossing een grotere concentratie aan H⁺-ionen bevat dan aan OH⁻-ionen. Omgekeerd: wanneer een oplossing een pH-waarde heeft van boven 7, is er sprake van een basische oplossing. Dit wil zeggen dat de oplossing een hogere concentratie aan OH⁻-ionen bevat dan aan H⁺-ionen. [22]

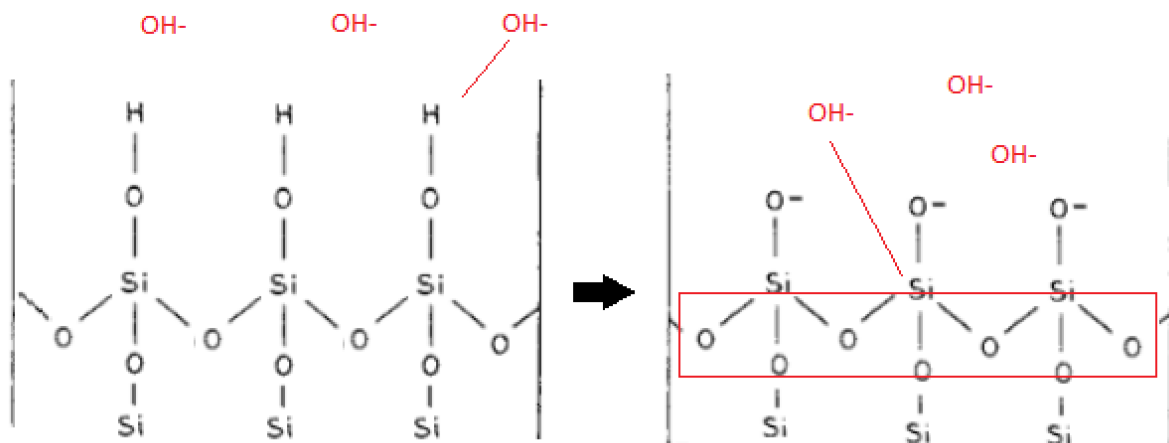
Een oplossing in een mengsel op cementbasis heeft normaliter een basisch milieu, dit wil dus zeggen dat de oplossing een hoge concentratie aan OH⁻-ionen bevat. [21]

Er wordt verondersteld dat het oppervlak van de SiO₂-korrel van de vliegias in eerste instantie is opgebouwd uit neutrale ≡Si-OH-structuren. Deze korrel bevindt zich in een basische oplossing van het mengsel. Hij is dus omringd door een hoge concentratie aan OH⁻-ionen. Dit wil zeggen dat volgende reactie zich zal voordoen aan het oppervlak van de korrel.



Een waterstofatoom van de $\equiv \text{Si} - \text{OH}$ -structuren zal worden aangetrokken door de OH^- -ionen in de oplossing om H_2O te vormen. Hierbij krijgt de structuur een lading en wordt een $\equiv \text{Si} - \text{O}^-$ -structuur gevormd. Wanneer dit gebeurt bij $\equiv \text{Si} - \text{OH}$ -structuren over het gehele oppervlak, wordt het oppervlak negatief geladen.

Het effectieve mechanisme van het oplossen van de SiO_2 -structuur is te zien in Figuur 4.13. In eerste instantie is het oppervlak opgebouwd uit neutrale $\equiv \text{Si} - \text{OH}$ -structuren, zoals verondersteld. De OH^- -ionen nemen een waterstofatoom weg van de oppervlaktestructuren en het oppervlak wordt negatief geladen. Door deze negatieve lading op het achtergebleven zuurstofatoom aan het oppervlak, worden de $\text{Si} - \text{O}$ -bindingen in de onderliggende structuur die de siliciumatomen vasthouden aan het oppervlak gepolariseerd en verzwakt. Dit wordt aangeduid met de rechthoek in Figuur 4.13. De OH^- -ionen maken hiervan gebruik en vallen de siliciumatomen aan. Zo laten de siliciumatomen de onderliggende structuur los en binden ze met de omliggende OH^- -ionen aanwezig in de oplossing. Door het binden van de siliciumatomen met de OH^- -ionen vormen zich $\text{Si}(\text{OH})_4$ -moleculen in de oplossing. Deze $\text{Si}(\text{OH})_4$ -moleculen worden dan gebruikt om te binden met $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en laten zo de puzzolane reacties doorgaan. [21] [23]



Figuur 4.13 Mechanisme hydrolyse SiO_2 [21]

Het is dus zo dat een grote concentratie aan OH^- -ionen aanwezig moet zijn in de oplossing om de SiO_2 -structuur af te breken en op te lossen. Hoe hoger de concentratie aan OH^- -ionen aanwezig in de oplossing, hoe hoger de pH-waarde van de oplossing is en hoe agressiever deze reacties zullen doorgaan over het gehele oppervlak. Dit betekent dat een hogere pH-waarde van de oplossing ervoor zorgt dat er meer SiO_2 -oppervlak geladen wordt en de vliegias in het mengsel reactiever is. Hoe reactiever de vliegias in het mengsel, hoe makkelijker de SiO_2 zal oplossen. [21]

Er is aan de reactievergelijking van de hydrolyse van SiO_2 in 4.4.1 te zien dat er sprake is van een evenwichtsvergelijking. Wanneer er zich een sterke lading bevindt aan het oppervlak zal het evenwicht naar rechts verschuiven, wat dus betekent dat de concentratie aan $\text{Si}(\text{OH})_4$ in de oplossing toeneemt. [21] [24]

4.4.3 Probleem en mogelijke oplossing

Zoals hierboven vermeld is het voor een goede activering van de puzzolane reacties nodig dat de SiO_2 -structuren van de vliegias substantieel kunnen worden afgebroken of opgelost tot $\text{Si}(\text{OH})_4$. Voor een goede oplossing van de SiO_2 -structuur is een grote concentratie aan OH^- -ionen nodig. De OH^- -ionen werken dus in se als katalysator voor de puzzolane werking.

Dit wil dus zeggen dat de oplossing van het mengsel een hoge pH-waarde dient te hebben om een goede puzzolane werking te verkrijgen. Volgens de literatuur heeft de SiO₂-structuur van de vliegias een pH-waarde van 13 nodig om substantiële oplossing te laten doorgaan. [23]

Vele mengsels zullen deze pH-waarde niet halen, waardoor de puzzolane reacties dus niet optimaal benut kunnen worden. Ook bij de mengsels die zullen worden besproken in dit werk is de kans groot dat de oplossing deze pH-waarde niet zal aannemen, zeker wanneer een grote hoeveelheid van het zandvliegiasmengsel wordt toegevoegd in het mengsel. Het zandvliegiasmengsel is namelijk slechts licht basisch. Er is dus een grote kans dat de vliegias in het mengsel en zijn puzzolane werking niet optimaal benut wordt, doordat het niet substantieel wordt afgebroken of opgelost. [23]

De kans dat de oplossing van het mengsel deze pH-waarde wel behaald blijft echter wel. Indien deze hoge pH-waarde wel bereikt wordt, is er geen probleem. Alle mogelijke puzzolane werking, gelimiteerd door de hoeveelheid reagentia aanwezig, zou in dat geval plaatsvinden.

Enkel praktische testen op pH kunnen duidelijkheid scheppen over de behaalde pH-waarde in de mengsels in dit onderzoek. Binnen deze context een veronderstelling maken op basis van literatuur of bedenkingen zou wetenschappelijk ongegrond zijn. Deze testen op bepaling van pH-waardes (Covid19) zijn dit onderzoekjaar niet meer kunnen doorgaan.

Stel dat het mengsel de nodige pH-waarde van 13 niet behaald, is er echter wel een oplossing mogelijk. Er dient te worden gestreefd naar een hogere concentratie aan OH⁻-ionen binnen de oplossing. De mogelijke oplossing bestaat erin het toevoegen van een zeer sterk basisch product zoals natriumhydroxide. Natriumhydroxide of NaOH is een zeer sterke base, dit betekent dat het zeer goed oplost in een waterig milieu en dus makkelijk OH⁻-ionen vrijgeeft in de oplossing. De toegevoegde NaOH werkt hier dus als katalysator voor de hydrolyse van de SiO₂-structuren in de vliegias. Literatuur [23] die de toevoeging van NaOH aan een mengsel beschrijft, geeft belovende resultaten hierover. In die literatuur wordt geconcludeerd dat de toevoeging van natriumhydroxide effectief significante verbeteringen in druksterkte met zich meebrengt. Een calciumhydroxide-oplossing heeft een pH-waarde van 12,4 en is dus ook een sterke base. Het is echter niet mogelijk om door toevoeging van deze calciumhydroxide een pH-waarde van 13 te bereiken. Natriumhydroxide-oplossing heeft een pH-waarde van 13 tot 14, dit is dus wel geschikt om de oplossing van voldoende OH⁻-ionen te voorzien. Tabel 4.6 toont de pH-waarden voor de oplossingen van de twee stoffen. [15] [25]

Tabel 4.6 pH-waardes verschillende oplossingen [15]

Substance	Strength of solution			pH values
	Molarity	(g/L)		
Sodium hydroxide	NaOH	1.0 M	40	14.0
		0.1 M	4	12.9
Calcium hydroxide	Ca(OH) ₂	Saturated	1.2	12.4
Magnesium hydroxide	Mg(OH) ₂	Saturated	0.01	10.5
Calcium carbonate	CaCO ₃	Saturated	0.02	9.4
Ammonia	NH ₃	0.1 M	1.7	11.3
Acetic acid	CH ₃ COOH	1.0 M	60	2.4

Voor de mengsels in dit onderzoek is het dus een mogelijkheid om een hoeveelheid natriumhydroxide toe te voegen aan het mengsel en zo de puzzolane reacties van de vliegias optimaal te benutten. De optimale hoeveelheid ervan wordt best experimenteel bepaald, alsook de financiële werkbaarheid ervan. In de literatuur [23] worden de beste waarden voor

druksterkte behaald voor een toevoegingsgehalte van 2,5% in gewicht van het toegevoegde water. Er dient echter wel voor gezorgd te worden dat er niet te veel NaOH wordt toegevoegd. Er is namelijk een optimale hoeveelheid, waarna de druksterkte terug daalt. Nogmaals: experimentele data rond de effectiviteit van de toevoeging van natriumhydroxide aan het mengsel is nodig in dit onderzoek. Deze effectiviteit en de optimale hoeveelheid van de natriumhydroxide kon tijdens dit onderzoeksjaar door omstandigheden niet experimenteel worden getest.

4.4.3.1 De tweede verbetering NaOH

Het toevoegen van natriumhydroxide aan het zandcementmengsel is de tweede mogelijke verbetering van het mengsel die in dit onderzoek wordt voorgesteld. Bij de eerste voorgestelde verbetering, namelijk de toevoeging van $\text{Ca}(\text{OH})_2$, wordt het toevoegingsgehalte op basis van een financiële analyse gekwantificeerd in 6.4.5. De tweede voorgestelde verbetering van het mengsel, de toevoeging van natriumhydroxide die in 4.4.3 besproken wordt, wordt in dit onderzoek niet gekwantificeerd. Dit wil zeggen dat dit onderzoek op vlak van het tweede verbeteringsvoorstel zich beperkt tot bovenstaande theoretische uiteenzetting.

4.4.4 Nalevering van de puzzolane reactie

Zoals al eerder vermeld zullen de puzzolane reacties pas na enige tijd optreden. Een mogelijke verklaring hiervoor is de pH-waarde van de oplossing van het mengsel. In het beginstadium van de hydratatie heeft de oplossing een relatief lage concentratie aan OH^- -ionen en dus een relatief lage pH-waarde (<13), daardoor functioneert de vliegaskenkel als een inerte filler in het beginstadium. Na verloop van tijd komen meer en meer OH^- -ionen vrij in de oplossing, deze kunnen ter beschikking worden gesteld aan de oplossing van de SiO_2 -structuur van de vliegas. [23]

Deze OH^- -ionen zijn dan afkomstig uit de verschillende reactieproducten van de hydratatiereacties van cement, zoals $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Dit wil dus zeggen dat pas na een verloop van tijd OH^- -ionen beschikbaar zijn in de oplossing voor het oplossen van de SiO_2 -structuur en bijgevolg het activeren van de puzzolane reacties. Daarom wordt er mogelijks gesproken van nalevering door de puzzolane reacties. [23]

4.5 Filler effect

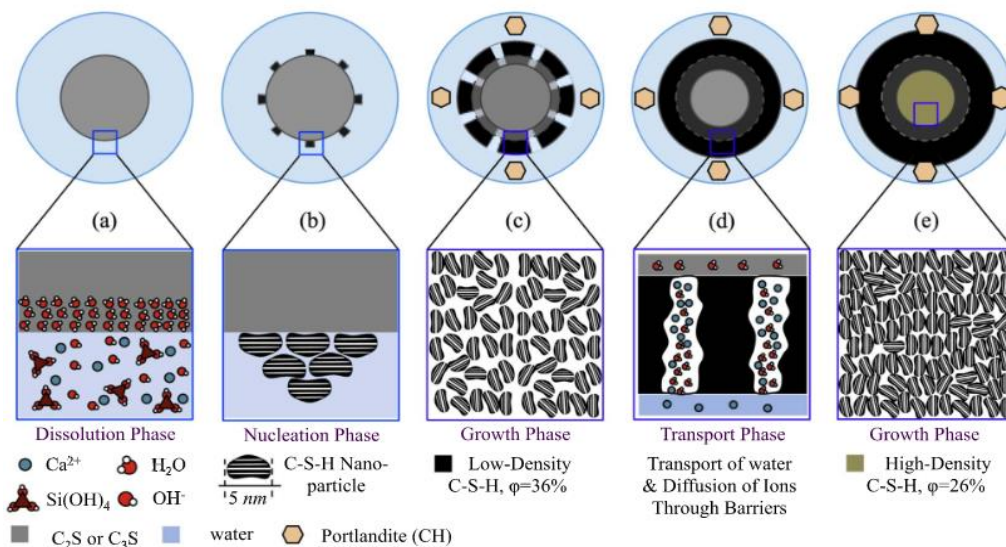
In de thesis van 2019 was te zien dat wanneer een hoeveelheid vliegaskenkel wordt toegevoegd, de druksterkte van de mengsels verbetert. Deze verbetering kan het gevolg zijn van een aantal oorzaken. Allereerst kan de verbetering te wijten zijn aan de puzzolane werking van de vliegaskenkel. Zoals er reeds aangehaald werd, reageert de vliegaskenkel chemisch met calciumhydroxide. Deze calciumhydroxide is een reactieproduct van de hydratatiereactie van cement. Deze chemische reactie is de oorzaak van de productie van bijkomende CSH-verbindingen. Daarnaast kan een oorzaak van de hogere druksterkte de fijne fractie van het zandvliegaskemengsel zijn. Deze eigenschap kan zorgen voor enkele bijkomende effecten in het mengsel.

Het gevolg van de kleine fractie in het mengsel lijkt op zich een makkelijk concept: door het toevoegen van de kleinere fractie in het mengsel, worden de holtes beter opgevuld (=iets wat zand niet kan omdat het een te grote korreldiameter heeft), waardoor uiteindelijk minder lucht in het gehard mengsel zit en het dus een grotere druksterkte heeft. Zo éénduidig is het echter niet.

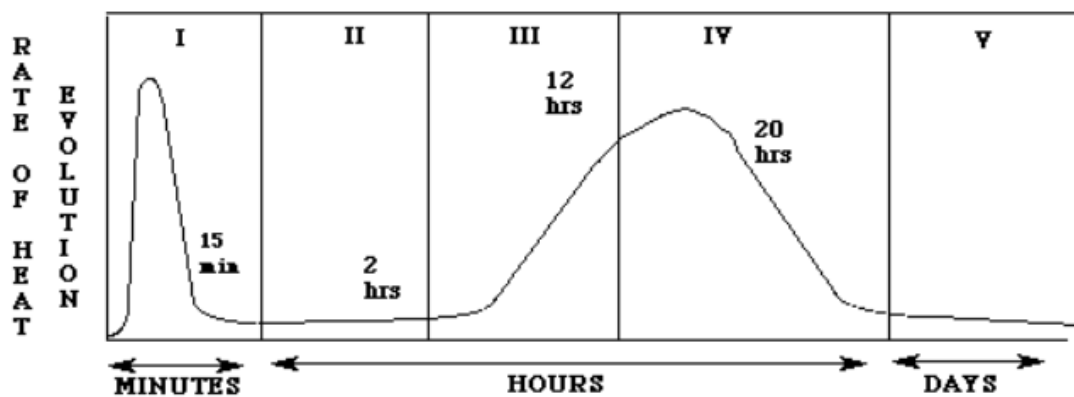
4.5.1 Werking

De toegevoegde kleine fractie zorgt voor een grote vermeerdering in plaatsen waar CSH-bindingen kunnen starten, nucleatieplaatsen genaamd. Om dit proces te snappen wordt er eerst bestudeerd hoe de hydratatie van cement er op moleculair niveau uitziet.

4.5.1.1 Cementhydratatie



Figuur 4.14 Hydratatie van cement [26]



Figuur 4.15 Warmte-evolutie bij hydratatie van cement [27]

Op Figuur 4.14 zijn de verschillende stadia van de cementhydratatie op moleculaire schaal te zien. Cementhydratatie is een exotherme reactie. Op Figuur 4.15 is de evolutie van de verandering in vrijkomende warmte bij het hydratatieproces te zien. Beide figuren kunnen aan elkaar worden gekoppeld.

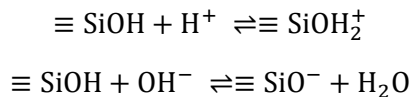
Een cementkorrel wordt geïllustreerd door de grijze cirkel in het centrum op Figuur 4.14, dit is C₃S of C₂S. In het eerste stadium geven C₃S en C₂S ionen, zoals Ca²⁺, SiO²⁻ en OH⁻, af in de oplossing. Dit proces geeft warmte vrij en vormt de eerste piek in de warmte-evolutie, dit is te zien op Figuur 4.15. Deze ionen vormen de eerste CSH-bindingen rond het oppervlak van het cementpartikel. De CSH-bindingen vormen een laag waardoor het vrijgeven van ionen door

C₃S en C₂S bemoeilijkt wordt, dit is het tweede stadium op Figuur 4.14. Hierdoor is er na de eerste piek een vrij stabiele periode te zien in de warmte-evolutie, zoals afgebeeld in Figuur 4.15. Daarna begint het derde stadium, namelijk de groeifase van CSH en CH. De eerste laag CSH blijft binden met de ionen om steeds meer CSH en CH te genereren, dit gaat door tot er geen vrije ionen of watermoleculen meer beschikbaar zijn om bindingen mee aan te gaan. Dit is het derde stadium op Figuur 4.14. In het laatste stadium blijft een zekere hydratatie bestaan. Het transport van ionen en watermoleculen maakt het mogelijk maanden tot zelf jaren hydratatie te laten bestaan, dit proces wordt afgebeeld in stadium 4 op Figuur 4.14.

Dit geeft een beeld van het mechanisme waarmee cement op moleculair niveau zijn hardheid verkrijgt. Zoals hierboven vermeld, werken de vliegaspertikels bevorderend op de hydratatie van het cement. Dit komt door hun fijne fractie. [26] [27]

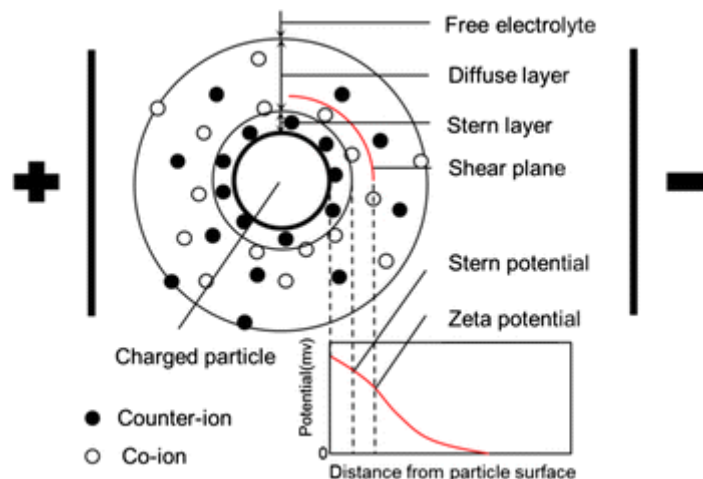
4.5.1.2 Oppervlaktelading fijnen

Wanneer silica-houdende fijnere fracties worden toegevoegd aan het mengsel veroorzaakt ook hun oppervlak hydratatie.



In bovenstaande reactievergelijkingen is te zien hoe de oppervlakken van de fijne fracties geladen worden wanneer water wordt toegevoegd. De silicagroep verliest of wint een proton wanneer deze bindt met een hydroxide- of waterstofion. Op deze wijze wordt het volledige oppervlak van het partikel geladen. Het geladen oppervlak heeft nu een zekere absorptiekracht voor ionen. Deze absorptiekracht zal de vrijgekomen ionen van het cementpartikel absorberen en met deze ionen CSH-bindingen aangaan. Dit verschijnsel heet heterogene nucleatie. [28]

De mate van aantrekkingskracht van het silica-houdend partikel is afhankelijk van zijn oorsprong en behandeling. Een manier om de absorptiekracht uit te drukken is aan de hand van de zeta-potentiaal (ζ). Een illustratie is te zien op Figuur 4.16. [28] [29]



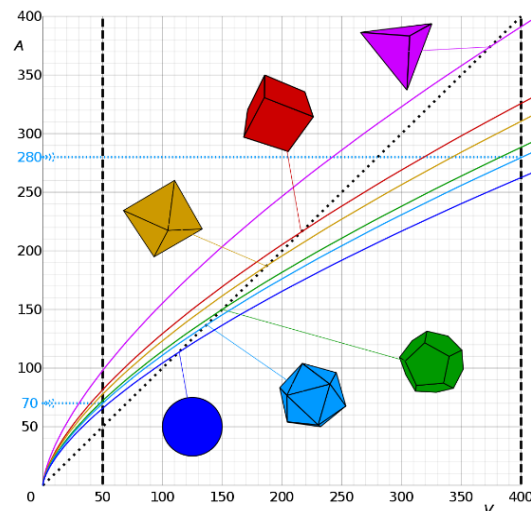
Figuur 4.16 Zeta-potentiaal geladen kern [28]

Rond het geladen partikel vormt zich een laag van ionen met een verschillende lading dan het partikel zelf. Een tweede, minder dicht gepakte (diffuse), laag wordt gevormd rond deze eerste laag met ionen van dezelfde en verschillende ladingen dan de lading van het oppervlak van het partikel. Ergens binnen deze laag ligt de zogenaamde shear plane. Alle ionen in dit veld

vormen samen met de oppervlaktelading een perfecte balans. De zeta-potentiaal kan worden gezien als de energie die nodig is om de ionen binnen de shear plane samen met het partikel weg te trekken van zijn diffuse laag ionen. De zeta-potentiaal kan dus worden gezien als een maat voor aantrekkings- of absorptievermogen voor ionen. [28] [29]

4.5.1.3 Kleinere fractie, grotere oppervlakte

De mate van heterogene nucleatie is dus afhankelijk van het absorptievermogen van de oppervlaktes van de fijne fractie in het mengsel, maar ook van de grootte van de gezamenlijke oppervlakte van de fractie. Hierin ligt de sterkte van de kleine fractie. Op Figuur 4.17 wordt de oppervlakte/volume ratio (A/V) afgebeeld. Er wordt verondersteld dat de partikels binnen deze probleemstelling bolvormig zijn. De rechte die de A/V -ratio van de bol voorstelt ligt boven de recht evenredige rechte vanuit de oorsprong tot een bepaald volume. Ook is te zien dat de A/V -ratio groter wordt naarmate het partikel verkleint. Er kan dus worden besloten dat hoe kleiner het partikel, hoe groter de A/V -ratio is. Dus wanneer een volume wordt gevuld met partikels, zal een zo groot mogelijk oppervlak worden verkregen met zo klein mogelijke partikels. Wanneer je binnen deze probleemstelling het mengsel vult met partikels, zal een groot oppervlak beschikbaar zijn voor nucleatie bij een zeer kleine fractie. [28] [30]

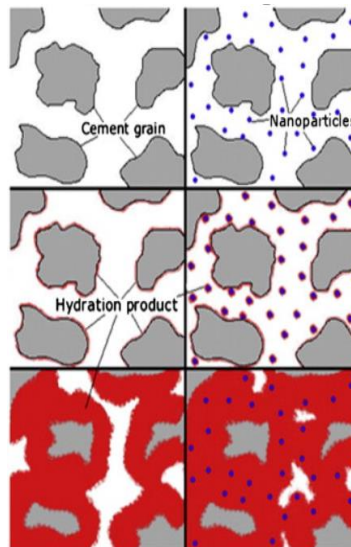


Figuur 4.17 A/V - ratio [30]

4.5.2 Gevolg van filler effect

Er is al aangetoond hoe de kleine fractie ervoor zorgt dat er meer plaats is om nucleatie aan te gaan. Wat betekent dit voor de eigenschappen van het uiteindelijk uitgehard mengsel?

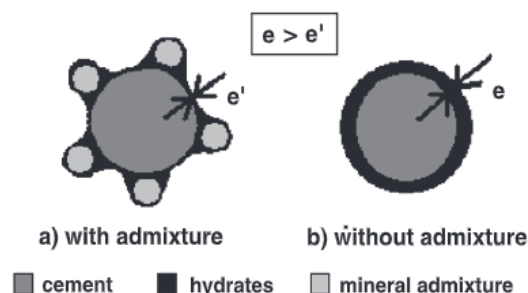
Doordat de nucleatie op meerdere plaatsen wordt gestart, worden de lege ruimten of holtes beter opgevuld. Dit zorgt ervoor dat er minder lucht in het uitgehard mengsel blijft en dit betekent op zijn beurt dat het uitgehard mengsel een hogere druksterkte zal hebben. Figuur 4.18 is een schets van het effect van de fijne fractie. Zoals aangeduid op de figuur blijven er bij het uitgehard mengsel minder holtes over. [31]



Figuur 4.18 Sterkteontwikkeling door fijnen [31]

4.5.3 Tweede effect van de filler

Op Figuur 4.19 is een ander effect van de toevoeging van de fijne fractie te zien. Zoals eerder vermeld in 4.5.1.1, wordt in de eerste fase van het hydratatieproces een eerste CSH-laag gevormd over het oppervlak van de cementkorrel. Deze laag bemoeilijkt het vrijgeven van ionen. Wanneer de fijne fractie wordt toegevoegd, zal een groot deel van de eerst vrijgegeven ionen aangetrokken en worden geabsorbeerd door het oppervlak van de fijne fractie. Hierdoor zullen de eerste CSH-bindingen grotendeels rond de fijne fractie worden gevormd en zal de eerste laag rond het cementpartikel dunner zijn. Doordat deze laag dunner is, kunnen ionen makkelijker worden afgegeven aan de oplossing. Dit betekent dat ionen beter gebruikt kunnen worden om verdere producten te vormen. [32] [33]



Figuur 4.19 Dunnere CSH-laag [33]

4.5.4 Verdunning

Het filler effect kent echter een limitatie. Het is geen verschijnsel dat eindeloos kan worden gebruikt om de mechanische sterkte te blijven verhogen. Een te hoog gehalte aan fijnen kan ervoor zorgen dat de mechanische eigenschappen van het mengsel worden gereduceerd. De fijnen bevorderen de hydratatie van het cement door nucleatieplaatsen te voorzien, maar ze laten zelf geen stoffen vrij om de hydratatieproducten te produceren. Vanaf een bepaald gehalte aan fijnen is er te veel nucleatieplaats. Er kunnen niet genoeg stoffen worden voorzien

om de volledige oppervlakte te voorzien van hydratatieproducten. Daarenboven drijven de fijnen de cementpartikels verder uit elkaar, wat ervoor zorgt dat hydratatieproducten minder compact zijn. Deze reductie in compactheid heeft zijn gevolgen voor de mechanische eigenschappen van het mengsel. In de thesis van 2019 werd een meest optimaal zandvervangingsgehalte door het zandvliegasmengsel van 30% gevonden. Hogere vervangingspercentages betekenden een reductie in sterkte. Dit is hiervoor mogelijk een verklaring. [34]

4.5.5 Filler effect in dit onderzoek

Het is dus duidelijk dat een significant aandeel van het mengsel uit fijnen dient te bestaan om enig filler effect te verkrijgen. Op Figuur 3.1 is echter te zien dat slechts een klein aandeel van het zandvliegasmengsel bestaat uit fijnen (10% tot 14%). Er kan dus worden gesteld dat het filler effect geen significante invloed zal hebben op de mechanische eigenschappen van de mengsels. Er worden dan ook geen voorstellen gemaakt voor optimalisatie van de zandcementmengsels op basis van het filler effect.

5 LABOTESTEN - THEORETISCH

Hieronder worden de uitgevoerde testen beschreven. Overige details zijn in de bijhorende norm terug te vinden.

5.1 Test op cementmortelproefstukken

Deze test wordt uitgebreid beschreven, ze werd namelijk nog niet uitgevoerd in voorgaande thesissen.

In het verdere verloop van dit onderzoek worden verschillende mengsels gemaakt en daarbij wordt deze test toegepast.

Deze test wordt volledig uitgevoerd aan de hand van BS EN 196-1:2016 (Methods of testing cement, part 1: determination of strength). De norm beschrijft een methode om de druksterkte en eventueel ook de buigsterkte van een cementmortel te bepalen.

5.1.1 Principe

Bij deze test worden cementmortelproefstukken gemaakt. Deze proefstukken zijn prisma's (balken) met volgende afmetingen: 40 mm x 40 mm x 160 mm. Deze worden gedrukt tot breuk om de druksterkte en/of buigsterkte te bepalen. In dit onderzoek is enkel de druksterkte van belang.

De verhouding van de hoofdbestanddelen van de balkjes is steeds hetzelfde. Elke batch vloeibare mortel bestaat uit één deel cement, drie delen standaardzand (CEN) en een half deel water. Dit zorgt voor een W/C van 0,5. Deze delen zijn te interpreteren volgens massa.

Elke mal bestaat uit drie 'deelmallen'. Per mal kunnen er dus drie proefstukken worden gemaakt.

De batch mortel dient steeds mechanisch te worden gemengd en verdicht met behulp van een jolting apparaat.

Na het gieten en verdichten van de mortel in de met olie ingesmeerde mallen, moeten de proefstukken (inclusief mallen) 24 uur in een vochtige omgeving worden geplaatst. Hierna worden de proefstukken ontkist en opgeslagen onder water tot het moment van testen.

Als de ouderdom van de proefstukken (7, 28 of 90 dagen) behaald is, kunnen de proefstukken uit het water worden gehaald en kunnen ze worden gedrukt. Gedrukt wil zeggen: samengedrukt tot breuk om de druksterkte te bepalen of gebogen tot breuk om de buigsterkte te bepalen. [35]

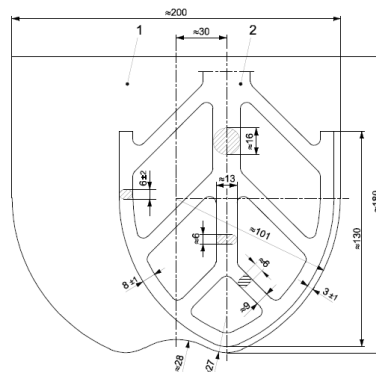
5.1.2 Labo -en materiaalvereisten

Er zijn verschillende eisen in verband met labo-omstandigheden (temperatuur en luchtvochtigheid). Ook voor het labomateriaal (zeven, mixer, jolting apparaat, mallen, afstrijkplaatjes...) liggen eisen vast. Deze eisen zijn allemaal gedetailleerd terug te vinden in de norm.

Wanneer één van de eisen niet voldaan is, kan de proef in principe niet worden uitgevoerd. [35]

5.1.3 Mixer

De mixer die gebruikt wordt om de mengsels correct te mengen ziet er als volgt uit. Ook de snelheden van mixen worden meegegeven. De inhoud van de mixer is 5 liter. [35]



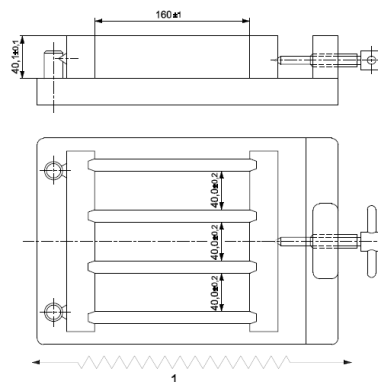
Figuur 5.1 Mixer om cementmortelbalkjes te maken [35]

Tabel 5.1 Snelheden van de mixer [35]

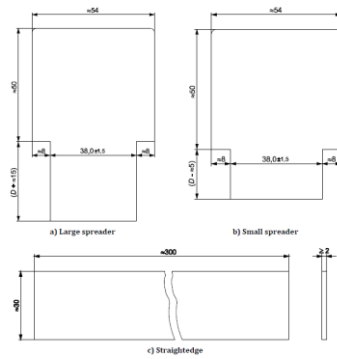
	Rotaties (min^{-1})	Planetaire beweging (min^{-1})
Low speed	140 ± 5	62 ± 5
High speed	285 ± 10	125 ± 10

5.1.4 Mallen

Elke mal biedt de mogelijkheid om drie balkjes/proefstukken te maken. Deze drie proefstukken dienen gelijktijdig te worden gegoten, afgestreken en verdicht. Deze mallen dienen steeds te worden ingevet met olie. De mallen en afstrijkplaatjes die gebruikt worden zien er als volgt uit. [35]



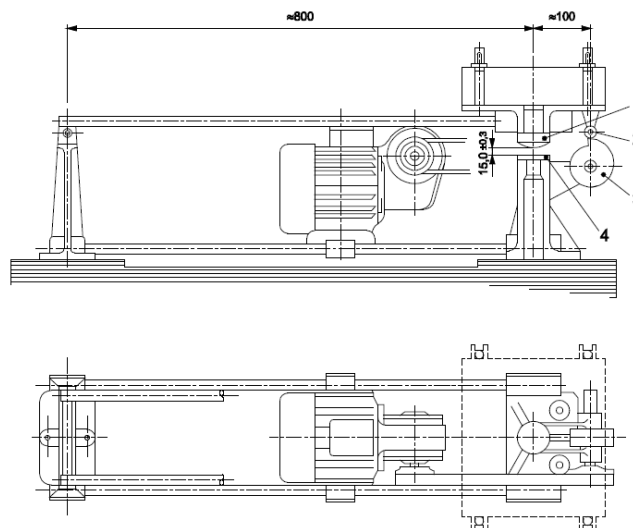
Figuur 5.2 Mal waarin cementmortelbalkjes worden gevormd [35]



Figuur 5.3 Afstrijkplaatjes voor het maken van cementmortelbalkjes [35]

5.1.5 Jolting apparaat

Het jolting apparaat verdicht de proefstukken op een systematische en genormeerde manier. Dat gebeurt aan de hand van schokken. 60 schokken worden in een tijdsduur van 60 seconden toegediend. Het apparaat ziet er als volgt uit. [35]

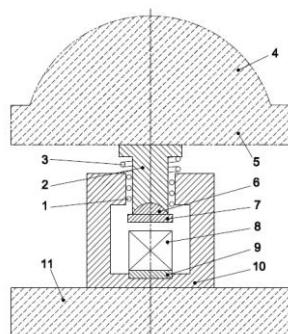


Figuur 5.4 Jolting apparaat voor het verdichten van cementmortelbalkjes [35]

5.1.6 Apparaat voor het bepalen van de druksterkte

Het apparaat om de druksterkte te bepalen werkt als volgt. Er wordt een toenemende drukkracht aangebracht op het proefstuk. De snelheid van toename is 2,4 kN per seconde. Hierbij worden alle nodige parameters gemonitord. Met de waarde van de optredende kracht op het moment vlak voor breuk kan de druksterkte worden bepaald. Het oppervlak waarop wordt gedrukt is 40 mm op 40 mm.

In praktijk is dit proces volledig geautomatiseerd en worden de resultaten in de vorm van een tekstbestand op USB verkregen. [35]



Figuur 5.5 Apparaat voor het bepalen van de druksterkte [35]

5.1.7 Bestanddelen en samenstelling van de cementmortel

Zoals reeds gezegd bestaat elke batch vloeibaar mortel uit één deel cement, drie delen standaardzand (CEN) en een half deel water. Dit zorgt voor een W/C van 0,5. Deze delen zijn te interpreteren volgens massa. [35]

In acht te nemen opmerkingen worden hieronder opgelijst.

- Standaardzand
Onder standaardzand (CEN) wordt zand waarvan de korrelverdeling binnen volgende intervallen ligt verstaan.

Tabel 5.2 Korrelverdeling standaardzand [35]

Zeefgrootte (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

- Cement
De tijd tussen het openen van de verpakking van het cement en het gebruiken van het cement dient minimaal te zijn.
- Water
Er kan zowel gedestilleerd water als kraanwater worden gebruikt. [35]

5.1.8 Bereiding van de cementmortel

De verhouding van de bestanddelen werd reeds meegegeven.

Concreet: voor één batch (drie proefstukken) is de samenstelling de volgende.

- (450 ± 2) g cement
- (1350 ± 5) g zand
- (225 ± 1) g water [35]

Het mixen van het mengsel dient volgens een concreet stappenplan te worden uitgevoerd.

1. Plaats het cement in de schaal en voeg het water toe, de toevoeging gebeurt binnen de tien seconden.
2. Van zodra het cement en het water in contact komen met elkaar wordt de mixer gestart op low speed.
3. Na dertig seconden mixen op low speed wordt het zand gestaag toegevoegd. Dit toevoegen gebeurt binnen de dertig seconden.
4. Hierna wordt de mixer op high speed gezet en wordt er nog dertig seconden gemixt.
5. Stop de mixer en wacht anderhalve minuut. Tijdens de eerste dertig seconden hiervan wordt de mortel van de wanden geschraapt en in het midden van de schaal geplaatst.
6. Daarna wordt er nog 30 seconden op high speed gemixt.
7. De cementmortel is klaar. [35]

5.1.9 Bereiding van de proefstukken

De bereiding van de proefstukken dient ook volgens een exact stappenplan te worden uitgevoerd. Dit stappenplan is een direct vervolg op het bereiden van de cementmortel.

1. Smeer de mallen in met olie.
2. Vul de mallen tot halve hoogte met cementmortel (eerste laag).
3. Spreid deze laag uit met behulp van het grote afstrijkplaatje.
4. Verdicht deze laag met 60 slagen op het jolting apparaat.
5. Vul de mallen tot iets boven volledige hoogte met cementmortel (tweede laag).
6. Spreid deze laag uit met behulp van het kleine afstrijkplaatje.
7. Verdicht deze laag met 60 slagen op het jolting apparaat.
8. Strijk het teveel aan cementmortel af met het bijhorende afstrijkplaatje. Doe dit zigzagsgewijs met het plaatje onder een helling.
9. Label de mal en plaats het in de vochtige ruimte waar het 24 uur kan staan. [35]

5.1.10 Behandeling van de proefstukken na bereiding

Na 24 uur in een vochtige ruimte gestaan te hebben, worden de proefstukken ontkist. Dit wel op voorwaarde dat de proefstukken al sterk genoeg zijn, indien dit niet het geval is wordt er nogmaals 24 uur gewacht. De proefstukken worden gelabeld en in water geplaatst. Ze blijven in dit water gestockeerd tot op het moment van testen. [35]

5.1.11 Momenten van testen

De proefstukken kunnen op volgende momenten worden getest. De toleranties zijn vrij klein.

- 24 u \pm 15 min
- 48 u \pm 30 min
- 72 u \pm 45 min
- 7 d \pm 2 u
- 28 d \pm 8 u [35]

5.1.12 Eigenlijke test: druksterkte

Per proefstuk kan de druksterkte driemaal worden bepaald. Dit omdat elk balkje in 3 delen kan worden geschild. Het procedé van het apparaat werd reeds uitgelegd (automatische werking).

Het berekenen van de druksterkte (R_c) in N/mm² gebeurt als volgt.

$$R_c = \frac{F_c}{1600 \text{ mm}^2} \quad (5-1)$$

Hierbij is F_c de drukkracht net voor breuk in N en is 1600 mm² het gedrukte oppervlak.

Nogmaals: het apparaat die hiervoor gebruikt wordt, hanteert een automatisch proces waarbij de resultaten in de vorm van een tekstbestand op USB worden verkregen. [35]

5.2 Strength Activity Index (SAI)

Op basis van de bekomen waarden uit de proef besproken in 5.1 kan de Strength Activity index worden bepaald. Dit is een maat voor de sterkteontwikkeling in functie van de samenstelling van het mengsel. Meer specifiek: de Strength Activity Index is de verhouding van de sterkte (in dit geval druksterkte) van het testmengsel op de sterkte van het referentiemengsel op een bepaald tijdstip (na x-aantal dagen). De SAI wordt uitgedrukt in %. [36]

Wanneer de SAI's van verschillende mengsels naast elkaar worden gelegd, kunnen ze worden vergeleken. Daaruit volgen dan de conclusies.

5.3 Proctortest

Naast cementmortelproefstukken wordt er, net zoals in 2019, ook gewerkt met proctorproefstukken.

Bij de proctorproef worden, in dit geval, zandcementproefstukken (cilinders) gemaakt en verdicht met behulp van een proctortoestel. Afhankelijk van de gebruikte materialen en de voorziene toepassing worden verschillende variaties van de proctortest toegepast. Deze variaties omvatten het gebruik van verschillende mallen, valhamers, aantal lagen, aantal verdichtingen, valhoogte ...

Deze staan allemaal beschreven in NBN EN 13286-2. Tabel 5.3 en Tabel 5.4 helpen de onderzoeker om de juiste keuzes te maken. [6] [37]

Tabel 5.3 Voorwaarden keuze proctormallen [37]

Percentage passing test sieves			Mass of sample kg	Proctor mould
16 mm	31,5 mm	63 mm		
100	-	-	15	A
100	-	-	40	B
75 to 100	100	-	40	B
< 75	75 to 100	100	40	B
-	< 75	75 to 100	200	C

Tabel 5.4 Gegevens Procedure #1 [37]

Standaard		EN 13286-2
Mould(s) diameter (mm)		100 (mould A)
		150 (mould B)
Rammer weight (kg)		2,5 (rammer A)
		4,5 (rammer B)
Procedure #1	Procedure name to Standard	Proctor test (rammer A, mould A)
		Proctor test (rammer A, mould B)
	Mould diameter (mm)	100 (mould A)
		150 (mould B)
	Rammer weight (kg) and type	2,5 kg (rammer A)
	Drop height (mm)	305
	Number of layers	3
	Blows per layer	25 (mould A)
		56 (mould B)
	Pattern	Mould A: 25 blows per layer (3 series of 8 blows on the surface and 1 central blow at the end)
Mould B: 56 blows per layer (8 series of 7 blows on the surface and 1 central blow at the end of each series)		

Daar er in het mengsel nooit korrels aanwezig zullen zijn met een diameter van meer dan 16 millimeter, wordt steeds geopteerd voor mal A. Ook ligt meteen de procedure vast: in dit geval procedure 1. De grootste korrels worden in principe steeds geleverd door de zandfractie. Echter wordt er altijd afgezeefd op 8 millimeter om onzuiverheden en onnatuurlijk materiaal te verwijderen.

5.3.1 Drukproef

De proctorcilinders worden op een bepaalde ouderdom gedrukt in de drukproef. Ze worden getest op druksterkte gezien er op dat vlak gebruikseisen vooropgesteld worden in zowel het SB250 als in de Waalse wetgeving. Laatstgenoemde normeringen behandelen het gebruik van zandcement in bouwkundige toepassingen. De drukproef zelf wordt beschreven in NBN EN 13286-41. [6]

Een proctorproefstuk heeft een diameter van ± 100 mm en een hoogte van ± 120 mm. [38]

Volgens het SB250 moet er op 7 dagen een minimum druksterkte van 2 MPa zijn en op 28 een minimum druksterkte van 3 MPa. [6] [38]

Tijdens het testen wordt de druk geleidelijk opgevoerd tot bezwijken. Het toestel geeft na bezwijken de waarde van de maximaal aangebrachte kracht op de proctorcilinder aan en berekent ook meteen de druksterkte in MPa. Dit volgens volgende formule.

$$p = \frac{F}{A_c} \quad (5-2)$$

Hierin is p de druksterkte in N/mm^2 , F de maximaal aangebrachte kracht in N en A_c de oppervlakte van de doorsnede van de geteste cilinder in mm^2 .

Ook deze resultaten worden in de vorm van een tekstbestand via USB verkregen. [6] [39]

6 LABOTESTEN - PRAKTISCH

6.1 Watergehalte

In het belang van een juiste bepaling van de samenstellingen van de mengsels dient te worden rekening gehouden met het watergehalte in het zandvliegasmengsel (en van het natuurlijk zand 0/2). Deze worden eenvoudig bepaald door een massa materiaal voor en na drogen op te meten.

6.1.1 Zandvliegasmengsel

Uit de thesis van 2018 bleek dat het belangrijk is om de massa's die worden gedroogd te beschermen met een nylonkous. Op die manier wordt de mogelijkheid dat de ventilatoren in de oven de fijnen van het zandvliegasmengsel wegblazen uitgesloten.



Figuur 6.1 Nylonkous om de massa zandvliegasmengsel te beschermen

Het staal van het zandvliegasmengsel dat gebruikt wordt, heeft een watergehalte van 14,10%. Deze is als uniform te beschouwen voor het volledige staal.

Tabel 6.1 Bepaling watergehalte zandvliegasmengsel

Watergehalte zandvliegasmengsel (=ZVM)						
	Massa bakje (g)	Massa bakje + ZVM voor drogen (g)	Massa ZVM voor drogen (g)	Massa bakje + ZVM na drogen (g)	Massa ZVM na drogen (g)	Watergehalte (%)
1	9,7	667,8	658,1	574,1	564,4	14,24
2	9,7	337,0	327,3	291,7	282,0	13,84
3	9,7	445,1	435,4	383,2	373,5	14,22

Deze waarde wordt gebruikt bij het berekenen van de samenstelling van de testmengsels. Het zandvliegasmengsel wordt gezeefd op 2 mm. Dit zeven is van belang om de grotere fracties er uit te halen, deze kunnen namelijk invloed hebben op de uiteindelijke resultaten van de balkjes.

6.1.2 Natuurlijk zand 0/2

Het staal van het natuurlijk zand 0/2 die gebruikt wordt, heeft een watergehalte van 1,51%.

Tabel 6.2 Bepaling watergehalte natuurlijk zand 0/2

Watergehalte natuurlijk zand 0/2						
	Massa bakje (g)	Massa bakje + natuurlijk zand voor drogen (g)	Massa natuurlijk zand voor drogen (g)	Massa bakje + natuurlijk zand na drogen (g)	Massa ZVM na drogen (g)	Watergehalte (%)
1	14,7	1779,8	1765,1	1751,4	1736,7	1,61
2	15,0	1272,8	1257,6	1252,7	1237,7	1,58
3	15,0	1890,4	1875,4	1865,2	1850,7	1,34

Deze waarde is niet als uniform te beschouwen voor het volledige staal dus wordt er niet verder gewerkt met deze waarde. Het zand wordt voor de zekerheid telkens volledig gedroogd en net zoals het zandvliegasmengsel gezeefd op 2 mm. Ook dit zeven is van belang om de grotere fracties er uit te halen.

6.2 Karakterisatie materialen

In de testen beschreven in 6.3 wordt er kalksteenpoeder (Calcitec 2001 M) en natuurlijk zand 0/2 gebruikt. De korrelverdeling hiervan is van belang zodat er met zekerheid gewerkt wordt met materialen die geschikt zijn binnen de context.

De korrelverdeling van het kalksteenpoeder kon via de fabrikant worden verkregen en de korrelverdeling van het natuurlijk zand 0/2 werd bepaald bij eerder onderzoek van KU Leuven Brugge.

6.2.1 Kalksteenpoeder (Calcitec 2001 M)

De korrelverdeling van het kalksteenpoeder kon worden verkregen bij de fabrikant (Carmeuse).

Tabel 6.3 Korrelverdeling Calcitec 2001 M [40]

Luchtstraalzeven	Eis	90% gebied	Gemiddelde	
Doorval op 2,00 mm zeef	100	100	100	%
Doorval op 0,500 mm zeef	-	100	100	%
Doorval op 0,125 mm zeef	85-100	90-100	98,5	%
Doorval op 0,063 mm zeef	70-100	85-95	89,7	%

Het aantal fijnen bedraagt 10,3% en het aantal niet-fijnen bedraagt 89,7%.

6.2.2 Natuurlijk zand 0/2

De korrelverdeling van het natuurlijk zand kon worden verkregen uit eerder onderzoek van KU Leuven Brugge.

Tabel 6.4 Korrelverdeling natuurlijk zand 0/2

Sieve size (mm)	Cum. pass-through sand 0/2
31,5	100,00
20	100,00
16	100,00
14	100,00
12,5	100,00
10	100,00
8	100,00
6,3	100,00
4	99,27
2	95,87
1	89,41
0,5	74,17
0,25	16,02
0,125	0,13
0,063	0,03
0	0,00
FM	2,25

Het aantal fijnen bedraagt 0,03% en het aantal niet-fijnen bedraagt 99,97%.

6.3 Cementmortelbalkjes - Strength Activity Index

Er worden dus drie zaken (puzzolane werking, filler effect en CEM I vs. CEM III) praktisch bestudeerd aan de hand van de druksterkte van cementmortelproefstukken. De waarden van de druksterktes worden vergeleken met behulp van de referentiemengsels en de Strength Activity Index. Hierna worden de nodige conclusies getrokken.

De twaalf mengsels (PW1, PW2, PW3, PW4, FE1, FE2, FE3, FE4, VC1, VC2, REF1 en REF2) worden zoals reeds vermeld telkens op die manier aangepast dat een bepaalde eigenschap uitgelicht wordt. PW staat voor puzzolane werking, FE voor filler effect, VC voor verschil tussen CEM I/CEM III en REF staat voor referentie. De samenstellingen van alle mengsels worden opgeijst in Tabel 6.5 t.e.m. Tabel 6.17.

Per cementmortelproefstuk kunnen er drie druksterktes worden opgemeten.

Per mengsel en per tijdstip van drukken worden in theorie drie balkjes gemaakt. In praktijk worden vier balkjes gemaakt per tijdstip. Op 7 dagen zijn er geen resultaten, op 27 en 29 dagen zijn er per mengsel 4 resultaten, op 58 en 60 dagen zijn er per mengsel 8 resultaten. Op het later tijdstip zijn er dubbel zoveel resultaten omdat de balkjes daar worden doorgezaagd (4 x 2 proefstukken) voor ze worden gedrukt.

Als vervangingspercentage van het zand door het zandcementmengsel wordt telkens 30% genomen, in de thesis van 2019 leek dit het meest optimale. Als gevolg hiervan zijn vele mengsels qua samenstelling dezelfde. Het is dan ook zo dat enkel mengsels REF1, REF2, FE1, FE2, VC1 en VC2 effectief gemaakt dienen te worden.

De CEM-types die gebruikt worden zijn dezelfde als in 2019.

- CEM I-type: 52,5 R HES – Holcim
- CEM III-type: A 32,5 N-LH LA – Holcim

Dit deel van de labotesten is door uitzonderlijke omstandigheden (Covid19) slechts heel beperkt uitgevoerd kunnen worden. Enkel mengsels REF1, REF2, VC1 en VC2 zijn gemaakt kunnen worden. REF1 en REF2 konden enkel op 27 en 58 dagen worden gedrukt, VC1 en VC2 op 29 en 60 dagen. Zonet genoemde mengsels hebben dezelfde samenstelling als volgende mengsels in respectievelijke volgorde: FE3, FE4, PW1 en PW2.

Op te merken is het feit dat mortel waarin zandvliegasmengsel verwerkt is vrij droog is qua structuur en deze dus iets moeilijker verwerkbaar is, zoals op Figuur 6.2 te zien. De oorzaak hiervan is het feit dat het water reeds (minstens twee uur) op voorhand moet vermengd zijn met het zandvliegasmengsel om hogere druksterktes te bekomen. Dit bleek uit testen van de thesis van 2019. Deze droge indruk blijkt na ontkisting echter praktisch gezien geen probleem te zijn, de balkjes waren werkbaar. De resultaten zullen uitwijzen of deze droge structuur een invloed zal hebben op de druksterkte.

Wanneer er mortel gemaakt wordt waar geen zandvliegasmengsel in verwerkt is, is de werkbaarheid een stuk beter. De reden zit hem in het feit dat het water deze keer niet op voorhand vermengd dient te worden.



Figuur 6.2 Droge indruk van gemaakte mortel

6.3.1 Referentiemengsels

6.3.1.1 Praktische denkwijze

Deze mengsels zijn gebaseerd op de normale samenstelling van mortel. Er wordt eens gewerkt met CEM I en eens met CEM III. De mengsels dienen om de referentiewaardes van de druksterkte te bekomen, deze proefstukken (druksterkte) worden op 7, 28 en 90 dagen gedrukt.

6.3.1.2 Samenstelling mengsels

- CEM I, mengselnummer: REF1 (3 keer 3 balkjes)

Tabel 6.5 Samenstelling mengsel REF1

Materiaal	Type materiaal	Massa (g)	Massa (%)
-Cement	CEM I 52.5 R HES	450	22,22
-Droog standaardzand	Natuurlijk zand 0/2	1350	66,67
-Water	/	225	11,11
Totaal	/	2025	100,00

- CEM III, mengselnummer: REF2 (3 keer 3 balkjes)

Tabel 6.6 Samenstelling mengsel REF2

Materiaal	Type materiaal	Massa (g)	Massa (%)
-Cement	CEM III/A 32,5 N-LH LA	450	22,22
-Droog standaardzand	Natuurlijk zand 0/2	1350	66,67
-Water	/	225	11,11
Totaal	/	2025	100,00

6.3.1.3 Labotesten: resultaten

Tabel 6.7 Resultaten mengsels REF1 en REF2

Ouderdom drukken (dagen)	Mengsel	Druksterkte (N/mm ²)	Gem. druksterkte (N/mm ²)
27	REF1	45,26	44,09
		44,84	
		43,66	
		42,60	
58	REF1	43,08	45,20
		46,88	
		46,18	
		42,22	
		46,08	
		44,73	
		45,82	
46,64			
27	REF2	31,44	29,52
		30,42	
		24,84	
		31,37	
58	REF2	32,56	32,08
		34,18	
		34,53	
		39,92	
		33,12	
		26,77	
		23,32	
32,20			

6.3.1.4 Conclusie

Op 27 dagen is duidelijk te zien dat de druksterkte bij REF1 (CEM I) hoger ligt dan bij REF2 (CEM III), dit bevestigt onze verwachtingen. Op 58 dagen zien we dat voor zowel REF1 als REF2 de druksterktes nog in lichte mate stijgen, respectievelijk 2,46% en 7,98%, ook dit bevestigt onze verwachtingen.

6.3.1.5 Verklaring

De druksterkte van mengsel REF1, waarbij CEM I gebruikt wordt, ligt hoger dan mengsel REF2, waarbij CEM III gebruikt wordt. Dit kan worden gelinkt aan de samenstellingen van CEM I en CEM III die in 4.1.3.1 en 4.1.3.2 worden aangehaald. Op basis van die samenstellingen kan worden gesteld dat CEM I een grotere hoeveelheid C₃S en C₂S bevat dan CEM III. Het zijn vooral C₃S en C₂S die hydrateren en dus bindend effect opleveren. Een grotere hoeveelheid C₃S en C₂S resulteert dus in een hogere druksterkte.

In de thesis van de 2019 werd echter besloten dat er geen significant verschil is tussen de resultaten van CEM I en CEM III. Dit kan te wijten zijn aan het feit dat in de

zandcementmengsels die gebruikt werden voor de proctorproeven een relatief laag percentage aan cement werd gebruikt. Door deze lage hoeveelheden cement heeft het verschil in druksterkte tussen de twee cementsoorten zich niet significant laten blijken.

De kleine nalevering tussen 27 en 58 dagen kan worden gelinkt aan het feit dat hydratatiereacties nog in beperkte mate een lange tijd doorgaan. De nalevering bij REF2 is iets groter dan de nalevering bij REF1. Dit kan worden verklaard door het feit dat CEM III hoogovenslak bevat, wat voor puzzolane werking zorgt. Typisch aan puzzolane werking is zoals eerder vermeld die nalevering in druksterkte.

6.3.2 Puzzolane werking

6.3.2.1 Praktische denkwijze

Er wordt een mengsel gemaakt met zandvliegasmengsel en natuurlijk zand enerzijds (mengsel PW1 en PW2) en een mengsel met kalksteenpoeder en natuurlijk zand anderzijds (mengsel PW3 en PW4). Het zandvliegasmengsel en het kalksteenpoeder zijn deels ter vervanging van het natuurlijk zand. De 14% fijnen van het zandvliegasmengsel ligt in de grootteorde van het kalkpoeder. Wanneer in mengsel PW1 en PW2 30% van het natuurlijk zand vervangen wordt door het zandvliegasmengsel en in mengsel PW3 en PW4 14% van 30% van het natuurlijk zand vervangen wordt door kalksteenpoeder, wordt er in beide mengsels met een gelijkaardige hoeveelheid fijnen gewerkt. Wat er wel verschilt en hier ook van tel is, is het feit dat het kalksteenpoeder en het natuurlijk zand geen puzzolane werking kunnen teweegbrengen terwijl het zandvliegasmengsel dat mogelijks wel kan. Dit laatste zal aan de hand van deze test worden achterhaald: "Zorgt het zandvliegasmengsel voor een puzzolane werking of niet?". De druksterkte op 28 dagen wordt bekeken. Enkel indien de druksterkte van mengsel PW1 en PW2 groter is dan de druksterkte van het mengsel PW3 en PW4, kan worden gesteld dat er een puzzolane werking (en dus sterkteontwikkeling) heeft plaatsgevonden als gevolg van de toevoeging van het zandvliegasmengsel.

6.3.2.2 Samenstelling mengsels

De samenstellingen die per tabel worden weergegeven zijn voldoende om drie mortelbalkjes te maken.

- Mengsel met ondroge/natte zandvlieg
 - CEM I, mengselnummer: PW1 (3 balkjes)

Tabel 6.8 Samenstelling mengsel PW1

Materiaal	Type materiaal	Massa (g)	Massa (%)
-Cement	CEM I 52.5 R HES	450	22,22
-Droog standaardzand	Natuurlijk zand 0/2	945	46,67
-Nat zandvliegasmengsel	/	471,47	23,28
-Water	/	158,53	7,83
Totaal	/	2025	100,00

- CEM III, mengselnummer: PW2 (3 balkjes)

Tabel 6.9 Samenstelling mengsel PW2

Materiaal	Type materiaal	Massa (g)	Massa (%)
-Cement	CEM III/A 32,5 N-LH LA	450	22,22
-Droog standaardzand	Natuurlijk zand 0/2	945	46,67
-Nat zandvliegasmengsel	/	471,47	23,28
-Water	/	158,53	7,83
Totaal	/	2025	100,00

- Mengsel met kalksteenpoeder
 - CEM I, mengselnummer: PW3 (3 balkjes)

Tabel 6.10 Samenstelling mengsel PW3

Materiaal	Type materiaal	Massa (g)	Massa (%)
-Cement	CEM I 52.5 R HES	450	22,22
-Droog standaardzand	Natuurlijk zand 0/2	1293,30	63,87
-Kalksteenpoeder	Calcitec 2001M	56,70	2,80
-Water	/	225	11,11
Totaal	/	2025	100,00

- CEM III, mengselnummer: PW4 (3 balkjes)

Tabel 6.11 Samenstelling mengsel PW4

Materiaal	Type materiaal	Massa (g)	Massa (%)
-Cement	CEM III/A 32,5 N-LH LA	450	22,22
-Droog standaardzand	Natuurlijk zand 0/2	1293,30	63,87
-Kalksteenpoeder	Calcitec 2001M	56,70	2,80
-Water	/	225	11,11
Totaal	/	2025	100,00

6.3.2.3 Labotesten

Deze testen worden door omstandigheden (Covid19) niet uitgevoerd.

6.3.3 Filler effect

6.3.3.1 Praktische denkwijze

Deze test staat los van het zandvliegasmengsel. Het is zuiver een test op het filler effect. Er wordt een mengsel gemaakt met kalksteenpoeder (ter vervanging van zand opnieuw, 30%) en een standaardmengsel (= referentiemengsel). Er is geweten dat het zand (natuurlijk zand 0/2) in het standaardmengsel geen filler is, omdat het geen fijnen bevat en dat het kalkpoeder door zijn fijnen wel een potentiële filler is. De druksterkte wordt op 7 en 28 dagen gemeten. De invloed van de filler op de sterkteontwikkeling wordt bekeken (en vergeleken). Met deze resultaten wordt duidelijk in welke mate een filler bijdraagt aan de sterkteontwikkeling van het mengsel.

6.3.3.2 Samenstelling mengsels

- Mengsel met kalksteenpoeder
 - CEM I, mengselnummer: FE1 (2 keer 3 balkjes)

Tabel 6.12 Samenstelling mengsel FE1

Materiaal	Type materiaal	Massa (g)	Massa (%)
-Cement	CEM I 52.5 R HES	450	22,22
-Droog standaardzand	Natuurlijk zand 0/2	945	46,67
-Kalksteenpoeder	Calcitec 2001M	405	20,00
-Water	/	225	11,11
Totaal	/	2025	100,00

- CEM III, mengselnummer: FE2 (2 keer 3 balkjes)

Tabel 6.13 Samenstelling mengsel FE2

Materiaal	Type materiaal	Massa (g)	Massa (%)
-Cement	CEM III/A 32,5 N-LH LA	450	22,22
-Droog standaardzand	Natuurlijk zand 0/2	945	46,67
-Kalksteenpoeder	Calcitec 2001M	405	20,00
-Water	/	225	11,11
Totaal	/	2025	100,00

- Mengsel zonder kalksteenpoeder
 - CEM I, mengselnummer: FE3 (2 keer 3 balkjes)

Tabel 6.14 Samenstelling mengsel FE3

Materiaal	Type materiaal	Massa (g)	Massa (%)
-Cement	CEM I 52.5 R HES	450	22,22
-Droog standaardzand	Natuurlijk zand 0/2	1350	66,67
-Water	/	225	11,11
Totaal	/	2025	100,00

- CEM III, mengselnummer: FE4 (2 keer 3 balkjes)

Tabel 6.15 Samenstelling mengsel FE4

Materiaal	Type materiaal	Massa (g)	Massa (%)
-Cement	CEM III/A 32,5 N-LH LA	450	22,22
-Droog standaardzand	Natuurlijk zand 0/2	1350	66,67
-Water	/	225	11,11
Totaal	/	2025	100,00

6.3.3.3 Labotesten

Deze testen worden door omstandigheden (Covid19) niet uitgevoerd.

6.3.4 CEM I vs. CEM III

6.3.4.1 Praktische denkwijze

Een vreemde bevinding uit de thesis van 2019: het gebruik van CEM I enerzijds en CEM III anderzijds geven quasi dezelfde druksterktes. CEM I zou altijd een beter resultaat moeten opleveren, maar dat was hier niet zo. Uiteraard geniet het gebruik van CEM III de voorkeur omdat die een stuk goedkoper is. In het achterhoofd houdend dat er hoogstwaarschijnlijk met CEM III verder gewerkt zal worden omdat het financieel voordeliger is, wordt toch eens het verschil bekeken. Er wordt een mengsel met zandvliegasmengsel (als zandvervanger opnieuw) gemaakt, dit eens met CEM I en eens met CEM III. Deze proefstukken worden gedrukt (druksterkte) op 7, 28 en 90 dagen. Het is vooral op 90 dagen dat er een duidelijk verschil in druksterkte zou moeten te zien zijn.

Doordat de testen op puzzolane werking (6.3.2) niet konden doorgaan wordt hier ook gekeken wat de nalevering is als gevolg van puzzolane werking (toevoeging zandvliegasmengsel) bij mengsel VC1 en VC2 afzonderlijk.

6.3.4.2 Samenstelling mengsels

- Mengsel met ondroge/natte zandvlieg
○ CEM I, mengselnummer: VC1 (3 keer 3 balkjes)

Tabel 6.16 Samenstelling mengsel VC1

Materiaal	Type materiaal	Massa (g)	Massa (%)
-Cement	CEM I 52.5 R HES	450	22,22
-Droog standaardzand	Natuurlijk zand 0/2	945	46,67
-Nat zandvliegasmengsel	/	471,47	23,28
-Water	/	158,53	7,83
Totaal	/	2025	100,00

- CEM III, mengselnummer: VC2 (3 keer 3 balkjes)

Tabel 6.17 Samenstelling mengsel VC2

Materiaal	Type materiaal	Massa (g)	Massa (%)
-Cement	CEM III/A 32,5 N-LH LA	450	22,22
-Droog standaardzand	Natuurlijk zand 0/2	945	46,67
-Nat zandvliegasmengsel	/	471,47	23,28
-Water	/	158,53	7,83
Totaal	/	2025	100,00

6.3.4.3 Labotesten: resultaten

Tabel 6.18 Resultaten mengsels VC1 en VC2

Ouderdom drukken (dagen)	Mengsel	Druksterkte (N/mm ²)	Gem. druksterkte (N/mm ²)	SAI (%)
29	VC1	40,77	42,70	96,85
		41,13		
		43,27		
		45,64		
60	VC1	43,63	42,82	94,72
		45,49		
		40,44		
		40,09		
		40,52		
		40,64		
		46,60		
		45,14		
29	VC2	26,25	28,19	95,50
		28,14		
		29,34		
		29,03		
60	VC2	25,11	26,31	82,03
		26,35		
		30,68		
		31,64		
		25,45		
		26,50		
		22,67		
		22,08		

6.3.4.4 Conclusie

Op 29 dagen is ook hier duidelijk te zien dat de druksterkte bij VC1 (CEM I) hoger ligt dan bij VC2 (CEM III). Dit bevestigt onze verwachtingen. Op 60 dagen zien we dat bij VC1 de druksterkte quasi niet stijgt en bij VC2 zien we een daling van de druksterkte, dit laatste gaat tegen de logica in.

De verwachte nalevering door toevoeging van het zandvliegasmengsel (puzzolane werking) is hier niet te zien. We verwachten een beduidend verschil op 90 dagen, maar ook op 60 dagen zou al een verschil moeten te zien zijn. Dit is hier duidelijk niet het geval.

Wat opvalt is het feit dat er een beduidend verschil is tussen de druksterktes onderling per mengsel per tijdstip. Dit is geen goed teken. Dit wijst er op dat er veel verschil zit in de gemaakte proefstukken. Een gemiddelde gebruiken om zaken te concluderen is dus ook hier niet aan te raden.

6.3.4.5 Verklaring

De verklaring voor het verschil in druksterkte tussen gebruik van CEM I en CEM III werd in 6.3.1.5 reeds uitgebreid besproken. Deze is hier ook van toepassing.

De beduidende verschillen in druksterkte per mengsel per tijdstip zijn te wijten aan het feit dat de proefstukken niet op 100% dezelfde manier gemaakt werden. Twee zaken zijn hiervan de oorzaak. Ten eerste is er de minder goede verwerkbaarheid van de mortel door toevoeging van het zandvliegasmengsel (zoals reeds aangehaald in 6.3) en ten tweede is er de ongelijke verdichting. Door de moeilijke verwerkbaarheid en het weinig vloeibaar zijn van de mortel konden de proefstukken niet op een gelijke manier worden verdicht. De slagen van het jolting apparaat (Figuur 5.4) zijn onvoldoende sterk om de proefstukken zo te verdichten dat elk proefstuk hetzelfde verdicht is. Wat bij testen op cementmortelbalkjes niet lukt op vlak van gelijk verdichten lukt bij proctorproefstukken wel. Dit omdat proctorproefstukken op een veel stevigere manier worden verdicht, een beduidend verschil in verdichting is bij proctorproefstukken dan ook niet mogelijk.

De verwachte nalevering, als gevolg van puzzolane werking, die hier niet te zien kan twee mogelijke oorzaken hebben. Een eerste oorzaak is het feit dat de nalevering op 60 dagen vrij beperkt kan zijn in vergelijking met op 90 dagen. Een tweede oorzaak ligt opnieuw bij de ongelijke verdichting die hierboven besproken werd.

6.3.5 Besluit

Er kan worden gesteld dat het testen van zandcement aan de hand van cementmortelbalkjes niet zo gemakkelijk is, ze is dan ook niet echt aan te raden. De beduidende verschillen in druksterkte per mengsel per tijdstip laten het weinig toe om representatieve gemiddeldes te bepalen. De twee grote oorzaken van deze verschillen worden hieronder nog eens kort opgelijst.

1. Minder goede verwerkbaarheid
2. Gelijke verdichting niet mogelijk

Het is duidelijk dat testen op zandcement aan de hand van proctorproefstukken beter zijn om volgende reden. Bij proctortesten speelt de verwerkbaarheid een veel minder doorslaggevende rol. De verschillen in verwerkbaarheid worden namelijk afgevlakt door het verdichten op een veel stevigere manier.

6.4 Proctortest - toevoeging van calciumhydroxide

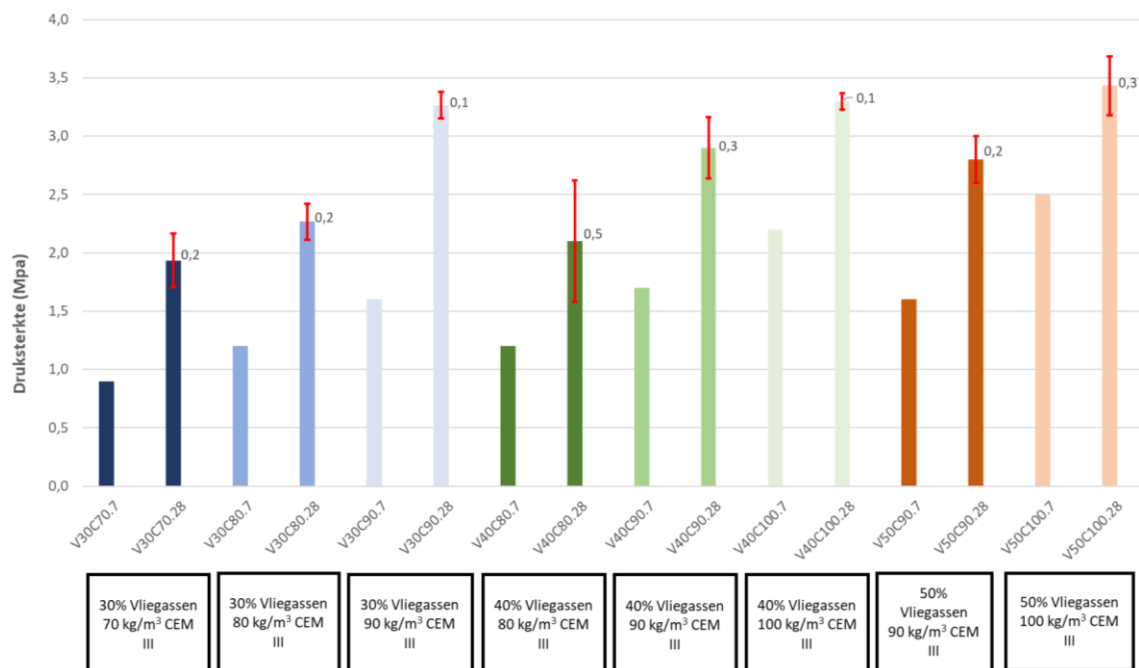
6.4.1 Praktische denkwijze

De literatuur uit 4.3.4 geeft aan dat de hoeveelheid calciumhydroxide die kan reageren met een hoeveelheid puzzolaan gelijk is aan 45% tot 75% van het eigen gewicht van de puzzolaan. Dit wil zeggen dat 100 gram puzzolaan kan reageren met 45 tot 75 gram $\text{Ca}(\text{OH})_2$ om sterkteontwikkende stoffen te genereren. Uit de literatuur [15] is ook geweten dat de calciumhydroxide die beschikbaar wordt om te reageren voornamelijk komt uit de hydratieractie van het cement. Om de kostprijs van het zandcementmengsel te reduceren wordt geprobeerd het cementgehalte te reduceren, wat leidt tot een reductie in de beschikbaarheid van vrijkomende calciumhydroxide die nodig is voor de puzzolane werking. Er kan dus worden gesteld dat er geen 45% tot 75% van het gewicht van de puzzolaan aan calciumhydroxide zal vrijkomen om het volledige potentieel van de puzzolaan te gebruiken. De puzzolane werking wordt dus niet optimaal benut. [15]

De testen die uitgevoerd kunnen worden om dit te testen, zijn proctorproeven op mengsels met een bepaalde hoeveelheid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aan toegevoegd. Er wordt uitgegaan van de mengsels die medestudenten T. Vansteelant & E. Vanden Bussche in 2019 hebben ontworpen. De aanpassingen aan de mengsels die hier worden voorgesteld, hebben als doel de mengsels van de medestudenten financieel aantrekkelijker te maken voor de producent.

6.4.2 Mengsels T. Vansteelant & E. Vanden Bussche

T. Vansteelant & E. Vanden Bussche ontworpen in 2019 enkele mengselontwerpen met als veranderende parameters het vervangingspercentage van zand door het zandvliegasmengsel en de hoeveelheid cement in het mengsel. Van elk mengsel werden proctorproefstukken gemaakt en onderworpen aan een druktest. De resultaten van de druktesten zijn te zien in Figuur 6.3.



Figuur 6.3 Resultaten druktesten E. Vanden Bussche en T. Vansteelant [6]

Volgens het standaardbestek 250 [38] dient de druksterkte van een proctorproefstuk van zandcement minstens een waarde te hebben van 2 MPa na 7 dagen of 3 MPa na 28 dagen. Figuur 6.3 geeft aan dat drie van de mengsels ontworpen door de medestudenten voldoen aan deze voorwaarden. Namelijk de mengsels met 30% vliegas en 90 kg/m³ cement, 40% vliegas en 100 kg/m³ cement en 50% vliegas en 100 kg/m³ cement. Dit betekent dat de vijf andere mengsels niet voldoen aan de vooropgestelde voorwaarden. De mengsels die niet voldoen aan de voorwaarden zijn dan ook de mengsels met een lager cementgehalte dan de mengsels die wel voldoen.

6.4.3 Doel

Zoals eerder vermeld is het doel van de mengselontwerpen het financieel voordeliger maken van de mengsels. Het financieel voordeel zal zijn oorsprong vinden in de reductie van het cementgehalte van de mengsels. In principe is het de bedoeling om de vijf mengsels, die werden ontworpen door de medestudenten die niet voldeden aan de voorwaarden betreffende de druksterkte, aan te passen zodat deze wel voldoen aan de voorwaarden. Deze vijf mengsels hebben namelijk een lager cementgehalte, wat een belangrijke factor is voor de prijsbepaling van het mengsel.

6.4.4 Methode

Het is dus de bedoeling om de mengsels die oorspronkelijk niet voldeden aan de voorwaarden aan te passen zodat deze wel voldoen. Dit wordt gedaan door een hoeveelheid calciumhydroxide toe te voegen aan het mengsel. Op deze manier zou de puzzolane werking gestimuleerd moeten worden en een hogere druksterkte behaald moeten worden, zeker op 28 dagen.

6.4.5 Mengselontwerp op basis van financiële analyse

Het algemene doel is het financieel voordeliger maken van de mengsels. Er dient te worden gekeken naar de hoeveelheid calciumhydroxide die kan worden toegevoegd aan de mengsels opdat de mengsels financieel voordelig blijven. Er zou bijvoorbeeld 30% van het gewicht van de puzzolaan aan calciumhydroxide kunnen worden toegevoegd, zodat de puzzolane werking zo goed als optimaal zou worden benut. Helaas kan dit financieel gezien niet voordelig zijn. Het ontwerp van de mengsels wordt dus gebaseerd op een financiële analyse. Er worden enkel mengsels voorgesteld die een financieel voordeel kunnen bieden ten opzichte van een referentiemengsel en de mengsels die werden ontworpen door T. Vansteelant & E. Vanden Bussche.

6.4.5.1 Referentiemengsel

Dit is het zandcementmengsel dat momenteel gebruikt wordt in de centrales van Viabuild. Hier komt geen vlieggas of toevoeging van calciumhydroxide aan te pas.

Tabel 6.19 Referentiemengsel [6]

Referentiemengsel			
Dichtheid (kg/m ³)	2076		
	Proctor (%)	Aandeel (kg/m ³)	Prijs (€/m ³)
Zand	83,38	1731,4	1,73
Vlieggas	0,00	0,00	0,00
Water	12,02	249,57	0,90
Cement	4,60	95,51	8,12
Calciumhydroxide	/	/	/
Centrale	/	/	7,27
Totaal	100,00	2076,33	18,02

6.4.5.2 Mengselontwerpen T. Vansteelant & E. Vanden Bussche

Dit zijn nogmaals, zoals reeds vermeld in hoofdstuk 2, de twee mengselontwerpen die door T. Vansteelant en E. Vanden Bussche in 2019 naar voren werden geschoven.

Mengselontwerp 1:

Tabel 6.20 Mengselontwerp 1 T. Vansteelant en E. Vanden Bussche [6]

Voorstel I: 30% VA - 90 kg/m ³			
Dichtheid (kg/m ³)	2068		
	Proctor (%)	Aandeel (kg/m ³)	Prijs (€/m ³)
Zand	58,43	1208,35	1,21
Vlieggas	25,04	517,87	0,00
Water	12,10	250,31	0,90
Cement	4,42	91,49	7,78
Calciumhydroxide	/	/	/
Centrale	/	/	7,24
Totaal	100,00	2068,02	17,12

Mengselontwerp 2:

Tabel 6.21 Mengselontwerp 2 T. Vansteelant en E. Vanden Bussche [6]

Voorstel II: 50% VA - 100 kg/m³			
Dichtheid (kg/m³)	2025		
	Proctor (%)	Aandeel (kg/m³)	Prijs (€/m³)
Zand	41,46	839,57	0,84
Vliegas	41,46	839,57	0,00
Water	12,02	243,41	0,88
Cement	5,06	102,47	8,71
Calciumhydroxide	/	/	/
Centrale	/	/	7,09
Totaal	100,00	2025,00	17,51

6.4.5.3 Mengselvoorstellen met kalktoevoeging

Dit zijn de te testen mengselvoorstellen met een kalktoevoeging.

Tabel 6.22 Mengselvoorstel 1 - mengsel 3.70

3.70: 30% vliegassen, 70 kg/m³ CEM III			
Dichtheid (kg/m³)	2062,79		
	Proctor (%)	Aandeel (kg/m³)	Prijs (€/m³)
Zand	58,68	1210,37	1,21
Vliegas	25,15	518,73	0,00
Water	12,15	250,72	0,90
Cement	3,39	70,00	5,95
Calciumhydroxide	0,75	15,47	1,78
Centrale	/	/	7,22
Totaal	100,12	2065,29	17,06

Tabel 6.23 Mengselvoorstel 2 - mengsel 3.80

3.80: 30% vliegassen, 80 kg/m³ CEM III			
Dichtheid (kg/m ³)	2065,43		
	Proctor (%)	Aandeel (kg/m ³)	Prijs (€/m ³)
Zand	58,57	1209,68	1,21
Vliegas	25,10	518,43	0,00
Water	12,13	250,58	0,90
Cement	3,87	80,00	6,80
Calciumhydroxide	0,39	8,06	0,93
Centrale	/	/	7,23
Totaal	100,06	2066,75	17,07

Tabel 6.24 Mengselvoorstel 3 - mengsel 4.80

4.80: 40% vliegassen, 80 kg/m³ CEM III			
Dichtheid (kg/m ³)	2039,24		
	Proctor (%)	Aandeel (kg/m ³)	Prijs (€/m ³)
Zand	50,12	1022,03	1,02
Vliegas	33,41	681,36	0,00
Water	12,11	246,99	0,89
Cement	3,92	80,00	6,80
Calciumhydroxide	0,52	10,60	1,22
Centrale	/	/	7,14
Totaal	100,09	2040,99	17,07

Tabel 6.25 Mengselvoorstel 4 - mengsel 4.90.01

4.90.01: 40% vliegassen, 90 kg/m³ CEM III			
Dichtheid (kg/m ³)	2041,23		
	Proctor (%)	Aandeel (kg/m ³)	Prijs (€/m ³)
Zand	50,04	1021,41	1,02
Vliegas	33,36	680,94	0,00
Water	12,09	246,84	0,89
Cement	4,41	90,00	7,65
Calciumhydroxide	0,12	2,45	0,28
Centrale	/	/	7,14
Totaal	100,02	2041,63	16,99

Tabel 6.26 Mengselvoorstel 5 - mengsel 4.90.02

4.90.02: 40% vliegassen, 90 kg/m³ CEM III			
Dichtheid (kg/m ³)	2042,05		
	Proctor (%)	Aandeel (kg/m ³)	Prijs (€/m ³)
Zand	58,68	1197,72	1,20
Vliegas	33,32	680,24	0,00
Water	12,08	246,59	0,89
Cement	4,41	89,96	7,65
Calciumhydroxide	0,24	4,90	0,56
Centrale	/	/	7,15
Totaal	108,73	2219,41	17,44

Tabel 6.27 Mengselvoorstel 6 - mengsel 5.90.01

5.90.01: 50% vliegassen, 90 kg/m³ CEM III			
Dichtheid (kg/m ³)	2015,47		
	Proctor (%)	Aandeel (kg/m ³)	Prijs (€/m ³)
Zand	41,63	838,98	0,84
Vliegas	41,63	838,98	0,00
Water	12,07	243,31	0,88
Cement	4,47	90,00	7,65
Calciumhydroxide	0,25	5,04	0,58
Centrale	/	/	7,05
Totaal	100,04	2016,31	17,00

Tabel 6.28 Mengselvoorstel 7: mengsel 5.90.02

5.90.02: 50% vliegassen, 90 kg/m³ CEM III			
Dichtheid (kg/m ³)	2015,85		
	Proctor (%)	Aandeel (kg/m ³)	Prijs (€/m ³)
Zand	41,56	837,53	0,84
Vliegas	41,56	837,53	0,00
Water	12,05	242,88	0,87
Cement	4,46	89,98	7,65
Calciumhydroxide	0,45	9,07	1,04
Centrale	/	/	7,06
Totaal	100,08	2017,00	17,46

6.4.6 Financiële analyse

Tabel 6.29 toont een financiële analyse van de verschillende mengselvoorstellen. De tabel berekent per mengselvoorstel enkele eigenschappen.

- Eerst en vooral wordt de kostprijs berekent om één kubieke meter van elk ontwerp te produceren.
- Aannemend dat een volume van 200 000 m³ aan zandvliegasmengsel aanwezig is op de site te Sambreville en dat per jaar 25000 m³ zandcement wordt geproduceerd, wordt het aantal jaren waarin de hele hoop kan worden verwerkt berekend.
- De totale kost voor de productie van het mengsel voor een volledig jaar wordt bepaald.
- De financiële besparing wordt berekend ten opzichte van het referentiemengsel waarin geen zandvliegasmengsel is in verwerkt. Zowel de besparing in euro per jaar als de procentuele besparingen wordt berekend.
- Als laatste wordt aangegeven welke hoeveelheid calciumhydroxide maximaal kan worden toegevoegd aan het mengsel om het financieel voordelig te maken. Dit wil zeggen dat het financieel voordeel hoger dient te liggen dan de 4,95% (of 2,79%) uit de thesis van 2019. Er wordt gesproken van een maximale hoeveelheid kalktoevoeging omdat deze gebluste kalk (calciumhydroxide) een relatief gezien duur materiaal is.

Tabel 6.29 Financiële analyse mengselvoorstellen met toevoeging van calciumhydroxide

Mengsels	Prijs (€/m³)	TijdWegwerk (j)	KostTotaal (€/j)	Besparing (€/j)	Besparing (%)	Kalktoevoeging (%)
Referentie	18,02	∞	450.382	REF	REF	0%
Voorstel I	17,12	31	428.099	22.283	4,95%	0%
Voorstel II	17,51	19	437.821	12.561	2,79%	0%
3.70	17,06	31	426.547	23.835	5,29%	25%
3.80	17,07	31	426.678	23.705	5,26%	13%
4.80	17,07	23	426.700	23.682	5,26%	13%
4.90.1	16,99	23	424.650	25.732	5,71%	3%
4.90.2	17,44	23	436.073	14.310	3,18%	6%
5.100.1	17,00	19	424.961	25.421	5,64%	5%
5.100.2	17,46	19	436.473	13.909	3,09%	9%

Tabel 6.30 Kostprijs per component

Materiaal	Kostprijs (€/t)
Zand	1
Vliegas	0
Water	3,6
CEM III	85
CEM I	130
Calciumhydroxide	115
Centrale	3,5

6.4.7 Bespreking financiële analyse

De financiële analyse geeft voor elk mengselvoorstel een procentuele waarde voor de maximale hoeveelheid aan calciumhydroxide die toegevoegd mag worden aan het mengsel, opdat het mengsel een financieel voordeel zou bieden. De hoeveelheid calciumhydroxide die wordt toegevoegd aan het mengsel wordt uitgedrukt als een percentage van de hoeveelheid vliegas aanwezig in het mengselontwerp. Er wordt hier gesteld dat er 10% van de hoeveelheid zandvliegasmengsel effectief vliegas is.

Het doel is dus een mengsel te ontwerpen die een groter financieel voordeel biedt dan het financieel voordeel die de mengselontwerpen van de medestudenten uit de thesis van 2019 bieden. Een lager financieel voordeel zou geen nut hebben. De mengselvoorstellen zouden dus een procentueel financieel voordeel moeten bieden groter dan 4,95% enerzijds (mengselontwerp 1 van de medestudenten met een langere verwerkingstijd) of 2,79% anderzijds (mengselontwerp 2 van de medestudenten met een kortere verwerkingstijd).

6.4.7.1 4,95% overtreffen

Van de mengsels, ontworpen om te voldoen aan een financieel voordeel groter dan 4,95% (3.70, 3.80, 4.80, 4.90.01 en 5.100.01), blijkt dat het mengselvoorstel met een zandvervanging van 30% en een cementhoeveelheid van 70 kg/m³ de hoogste kalktoevoeging toelaat, namelijk 25 %.

In gedachten moet worden gehouden dat deze mengsels zonder de toevoeging van calciumhydroxide niet voldoen aan de eisen voor druksterkte. Er wordt op de toevoeging van de calciumhydroxide gerekend om deze mengsels wel aan de eisen te laten voldoen. De kostprijs voor één ton calciumhydroxide op industriële schaal wordt geschat op 115 euro tot 120 euro per ton. Bij de berekening van de percentages werd met 115 euro per ton gewerkt, wat de minimum geschatte kostprijs is.

Bij mengsels 3.70 en 3.80 is de tijd om de berg zandvliegasmengsel te verwerken 31 jaar, bij mengsel 4.80 is die tijd 23 jaar, bij mengsel 4.90.1 is die tijd 23 jaar en bij mengsel 5.100.1 is dat 19 jaar. Bij mengselontwerp 1 van de medestudenten was dit 31 jaar.

6.4.7.2 2,79% overtreffen

Naast de reeds besproken vijf mengsels worden twee extra mengsels ontworpen, namelijk mengsel 4.90.02 en 5.90.02. Deze worden ontworpen niet om te voldoen aan een financieel voordeel van groter dan 4,95%, maar aan een financieel voordeel van groter dan 2,79%. Dit is het financieel voordeel van mengselontwerp 2 van de medestudenten. Deze mengsels hebben een lager financieel voordeel dan het mengselontwerp 1 van de medestudenten. Het voordeel van deze mengsels is dat een hogere hoeveelheid calciumhydroxide kan worden toegelaten in het mengsel, wat kan leiden tot een hogere druksterkte. Ook kan voor deze mengsels worden gekozen, omdat zij een hoger aandeel aan zandvervanging hebben. Op deze manier zal de hoop met het zandvliegasmengsel sneller worden verwerkt. Bij mengsel 4.90.02 is de tijd om de berg zandvliegasmengsel te verwerken 23 jaar en bij mengsel 5.100.02 is dat 19 jaar. Bij mengselontwerp 2 van de medestudenten was dit 19 jaar.

6.4.7.3 Conclusie financiële analyse

Voordat een definitieve conclusie kan worden getrokken in verband met de mogelijkheid van het toevoegen van calciumhydroxide, moeten deze mengsels worden getest als ze al dan niet voldoen aan de voorwaarden voor druksterkte. De berekende waarden voor kalktoevoeging

zijn maximale waardes. Dit wil zeggen: hogere waardes zouden geen financieel voordeel meer bieden ten opzichte van de mengselontwerpen van de medestudenten of zelfs ten opzichte van het referentiemengsel.

Wanneer enkele of alle mengselvoorstellen voldoen aan de voorwaarden voor druksterkte, kan worden besloten dat het gebruik van calciumhydroxide financiële voordelen kunnen bieden voor de producent. Is dit niet het geval, dan wil dit zeggen dat geen enkel mengselvoorstel voldoet. Hieruit kan dan worden besloten dat calciumhydroxide geen mogelijkheid biedt tot het optimaliseren van de mengselontwerpen van de medestudenten ontworpen in 2019.

Zoals besproken in 4.3.4 kan een massa puzzolaan, hier vliegas, reageren met 45% tot 75% van zijn eigen gewicht met calciumhydroxide om puzzolane werking te realiseren. De waarden die verkregen worden uit de financiële analyse voor maximale kalktoevoeging geven aan dat een toevoeging van calciumhydroxide een mogelijkheid is. Wanneer deze hoeveelheden worden toegevoegd aan de mengsels, is het mogelijk dat de mengsels zullen voldoen aan de norm voor druksterkte van zandcement. Dit is echter nog geen zekerheid. Het behalen van de minimale druksterktes hangt af van de effectiviteit van het toevoegen van calciumhydroxide aan het mengsel. Dit betekent dat als het toevoegen van calciumhydroxide aan het mengsel een significant effect heeft op de druksterkte, het behalen van de minimale druksterktes een reële mogelijkheid is. De effectiviteit van de toevoeging van calciumhydroxide aan een mengsel dient echter nog te worden getest.

Wanneer de toevoeging van calciumhydroxide een sterk positief effect heeft op de druksterkte van de hierboven vermelde mengsels en deze druksterktes dus ruim voldoen aan de opgelegde normen, kan het gehalte aan calciumhydroxide worden gereduceerd. Dit kan leiden tot een nog groter financieel voordeel.

Nogmaals, op dit moment kan geen definitieve conclusie worden getrokken. Enkel testresultaten voor de druksterktes kunnen uitsluiting of bevestiging bieden. Uitzonderlijke omstandigheden (Covid19) beletten ons er echter toe deze testen uit te voeren en dus uitsluiting of bevestiging te bieden. [15]

7 ALGEMENE CONCLUSIE

In 2018 en 2019 hebben medestudenten de mogelijkheid tot verwerking van een zandvliegasmengsel in bouwkundige toepassingen onderzocht. Hun gecombineerd nalatenschap bestaat uit twee zeer effectieve en markwaardige eindmengsels voor zandcement. De thesis van dit jaar is gericht op het 'waarom' van dit alles: "Waarom worden hogere druksterktes verkregen door toevoeging van een zandvliegasmengsel?" en "Waarom is er hierbij sprake van nalevering in druksterkte?". Kortom: het doel was om de volledige werking van de zandcementmengsels gecombineerd met het zandvliegasmengsel bloot te leggen, dit zowel op chemisch als fysisch vlak. Daarna werd gekeken op welke parameters kan worden ingespeeld om de ontwerpen van de zandcementmengsels nog te optimaliseren.

De testen rond de Strength Activity Index (SAI) waren gericht op het onderscheiden van de chemische en de fysische werkingen van de vliegias. Deze testen moesten duidelijkheid bieden over welke werking voornamelijk verantwoordelijk is voor de hogere druksterktes. De resultaten van de testen waren helaas niet van die aard dat er doorslaggevende besluiten gevormd konden worden. Dit heeft twee redenen. Allereerst konden door omstandigheden (Covid19) niet alle vooropgestelde testen worden uitgevoerd. Ten tweede was de verwerkbaarheid van het cementmortelmengsel in combinatie met het zandvliegasmengsel niet goed, waardoor verdichten op een gelijke manier niet mogelijk was. Door de verschillen in verwerkbaarheid en dus ook verdichting tussen de proefstukken onderling is een correcte vergelijking van de resultaten niet mogelijk. Er kon op basis van de testresultaten wel worden besloten dat het gebruik van CEM I een grotere druksterkte oplevert dan CEM III. Dit kon worden verklaard aan de hand van hun samenstellingen. Verder was er één iets duidelijk. Deze testen dienen opnieuw te worden uitgevoerd: niet op cementmortelbalkjes, maar op proctorcilinders uit zandcement. Bij proctortesten heeft de verwerkbaarheid geen invloed op de verdichting van de mengsels en kunnen de verschillende mengsels dus op een correcte manier worden vergeleken.

Gelijktijdig met de uitvoering van de eerste proeven werd een theoretisch onderzoek op poten gezet. Ook hier werd een onderscheid gemaakt tussen de chemische en de fysische werkingen binnen de mengsels.

Het fysisch aspect van de werking van het zandvliegasmengsel, namelijk het filler effect, werd theoretisch onderzocht. Op het filler effect konden echter geen testen worden uitgevoerd. Ook worden geen optimalisaties van het zandcementmengsel voorgesteld op basis van het filler effect, omdat het effect ervan insignificant zal zijn. Dit omdat de zeefcurve van het zandvliegasmengsel uitwijst dat slechts een klein percentage van het mengsel (10% tot 14%) beschouwd kan worden als fijnen. Het chemische aspect van het theoretisch onderzoek is gericht op enkele verschillende chemische werkingen: de hydratiereducties van cement in relatie met de puzzolane activiteit en de zuurtegraad in de zandcementmengsels. Elk aspect van dit theoretisch onderzoek heeft bijgedragen tot de besluiten voor de optimalisatie van de zandcementmengsels.

Allereerst werden de puzzolane reacties bestudeerd. Hieruit werd snel duidelijk dat dé te optimaliseren parameter de hoeveelheid calciumhydroxide is. Het theoretisch onderzoek heeft uitgewezen dat de hydratatiereacties van cement de oorsprong zijn van de calciumhydroxide die gebruikt wordt in de puzzolane reacties. Een tweede chemische analyse van het zandvliegasmengsel dient dit echter nog te bevestigen. Het onderzoek heeft ook uitgewezen

dat de puzzolane werking waarschijnlijk niet optimaal benut wordt, omdat de hoeveelheid calciumhydroxide die ter beschikking gesteld wordt aan de vliegase te laag is.

Door het feit dat de puzzolane reacties niet optimaal worden benut, door een gebrek aan calciumhydroxide, werden er enkele zandcementmengsels ontworpen waar calciumhydroxide aan wordt toegevoegd. De aanpak rond het ontwerp van de mengsels is de volgende. Het heeft geen nut een mengsel te ontwerpen die geen financieel voordeel biedt ten opzichte van de reeds ontworpen mengsels. Gebaseerd op een financiële analyse zijn dus enkele mengsels ontworpen met een toevoeging van calciumhydroxide. Deze mengsels dienen nog te worden getest op druksterkte. Indien deze voldoen aan de minimumeisen kan worden gesteld dat er mengsels ontworpen zijn die financiële voordelen bieden voor de producent. Indien deze niet voldoen aan de eisen kan worden gesteld dat een toevoeging van calciumhydroxide geen mengsels oplevert met een hoger financieel voordeel dan bekomen in 2019.

Een volgend theoretisch onderzoek, namelijk over de zuurtegraad of pH-waarde van de mengsels, heeft geleid tot een tweede mogelijke optimalisatie van de mengsels. Er werd besloten dat de puzzolaan opnieuw niet optimaal benut wordt. Dit komt omdat de vliegase een milieu nodig heeft met een zeer hoge pH-waarde (>13) om een goede puzzolane werking te bieden. Vanaf een pH-waarde van 13 zal de puzzolaan optimaal worden afgebroken en benut. In dit onderzoek is echter niet getest of dit al dan niet het geval is. Indien dit niet het geval zou zijn en het mengsel dus de hoge pH-waarde van 13 niet behaalt, zal de puzzolaan niet optimaal worden benut. Een mogelijke oplossing hiervoor is het toevoegen van een zeer sterke base. In dit onderzoek werd gekozen voor natriumhydroxide. Het toevoegen van natriumhydroxide is dus het tweede voorstel dat in dit onderzoek naar voren wordt geschoven als optimalisatie van de zandcementmengsels. Deze mogelijke optimalisatie werd in dit onderzoek enkel theoretisch uitgewerkt. Het ontwerp, de realisatie en het testen van mengsels met toepassing van dit voorstel laten we daardoor over aan eventuele opvolgers.

Beide mogelijke optimalisaties, die hier worden voorgesteld, zijn gebaseerd op een grondig theoretisch onderzoek. Zowel de toevoeging van calciumhydroxide als de toevoeging van natriumhydroxide dienen nog te worden gefundeerd op experimentele data. Alsook dienen de optimalisaties te worden getest op hun financiële maakbaarheid. Het heeft namelijk geen nut een mengsel te ontwerpen dat het financieel voordeel uit 2019 niet overschrijdt.

We kunnen besluiten dat de werkingen van de vliegase binnen een zandcementmengsel zo goed als volledig blootgelegd zijn. De theoretische aspecten ervan werden grondig onderzocht en de nodige zaken werden geconcludeerd. Deze conclusies werden vervolgens gebruikt om optimalisaties voor de zandcementmengsels voor te stellen.

Volgens ons hebben deze twee optimalisatievoorstellen een goede kans op slagen. Vanuit ons perspectief en het uitgevoerde theoretisch onderzoek betwijfelen we dat er naast deze voorstellen nog andere parameters zijn die aangepast kunnen worden om de zandcementmengsels te optimaliseren.

Zoals reeds vermeld zal het aan onze eventuele opvolgers zijn om de hypothesen experimenteel te testen. Ten eerste dient de tweede chemische analyse van het zandvliegasmengsel nog te worden uitgevoerd en geanalyseerd. Ten tweede kan met de Strength Activity Index (SAI) op proctorproefstukken worden getest of de chemische werkingen effectief een grotere invloed hebben dan de fysische. Ten derde kunnen de mengselontwerpen met toevoeging van calciumhydroxide, hier voorgesteld als eerste mogelijke optimalisatie, worden getest op hun druksterkte. Daarnaast kunnen vanuit het tweede optimalisatievoorstel zandcementmengsels met toevoeging van natriumhydroxide worden ontworpen op basis van hun financiële maakbaarheid. Deze mengsels dienen dan ook te worden getest op druksterkte.

Als laatste kan worden getest als de twee optimalisatievoorstellen al dan niet gecombineerd kunnen worden om een finaal zandcementmengsel te ontwerpen met significante mechanische en financiële voordelen.

REFERENTIES

- [1] Belgische Betongroepering (BBG), *Betontechnologie*, Brussel: Belgische Betongroepering, 2015.
- [2] J. Li, „Concrete Technology,” KU Leuven, Brugge, 2018.
- [3] V. I. BUSINESS INSIDER, „Woestijnen te over, en toch dreigt er een wereldwijd tekort aan zand,” *Nieuwsblad*, p. 1, 13 06 2018.
- [4] Mick Van Loon, „Wereld kampt met een tekort aan... zand,” *Express Business*, p. 1, 28 10 2017.
- [5] Willem Schoonen, „Zandhonger van de bouw zorgt voor wereldwijde tekorten,” *Trouw*, p. 1, 12 09 2017.
- [6] E. Vansteelant en T. vanden Bussche, *Van afval tot grondstof: Vliegassen in zandcement*, Brugge: KU Leuven, 2019.
- [7] H. Debruyne en S. Ferier, *Zand-vliegas mengsels in bouwkundige toepassingen*, Brugge: KU Leuven, 2018.
- [8] F. U. Rahman, „Manufacture of Cement- Materials and Manufacturing Process of Portland Cement,” *The Constructor*, 2019. [Online]. Available: <https://theconstructor.org/building/manufacture-of-cement/13709/>. [Geopend 25 november 2019].
- [9] Holcim, „CEM I 52,5 R HES,” Holcim N.V., Nivelles, 2019.
- [10] Holcim, „CEM III/A 32,5 N-LH LA,” LaforgeHolcim, 2018.
- [11] B. v. Normalisatie, NBN EN 450-1: Fly ash for concrete - Part 1: Definition, specifications and conformity criteria, Bureau voor Normalisatie, 2012.
- [12] J. D. Maersschalk, „De sterkteontwikkeling van volledig recycleerbaar beton met een combinatie van traditioneel portlandcement en calciumaluminaatcement,” Universiteit Gent, Gent, 2010-2011.
- [13] Encyclo, „Nederlandse Encyclopedie,” Encyclo, 9 september 2019. [Online]. Available: <https://www.encyclo.nl/begrip/puzzolaan>. [Geopend 22 februari 2020].
- [14] „Puzzolaan,” 26 1 2019. [Online]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Puzzolaan>. [Geopend 25 2 2019].
- [15] P. Hewlett, *Lea's chemistry of cement en concrete*, Elsevier Science & Technology Books, 2004.

- [16] T. Oey, A. Kumar, J. Bullard, N. Neithalath en G. Sant, „The Filler Effect: The influence of filler content and surface area on cementitious reaction rates,” *The American Ceramic Society*, vol. 2013, nr. 96, p. 1990, 2013.
- [17] K. v. Balen, B. v. Bommel, R. v. Hees, M. v. Hunen, J. v. Rhijn en M. v. Rooden, *Kalkboek. Het gebruik van kalk als bindmiddel voor metsel- en voegmortels in verleden en heden*, dbnl, 2013.
- [18] „zeolite,” wikipedia, 17 04 2020. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Zeolite>. [Geopend 21 04 2020].
- [19] „diagenese,” wikipedia, 20 04 2017. [Online]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Diagenese>. [Geopend 21 04 2020].
- [20] M. Uemoto, Y. Kuwabara, S. A. Sato en K. Yabana, „Nonlinear polarization evolution using time-dependent density functional theory,” University of Tsukuba, Tsukuba, Japan, 2018.
- [21] P. V. Brady en j. V. Walther, „Controls on silicate dissolution rates in neutral and basic pH solutions at 25°C,” Northwestern University Evanston, Evanston, USA, 1989.
- [22] A. M. Helmenstine, Ph.D, „Here's How to Calculate pH Values,” ThoughtCo, 02 05 2020. [Online]. Available: <https://www.thoughtco.com/how-to-calculate-ph-quick-review-606089>. [Geopend 12 05 2020].
- [23] F. J. Bijen, „Cement-Stabilized Fly Ash Base Courses,” Delft University, Nederland, 1990.
- [24] C. Cornelly, „Chemie 2: Chemische reactiviteit,” KU Leuven, Brugge, België, 2017.
- [25] „Natriumhydroxide,” Wikipedia, 17 03 2020. [Online]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Natriumhydroxide>. [Geopend 12 05 2020].
- [26] S. Rahimi-Aghdam, Z. P. B. žant en M. A. Qomi, „ScienceDirect,” 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022509616305919>. [Geopend 27 11 2019].
- [27] „Matse,” Department of Materials Science and Engineering University of Illinois Urbana-Champaign, [Online]. Available: <http://matse1.matse.illinois.edu/concrete/prin.html>. [Geopend 27 11 2019].
- [28] X. Ouyang, D. A. Koleva, G. Ye en K. v. Breugel, „SpringerLink,” 23 10 2017. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-017-1082-y>. [Geopend 10 11 2019].
- [29] V. Rahhal, V. Bonavetti, A. Delgado, R. Talero en C. pedrajas, „researchgate,” 1 2009. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/288270624_Scheme_of_the_Portland_cement_hydration_with_crystalline_mineral_admixtures_and_other_aspects. [Geopend 20 11 2019].
- [30] „Wikipedia,” 21 11 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Surface-area-to-volume_ratio. [Geopend 23 11 2019].

- [31] G. Land en S. Dietmar, „ScienceDirect,” 23 08 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946514002248#!>. [Geopend 15 11 2019].
- [32] E. John, T. Matschei en S. Dietmar, „ScienceDirect,” 11 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884617306798>. [Geopend 25 11 2019].
- [33] P. Lawrence, M. Cyr en E. Ringot, „ScienceDirect,” 12 2003. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884603001832>. [Geopend 25 11 2019].
- [34] F. Zuninoa en M. Lopez, „ScienceDirect,” 01 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946515300330>. [Geopend 02 11 2019].
- [35] bsi., „Methods of testing cement, part 1: determination of strength,” CEN, Brussel, 2016.
- [36] N. M. Altwair, M. Azmi, M. Johari en h. F. S. syed, „Strength Activity Index and Microstructural Characteristics of Treated Palm Oil Fuel Ash,” IJENS Publisher, Rawalpindi, Pakistan, 2011.
- [37] B. v. Normalisatie, „NBN EN 13286-2 Ongebonden en hydraulisch gebonden mengsels - Deel 2: Beproevingmethoden voor het bepalen van de laboratoriumreferentiedichtheid en het watergehalte - Proctorverdichting (+ AC:2012),” 2010.
- [38] V. Overheid, Standaardbestek 250, Vlaamse Overheid, 2013.
- [39] B. v. Normalisatie, „NBN EN 13286-41 - Druksterkte van hydraulisch gebonden mengsels,” 2003.
- [40] Carmeuse, „Technische fiche Calcitec 2001 M,” Carmeuse SA, Louvain-la-Neuve, 2017.

Bijlagen

Bijlage A Excelsheet met betrekking tot cementmortelbalkjes, 6.3

Bijlage B Excelsheet met betrekking tot de proctorcilinders, 6.4

FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
CAMPUS BRUGGE
Sporwegstraat 12
8200 BRUGGE, België
tel. + 32 50 66 48 00
iiw.brugge@kuleuven.be
www.iw.kuleuven.be

