

# Het effect van luchtbelvormers op de duurzaamheid van beton met vliegas

Jamie Furniere

Promotor: Prof. dr. ir. Nele De Belie

Begeleider: ir.-arch. Philip Van den Heede, ir. Elke Gruyaert

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Vakgroep Bouwkundige constructies

Voorzitter: Prof. dr. ir. Luc Taerwe

Faculteit Ingenieurswetenschappen

Academiejaar 2009-2010



# Voorwoord

De verwezenlijking van dit afstudeerwerk zou nooit kunnen gebeurd zijn zonder de steun van enkele mensen. Van dit stukje tekst zou ik dan ook graag gebruik maken om iedereen die mij de voorbije maanden geholpen heeft dit voorliggend werk te realiseren, te bedanken.

Als eerste wens ik mijn promotor, prof. dr. ir. Nele De Belie, te bedanken om mij de kans te geven om onderzoek te doen op de duurzaamheid van vliegasseton. De tussentijdse vergaderingen gaven mij telkens enkele nuttige tips mee voor het verder verwerken van mijn proefresultaten en met elke vraag kon ik bij haar langs.

Ik zou ook graag mijn begeleider ir.-arch. Philip Van den Heede oprecht willen bedanken voor de vele tijd die hij in mijn begeleiding heeft gestopt in de loop van het academiejaar. Steeds was hij bereid een antwoord te geven op mijn – vele – vragen en stond hij klaar om allerhande problemen op te lossen. Ook voor het uitvoeren van een aantal proeven wanneer ik door examens of andere omstandigheden was verhinderd, zou ik hem ten zeerste willen bedanken.

Mijn dank gaat eveneens uit naar de gehele technische staf van het Laboratorium Magnel en daarbij in het bijzonder aan dhr. Nicolas Coppetiers. Op eender welk moment kon ik bij hen terecht wanneer ik een probleem of vraag had en die werden telkens meteen van de baan geveegd. Ze hielpen mij ook bij het vervaardigen en correct behandelen van de proefstukken en de uitvoering van de proeven, en stonden altijd klaar om raad te geven, waarvoor een welgemeende dankjewel!

Verder wens ik graag nog mijn allergrootste voorbeelden te bedanken: mama en papa. Ik had niet gestaan waar ik nu stond zonder jullie jarenlange steun. Ik apprecieer wat jullie allemaal voor mij doen. Al kan ‘beton’ jullie niet zozeer bekoren, de geveinsde interesse tijdens de zoveelste vertelling over mijn thesis deed alleszins deugd.

Voorts zou ik graag nog mijn vriend Koen bedanken, voor het dulden van de luide wekkers in de vroege morgen om naar het labo te komen, voor het luisterend oor wanneer het schrijven niet zo vlotte en voor de onvoorwaardelijke steun en liefde.

Tot slot dank ik nog eens iedereen die op directe of indirecte wijze heeft bijgedragen tot de realisatie van dit afstudeerwerk, bedankt!

Gent, Juni 2010

Jamie Furniere

#### **Toelating tot bruikleen**

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

# Overzicht

HET EFFECT VAN LUCHTBELVORMERS OP DE DUURZAAMHEID VAN BETON MET VLEGAS

door

Jamie Furniere

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van  
burgerlijk bouwkundig ingenieur

Academiejaar 2009-2010

Promotor: Prof. dr. ir. N. De Belie

Scriptiebegeleiders: ir.-arch. Philip Van den Heede, ir. Elke Gruyaert

Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen

Vakgroep Bouwkundige Constructies

Laboratorium Magnel voor Betononderzoek

Voorzitter: Prof. dr. ir. L. Taerwe

## *Samenvatting*

De milieu-impact van de productie van beton kan worden teruggeschroefd door in het beton cement te vervangen door vliegas. Vliegas is een bijproduct van de verbranding van poederkool in elektriciteitscentrales en kan eigenlijk als afvalproduct gezien worden. Het is een puzzolaan materiaal dat reageert met de hydratatieproducten, afkomstig van portlandcement. De vervanging van een grote hoeveelheid cement door vliegas heeft een belangrijke invloed op de samenstelling, microstructuur en de eigenschappen van vers en verhard beton.

Luchtbelvormers staan bekend om hun gunstige invloed op de duurzaamheid van beton in termen van verbetering van de vorst-dooibestandheid. LBV's zouden een uniform systeem van geïsoleerde luchtbellen in het beton brengen. In deze masterproef wordt het effect van het gebruik van een LBV op andere parameters betreffende de duurzaamheid (porositeit, gasdoorlatendheid en capillariteit) onderzocht.

Veel onderzoek is reeds uitgevoerd op de invloed van het combineren van LBV en vliegas in beton op het totale luchthalte van beton. Het doel van dit onderzoek is om de interactie tussen LBV en vliegas te onderzoeken, en wat dit voor invloed heeft op de porositeit, gaspermeabiliteit, capillariteit en vorst-dooibestandheid van het beton.

Voor dit onderzoek werden 6 betonmengelingen vervaardigd: T(0,45) en T(0,45)A die een referentie-cementbeton voorstellen (met W/C-factor van 0,45), respectievelijk zonder en

met luchtbelvormer (suffix 'A'). Deze mengeling werd gekozen naar aanleiding van de in de norm NBN EN 206-1 voorgestelde mengeling T(0,45) die bestand hoort te zijn tegen de omgevingsklasse XF4: de strengste omgevingsklasse voor beton dat moet weerstaan aan vorst-dooicycli in de aanwezigheid van dooizouten. Daarnaast werd gebruik gemaakt van 2 verschillende types vliegass, type I en type II, waarbij het belangrijkste verschil in de fijnheid van de vliegass zit: type I is de helft fijner dan type II. Deze betonmengelingen zijn FA(1)50, FA(1)50A, FA(2)50 en FA(2)50A (cementvervanging door vliegass = 50%). De water/bindmiddel-factor van deze mengelingen bedroeg 0,35.

De (open) porositeit is een belangrijke parameter in de weerstand van beton tegen zowel carbonatatie als chloride-indringing. Voor de hier beproefde mengelingen stijgt zowel de capillaire als totale porositeit wanneer vliegass gebruikt is in het beton, met geen verschil tussen de HVFA-mengelingen. Het effect van de tragere puzzolane reactie is duidelijk te zien op de verschillende leeftijden, daar de capillaire porositeit significant daalt voor alle mengelingen behalve FA(2)50A tussen 1 en 3 maand ouderdom. De additie van LBV zorgt bij alle mengelingen voor een toename van de porositeit, die in mindere mate opgemerkt wordt bij FA(1)50A daar het fijnere vliegass FA1 de LBV meer adsorbeert.

Gasdoorlatendheid van beton is een zeer bepalende factor voor de duurzaamheid van beton. Een gemakkelijke indringing van  $O_2$  en  $CO_2$  kan immers leiden tot carbonatatiegeïnitieerde corrosie. FA1-beton vertoont een kleinere gasdoorlatendheid dan het referentiebeton en FA2-beton vertoont geen merkbaar verschil met referentiebeton. Wanneer LBV werd toegevoegd aan het beton, zorgt dat bij alle mengelingen voor een significante stijging van de gasdoorlatendheid, die opnieuw in mindere mate merkbaar is bij FA(1)50A.

Capillaire opzuiging in beton kan een negatieve invloed hebben op de duurzaamheid van beton daar aggressieve stoffen in het beton zouden kunnen meegezogen worden. De capillaire opzuiging in HVFAbeton was lichtelijk meer dan in het referentiebeton. De inbreng van LBV had geen effect op de capillaire opzuiging.

Vorst-dooibestandheid is op zich een belangrijke duurzaamheidskenmerk voor beton. Additie van LBV zorgt hier voor het verwachte effect: de afschilfering van het beton werd telkens significant verlaagd. Het effect was opnieuw in mindere mate te zien bij FA1-beton dan FA2-beton. T(0,45)A, FA(1)50A en FA(2)50A halen dan ook de vooropgestelde norm i.v.m. maximale afschilfering. Vliegassbeton vertoont echter een zwakkere weerstand tegen vorst-dooicycli met dooizouten ten opzichte van het referentiebeton. Ook T(0,45) haalt de norm.

Als algemeen besluit kan gesteld worden dat de toevoeging van luchtbelvormers de vorst-dooibestandheid vergroot, geen effect heeft op de capillaire opzuiging van beton en een nefaste invloed heeft op andere duurzaamheidseigenschappen van beton: de gaspermeabiliteit en open porositeit worden significant verhoogd. Waarschijnlijk brengen luchtbelvormers geen systeem van geïsoleerde luchtbellen aan in de cement matrix, maar zouden de luchtbellen ook verbonden kunnen zijn met elkaar, wat een vrij pad creëert voor schadelijke gassen (bv.  $O_2$  voor de corrosie van wapeningsstaal) in beton. In vliegassbeton is het effect van de luchtbelvormers meer duidelijk wanneer een grover vliegass gebruikt wordt. Een fijner vliegass lijkt de luchtbelvormer meer te adsorberen. Op alle geteste betonmengelingen hadden de luchtbelvormers dezelfde invloed op de duurzaamheidseigenschappen: zowel op vliegassbeton als op cementbeton.

# THE EFFECT OF AIR ENTRAINING AGENTS ON THE DURABILITY OF CONCRETE CONTAINING FLY ASH

Jamie Furniere

Supervisor(s): Prof. Dr. Ir. N. De Belie, Ir.- Arch. Ph. Van den Heede

**Abstract** – This paper describes the results of a research on the durability of fly ash concrete. Six concrete mixtures were tested for porosity, gas permeability, capillarity and freeze-thaw durability in combination with deicing salts. They have also been examined using fluorescence microscopy and air-void-analysis. The influence of the incorporation of an air entraining agent (AEA) on some of the durability parameters was examined.

**Keywords** – fly ash concrete, air entraining agents, durability, permeability

## I. INTRODUCTION

The production of Portland cement consumes a great deal of energy and produces a considerable amount of CO<sub>2</sub> per year. The environmental impact of the production of concrete can be reduced by replacing cement used in concrete by fly ash, which is a by-product of the combustion of pulverized coal [1]. Fly ash is a pozzolanic material which reacts with the hydration products coming from the hydration of Portland cement. The replacement of a large quantity of cement by fly ash has an important influence on the composition, microstructure and properties of fresh and hardened concrete [1].

AEAs are known for their beneficial effect on the durability of concrete in terms of improving the freeze/thaw-resistance in combination with deicing salts. AEAs create a uniform system of isolated air bubbles into the concrete. In this paper, the effect of using an AEA on other durability parameters (porosity, gas permeability and capillarity) has been examined.

A lot of research has already been performed on the influence of combining AEAs and fly ash in concrete on the overall air content of the concrete. Little research has been done on the parameters concerning the durability of fly ash concrete containing AEAs. The aim of this paper is to examine the interaction between AEAs and fly ash, and its reflection on porosity, gas permeability, capillary sorption and freeze/thaw-resistance.

## II. MATERIALS

Six different concrete mixtures were made to examine the durability: two reference mixtures T(0,45) and T(0,45)A with 100% Portland cement (suffix 'A' stands for the addition of an AEA) and two different fly ash mixtures, type 1 and type 2, named FA(1)50 and FA(2)50. The two

fly ash mixtures were also combined with an AEA to form FA(1)50A and FA(2)50A. In the fly ash mixtures, 50% of the cementitious material was replaced by fly ash, and the water/binder-ratio was 0,35. In the reference mixtures, the water/cement-ratio was 0,45. The mixture proportions are given in Table 1. The big difference between the fly ashes is in their fineness: FA1 had a 45µm-fineness of 13,2% and FA2 26,6% so FA1 is much finer.

## III. TESTING & RESULTS

### A. Open porosity

To check the properties of the pores in the different mixtures, automatic air-void-analysis was performed using the Rapid Air 457. To make a visual analysis, fluorescence microscopy was performed. Finally, the open porosity was measured using the vacuum saturation method (NBN B05-202 (1976)). From these tests, it could be concluded that the use of an AEA in HVFA-concrete resulted in a smaller mean pore size than in ordinary fly ash concrete or OPC. Also that there was practically no air content increase with the addition of AEA in FA(1)-concrete (+1,3%) while there is a significant air content increase in the FA(2)-concrete (+2,5%) and the OPC concrete (+6,5%). Fly ash adsorbs the AEA, and this effect is larger for a finer fly ash. The total open porosity of fly ash concretes was higher than of OPC-concrete. The effect of the addition of the AEA was the same as on the air content: little influence on the FA(1)50 but a significant increase of the open porosity of the T(0,45) and FA(2)50.

### B. Gas permeability

Gas permeability was measured using the 'Cembureau' permeameter (RILEM TC 116-PCD (1999)). The differences between concretes of 1 and 3 months of age showed that the gas permeability of fly ash concrete decreases significantly with age and OPC concrete does not have that same effect. Again there is a big influence of the AEA on the gas permeability: for every concrete mixture there is an increase in permeability and the increase is the greatest for T(0,45)A (x2,76) and FA(2)50A (x2,28) in comparison with FA(1)50A (x1,57). This means that an AEA doesn't only create a system of isolated air bubbles. The air bubbles are probably also connected.. FA(1)-concrete seemed to be less gas permeable than the OPC-concrete, this can be caused by the fineness of FA(1)

in comparison with cement, which makes the pore structure more fine and dense. The gas permeability can be plotted against the open porosity to see clearer which concrete will perform best on the subject of gas permeability and porosity together (Figure 1). It can be seen that the addition of an AEA increases both open porosity and gas permeability. This increase happens in an equal manner for the OPC concrete and the FA2-concrete and in a less noticeable way for the FA1-concrete.

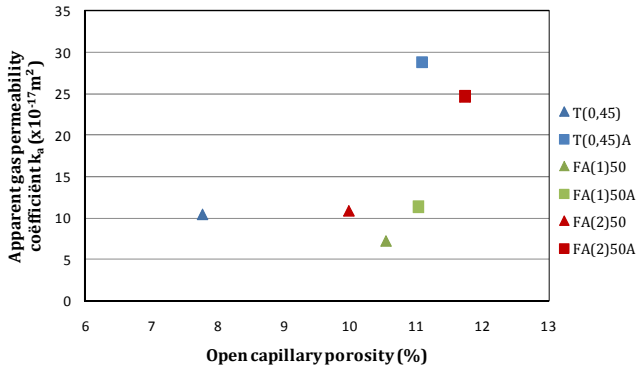


Figure 1: Gas permeability and open capillary porosity

#### B. Capillary sorption

A capillary sorption test was performed in accordance with NBN B15-217(1984). The results of this test showed no significant difference in the weight of the water being capillary absorbed in the concrete after 336h between the age of 1 month and 3 months. This is in contradiction with [2] where it is concluded that the capillary suction should increase with increasing age. There was also no difference to be found between the concretes with or without the AEA. Fly ash concretes had a slightly higher capillary water uptake than OPC concrete ( $\pm 25\%$ ). Finer pores in fly ash concrete, which can absorb more water, could explain this phenomenon.

#### C. Freeze-thaw durability in combination with deicing salts

This test was performed in accordance with NBN EN 1338. When AEAs are added to the concrete, there is a big

improvement of the salt scaling resistance. That is the AEAs main goal so that result was expected. Fly ash concrete was much less resistant to salt scaling than OPC concrete. The scaling was twice as high for HVFA concrete than for the OPC concrete. This effect could not be explained and based on the strength development of fly ash concretes at later ages, the 'glue spalling mechanism' as given in [3] could be rejected as well. For now, there is no consensus yet on how to explain the salt scaling mechanism.

#### IV. CONCLUSIONS

The addition of AEAs improves the salt scaling resistance, has no effect on capillary suction of concrete, but badly influences other durability-characteristics of concrete: gas permeability and open porosity are significantly increased. Probably AEAs do not only create isolated air bubbles in the cement matrix, but the bubbles could also be interconnected, which creates a free path for harmful gases (e.g.  $\text{O}_2$  for the corrosion of reinforcement bars) into the concrete.

On HVFA-concretes, the effect of the addition of AEAs is more noticeable when coarser fly ash is used. Finer fly ash seems to adsorb the AEA. On all tested concrete mixtures, the AEAs had the same influence on the durability characteristics so this is not only the case for HVFA-concrete, but also for OPC concrete.

#### V. REFERENCES

- [1] Papadakis V.G., Fardis M.N., Vayenas C.G. (1992) *Hydration and Carbonation of Pozzolanic Cements*, ACI Materials Journal, Vol. 89 No.2, March-April 1992, p. 119-130
- [2] Audenaert K., (2006). *Transportmechanismen in zelfverdichtend beton in relatie met carbonatatie en chloridepenetratie*, doctoraatsthesis, Universiteit Gent
- [3] Valenza J.J., Scherer G.W., (2007). *A review of salt scaling: II. Mechanisms*, Cement and Concrete Research 37, p.1022-1034

|                                      | T(0,45) | T(0,45)A | FA(1)50 | FA(1)50A | FA(2)50 | FA(2)50A |
|--------------------------------------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| sand 0/4 [kg/m <sup>3</sup> ]        | 715     | 715      | 645     | 645      | 645     | 645      |
| aggregate 2/8 [kg/m <sup>3</sup> ]   | 515     | 515      | 465     | 465      | 465     | 465      |
| aggregate 8/16 [kg/m <sup>3</sup> ]  | 671     | 671      | 606     | 606      | 606     | 606      |
| CEM I 52,5 N [kg/m <sup>3</sup> ]    | 340     | 340      | 225     | 225      | 225     | 225      |
| water [kg/m <sup>3</sup> ]           | 153     | 153      | 157,5   | 157,5    | 157,5   | 157,5    |
| fly ash type I [kg/m <sup>3</sup> ]  | -       | -        | 225     | 225      | -       | -        |
| fly ash type II [kg/m <sup>3</sup> ] | -       | -        | -       | -        | 225     | 225      |
| AEA [ml/kg binder]                   | -       | 2        | -       | 5        | -       | 5        |
| superplasticizer [ml/kg binder]      | 2       | 2        | 7       | 7        | 5       | 5        |
| water/binder-ratio [-]               | 0,45    | 0,45     | 0,35    | 0,35     | 0,35    | 0,35     |

Table 1: Concrete mixtures to be examined

# Inhoudstafel

|                                                                               |             |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Voorwoord .....</b>                                                        | <b>ii</b>   |
| <b>Overzicht .....</b>                                                        | <b>iv</b>   |
| <b>Extended abstract .....</b>                                                | <b>vi</b>   |
| <b>Afkortingen en symbolen.....</b>                                           | <b>xiii</b> |
| <b>Hoofdstuk 1: Inleiding.....</b>                                            | <b>1</b>    |
| 1.1 Duurzaamheid van beton & transportmechanismen .....                       | 1           |
| 1.2 Probleemstelling .....                                                    | 1           |
| 1.3 Te verrichten onderzoek .....                                             | 3           |
| <b>Hoofdstuk 2: Theoretische beschouwingen - Literatuurstudie .....</b>       | <b>4</b>    |
| 2.1 Mechanisme van luchtinsluitingen – gebruik van luchtbelvormers.....       | 4           |
| 2.2 Gebruik van vliegias in beton .....                                       | 7           |
| 2.2.1 Eigenschappen van vliegias .....                                        | 7           |
| 2.2.2 Invloed en effect van vliegias in beton .....                           | 9           |
| 2.3 Interactie van luchtbelvormers en vliegias (effect op luchtgehalte) ..... | 10          |
| 2.4 Invloed van vliegias en luchtbelvormers op betoneigenschappen .....       | 12          |
| 2.4.1 Porositeit en transporteigenschappen.....                               | 12          |
| 2.4.1.1 Porositeit .....                                                      | 12          |
| 2.4.1.2 Capillariteit.....                                                    | 15          |
| 2.4.1.3 Gasdoorlatendheid.....                                                | 16          |
| 2.4.2 Vorst-dooibestandheid .....                                             | 18          |
| 2.4.2.1 Vorstbestandheid .....                                                | 19          |
| 2.4.2.2 Vorst-dooibestandheid in aanwezigheid van dooizouten.....             | 20          |
| 2.4.2.3 Vereisten van beton voor goede vorst-dooiweerstand.....               | 23          |
| 2.5 Druksterkte van beton.....                                                | 23          |
| 2.6 Relatie tussen verschillende betoneigenschappen .....                     | 24          |



|                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Hoofdstuk 3: Vooronderzoek invloed interactie luchtbelvormer – vliegas op luchtgehalte</b> |           |
| 3.1 Inleiding.....                                                                            | 26        |
| 3.2 Materialen.....                                                                           | 26        |
| 3.3 Methode.....                                                                              | 28        |
| 3.4 Resultaten & discussie .....                                                              | 28        |
| 3.5 Besluit .....                                                                             | 30        |
| <b>Hoofdstuk 4: Materialen &amp; Methodes.....</b>                                            | <b>31</b> |
| 4.1 Materialen.....                                                                           | 31        |
| 4.2 Methodes .....                                                                            | 34        |
| 4.2.1 Bepaling van de druksterkte .....                                                       | 34        |
| 4.2.2 Porositeit en transporteigenschappen.....                                               | 34        |
| 4.2.2.1 Vacuümverzadiging .....                                                               | 34        |
| 4.2.2.2 Capillariteit.....                                                                    | 36        |
| 4.2.2.3 Gasdoorlatendheid.....                                                                | 38        |
| 4.2.3 Vorst-dooi bestandheid in combinatie met dooizouten .....                               | 41        |
| 4.2.4 Fluorescentiemicroscopie op slijpplaatjes.....                                          | 43        |
| 4.2.5 Air-void-analyse .....                                                                  | 47        |
| 4.2.5.1 Voorbereiding van de proefstukken.....                                                | 47        |
| 4.2.5.2 Uitvoering van de metingen met de RapidAir457 .....                                   | 49        |
| 4.2.5.3 Instelling van de parameters .....                                                    | 51        |
| 4.2.5.4 Resultaten uit de air-void-analyse .....                                              | 52        |
| <b>Hoofdstuk 5: Experimenteel proefprogramma: resultaten &amp; discussie.....</b>             | <b>54</b> |
| 5.1 Statistische verwerking van de resultaten .....                                           | 54        |
| 5.2 Druksterktes .....                                                                        | 55        |
| 5.2.1 Resultaten .....                                                                        | 55        |
| 5.2.2 Invloed van de additie van luchtbelvormer .....                                         | 56        |
| 5.2.3 Vergelijking vliegasbeton – traditioneel beton .....                                    | 56        |

|       |                                                                              |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.2.4 | Invloed van de ouderdom .....                                                | 56 |
| 5.2.5 | Besluit .....                                                                | 57 |
| 5.3   | Capillariteit .....                                                          | 57 |
| 5.3.1 | Resultaten .....                                                             | 57 |
| 5.3.2 | Invloed van de additie van luchtbelvormer .....                              | 59 |
| 5.3.3 | Invloed van de ouderdom .....                                                | 60 |
| 5.3.4 | Invloed van de droogtemperatuur.....                                         | 60 |
| 5.3.5 | Vergelijking traditioneel beton – vliegasbeton .....                         | 60 |
| 5.3.6 | Besluit .....                                                                | 61 |
| 5.4   | Gasdoorlatendheid .....                                                      | 62 |
| 5.4.1 | Resultaten .....                                                             | 62 |
| 5.4.2 | Invloed van de additie van luchtbelvormer .....                              | 65 |
| 5.4.3 | Vergelijking traditioneel beton – vliegas beton & invloed van de ouderdom .. | 66 |
| 5.4.4 | Besluit .....                                                                | 67 |
| 5.5   | Porositeit.....                                                              | 68 |
| 5.5.1 | Resultaten .....                                                             | 68 |
| 5.5.2 | Vergelijking wandproefstukken met proefstukken uit de kern .....             | 70 |
| 5.5.3 | Invloed van de additie van luchtbelvormer .....                              | 71 |
| 5.5.4 | Invloed van ouderdom.....                                                    | 71 |
| 5.5.5 | Vergelijking traditioneel beton – vliegasbeton .....                         | 72 |
| 5.5.6 | Besluit .....                                                                | 73 |
| 5.6   | Air-void analyse .....                                                       | 74 |
| 5.6.1 | Resultaten .....                                                             | 74 |
| 5.6.2 | Invloed van de additie van luchtbelvormer .....                              | 77 |
| 5.6.3 | Vergelijking vliegasbeton - traditioneel beton en invloed van ouderdom ..... | 78 |
| 5.6.4 | Besluit .....                                                                | 80 |
| 5.7   | Fluorescentiemicroscopie op slijpplaatjes.....                               | 81 |

|                                                                                          |                                                                            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.7.1                                                                                    | Kwalitatief onderzoek.....                                                 | 81         |
| 5.7.1.1                                                                                  | Invloed van de additie van luchtbelvormer.....                             | 81         |
| 5.7.1.2                                                                                  | Verschil traditioneel beton – vliegasbeton.....                            | 83         |
| 5.7.1.3                                                                                  | Invloed bekistingvlak – niet-bekistingsvlak.....                           | 84         |
| 5.7.2                                                                                    | Kwantitatief onderzoek.....                                                | 84         |
| 5.7.3                                                                                    | Besluit.....                                                               | 86         |
| 5.8                                                                                      | Vorst-dooibestandheid in combinatie met dooizouten.....                    | 86         |
| 5.8.1                                                                                    | Resultaten.....                                                            | 86         |
| 5.8.2                                                                                    | Invloed van de additie van luchtbelvormer.....                             | 88         |
| 5.8.3                                                                                    | Vergelijking traditioneel beton – vliegasbeton & invloed van ouderdom..... | 88         |
| 5.8.4                                                                                    | Besluit.....                                                               | 90         |
| <b>Hoofdstuk 6: Relaties tussen de verschillende resultaten .....</b>                    |                                                                            | <b>92</b>  |
| 6.1                                                                                      | Effectiviteit van de luchtbelvormer & luchtgehalte.....                    | 92         |
| 6.2                                                                                      | Grootte van de poriën.....                                                 | 95         |
| 6.3                                                                                      | Verband porositeit – druksterkte.....                                      | 95         |
| 6.4                                                                                      | Verband porositeit – gasdoorlatendheid.....                                | 96         |
| 6.5                                                                                      | Verband porositeit – capillaire wateropsorping.....                        | 98         |
| 6.6                                                                                      | Weerstand tegen vorst-dooicycli in combinatie met dooizouten.....          | 99         |
| 6.6.1                                                                                    | Verklaring slechte resultaten vliegasmengelingen.....                      | 99         |
| 6.6.2                                                                                    | Verantwoording verwerpen resultaat van FA(2)50A op 3 maand ouderdom.....   | 99         |
| <b>Hoofdstuk 7: Conclusies.....</b>                                                      |                                                                            | <b>102</b> |
| 7.1                                                                                      | Algemene besluitvorming.....                                               | 102        |
| 7.2                                                                                      | Aanbevelingen voor verder onderzoek.....                                   | 105        |
| <b>Bijlage A: Productfiche luchtbelvormer Micro-Air 103 con 4% .....</b>                 |                                                                            | <b>107</b> |
| <b>Bijlage B: Productfiche superplastificeerder Glenium 51 con. 35% .....</b>            |                                                                            | <b>108</b> |
| <b>Bijlage C: Korrelverdelingsdiagramma's van het gebruikte zand en granulaten .....</b> |                                                                            | <b>109</b> |
| <b>Bijlage D: Resultaten proeven op vers beton.....</b>                                  |                                                                            | <b>110</b> |

|                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Bijlage E: Resultaten uit de capillaire wateropslorping .....</b>                  | <b>111</b> |
| <b>Bijlage F: Resultaten uit de gaspermeabiliteitsproef .....</b>                     | <b>112</b> |
| <b>Bijlage G: Resultaten m.b.t. de porositeit .....</b>                               | <b>115</b> |
| <b>Bijlage H: Resultaten uit de airvoid-analyse .....</b>                             | <b>116</b> |
| <b>Bijlage I: Resultaten uit de fluorescentiemicroscopie .....</b>                    | <b>120</b> |
| <b>Bijlage J: Resultaten uit de vorst-dooiproef in combinatie met dooizouten.....</b> | <b>124</b> |
| <b>Bijlage K: Vergelijking luchtgehaltes uit meerdere proeven .....</b>               | <b>126</b> |
| <b>Referentielijst .....</b>                                                          | <b>127</b> |
| <b>Lijst van figuren .....</b>                                                        | <b>133</b> |
| <b>Lijst van tabellen .....</b>                                                       | <b>136</b> |

# Afkortingen en symbolen

|                   |                                                                |                  |
|-------------------|----------------------------------------------------------------|------------------|
| $A_\alpha$        | luchtgehalte proefstuk air-void-analyse                        | %                |
| FA                | vliegas                                                        | -                |
| FA(1)50           | vliegas type I-mengeling zonder luchtbelvormer                 | -                |
| FA(1)50A          | vliegas type I-mengeling met luchtbelvormer                    | -                |
| FA(2)50           | vliegas type II-mengeling zonder luchtbelvormer                | -                |
| FA(2)50A          | vliegas type II-mengeling met luchtbelvormer                   | -                |
| FA1               | vliegas type II                                                | -                |
| FA2               | vliegas type I                                                 | -                |
| HVFA              | hoog-volume-vliegas                                            | -                |
| $K_{28}$          | geschatte intrinsieke gaspermeabiliteitscoëfficiënt (28 dagen) | $m^2$            |
| $K_{90}$          | geschatte intrinsieke gaspermeabiliteitscoëfficiënt (90 dagen) | $m^2$            |
| $k_a$             | experimentele schijnpare gaspermeabiliteitscoëfficiënt         | $m^2$            |
| $k_i$             | experimentele intrinsieke gaspermeabiliteitscoëfficiënt        | $m^2$            |
| LBV               | luchtbelvormer                                                 | -                |
| $l_{gem}$         | gemiddelde koordelengte                                        | mm               |
| $L_M$             | massaverlies per oppervlakte-eenheid bij vorst-dooiproef       | $kg/m^2$         |
| LOI               | loss-on-ignition of gloeiverlies                               | %                |
| $L_S$             | spacing-factor of afstandsfactor                               | mm               |
| $m_d$             | massa van het droge proefstuk                                  | kg               |
| $m_s$             | massa van het verzadigde proefstuk                             | kg               |
| $m_w$             | massa van het verzadigde proefstuk, onder water gewogen        | kg               |
| $P_1$             | druk aan inlaat permeameter                                    | bar              |
| $P_2$             | druk aan uitlaat permeameter                                   | bar              |
| $P_M$             | gemiddelde druk over gaspermeabiliteitsproefstuk               | bar              |
| $Q$               | gasdebiet doorheen gaspermeabiliteitsproefstuk                 | $m^3/s$          |
| $Q_c$             | massatoename per eenheidsoppervlak na 336u bij capillariteit   | $kg/m^2$         |
| $S$               | capillaire opslorplingscoëfficiënt                             | $kg/m^2\sqrt{h}$ |
| T(0,45)           | referentiemengeling zonder luchtbelvormer                      | -                |
| T(0,45)A          | referentiemengeling met luchtbelvormer                         | -                |
| W/C               | water-cement factor                                            | -                |
| $\alpha_a$        | specifieke oppervlakte                                         | $mm^{-1}$        |
| $\epsilon_{0,28}$ | totale open porositeit op 28 dagen ouderdom                    | %                |
| $\epsilon_{0,90}$ | totale open porositeit op 90 dagen ouderdom                    | %                |
| $\epsilon_{c,28}$ | capillaire open porositeit op 28 dagen ouderdom                | %                |
| $\epsilon_{c,90}$ | capillaire open porositeit op 90 dagen ouderdom                | %                |
| $\mu_d$           | dynamische viscositeit van gas                                 | $Nsm^{-2}$       |

# Hoofdstuk 1

## Inleiding

### 1.1 Duurzaamheid van beton & transportmechanismen

Het is algemeen aanvaard dat de duurzaamheid van beton voor een groot deel beïnvloed wordt door de weerstand tegen het transport van agressieve elementen in de poriën. Deze agressieve elementen kunnen aanwezig zijn in vloeibare of gasvormige vorm en het transport ervan gebeurt via het poriënnetwerk in de matrix van de cementpasta of via microscheurtjes. Een waaier aan factoren kan het transport van deze vloeistoffen regelen. Sommige van deze factoren zijn: de vloeistof zelf en de lokale concentratie ervan, de omgevingsfactoren, de poriënstructuur van het beton, de poriënstraal, de verzadigingsgraad van het poriënsysteem en de temperatuur.

Wat vloeistoftransport betreft, zijn er 2 mogelijke transportmechanismen te onderscheiden: namelijk de doorlatendheid, veroorzaakt door een drukgradiënt in het beton, en de capillaire opzuiging die zijn oorzaak vindt in verschillen in oppervlaktespanning. Voor het transport van gassen zijn eveneens 2 mechanismen te noemen: gasdoorlatendheid en diffusie.

### 1.2 Probleemstelling

Om de weerstand van beton tegen vorst-dooi-cycli in combinatie met dooizouten te verbeteren, worden meestal luchtbelvormers toegevoegd aan het beton. De luchtbelvormers brengen microluchtballen aan in het beton. Deze luchtballen vormen eigenlijke expansiekamers voor het water dat het beton is ingedrongen onder invloed van eerder vermelde transportmechanismen, en dat uitzet door bevriezing. Wanneer de luchtballen niet aanwezig zouden zijn, zou die uitzetting gebeuren in kleine scheuren, eventueel reeds aanwezig in het beton, waardoor betonstukjes zouden kunnen afspringen indien de scheuren de expansie niet aankunnen. De luchtbelvormers vergroten dus in zekere mate de vorst-dooibestendheid van beton.

Aangezien luchtbelvormers verondersteld worden geïsoleerde luchtholten in het beton te brengen, wordt over het algemeen aangenomen dat deze kunstmatig ingebrachte luchtbellen het beton niet toegankelijker maken voor schadelijke agentia van buitenaf. Resultaten van recent onderzoek aan het Laboratorium Magnel voor Betononderzoek in combinatie met bevindingen in de literatuur hebben echter het vermoeden doen rijzen dat dit niet helemaal klopt. Zo zouden luchtbelvormers wel degelijk een nadelig effect kunnen hebben op de porositeit en transporteigenschappen van het beton, wat uiteraard gevolgen heeft voor de duurzaamheid.

Om de milieu-impact van beton zoveel mogelijk in te perken, is men op zoek gegaan naar alternatieven in de mengselsamenstelling en kwam men op het product 'vliegas'. Wanneer dit wordt gebruikt in plaats van portlandcement, wordt het energieverbruik en de CO<sub>2</sub>-emissie ter vervaardiging van beton wat teruggeschroefd. Door het gebruik van vliegas gebruikt men ook een reststof in plaats van natuurlijke materialen. Daarom maakt men vaak gebruik van vliegas ter vervanging van portlandcement. Het gebruik van vliegas heeft vele voordelen ten opzichte van het gebruik van portlandcement in beton. Hier wordt verder op ingegaan in paragraaf 2.2.2.

Behoorlijk wat onderzoek is al verricht naar de interactie tussen vliegas en luchtbelvormers in beton, zeker inzake het ingebrachte luchtgehalte. Weinig onderzoek is echter verricht naar de invloed van luchtbelvormers op andere duurzaamheidseigenschappen buiten de vorst/dooi-bestandheid van vliegasbeton. Het is zeer de vraag hoe de toevoeging van een luchtbelvormer eigenschappen zoals de porositeit en de gas- en waterpermeabiliteit van vliegasbeton beïnvloedt.

Permeabele porositeit van beton is een belangrijk begrip in verband met de duurzaamheid van het beton. Ze beïnvloedt namelijk de transportmogelijkheden van gassen en vloeistoffen doorheen het beton. Een poreus beton laat het transport van chloriden, zuurstof, koolstofdioxide en vocht toe, wat het corroderen van wapeningsstaven in het beton in de hand werkt. De afschilfering van beton door vorst- en dooicycli is ook gerelateerd aan de permeabele porositeit van het beton. Ook sulfaat-aantasting en schade ten gevolge van alkali-silica-reacties zijn hieraan gerelateerd.

De doelstelling van dit afstudeerwerk is na te gaan welke interactie precies plaatsvindt tussen vliegass en luchtbelvormer en welke invloed dit heeft op de duurzaamheidseigenschappen van het beton. Er wordt gepoogd een verband te zoeken tussen het ingebrachte luchtgehalte, de porositeit, de permeabiliteit en de daarmee gepaard gaande duurzaamheid van vliegassbeton met luchtbelvormer.

Naargelang een bepaalde milieuklasse waaraan een gebruikt beton moet voldoen wordt een bepaald betontype voorgesteld. Volgens NBN EN 206-1 dient een betonmengsel dat blootgesteld is aan de ergste graad van vorst-dooi aanvallen in combinatie met dooizouten (blootstellingsklasse XF4) (zoals op de wegen en mariene structuren het geval is) een watercementfactor van ten hoogste 0,45 te bezitten en een minimaal luchtgehalte van 4% te halen in vers beton. Hetzelfde wordt teruggevonden in NBN B 15-001.

### **1.3 Te verrichten onderzoek**

In dit afstudeerwerk worden verschillende proeven uitgevoerd. Ten eerste zal een macroscopisch onderzoek verricht worden naar de interactie tussen luchtbelvormer en vliegass door te kijken naar verschillen qua porositeit en transporteigenschappen tussen mengelingen met en zonder luchtbelvormer in combinatie met of zonder vliegass. Daartoe worden vacuümverzadigingsproeven, capillariteitsproeven en gasdoorlatendheidsproeven uitgevoerd. Ook de verbeterde vorstweerstand van beton met luchtbelvormers, al dan niet in combinatie met vliegass, wordt geëvalueerd. Daartoe wordt een vorst-dooizoutproef uitgevoerd.

Ten tweede wordt ook microscopisch onderzoek verricht om voor een gegeven dosering van de luchtbelvormer na te gaan of er een eenduidig verband bestaat tussen vliegassgehalte en gehalte aan kunstmatig ingebrachte luchtbellen. In dit onderzoek wordt ook gekeken of de holtes met elkaar in verbinding staan, omdat dit het transport van vloeistoffen en gassen toch vergemakkelijkt. Voor dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van fluorescentiemicroscopie op slijpplaatjes en air-void-analyse.



# Hoofdstuk 2

## Theoretische beschouwingen - Literatuurstudie

### 2.1 Mechanisme van luchtinsluitingen – gebruik van luchtbelvormers

In beton waarin luchtbelvormers worden gebruikt zijn 3 klassen van poriën aanwezig (Chatterji, 2003). Vooreerst zijn er de gelporiën: deze zijn een systeem van heel fijne poriën in de dichte pakking van cementhydratieproducten. De diameter van deze poriën is heel klein (tot 10nm). Water aanwezig in deze klasse van poriën bevriest zelden onder normale vriescondities van beton. Een tweede klasse van luchtbellens zijn de capillaire poriën (diameter tot 0,5µm volgens Chatterji (2003) en Boel (2006)). Deze zijn groter dan de gelporiën en worden gevormd doordat het volume van de hydratieproducten van het verhardende cement kleiner is dan het oorspronkelijke volume van de samenstellende componenten. Lagen van cementhydratieproducten met daarin de gelporiën scheiden de individuele capillaire poriën van elkaar. Water aanwezig in deze poriën bevriest wel onder normale vriescondities. Door de kleine afmetingen van de capillaire poriën, bevriest het water erin op een temperatuur lager dan 0°C. Hoe kleiner de afmetingen, hoe lager de vriestemperatuur. Kunstmatig ingebrachte luchtbellens behoren tot een derde klasse, ze hebben een diameter groter dan 10 µm en variëren in grootte meestal tussen 20 en 500 µm (Betoniek). De grootte van deze luchtbellens is veel groter dan de andere twee klassen van poriën, en ze zouden normaal gezien leeg moeten zijn. Dit komt doordat luchtbelvormer ervoor zorgt dat geïsoleerde luchtbellens worden ingebracht. In een verzadigd beton zijn enkel de capillaire en de gelporiën verzadigd.

Luchtbelvormers produceren dus een groot aantal kleine en afzonderlijk luchtbellens die gelijkmatig in de massa verdeeld zijn en die na verharding blijven bestaan. De aanwezige luchtholten fungeren als expansieruimte voor het bevriezende water (water zet uit met 9% wanneer het bevriest) zodat geen inwendige drukken kunnen opgebouwd worden.

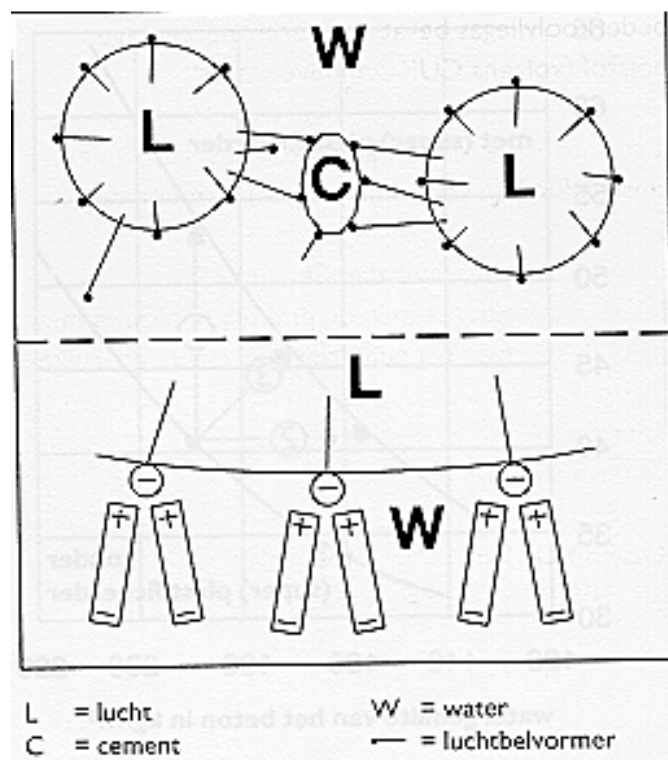
Het insluiten van lucht in kleine sub-millimeter luchtbellen (kleiner dan  $250\mu\text{m}$ ) verbetert de weerstand tegen vorst-dooi-cycli en verbetert de verwerkbaarheid en cohesie. Aan de andere kant reduceert een te hoge luchthoeveelheid de sterkte van het beton (Pedersen et al., 2007). Als vuistregel kan gehanteerd worden dat voor elke procent lucht de sterkte met 3 à 5% afneemt. (Betoniek) Om de invloed op de sterkte in te schatten, kunnen we de extra ingebrachte lucht ook optellen bij de hoeveelheid water voor de berekening van de effectieve water-cementfactor.

Een fundamentele tekortkoming in onderzoek en literatuur de dag van vandaag is dat luchtinsluitingen meestal gespecificeerd worden aan de hand van de totale luchtinhoud van het beton. In (Powers, 1954) wordt gesteld dat ook de luchtholte-grootte en distributie meer bijdragen tot de vorst-dooibestandheid van beton, de hoofdreden waarom luchtbelvormers worden gebruikt. Voor een gegeven luchthoeveelheid in beton zal de vorst-dooibestandheid klein zijn wanneer de spacingfactor of afstandsfactor, de diameter en de specifieke oppervlakte groter zijn. Hogere luchtgehaltes geven over het algemeen een beter specifiek oppervlak en een betere afstandsfactor, maar een hoog luchtgehalte zorgt niet automatisch voor goede karakteristieken van het luchtholtensysteem. Goede eigenschappen zijn trouwens eveneens met lage luchtgehaltes te verkrijgen. Over de afstandsfactor en de specifieke oppervlakte wordt verder ingegaan in paragraaf 2.4.2.

Chemisch lucht insluiten in beton is moeilijk om te categoriseren in de zin van een conventioneel chemisch proces. Volgens (Du et al., 2004) kan het worden gezien als een emulsie van lucht in het totale-cement-water systeem of schuimvorming in de vloeibare fase en vastgehouden in het vaste netwerk, of beide.

Luchtbelvormers zijn vooral mengsels van verschillende oppervlakteactieve stoffen. Op dit moment hebben de meeste luchtbelvormers een basis van vinsolharsen. De beschikbaarheid van deze grondstof neemt in de toekomst sterk af waardoor alternatieve producten een steeds grotere rol zullen gaan spelen. Naast vinsolharsen worden ook wel vetzuren en alkylsulfaten toegepast (Betoniek). Om de rol die oppervlakteactieve stoffen spelen in dit proces te kennen, is het belangrijk om hun chemische eigenschappen te kennen (Du et al., 2004). De stoffen bestaan meestal uit 2 delen. De (negatieve) chemische eenheid die een sterke aantrekkingskracht heeft voor het solvent (water) wordt de hydrofiele kop genoemd.

De (positieve) moleculaire componenten die weinig aantrekkingskracht hebben voor water worden de hydrofobe staarten genoemd (Freeman et al., 1996) (Betoniek). Luchtbelvormers zijn overwegend negatief geladen. Het niet-polaire eind richt zich naar de binnenkant van de luchtbel en het polaire eind wordt geadsorbeerd aan het oppervlak van het cementdeel. Dit effect stabiliseert de luchtbellen, welke zouden samenvloeien tot grotere luchtbellen die het beton zouden verlaten, indien geen luchtbelvormers aanwezig zouden zijn (Pedersen et al., 2007).



Figuur 1: De werking van een luchtbelvormer in betonspecie (Betoniek)

De meest bruikbare chemische indeling van oppervlakteactieve stoffen is gebaseerd op de aard van de hydrofiele koppen, namelijk anionisch, kationisch, niet-ionisch en amfoteer. De meeste van de moderne luchtbelvormers zijn anionisch van karakter, omwille van de stabiliteit van de hiermee gegenereerde luchtbellen. De stabiliteit van de luchtbellen met behulp van kationische of niet-ionogene luchtbelvormers is twijfelachtig (Du et al., 2004).

De oppervlakken van de cementpartikels bevatten een hoge vrije oppervlakte-energie. De adsorptie van oppervlakteactieve moleculen aan het oppervlak van cementdeeltjes en aan eerder neergeslagen hydratatieproducten ter vermindering van de vrije oppervlakte-energie

geniet thermodynamisch de voorkeur. De adsorptie van ionische luchtbelvormers op vaste oppervlakken is hoog vanwege de geladen hoofdgroep van de gebruikte oppervlakteactieve stoffen.

Er zijn vele factoren die de werking van luchtbelvormers beïnvloeden, zoals daar zijn: de manier van mengen, de hoeveelheid cementpasta, de temperatuur van het beton, de kwaliteit van het gebruikte mengwater, de kwaliteit en eigenschappen van het gebruikte cement en zo ook de eigenschappen van de eventueel gebruikte vliegas. Voor een verdere uitwerking van deze invloedsfactoren wordt verwezen naar verdere specifieke literatuur (Du et al., 2004). Op de invloed van de eigenschappen van vliegas op de werking van luchtbelvormers wordt verder ingegaan in paragraaf 2.3.

## **2.2 Gebruik van vliegas in beton**

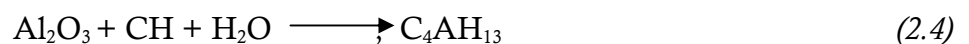
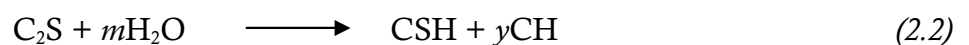
### **2.2.1 Eigenschappen van vliegas**

Vliegas is een nevenproduct dat ontstaat bij de verbranding van poederkool in de ovens van elektriciteitscentrales en dat langs elektrostatische weg uit de rookgassen gefilterd wordt. De chemische samenstelling van vliegas vertoont sterkte gelijkenis met natuurlijke puzzolanen als cement. Terwijl cementdeeltjes eerder hoekig van vorm zijn, is vliegas een fijn poeder dat hoofdzakelijk uit glasachtige, holle, bolvormige deeltjes bestaat. In vergelijking met gewone portlandklinker bezit vliegas minder CaO, waardoor het weinig of geen hydraulische eigenschappen bezit. De hoofdbestanddelen van vliegas zijn  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en CaO. Hun relatieve percentages hangen hoofdzakelijk af van het type kool dat werd verbrand in de energiecentrale. Vliegas, bekomen uit de verbranding van bitumineuze kolen zoals antraciet, bevat relatief weinig calciumoxide, CaO, en is gekend als een laag-calcium vliegas. Het verbranden van sub-bitumineuze kolen zoals ligniet resulteert in een as met een hogere CaO-inhoud en kan een hoog-calcium vliegas genoemd worden. ASTM classificeert laag-calcium vliegas als vliegas klasse F ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70 \text{ m-\%}$ ) en hoog-calcium vliegas als klasse C ( $70 \text{ m-\%} > \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 50 \text{ m-\%}$ ) (Pedersen et al., 2007). Vliegassen gebruikt in België zijn allen van het type F. Laag-calcium vliegas bezit enkel puzzolane eigenschappen, terwijl hoog-calcium vliegas naast puzzolane eigenschappen ook nog enigszins hydraulische eigenschappen bezit (Shafiq et al., 2007).

Een goede meetstaf om te weten hoeveel koolstof nog aanwezig is in de vliegas is een LOI-test (Loss On Ignition-test). Dit geeft geen informatie over de vorm of eigenschappen van het aanwezige koolstof, enkel het gehalte aan koolstof (het gloeiverlies) (Freeman, 1996). De classificatie van vliegas in België gebeurt aan de hand van die gloeiverlies-index en aan de hand van de fijnheid van de vliegas.

Vliegas bevat grote hoeveelheden  $\text{SiO}_2$  en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , die in de aanwezigheid van  $\text{H}_2\text{O}$  chemisch reageren met calciumhydroxide ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  of afgekort CH) om zo CSH te vormen. Dit calciumhydroxide is afkomstig van de reactie van het portlandcement met  $\text{H}_2\text{O}$  in het jonge beton. Dat wil zeggen dat de chemische reactie van de vliegas pas kan doorgaan wanneer het portlandcement al deels is gehydrateerd. De vliegas moet met andere woorden ‘geactiveerd’ worden. Door deze laattijdige reactie zal de hydratatie en de ontwikkeling van de sterkte van het vliegasbeton trager verlopen dan in traditioneel beton. Door Shafiq et al. (2007) werd opgemeten dat de druksterkte van vliegasbeton (met portlandcementvervanging van 40% door vliegas) op vrij jonge leeftijd (tot 14 dagen ouderdom) 35 tot 48% lagere druksterkte bezit dan cementbeton. Na 28 dagen ouderdom wint vliegasbeton geleidelijk aan aan druksterkte.

De reacties die doorgaan in het beton ter hydratatie van het portlandcement en de vliegas kunnen verkort als volgt neergeschreven worden (in Papadakis et al. (1992) kunnen de volledig uitgeschreven reacties teruggevonden worden):



Gewoon portlandcement bezit grote hoeveelheden tricalciumsilicaat ( $\text{C}_3\text{S}$ ) en dicalciumsilicaat ( $\text{C}_2\text{S}$ ) die reageren met water en zo calciumsilicaathydraat vormen (CSH), samen met calciumhydroxide ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  kortweg CH) (Berry et al., 1994). Deze reacties blijven vaak incompleet, waarbij nog ongehydrateerde cementkorrels gevonden worden in pasta's van hoge leeftijd. Algemeen gezien zal ongeveer 20 à 25 gewichtprocent  $\text{H}_2\text{O}$  gebonden worden met de productie van 20 tot 25 gewichtsprocent CH.

In beton waar hoge volumes vliegas worden gebruikt, wordt de puzzolane reactie niet volledig voltooid is omdat het vliegasgehalte relatief hoog is in vergelijking met het cementgehalte. Papadakis et al. (1992) vermelden dat voor cementvervangingen van meer dan 35 % door vliegas type F er geen  $\text{Ca(OH)}_2$  genoeg wordt aangemaakt om alle vliegas te laten hydrateren. Een deel van de vliegas kan achterblijven in het systeem, zelf na een lange tijd van nabehandeling. Dit kan de microstructuur en verschillende eigenschappen van de vliegaspasta en zo ook het vliegasbeton beïnvloeden (Zhang, 1995).

### 2.2.2 Invloed en effect van vliegas in beton

Volgens Zhang (1995) kan vliegaspasta, microscopisch gezien, beschouwd worden als een composiet-materiaal. Vliegasdeeltjes gedragen zich in pasta's als reactieve micro-aggregaten, ingebed in een matrix van gehydrateerde en reactie-producten. Er ontstaat een transitiezone tussen de vliegasdeeltjes en de matrix, die meer poreus en zwakker is dan elk van beide producten. Wanneer scheurvorming ontstaat in het beton, dan zal dat gebeuren ómheen de vliegas-partikels, niet erdoorheen.

In Lammertijn (2007) staan de verschillende effecten, te wijten aan het toevoegen van vliegas aan beton, op de eigenschappen van het beton samengevat. Hierna volgend worden enkele van de meest relevante effecten samengevat voor dit afstudeerwerk:

#### *Effect op jong beton*

- **Verwerkbaarheid:** de sferische vorm en het gladde oppervlak van de vliegas doet de wrijving tussen de deeltjes dalen waardoor de verwerkbaarheid van het verse beton zal stijgen
- **Luchtgehalte:** daalt door een betere verdichting van het beton. Er moet luchtbelvormer toegevoegd worden om eenzelfde luchtgehalte te behouden.
- **Hydratatiewarmte:** zal dalen: er is minder portlandcement aanwezig en door de tragere reactie zal de hoeveelheid warmte die zich opstapelt in het beton lager zijn. Bijgevolg zullen er minder scheuren optreden t.g.v. thermische gradiënten. Dit is niet onbelangrijk voor de duurzaamheid van het beton.
- **Sterkte:** enerzijds zal de sterkte op jonge leeftijd lager zijn door de vertraagde reactie van vliegas, anderzijds stijgt de sterkte door de lagere W/C-factor die kan aangewend worden (voor eenzelfde verwerkbaarheid). Er kan evenwel gebruik

gemaakt worden van superplastificeerders om voldoende sterkte te bereiken, reeds op jonge leeftijd.

#### *Effect op verhard beton*

- **Sterkte:** t.g.v. de tragere puzzolane reactie zullen bijkomende hydratatieproducten gevormd worden die de poriën opvullen. De uiteindelijke sterkte kan hoger zijn dan die van traditioneel beton.
- **Permeabiliteit en waterabsorptie:** dalen door het opvullen van de poriën met bijkomende reactieproducten.
- **Weerstand tegen vorst-dooicycli:** zeer goed, op voorwaarde dat er voldoende luchtbellens aanwezig zijn (vereist meestal het gebruik van een luchtbelvormer).
- **Weerstand tegen vorst-dooicycli in combinatie met dooizouten:** uit verscheidene proeven is gebleken dat deze lager is dan bij traditioneel beton.

De meeste van deze effecten worden in dit afstudeerwerk beproefd en daarna getoetst aan de - zopas opgesomde en hierna volgende - resultaten uit de literatuur.

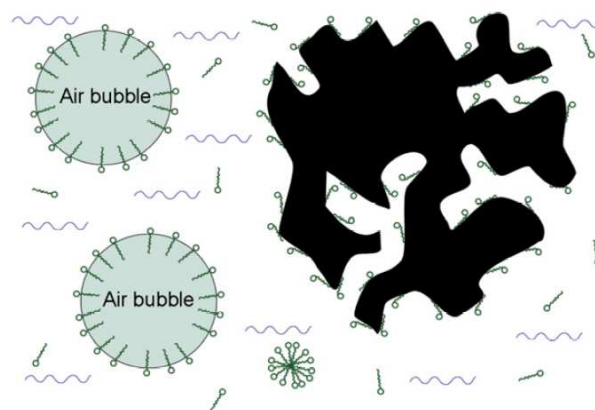
### **2.3 Interactie van luchtbelvormers en vliegas (effect op luchtgehalte)**

In Freeman et al. (1996) stelt men dat het koolstof, aanwezig in de vliegas, interfereert met de luchtinbrengers door de luchtbelvormers te adsorberen en hen inactief maken voor het stabiliseren van de luchtbellens. Vaak hanteert men in normen en wetten een limiet voor het gehalte aan koolstof aanwezig in het vliegas. Volgens de Europese Standaard is het koolstofgehalte gelimiteerd tot 5 m-% voor een vliegas klasse F. Maar er zijn al problemen gerapporteerd met onverbrande koolstofgehaltenes van 3 tot 3,7 m-% (Pedersen et al., 2007). In de Belgische Norm NBN B15-001 werd ook als kanttekening gemaakt dat bij het gebruik van een vliegas met een gloeiverlies tussen 5 en 7% er een limiet is op de vliegasvervanging, slechts tot 25% van de cementmassa.

In Freeman et al. (1996) werd echter besloten dat niet alleen het gehalte aan koolstof de adsorptie van de luchtbelvormers bepaalt, maar evenzeer de vorm van die koolstofpartikels. Daaruit kan besloten worden dat de alom gebruikte LOI-test voor het bepalen van het koolstofgehalte niet voldoende is om het gebruik van een bepaald vliegas in beton toe te laten of uit te sluiten. Ook Hill et al. (1997) en Pedersen et al. (2007) zijn van die mening.

Na grondig onderzoek zou de Belgische Norm dus herzien moeten worden. In Pedersen et al. (2007) en vorige onderzoeken is besproken dat de volgende eigenschappen van het onverbrande koolstof bijdragen tot de adsorptie van luchtbelvormers: de hoeveelheid, de specifieke oppervlakte, de toegankelijkheid van de oppervlakte en de chemische eigenschappen van het oppervlak. De adsorptiecapaciteit van het koolstof vermindert met een grotere deeltjesgrootte. Dit beïnvloedt namelijk de toegankelijkheid.

De onverbrande koolstof, en niet de anorganische fractie van de vliegass, schijnt verantwoordelijk te zijn voor de adsorptie van de luchtbelvormers. Een groot deel van het koolstofoppervlak is niet-polair, vergeleken met het polaire oppervlak van de anorganische deeltjes. Dit zorgt voor actieve adsorptieplaatsen voor het hydrofobe gedeelte van de oppervlakte-actieve luchtbelvormers, zodat de koolstof concurreert met het lucht/water-oppervlak. Op onderstaande figuur staan 2 luchtbellen en 1 koolstofpartikel getekend. De luchtbelvormers zijn voorgesteld met een kleine cirkel als het polaire eind en de staart correspondeert met het hydrofobe eind (Pedersen et al., 2007).



**Figuur 2: Adsorptieplaatsen voor luchtbelvormers aan het lucht/water-oppervlak en aan het koolstofoppervlak (Pedersen et al., 2007)**

Bij het experiment uitgevoerd door Hill et al. (1997) wordt de chemische analyse van de gebruikte vliegassen gelinkt aan de resultaten van de benodigde hoeveelheid luchtbelvormer om een bepaald luchtgehalte te bekomen. Er wordt gevonden dat wanneer meer luchtbelvormer nodig bleek, deze vliegassen een hoger gehalte aan zuurstof bevatten. Door Pedersen et al. (2007) wordt gevonden dat verhoogd  $\text{SO}_3^-$  of totaal alkali-gehalte (zoals  $\text{Na}_2\text{O}$ ) in vliegass leidt tot gereduceerd luchtverlies. Ook, hoe hoger de fijnheid van de vliegass, hoe meer luchtbelvormer moet toegevoegd worden voor eenzelfde luchtgehalte.



Volgens (Zhang, 1996) is er 2 tot 6 maal zoveel luchtbelvormer nodig in vliegasbeton dan in traditioneel beton om eenzelfde luchtgehalte te bekomen. In diezelfde studie wordt nagegaan welk soort luchtbelvormers in hogere dosissen gedoseerd moeten worden om eenzelfde luchtgehalte te bekomen. Het blijkt dat het zout van een vetzuur het minst efficiënt is om lucht in te brengen wanneer vliegas aanwezig is in het beton. Vinsol-harsen blijken tot 3 keer efficiënter dan voorgaand product om luchtbellen in te brengen in de aanwezigheid van vliegas.

## **2.4 Invloed van vliegas en luchtbelvormers op betoneigenschappen**

Een aantal van deze effecten werden reeds algemeen opgesomd in 2.2.2. In dit gedeelte wordt echter specifiek ingegaan op de invloeden die in dit onderzoek van belang zijn.

### **2.4.1 Porositeit en transporteigenschappen**

#### **2.4.1.1 Porositeit**

Porositeit zal opgemeten worden door middel van een vacuümverzadigingsproef. Deze proef kan dienen voor het maken van een ruwe schatting van de porositeit (Audenaert, 2006). Door middel van wateropsorping onder vacuüm wordt enkel de porositeit bepaald die toegankelijk is vanaf de buitenzijde van het beton. Deze porositeit wordt de open porositeit genoemd. Deze porositeit is ook bepalend voor het aantastingsgedrag van beton. Deze proef zal worden uitgevoerd na droging bij een temperatuur van 40°C en van 105°C. De open porositeit die bekomen wordt na droging bij 40°C stemt overeen met de holten die gevuld kunnen worden met vrij water. Deze holten zijn echter nog met een hoeveelheid vocht gevuld dat nog kan verdampen maar in een trager tempo dan 0,1% van de massa in 24 uur. We heten deze porositeit de capillaire porositeit omdat bij deze droogtemperatuur enkel het water uit de capillaire poriën zal kunnen verdampen. De open porositeit bij 105°C stemt overeen met de capillaire porositeit en de ruimte die vrijkomt door het verdampen van het gelwater, of de gelporositeit (Audenaert, 2006). Deze porositeiten samen geven bij 105°C droogtemperatuur een schatting van de totale open porositeit.

Gallé (2001) geeft echter aan dat droging bij 105°C zal resulteren in een overschatting van de totale porositeit. Bij deze temperatuur zouden de hydratatieproducten reeds een belangrijk deel van het niet-verdampbaar water verliezen. Dit dehydratieproces wordt in de literatuur nogal eens geassocieerd met een toename van de capillaire porositeit ten koste

van de gelporositeit en met het ontstaan van microscheuren. Daarom kan de totale porositeit volgens Gallé (2001) beter worden benaderd door te drogen bij 60°C in plaats van bij 105°C. Boel (2006) vermeldt eveneens de bovengenoemde risico's van droging bij 105°C maar verwerpt de techniek niet. Als argument worden de snelheid en de reproduceerbaarheid van deze wijd verspreide techniek aangehaald (Van den Heede, 2008).

Wanneer luchtbelvormer gebruikt wordt in beton, met of zonder puzzolane materialen, zorgt dat voor een stijging in het poriënvolume en een stijging van de gemiddelde poriënafmeting. (Peng et al., 2007)

Resultaten uit (Chindaprasirt et al., 2005, 2007, 2009), (Khan et al., 2000) en (Poon et al., 1999) tonen aan dat het gebruik van vliegas de totale porositeit en capillaire porositeit, op alle leeftijden van het beton, doet vergroten in vergelijking met traditioneel beton. Die totale en capillaire porositeit nemen ook toe met toenemend vliegasgehalte. De porositeit van het beton met fijn vliegas is significant lager dan met een grover vliegas, maar is nog steeds hoger dan dat van traditioneel beton. Uit diezelfde onderzoeken blijkt dat de gemiddelde poriëndiameter bij vliegasbeton kleiner is dan deze bij traditioneel beton. De gemiddelde diameter neemt af met toenemend vliegasgehalte. De gemiddelde diameter neemt nog meer af wanneer gebruik gemaakt wordt van fijner vliegas. Dit bevestigt nogmaals dat fijner vliegas effectiever is in het reduceren van de poriëngrootte, als resultaat van de grotere pakkingsdichtheid van de fijnere vliegasdeeltjes. Bijkomend is nog dat bij toenemend vliegasgehalte, de porositeit toeneemt, en de poriëndiameter blijft afnemen.

Uit de 2 voorgaande paragrafen zou kunnen afgeleid worden dat wanneer zowel luchtbelvormer als vliegas wordt toegevoegd, het poriënvolume zeker zou moeten stijgen, maar over de gemiddelde poriënafmeting valt geen uitspraak te doen. Dit is een conclusie in de veronderstelling dat er geen interactie plaatsvindt tussen de vliegas en de luchtbelvormer, wat onwaarschijnlijk is.

Wanneer traditioneel beton verhardt, zijn er transitiezones aanwezig op de grens tussen de gehydrateerde cementmatrix en de granulaten (Poon et al., 1999), (Kuroda et al., 2000), (Kearsley, 2001). Deze zones hebben meestal een dikte tussen 20 en 100 µm en zijn meer poreus dan het overgrote deel van de pasta. Onderzoek heeft aangetoond dat wanneer er

voldoende cementpasta en granulaat-transitiezones bestaan, zij een continu kanaal kunnen vormen zodat percolatie en gas- en waterpermeabiliteit kan vergroten. Wanneer vliegas wordt gebruikt in het beton, zal de transitiezone gedensificeerd worden en zal de dikte van de transitie laag danig verminderen (Poon et al., 1997). Dit komt de duurzaamheid van het beton ten goede, daar de mogelijkheid voor transport van schadelijke stoffen vermindert. Ook de puzzolane reactie werd gevonden sneller door te gaan in de interface-zones, dan in de rest van de pasta.

Kearsley (2001) vond dat de porositeit geen unieke functie is van de permeabiliteit. De totale porositeit van verharde cementpasta is niet enkel gerelateerd aan permeabiliteit maar hangt af van de water-cement-factor of de hydratatie tijd. De porositeit en ook permeabiliteit zijn sterk beïnvloed door de vocht-hoeveelheid in het beton: een verandering van bijna verzadigd naar ovengedroogde condities kan de permeabiliteit tot 2 grootte-orde vergroten. Incomplete droging resulteert in residueel water aanwezig in het poriënsysteem, hoofdzakelijk in kleinere poriën. Het residuele water kan de doorgang van gassen doorheen zekere routes doorheen het proefstuk verkleinen. Complete droging (105°) kan echter resulteren in krimp-scheuren, wat de poriënstructuur gaat modificeren en zo ook artificieel hoge porositeiten en permeabiliteits-waarden opleveren (Kearsley, 2001). Volgens diezelfde auteur is dit effect echter zeer gering en hebben eventuele scheuren geen invloed op de uiteindelijke vergelijking van de permeabiliteiten en porositeiten indien alle te vergelijken betonmengelingen op dezelfde temperatuur worden gedroogd.

In (Khan, 2003) wordt een model vooropgesteld om de porositeit te berekenen van beton met een gedeeltelijke vervanging van het portlandcement door vliegas. De vliegasvervangingen zijn gelegen tussen 0% en 40%. Om de porositeit op 28 dagen ouderdom respectievelijk 90 dagen te berekenen worden volgende formules voorgesteld:

$$\varepsilon_{0,28} = 21,5 - 0,02x_1 + 49,3 x_3 + 80,5 x_3^2 \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_{0,90} = 19,1 - 0,04x_1 - 37,4x_3 + 62,9x_3^2 + 0,1x_1x_3 \quad (2.6)$$

waarbij  $x_1$  de hoeveelheid vliegas als gedeeltelijke cementvervanging (%) en  $x_3$  de water/bindmiddel-verhouding voorstelt. Met de hoeveelheid bindmiddel wordt de som van het cement en de vliegas bedoeld.

#### 2.4.1.2 *Capillariteit*

Volgens Martys et al. (1997) zal de mate waarin er capillaire zuiging is, afhangen van de verzadigingsgraad van het poreuze medium. Hoe hoger het vochtgehalte is, hoe lager de absorptie zal zijn. Volgens diezelfde referentie hebben eerdere experimenten ook al aangetoond dat er een lineaire relatie bestaat tussen de wateropname via capillaire zuiging en de vierkantswortel van de tijd (Dhir et al., 1987) (Levitt, 1969).

Gopalan (1996) deed experimenten met verschillende vliegasbetonmengsels met variërende water-cementfactoren en vliegasvervangingen. Voor een vliegasbeton met water-cementfactor van 0,53 werden mengelingen beproefd met cementvervangingen van 20% en 40% door vliegas, waarbij het totale bindmiddelgehalte hetzelfde blijft op 390 kg/m<sup>3</sup>. De proefstukken werden bewaard in een ruimte bij 23°C ± 2°C en een relatieve vochtigheid van 95% ± 3% tot ze op hun gewenste eigendom werden beproefd. Als resultaat wordt bekomen dat een vliegasvervanging van 20% geen significante invloed heeft op de opslorping van het beton. Een vliegasvervanging van 40% echter leidt tot een vermindering van de opslorping van het beton, op alle beproefde leeftijden. Wanneer ouderdommen worden vergeleken, wordt de opslorping kleiner naarmate de ouderdom van de mengelingen stijgt. Dit is in meerdere mate het geval voor vliegasbeton dan voor cementbeton: het verschil in opslorping voor een beton op 28 dagen en 91 dagen ouderdom bedraagt voor cementbeton slechts 2% terwijl dat bij een vliegasbeton met vliegasvervanging van 20% en 40% respectievelijk een vermindering van opslorping van 18% en 30% bedraagt. De enige voorwaarde is wel dat de vliegasmengelingen gedurende 7 dagen een vochtige nabehandeling (23 ± 2 °C en 95 ± 3% RV) krijgen. Na een droge nabehandeling (23 ± 2 °C en 50 ± 3% RV) presteert beton met vliegas immers minder goed dan traditioneel beton.

Volgens Audenaert (2006) is 1 van de besluiten die getrokken kan worden uit de bepaling van de formules van de capillariteit dat hoe kleiner de straal van de porie, hoe groter de uiteindelijke stijghoogte van het capillaire water zal zijn in het beton. Dit betekent dus meer opslorping. Hoe fijner de poriënstructuur, hoe groter de uiteindelijke stijghoogte. Op basis van deze uitspraak en de resultaten uit (Chindaprasirt et al., 2005, 2007, 2009), (Khan et al., 2000) en (Poon et al., 1999) die stellen dat de gemiddelde poriëndiameter van vliegasbeton lager is dan traditioneel beton, kan besloten worden dat verwacht wordt dat vliegasbeton meer capillaire opzuiging zal vertonen. Ook Nokken en Hooten (2002) geven aan dat de

initiële capillaire wateropsorping zal toenemen naarmate de poriënafmetingen kleiner zijn. Vervolgens zou de opsorping hoe dan ook trager verlopen doordat de poriën steeds minder met elkaar verbonden zijn.

Aangezien de porositeit daalt naarmate de proefstukken ouder worden en de hydratatie vordert, zal de capillaire opsorping dalen als de proefstukken ouder zijn. (Audenaert, 2006) Een grotere opsorping zou dus moeten terug te vinden zijn bij proefstukken op een ouderdom van 1 maand in vergelijking met die op 3 maand ouderdom.

Om het verband te kunnen nagaan met de te bepalen porositeiten, zullen voor de proeven ter bepaling van de capillaire opsorping dezelfde droogtemperaturen worden aangehouden als voor de porositeitsproeven, namelijk 40°C en 105°C.

#### ***2.4.1.3 Gasdoorlatendheid***

Voor de gasdoorlatendheid zijn enkel die poriën van belang die met elkaar in verbinding staan, of de zogenaamde open porositeit. Het grootste deel van het transport gebeurt via de grotere capillaire poriën (Boel, 2007). De gelporiën en de kleine capillairen hebben bijna geen invloed op de doorlatendheid. Bij toenemende hydratatiegraad en zo ook toenemende ouderdom, is er een toename van het volume kleine capillairen en de gelporositeit en zou een belangrijke afname van de doorlatendheid moeten vastgesteld worden. Zeker door de trage hydratatiereactie van vliegias moet dit vooral in de vliegiasmengelingen te zien zijn. Volgens Boel (2006) toont Mehta aan dat er een goed verband zou zijn tussen het totaal volume poriën groter dan 100nm en de doorlaatbaarheid.

Volgens de proefmethode (RILEM, 1999) neemt de gasdoorlatendheidscoëfficiënt af met toenemende druk.

Volgens Shafiq et al. (2007) is de gasdoorlatendheidscoëfficiënt voor zuurstof in traditioneel beton 4 tot 5 keer hoger dan deze voor vliegiasbeton (met zeer laag CaO-gehalte). In dit experiment werd gebruik gemaakt van 2 verschillende vliegiasen: UK-vliegias en Maleisisch vliegias. Het grote verschil zit hem in het CaO-gehalte. Het UK-vliegias bestaat voor 2,55% uit CaO en het Maleisische voor 11,47%. Het vliegiasbeton werd vervaardigd door 40% portlandcement te vervangen door vliegias, bij een totaal bindmiddelgehalte van 325 kg/m<sup>3</sup> en een water-cementfactor van 0,48 bij het vliegiasbeton en 0,55 bij het cementbeton. De

gasdoorlatendheidscoëfficiënt voor UK-vliegasbeton was gereduceerd tot 22% van de waarde voor traditioneel beton op 28 dagen ouderdom, en de coëfficiënt bij het Maleisisch-vliegasbeton was gereduceerd tot 75% van de cementbetonwaarde. Een lagere permeabiliteitscoëfficiënt zorgt ervoor dat de duurzaamheid van vliegasbeton hoger zal zijn dan het traditionele beton. Volgens deze zelfde bron is het effect van de leeftijd op de permeabiliteitscoëfficiënt meer significant voor vliegasbeton dan voor traditioneel beton.

Ook volgens Saricimen (1995) en Chindaprasirt (2007) is vliegasbeton minder permeabel dan traditioneel beton (beide experimenten beproefden vliegasbeton en traditioneel beton met eenzelfde W/C-factor). De hydratatiereactie, de puzzolane reactie, het pakkingseffect en nucleatie-effect worden versterkt wanneer fijner vliegas wordt toegevoegd. De pasta wordt meer homogeen en dichter qua structuur.

Volgens (Kearsley, 2001) stijgt de gaspermeabiliteit met een verhoging van de drogingstemperatuur van de proefstukken. De krimpscheuren die gepaard gaan met het drogen geven geen verkeerd beeld van de resultaten van de gaspermeabiliteitsmetingen wanneer verschillende betonmengelingen met elkaar worden vergeleken, die aan dezelfde temperatuur werden gedroogd. Hierbij is ook de verzadigingsgraad van de proefstukken van belang. Immers de permeabiliteit ondergaat een belangrijke toename wanneer water uit het beton verdwijnt. Zo ontstaat er immers een toename van de connectiviteit van de poriën, wat zorgt voor een betere doorstroming door de lucht (Boel, 2006).

Uit resultaten van (Khan, 2002) is gebleken dat het gebruik van vliegas een beperkte invloed heeft op de permeabiliteit van beton tot de leeftijd van 90 dagen. Op een leeftijd van 180 dagen kan een lichte vermindering in zuurstofpermeabiliteit worden waargenomen, die des te groter is naarmate het percentage vliegasvervanging stijgt (voor eenzelfde W/C-factor). Betonmengelingen waarbij meer dan 30% vliegas werd gebruikt, halen nooit dezelfde sterkte als de referentiemengeling. Volgens (Poon et al., 1997) kan de puzzolane reactie van de vliegas in gemengde cementpasta's een substantiële reductie geven in de permeabiliteit. Deze reductie kan ongeveer 1/3 bedragen in vergelijking met traditionele mortel.

Op basis van zijn resultaten stelde (Khan, 2003) - net als bij de porositeit - een model op om de gaspermeabiliteit voor zuurstof te voorspellen op een ouderdom van 28, 90 en 180 dagen.

Hij stelde deze formules op door het gebruik van betonmengeling met een water-bindmiddelfactor in de orde van 0,27 tot 0,5 en een portlandcementvervanging door vliegas van 0 tot 40%. Hij vond daarvoor de volgende formules:

$$K_{28} = -2,4 + 0,01x_1 + 123x_3 + 6,4x_3^2 \quad (2.7)$$

$$K_{90} = -0,06 + 7,3x_3^2 - 0,02x_1x_3 \quad (2.8)$$

waarin  $K$  de gaspermeabiliteit ( $\times 10^{-16} \text{ m}^2$ ) voorstelt,  $x_1$  de hoeveelheid vliegasvervanging (%) en  $x_3$  de water/bindmiddel-factor. Bij deze formules werd echter niet aangeduid of het gaat over de intrinsieke of de schijnbare gaspermeabiliteit, en bij welke verzadigingsgraad van het beton deze formule geldig is.

Volgens Boel (2006) staat in de CEB/FIP Model Code 90 (1991) een schatting die gemaakt kan worden van de intrinsieke gaspermeabiliteitscoëfficiënt, op basis van de karakteristieke druksterkte  $f_{ck}$ . Zo wordt de volgende relatie gevonden:

$$\log\left(\frac{k_i}{K_{go}}\right) = -0,5 \frac{f_{ck}}{f_{ck0}} \quad (2.9)$$

Met  $K_{go}$  gelijk aan  $10^{-14} \text{ m}^2$ ,  $f_{ck0}$  gelijk aan  $10 \text{ N/mm}^2$  en  $k_i$  de intrinsieke gaspermeabiliteit [ $\text{m}^2$ ]. Ook bij deze formule werd niet specifiek aangehaald bij welke verzadigingsgraad deze intrinsieke gaspermeabiliteitscoëfficiënt dan wordt voorspeld.

#### 2.4.2 Vorst-dooibestandheid

Er zijn 2 basis duurzaamheidsproblemen gerelateerd aan vriezen: interne scheuren door vries-dooi-cycli en oppervlakte-afschilfering door het vriezen in de nabijheid van dooizouten (Pigeon et al., 1995). Dit laatste probleem wordt in dit afstudeerwerk geëvalueerd. De oplossing voor het eerste probleem bestaat erin om ervoor te zorgen dat er een adequaat systeem van ingebrachte luchtbellen bestaat. Veldonderzoek en experimenten in het laboratorium hebben uitgewezen dat interne scheurvorming door vorst in beton waar lucht is ingebracht quasi onbestaande is. Oppervlakte-afschilfering is een veel complexer probleem om vele redenen, maar hoofdzakelijk omdat het gerelateerd is aan de microstructuur van het buitenste dunne laagje of 'huid' van het beton.

#### 2.4.2.1 *Vorstbestandheid*

Verskillende theoriën worden geopperd om de werkelijk optredende mechanismen bij schade door vorst-dooicycli te verklaren. Tot een consensus werd echter nog niet gekomen. De alom meest aanvaarde theoriën stellen hydraulische of osmotische drukken, of een combinatie van beiden aan de grondslag van het fenomeen. In (Boel 2007) werden beide theoriën uitgeschreven.

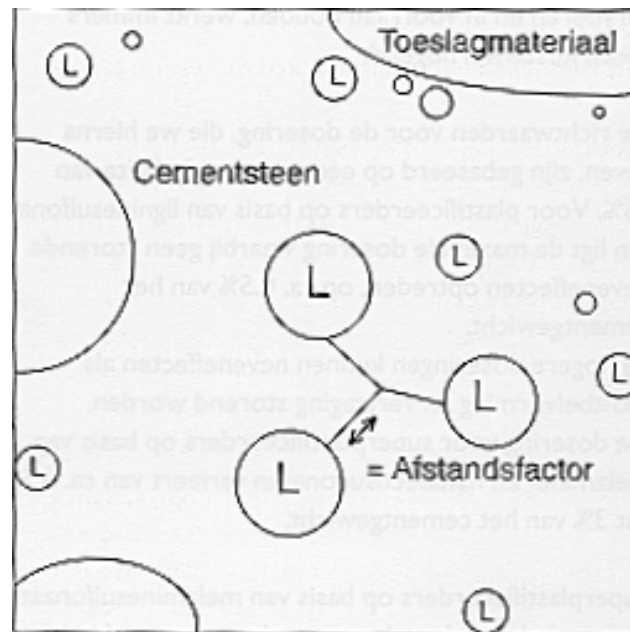
Volgens (Mather, 1999) is beton immuun voor de effecten van vriezen en dooien (zonder zouten) als

- de poriën in het beton niet groot genoeg zijn om het bevroerende water vast te houden (geen capillaire holtes).
- de poriën, die toch bevroerend water bevatten, niet meer dan voor 91% gevuld zijn. In dergelijke gevallen is de verzadigingsgraad niet kritiek.
- de poriën, die voor meer dan 91% gevuld zijn, niet meer dan 0,2 mm verwijderd zijn van een luchtbel in de pasta. Dit vraagt een uniforme verdeling van de luchtbellen over de pasta.

Vele factoren beïnvloeden de effectiviteit van de kunstmatige luchtinbreng via luchtbelvormers, zoals de 'spacing'-factor en het volume ingebrachte lucht. Naarmate het water in een verzadigd capillair netwerk bevroert, verplaatst het nog niet bevroren water zich naar een naburige holte of veroorzaakt het water een expansie in de verharde cementpasta met mogelijke schade tot gevolg. De interne spanningen ontstaan doordat het poriënsysteem weerstand biedt tegen de doorstroming en er zo hydraulische drukken ontstaan. Gebaseerd op deze veronderstellingen definieerde Powers een invloedssbol rond elke holte van waaruit uitgedreven water in de holte kan opgenomen worden (Boel, 2006). De spacing-factor is in dit geval een maat voor de hoeveelheid pasta die zich rondom een luchtbel bevindt. Vaak wordt de parameter beschouwd als de gemiddelde afstand die in de cementpasta dient afgelegd te worden om een holte te bereiken (zie Figuur 3). Een kleine spacing-factor zal de weerstand van het beton tegen vriezen verbeteren. Zowel uit veldonderzoek als laboratorium-experimenten is gebleken dat de maximale ontwerpwaarde voor deze afstand 0,2 mm is, zoals reeds hierboven aangegeven (Pigeon et al., 1995). De weerstand tegen vorst-dooicycli wordt behoorlijk verbeterd door het gebruik van luchtbelvormers.



Toevoeging van dergelijke hulpstoffen zorgt ervoor dat de weerstand met 2 tot 6% verbetert (Mohamed, 1998).



Figuur 3: Schematische weergave van de verdeling van luchtbelletjes in beton met de afstandsfactor (Betoniek)

Ook het specifiek oppervlak  $\alpha$  is een belangrijke parameter om na te gaan of het luchtbelstelsel efficiënt is. Dit is de verhouding van de oppervlakte van een gemiddelde holte ten opzichte van het volume van de gemiddelde holte, berekend uitgaande van de gemiddelde koordelengte. Eerder werd al vermeld dat hogere luchtgehalten over het algemeen een beter specifiek oppervlak en een betere afstandsfactor geven, maar een hoog luchtgehalte zorgt niet automatisch voor goede karakteristieken van het luchtholtensysteem.

Puzzolane bestanddelen zoals vliegas geven de microstructuur van het beton meer dichtheid en compactheid en zouden zo de vorst-bestandheid van beton vergroten (Peng et al., 2007).

#### **2.4.2.2 Vorst-dooibestandheid in aanwezigheid van dooizouten**

Eerder werd al vermeld dat hierbij vooral de oppervlaktelaag een cruciale rol speelt. Die dunne laag is meestal meer poreus dan de rest van het beton. De oppervlaktelagen zijn meestal onderworpen aan regelmatige bevochtigings-drogingscycli die microscheuren zouden kunnen induceren en de poriënstructuur van de gehydrateerde cementpasta kunnen wijzigen. De door droging geïnduceerde poriënstructuurwijzigingen vergroten de in het beton aanwezige waterhoeveelheid die kan bevriezen.

Volgens (Valenza & Scherer, 2007) bestaat een pessimumconcentratie van zoutoplossing om een maximale schade aan het betonoppervlak te bekomen. Deze concentratie werd bekomen uit onderzoek in een laboratorium. Deze bedraagt ongeveer 3%. Deze concentratie werd ook toegepast in de proefmethodes. Die concentratie is het resultaat van het effect van zout op de mechanische eigenschappen van de ijslaag. Ijs dat bestaat uit puur water is niet verondersteld te barsten. Pekel-ijs gevormd door oplossingen van gematigde concentraties (1 à 5%) zal wel 'scheuren' vertonen in de ijsformatie. Tenslotte zullen hooggeconcentreerde oplossingen niet genoeg sterkte ontwikkelen tijdens het vriezen doordat de smelttemperatuur danig verlaagd werd. Daardoor zullen dus enkel de gematigde concentraties oppervlakte-afschilfering als resultaat hebben, volgens het mechanisme 'glue spalling' dat verder in deze paragraaf wordt uitgelegd.

Door het vriezen en dooien in aanwezigheid van een zoutoplossing zal het betonoppervlak oppervlakkig beginnen afschilferen, waarbij heel weinig kleine granulaten worden verwijderd. Valenza & Scherer (2007) deden experimenten met een langere duur (200 tot 300 cycli), maar deze gaven eenzelfde afschilfering als na 100 cycli. Daarmee wordt nogmaals duidelijk gesteld dat vriezen en dooien in aanwezigheid van dooizouten vooral een oppervlaktefenomeen is: na verwijdering van de zwakke oppervlaktelaag, was het materiaal bestand tegen verdere afschilfering. De cycli waarmee wordt gewerkt in hun experimenten, gebeuren volgens de ASTM C672: de temperatuur wordt gereduceerd tot  $-17.8 \pm 2.8$  °C in 16–18 uur en daarna wordt de temperatuur weer opgedreven tot  $23 \pm 3$  °C in 6–8 uur. 1 cyclus duurt dus 24u.

Nog volgens Valenza & Scherer (2007) zorgt ingebrachte lucht voor een heilzaam effect tegen oppervlakteafschilfering op 2 manieren: ingebrachte lucht zorgt ervoor dat er minder 'bleeding' optreedt en het ijs in de luchtholten zuigt poriënvloeistof uit de omgevende matrix, waardoor het betonlichaam wordt samengedrukt doordat het ietwat inkrimpt. Bleeding is nadelig omdat dit zorgt voor een zwakke oppervlaktelaag, die makkelijker kan afschilferen onder invloed van vorst-dooicycli in combinatie met dooizouten.

In (Valenza & Scherer, 2007) werden verschillende mechanismen besproken die de oppervlakte-afschilfering van beton in aanwezigheid van een zoutoplossing zouden kunnen verklaren. De eerder in de literatuur voorgestelde mechanismen (samengevat in (Boel 2007))

vertoonden enige tekorten, onder andere om de pessimumconcentratie van 3% te beschrijven. Daarom werd een nieuw mechanisme voorgesteld om het fenomeen te beschrijven: 'glue spalling'. Wanneer een oplossing bevriest op een betonoppervlak, ontstaat een ijs/beton bi-materiaal composietvorm. Wanneer de composiettemperatuur gereduceerd wordt onder het vriespunt van de oplossing, zal de ijslaag de neiging hebben om 5 keer meer samen te trekken dan het onderliggende beton. Afhankelijk van de originele concentratie van de oplossing zal de corresponderende ijslaag kraken door de trekspanning die erin ontstaat doordat de onderliggende betonlaag stijf is. De scheuren die ontstaan in de ijslaag zullen de onderliggende cementgebonden laag penetreren en vervolgens propageren in een pad dat parallel is aan de composiet-interface, wat resulteert in het verwijderen van een schilfer van het beton.

Volgens de NBN EN 1338 wordt een materiaal bestand tegen dooizouten genoemd wanneer de gemiddelde massa van de afgeschilferde delen minder dan  $1\text{ kg/m}^2$  bedraagt en geen enkele individuele waarde hoger is dan  $1,5\text{ kg/m}^2$  na het vooropgestelde aantal te doorlopen cycli. De cycli tellen elk 24u en volgen de temperatuurschommelingen zoals weergegeven op onderstaande figuur. Verdere details over de voorbereiding van de proefstukken en deze proefmethode staan beschreven in hoofdstuk 3.

In (Pigeon et al., 1995) en (Valenza & Scherer, 2007) wordt gesteld dat het gebruik van vliegias in beton waarin lucht is ingebracht, zorgt voor een significante reductie van de weerstand tegen oppervlakte-afschilfering en zo ook de duurzaamheid van beton. Volgens verschillende studies, opgesomd in de vermelde bronnen, zou de hoeveelheid vliegias gelimiteerd moeten worden tot ongeveer 20% van de totale massa bindmiddel, om de duurzaamheid van het beton te bewaren. Dit is geconcludeerd uit laboratoriumtesten. Volgens Boel (2006) is de ervaring met het gebruik van vliegias eerder positief. De minder goede bestandheid is mogelijk te wijten aan de langzame ontwikkeling van de microstructuur. Uit onderzoek in de praktijk blijkt dat bij een cementvervanging van 25% door vliegias, er een positief effect wordt gevonden op de vorstbestandheid. Er wordt wel op gewezen dat bij vliegias veel verschillende soorten en kwaliteiten bestaan.

Volgens Boel (2006) stelt Visser vast dat laboratoriumproeven de Nederlandse praktijk niet goed weergeven, daar de hoeveelheid afgevroren materiaal per oppervlakte veel groter is

dan in de praktijk. Er wordt dus enige discrepantie tussen praktijk en laboratorium bij vorst en dooi vastgesteld. Bij laboratoriumtesten zijn de afkoel- en opwarm snelheden veel te hoog. Dit zorgt voor een zeer steile temperatuursgradiënt in het proefstuk wat in de praktijk niet in die mate zal voorkomen. Echter wanneer de testen op een duidelijk gedefinieerde en reproduceerbare wijze zijn uitgevoerd, kunnen verschillende betonmengelingen wel kwalitatief met elkaar worden vergeleken (Boel, 2006).

#### ***2.4.2.3 Vereisten van beton voor goede vorst-dooiweerstand***

In (Boel, 2006) zijn de verschillende eisen wat de betreft de parameters van het luchtholtensysteem samengevat. Volgens ASTM C457 dient voor beton de specifieke oppervlakte tussen  $23,6\text{mm}^{-1}$  en  $43,3\text{mm}^{-1}$  te liggen. Voor de eisen in verband met de spacing-factor zou volgens ASTM C457 (2000), Mehta (2001) en Sutter (2002) die factor lager dan 0,200 mm moeten liggen. Indien extra luchtbelletjes worden ingebracht, dienen hun afmetingen 50 tot 200  $\mu\text{m}$  te bedragen. Algemeen wordt vaak bij het bespreken van resultaten uit studies gekeken naar het volume holten kleiner dan 300  $\mu\text{m}$ . In PCA (2010) werden volgens Boel (2006) de vereisten voor het luchtgehalte  $A_a$  in verhard beton opgelijst. Voor het beschouwde beton in deze masterproef zou het luchtgehalte voor het beton, gebruikt in een milde omgeving, minstens 4% moeten bedragen.

## **2.5 Druksterkte van beton**

Volgens Chindaprasirt (2005) en Khan et al. (2000) neemt de druksterkte van een vliegasbeton af met een toenemend vliegasgehalte. Om dit effect te compenseren zou men de water-cementfactor kunnen verlagen om dezelfde sterkte te behouden. Dit zal geen effect hebben op de verwerkbaarheid aangezien deze stijgt wanneer vliegas wordt gebruikt in plaats van cement. Ook de fijnheid van de gebruikte vliegas in vliegasbeton heeft een invloed op de druksterkte van datzelfde beton. De fijnheid van vliegas wordt gekarakteriseerd als de restfractie van de 0,045mm-zeef, in massapercentage. Wanneer de vliegas geclassificeerd is als een fijn as (fijnheid 0%, gebruikt in de experimenten in (Chindaprasirt, 2005)), zal de druksterkte merkkelijk hoger zijn dan bij ander vliegasbeton (fijnheid 31%, (Chindaprasirt, 2005)). Ook de chemische compositie van de vliegas kan een rol spelen. In (Dhir, 1998) werd gevonden dat er bij een gloeiverlies tot 8% geen significante effecten zijn op de betondruksterkte. De druksterkte op 90 dagen was significant hoger voor fijn-vliegasbeton (in de experimenten van (Dhir, 1998) werd vliegas gebruikt met een fijnheidsrange van 3 tot 41,5%) dan voor gewoon vliegasbeton, en slechts iets lager dan voor

traditioneel beton op dezelfde leeftijd. Dit is het resultaat van het pakkingseffect van de fijne vliegas. De kleine en sferische deeltjes vullen de gaten of luchtholten en verhogen de densiteit. Het effect op de druksterkte kan ook rechtstreeks gelinkt worden aan de vermeerdering van de porositeit bij toenemend vliegasgehalte. Dit zorgt voor een daling in druksterkte.

Ook een overmaat aan ingebrachte lucht via luchtbelvormers zal een vermindering van de druksterkte veroorzaken. Volgens (Mehta, 2001) vermindert de druksterkte met 5% per overmaat van 1% luchtgehalte.

## 2.6 Relatie tussen verschillende betoneigenschappen

Men zou kunnen veronderstellen dat hoe hoger de druksterkte van beton is, hoe beter zijn duurzaamheid zal zijn. Deze aanname is niet steeds correct. Een betonmengeling die voldoet aan de vereiste sterkte is niet noodzakelijk duurzaam. Voor kwaliteitsdoelstellingen is het belangrijk relaties te kunnen opstellen tussen druksterkte en duurzaamheidskenmerken. Porositeit van het beton kan zowel de sterkte als de duurzaamheid beïnvloeden. Daarom kan steeds een relatie opgesteld worden tussen de sterkte en de duurzaamheid van het beton (Al-Amoudi et al., 2009).

Porositeit en permeabiliteit zijn aan elkaar gelinkt. Porositeit is een maat voor het aantal poriën aanwezig in een systeem, terwijl permeabiliteit gerelateerd is aan de interconnectiviteit van de poriën. In (Shafiq et al., 2007) werden relaties overgenomen uit (Cabrera, 1989) die het verband voorstellen tussen porositeit, permeabiliteit en druksterkte in traditioneel en vliegasbeton. Gelijkaardige formules werden aan de experimentele onderzoeken van (Shafiq et al., 2007) zelf gefit. Zo komt men aan de volgende relaties:

volgens (Cabrera, 1989)

$$\text{traditioneel beton: } \log(k_i) = -15,54 + 1,11 \log\left(\frac{\varepsilon_0}{f_{cu}}\right) \quad (2.10)$$

$$\text{vliegasbeton: } \log(k_i) = -15,95 + 1,01 \log\left(\frac{\varepsilon_0}{f_{cu}}\right) \quad (2.11)$$

volgens (Shafiq et al., 2007)

$$\text{traditioneel beton: } \log(k_i) = -14,93 + 3,10 \log\left(\frac{\varepsilon_0}{f_{cu}}\right) \quad (2.13)$$

$$\text{vliegasbeton:} \quad \log(k_i) = -15,88 + 2,89 \log \left( \frac{\varepsilon_0}{f_{cu}} \right) \quad (2.14)$$

waarin  $k_i$  de intrinsieke gaspermeabiliteitscoëfficiënt in  $\text{m}^2$ ,  $\varepsilon_0$  de porositeit in % en  $f_{cu}$  de kubusdruksterkte in  $\text{N/mm}^2$ .

Voor het gebruik van deze formules werd niet nader een specifieke water-cementfactor vooropgesteld.

# Hoofdstuk 3

## Vooronderzoek invloed interactie

## luchtbelvormer – vliegas op luchtgehalte

### 3.1 Inleiding

In vele literatuur is geschreven over de interactie tussen luchtbelvormer en vliegas op het gebied van het luchtgehalte (Baltrus et al., 2001), (Du et al., 2004), (Hill et al., 1997), (Pedersen et al., 2007), (Zhang, 1996). De additie van vliegas zou het effect van de LBV verminderen, en zou de LBV adsorberen, en dit des te meer naarmate het gebruikte vliegas fijner is. Om op voorhand een zeker idee te hebben van welk vliegas het meeste de LBV adsorbeert, en hoeveel LBV dient toegevoegd te worden om het gewenste luchtgehalte te bekomen, werd een vooronderzoek verricht op mortels.

### 3.2 Materialen

In dit vooronderzoek werd gebruik gemaakt van mortelmengelingen. Er werden zowel referentiemortels (naamgeving T-A) beproefd als mortels vervaardigd met vliegas (naamgeving FA1-A voor vliegas type I en FA2-A voor vliegas type II). Er werd gebruik gemaakt van 2 verschillende vliegassen. In het verdere document zal gesproken worden over vliegas type I en type II. De chemische analyses en karakteristieken van de beide vliegassen alsook het gebruikte cement kunnen teruggevonden worden in Tabel 1 en Tabel 2. Deze vliegassen voldoen qua samenstelling beiden aan de voorschriften voor vliegas, voorgeschreven in NBN EN 450-1 (2007).

In alle mortels werd een water/bindmiddelfactor van 0,5 gehanteerd. In de vliegasmortels werd telkens 50% van het bindmiddel vervangen door vliegas. De samenstelling van de verschillende mortels is te vinden in Tabel 3, dit zijn de samenstellingen om zeker genoeg mortel te bekomen om de luchtgehaltemeter te kunnen vullen (inhoud 1 l). De referentiemortel met enkel cement is een standaardmortel, zoals de samenstelling terug te vinden is in NBN EN 196-1 (2005).

**Tabel 1: Karakteristieken van de gebruikte vliegas en het cement**

|                                       | Vliegas type I | Vliegas type II | CEM I 52,5N |
|---------------------------------------|----------------|-----------------|-------------|
| Gloeiverlies (%)                      | 4,79           | 4,42            | 1,51        |
| Fijnheid (%)                          | 13,2           | 26,6            | -           |
| Sulfaatgehalte (SO <sub>3</sub> ) (%) | 0,8            | 0,68            | 3,34        |
| Vrije calciumoxide (CaO) (%)          | < 0,1          | 0,8             | -           |
| Chloride (Cl <sup>-</sup> ) (%)       | 0,002          | 0,004           | -           |
| Reactief SiO <sub>2</sub> (%)         | 34,44          | 35,65           | -           |

**Tabel 2: Chemische samenstelling van de gebruikte vliegas en het cement**

| %                                                                                 | Vliegas type I | Vliegas type II | CEM I 52,5 N |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------|--------------|
| SiO <sub>2</sub>                                                                  | 48,54          | 50,83           | 18,90        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                    | 33,34          | 20,45           | 5,74         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                    | 3,52           | 7,25            | 4,32         |
| MgO                                                                               | 0,72           | 1,77            | 0,89         |
| Na <sub>2</sub> O                                                                 | 0,34           | 1               | 0,47         |
| K <sub>2</sub> O                                                                  | 1,54           | 1,69            | 0,73         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                                                     | 0,86           | 2,99            | -            |
| Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>                                                   | 1,36           | 2,12            | -            |
| SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + F <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 85,4           | 78,53           | -            |
| CaO                                                                               | niet vermeld   | niet vermeld    | 63,37        |

**Tabel 3: Mortelsamenstellingen**

|                  | T-A  | FA1-A en FA2-A |
|------------------|------|----------------|
| zand [g]         | 1350 | 1485           |
| CEM I 52,5 N [g] | 450  | 247,5          |
| water [g]        | 225  | 247,5          |
| FA [g]           | -    | 247,5          |

Er werd geen gebruik gemaakt van superplastificeerder, wel van de luchtbelvormer Micro-Air 103 con.4%, waarvan de productfiche terug te vinden is in bijlage A. De voorgestelde dosering van deze luchtbelvormer gaat van 50 cc tot 550 cc per 100 kg cement. Aangezien in de gebruikte mortelmengelingen gebruik gemaakt wordt van vliegas, zal de luchtbelvormer verder worden uitgedrukt in ml/kg bindmiddel. De beproefde doseringen zijn terug te vinden in Tabel 4.



**Tabel 4: Luchtbelvormerdoseringen bij de verschillende mortels**

| T-A  |                    | FA1-A en FA2-A |                    |
|------|--------------------|----------------|--------------------|
| [ml] | [ml/kg bindmiddel] | [ml]           | [ml/kg bindmiddel] |
| 0    | 0                  | 0              | 0                  |
| 0,9  | 2                  | 0,99           | 2                  |
| 1,8  | 4                  | 1,98           | 4                  |
| 3,6  | 8                  | 3,96           | 8                  |

### 3.3 Methode

Voor de vervaardiging van de mortels werd eerst gedurende 1 minuut droog gemengd. Daarna werd geleidelijk aan het water toegevoegd met de eventuele luchtbelvormer reeds ingemengd, en werd verder voor 2 minuten gemengd. Dit is een iets andere methode dan in de norm NBN EN 196-1 (2005), maar deze manier van mengen stemt meer overeen met de mengprocedure van het later te vervaardigen beton. Aangezien alle mortels op dezelfde manier gemengd werden, is een vergelijking tussen de mengsels gerechtvaardigd. Daarna werd de luchtgehaltemeter met de verse mortel gevuld. Vervolgens werd het apparaat op de schoktafel geplaatst en gedurende 1 minuut verdicht. Na deze verdichting kon de eventuele overtollige mortel met een spatel worden afgestreken. Tot slot kon dan het luchtgehalte bepaald worden. De bepaling van het luchtgehalte gebeurt volgens de norm NBN EN 12350-7 (2000).

### 3.4 Resultaten & discussie

De luchtgehalten die werden teruggevonden voor de verschillende LBV-doseringen voor de verschillende mortels zijn terug te vinden in Tabel 5.

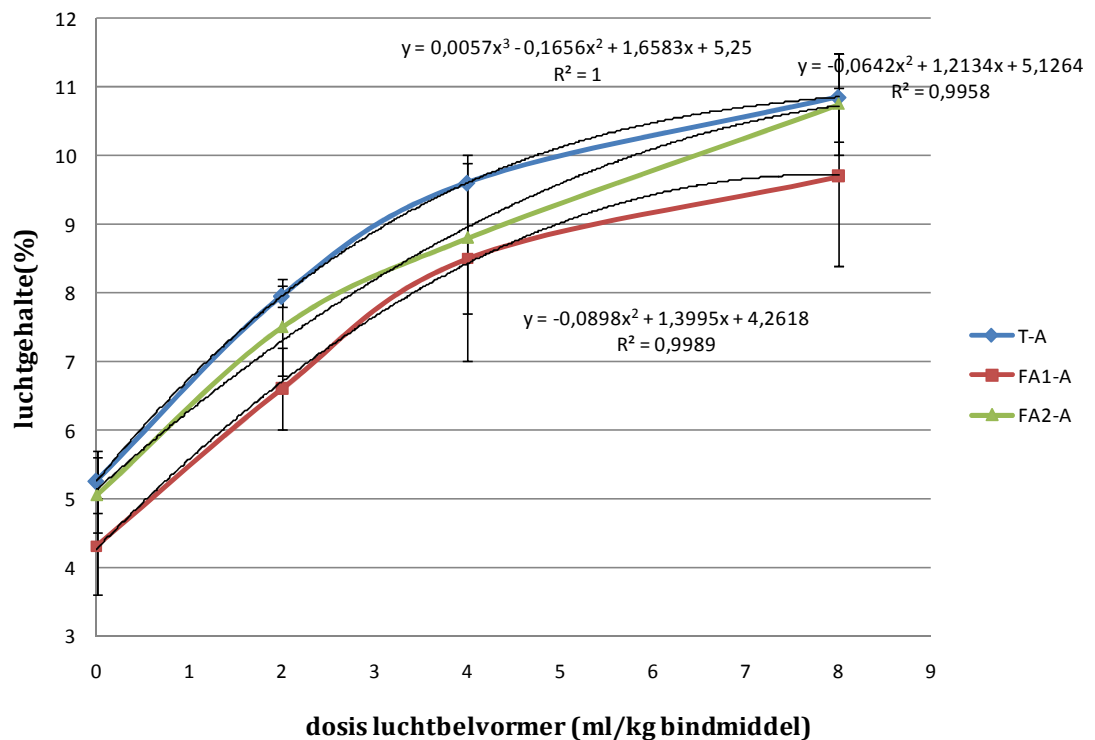
**Tabel 5: Luchtgehalten bij verschillende doseringen luchtbelvormer**

|       | Luchtgehalten bij verschillende doseringen ( ml/kg bindmiddel) |       |           |       |           |       |           |       |
|-------|----------------------------------------------------------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|       | 0                                                              |       | 2         |       | 4         |       | 8         |       |
|       | $\bar{x}$                                                      | $s_f$ | $\bar{x}$ | $s_f$ | $\bar{x}$ | $s_f$ | $\bar{x}$ | $s_f$ |
| T-A   | 5,25                                                           | 0,45  | 7,95      | 0,15  | 9,6       | 0     | 10,85     | 0,65  |
| FA1-A | 4,3                                                            | 0,7   | 6,6       | 0,6   | 8,5       | 1,5   | 9,7       | 1,3   |
| FA2-A | 5,05                                                           | 0,55  | 7,5       | 0,7   | 8,8       | 1,1   | 10,75     | 0,75  |

Uit deze waarden kan meteen afgeleid worden dat er een zeer grote standaardfout op de gemiddelde waarden is. Daardoor is de vergelijking van de resultaten niet zo betrouwbaar.

Toch kunnen enkele trends worden waargenomen: het luchtgehalte in de FA-mortels blijkt telkens lager te zijn dan in de referentiemortel. In de literatuur werd al aangehaald dat een oorzaak hiervan kan liggen in de fijnheid van vliegash ten opzichte van cement, vliegash is veel fijner. Ook lijkt de LBV meer effect te hebben op FA2-A dan op FA1-A: het luchtgehalte bij de FA2-A mortels is telkens hoger dan de FA1-A mortels. Volgens de literatuur ((Hill et al., 1997) en (Pedersen et al., 2007)), kan dit verschil te wijten zijn aan het verschil in fijnheid tussen de 2 verschillende vliegassen. FA1 vertoont een kleiner percentage 45µm-fijnheid dan FA2, dus is een fijner vliegash en zou de LBV daardoor meer adsorberen.

Alle mortels lijken ook zonder LBV de luchtgehaltenorm (4%) te halen volgens NBN EN 206-1, dus eigenlijk zou geen luchtbelvormer moeten worden toegevoegd om de vereiste eisen te halen. Wel moet hierbij worden opgemerkt dat het in dit vooronderzoek gaat om mortels, terwijl de eisen volgens de NBN EN 206-1 gelden voor beton. Grove granulaten en het gebruik van superplastificeerder zullen ook een invloed uitoefenen op het luchtgehalte, dus is het veiliger om geen veralgemening te maken van de resultaten voor mortel naar de beoogde resultaten bij beton. Algemene trends zullen waarschijnlijk wel geldig zijn.



Figuur 4: Gefitte trendlijn aan luchtgehalte i.f.v. dosis luchtbelvormer

Wanneer de luchtgehaltenes grafisch worden uitgezet, kan een polynomiale trendlijn gefit worden aan de gemiddelde meetwaardes (zie Figuur 4). Daaruit zou eventueel een voorspelling kunnen gedaan worden over welk luchtgehalte zal worden bekomen bij een zekere dosering van luchtbelvormer. Er werden polynomen van de derde en tweede graad aan de meetwaardes gefit, ook de correlatiecoëfficiënt is weergegeven in de figuur en er kan besloten worden dat met deze polynomen een zeer goede correlatie kan bekomen worden. Echter, door de grote spreiding op de meetresultaten zullen deze functies niet betrouwbaar genoeg zijn om het luchtgehalte op correcte wijze te voorspellen.

### **3.5 Besluit**

Gezien de grote standaardfout op de gemiddelds van de resultaten en het feit dat deze proef is uitgevoerd op mortels, waarvan de water/bindmiddelfactor niet overeenstemt met de betonmengelingen die zullen gebruikt worden in het experimentele proefprogramma, lijkt het niet opportuun om uit deze resultaten voorspellingen te halen betreffende de toe te voegen doseringen voor die te gebruiken betonmengelingen. Er kan echter wel een grotere adsorptie van de LBV verwacht worden door FA1 i.v.m. FA2, waarbij de oorzaak waarschijnlijk kan toegeschreven worden aan het feit dat FA1 veel fijner is dan FA2. Ook valt aan te raden meer LBV toe te voegen aan de HVFA-mengelingen aangezien deze steeds lagere luchtgehaltenes vertonen dan de referentiemengeling.

# Hoofdstuk 4

## Materialen & Methodes

### 4.1 Materialen

In dit thesisonderzoek is het de bedoeling te onderzoeken wat de invloed is van vliegas in combinatie met luchtbelvormer, op de transporteigenschappen van het beton waarin het wordt gebruikt. Om dit te onderzoeken zijn betonmengelingen nodig waaraan, uiteraard, luchtbelvormer en vliegas zijn toegevoegd, zowel apart als samen. In dit onderzoek werd gewerkt met 6 verschillende betonmengelingen. Twee mengelingen zijn referenties, de één zonder luchtbelvormer T(0,45) en de andere met luchtbelvormer T(0,45)A. De 'T' staat voor een typebetonmengeling volgens NBN EN 1338. In deze mengelingen werd een W/C-factor van 0,45 gehanteerd, en het suffix A staat voor het gebruik van een luchtbelvormer, vandaar de naamgeving.

Verder werd gebruik gemaakt van 2 verschillende vliegassen, type I en type II, die reeds eerder gebruikt werden in hoofdstuk 3. De vliegasbetonmengelingen (FA) werden enerzijds vervaardigd met luchtbelvormer (suffix 'A'), en anderzijds zonder. Bij deze 4 mengelingen wordt telkens 50% portlandcement vervangen door vliegas. Het bindmiddelgehalte in de referentiemengelingen bedroeg  $340 \text{ kg/m}^3$  en bij de vliegasmengelingen was dat  $450 \text{ kg/m}^3$ . In elk van deze vliegasmengelingen werd ook een water/bindmiddel-factor gehanteerd van 0,35. Dit is mogelijk doordat door toevoeging van de vliegas, het beton meer verwerkbaar wordt en zodoende minder water kan gebruikt worden. Toch dient een vrij hoge dosis superplastificeerder gebruikt te worden om het beton voldoende verwerkbaar te maken. Door een lagere water/bindmiddel-factor te gebruiken wordt ook een betere sterkte bekomen die vergelijkbaar is met de referentiemengelingen op 28 dagen ouderdom.

In alle mengelingen waaraan luchtbelvormer is toegevoegd, gaat het om de luchtbelvormer Micro-Air 103 con.4%, waarvan de productfiche terug te vinden is in bijlage A. De dosering in de referentiemengeling ligt lager dan in de vliegasmengelingen. Hiervoor werd geopteerd omdat in het vooronderzoek reeds duidelijk werd dat om eenzelfde luchtgehalte te

bekomen, er meer LBV moest worden toegevoegd aan de vliegasmengelingen, en ervoor gekozen werd hier reeds in het maken van de betonmengelingen rekening mee te houden. De dosering luchtbelvormer in de vliegasmengelingen werd zodanig gekozen dat bij het meten van het luchtgehalte op de verse betonmengeling reeds de vereiste minimumwaarde werd gehaald conform NBN EN 1338 (4%). De dosering in de productfiche geeft de dosering in cc/100 kg cement. Er wordt niet gesproken over 'bindmiddel', dus geen rekening gehouden met vliegass. Wanneer enkel rekening gehouden wordt met de hoeveelheid cement dan was de dosering van de luchtbelvormer 1000 cc/100 kg cement in de vliegassbetonmengelingen en 223,5 cc/100 kg cement in de referentiemengeling. Indien de hoeveelheid wordt uitgedrukt in cc/kg bindmiddel, dan was de dosering in de vliegassbetonmengelingen 500 cc/100 kg bindmiddel. Volgens de productfiche is de aangeraden dosering van de luchtbelvormer tussen 50 en 550 cc per 100 kg cement. Hierbij is dan wel verondersteld dat geen vliegass in het beton aanwezig is. De vergelijking van de verwachte waarde voor het luchtgehalte bekomen uit het vooronderzoek en het effectief bekomen luchtgehalte wordt besproken in hoofdstuk 6.

In de verschillende mengelingen werd ook gebruik gemaakt van de superplastificeerder Glenium 51 con.35%, waarvan de productfiche terug te vinden is in bijlage B. De dosering van deze superplastificeerder varieert van 490 cc tot 704 cc per 100 kg bindmiddel. De samenstellingen van de verschillende mengelingen en enkele eigenschappen worden in Tabel 6 samengevat.

De korrelverdelingsdiagramma's van het gebruikte zand en de granulaten zijn terug te vinden in bijlage C.

De slumpklasse bij de vliegasmengelingen bleek hoger te zijn dan bij de referentiemengelingen. Dit komt doordat bij de vliegasmengelingen meer superplastificeerder werd toegevoegd om het beton bewerkbaarder te maken doordat deze bij een lagere water/bindmiddel-factor werden vervaardigd dan de referentiemengelingen. Voor de toevoeging van de extra superplastificeerder leek het beton nog onvoldoende vloeibaarheid te bezitten en gedroeg het zich te plastisch. Na additie van extra superplastificeerder werd de vloeibaarheid en verwerkbaarheid bekomen die nodig was, en

daarbij hoorde een grotere slump. Op geen enkel moment was echter sprake van segregatie van het beton.

**Tabel 6: Samenstelling verschillende betonmengelingen**

|                                        | T(0,45) | T(0,45)A | FA(1)50 | FA(1)50A | FA(2)50 | FA(2)50A |
|----------------------------------------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| zand 0/4 [kg/m <sup>3</sup> ]          | 715     | 715      | 645     | 645      | 645     | 645      |
| granulaat 2/8 [kg/m <sup>3</sup> ]     | 515     | 515      | 465     | 465      | 465     | 465      |
| granulaat 8/16 [kg/m <sup>3</sup> ]    | 671     | 671      | 606     | 606      | 606     | 606      |
| CEM I 52,5 N [kg/m <sup>3</sup> ]      | 340     | 340      | 225     | 225      | 225     | 225      |
| water [kg/m <sup>3</sup> ]             | 153     | 153      | 158     | 157,5    | 157,5   | 157,5    |
| vliegas type I [kg/m <sup>3</sup> ]    | -       | -        | 225     | 225      | -       | -        |
| vliegas type II [kg/m <sup>3</sup> ]   | -       | -        | -       | -        | 225     | 225      |
| luchtbelvormer [ml/kg BM]              | -       | 2        | -       | 5        | -       | 5        |
| superplastificeerder [ml/kg BM]        | 2       | 2        | 7       | 7        | 5       | 5        |
| W/C-factor [-]                         | 0,45    | 0,45     | 0,35    | 0,35     | 0,35    | 0,35     |
| bindmiddelgehalte [kg/m <sup>3</sup> ] | 340     | 340      | 450     | 450      | 450     | 450      |
| luchtgehalte [%]                       | 2,8     | 6,6      | 2,6     | 5,2      | 2,8     | 4,9      |
| slumpklasse                            | S2      | S3       | S5      | S5       | S5      | S5       |
| $f_{ck,28}$ [N/mm <sup>2</sup> ]       | 67,02   | 49,93    | 59,09   | 50,59    | 50,46   | 42,87    |

De  $f_{ck,28}$  is de karakteristieke druksterkte op 28 dagen ouderdom van een kubus met zijde 150mm en werd berekend zoals aangegeven in paragraaf 4.2.1.

Ter vervaardiging van de verschillende mengelingen werden eerst de granulaten droog met elkaar vermengd gedurende 1 minuut. Daarna kon het water toegevoegd worden en werd zo gedurende 2 minuten gemengd. Tot slot werd superplastificeerder toegevoegd volgens een vooropgestelde waarde en ging het mengen 2 minuten door tot een homogene massa werd verkregen. Tot zover was de mengprocedure bij elke mengeling gelijk, in totaal 5 minuten lang. Daar bij sommige mengelingen de betonmassa nog niet vloeibaar genoeg was of omdat na die laatste 2 minuten mengen nog geen homogene massa was bekomen, werd een additionele tijd verder gemengd, eventueel met toevoeging van supplementaire superplastificeerder. Bij FA(2)50 werd niet verder gemengd, bij T(0,45), FA(1)50 en FA(2)50A nog gedurende 2 min. extra, bij T(0,45)A 2,5 min. extra en tot slot bij FA(1)50A 3 min. extra. De resultaten van de testen die op het verse beton zijn gebeurd, zijn terug te vinden in bijlage D.

Na de vervaardiging werden de proefstukken bewaard in een geklimatiseerde ruimte bij een temperatuur van  $20 \pm 2$  °C en meer dan 90% relatieve vochtigheid, tot ze de gewenste ouderdom hadden.

## **4.2 Methodes**

### **4.2.1 Bepaling van de druksterkte**

De druksterkte van elke mengeling op elke ouderdom werd bepaald door telkens 3 kubussen met zijde 150 mm te beproeven volgens NBN B15-220. Het proefstuk werd tussen de drukplaten van een drukpers geplaatst en onderworpen aan een volgens een voorgeschreven snelheid toenemende drukkracht. De druksterkte werd dan bekomen door de maximale drukkracht te delen door de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het proefstuk. Zo werd  $f_{cm}$  berekend. Om tot de karakteristieke druksterkte  $f_{ck}$  te komen dient deze gemiddelde waarde nog verminderd te worden tot:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,645 \cdot \sigma$$

waarbij  $\sigma$  de standaardafwijking voorstelt op de 3 verschillende uitgevoerde drukproeven per mengeling, per ouderdom.

### **4.2.2 Porositeit en transporteigenschappen**

#### **4.2.2.1 Vacuümverzadiging**

De totale open porositeit van het beton kan afgeleid worden uit een vacuümverzadigingsmethode. Deze methode werd gevonden als de beste manier om de porositeit van beton uit af te leiden, in een vergelijk met 2 andere methodes: koudwaterverzadiging en kokend water-verzadiging (Safiuddin en Hearn, 2005).

Voor elke betonmengeling werden 6 kubussen met zijde 150mm gebruikt. Deze werden respectievelijk tot een ouderdom van 28 en 91 dagen bewaard in een geklimatiseerd lokaal bij  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  en meer dan 90% relatieve vochtigheid. Uit een kubus met zijde 150 mm werd een kern met diameter 100 mm geboord vanuit een bekistingsvlak, evenwijdig met het afstrijkvlak. Deze kernen werden in 3 delen gezaagd, elk met een hoogte 50 mm, zodat per mengeling, per leeftijd, 9 proefstukken voorhanden waren. De kernen werden vervolgens als A en A' (met bekistingsvlak) en B (uit de massa) gemerkt.

Vooraleer de vacuümverzadigingsproef aan te vangen, dienden de kernen gedroogd te worden in een oven, tot het massaverlies in 24 uur minder dan 0,1% bedroeg. Volgens Audenaert (2006) wordt zeker steeds aan deze voorwaarde voldaan wanneer deze proefstukken 14 dagen in de oven doorbrengen. De proef werd per mengeling en per leeftijd tweemaal uitgevoerd, d.i. bij 2 verschillende droogtemperaturen. Zo kon volgens paragraaf 2.4.1.1 een onderscheid gemaakt worden tussen de capillaire porositeit (na droging bij  $40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ) en de totale porositeit (na droging bij  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ).

De procedure voor de vacuümverzadiging staat beschreven in NBN B05-202 (1976). Na het drogen werd de droge massa  $m_d$  bepaald, waarna de proefstukken in een vacuümtank (zie Figuur 5) werden geplaatst onder een absolute druk van 2.7 kPa gedurende 2,5 uur. Daarna werd water toegevoegd onder vacuüm met een snelheid van 5 cm/uur tot het waterniveau zich ongeveer 5 cm boven de proefstukken bevond. Eens dit was bereikt, werd het vacuüm opgeheven en werden de proefstukken nog 24 uur onder water gelaten. Hierna werd de massa onder water  $m_w$  en de massa boven water  $m_s$  bepaald.



**Figuur 5: Proefopstelling vacuümverzadiging: vacuümtank**

De porositeit van de proefstukken kon dan bepaald worden aan de hand van de volgende uitdrukking:

$$\varepsilon_0 (\%) = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_w} \times 100 \quad (3.1)$$

waarin  $\varepsilon_0$  = porositeit van het proefstuk

$m_s$  = massa van het verzadigde proefstuk



$m_d$ = gedroogde massa van het proefstuk, voor aanvang van de proef

$m_w$ = massa van het verzadigde proefstuk, gewogen onder water

#### 4.2.2.2 *Capillariteit*

De aangewende proefmethode werd gekozen na een onderzoek van de door Audenaert (2006) opgestelde vergelijkingstabel tussen de verschillende proefmethodes. Alle methodes verschillen qua richting van de stroming van het capillaire water doorheen het proefstuk (waterreservoir boven, onder of naast het proefstuk), duur van de proef en voorbereiding van de proefstukken. Van alle betonmengelingen werden 6 kubussen met zijde 150mm (zoals bepaald in NBN B15-215 (1984)) gebruikt voor de capillariteitsproef: 3 op een ouderdom van 1 maand en 3 op een ouderdom van 3 maand.

Alle proefstukken werden bij aanvang tot een ouderdom van 28 dagen bewaard in een geklimatiseerd lokaal bij  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  en meer dan 90% relatieve vochtigheid. Vervolgens werden de proefstukken gedurende twee weken gedroogd tot hun massaverlies minder dan 0,1% van de totale massa bedroeg. In (RILEM, 1999) wordt een drogingstemperatuur van de proefstukken van  $105^{\circ}\text{C}$  voorgesteld terwijl NBN B15-217(1984) een temperatuur van  $40^{\circ}$  voorstelt. In dit afstudeerwerk werden de proefstukken op een ouderdom van 1 maand op beide droogtemperaturen beproefd, terwijl die op 3 maand beproefd werden bij een droogtemperatuur van  $40^{\circ}$  volgens de Belgische norm. De drogingstemperatuur heeft een invloed op de verzadigingsgraad van het proefstuk, die op zijn beurt invloed heeft op de capillariteit. Daartoe werd de proef dus na droging op 2 verschillende temperaturen uitgevoerd, waardoor een waarde werd bekomen voor een ‘droog’ proefstuk (na droging bij  $105^{\circ}\text{C}$ ) en een proefstuk met een bepaald vochtgehalte (na droging bij  $40^{\circ}\text{C}$ ). Ook om het verband te kunnen nagaan met de te bepalen porositeiten, zullen de 2 droogtemperaturen worden aangehouden als voor de porositeitsproeven, namelijk  $40^{\circ}\text{C}$  en  $105^{\circ}\text{C}$ .

De zijkanten van de proefstukken werden afgeplakt, zodat de opslorping enkel unidirectionaal kon gebeuren. Vervolgens werden de proefstukken geplaatst op steunen, waarbij het waterniveau zich  $5 \pm 1\text{mm}$  boven het ondervlak van het proefstuk bevindt, in een geklimatiseerd lokaal bij  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  en  $60 \pm 3\%$  relatieve vochtigheid (zie Figuur 6). De proeven werden uitgevoerd met leidingwater.

Op regelmatige tijdstippen na de plaatsing van de betonproefstukken in het water werd de massa van de proefstukken gemeten. Dit gebeurde gedurende een periode van 14 dagen. De massa van de proefstukken werd opgemeten na 1,5; 3, 6, 24, 48, 168, 216 en 336 uur.



Figuur 6: Proefsopstelling capillariteit

Als resultaat uit deze proef werd de totale opgeslorpte massa water na 336u bij alle betonmengelingen geregistreerd, om deze met elkaar te vergelijken. Naast deze parameter kunnen nog andere parameters gedefinieerd worden. Zo maakt men in (Gonen, 2007) gebruik van de opslorplingscoëfficiënt om de resultaten van de capillariteitsproeven beter voor te stellen. Deze wordt bekomen met behulp van de volgende uitdrukking:

$$\frac{Q}{A} = S\sqrt{t} \quad (3.2)$$

waarbij  $Q$  de massa aan opgeslorpt water voorstelt (in kg),  $A$  het oppervlak van het betonlichaam dat in contact was met het water ( $m^2$ ),  $Q$  wordt meestal algemeen uitgedrukt in  $kg/m^2$ .  $t$  stelt de tijd in uur voor en  $S$  is de opslorplingscoëfficiënt van het proefstuk ( $\frac{kg}{m^3\sqrt{h}}$ ). Deze stelt als het ware de richtingscoëfficiënt voor van de rechte die kan getekend worden wanneer het volume opgeslorpt water, genormaliseerd over de oppervlakte, wordt voorgesteld in functie van de vierkantswortel van de tijd. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen 2 verschillende opslorplingscoëfficiënten: 1 voor het eerste tijdsbestek ( $S_1$ ) waarin de capillaire opzuiging sterk toeneemt in functie van de tijd en 1 voor het tweede tijdsbestek ( $S_2$ ) ongeveer startend na 24u, waarbij de capillaire opzuiging minder snel toeneemt.

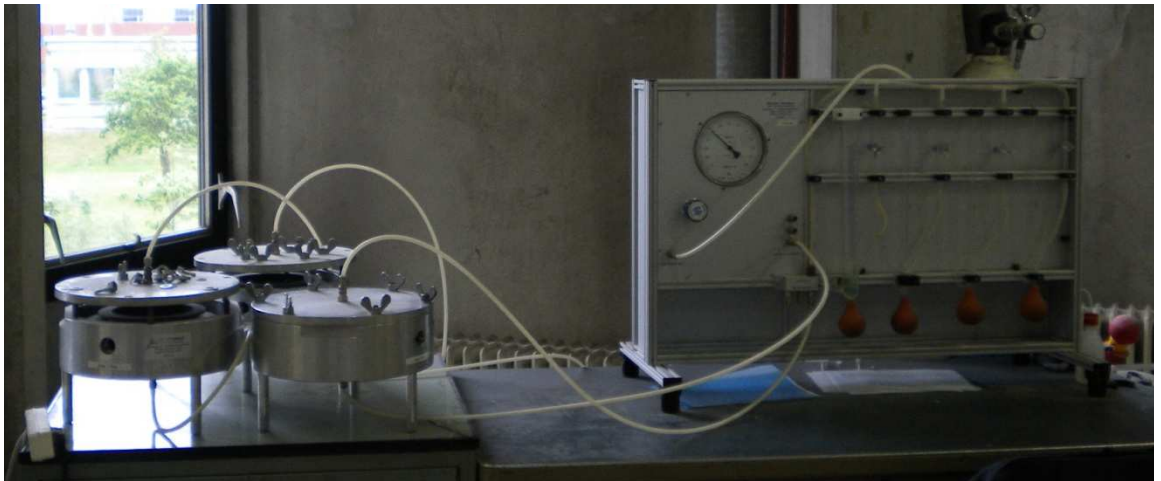
De twee opslorplingscoëfficiënten zijn volgens Audenaert (2006) toe te schrijven aan een verschillende samenstelling van de kern- en randzone van het beton. In de directe omgeving van de afstrijk- en bekistingsvlakken zou over het algemeen een iets grotere porositeit heersen dan in de kernzone. Dit zou te maken hebben met de aanwezigheid van een grotere hoeveelheid cementeerbaar materiaal in de randzone.

#### **4.2.2.3 Gasdoorlatendheid**

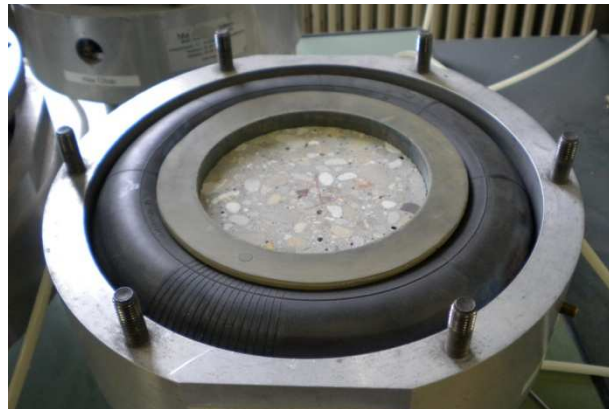
De bepaling van de gasdoorlatendheid van een specifiek beton wordt bepaald aan de hand van een gaspermeabiliteitsproef. Per betonmengeling en op een leeftijd van 1 en 3 maand respectievelijk, werden uit een plaat van 400x400x100 mm<sup>3</sup> drie kernen met diameter 150 mm geboord. Uit het midden van deze kernen werden schijven met een hoogte van 50 mm gezaagd, waarvan het oppervlak daarna geëffend werd. Op de gewenste ouderdom werden de proefstukken in een oven van 40°C geplaatst tot hun massaverlies in 24 uur kleiner was dan 0.1% ( $\pm 14$  dagen).

Het doel was om de gasdoorlatendheid van alle betonmengelingen bij eenzelfde verzadigingsgraad te beproeven, daar deze een grote invloed heeft op de resultaten van de proef. Voor elke mengeling werd dezelfde proefmethode toegepast zodat de resultaten achteraf beter te vergelijken waren, en verzadigingsgraden in dezelfde 'range' bekomen werden. De proefstukken op 1 maand ouderdom werden beproefd na een drogingstemperatuur van 40°C, 80°C en 105°C. Deze temperaturen komen vaak voor in de proefmethodes uit de literatuur volgens Boel (2006). Op 28 dagen ouderdom werden ze in een oven op 40°C geplaatst gedurende 14 dagen. Na deze periode werd nagekeken of het massaverlies minder dan 0,1% van de massa bedroeg. De eerste gaspermeabiliteitsmeting kon gebeuren. Na deze meting werden de proefstukken in een oven op 80° geplaatst. Dit gedurende een week, totdat het massaverlies opnieuw minder dan 0,1% van de massa bedroeg. De tweede gaspermeabiliteitsmeting werd uitgevoerd. Na deze meting werden de proefstukken gedurende een week in een oven op 105°C geplaatst worden, daarna kon de 3<sup>e</sup> meting plaatsvinden. Na deze drie metingen werd het proefstuk vacuümverzadigd, zodat de verzadigingsgraad van elk proefstuk tijdens elke meting kon bepaald worden. De proefstukken op 3 maand ouderdom konden evenwel niet bij alle droogtemperaturen worden beproefd gezien het beperkte tijdsbestek van deze masterproef. De proeven zullen verder worden opgevolgd door ir.-arch. Philip Van den Heede.

Om de schijnbare gasdoorlatendheid te meten, wordt een permeameter van het type “CEMBUREAU” gebruikt (Figuur 7). De proefmethode staat beschreven in (RILEM, 1999). Drie proefstukken van eenzelfde mengeling werden elk apart beproefd, zo is er een beter zicht op de spreiding van de resultaten. Daartoe dienden ze geplaatst te worden in een proefcel, waarin ze omgeven werden door een rubberen band waarvan de druk werd ingesteld op 6 bar, zodanig dat zuurstoflekken langsheen de mantel van het proefstuk vermeden worden (zie Figuur 8).



**Figuur 7: Permeameter type "CEMBUREAU"**



**Figuur 8: Proefstuk in rubberen band tegen zuurstoflekken**

Zuurstof werd op een specifieke druk ingesteld en aangevoerd onderaan de proefcel. Bovenaan de proefcel werd de zuurstof dan verder geleid naar het meettoestel. Door middel van een zeepbellenmeter kon de tijd worden opgemeten die een zeepbel nodig heeft om een bepaald volume te doorlopen in de meetbuis. Dit is een maat voor het gasdebiet  $Q$ , welke door het proefstuk stroomt bij de opgelegde druk.

Deze proef werd uitgevoerd bij een zuurstofdruk van 2, 3 en 4 bar. Tussen elke meting diende een half uur gewacht te worden, omdat zich een steady-state toestand dient in te stellen doorheen het proefstuk. Bij elk proefstuk werden 3 metingen uitgevoerd per ingestelde druk.

De gaspermeabiliteit die proefondervindelijk gevonden wordt, wordt de schijnbare gaspermeabiliteit  $k_a$  genoemd en is afhankelijk van de gemiddelde druk  $P_M$  over het proefstuk. Theoretisch gezien is  $k_a$  een intrinsieke parameter maar in werkelijkheid hangt de gaspermeabiliteit af van de verzadigingsgraad, de drukgradiënt en de microstructuur van het materiaal (Boel, 2006).

De schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt  $k_a$  ( $m^2$ ) kan dan berekend worden, gebruik makend van de vergelijking van Darcy op de volgende manier:

$$k_a = \frac{2\mu_d P_2 Q L}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (3.3)$$

waarin  $k_a$  = schijnbare permeabiliteit van het beton in  $m^2$

$\mu_d$  = dynamische viscositeit van het beschouwde gas (zuurstof op 20°C  $\mu=2,02 \cdot 10^{-16}$  Nsm<sup>-2</sup>)

$P_2$  = de druk aan de uitlaat, gelijk aan 1 bar bij een standaardtemperatuur en druk

$P_1$  = de druk aan de inlaat, variabel in te stellen gedurende de proef

$Q$  = gasdebiet in m<sup>3</sup>/s doorheen het proefstuk

$L$  = dikte van het proefstuk, hier 0,05m

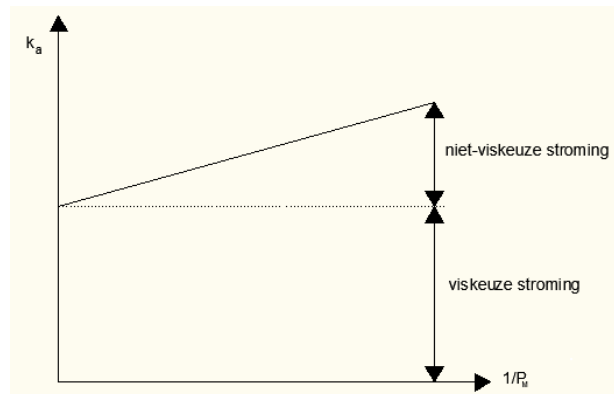
$A$  = doorsnede-oppervlak van het proefstuk met hier diameter 0,15m

De gemiddelde druk over het proefstuk wordt dan:

$$P_M = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (3.4)$$

In principe is de wet van Darcy niet toepasbaar op gassen daar deze samendrukbaar zijn en hun doorstroming doorheen een poreus medium niet louter viskeus is. De veronderstelling van de viskeuze stroming wordt toch aanvaard, zodat een schatting van de gaspermeabiliteit kan gemaakt worden. Indien de schijnbare gaspermeabiliteit wordt uitgezet in functie van

de inverse van de gemiddelde druk  $P_M$ , is het mogelijk het aandeel viskeuze stroming en het aandeel niet-viskeuze stroming visueel voor te stellen (zie Figuur 9).



Figuur 9: Aandeel van niet-viskeuze en viskeuze stroming

Om dan de intrinsieke permeabiliteit terug te vinden wordt gebruikt gemaakt van de methode van Klinkenberg (Boel, 2006). Deze veronderstelt dat bij heel hoge drukken en dus zuiver viskeuze stroming, de permeabiliteit onafhankelijk is van het soort fluïdum. Hij stelde de volgende vergelijking voor die algemeen geldig is voor de gasdoorstroming doorheen een poreus medium:

$$k_a = k_i \left( 1 + \frac{\beta_k}{P_m} \right) \quad (3.5)$$

De intrinsieke permeabiliteit is dan de waarde waarvoor  $1/P_M$  gelijk is aan nul. In (Boel, 2006) werd opgemerkt dat door Skejetne et al. (1999) aangetoond werd dat in de formule van Klinkenberg  $P_M$  beter door  $P_1$  vervangen zou worden.

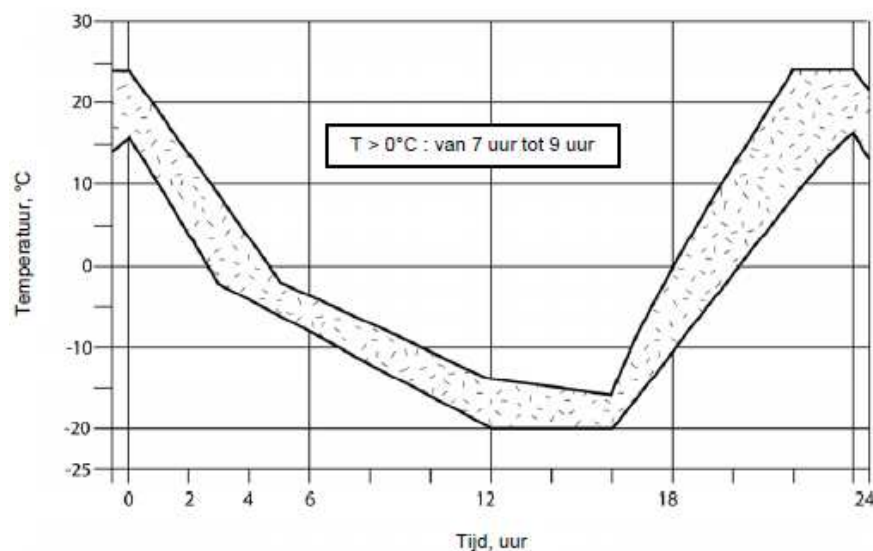
#### 4.2.3 Vorst-dooi bestandheid in combinatie met dooizouten

De vorst-dooibestandheid in combinatie met dooizouten werd beproefd volgens de norm NBN EN 1338. Per betonmengeling en op de leeftijd van 1 en 3 maand werden telkens 6 proefstukken met diameter 100 mm beproefd. Deze werden bekomen door uit een plaat van 400mmx400mmx100mm 6 cilinders te boren en deze in 2 te zagen zodat elk proefstuk een hoogte van 50 mm heeft. Van elke cilinder werd telkens het proefstuk beproefd met het bekistingsvlak. Deze proefstukken werden eerst 28 dagen in een geklimatiseerd lokaal bij  $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  en meer dan 90% relatieve vochtigheid bewaard. Daarna werden deze met behulp van epoxy ingelijmd in PVC-buizen. Het proefoppervlak A werd bepaald door het gemiddelde van twee diametermetingen tot op de millimeter nauwkeurig. Na bewaring in

de geklimatiseerde ruimte aan een temperatuur van  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$  werd een laag van  $5 \pm 2$  mm leidingwater op het proefoppervlak gegoten. Deze waterlaag werd gedurende  $72 \pm 2$  uur in stand gehouden bij  $20 \pm 2 ^\circ\text{C}$  en kon gebruikt worden om de doeltreffendheid van de dichting tussen het proefstuk en de epoxydichting te beoordelen.

Wanneer de proefstukken in de vrieskast werden gezet, werd het water dat zich op het proefoppervlak bevond, vervangen door een laag van  $5 \pm 2$  mm van een 3%-oplossing van NaCl in leidingwater, gemeten vanaf het bovenoppervlak van het proefstuk. Een polyethyleenfolie of plastic afdekking sloot het bovenvlak horizontaal af om verdamping te voorkomen. De polyethyleenfolie moest zo strak mogelijk blijven gedurende de proef en mocht niet in contact komen met het vriesmedium.

Eens in de vrieskast werden de proefstukken onderworpen aan herhaalde vorst-dooicycli. Gedurende minstens 7 en hoogstens 9 uur per cyclus steeg de temperatuur boven  $0^\circ\text{C}$ . De tijd van de eerste cyclus van een proefstuk begon te lopen binnen de  $0 \pm 30$  min. nadat het proefstuk in de vrieskast werd geplaatst. De temperatuursgrenzen van de cycli zijn in onderstaande figuur (NBN EN 1338 (2003)) per 24u terug te vinden.



Figuur 10: Temperatuursschema vorst-dooicycli (per 24u)

De proefstukken bleven in totaal gedurende 28 cycli in de vrieskast. Na elke 7 cycli echter, werd de afschilfering verzameld. Dit gebeurde door spoeling met een spuitfles en afborsteling, tot geen materiaal meer loskwam. De afschilfering werd verzameld in een

papieren filter met een maaswijdte van 8 tot 10  $\mu\text{m}$ , die op voorhand gewogen werd. De filters met het afgeschilferde materiaal werden daarna voor minstens 24u in de oven op  $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  geplaatst en vervolgens gewogen. Zodoende kon het drooggewicht van het afgeschilferde materiaal bepaald worden, rekening houdend met de massa van het filterpapier.

Uiteindelijk kon dan het massaverlies per oppervlakte-eenheid van het proefstuk in  $\text{kg}/\text{m}^2$  bepaald worden als  $L_M = \frac{M}{A}$  met M de massa van de totale hoeveelheid losgekomen materiaal na 28 cycli uitgedrukt in kilogram en A de oppervlakte van het proefoppervlak uitgedrukt in vierkante meter.

#### 4.2.4 Fluorescentiemicroscopie op slijpplaatjes

Enkele slijpplaatjes werden met behulp van een polarisatiemicroscoop Leica DM LP (zie Figuur 11) in doorvallend gepolariseerd licht onderzocht. De slijpplaatjes werden met gekleurd epoxy geïmpregneerd, waardoor ze ook, mits het gebruik van specifieke kleurenfilters, in doorvallend fluorescerend licht bestudeerd konden worden. Van elke betonmengeling werden op verschillende ouderdom (1 en 3 maand) 3 slijpplaatjes vervaardigd. Op elk slijpplaatje werd ook telkens het bekistingsvlak aangeduid, zodat ook verschillen tussen de zone nabij het bekistingsvlak en het niet-bekistingsvlak bekeken konden worden.

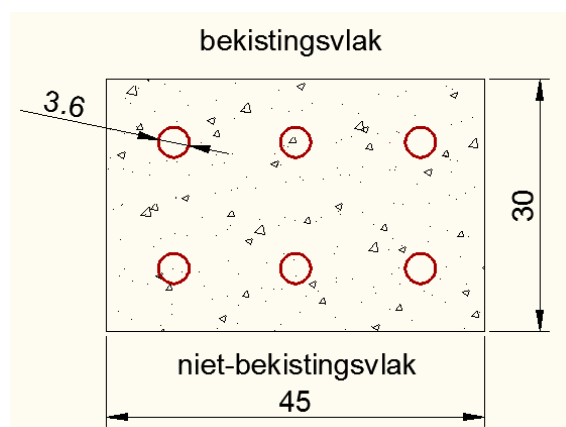


Figuur 11: Microscoop Leica DM LP



Het voorbereidingsproces van de slijpplaatjes wordt uitgebreid beschreven in (Boel, 2006). Hier worden enkel de voornaamste processen in het vervaardigen van de slijpplaatjes vermeld. Vooreerst werd het betonstaal onder vacuüm geïmpregneerd met een epoxy waaraan gele kleurstof is toegevoegd die onder UV-belichting fluorescerend reageert. Alle holten en/of barsten van het beton werden volledig geïmpregneerd. Met behulp van een ethanolgekoelde diamantzaag werd vervolgens in het met hars geïmpregneerde staal een dunne schijf van ongeveer 1 cm gezaagd. Van deze schijf werd vervolgens 1 oppervlak machinaal vlak afgeslepen tot het omhullende hars net verwijderd is, waarna dit schijfje terug onder vacuüm met gekleurd hars geïmpregneerd werd. De oppervlakken van het schijfje werden opnieuw volkomen vlak afgeslepen en 1 van de vlakken werd op een draagglas gekleefd. Ten slotte werd het staal met behulp van een abrasief poeder en diamantschijven tot op een dikte van 25  $\mu\text{m}$  afgeslepen. Als laatste stap werd het slijpplaatje met een dekglas afgedekt.

De microscoop werd op een PC-eenheid aangesloten, zodat de beelden live overgezet werden. De mogelijkheid was er om tijdens het bestuderen van het slijpplaatje, foto's te nemen die dan werden doorgestuurd naar de PC. Er werd ervoor geopteerd om van elk slijpplaatje telkens 3 foto's te nemen aan het bekistingsvlak en 3 aan het niet-bekistingsvlak, zoals aangeduid op de volgende figuur. De getrokken foto's stelden telkens een cirkel voor met diameter 3,6 mm op het slijpplaatje, daar voor de vergroting een factor 50 was gekozen.

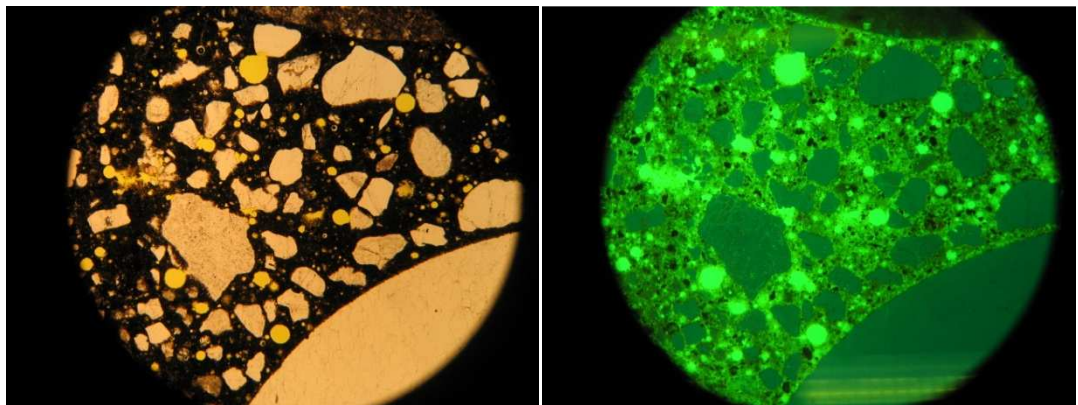


**Figuur 12: Aanduiding foto-opnameplaatsen op slijpplaatje (afmetingen in mm)**

Voor elk van die 6 plaatsen werd ook telkens een foto genomen onder doorvallend gepolariseerd licht, en onder doorvallend fluorescerend licht. Zo werden in totaal 12 foto's genomen van elk slijpplaatje. Een voorbeeld wordt hierna gegeven in Figuur 13.

Er werd telkens dezelfde werkwijze gehanteerd bij alle slijpplaatjes van de verschillende mengelingen: een vergroting van 5 x 10, lichtsterkte van 5 op een schaal van 10 bij doorvallend gepolariseerd licht, en de maximale lichtsterkte bij het fluorescerende licht.

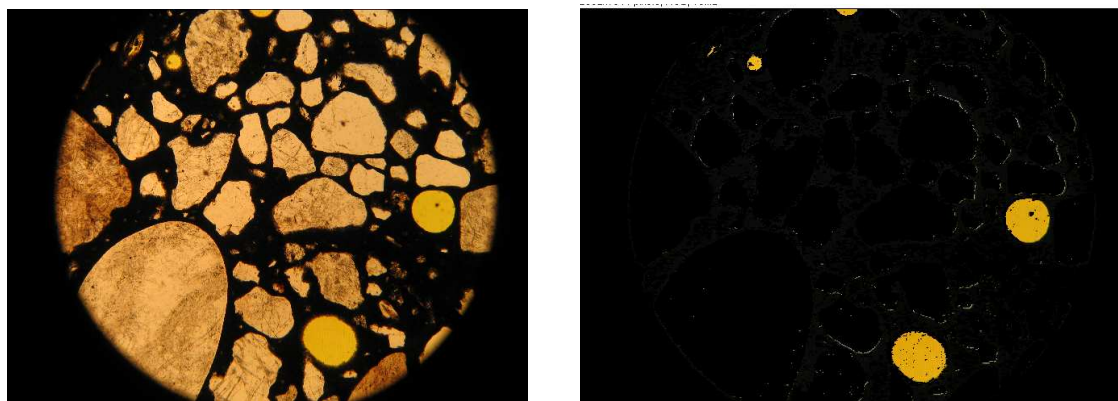
Op de foto bij het doorvallende licht zijn de luchtbellens duidelijk te zien daar ze een donkere gele kleur hebben, donkerder dan de omliggende granulaten. Het 'zwarte' omheen alles stelt de cementpasta voor. Op het fluorescentie-beeld is duidelijk te zien dat donkerzwarte vlieg-as-deeltjes zich bevinden in de cementpasta, uniform verspreid.



Figuur 13: Links: foto onder doorvallend gepolariseerd licht. Rechts: foto onder doorvallend fluorescerend licht.

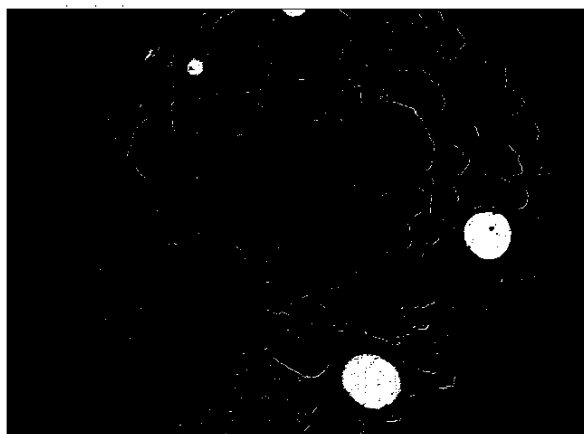
Het doel was om vooreerst *kwalitatief* de beelden van de verschillende mengelingen met elkaar te vergelijken. Als visueel onderzoek werd gekeken of er grote verschillen zijn qua luchtbelgehalte, grootte en verspreiding van de luchtbellens. Ook werd een verschil onderzocht tussen bekistingsvlak en niet-bekistingsvlak qua luchtbelgehalte en -distributie. Daarna kon ook nog, indien nodig, een *kwantitatief* onderzoek gedaan worden naar de hoeveelheid luchtholtes die aanwezig zijn in het slijpplaatje. Daarvoor werd gebruik gemaakt van het programma ImageJ om de beelden gemaakt met het gepolariseerde doorvallende licht te bewerken.

Eerst en vooral werd een zekere drempelwaarde ingegeven. In het menu 'Color threshold' werd het interval van de 'Hue' gebracht naar [30,225] in plaats van [0,225]. Dit levert onderstaand beeld op. De luchtbellens lichten duidelijk op.



Figuur 14: Links: origineel fotobeeld & Rechts: bewerkt 'Hue'-interval

Daarna kon de foto worden omgezet naar een 8-bits kleurfoto met enkel grijsstinten. Deze foto kon dan op z'n beurt worden omgezet in een 'Binary': dit is een foto met enkel wit of zwarte kleurpigmenten. De bewerkte foto uit het voorbeeld ziet er dan uit zoals in volgende Figuur 15.



Figuur 15: 'Binary'-foto in ImageJ

Tot slot kon de relatieve oppervlakte van het totale luchtgehalte ten opzichte van de gehele foto bepaald worden door middel van het menu-item 'Analyze particles'. Hierbij gaat het programma op zoek naar partikels die in het wit zijn aangeduid, en een ingestelde pixelgrootte hebben. De instelling gekozen om het luchtgehalte te bepalen was een grootte van 10 tot oneindig qua pixelgrootte. De ondergrens van 10 is gekozen zodanig dat de kleine witte puntjes (te zien op Figuur 15) naast de granulaten, die niet tot de luchtholtes behoren, niet worden meegerekend. Het bekomen percentage lucht voor de gehele foto moest dan uiteraard nog vermenigvuldigd worden met een factor die rekening houdt met het feit dat het proefoppervlak niet de ganse foto in beslag neemt. Deze factor is gelijk aan het quotiënt van de oppervlakte van de gehele foto en de oppervlakte van het

proefoppervlak en bedraagt 1,29. Zo konden de slijpplaatjes van de verschillende mengelingen uiteindelijk met elkaar vergeleken worden aan de hand van de verschillende percentages lucht die teruggevonden werden in de beelden.

#### **4.2.5 Air-void-analyse**

Voor de air-voidanalyse werd gebruik gemaakt van het toestel RapidAir 457. Dit toestel maakt het mogelijk om in overeenstemming met de ASTM C457 het luchtbelgehalte en de luchtbeldistributie in verhard beton te bepalen.

In de ASTM C457 worden 2 methodes besproken, waarvan 1 gebruikt wordt in dit afstudeerwerk: de 'linear traverse methode'. In de ASTM worden manuele methodes besproken, terwijl er bij dit onderzoek gebruik gemaakt wordt van het toestel RapidAir 457, dat dezelfde handelingen en interpretaties als bij de manuele methode automatisch uitvoert. Dit toestel is ontworpen door de Concrete Experts International (CXI). De analyse neemt ongeveer 15 minuten in beslag en is veel voordeliger tegenover de 4 à 6 uur die een onderzoeker nodig heeft om hetzelfde onderzoek manueel uit te voeren.

Het gehele systeem bestaat uit een PC die alles controleert, een videocamera, een microscooplenz, een beweegbaar platform en een gebruiksvriendelijk software-programma. De RapidAir 457 is op Figuur 16 getoond.



Figuur 16: RapidAir 457 (foto vanop [www.concrete-experts.com](http://www.concrete-experts.com))

##### **4.2.5.1 Voorbereiding van de proefstukken**

Vooraleer met de airvoid-analyse kan aangevangen worden dienden de proefstukken voorbereid te worden. De proefstukken werden vooreerst glad gepolijst. Dit dient te gebeuren in 7 opeenvolgende stappen, waarbij een met krijt aangebracht raster met

diamantschijven dient afgepolijst te worden. Het totale polijsten omvat 30 minuten en er gaat een oppervlak af met een dikte van ongeveer 1mm. Goed polijsten geeft oppervlakken zonder reliëf, zonder zaagmerktekens en waarbij de luchtbellen scherpe randen vertonen. (Annerel, 2006).

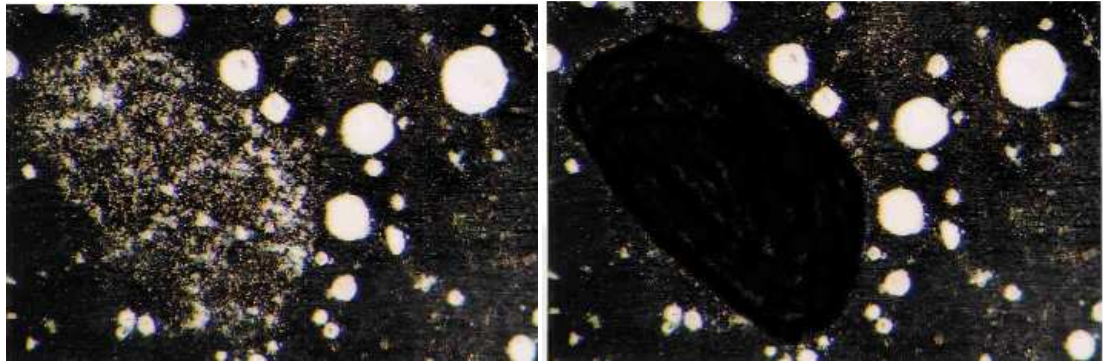
Na het polijsten wordt het proefstuk zwart gemaakt, dit kan met een dikke viltstift. De bedoeling is om een contrastverschil te creëren. Eens het proefstuk volledig zwart is gemaakt, wordt er droog, wit bariumsulfaatpoeder ( $\text{BaSO}_4$ ) overheen gestrooid. Dit poeder heeft een deeltjesgrootte kleiner dan  $2\mu\text{m}$  zodat een goede vulling van de luchtbellen wordt voorzien. Het opvullen gebeurt door het poeder zacht met een rubberen stamper aan te drukken. Het overtollige poeder wordt achteraf met een stalen mes verwijderd. Dit dient met uiterste zorg te gebeuren zodat geen poeder terug wordt meegesleurd uit de luchtholtes enerzijds, en de zwarte inktlaag mag noch gekrast, noch verwijderd worden anderzijds. Daarna kan nog met de blote palm van de hand over het proefstuk gewreven worden om het overtollige poeder te verwijderen, zodat de witte luchtbellen in scherp contrast komen te staan met de zwarte gekleurde cementpasta en granulaten. De ‘transformatie’ van het proefstuk is getoond op Figuur 17.



**Figuur 17: Voorbereiding gepolijst proefstuk met zwarte inktstift en  $\text{BaSO}_4$ -poeder**

In een laatste stap dienen holtes, aanwezig in granulaten, nog bijgekleurd te worden met de zwarte stift, evenals kleine barsten in de granulaten. Poreuze granulaten zouden een verkeerd beeld kunnen geven in de analyse doordat de kleine luchtholtes daarin ook worden opgevuld met het poeder en aanzien worden als kleine luchtbellen. Vandaar dienen deze poreuze granulaten ook zeker bijgekleurd worden.



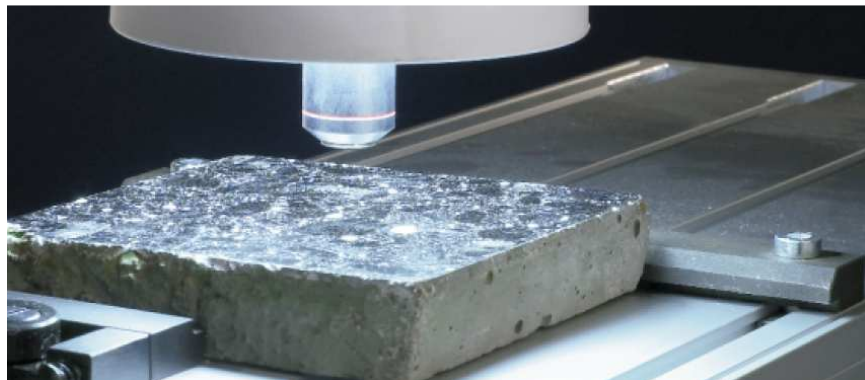


Figuur 18: Bijkleuren van een poreus granulaat

Het niet bijkleuren van de granulaten levert volgens een case-study op de website van de RapidAir 457 ([www.concrete-experts.com](http://www.concrete-experts.com)) slechts een fout op van 1,6 à 10% van het gemeten luchtgehalte.

#### 4.2.5.2 *Uitvoering van de metingen met de RapidAir457*

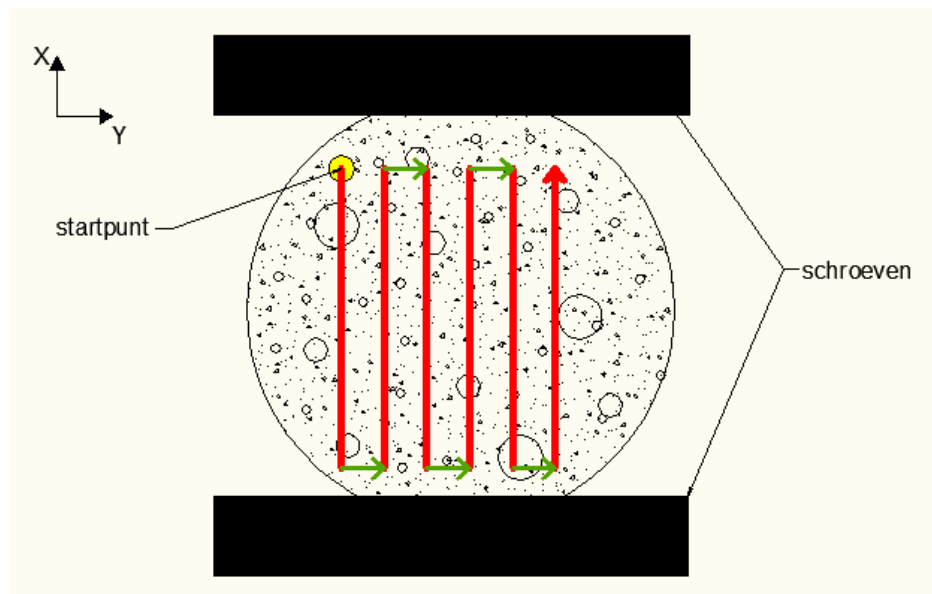
Na de voorbereiding kan het proefstuk tussen de schroeven van de tafel geplaatst worden op een veer, waarmee het monster waterpas wordt gezet onder de microscooplenz.



Figuur 19: Plaatsing van het proefstuk in de RapidAir 457 ([www.concrete-experts.com](http://www.concrete-experts.com))

Na het starten van de analyse zal door het bewegen van de microscoop in X en Y-richting het monster doorlopen worden volgens de “lineair traverse”-methode beschreven in ASTM 457. Voor aanvang wordt de lens boven de linkerbovenhoek geplaatst, vanaf waar ze in eerste instantie in de X-richting loopt en daarna telkens ietwat in de Y-richting opschuift. Het aantal lineaire paden dat wordt geanalyseerd, wordt bepaald door het invoeren van drie parameters in het programma: de te onderzoeken oppervlakte van het monster (traverse area), de te onderzoeken totale lengte (traverse length) en het aantal lijnen waarmee de analyse per beeld wordt uitgevoerd (probe lines) (Annerel, 2006). Over de in te voeren parameters wordt verdergegaan in de volgende paragraaf. Aangezien het gebruikte proefstuk voor dit afstudeerwerk een cirkelvormig proefstuk is, dient goed aandacht besteed te worden

aan de 'traverse area', zodat niet buiten het proefstuk gescand zou worden. Het doorlopen van het proefstuk gebeurt dan zoals op Figuur 20.



**Figuur 20: Afgelegd pad volgens 'linear traverse' methode**

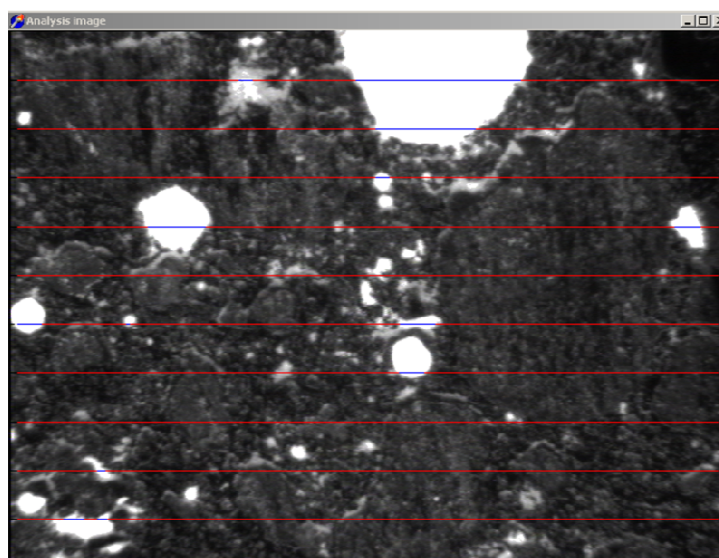
Nadat het monster volledig is doorlopen, keert de camera terug naar zijn beginpositie. Tijdens de analyse beweegt de tafel in de X-richting volgens zorgvuldig bepaalde staplengtes zodat twee opeenvolgende videobeelden elkaar mooi opvolgen (een overlapping van de beelden van 20 pixels is voorzien). Doordat videosignalen dikwijls verstoord kunnen zijn, worden 20 pixels, van het in totaal 768 pixels brede scannend kader, niet gebruikt voor analyse. Het actieve beeld is dus slechts 748 pixels. Het meten van de luchtbellen (chord length) gebeurt met een lijn van 1 pixel breedte (de probe line). Het programma onthoudt het vorige beeld en kan op die manier ook zonder problemen luchtbellen meten die zich uitspreiden over meerdere beelden. Zowel witte als zwarte zones die kleiner zijn dan 4 pixels lengte worden automatisch als verstoring beschouwd door het programma. Daar een pixel ongeveer  $2,1\mu\text{m}$  is, wordt er met luchtbellen kleiner dan  $8,4\mu\text{m}$  geen rekening gehouden (Annerel, 2006).

De analyse wordt uitgevoerd op beelden die door de op de microscoop lens aangesloten videocamera rechtstreeks worden doorgestuurd naar de PC. Deze ruwe beelden worden eerst nog door een instelling van een gepast thresholdlevel omgezet in binaire beelden. De analyse van de RapidAir 457 gebeurt volledig automatisch, maar de instelling van de threshold is persoonsgebonden en kan de resultaten lichtjes beïnvloeden.

Van elke betonmengeling, beschouwd in dit afstudeerwerk, werden per ouderdom (op 1 en 3 maand) 2 proefstukken met diameter 80mm vervaardigd, en gepolijst langs beide zijden. Zo ontstonden er voor elke betonmengeling 4 proefoppervlakken. Echter, wanneer langs 1 bepaalde zijde de airvoid-analyse was uitgevoerd, werd het proefstuk over 90° gedraaid en werd de analyse opnieuw uitgevoerd. Zo zijn er voor elke betonmengeling dus in totaal 8 analyses gebeurd op verschillende ouderdom: op 1 maand en op 3 maand.

#### 4.2.5.3 *Instelling van de parameters*

In het algemeen is het uiteindelijke totaal gescande oppervlak zeer laag (rond de 1%). Dit komt door de in de ASTM C457 gehanteerde “Linear Traverse”-methode, waarbij geen oppervlaktes berekend worden, maar luchtbellengtes. Op basis van deze koordlengtes wordt er een evenredige extrapolatie naar oppervlaktes en volumes verondersteld. Het meten op een lijn heeft echter het nadeel dat de plaats en het aantal lijnen op het te onderzoeken monster van belang is. Het onderzoek hangt dan tussen een teveel meten (meerdere keren door dezelfde luchtbel) of een te weinig meten (luchtballen vallen tussen de lijnen). Dit beïnvloedt de keuze voor het aantal ‘probe lines’ of ‘traverse lines’, zie Figuur 21. Ook zullen er meetfouten ontstaan doordat er uitgegaan wordt van luchtballen die cirkelvormig zijn. Langwerpige luchtballen zullen dan ofwel meerdere keren als kleine luchtballen gemeten worden, ofwel als 1 zeer grote, waarbij met de extrapolatie een te grote cirkelvormige luchtbel bekomen wordt. (Annerel, 2006)



Figuur 21: Evenwichtig aantal 'probe lines' bij het scannen met de RapidAir 457



In (Annerel, 2006) werd een studie uitgevoerd naar de invloed van de verschillende parameterinstellingen op de resultaten en uitvoerbaarheid van de airvoid-analyse. Een optimum tussen een maximaal gescand oppervlak en een minimum aan tijdsduur werd gevonden bij het scannen met 10 ‘probe lines’, een ‘length traverse’ van 17733mm en een ‘area traverse’ van 60mm x 60mm. Daar ons proefstuk cirkelvormig is en niet rechthoekig als bij de onderzoeken gedaan in het werk van (Annerel, 2006), is ervoor gekozen om de ‘area traverse’ beperkter te houden op 50mm x 50mm. Het aantal ‘probe lines’ en de ‘length traverse’ werd echter wel in overeenstemming gekozen met de eerdere studie. Eén airvoidanalyse nam tenslotte 15 minuten in beslag.

#### ***4.2.5.4 Resultaten uit de air-void-analyse***

Bij het doorlopen van de opeenvolgende lineaire paden worden door de software de koordlengtes van de luchtbellen (chord length) gemeten en in 28 klassen onderverdeeld. Deze zijn een indicatie voor de verschillende aanwezige luchtbeldiameters in het beton. De kleinste klasse is 0-10µm en de grootste 3000-4000µm. Grotere koordlengtes dan 4mm worden wel opgemeten, maar worden verspreid geclassificeerd over klassen kleiner dan 4mm (Annerel, 2006). Na de analyse wordt een printklaar verslag gegenereerd met de volgende airvoid-parameters in verwerkt (die verder in dit afstudeerwerk gebruikt zullen worden):

##### ***Luchtgehalte $A_a$ [%]***

Deze wordt berekend volgens  $A_a = \frac{T_a}{T_{tot}} \times 100$  (3.6)

met  $T_a$ = de totaal doorlopen afstand (chord length) aan luchtbellen en  $T_{tot}$ = de totaal doorlopen afstand. Voor deze waarde wordt op het gebied van vorstbestandheid een minimaal percentage vereist. Een te hoog percentage is dan weer nadelig voor de druksterkte.

##### ***Specifieke oppervlakte $\alpha$ [mm<sup>-1</sup>]***

De specifieke oppervlakte wordt bepaald als  $\alpha_a = \frac{4N}{T_a}$  (3.7)

met  $N$ = het aantal doorlopen luchtbellen. Dit stelt de verhouding van de oppervlakte van een gemiddelde holte ten opzichte van het volume van de gemiddelde holte, berekend uitgaande van de gemiddelde koordlengte voor of de verhouding van de oppervlakte in aanraking met de luchtholten tot het totaal volume poreus materiaal. Deze formule is

opgesteld in de veronderstelling dat de luchtbellen bolvormig zijn (Boel, 2006). Indien 2 materialen eenzelfde poriënvolume hebben zal het materiaal met overwegend fijne poriën een veel hogere specifieke oppervlakte hebben dan het materiaal met overwegend grote poriën. Met het oog op vorstbestandheid worden hoge waarden nagestreefd daar voor eenzelfde luchtgehalte bij hogere waarden van het specifieke oppervlak een kleiner volume pasta tussen de holten ligt.

### ***Spacing factor $L_s$ [mm]***

Deze wordt berekend volgens Powers op de volgende manier:

$$\text{voor } p/A \leq 4,33: L_s = \frac{T_p}{4N} \quad (3.8)$$

$$\text{voor } p/A > 4,33: L_s = \frac{3}{\alpha} \left[ 1,4 \left( 1 + \frac{p}{A} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (3.9)$$

met  $T_p$  de totaal doorlopen afstand (chord length) aan cementpasta en  $p$  het pastagehalte (%). De formules voor de spacing factor zijn beiden een overschatting van de eigenlijke, werkelijke spacing factor (Annerel, 2006). Formule 3.8 werd gebruikt in de veronderstelling dat de spacing factor simpelweg het volume pasta per luchtbeloppervlak is. Formule 3.9 echter gaat ervan uit dat alle luchtbellen sferisch van vorm zijn, gelijkmatig verspreid voorkomen in de cementpasta en eenzelfde diameter hebben. De kleinste waarde bekomen uit de 2 formules zal het nauwst aanleunen tegen de werkelijke spacingfactor.

### ***Gemiddelde koordelengte $l_{gem}$ [mm]***

Deze parameter wordt berekend als de totale som van de individuele koordlengtes van de doorsneden holten gedeeld door het aantal doorsneden holten.

$$l_{gem} = \frac{T_a}{N_a} \quad (3.10)$$

Hierin is  $T_a$  de totale lengte koordlengtes van de holten en  $N_a$  de holtenfrequentie.

Men moet nog in het achterhoofd houden dat de methode berust op een onderzoek in het vlak, terwijl een driedimensionaal fenomeen wordt bestudeerd. Er wordt verondersteld dat de waarden uit het vlak evenredig mogen worden geëxtrapoleerd naar een volume.

# Hoofdstuk 5

## Experimenteel proefprogramma: resultaten & discussie

### 5.1 Statistische verwerking van de resultaten

Bij elke proef werden meerdere proefstukken gebruikt om dezelfde proef uit te voeren. Daardoor kon voor elke proef een gemiddelde waarde van het resultaat ( $\bar{x}$ ) berekend worden. In alle volgende grafieken werden telkens gemiddelde waarden voorgesteld. Om de fout op deze gemiddelde waarden beter weer te geven, werd ook telkens de standaardafwijking van de gemiddeldes voorgesteld: de standaardfout ( $s_f$ ). Deze werd berekend als het quotiënt van de standaardafwijking en de wortel uit het aantal metingen per proef:

$$s_f = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (4.1)$$

Voor de statistische verwerking werd verder gebruik gemaakt van het programma SPSS. In dit programma werden per mengeling, per ouderdom telkens alle proefresultaten per proefstuk ingegeven. Daarna werd een enkelvoudige variantie-analyse (One-Way ANOVA) uitgevoerd op de resultaten. Daarbij werd telkens getest of de varianties homogeen waren al dan niet, door middel van een Levene's test. Wanneer de effectieve significantie meer dan 1% bedroeg, werd de hypothese aanvaard en werden alle varianties homogeen verondersteld. De 'One-Way ANOVA' zelf ging na of er significante verschillen waren tussen de gemiddelde waardes van de steekproeven. Bij een significantie lager dan 5% werd gesteld dat de gemiddeldes significant van elkaar verschilden.

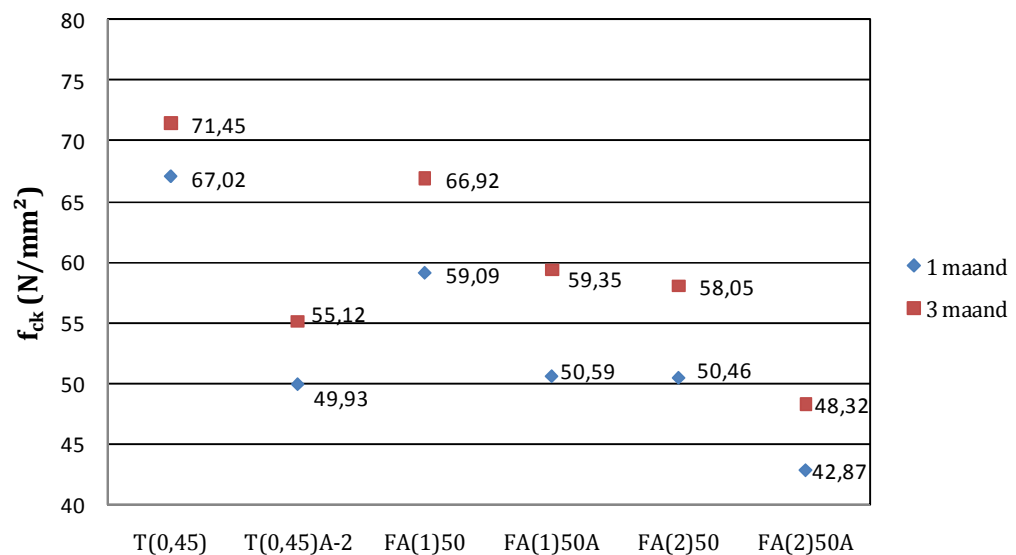
Om te weten welke gemiddeldes significant verschilden en welke niet, werden Post Hoc-testen uitgevoerd. Naargelang de varianties homogeen waren of niet werd een bijkomende Student-Newman-Keuls- of een Dunett's-Test uitgevoerd. Deze testen delen de resultaten op in groepen met significant verschillende gemiddelden.

Op deze wijze kon besloten worden welke resultaten significant verschillend waren van anderen, en welke dicht tegen elkaar aanleunden.

## 5.2 Druksterktes

### 5.2.1 Resultaten

De druksterktes van de 6 betonmengelingen werden beproefd op telkens 3 kubussen met zijde 150 mm op elke ouderdom. Aan de hand van deze gegevens kon de karakteristieke kubusdruksterkte  $f_{ck}$  gevonden worden. De resultaten zijn op Figuur 22 en in Tabel 7 samengevat.



Figuur 22: Karakteristieke kubusdruksterktes betonmengelingen

Tabel 7: Druksterktes op een ouderdom van 28 dagen en 90 dagen

|                      | T(0,45) | T(0,45)A | FA(1)50 | FA(1)50A | FA(2)50 | FA(2)50A |
|----------------------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| $f_{cm,28d}$ (N/mm²) | 69,27   | 53,23    | 59,68   | 51,32    | 51,69   | 43,53    |
| $f_{ck,28d}$ (N/mm²) | 67,02   | 49,93    | 59,09   | 50,59    | 50,46   | 42,87    |
| betonklasse          | C55/67  | C40/50   | C50/60  | C40/50   | C40/50  | C35/45   |
| $f_{cm,90d}$ (N/mm²) | 72,64   | 55,84    | 70,64   | 64,20    | 63,39   | 51,81    |
| $f_{ck,90d}$ (N/mm²) | 71,45   | 55,12    | 66,92   | 59,35    | 58,05   | 48,32    |
| betonklasse          | C55/67  | C45/55   | C55/67  | C50/60   | C50/60  | C40/50   |

### **5.2.2 Invloed van de additie van luchtbelvormer**

Er is duidelijk te zien dat voor elke mengeling met LBV, de druksterkte significant lager is dan voor de overeenkomstige mengeling zonder LBV, met het grootste verschil tussen de referentiemengelingen ( $\pm 16 \text{ N/mm}^2$ ). De luchtbelvormer induceert luchtholtes in het beton, die het beton poreuzer en dus minder sterk maken. Het effect van de LBV heeft in mindere mate een effect op het vliegasbeton ( - 7 à 10  $\text{N/mm}^2$  t.o.v. -16 à -18  $\text{N/mm}^2$  bij T(0,45)).

### **5.2.3 Vergelijking vliegasbeton – traditioneel beton**

De druksterkte zou moeten afnemen met toenemend vliegasgehalte, doordat de porositeit wordt vermeerderd. Dit is zo op beide leeftijden. Alhoewel gewerkt werd met een kleinere water/bindmiddel-factor in de vliegasbetonmengelingen, wat zou moeten resulteren in een hogere sterkte, blijft de sterkte van de vliegasbetonmengelingen lager dan de referentiemengeling. Volgens Chindaprasirt (2005) heeft beton met een fijner vliegas een grotere druksterkte dan een beton met een grover vliegas. Dit kan ook teruggevonden worden in deze resultaten aangezien FA1 fijner is (fijnheid = 13,2%) dan FA2 (fijnheid = 26,6%) en voor FA1-beton inderdaad een hogere sterkte wordt teruggevonden dan voor FA2-beton (66,92  $\text{N/mm}^2$  t.o.v. 58,05  $\text{N/mm}^2$ ). Dit komt doordat de kleine, sferische vliegasdeeltjes de luchtholten opvullen en zo de densiteit van het beton verhogen, wat resulteert in een hogere druksterkte. Fijnere vliegasdeeltjes zijn ook reactiever door hun groter totaal oppervlak en vormen zo gemakkelijker puzzolane hydratatieproducten dan grover vliegas.

### **5.2.4 Invloed van de ouderdom**

Voor elke mengeling is telkens een significant verschil in druksterkte waar te nemen tussen 1 en 3 maanden ouderdom. De mengelingen waaraan LBV werd toegevoegd vertonen meestal de grootste stijging in druksterktes t.o.v. die zonder LBV: 10,4% t.o.v. 6,6% bij de referentiemengeling en 17,8% t.o.v. 13,3% bij de FA1-mengeling. De verklaring hiervoor zou erin kunnen gevonden worden dat luchtholtes kunnen zorgen voor bijkomende ruimtes waarin hydratatieproducten zich kunnen vormen op latere leeftijd, en zo nog een dichtere structuur kunnen vormen. Bij de FA2-mengeling is er een kleiner verschil in stijging en stijgt de druksterkte meer bij de mengeling zonder LBV (15,9% t.o.v. 12,7%).

De druksterktetoename ligt bij de vliegasmengelingen telkens hoger dan bij de referentiemengelingen. Dit komt doordat de puzzolane hydratatiereacties van de vliegas die zorgen voor een verfijning van de poriënstructuur, trager verlopen dan die bij traditioneel beton, waardoor de sterkte van vliegasseton pas op latere leeftijd wordt ontwikkeld.

### 5.2.5 Besluit

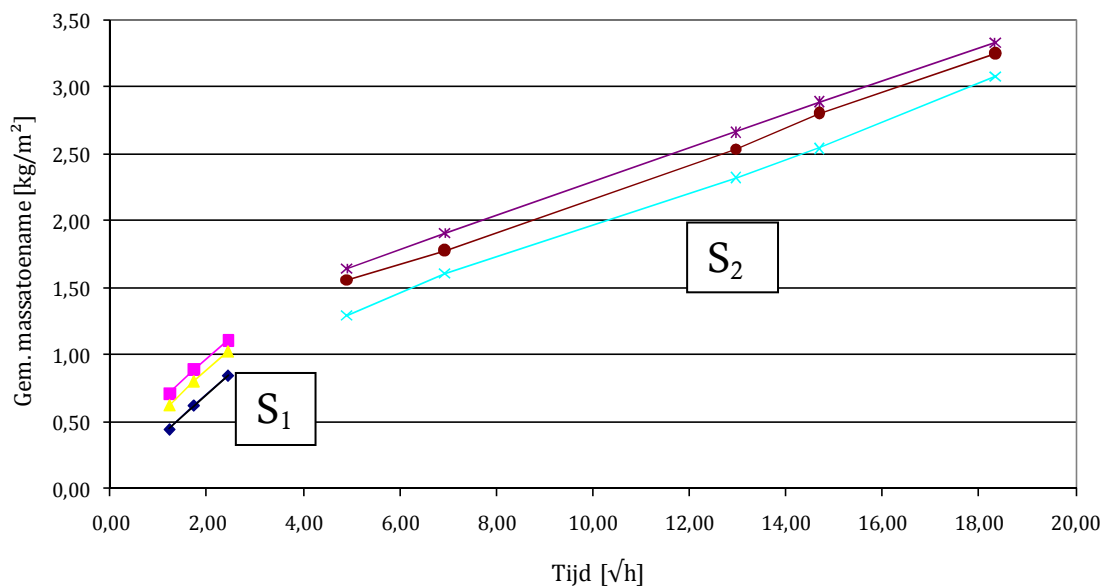
Ondanks de lagere water/bindmiddel-factor slagen de vliegassetonmengelingen er niet in een even grote druksterkte te ontwikkelen als bij traditioneel beton, zelfs niet op latere leeftijd. Het traditionele beton waarover hier gesproken wordt is T(0,45) zoals beschreven in de norm NBN EN 1338, dat blootgesteld kan zijn aan de ergste graad van vorst-dooi aanvallen in combinatie met dooizouten (blootstellingsklasse XF4). De eisen aan dit beton zijn dan ook hoog en zo wordt ook een hoge druksterkte bekomen. De vliegasmengelingen halen de druksterkte dus niet van dit ‘traditionele’ beton, maar mogelijks is dit wel het geval voor andere betonsamenstellingen zonder vliegaseton die aan andere blootstellingsklassen moeten weerstaan, en die ook onder de noemer ‘traditioneel’ beton vallen.

De hogere fijnheid van FA1 zorgt voor een hogere druksterkte voor dit beton dan het beton met FA2. Mengelingen met LBV hebben telkens een kleinere druksterkte dan de overeenkomstige mengeling zonder LBV.

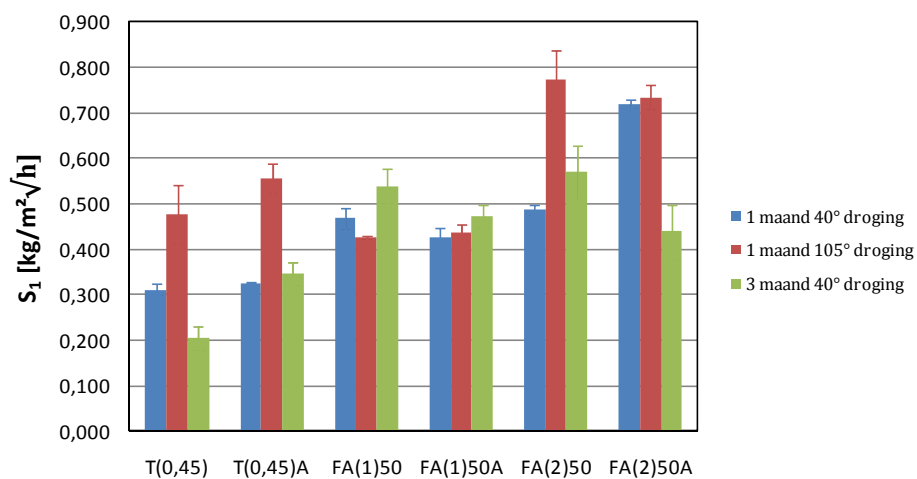
## 5.3 Capillariteit

### 5.3.1 Resultaten

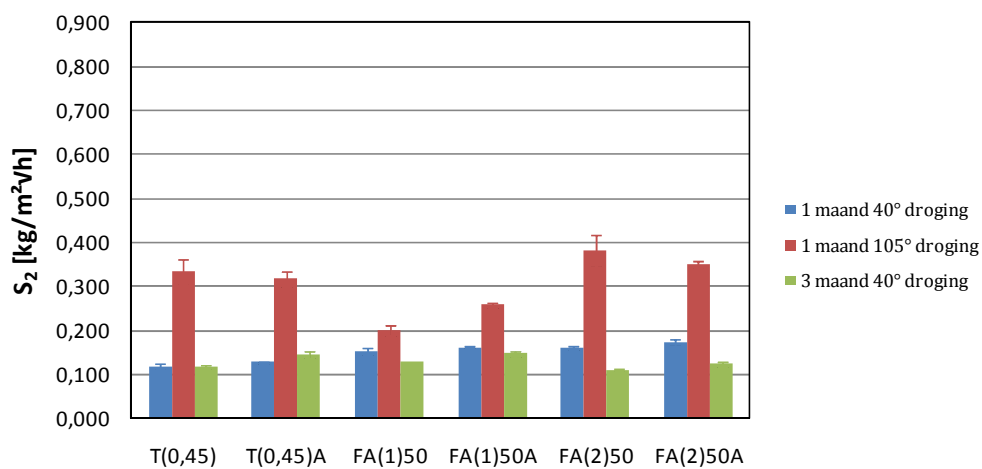
Van elke betonmengeling, op elke leeftijd en na elke drogingstemperatuur werd een gelijkaardige grafiek opgesteld als hieronder weergegeven: de opgeslorpte massa water, genormaliseerd over het proefoppervlak ( $Q_C$  [kg/m<sup>2</sup>]) werd uitgezet tegenover de vierkantswortel van de tijd (in uur) (zie Figuur 23). De resultaten die hieruit worden gehaald zijn de totale capillaire opzuiging na 336u ( $Q_C$  [kg/m<sup>2</sup>]), de opslorplingscoëfficiënt van het eerste tijdsinterval tot 24u ( $S_1$  [ $\frac{kg}{m^2\sqrt{h}}$ ]) en de opslorplingscoëfficiënt van het tweede tijdsinterval vanaf 24u tot einde meting ( $S_2$  [ $\frac{kg}{m^2\sqrt{h}}$ ]). De resultaten van de verschillende metingen zijn samengevat in de volgende grafieken. De getalwaarden zijn terug te vinden in bijlage E.



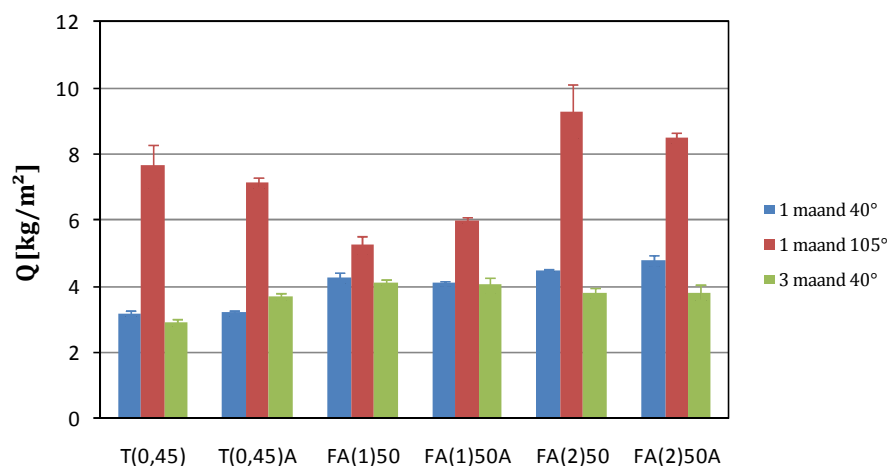
**Figuur 23: Voorbeeld verwerking gegevens capillariteitsproef (T(0,45), 1 maand ouderdom, 40° droging)**



**Figuur 24: Capillaire opslorpcingscoëfficiënt van het eerste tijdsinterval  $S_1$**



**Figuur 25: Capillaire opslorpcingscoëfficiënt van het tweede tijdsinterval  $S_2$**



**Figuur 26: Totale capillaire opslorping na 336h**

Meteen valt al duidelijk op te merken dat  $S_1$  veel groter was dan  $S_2$ . Zoals reeds in paragraaf 2.4.1.2 vermeld, geven Nokken en Hooten (2002) aan dat de initiële capillaire wateropslorping zal toenemen naarmate de poriënafmetingen kleiner zijn. Vervolgens zou de opslorping hoe dan ook trager verlopen doordat de poriën steeds minder met elkaar verbonden zijn.

Algemeen zou kunnen gesteld worden dat  $S_1$  meer verband houdt met de capillaire opslorping die gebeurt aan de rand van de betonproefstukken, terwijl  $S_2$  vooral beïnvloed wordt door de verdere opslorping die nog gebeurt in de massa van het beton.

### 5.3.2 Invloed van de additie van luchtbelvormer

Aangezien de waarden voor de opslorplingscoëfficiënten en de totale opzuiging van 336h zodanig dicht bij elkaar in de buurt lagen, de standaardfout niet te verwaarlozen was en op basis van de gemiddelde waardes geen eenduidig verband was af te leiden, was een statistische analyse hier zeker aan de orde. Met behulp van SPSS werd gevonden dat bij droging na 40°C en 105°C bij de vergelijking tussen T(0,45) & T(0,45)A, FA(1)50 & FA(1)50A en FA(2)50 & FA(2)50A op de 2 ouderdommen slechts 1 significant verschil werd gevonden: bij de toevoeging van LBV bij FA(2)50 op 1 maand ouderdom en 40°C droging was er een significante stijging van de opslorplingscoëfficiënt  $S_1$ . Voor elke andere mengeling, ouderdom of drogingstemperatuur had de additie van de luchtbelvormer geen invloed op de capillaire wateropslorping. Van den Heede (2008) kon ook geen eenduidig verband afleiden tussen het gebruik van luchtbelvormers en de capillaire wateropname.



### 5.3.3 Invloed van de ouderdom

Voor de invloed van de ouderdom op de capillaire opslorping kan enkel na een droging van 40°C vergeleken worden. Voor  $Q_c$  werd voor geen enkele mengeling een significant verschil gevonden tussen 1 en 3 maand ouderdom. Hetzelfde gold voor  $S_1$ . Wel moet hierbij opgemerkt worden dat de resultaten voor  $Q_c$  bij de mengeling FA(2)50 ( $\alpha_{\text{eff}} = 0,381$ ) en voor  $S_1$  bij de mengeling FA(2)50A ( $\alpha_{\text{eff}} = 0,311$ ) niet significant verschillend waren. Voor  $S_2$  werd ook voor het grotendeel van de mengelingen geen significant verschil opgemerkt tussen 1 en 3 maand ouderdom: wel daalt de opslorplingscoëfficiënt significant bij de mengelingen FA(2)50 en FA(2)50A. Dit zou kunnen te wijten zijn aan de verdere hydratatie van de grove vliegast tussen 1 en 3 maand ouderdom, waardoor een dichtere structuur ontstaat met minder geconnecteerde poriën. Capillariteit en poriënstructuur zullen nauw aan elkaar verbonden zijn, vandaar wordt ook het verband tussen deze gezocht in paragraaf 6.5.

### 5.3.4 Invloed van de droogtemperatuur

Voor het verschil in drogingstemperatuur kon enkel de vergelijking gemaakt worden op 1 maand ouderdom. Voor de opslorping  $Q_c$  werd voor elke mengeling een significant hogere waarde gevonden voor de droging bij 105°C i.v.m. 40°C droging, behalve voor FA(1)50. Voor  $S_1$  werd voor geen enkele mengeling een significant verschillende waarde gevonden bij vergelijking van de 2 drogingstemperaturen, ondanks het duidelijke verschil tussen sommige gemiddelde waarden. Ook voor  $S_2$  werden haast geen significant verschillende waardes opgemeten: enkel bij FA(1)50A en FA(2)50A was deze opslorplingscoëfficiënt significant hoger na een droging van 105°C. Hierbij dient wel opgemerkt dat  $\alpha_{\text{eff}}$  voor alle mengelingen waar geen significant verschil werd waargenomen, toch nauw aanleunde bij 0,05. De maximale waarde die werd teruggevonden was 0,132. Ook aan de gemiddelde waardes is wel duidelijk een trend waar te nemen dat een hogere drogingstemperatuur zou zorgen voor een hogere opslorping. Dit kan twee mogelijke oorzaken hebben: ofwel werd het beton tijdens de droging beschadigd, zodat het water sneller opgezogen wordt langsheen de aanwezige microscheuren, ofwel vindt een sterke capillaire wateropname plaats langsheen de fijne gelporiën die na droging bij 105°C vrijkomen.

### 5.3.5 Vergelijking traditioneel beton – vliegastbeton

*Na droging op 40°C*

Opslorpingscoëfficiënt  $S_1$  neemt over het algemeen toe wanneer vliegias wordt toegevoegd aan beton. FA2-beton vertoont echter een groter significant verschil met het cementbeton dan FA1-beton.  $S_2$  vertoont geen significante verschillen.  $S_1$  heeft betrekking op de randzone van het beton (Van den Heede, 2008). Dit betekent dat de randzone van HVFA-beton gemakkelijker water opzuigt dan de randzone van traditioneel beton, wat tot corrosieproblemen kan leiden indien er wapening in de randzone voorkomt.

#### *Na droging op 105°C*

Op deze metingen zitten grote standaardfouten, vandaar is tussen de referentiebetonmengeling en de HVFA-mengelingen nergens een significant verschil terug te vinden. Toch valt voor zowel  $Q_C$ ,  $S_1$  als  $S_2$  een bepaalde trend op: de gemiddelde waarden voor de FA1-mengeling zowel met als zonder LBV leverden telkens lagere waarden op dan voor de FA2- en de referentiemengeling, terwijl de referentiemengeling en de FA2-beton gelijkaardige resultaten opleverden. Waarschijnlijk bezit het FA1-beton een minder geïnterconnecteerd netwerk aan poriën, ofwel een dichtere poriënstructuur dan het FA2- en cementbeton. Deze trend was echter nog niet waarneembaar bij een droging bij 40°C. Hoe lager de verzadigingsgraad van de proefstukken echter, hoe meer de grootte, hoeveelheid en de onderlinge ligging van de poriën een rol zullen beginnen spelen, doordat het water eruit verdampt is.

#### **5.3.6 Besluit**

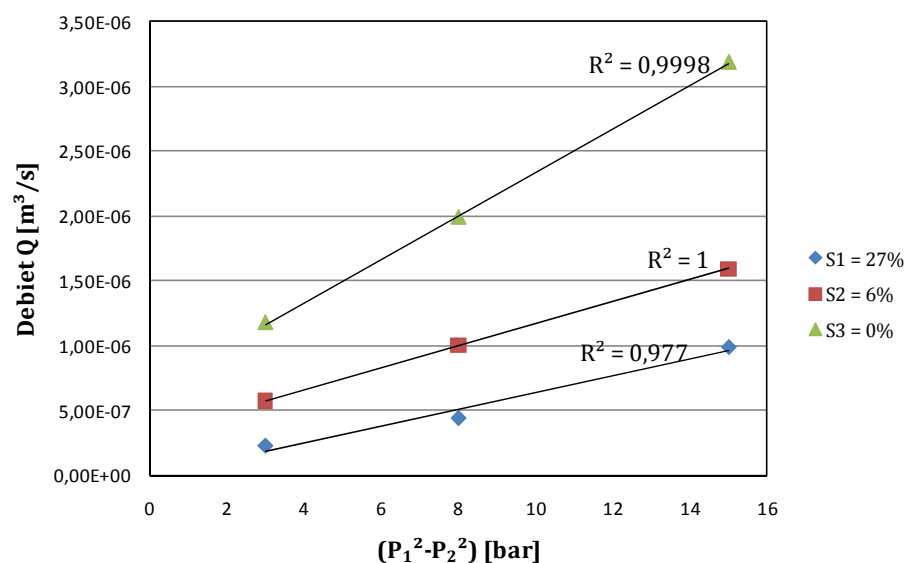
Blijkbaar zorgt de additie van LBV niet voor een noemenswaardige verandering van de opslorplingscoëfficiënten en de totale opslorping na 336h. Misschien zijn de ingebrachte luchtholtes van een te grote aard zodat ze bijna geen bijkomende capillaire zuiging opwekken.

Bij een droging op 105°C werd vastgesteld dat de capillaire opzuiging voor FA1-beton minder was dan die voor het referentie- of FA2-beton. In paragraaf 6.5 zal een verband gezocht worden tussen de open porositeit, die hiervoor waarschijnlijk een verklaring kan geven, en de capillaire wateropslorping. Waarschijnlijk zal de fijnere vliegias FA1 meer reactiever zijn en zo een dichtere poriënstructuur vormen die een obstructie kan vormen voor een goede capillaire wateropname.

## 5.4 Gasdoorlatendheid

### 5.4.1 Resultaten

Zoals eerder vermeld in het hoofdstuk 'Materialen & Methodes' werden van elke betonmengeling op 2 leeftijden en na drogingstemperaturen van 40°C, 80°C en 105°C de schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënten bepaald van telkens 3 proefstukken volgens formule 3.3, die geldig is bij laminaire stroming. Voor alle mengelingen diende eerst gecontroleerd te worden of de relatie tussen het debiet van het gas  $Q$  en de drukgradiënt  $(P_1^2 - P_2^2)$  quasi lineair is en dus laminaire stroming mag aangenomen worden. Het lineaire verband werd bij elke mengeling en bij elke verzadigingsgraad vastgesteld. De lineariteit van het verband werd beoordeeld aan de hand van de correlatiecoëfficiënt. Gemiddeld genomen over alle mengelingen en over alle verzadigingsgraden bedraagt de correlatiecoëfficiënt  $R^2$  0,99. De laagste waarde gevonden voor  $R^2$  was 0,96. Formule 3.3 kon dus gebruikt worden. In Figuur 27 werd voor mengeling T(0,45)A op leeftijd van 3 maanden voor de drie verzadigingsgraden het debiet  $Q$  tegen  $(P_1^2 - P_2^2)$  uitgezet.



Figuur 27: Het debiet  $Q$  i.f.v.  $(P_1^2 - P_2^2)$  bij verschillende verzadigingsgraden voor T(0,45)A op 3 maand ouderdom

De schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt  $k_a$  werd dus berekend aan de hand van formule 3.3. De resultaten zijn in Tabel 8 samengevat. Er werd geopteerd om de grafische resultaten in bijlage F te plaatsen om deze tekst niet te overladen met figuren. De resultaten van de gaspermeabiliteitsproeven op FA(2)50 en FA(2)50A op 3 maand ouderdom werden in deze masterproef niet besproken gezien door het korte tijdsbestek de bijhorende

verzadigingsgraden niet tijdig bepaald konden worden. De gaspermeabiliteitsproef van FA(2)50 werd echter wel al uitgevoerd na een droging van 105°C. Daarbij wordt sowieso een verzadigingsgraad van 0% aangenomen dus deze waarde kan toch meebeschouwd worden.

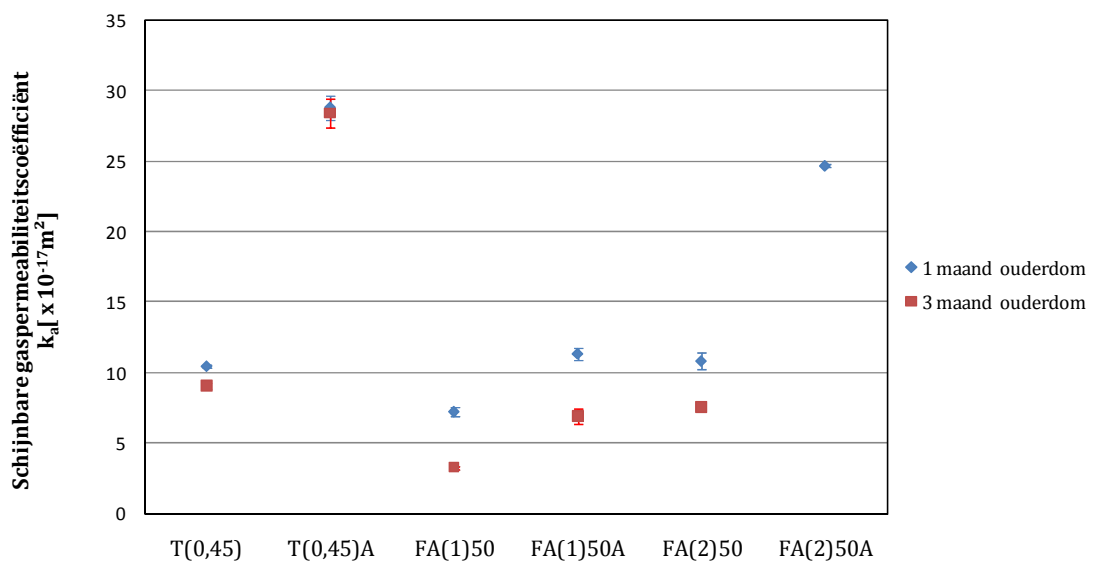
Tabel 8: Getalwaardes schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt  $k_a$

| 1 maand ouderdom $k_a$ [x10 <sup>-17</sup> m <sup>2</sup> ] |       |           |                |           |                |           | 3 maand ouderdom $k_a$ [x10 <sup>-17</sup> m <sup>2</sup> ] |       |           |                |           |                |           |                |
|-------------------------------------------------------------|-------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|-------------------------------------------------------------|-------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|
|                                                             | S (%) | 2 bar     |                | 3 bar     |                | 4 bar     |                                                             | S (%) | 2 bar     |                | 3 bar     |                | 4 bar     |                |
|                                                             |       | $\bar{x}$ | S <sub>f</sub> | $\bar{x}$ | S <sub>f</sub> | $\bar{x}$ | S <sub>f</sub>                                              |       | $\bar{x}$ | S <sub>f</sub> | $\bar{x}$ | S <sub>f</sub> | $\bar{x}$ | S <sub>f</sub> |
| T(0,45)                                                     | 39    | 3,32      | 0,07           | 2,40      | 0,04           | 2,57      | 0,06                                                        | 38    | 3,27      | 0,11           | 2,32      | 0,08           | 2,52      | 0,09           |
|                                                             | 14    | 7,93      | 0,10           | 5,19      | 0,04           | 4,67      | 0,03                                                        | 13    | 8,63      | 0,19           | 5,74      | 0,14           | 5,42      | 0,19           |
|                                                             | 0     | 16,10     | 0,25           | 10,46     | 0,14           | 8,21      | 0,76                                                        | 0     | 14,36     | 0,36           | 9,06      | 0,20           | 7,93      | 0,22           |
| T(0,45)A                                                    | 23    | 8,62      | 0,28           | 6,06      | 0,25           | 6,09      | 0,16                                                        | 27    | 8,71      | 0,15           | 6,30      | 0,40           | 7,51      | 1,21           |
|                                                             | 6     | 21,75     | 0,45           | 13,29     | 0,77           | 12,48     | 0,33                                                        | 6     | 21,91     | 0,90           | 14,30     | 0,60           | 12,15     | 0,58           |
|                                                             | 0     | 43,72     | 1,38           | 28,85     | 0,86           | 24,68     | 0,78                                                        | 0     | 44,83     | 1,56           | 28,43     | 0,98           | 24,28     | 0,87           |
| FA(1)50                                                     | 30    | 4,75      | 0,29           | 3,27      | 0,22           | 3,20      | 0,21                                                        | 51    | 2,45      | 0,02           | 1,81      | 0,02           | 1,88      | 0,03           |
|                                                             | 4     | 8,39      | 0,46           | 5,53      | 0,26           | 5,27      | 0,28                                                        | 20    | 3,65      | 0,04           | 2,47      | 0,02           | 2,43      | 0,02           |
|                                                             | 0     | 11,25     | 0,63           | 7,24      | 0,37           | 6,29      | 0,29                                                        | 0     | 4,83      | 0,17           | 3,28      | 0,12           | 3,04      | 0,08           |
| FA(1)50A                                                    | 24    | 7,09      | 0,35           | 4,59      | 0,22           | 4,43      | 0,19                                                        | 40    | 3,64      | 0,29           | 2,58      | 0,19           | 2,60      | 0,18           |
|                                                             | 4     | 13,16     | 0,73           | 8,51      | 0,41           | 7,22      | 0,34                                                        | 13    | 7,06      | 0,59           | 4,65      | 0,37           | 4,19      | 0,29           |
|                                                             | 0     | 17,41     | 0,72           | 11,35     | 0,43           | 9,85      | 0,29                                                        | 0     | 10,60     | 0,78           | 6,89      | 0,50           | 5,98      | 0,43           |
| FA(2)50                                                     | 29    | 6,35      | 0,55           | 4,29      | 0,37           | 4,59      | 0,49                                                        | -     | -         | -              | -         | -              | -         | -              |
|                                                             | 4     | 12,52     | 0,80           | 8,31      | 0,51           | 7,34      | 0,48                                                        | -     | -         | -              | -         | -              | -         | -              |
|                                                             | 0     | 16,02     | 0,85           | 10,83     | 0,58           | 9,50      | 0,50                                                        | 0     | 11,56     | 0,49           | 7,57      | 0,10           | 6,55      | 0,00           |
| FA(2)50A                                                    | 17    | 18,47     | 0,26           | 12,62     | 0,14           | 11,89     | 0,22                                                        | -     | -         | -              | -         | -              | -         | -              |
|                                                             | 3     | 30,27     | 0,17           | 19,85     | 0,23           | 17,57     | 0,18                                                        | -     | -         | -              | -         | -              | -         | -              |
|                                                             | 0     | 37,63     | 0,25           | 24,69     | 0,13           | 21,93     | 0,31                                                        | -     | -         | -              | -         | -              | -         | -              |

De vergelijking tussen de verschillende mengelingen is gebaseerd op de proefresultaten van proefstukken die in een oven bij 105°C geplaatst werden. Drogen bij een danig hoge temperatuur kan eventueel lichte scheurvorming en een zekere verandering aan de poriënstructuur veroorzaken waardoor de gaspermeabiliteit van de proefstukken kan verhogen (Kearsley, 2001) (Boel, 2006). Het zou ideaal zijn de verschillende mengelingen bij een constante verzadigingsgraad verschillend van 0% onderling te vergelijken. Deze vaste verzadigingsgraad bij de verschillende proefstukken kan moeilijk nagestreefd worden zoals blijkt uit de resultaten. Om die reden en gebaseerd op de methode van de bespreking van de resultaten van Boel (2006), werden de mengelingen toch onderling vergeleken bij een verzadigingsgraad van 0%. Stel dat eventuele scheurvorming zou ontstaan door de droging

op de hoge temperatuur van 105°C, dan zal dit bij alle mengelingen voorkomen, en is een onderlinge vergelijking toch mogelijk volgens Kearsley (2001)

De waarde van de intrinsieke gaspermeabiliteit kon berekend worden door middel van het gebruik van formule 3.5. In deze formule werd ook gebruik gemaakt van de gemiddelde druk over het proefstuk:  $P_M$ . De meeste van deze berekeningen voor de verschillende mengelingen leverden een negatieve waarde op voor de intrinsieke gaspermeabiliteit en bovendien is er niet echt een duidelijk verband tussen de verschillen in betonsamenstellingen en de intrinsieke gaspermeabiliteit terug te vinden. Zij zijn in tabelvorm terug te vinden in bijlage F. Hetzelfde fenomeen deed zich voor bij Boel (2006). In (Boel, 2006) werd opgemerkt dat door Skejetne et al. (1999) aangetoond werd dat in de formule van Klinkenberg  $P_M$  beter door  $P_1$  vervangen zou worden. Wanneer dit werd gedaan, werd inderdaad geen enkele negatieve waarde meer teruggevonden maar evenmin kon uit deze waarden een eenduidig verband worden afgeleid. Daarom werd besloten de duurzaamheid met betrekking tot de gasdoorlatendheid van de verschillende betonsamenstellingen met elkaar te vergelijken aan de hand van de schijnbare gaspermeabiliteit bij een verzadigingsgraad van 0% en bij een druk van 3 bar. De verhoudingen in de gedragingen van de verschillende betonmengelingen ten opzichte van elkaar zijn immers quasi gelijk voor alle drukken.



**Figuur 28:** Schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt [ $\times 10^{-17} \text{m}^2$ ] bij verzadigingsgraad 0% en  $P_1 = 3$  bar

Grafische voorstellingen van de schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënten op 1 en 3 maand ouderdom van alle mengelingen bij verzadigingsgraad 0% en een druk  $P_1$  van 3 bar zijn voorgesteld in Figuur 28.

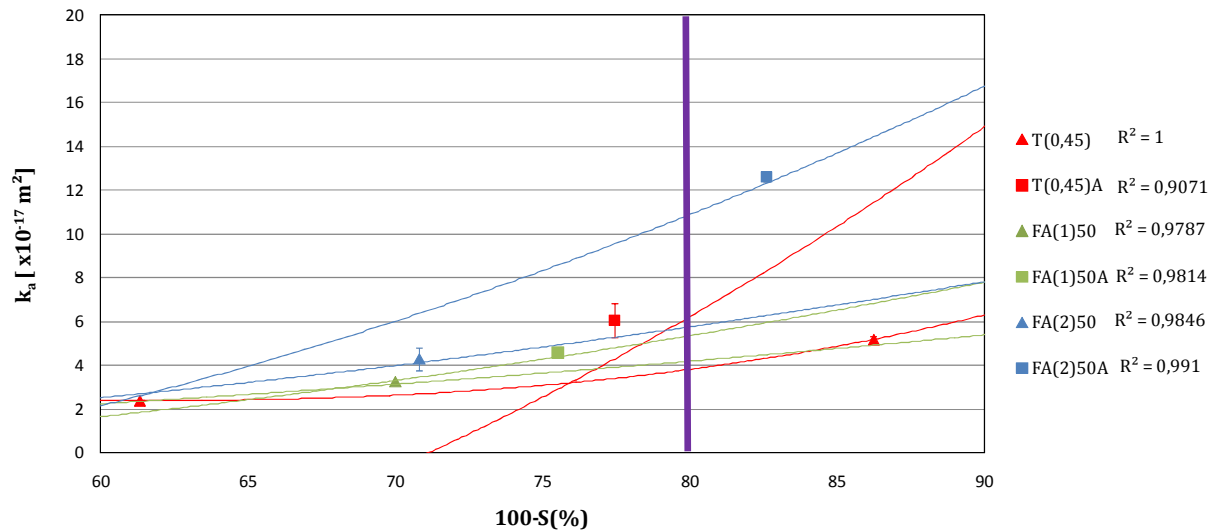
#### 5.4.2 Invloed van de additie van luchtbelvormer

Hoewel het gebruik van een luchtbelvormer veronderstelt geïsoleerde luchtballen in te sluiten, bleek dit uit de resultaten van de gaspermeabiliteit anders te zijn. Mengelingen waaraan luchtbelvormer was toegevoegd bleken een significant hogere schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt te bezitten dan de bijhorende mengelingen zonder LBV: de gaspermeabiliteitscoëfficiënt werd vermenigvuldigd met een factor 2,76; 1,57 en 2,28 respectievelijk wanneer LBV aan T(0,45), FA(1)50 en FA(2)50 werd toegevoegd (op 1 maand ouderdom). Op 3 maand ouderdom waren deze factoren 3,14 en 2,1 voor T(0,45) en FA(1)50. De invloed van de LBV op de gasdoorlatendheid was duidelijk kleiner op het FA1-beton dan op de overige 2 betonmengelingen. FA(1)50A was zelfs even permeabel als het traditionele beton zonder luchtbelvormer. Adsorptie van de luchtbelvormer aan het fijnere type I vliegaskan hier aan de oorzaak liggen. Luchtbelvormer zal dus niet enkel zorgen voor geïsoleerde holten, maar ook voor poriën die met elkaar in contact staan, wat de grotere gasdoorlatendheid kan verklaren.

Een droging bij 105°C zou scheuren kunnen induceren in het beton, die een verkeerd beeld zouden kunnen geven van de werkelijke gaspermeabiliteit. Daarom werd ook bij andere verzadigingsgraden gecontroleerd of dezelfde trends waarneembaar zijn bij de toevoeging van luchtbelvormer. Daartoe werd de schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt uitgezet tegenover 100%-S op 1 maand ouderdom en bij 3 bar (Figuur 29). Op die manier kan voor elke mengeling een curve gefit worden aan de meetwaarden. De bijhorende correlatiewaarde  $R^2$  werd telkens naast de desbetreffende naam van de mengeling vermeld.

Stel dat de waardes bij een verzadigingsgraad van 20% met elkaar worden vergeleken. Wanneer afgelezen wordt op de x-as bij 80% kan besloten worden dat dezelfde trends teruggevonden worden: de gefitte curves, horende bij de mengelingen met LBV liggen telkens boven de curves, horende bij dezelfde mengelingen zonder toevoeging van LBV. De additie van LBV zal dus waarschijnlijk bij alle verzadigingsgraden een hogere gaspermeabiliteitscoëfficiënt opleveren. Hoe groter de verzadigingsgraad echter, wordt

duidelijk dat die verschillen steeds minder worden. Alle curves ‘eindigen’ namelijk in hetzelfde punt waarbij de verzadigingsgraad 100% bedraagt en de gaspermeabiliteitscoëfficiënt 0 m<sup>2</sup> bedraagt.



Figuur 29: Gefitte curves aan de schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt i.f.v. 100-S (%)

#### 5.4.3 Vergelijking traditioneel beton – vliegas beton & invloed van de ouderdom

Volgens Saricimen (1995) en Chindaprasirt (2007) zou vliegasbeton minder permeabel zijn dan traditioneel beton. Volgens Khan (2002) is deze uitspraak geldig, maar de invloed van de additie van vliegas geeft geen merkbare daling van de gaspermeabiliteit tot op een leeftijd van 90 dagen. De resultaten die in deze masterproef terug te vinden zijn sluiten nauw aan bij deze laatste stelling: op een leeftijd van 1 maand is er geen significant verschil in gaspermeabiliteit tussen T(0,45) en FA(2)50. FA(1)50 vertoont echter wel een kleinere gaspermeabiliteit dan het traditionele beton. Waarschijnlijk zal de kleinere procentuele 45µm-fijnheid van FA1 t.o.v. portlandcement en FA2 (dwz. FA1 is fijner) hier een grote rol in spelen: volgens Sacricimen (1995) en Chindaprasirt (2007) worden de hydratatiereactie, de puzzolane reactie en het pakkingseffect versterkt bij het gebruik van een fijner vliegas, wat bijdraagt tot een dichtere structuur die minder permeabel is voor gassen. Een fijner vliegas is reactiever dan een grover vliegas.

Volgens Boel (2006) is er bij toenemende hydratatiegraad en zo ook toenemende ouderdom, een toename van het volume kleine capillairen en de gelporositeit en zou een belangrijke afname van de doorlatendheid moeten vastgesteld worden. Zeker door de trage hydratatiereactie van vlieggas moet dit vooral in de vliegasmengelingen te zien zijn. Op 3 maand ouderdom was er inderdaad een significante daling in de gaspermeabiliteit bij het FA1-beton (-55% bij FA(1)50 en -40% bij FA(1)50A) en het FA2-beton (-30 % bij FA(2)50). Bij het traditionele beton viel enkel een lichtere daling (-13%) in gaspermeabiliteit op te merken bij de mengeling zonder LBV.

#### **5.4.4 Besluit**

Vliegاسبeton met vliegاسب type I bleek minder permeabel voor gassen te zijn dan FA2-beton en traditioneel beton. Een verklaring zou kunnen gevonden worden in het feit dat FA1 fijner is dan FA2 en zodoende reactiever, zodat een dichtere poriënstructuur kan gevormd worden.

Additie van een luchtbelvormer in beton zorgt voor een stijging van de gaspermeabiliteit, zowel bij traditioneel beton als vliegاسبeton. De luchtbelvormer brengt dus niet alleen een systeem van geïsoleerde luchtbellen in het beton, maar zorgt er waarschijnlijk ook voor dat de poriën met elkaar in verbinding staan.

Op een leeftijd van 3 maand ouderdom daalde de schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt beduidend veel voor FA(1)50, FA(1)50A en FA(2)50. Dit is waarschijnlijk te wijten aan de tragere puzzolane reacties die nog doorgaan tussen 1 en 3 maand ouderdom. Een lichtere daling werd waargenomen tussen T(0,45) op 1 en 3 maand ouderdom. De reden hiervoor zal de verdere hydratatie van het cement zijn tussen die 2 leeftijden.

Uit het oogpunt van gaspermeabiliteit lijkt het meest duurzame beton het beton dat de minste gasdoorlatendheid vertoont. Een mogelijk transportmechanisme voor schadelijke gassen is namelijk de doorlatendheid t.g.v. een drukgradiënt. Aangezien carbonatatiegeïnitieerde corrosie het gevolg is van het binnendringen van CO<sub>2</sub>- en O<sub>2</sub>-moleculen in het beton, kan de gasdoorlatendheid een eerste indicatie geven van de weerstand van het beton tegen corrosie. In de norm NBN EN 206-1 (2000) werd een betonmengeling voorgesteld die specifiek bestand dient te zijn tegen carbonatatiegeïnitieerde

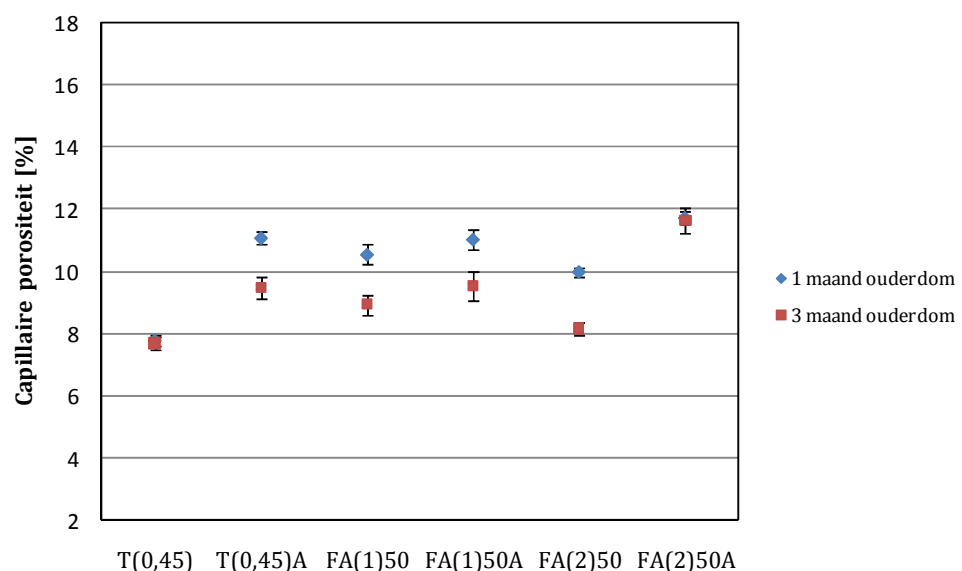


corrosie in een omgeving van cyclisch natte en droge periodes: XC4. Dit beton heet T(0,50). Aan het cementbeton dat in deze masterproef is gebruikt (overeenstemmend met XF4-weerstandbiedend beton, T(0,45) en T(0,45)A) zijn strengere eisen gesteld dan aan het XC4-beton. Aangezien de FA1-mengeling op 1 en 3 maand ouderdom en FA(1)50A op 3 maand ouderdom een kleinere gasdoorlatendheid vertonen dan de T(0,45)-mengeling, die zoiezo strenger is dan het XC4-beton, zou kunnen besloten worden dat bij FA1-beton weinig vrees moet zijn voor carbonatatiegeïnitieerde corrosie.

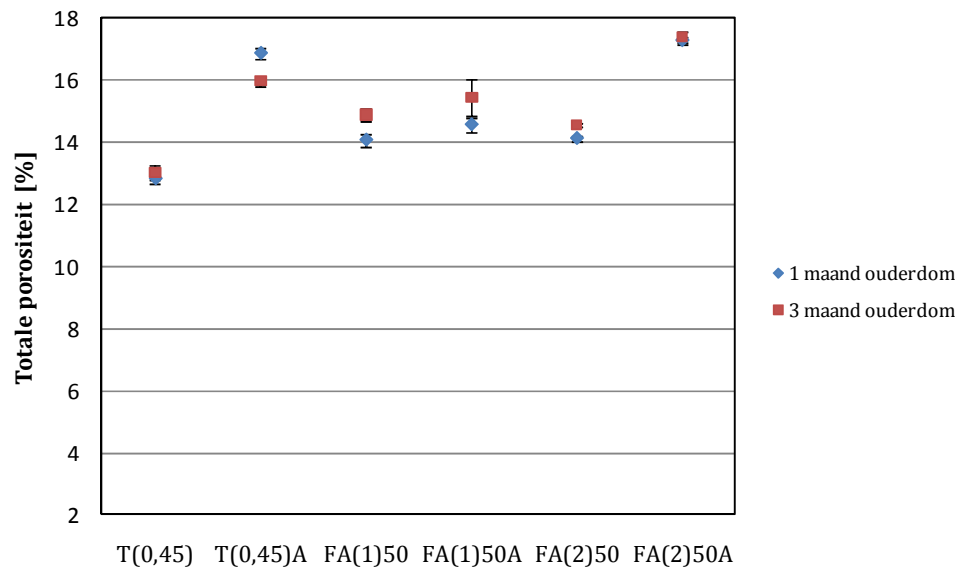
## 5.5 Porositeit

### 5.5.1 Resultaten

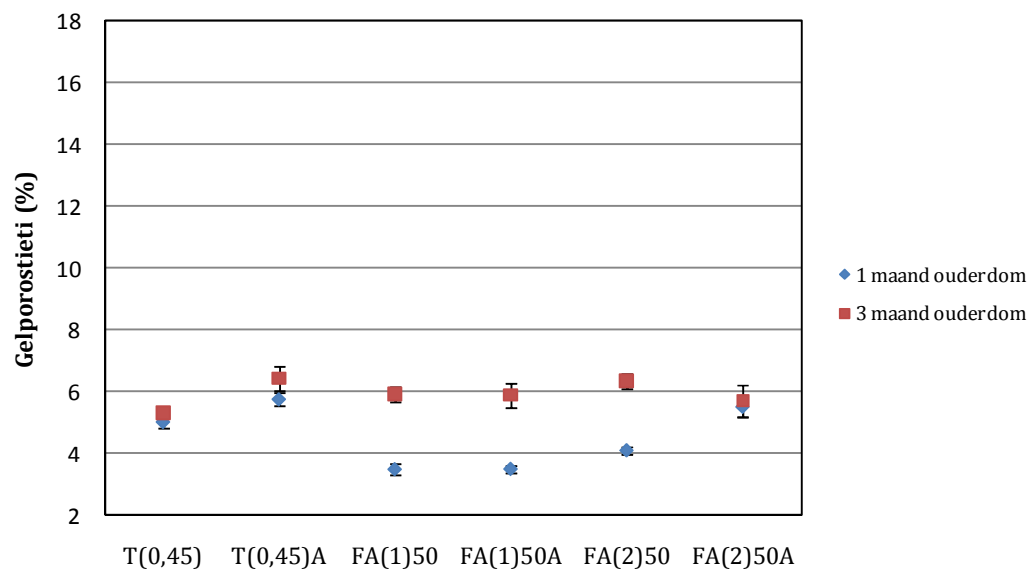
Figuur 30, Figuur 31 en Figuur 32 geven een overzicht van de gemiddelde capillaire, totale en gelporositeiten van de verschillende mengelingen op de verschillende leeftijden. Ook is telkens de standaardfout voorgesteld (die is echter zeer klein en is vaak niet zo duidelijk). De getalwaardes hiervan zijn terug te vinden in bijlage G. Ook werd een onderscheid gemaakt tussen de porositeiten van A-proefstukken (A en A') en de B-proefstukken. In Tabel 9 worden de gemiddelden van de proefstukken A & A' en B weergegeven. De gelporositeiten werden telkens berekend als het verschil tussen de capillaire en de totale porositeiten.



Figuur 30: Capillaire porositeit bij droging 40°C



Figuur 31: Totale porositeit bij droging 105°C



Figuur 32: Gelporositeit

Tabel 9: Getalwaarden gemiddelde porositeiten proefstukken A & A' en B

|          | 1 maand ouderdom    |       |                     |       |               |       | 3 maand ouderdom    |       |                     |       |               |       |
|----------|---------------------|-------|---------------------|-------|---------------|-------|---------------------|-------|---------------------|-------|---------------|-------|
|          | cap. por. bij 40° C |       | tot. por. bij 105°C |       | gelporositeit |       | cap. por. bij 40° C |       | tot. por. bij 105°C |       | gelporositeit |       |
|          | AA' (%)             | B (%) | AA' (%)             | B (%) | AA' (%)       | B (%) | AA' (%)             | B (%) | AA' (%)             | B (%) | AA' (%)       | B (%) |
| T(0,45)  | 7,84                | 7,63  | 13,00               | 13,08 | 4,83          | 5,45  | 7,87                | 7,36  | 13,00               | 13,06 | 5,13          | 5,69  |
| T(0,45)A | 11,29               | 10,67 | 16,96               | 16,63 | 5,67          | 5,96  | 9,24                | 10,03 | 16,05               | 15,73 | 6,82          | 5,70  |
| FA(1)50  | 11,15               | 9,33  | 14,42               | 13,32 | 3,27          | 3,99  | 9,56                | 7,72  | 15,17               | 14,25 | 5,61          | 6,53  |
| FA(1)50A | 11,59               | 9,94  | 14,92               | 13,81 | 5,79          | 3,87  | 10,39               | 7,82  | 16,18               | 13,96 | 5,79          | 6,14  |
| FA(2)50  | 10,00               | 9,95  | 14,11               | 14,09 | 4,10          | 4,14  | 8,46                | 7,59  | 14,49               | 14,62 | 6,02          | 7,03  |
| FA(2)50A | 12,10               | 11,01 | 17,08               | 17,61 | 4,98          | 6,60  | 12,32               | 10,30 | 17,48               | 17,14 | 5,17          | 6,84  |

Voor de vergelijking van de resultaten dient wel opgemerkt te worden dat de water/bindmiddel-factor van de HVFA-mengelingen slechts 0,35 bedraagt t.o.v. de 0,5 bij de referentiemengeling. Een hogere water/bindmiddelfactor zorgt voor een vermeerdering van de porositeit, ook wanneer een deel van het cement vervangen wordt door vliegas (Van den Heede, 2008). Wanneer de vergelijking tussen het vliegasbeton en cementbeton, gebruikt in deze masterproef, gemaakt wordt aangaande de porositeit, dient deze bemerking toch nog in het achterhoofd gehouden te worden. Wanneer in dit onderzoek een quasi gelijke porositeit zou gevonden worden voor het gebruikte cementbeton en vliegasbeton, zal bij een gelijke water/bindmiddelfactor de porositeit van het vliegasbeton waarschijnlijk groter zijn.

### **5.5.2 Vergelijking wandproefstukken met proefstukken uit de kern**

Uit Tabel 9 bleek onder meer dat de capillaire porositeiten van de B-proefstukken meestal iets lager liggen dan die van de AA'-proefstukken. Het verschil bedroeg gemiddeld ongeveer 0,91% op 1 maand ouderdom en 1,17% op 3 maand ouderdom. Hetzelfde fenomeen kon waargenomen worden in de resultaten van Van den Heede (2008). De verklaring kan wellicht gevonden worden op basis van het wandeffect: aangezien er ter hoogte van de bekistingsvlakken doorgaans minder granulaten voorkomen en meer cementpasta aanwezig is, kan daar een hogere waarde worden waargenomen. Bij de totale porositeiten kwam dit verschil echter veel minder tot uiting en zijn de verschillen vaak niet significant te noemen. Toch lag gemiddeld genomen de totale porositeit van B-proefstukken, 0,33% op 1 maand ouderdom en 0,6% op 3 maand ouderdom, lager dan bij AA'-proefstukken.

In verband met de gelporositeit werden gemiddeld hogere waarden voor B-proefstukken opgemerkt dan voor AA'-proefstukken (0,23% op 1 maand ouderdom en 0,57% op 3 maand ouderdom). Hieruit zou besloten kunnen worden dat proefstukken die uit de massa van het beton zijn genomen gekenmerkt worden door een fijnere poriënstructuur. Door ervoor te zorgen dat er voldoende betondekking aanwezig is, zal wapening zich dus in de fijnporeuzere en minder toegankelijke massa bevinden. Schadelijke stoffen zullen dan minder gemakkelijk tot het wapeningsstaal kunnen doordringen (Van den Heede, 2008).

### 5.5.3 Invloed van de additie van luchtbelvormer

Onderlinge vergelijking van de betonsamenstellingen met luchtbelvormer en zonder luchtbelvormer op 1 en 3 maand ouderdom wees uit dat zowel de gemiddelde capillaire als de gemiddelde totale porositeiten lagere waarden opleverden wanneer de hulpstof in kwestie niet werd toegevoegd. Dit verschil was echter minder duidelijk in het geval van de gelporositeit. Doordat deze laatste onrechtstreeks wordt afgeleid uit de capillaire en de totale porositeiten, zal het verschil sterk afhangen van de mate waarin beiden veranderen (Van den Heede, 2008). Een quasi gelijke toename van beide porositeiten bij gebruik van luchtbelvormers zal ervoor zorgen dat de gelporositeit niet verandert.

Wanneer met SPSS werd onderzocht of er effectief significante verschillen tussen de getalwaarden voor de porositeit met en zonder luchtbelvormer terug te vinden zijn, bleek dit inderdaad waar te zijn voor de referentiemengeling en de FA2-mengeling, maar niet voor de FA1-mengeling. FA1 zal de luchtbelvormer waarschijnlijk meer adsorberen, waardoor minder lucht zal ingebracht worden, en de porositeit dus niet merkbaar zal wijzigen.

Vreemd is wel dat de porositeiten van FA(2)50A niet significant wijzigden tussen 1 en 3 maand ouderdom. Er zou niet algemeen kunnen geopperd worden dat luchtbelvormers in vliegaseton voor deze oorzaak zorgen, aangezien bij FA(1)50A de porositeiten wel duidelijk significant wijzigden tussen 1 en 3 maand ouderdom.

### 5.5.4 Invloed van ouderdom

#### *Capillaire porositeit*

De capillaire porositeit van de referentiemengeling wijzigde niet significant tussen 1 en 3 maand ouderdom. Dit is vrij logisch aangezien naast de hydratatie van het cement geen secundaire reacties doorgaan die een significant verschil zouden kunnen opleveren in de tijd. Bij de HVFA-mengelingen zonder LBV was de capillaire porositeit na 3 maand wel duidelijk gedaald in vergelijking met de porositeit op 1 maand. Bij de HVFA-mengelingen met LBV werd geen significant verschil waargenomen. De vermindering van de capillaire porositeit zou kunnen toegeschreven worden aan de optredende tragere puzzolane reactie, die bijkomende hydratatieproducten vormt.

#### *Totale porositeit en gelporositeit*

Geen enkele mengeling vertoonde een significant verschil in totale porositeit tussen 1 en 3 maand ouderdom. Dit is in tegenstelling met (Lammertijn, 2007), daar werd gevonden dat de totale porositeit voor alle mengelingen daalt. In (Van den Heede, 2008) werden echter dezelfde resultaten gevonden als in deze masterproef: geen significant verschil op 1 en 3 maand ouderdom. De gelporositeit bij de HVFA-mengelingen was blijkbaar iets meer toegenomen dan dat het aandeel aan capillaire poriën gedaald was. Wat de gelporositeit betreft vertoonden alle HVFA-mengelingen behalve FA(2)50A een significante stijging. De verdere puzzolane reactie van vliegas zal er dus waarschijnlijk voor zorgen dat de capillaire poriën meer worden opgevuld, waardoor meer gelporositeit zal ontstaan.

#### **5.5.5 Vergelijking traditioneel beton – vliegasbeton**

##### *Capillaire porositeit*

De referentiemengeling vertoonde op 1 maand ouderdom een lagere capillaire porositeit dan de HFVA-mengelingen. Op 3 maand ouderdom waren door de daling van de capillaire porositeit van het FA2-beton onder invloed van de puzzolane reactie en het gelijkblijven van de capillaire porositeit van het referentiebeton, deze 2 mengelingen niet significant verschillend meer. De grootste capillaire porositeit werd waargenomen bij FA(2)50A. Vliegasbetonsamenstellingen zijn dus veel toegankelijker voor schadelijke stoffen. Tussen de vliegasmengelingen onderling was er geen verschil in porositeit, enkel FA(2)50A had toch een significant hogere porositeit. Een verklaring van de hogere capillaire porositeit van vliegasbeton kan hierin gevonden worden: bij vervanging van een deel van het cement door vliegas zal eerst het cement reageren. Aangezien er nu veel minder cement beschikbaar is dan in zuiver cementbeton, zal de hydratatie ervan sneller stoppen. Tijdens deze hydratatie worden minder capillaire holten gevormd ten gevolge van de volumereductie, maar blijft er meer vrij water over dan bij een zuivere cementpasta na hydratatie. In de veronderstelling dat de puzzolane reactie op 1 maand ouderdom eerder beperkt zal zijn, verklaart dit waarom op deze leeftijd hogere capillaire porositeiten worden gemeten voor de vliegasmengelingen (Van den Heede, 2008).

##### *Totale porositeit en gelporositeit*

De totale porositeit was telkens hoger bij de HVFA-mengelingen i.v.m. de referentiemengeling. Op te merken valt ook dat de totale porositeiten van de HFVA-

mengelingen niet significant verschillend waren van elkaar, opnieuw, net zoals bij de capillaire porositeit, was FA(2)50A een uitschieter.

Opvallend was dat de gelporositeit van traditioneel beton op 1 maand ouderdom significant hoger was dan de gelporositeit van de HVFA-mengelingen, behalve FA(2)50A. Dit verschil werd tot niets herleid op 3 maand ouderdom, door de puzzolane reactie van de HVFA-mengelingen.

#### **5.5.6 Besluit**

Het gebruik van vliegas in beton gaf na 1 maand aanleiding tot een hogere capillaire en totale porositeit en een iets hogere gelporositeit in vergelijking met traditioneel beton. Het effect van de puzzolane reacties in vliegasbeton was duidelijk terug te vinden in de porositeitsresultaten. Voor alle HVFA-mengelingen, behalve FA(2)50A werd telkens een significant daling van de capillaire porositeit en een significant stijging van de gelporositeit teruggevonden tussen 1 en 3 maand ouderdom. De totale porositeit echter wijzigde niet. Tussen 1 en 3 maand ouderdom zorgen de tragere puzzolane reacties voor het opvullen van de capillaire poriën, waardoor deze porositeit wordt verkleind, en de gelporositeit toeneemt. Op 3 maand ouderdom was de capillaire porositeit van FA1-beton toch nog steeds hoger dan die van het referentiebeton en het FA2-beton, die dezelfde capillaire porositeit vertoonden. De totale porositeiten voor de HVFA-mengelingen waren allen nog steeds hoger dan voor de referentiemengeling.

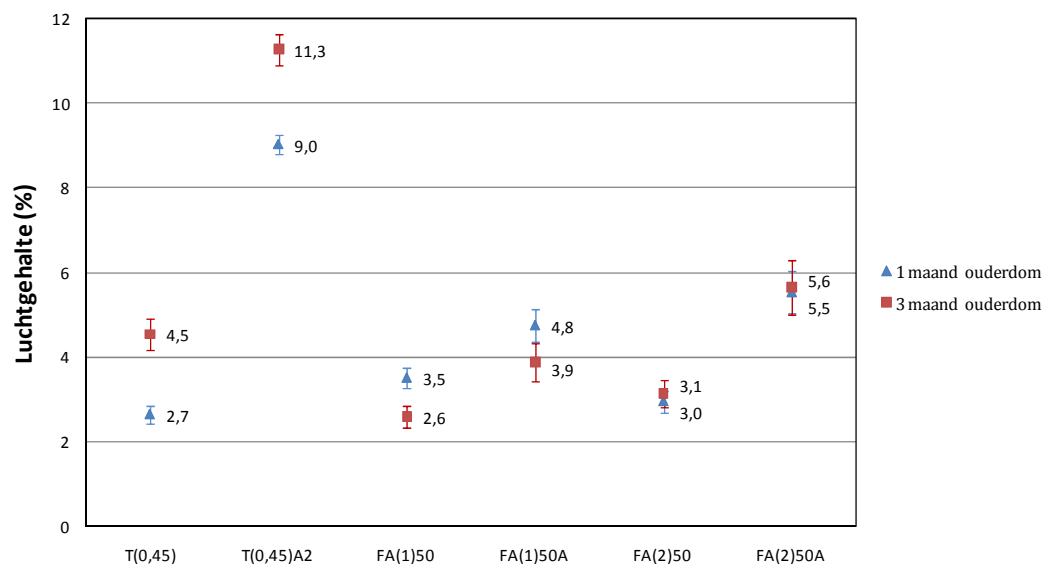
Het toevoegen van luchtbelvormer zorgde zowel bij de referentiemengeling als bij de FA2-mengeling voor een significante toename van de capillaire en totale porositeit. De gemiddelde waardes voor de porositeiten van de FA1-mengeling leken ook toe te nemen maar na een statistische analyse kon besloten worden dat dit verschil niet significant was. Daarom werd het idee geopperd dat de fijnere vliegas de luchtbelvormer meer zal adsorberen en dat daardoor dus minder luchtbellen worden ingebracht, waardoor zijn effect minder waarneembaar wordt. Additie van luchtbelvormer lijkt dus de porositeit te vergroten, dus zorgt waarschijnlijk voor de inbreng van poriën die toch geconnecteerd zijn, aangezien de open porositeit net gebaseerd is op poriën die met elkaar verbonden zijn. Additie van luchtbelvormer zal dus een nefaste invloed hebben op de duurzaamheidseigenschappen die te maken hebben met de open porositeit, daar schadelijke

stoffen (bv. O<sub>2</sub>-gas voor carbonatatiegeïnitieerde corrosie) het beton beter zullen kunnen indringen.

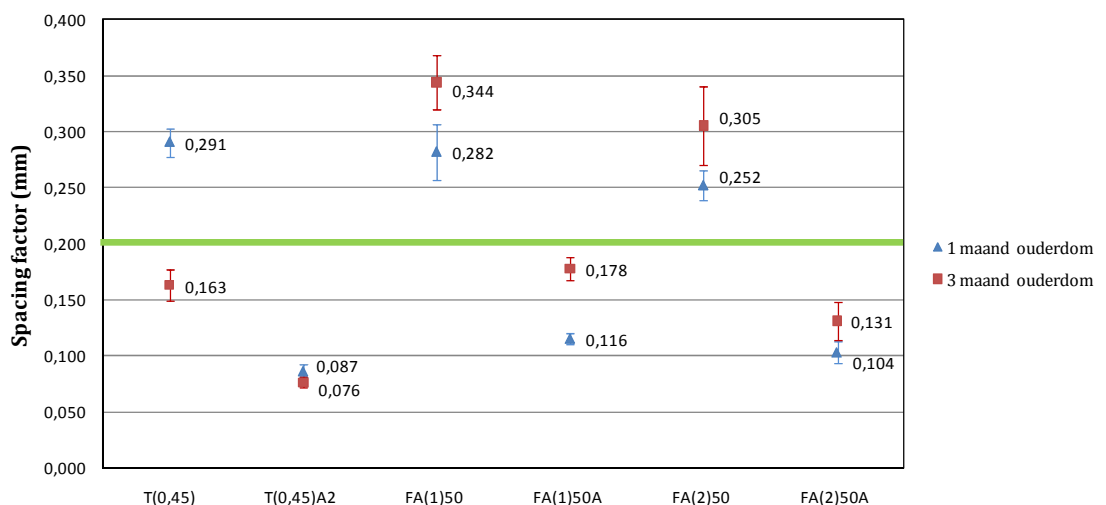
## 5.6 Air-void analyse

### 5.6.1 Resultaten

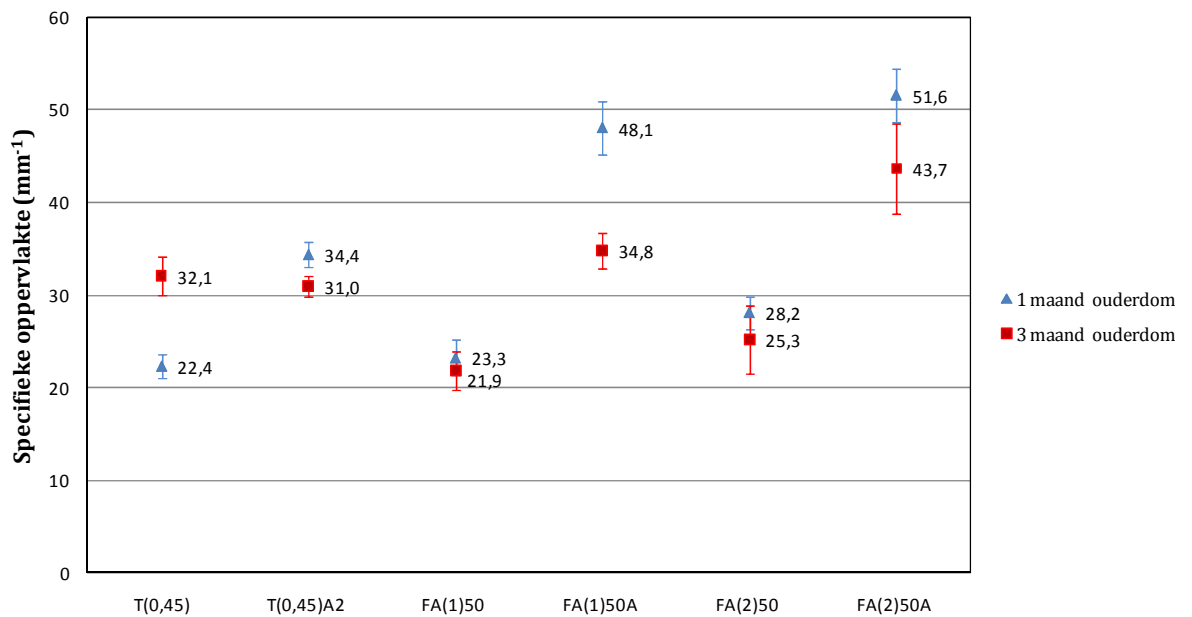
De parameters zoals bepaald in paragraaf 3.2.4 werden automatisch door het programma berekend. Per mengeling werden 8 analyses gedaan op 2 verschillende ouderdommen, 16 in totaal. De getalwaarden van de resultaten kunnen teruggevonden worden in bijlage H. In Figuur 33, Figuur 34, Figuur 35 en Figuur 36 volgt een grafische voorstelling van de resultaten.



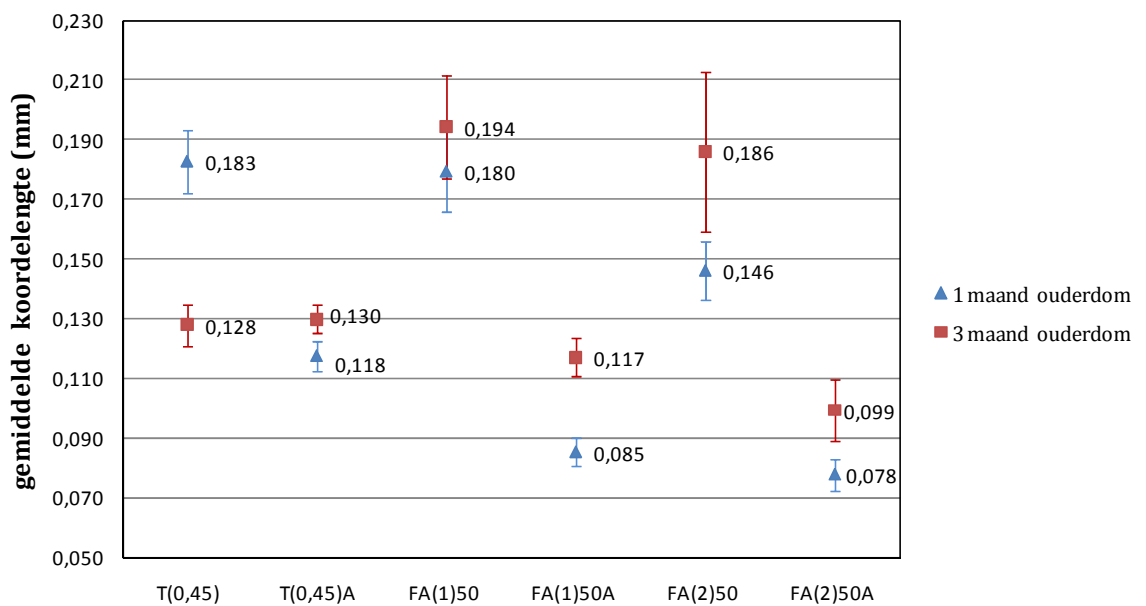
Figuur 33: Luchtgehalte van de air-void-proefstukken



Figuur 34: Spacing factor bij de verschillende air-void-proefstukken



**Figuur 35: Specifieke oppervlakte van de air-void-proefstukken**

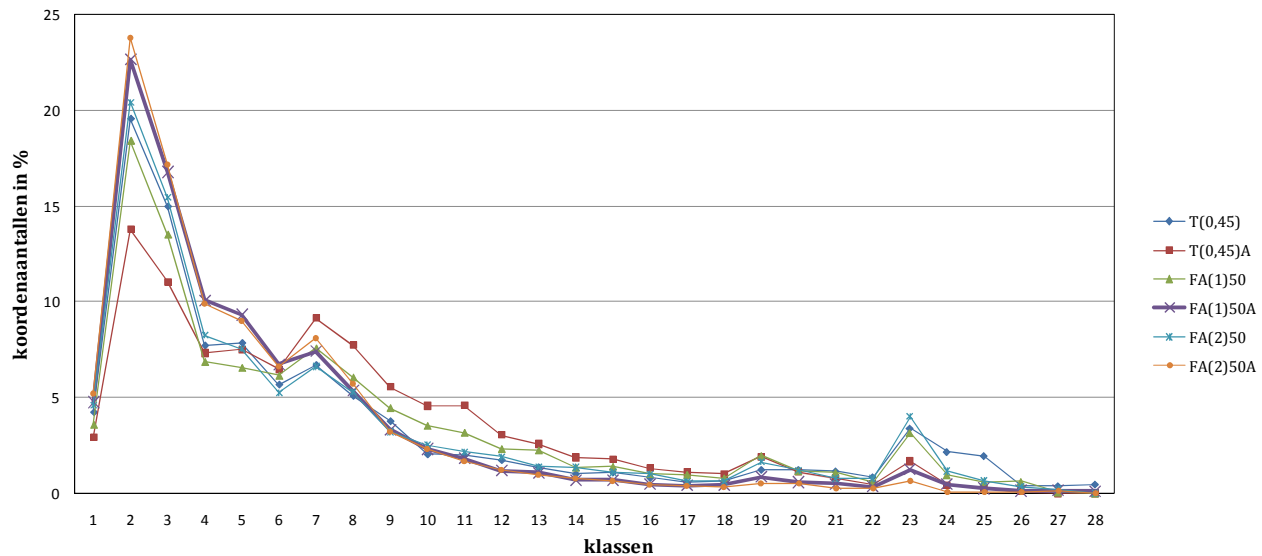


**Figuur 36: Gemiddelde koordelengte van de air-void-proefstukken**

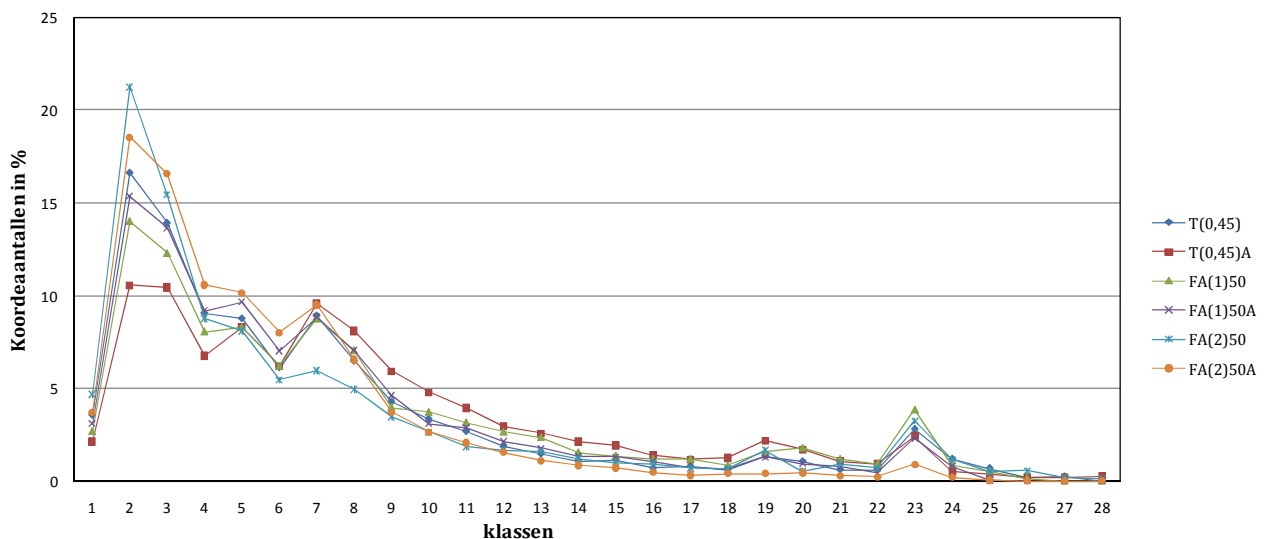
Ook de koordlengtedistributie werd bekeken. Per betonmengeling en per leeftijd werd de distributie bekeken van die resultatenfiche, waarvan de gemiddelde koordlengte het meest overeenstemt met het gemiddelde van de beschouwde mengeling. In Figuur 37 en Figuur 38 werden al deze distributies samengevat. De distributies per mengeling zijn grafisch voorgesteld in bijlage H. Hierbij is de x-as genummerd van 1 tot en met 28. Dit zijn de klassen die het softwareprogramma van de RapidAir 457 hanteert, om de koordelengtes in



intervallen op te delen. In bijlage H staat vermeld welke klasse overeenstemt met welk interval qua koordlengtegrootte. Om een eerste indicatie te geven: capillaire poriën situeren zich allen in de eerste klasse (0 – 10  $\mu\text{m}$ ) en luchtholtes tot de andere klassen. Klasse 1 t.e.m. 6 hebben een klassegrootte van 10  $\mu\text{m}$ , klasse 7 t.e.m. 18 hebben een klassegrootte van 20  $\mu\text{m}$ , klasse 19 t.e.m. 22 een klassegrootte van 50  $\mu\text{m}$ , klasse 23 t.e.m. 27 een klassegrootte van 500  $\mu\text{m}$  en klasse 28 tot slot een klassegrootte van 1000 $\mu\text{m}$ .



**Figuur 37: Koordlengtedistributie op 1 maand ouderdom**



**Figuur 38: Koordlengtedistributie op 3 maand ouderdom**

### 5.6.2 Invloed van de additie van luchtbelvormer

Mengelingen met LBV hadden telkens een significant hoger luchtgehalte dan de overeenkomstige mengelingen zonder LBV, zowel in een vergelijking op 1 maand als op 3 maand ouderdom. Het verschil in luchtgehalte tussen 1 maand ouderdom en 3 maand ouderdom was enkel significant verschillend bij de 2 referentiemengelingen. Alle HVFA-mengelingen toonden geen significante stijging of daling van het luchtgehalte op 3 maand ouderdom. De verklaring kan waarschijnlijk gevonden worden uit het feit dat bij HVFA-mengelingen meer hydratatieproducten werden gevormd op latere leeftijd, die zo een dichtere structuur vormen en eventueel gevormde luchtbellens op latere leeftijd verdringen. Vreemd is wel dat het luchtgehalte bij de referentiemengeling wel stijgt tussen 1 en 3 maand ouderdom. Hier kon echter geen verklaring voor gevonden worden.

De spacing-factor is ook zeker van belang. De bedoeling van de additie van een LBV is om deze te verkleinen door de inbreng van meer luchtholtes. Uit de resultaten kan besloten worden dat dit effect zeker bereikt werd: de spacing factor van alle mengelingen met LBV was significant lager dan de overeenkomstige mengelingen zonder LBV. De additie van de LBV zorgde er ook voor dat  $L_s$  verminderd werd tot minder dan de vooropgestelde maximale waarde van 0,200 mm om vorst-dooi-schade te weerstaan. Verwacht werd dan ook dat de mengelingen met LBV veel minder schade oplopen in vorst-dooicycli met dooizouten.

Additie van LBV deed ook telkens de specifieke oppervlakte stijgen (behalve bij de referentie op 3 maand ouderdom). Met het oog op vorstbestandheid worden hoge waarden nagestreefd daar voor eenzelfde luchtgehalte bij hogere waarden van het specifieke oppervlak een kleiner volume pasta tussen de holten ligt. Opnieuw kon dus geconcludeerd worden dat mengsels met LBV beter zullen presteren bij vorst-dooi-cycli met dooizouten.

Uit de grafieken van de koordelengtedistributie kon afgeleid worden dat door additie van LBV bij de referentie het percentage aan klasse 2 en 3-luchtbellens sterk daalt (samen ongeveer 9% minder), ten voordele van het percentage van klasse 3 t.e.m. klasse 19-luchtbellens. Dit betekent dat het percentage luchtbellens met diameter 10-30  $\mu\text{m}$  daalt en de percentages luchtbellens met diameters variërend van 20  $\mu\text{m}$  tot 350  $\mu\text{m}$  stijgen. In HVFA-mengelingen doet zich het omgekeerde fenomeen voor: het percentage fijne poriën stijgt met

7% bij FA1 en 5% bij FA2 terwijl de andere percentages weinig dalen. Daaruit kan geconcludeerd worden dat LBV's bij HVFA-mengelingen zorgen voor de inbreng van meer fijne poriën dan bij een traditioneel beton, daar worden grotere luchtholtes ingebracht. Bij alle mengelingen waar LBV is ingebracht daalt de gemiddelde koordelengte wel significant.

Een aardigheid die ook werd opgemerkt in de koordenlengtedistributie is de piekwaarde bij klasse 23. Dit kan eenvoudig verklaard worden aan de hand van de klassegroottes. Klasse 1 t.e.m. 6 hebben een klassegrootte van 10  $\mu\text{m}$ , klasse 7 t.e.m. 18 hebben een klassegrootte van 20  $\mu\text{m}$ , klasse 19 t.e.m. 22 een klassegrootte van 50  $\mu\text{m}$  en klasse 23 heeft meteen een klassegrootte van 500  $\mu\text{m}$  (koordlengte variërend van 500 tot 1000  $\mu\text{m}$ ). Ondanks het feit dat luchtbellen groter dan 500  $\mu\text{m}$  niet zo frequent voorkomen als kleinere luchtbellen, zorgt het percentage luchtbellen in die klasse wel voor een piek, omdat het koordelengte-interval van die klassen 10 keer zo groot is als de vorige klasse.

### **5.6.3 Vergelijking vliegaskonkret - traditioneel beton en invloed van ouderdom**

Grotere luchtholtes in combinatie met een kleinere spacing-factor en een groter luchtgehalte bij traditioneel beton waarbij LBV is gebruikt tegenover de HVFA-mengelingen waar LBV is gebruikt, tonen aan dat traditioneel beton beter bestand zal zijn tegen vorst-dooicycli met dooizouten dan FA-beton.

Het luchtgehalte tussen de mengelingen zonder LBV op 1 maand ouderdom bleek niet significant verschillend te zijn. Op 3 maand ouderdom bleek zelfs geen significant luchtgehalteverschil te bestaan tussen de HVFA-mengelingen. Voor het traditioneel beton met en zonder LBV stijgt het luchtgehalte met ongeveer 2% tussen 1 en 3 maand ouderdom, dit zou de vorst-dooibestendigheid ten goede moeten komen. Additie van LBV's zorgde telkens voor een significant verschil in luchtgehalte bij de 3 mengelingen, maar dit bleek veel groter te zijn bij het traditioneel beton (+ 7%) dan bij FA-beton (+ 1,2 à 2,5%). Dit komt doordat vliegaskonkret de LBV adsorberen en zo de werking verminderen. In paragraaf 2.4.2.3 van de literatuurstudie werd de waarde van 4% vooropgesteld als minimaal luchtgehalte in het verharde beton. Uit de air-void-analyse blijkt dat alle mengelingen met LBV deze norm halen. Van de mengelingen zonder LBV haalt slechts het traditionele beton op 3 maand ouderdom deze norm, de vliegaskonkretmengelingen hebben een lager luchtgehalte dan 4%.

HVFA-mengelingen zonder LBV vertoonden een gelijkaardige spacing-factor als bij traditioneel beton op 1 maand ouderdom (tussen 0,250 mm en 0,300 mm). In de literatuurstudie werd de waarde van 0,200 mm als maximale waarde van de spacing-factor vooropgesteld. Op basis hiervan zou men kunnen besluiten dat de vorst-dooibestandheid bij alle mengelingen zonder LBV, zowel traditioneel als FA-beton, niet zou voldoen op 1 maand ouderdom. Bij de HVFA-mengelingen zonder LBV was er geen significant verschil tussen de 2 ouderdommen terwijl er bij T(0,45) een significante daling van de spacing-factor was. Ondanks het kleine verschil in luchtgehalte tussen de HVFA-mengelingen met en zonder LBV, is er toch een groot verschil in spacing-factor, even groot als bij de referentiemengeling. Dit zou dan moeten duiden op het feit dat bij HVFA-mengelingen meer fijne poriën ontstaan wanneer LBV wordt toegevoegd, waar bij eenzelfde luchtgehalte dus de spacing-factor afneemt. Dit bleek inderdaad uit de koordlengtedistributie zoals eerder al werd aangegeven.

Uit de gemiddelde koordlengte  $l_{\text{mean}}$  kan een idee verkregen worden over de gemiddelde poriëndiameter in het beton. Uit de literatuur bleek dat de gemiddelde poriëndiameter bij HVFA-mengelingen kleiner is dan deze bij traditioneel beton, en deze diameter zou nog kleiner zijn wanneer gebruik gemaakt wordt van fijner vlieg-as (Chindaprasirt et al., 2005, 2007, 2009), (Khan et al., 2000) en (Poon et al., 1999). Uit de resultaten van de airvoid-analyse kan daarover echter geen besluit worden getrokken aangezien op 3 maand ouderdom, bij de mengelingen zonder LBV, de HVFA-mengelingen een beduidend hogere gemiddelde poriëndiameter hebben en er op 1 maand ouderdom slechts een klein significant verschil is tussen T(0,45) en de FA2-mengeling. LBV's echter in combinatie met vlieg-as leveren wel een kleinere gemiddelde poriëndiameter op, wat ook overeenkomt met wat in de koordlengtedistributie wordt gevonden.

Een vergelijking voor de verschillende eigenschappen tussen de HVFA-mengelingen levert op dat er zowel voor spacing-factor als specifieke oppervlakte geen significante verschillen zijn tussen de mengelingen met LBV, tussen de mengelingen zonder LBV of tussen de mengelingen op verschillende ouderdommen. Er is echter wel een verschil tussen de HVFA-mengelingen met of zonder LBV, maar dit werd al eerder aangehaald in de vorige paragraaf. Voor het luchtgehalte werd slechts een significant verschil bekomen tussen de mengelingen met LBV op 3 maand ouderdom: FA(2)50A (5,6%) leverde een groter

luchtgehalte op dan FA(1)50A (3,9%). Wanneer deze waardes vergeleken worden met het luchtgehalte van het verse beton dan lijkt het luchtgehalte bij FA(1)50A redelijk sterk gedaald (van 5,2% op vers beton) en FA(2)50A (4,9% op vers beton) nog een weinig toegenomen. Het grovere vliegas FA2 zal de LBV dus meer z'n werk laten doen en dus minder adsorberen dan het fijnere vliegas FA1.

#### **5.6.4 Besluit**

Wanneer spacing-factor, luchtgehalte en koordelengtedistributie samen geanalyseerd werden, bleek dat toevoeging van een LBV bij HVFA-mengelingen niet zorgde voor een extra gehalte aan lucht, maar eerder een groter percentage aan fijnere poriën en zo een kleinere afstandsfactor, waardoor de vorst-bestandheid verbeterd zou moeten worden. In traditioneel beton werd door toevoeging van LBV het luchtgehalte sterk vergroot, en dit door het inbrengen van grote luchtholten eerder dan fijnere poriën. Algemeen verbeterde de inbreng van LBV de parameters in die mate, dat alle mengelingen waaraan LBV is toegevoegd, bestand zouden moeten zijn tegen vorst-dooicycli.

De gemiddelde poriëndiameter van de vliegasmengelingen met luchtbelvormer werd sterk gereduceerd ten opzichte van de diameter bij de vliegasmengelingen zonder luchtbelvormer.

Bij de HVFA-mengelingen was er voor alle parameters telkens geen significant verschil op verschillende ouderdommen. Voor traditioneel beton steeg op latere leeftijd het luchtgehalte en daalde de spacing-factor, wat doet vermoeden dat de vorst-bestandheid zou moeten toenemen. Tussen de HVFA-mengelingen onderling werd slechts een significant groter luchtgehalte gemeten bij de FA(2)50A in vergelijking met FA(1)50A op 3 maand ouderdom, doordat het luchtgehalte van FA(1)50A ietwat daalt (waarschijnlijk door voortgezette hydratatiereacties) en het luchtgehalte van FA(2)50A gelijkblijft. De luchtbelvormer heeft dus in mindere mate een effect op FA(1)50A wat zou kunnen suggereren dat door de grotere fijnheid van FA1 de luchtbelvormer meer geadsorbeerd wordt.

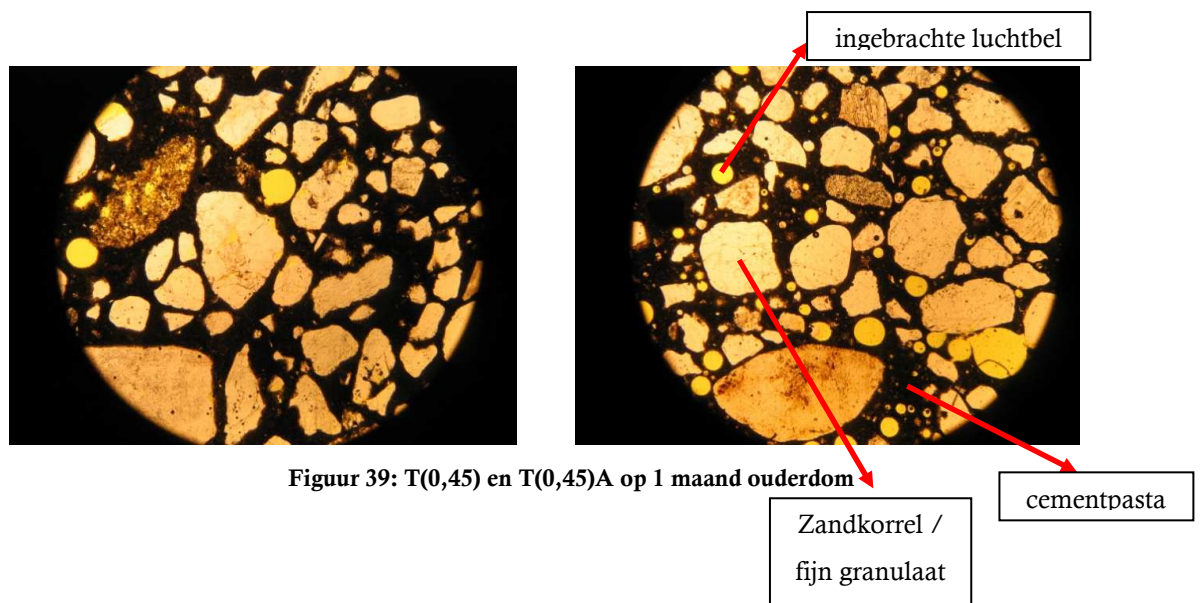
Gezien het positieve effect op de spacing-factor en in mindere mate ook op het luchtgehalte, zullen luchtbelvormers de duurzaamheid van beton met vliegas vergroten met het oog op vorst-dooibestandheid.

## 5.7 Fluorescentiemicroscopie op slijpplaatjes

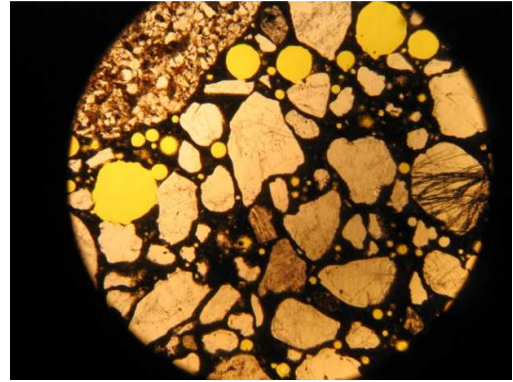
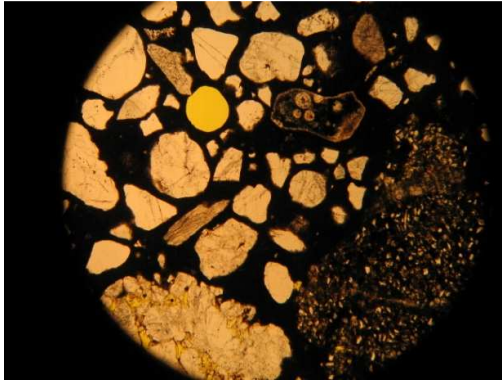
### 5.7.1 Kwalitatief onderzoek

#### 5.7.1.1 Invloed van de additie van luchtbelvormer

Om het effect van de additie van luchtbelvormer te onderzoeken werden telkens slijpplaatjes met elkaar vergeleken die niet aan het bekistingsvlak gelegen zijn. De linkerfoto in de volgende figuren stelt telkens de mengeling voor zonder LBV en de rechterfoto die met LBV. Er wordt gestart met een vergelijking tussen de referentie-mengeling met en zonder LBV. Op de foto's kunnen de luchtbelllen duidelijk onderscheiden worden door hun gele kleur.

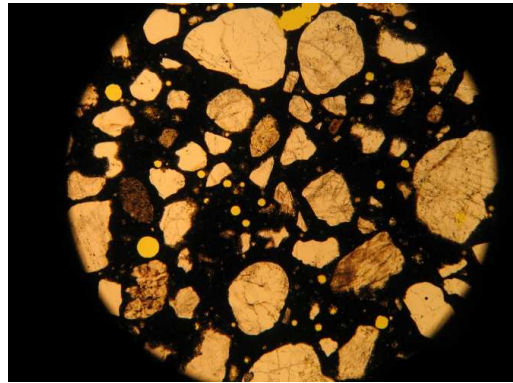
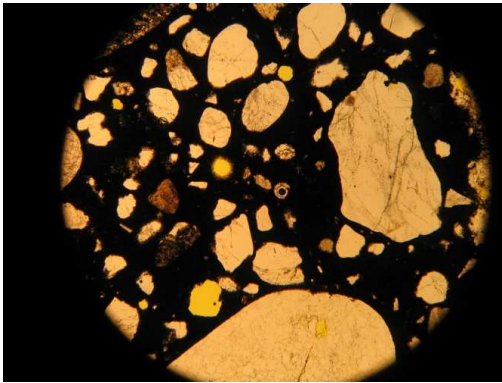


Op de foto's op Figuur 39 is duidelijk te zien dat in de referentiemengeling met LBV veel meer luchtholtes aanwezig zijn. In de linkerfoto kunnen 2 grote luchtbelllen teruggevonden worden met een grootte van 200 à 300  $\mu\text{m}$  diameter. Op de rechterfoto waar LBV is aangebracht ontstaat een uniforme spreiding van luchtbelllen met verschillende groottes gaande van 50 à 600  $\mu\text{m}$ . De LBV heeft dus gedaan wat ervan werd verwacht: het inbrengen van een uniform luchtbellensysteem waarbij de luchtbelllen niet met elkaar in verbinding staan. Ingebrachte luchtbelllen hebben ten opzichte van luchtbelllen eigen aan het betonmengsel een mooier, ronder oppervlak. Uit de vergelijking tussen dezelfde mengelingen op een ouderdom van 3 maand op Figuur 40 kunnen dezelfde besluiten getrokken worden .



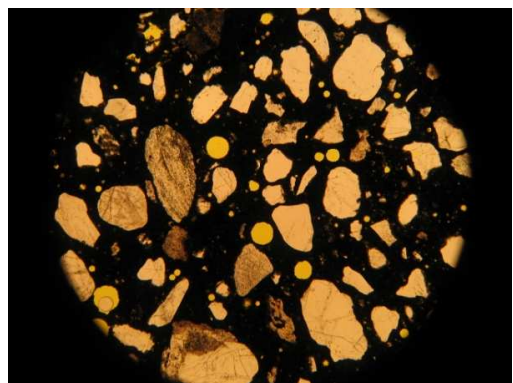
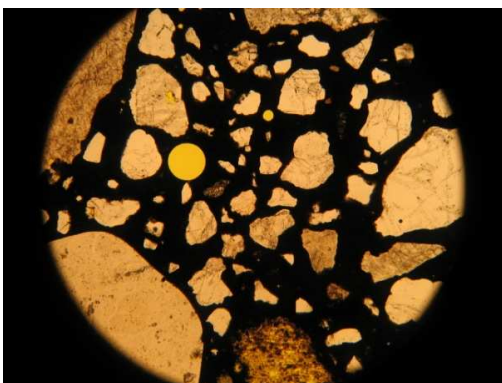
**Figuur 40: T(0,45) en T(0,45)A op 3 maand ouderdom**

In een vergelijking van de FA1-mengelingen met en zonder LBV (Figuur 41) blijkt dat de additie van LBV zorgde voor een inbreng van weinig luchtbelletjes, die beperkte afmetingen bezitten (20 à 150  $\mu\text{m}$ ). De LBV lijkt minder effectief te zijn als bij de referentiemengeling.



**Figuur 41: FA(1)50 en FA(1)50A op 1 maand ouderdom**

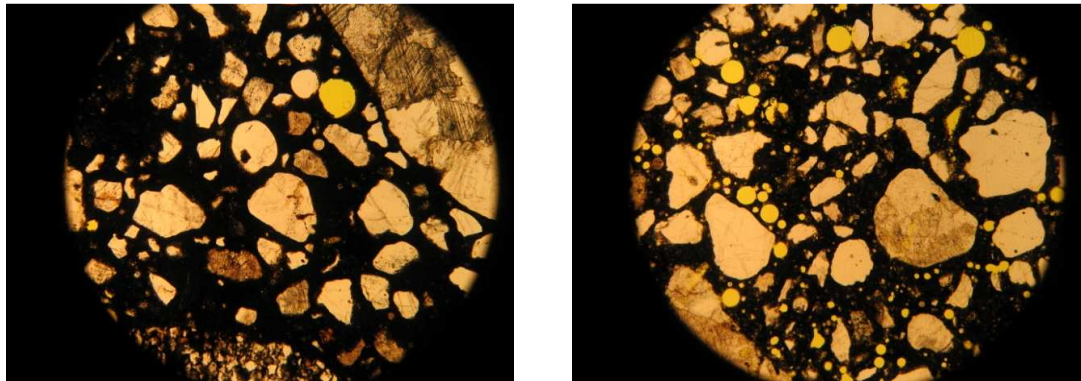
Een vergelijking tussen de FA1- mengeling met en zonder LBV op de leeftijd van 3 maand ouderdom leverde dezelfde conclusies op (Figuur 42).



**Figuur 42: FA(1)50 en FA(1)50A op 3 maand ouderdom**

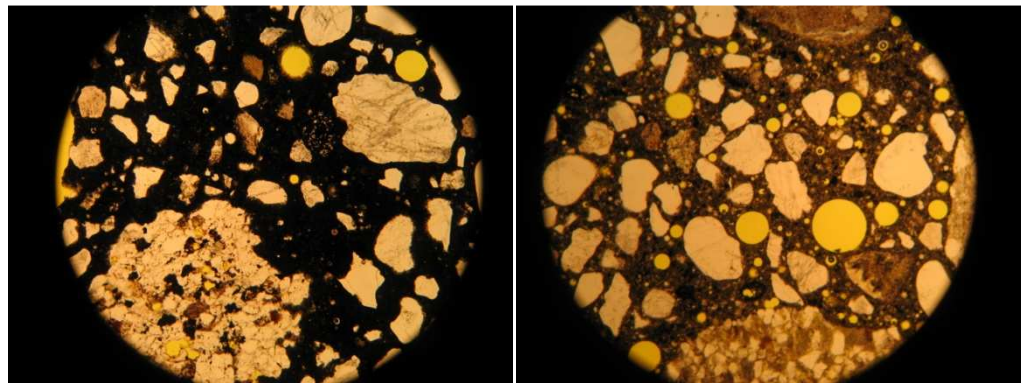


Tot slot wordt een vergelijking gemaakt tussen de FA(2)-mengeling met en zonder LBV. Daaruit bleek dat de additie van LBV voor het beoogde effect zorgt: opnieuw werd zoals bij de referentiemengeling een uniform systeem aan luchtbellen ingebracht. Het valt echter wel op dat ook hier, net als bij de andere FA-mengeling, de luchtholtes die zijn ingebracht beperkt zijn qua afmetingen (20 à 350  $\mu\text{m}$ ) (Figuur 43).



Figuur 43: FA(2)50 en FA(2)50A op 1 maand ouderdom

Een vergelijking van diezelfde mengelingen op 3 maand ouderdom leverde opnieuw dezelfde resultaten op (Figuur 44).



Figuur 44: FA(2)50 en FA(2)50A op 3 maand ouderdom

#### 5.7.1.2 *Verschil traditioneel beton – vliegasbeton*

Het verschil tussen traditioneel beton en vliegasbeton werd ook al duidelijk in de vorige paragraaf. Qua luchtgehalte lijken alle mengelingen zonder LBV quasi gelijk te zijn, zowel op 1 maand als op 3 maand ouderdom. De poriëndiameter bij de vliegasmengelingen lijkt schijnbaar een weinig kleiner dan bij de referentiemengeling. Alle eigenschappen qua luchtbelgrootte en ingebracht luchtgehalte wijzigen schijnbaar niet tussen 1 en 3 maand ouderdom.



Toevoeging van LBV beïnvloedde de samenstellingen op een verschillende manier. Het verschil tussen de 3 mengelingen met luchtbelvormer zat vooral in de poriëngrootte. De luchtbellens die ingebracht werden bij de vliegasmengelingen zijn fijner dan degene ingebracht in het traditionele beton. De totale hoeveelheid ingebrachte lucht in het traditionele beton en het FA2-beton was vergelijkbaar, terwijl er duidelijk minder lucht werd ingebracht in het FA1-beton. Al bleek uit paragraaf 5.6.2 dat het luchtgehalte veel minder toenam bij toevoeging van LBV bij FA(2)50 dan bij T(0,45), maar dat beide toenames toch groter bleken dan toevoeging van LBV bij FA(1)50. Kwalitatief gaat de vergelijking dus op, maar kwantitatief kan het ingebrachte luchtgehalte moeilijk beoordeeld worden op basis van slijpplaatjes.

In de literatuurstudie werd al melding gemaakt van het feit dat luchtbelvormers de gemiddelde poriëndiameter doen stijgen, terwijl de additie van vliegass de poriëndiameter doet dalen. Resultaten van de referentiemengeling bevestigen de eerste stelling. Het samengestelde effect van beiden – LBV én vliegass – blijkt dan toch te zorgen voor een daling van de gemiddelde poriëndiameter ten opzichte van het referentiebeton zonder LBV op het eerste zicht na de visuele analyse.

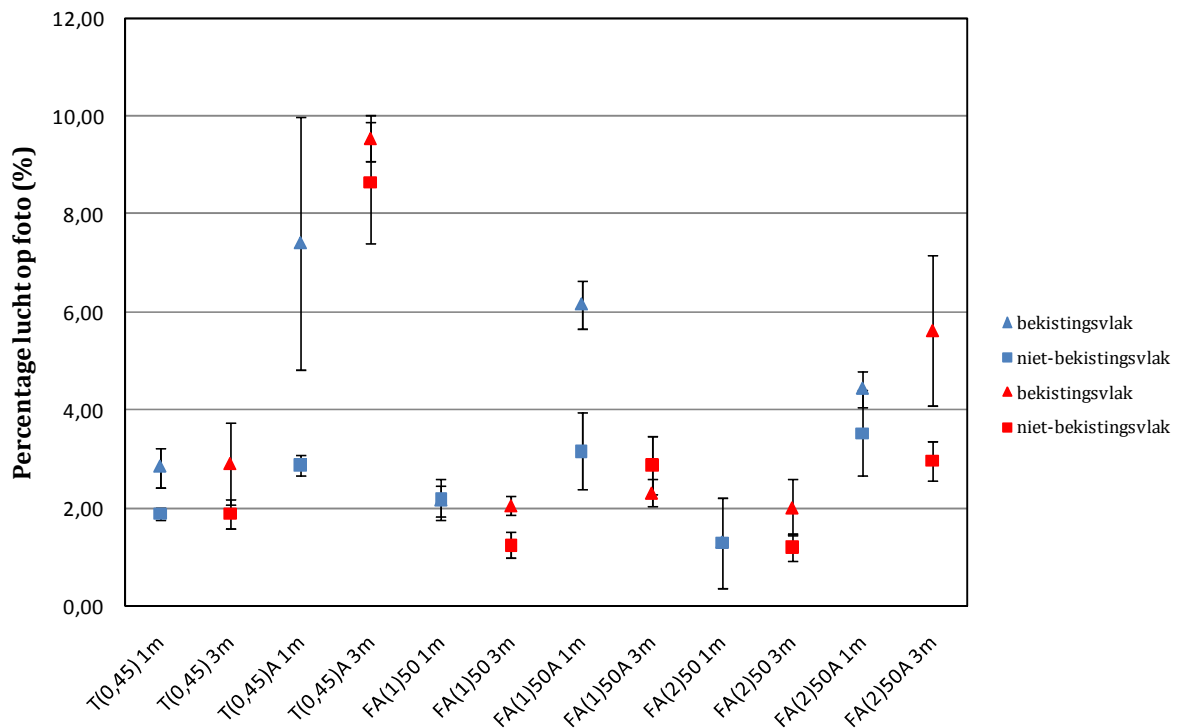
#### ***5.7.1.3 Invloed bekistingvlak – niet-bekistingsvlak***

Om deze resultatenbespreking niet te overladen met figuren heeft de auteur ervoor gekozen de foto's voor de vergelijking van de invloed van het al dan niet-bekistingsvlak op het luchtgehalte in een aparte bijlage te plaatsen (bijlage I), aangezien er ogenschijnlijk geen verschil is in noch het luchtgehalte, noch de luchtbeldistributie en noch de luchtbelgrootte tussen het niet-bekistingsvlak en het bekistingsvlak.

#### **5.7.2 Kwantitatief onderzoek**

Met behulp van het programma ImageJ werden de foto's van de slijpplaatjes geanalyseerd en zo werd het percentage lucht per foto eruit gefilterd. Zo konden de verschillende foto's met elkaar worden vergeleken. Per slijpplaatje werd 1 foto aan het niet-bekistingsvlak en 1 foto aan het bekistingsvlak geanalyseerd. Zo werden per mengeling, per ouderdom en per bekistingsvlak/niet-bekistingsvlak 3 foto's geanalyseerd, waarvan dan een gemiddelde

waarde en standaardfout bekomen werd. In Figuur 45 zijn de resultaten van die analyses weergegeven. De getalwaardes zijn terug te vinden in bijlage I.



**Figuur 45: Resultaten kwantitatieve analyse met Image J - percentage lucht op foto**

Hieruit kan besloten worden dat bij een vergelijking bij een bepaalde mengeling tussen zowel bekistingsvlak als niet-bekistingsvlak en 1 maand ouderdom als 3 maand ouderdom geen significante verschillen vastgesteld konden worden, behalve bij T(0,45)A waar het luchtgehalte bij de foto's van het niet-bekistingsvlak op 1 maand ouderdom beduidend lager ligt dan de andere luchtgehaltenes van die mengeling en bij FA(1)50A waar het luchtgehalte bij het bekistingsvlak op 1 maand ouderdom beduidend hoger ligt dan de rest van de luchtgehaltenes. Dit kon echter niet besloten worden uit de visuele analyse.

De uitschieters die in vorige paragraaf teruggevonden werden kunnen de meetmethode als oorzaak hebben. De plaats van de foto's op de slijpplaatjes was volgens willekeur gekozen. Zo kan het zijn dat door de grote vergroting (50x) 1 granulaat de helft van de foto kan innemen, terwijl op een ander beeld enkel een foto van de cementpasta tussen de granulaten is genomen. Dit geeft dan uiteraard een vertekend beeld van het luchtgehalte en een enorme spreiding op de resultaten wat duidelijk in gezien kan worden. Daarom is het beter zich te focussen op algemene trends die uit deze grafiek teruggevonden kunnen worden, dan op individuele gevonden waarden.

Algemene trends die terug te vinden waren, waren onder andere dat het luchtgehalte significant toenam wanneer LBV aan een mengeling werd toegevoegd, behalve bij de FA1-mengeling, zoals ook al besloten kon worden uit de visuele analyse. Ook de luchtgehalten bij de 3 mengelingen zonder LBV zijn vergelijkbaar, wat ook uit de visuele analyse teruggevonden werd.

### **5.7.3 Besluit**

Uit de beide voorgaande paragrafen kan vooreerst besloten worden dat de verschillen qua luchtgehalte, luchtbelgrootte en distributie van de luchtbellens quasi nihil zijn tussen 1 en 3 maand ouderdom, voor alle mengelingen.

Ook kon worden besloten dat er telkens een verschil was tussen de mengelingen met en zonder LBV, maar dat dat verschil het minst uitgesproken was bij de FA1-mengelingen. LBV zorgt voor de inbreng van een uniform verdeeld luchtbellensysteem in alle 3 de mengelingen. Het verschil tussen de 3 mengelingen met LBV zat vooral in de poriëngrootte. De poriën die ingebracht werden bij de vliegasmengelingen zijn fijner (20 à 350  $\mu\text{m}$ ) dan degene ingebracht in het traditionele beton (50 à 600  $\mu\text{m}$ ). De totale hoeveelheid ingebrachte lucht in het traditionele beton en het FA2-beton lijken gelijk, terwijl er duidelijk minder lucht werd ingebracht in het FA1-beton volgens de visuele analyse. Dit is slechts een kwalitatieve analyse. Kwantitatief kunnen hierover geen uitspraken gedaan worden en moet vergeleken worden met de resultaten uit de airvoid-analyse.

Volgens de literatuur doet het gebruik van een luchtbelvormer de poriëndiameter toenemen, wat ook het geval was voor T(0,45)A. Gebruik van vliegas zou de poriëndiameter moeten doen afnemen, wat niet meteen uit deze resultaten kon afgeleid worden. De combinatie van LBV en toevoeging van vliegas zorgde volgens deze resultaten wel voor een afname van de gemiddelde poriëndiameter.

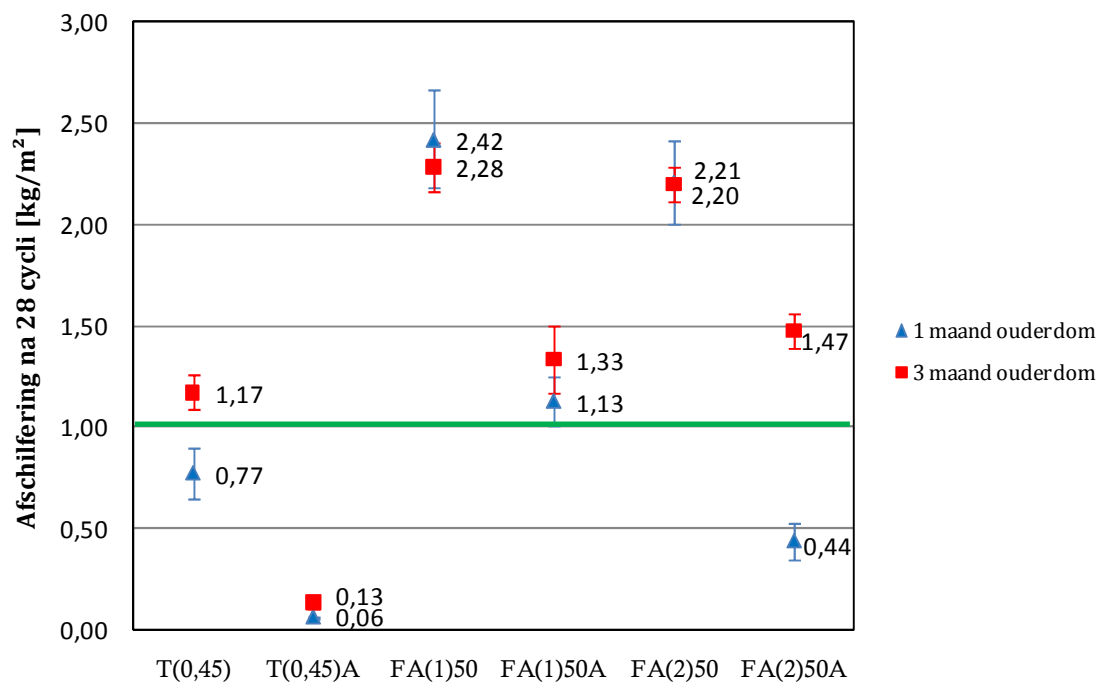
## **5.8 Vorst-dooibestandheid in combinatie met dooizouten**

### **5.8.1 Resultaten**

Van elke betonmengeling werden 6 proefstukken beproefd op 1 maand en op 3 maand ouderdom. In bijlage J wordt de afschilfering na een bepaald aantal doorlopen cycli grafisch

voorgesteld aan de hand van de gemiddelde waarden en de standaardfout. De getalwaarden zijn daar ook terug te vinden in tabelvorm.

Voor een goede vergelijking van de verschillende betonmengelingen werd hierna de totale afschilfering na 28 cycli grafisch voorgesteld op Figuur 46.



Figuur 46: Afschilfering na 28 cycli

Als algemene opmerking kan hier aangeduid worden dat op de gemeten waarden grote standaardfouten en ook standaardafwijkingen zijn. Deze standaardfouten zijn des te groter naarmate de afschilfering een hogere waarde kent (duidelijk te zien op de figuren in bijlage J). Dit zou kunnen verklaard worden wanneer een zeer afgeschilderd oppervlak beschouwd wordt: bij deze oppervlakken komen vaak kleine granulaten bloot te zitten aan de oppervlakte. Bij het ene proefstuk komen deze kleine granulaten nog net los uit de cementmatrix tijdens de afschilfering, terwijl ze in andere proefstukken dan net nog blijven zitten. Wanneer echter weinig tot geen afschilfering te zien is, komen ook geen kleine granulaten aan de oppervlakte en kunnen deze zodoende ook niet mee afschilferen. Kleine granulaten die mee afschilferen kunnen de oorzaak voor de grote spreiding op de meetwaarden zijn.

### **5.8.2 Invloed van de additie van luchtbelvormer**

Wanneer mengelingen met en zonder LBV met elkaar werden vergeleken, was het effect van de LBV telkens zeer duidelijk: toevoeging van LBV zorgde bij elke mengeling voor een afname van de afschilfering en dus een toename van de vorstbestandheid.

Op 1 maand ouderdom zorgde de additie van LBV er voor dat zowel de referentiemengeling als FA2-beton de norm van maximale afschilfering gelijk aan 1 kg/m<sup>2</sup> halen volgens NBN EN 1338. Ook werd via een T-test (significantieniveau 5%) met behulp van SPSS gevonden dat de afschilfering van FA(1)50A op 1 maand ouderdom niet significant van 1kg/m<sup>2</sup> verschilt. Op 3 maand ouderdom T(0,45)A de norm. Opnieuw werd met een T-test besloten dat de afschilfering van FA(1)50A op 3 maand ouderdom niet significant verschillend is van 1kg/m<sup>2</sup>. Verwacht werd dat ook FA(2)50A de norm nog zou halen, maar waarschijnlijk is in die proefreeks iets misgelopen. Daar wordt in een volgende paragraaf nog op teruggekomen.

Wanneer de resultaten op 1 maand ouderdom met elkaar werden vergeleken, kon besloten worden dat additie van LBV aan de referentiemengeling de afschilfering reduceerde tot quasi geen afschilfering meer, en dat de additie van LBV bij FA2-beton zorgde voor een indrukwekkende reductie van de afschilfering (5 maal minder). Bij het gebruik van LBV bij de FA1-mengeling was er ook een opmerkelijk verschil, maar dit was minder opvallend (2 maal minder afschilfering) dan bij de FA2-mengeling. Dat vliegass FA1 fijner is dan FA2, waardoor de luchtbelvormer meer wordt geadsorbeerd, zou dit eventueel kunnen verklaren.

### **5.8.3 Vergelijking traditioneel beton – vliegassbeton & invloed van ouderdom**

Volgens Boel (2006) is de ervaring met vliegass op de vorstbestandheid van beton positief, zolang de hoeveelheid cementvervanging door vliegass beperkt wordt tot 25%. In (Pigeon et al., 1995) en (Valenza & Scherer, 2007) werd teruggevonden dat bij een cementvervanging van meer dan 20% door vliegass, dit als weerslag een significante reductie in vorstbestandheid van het beton geeft. In deze masterproef werd een cementvervanging van 50% gehanteerd en het negatieve effect daarvan op de vorstbestandheid is duidelijk te zien: alle HVFA-mengelingen respectievelijk met en zonder LBV presteren slechter dan de referentiemengeling respectievelijk met en zonder LBV. De afschilfering van de HVFA-mengelingen zonder LBV bedraagt telkens meer dan de norm van 1 kg/m<sup>2</sup>. Van de HVFA-

mengelingen met LBV haalt de FA(2)50A op 1 maand ouderdom makkelijk de norm, FA(1)50A op 1 en 3 maand (achterhaald door middel van een T-test) geeft geen significant verschillende afschilfering dan  $1\text{ kg/m}^2$ , terwijl de referentiemengeling zowel met als zonder LBV de normwaarde haalt.

Vliegas is fijner dan cement en dit zorgt er voor dat beton waaraan vliegas is toegevoegd een meer dichtere structuur krijgt, waardoor ook de doorlatendheid daalt en de sterkte toeneemt. Wanneer de 'glue spalling' theorie geldig is, dan zou dit veronderstellen dat hoe sterker het beton, hoe minder afschilfering zou mogen plaatsvinden. Met 'sterkte' wordt niet de algemene druksterkte van het beton bedoeld, maar de sterkte van de oppervlaktelaag: 'glue spalling' gaat er immers vanuit dat scheuren in de ijsformatie op het beton, verder propageren in de oppervlaktelaag van het beton. Wanneer verondersteld wordt dat het fijnere vliegas zorgt voor een sterker beton op latere leeftijd, zou dit dus minder afschilfering moeten opleveren op de ouderdom van 3 maand. Het tegengestelde bleek echter waar uit de proefresultaten: HVFA-mengelingen presteren slechter dan de referentiemengeling en er blijkt geen significante verbetering te zijn van de afschilfering op 3 maand ouderdom (integendeel voor de referentiemengeling). Daaruit kunnen 2 conclusies worden getrokken: ofwel is de 'glue spalling' theorie niet geldig, ofwel evolueert de sterkte van de oppervlaktelaag niet mee met de algemene sterkte, zodat de additie van vliegas voor een zeer zwakke oppervlaktelaag zorgt, die makkelijk kan afschilferen, bijvoorbeeld door het optreden van meer 'bleeding'. Een gekend 'kenmerk' van het gebruik van vliegas is echter dat juist het effect van 'bleeding' wordt verminderd, dit kan dus zeker geen verklaring vormen. In (Cox, 2007) werd een vries-dooiproef met dooizouten uitgevoerd op proefstukken met een bekistingsvlak en met een vlak uit het beton genomen (bij HVFA-beton). In dit experiment werd ook teruggevonden dat de proefoppervlakken aan het bekistingsvlak veel meer afschilferden dan de oppervlakken uit het beton genomen. In het artikel kon hiervoor echter geen verklaring gevonden worden. Een verklaring zou misschien kunnen gevonden worden wanneer de resultaten van het onderzoek van de slijpplaatjes met een bekistingsvlak en niet-bekistingsvlak worden vergeleken met deze resultaten. Dit wordt dan ook uitgevoerd in paragraaf 6.6.1.

Van de referentiemengelingen halen alle mengelingen de norm, met en zonder LBV. Van alle vliegasmengelingen halen enkel FA(2)50A op 1 maand ouderdom en FA(1)50A op 1 en

3 maand ouderdom de norm. Verwacht werd (zie paragraaf 6.6.2) dat ook op 3 maand ouderdom voor de FA(2)50A-mengeling de norm werd gehaald. Het resultaat voor deze mengeling ligt dan ook totaal buiten de verwachtingen. De andere vliegasmengelingen vertonen geen significant verschillende afschilfering tussen 1 en 3 maand ouderdom, hetzelfde werd dus verwacht voor FA(2)50A. Ook uit een vergelijking met andere proefresultaten (met o.a. de airvoid-analyse, zie volgend Hoofdstuk 6) lijkt dit resultaat geheel onlogisch. Waarschijnlijk moet iets verkeerd gelopen zijn bij de voorbereiding van deze mengeling of tijdens de proef. Er werd beslist dit resultaat te verwerpen, en er wordt aangeraden deze proef opnieuw uit te voeren voor FA(2)50A op 3 maand ouderdom.

#### **5.8.4 Besluit**

Vliegasmengelingen blijken minder goed te presteren wanneer het aankomt op vorstbestandheid in vergelijking met traditioneel beton. Een verklaring hiervoor werd echter niet gevonden, maar in enkele literatuuronderzoeken werd dezelfde conclusie teruggevonden. Een verdere vergelijking tussen de eigenschappen van het vliegaskbeton aan het bekistingsvlak en het niet-bekistingsvlak is aan te raden (d.m.v. fluorescentie-microscopie) om op die manier een eventuele verklaring te vinden.

De weerstand tegen vorst-dooicycli neemt niet toe tussen 1 en 3 maand ouderdom, voor de referentiemengeling neemt ze zelfs af, waardoor met enige voorzichtigheid de ‘glue spalling’ theorie, die gebaseerd is op de oppervlaktesterktes van beton, kan verworpen worden. Het verwerpen van dit mechanisme steunt wel op de veronderstelling dat de oppervlaktesterkte in dezelfde mate evolueert als de algemene sterkte van het beton. Er wordt aangeraden onderzoek te verrichten in welke mate deze veronderstelling geldig is. Een verklaring voor de vorst-dooi-schade met dooizouten lijkt dus nog niet gevonden te zijn.

Luchtbelvormers zorgen bij elke mengeling voor een verbetering van de vorstbestandheid door een vermindering van de afschilfering. De luchtbelvormer doet dus hetgeen waarvoor hij bedoeld is: het inbrengen van expansieruimtes voor bevriezend water in het beton om zo de vorstbestandheid te vergroten. FA1 lijkt de LBV meer te adsorberen aangezien de vermindering van de afschilfering, met dank aan de toevoeging van de LBV, tussen FA(1)50 en FA(1)50A maar met een factor 2 vermindert terwijl de afschilfering tussen FA(2)50 en FA(2)50A met een factor 5 vermindert.

De gevonden waarden voor de afschilfering van FA(2)50A op 3 maand ouderdom kwamen niet overeen met de verwachte waarden voor de afschilfering van dit beton. Daarom werden deze meetresultaten verworpen (de reden hiervoor zal gegeven worden in paragraaf 6.6.2) en werd aangeraden deze proef opnieuw uit te voeren op die specifieke mengeling en ouderdom. Het verwerpen van deze resultaten dient wel nog gerechtvaardigd te worden door een vergelijking met resultaten van andere proeven (zie volgend Hoofdstuk 6).



# Hoofdstuk 6

## Relaties tussen de verschillende resultaten

In de hoofdstuk 5 werden per proef de meetresultaten voor de verschillende mengelingen afzonderlijk besproken. Aangezien alle uitgevoerde proeven op een of andere manier de microstructuur van het beton karakteriseren, is het nuttig te kijken in welke mate de bekomen meetwaarden van deze verschillende experimenten met elkaar in verband kunnen worden gebracht. In het voorliggende hoofdstuk wordt getracht deze relaties aan het licht te brengen. De vergelijkingen die gedaan worden, zijn naar analogie met de relaties die gezocht werden in (Van den Heede, 2008).

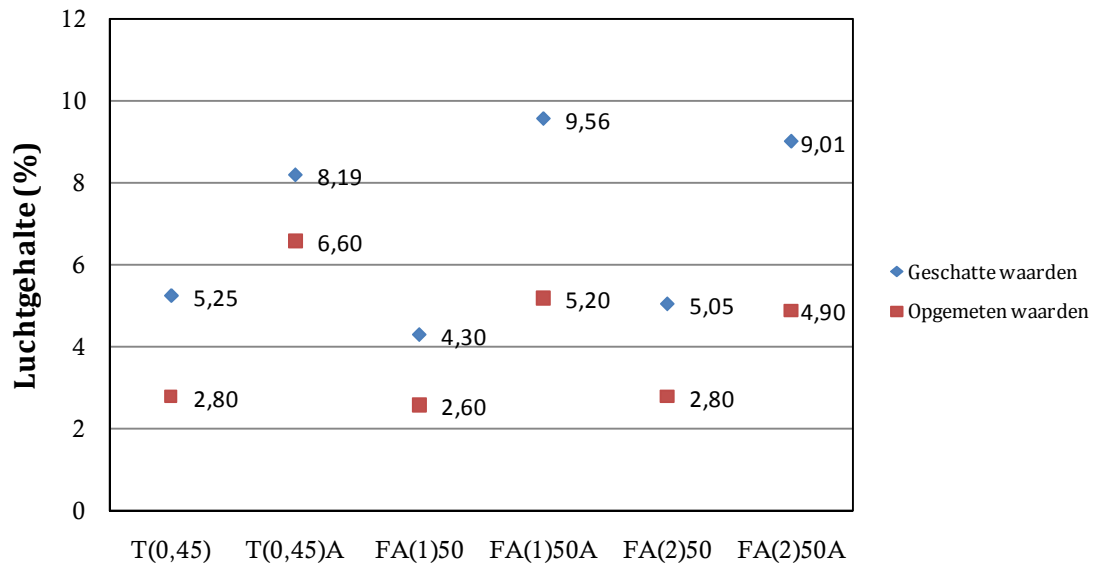
### 6.1 Effectiviteit van de luchtbelvormer & luchtgehalte

In de resultaten van de gaspermeabiliteit en de vacuümverzadiging werd een grotere gaspermeabiliteit en open porositeit teruggevonden wanneer gebruik gemaakt werd van een luchtbelvormer. Dit suggereert dat een luchtbelvormer niet enkel een systeem aan geïsoleerde luchtbellen inbrengt, maar ook zorgt voor interconnectie tussen poriën. Dit werd echter niet opgemerkt uit de fluorescentiemicroscopie.

Zowel uit de fluorescentiemicroscopie als uit de airvoid-analyse bleek de luchtbelvormer zijn werk te doen: het inbrengen van luchtbellen. Het gebruik van de LBV bleek daarin het meest effectief bij de referentiemengeling en de FA2-mengeling. FA1 leek de LBV meer te adsorberen. Dit kwam ook uit de resultaten van de gaspermeabiliteit naar voor. Dit kan te wijten zijn aan de grotere fijnheid van FA1 ten opzichte van FA2, waardoor de LBV meer geadsorbeerd wordt, dit in overeenstemming met wat reeds werd gevonden door Hill et al. (1997) en Pedersen et al. (2007).

In hoofdstuk 3 werd reeds een vooronderzoek uitgevoerd naar het luchtgehalte dat bekomen werd bij verse mortel, wanneer gebruik gemaakt wordt van vliegas en luchtbelvormer. Een curve werd gefit aan de meetwaarden en aan de hand daarvan kon een voorspelling gemaakt worden van het luchtgehalte in mortel, bij het gebruik van een nader te specificeren dosering luchtbelvormer. Een vergelijking kan nu gemaakt worden tussen deze geschatte waarden, en de effectief gemeten waarde voor het luchtgehalte van het verse beton. Hierbij

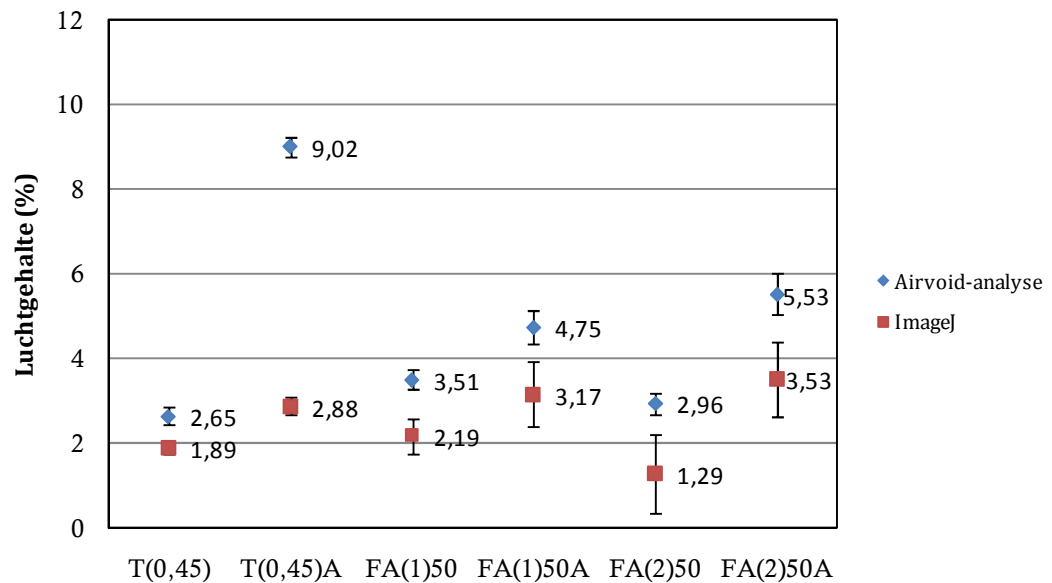
dient echter wel opgemerkt te worden dat in de mortels bij de vliegasmengelingen gewerkt werd met een water/bindmiddelfactor van 0,5 en bij de betonmengelingen met een water/bindmiddel-factor van 0,35. Ook kunnen resultaten bekomen op mortels, zoals reeds eerder opgemerkt, niet meteen geëxtrapoleerd worden naar resultaten op beton, daar in het beton grove granulaten en superplastificeerder wordt toegevoegd. In Figuur 47 is de vergelijking gemaakt tussen de geschatte en opgemeten waarden. De getalwaardes zijn terug te vinden in bijlage K.



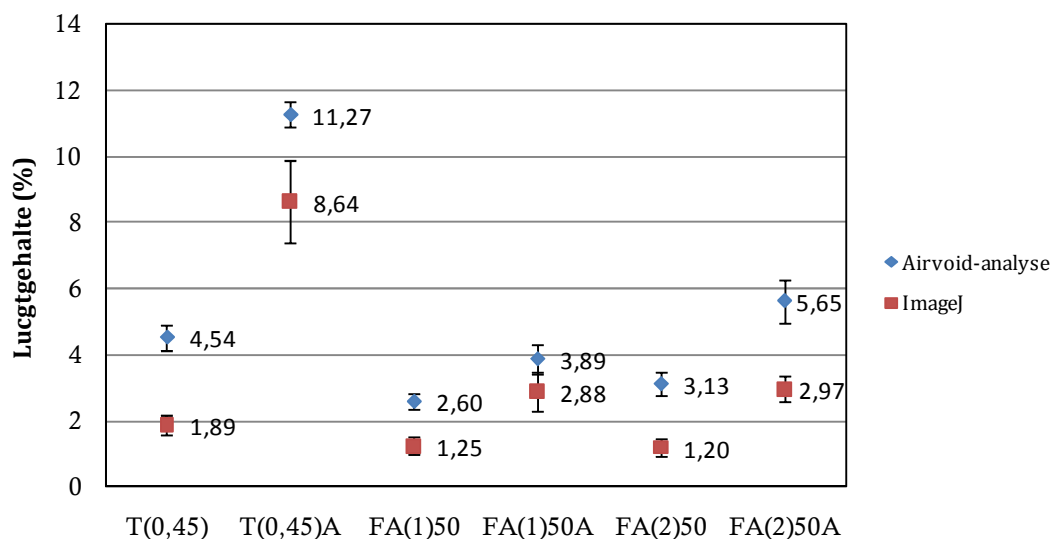
**Figuur 47: Vergelijking geschat en opgemeten luchtgehalte**

Meteen kan opgemerkt worden dat de opgemeten luchtwaardes telkens lager zijn dan de geschatte waardes. Hieruit zou kunnen besloten worden dat de additie van grove granulaten in beton zorgt voor een vermindering van het luchtgehalte. Algemene trends blijven wel geldig (mengelingen met LBV groter luchtgehalte dan mengelingen zonder LBV, FA2-mengeling quasi zelfde luchtgehalte als referentiemengeling en FA1-mengeling iets minder) maar het luchtgehalte van FA(2)50A ligt toch ver onder de geschatte waarde. Er moet wel gezegd dat de opgemeten waarde slechts 1 keer is opgemeten, dus is er geen idee van de spreiding op deze resultaten. Voorts werd al eerder aangehaald dat het gefitte model onbetrouwbaar van aard is gezien de grote standaardfouten op de gefitte meetwaarden.

Verder kunnen ook nog de luchtgehaltenes, bepaald op verhard beton aan de hand van airvoid-analyse en fluorescentiemicroscopie, met elkaar vergeleken worden op de verschillende ouderdommen. Op Figuur 48 en Figuur 49 zijn deze ten opzichte van elkaar uitgezet.



**Figuur 48: Vergelijking luchtgehaltes op 1 maand ouderdom**



**Figuur 49: Vergelijking luchtgehaltes op 3 maand ouderdom**

Het valt op dat telkens lagere luchtgehaltes gevonden worden met ImageJ dan bij de airvoid-analyse. De grote vergroting die gebruikt wordt bij het ImageJ programma, en het feit dat bij deze analyse slechts een heel kleine fractie van het oppervlak wordt bestudeerd kunnen hiervan de oorzaak zijn.

Uit de kwalitatieve analyse van de fluorescentiemicroscopie werd visueel vastgesteld dat ongeveer hetzelfde luchtgehalte werd ingebracht bij T(0,45)A als bij FA(2)50A. Op basis van deze visuele analyse kunnen blijkbaar geen besluiten getrokken worden omtrent de kwantiteit van de ingebrachte luchtbellens, aangezien uit de airvoid-resultaten duidelijk

besloten kan worden dat veel meer lucht werd ingebracht bij T(0,45)A (luchtgehalte =9,02% en 11,27%) dan bij FA(2)50A (luchtgehalte= 5,53% en 5,65%).

ImageJ blijkt dus een goeie tool om een kwalitatieve analyse te maken van de ingebrachte luchtbellen: de grootte en de distributie ervan. Voor een kwantitatieve analyse wordt een airvoid-analyse sterk aangeraden.

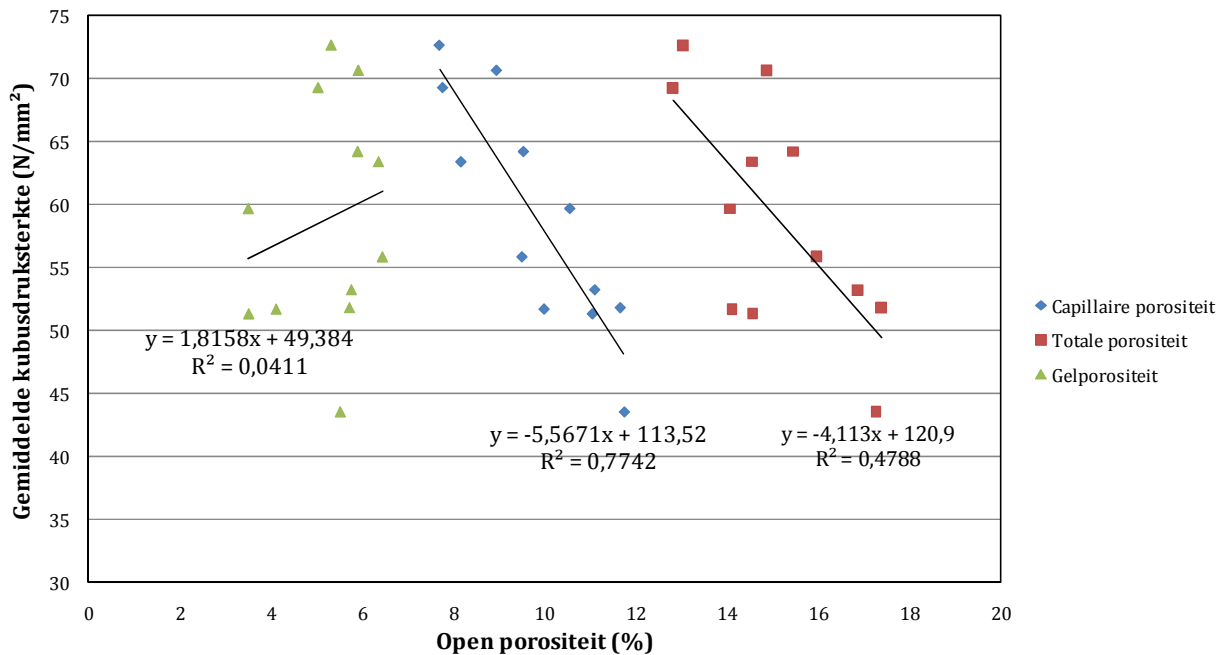
## **6.2 Grootte van de poriën**

Zowel uit de fluorescentiemicroscopie als uit de airvoid-analyse bleek dat toevoeging van een LBV bij de referentiemengeling zorgt voor een stijging van de gemiddelde poriëndiameter en bij een vliegasmengeling zorgt voor een daling van de gemiddelde poriëndiameter.

Over de mengelingen zonder LBV kon bij de fluorescentiemicroscopie geen uitspraak gedaan worden over het verschil in gemiddelde poriëndiameter tussen het traditionele beton en het vliegaseton. Na de visuele analyse leken deze ongeveer dezelfde grootte te hebben. In de airvoid-analyse werd wel een verschil aangetoond: in tegenstelling tot de literatuur hadden de vliegasmengelingen op een ouderdom van 3 maand een hogere gemiddelde poriëndiameter dan het traditionele beton. Op 1 maand ouderdom waren de poriëndiameters quasi gelijk met toch een licht significant kleinere poriëndiameter voor FA(2)50. Volgens de literatuur zou de gemiddelde poriëndiameter van vliegaseton kleiner zijn dan bij traditioneel beton. Bij dit gezegde werd echter geen uitspraak gedaan over de leeftijd van het beschouwde beton.

## **6.3 Verband porositeit – druksterkte**

Volgens paragraaf 2.5 zou de druksterkte vaak in verband kunnen worden gebracht met andere eigenschappen van beton. Aangezien de sterkteontwikkeling direct gerelateerd is aan de percolerende microstructuur, is het nuttig te kijken in hoeverre er een evenredig verband bestaat tussen de porositeit en de druksterkte (Van den Heede, 2008). Dit werd nagegaan door de gemiddelde druksterkte uit te zetten ten opzichte van de capillaire, de totale en de gelporositeiten op 1 en 3 maand ouderdom (Figuur 50).

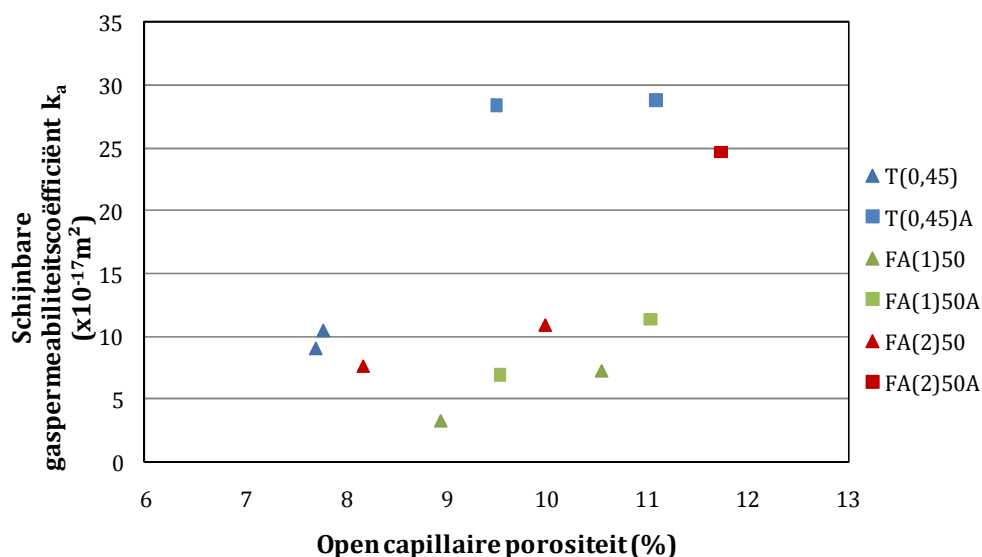


Figuur 50: Gemiddelde kubusdruksterkte in functie van de open porositeiten

Wat de capillaire porositeit betreft, is er duidelijk sprake van een vrij uitgesproken omgekeerd evenredig verband met de gemiddelde druksterkte. De trendlijn die gefit werd aan de meetwaarden vertoont een  $R^2$ -waarde van 0,77. Dit verband gaat ook op voor de totale porositeit, zij het in minder mate ( $R^2=0,48$ ). In het geval van de gelporositeiten is geen relevante trendlijn aan de meetwaarden te fitten, de correlatie bedraagt slechts 0,04.

#### 6.4 Verband porositeit – gasdoorlatendheid

Voor de gasdoorlatendheid zijn enkel die poriën van belang die met elkaar in verbinding staan, of de zogenaamde open porositeit. Het grootste deel van het transport gebeurt dan via de grotere capillaire poriën (Boel, 2006). Er wordt dan ook een sterk verband verwacht tussen de capillaire porositeit en de gasdoorlatendheid. In (Van den Heede, 2008) en (Lammertijn, 2007) werd telkens in beperkte mate een stijgende trend vastgesteld wanneer de schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt werd uitgezet ten opzichte van de capillaire porositeit. In Figuur 51 zijn de waarden uitgezet die in dit onderzoek bepaald werden op 1 en 3 maand ouderdom (voor de gaspermeabiliteitscoëfficiënt bij een verzadigingsgraad van 0% en een druk van 3 bar). Lage capillaire porositeiten kunnen over het algemeen gelinkt worden aan een kleinere gasdoorlatendheid.



Figuur 51: Verband tussen gaspermeabiliteitscoëfficiënt en capillaire porositeit

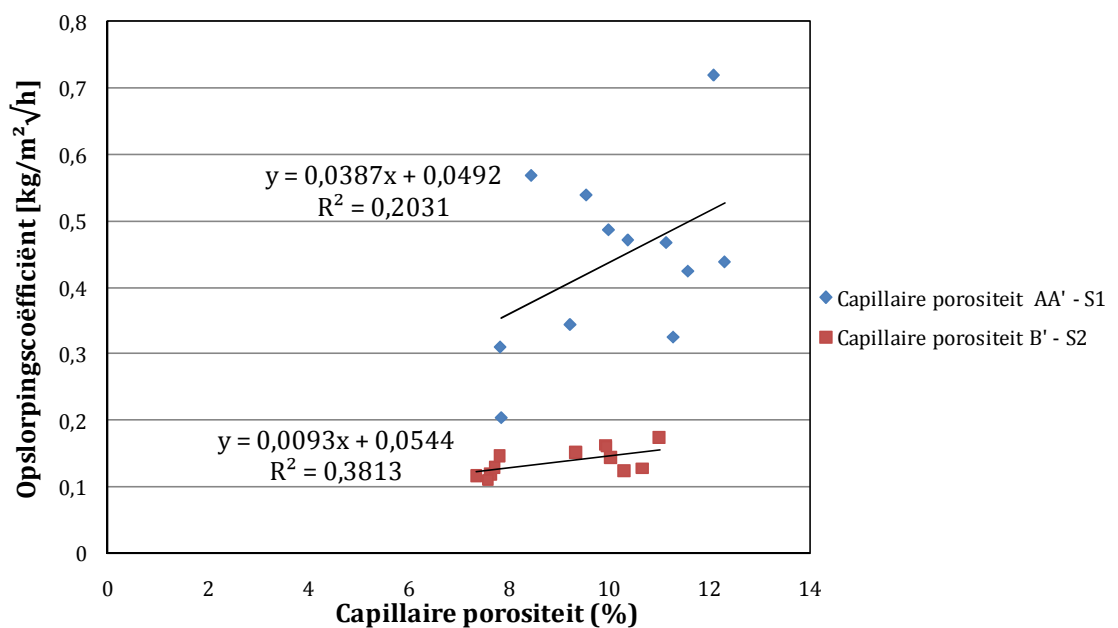
In Figuur 51 valt op dat FA(1)50 en FA(1)50A vrij poreus zijn en toch gekenmerkt worden door een eerder lage gasdoorlatendheid. Deze mengelingen presteren qua gasdoorlatendheid even goed of zelfs beter dan de referentie, terwijl dit voor de capillaire porositeit absoluut niet het geval is. Hieruit blijkt dat de gaspermeabiliteit geen eenvoudige functie is van de porositeit, maar dat ook andere factoren van belang zijn. Safiuddin & Hearn (2005) vermelden dat ook de grootte, verdeling en tortuositeit of bochtigheid van de poriën een invloed hebben op de gasdoorlatendheid.

Het gebruik van een ander type vliegias heeft ook een duidelijke invloed op de 2 duurzaamheidsparameters: de FA1-mengelingen vertonen telkens een lagere gasdoorlatendheid, maar een grotere open porositeit dan de FA2-mengelingen.

Ook het gebruik van LBV heeft een zeer duidelijke invloed op de duurzaamheidsparameters. Wanneer telkens mengelingen zonder LBV worden vergeleken met de overeenkomstige mengelingen met LBV is duidelijk te zien dat de additie van een LBV een stijging van zowel de open capillaire porositeit als de schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt teweeg brengt. Dit effect is minder duidelijk bij de FA1-mengeling en hiervoor werd de grotere adsorptie van de LBV aan de fijnere vliegias al aangewezen als mogelijke reden voor dit verschijnsel.

## 6.5 Verband porositeit – capillaire wateropslorping

Het is algemeen geweten dat in een cilindervormige buis water door capillariteit hoger zal worden opgezogen naarmate de buisdiameter kleiner is. Uitgaande van deze uitspraak zou de capillaire wateropslorping bij beton in verband moeten worden gebracht met de fijnere gelporiën (Van den Heede, 2008). In laatstgenoemd onderzoek werd echter geen voldoende correlatie gevonden tussen de gelporositeiten en de capillaire opslorplingscoëfficiënt  $S_1$ . Vaak konden hoge gelporositeiten zelfs gekoppeld worden aan een lage capillaire opslorping, waardoor de algemene opvatting rond capillaire wateropslorping niet zo maar toegepast kan worden op beton. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat een toenemend aantal fijne gelporiën aanleiding kan geven tot lokale obstructies in het poriënnetwerk waardoor de capillaire wateropslorping bemoeilijkt wordt (Van den Heede, 2008). Tussen de capillaire porositeit (AA') en de opslorplingscoëfficiënt  $S_1$  blijkt een beter verband te bestaan. Dit wordt dan ook uitgezet (zie Figuur 52), samen met de opslorplingscoëfficiënt  $S_2$  t.o.v. de capillaire porositeit van de B-proefstukken. Deze twee verbanden gaan het beste op aangezien de initiële capillaire wateropslorping, gekenmerkt door  $S_1$ , plaatsgrijpt in de poreuzere randzone van het beton nabij het bekistingsvlak (AA') en de opslorplingscoëfficiënt  $S_2$  meer betrekking heeft op de kernzone van het beton met een porositeit die eerder door deze van de B-proefstukken zal benaderd worden.



Figuur 52: Correlatie tussen de capillaire porositeit (AA' en B) en de opslorplingscoëfficiënt (respectievelijk  $S_1$  en  $S_2$ ) op 1 en 3 maand ouderom

De beide correlaties zijn behoorlijk zwak ( $R^2=0,20$  en  $R^2=0,38$ ). Over het algemeen kan echter wel gesteld worden dat hogere capillaire porositeiten bijdragen tot een grotere capillaire wateropsorping.

## **6.6 Weerstand tegen vorst-dooicycli in combinatie met dooizouten**

### **6.6.1 Verklaring slechte resultaten vliegasmengelingen**

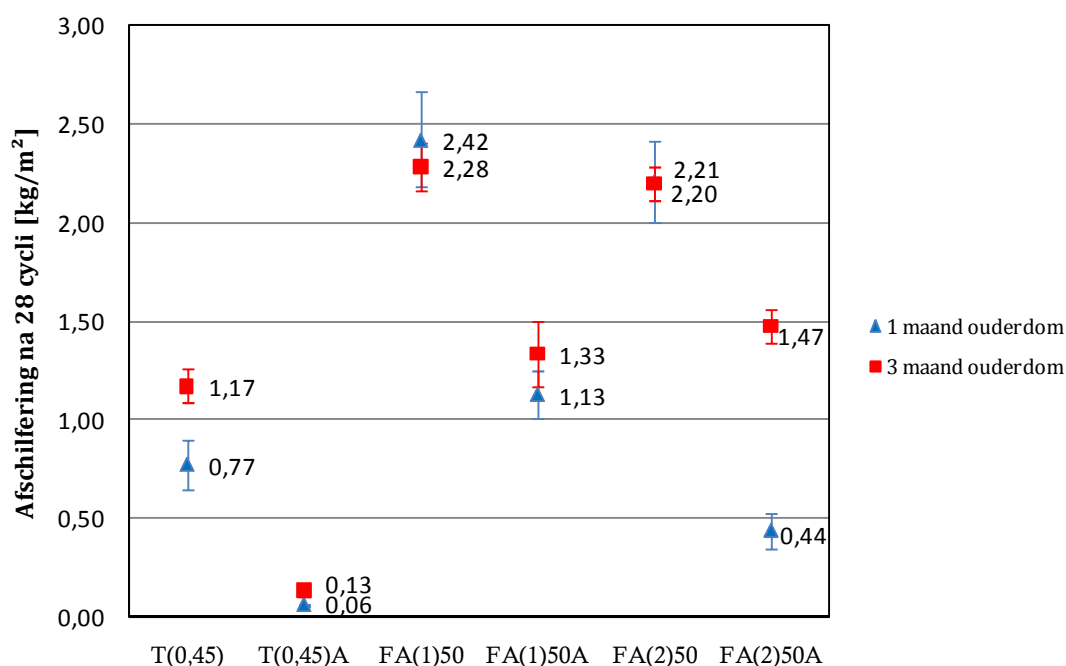
In de resultaten voor de vorst-dooibestandheid met dooizouten is gebleken dat vliegasbeton veel minder goed presteert dan cementbeton. Een oorzaak hiervoor werd echter nog niet gevonden maar een mogelijke reden zou zijn dat vliegasbeton een veel zwakker bekistingsvlak vertoont dan cementbeton. Dit werd eerder al door Cox (2007) gevonden. Waarom die oppervlaktelaag zwakker is, is nog niet precies duidelijk.

Onderzoek op de slijpplaatjes leverde geen merkbaar verschil op tussen de bekistings- en niet-bekistingsvlakken qua luchtgehalte. Om te onderzoeken of 'bleeding' de oorzaak zou kunnen zijn van de zwakkere oppervlaktelaag werd nagegaan of er een verschil was tussen 1 en 3 maanden op het vlak van samenstelling van het beton: er wordt nagegaan of er meer of minder cement/zand/vliegas/granulaten aanwezig is aan het bekistingsvlak t.o.v. het niet-bekistingsvlak. Deze visuele analyse leverde echter niets op. Er wordt dan ook aangeraden om verder onderzoek te doen op de oppervlaktelagen van vliegasmengelingen om de oorzaak van de zwakkere bekistingslaag te ontdekken.

### **6.6.2 Verantwoording verwerpen resultaat van FA(2)50A op 3 maand ouderdom**

In de resultaten voor de vorst-dooibestandheid van beton in paragraaf 5.8.3 werd 1 merkwaardige, geheel onverwachte waarde teruggevonden voor de afschilfering van de FA(2)50A-mengeling op 3 maand ouderdom. De getalwaarde die werd teruggevonden was veel hoger dan de verwachte waarde voor deze betonmengeling op 3 maand ouderdom. (zie Figuur 53). Er wordt gepoogd een verklaring te vinden voor deze waarde aan de hand van andere resultaten, onder meer uit de airvoid-analyse.





Figuur 53: Afschilfering na 28 cycli

#### *Invloed van ouderdom*

Vaak is het zo dat beton op het gebied van een bepaalde eigenschap beter of slechter presteert wanneer die eigenschap vergeleken wordt tussen 1 maand en 3 maand ouderdom van het beton. Dit is vooral het geval bij vliegasbetonmengsels door de trage puzzolane hydratatiereacties. Echter, wanneer de verschillende andere vliegasbetonmengsels vergeleken worden tussen 1 en 3 maand ouderdom, werd geen significant verschil vastgesteld. Ouderdom heeft weinig tot geen invloed op de afschilfering van de proefstukken. Verwacht is dan ook dat dit niet het geval zou zijn voor FA(2)50A.

#### *Luchtgehalte*

De inbreng van luchtbelvormer zou zorgen voor een groot luchtgehalte in het beton, en een betere vorstbestandheid van het beton. Een grootse daling in luchtgehalte tussen het FA(2)50A-beton tussen 1 en 3 maand ouderdom zou grotere afschilfering kunnen verklaren. Wanneer echter naar de luchtgehalte-resultaten uit de airvoid-analyse wordt gekeken, kan besloten worden dat het luchtgehalte niet de oorzaak kan zijn van de grotere afschilfering, daar deze niet wijzigt tussen 1 en 3 maand ouderdom. Ook uit de visuele analyse bleek er geen verschil vast te stellen tussen het ingebrachte luchtgehalte op 1 en 3 maand ouderdom.

### *Spacing factor*

De vorstbestandheid van beton neemt toe wanneer een uniform systeem van geïsoleerde luchtbellen wordt ingevoegd. Daarbij ‘werkt’ dat systeem beter wanneer de spacing factor beperkt wordt tot 200µm. De grotere afschilfering zou dus ook verklaard kunnen worden indien het beton op 3 maand ouderdom een veel grotere spacing factor bezit dan het beton op 1 maand. De spacing factor bleek echter niet significant verschillend te zijn tussen 1 en 3 maand ouderdom, dit kan dus ook niet voor een mogelijke verklaring zorgen.

Uit al deze beschouwingen kan afgeleid worden dat verwacht werd dat FA(2)50A op 3 maand ouderdom op dezelfde manier zou presteren tegen vorst-dooicycli met dooizouten dan FA(2)50A op 1 maand ouderdom. Het geheel onverwachte proefresultaat zou, voor een betere bespreking van de resultaten, beter worden verworpen. Er wordt aangeraden deze proef opnieuw uit te voeren voor de vernoemde mengeling.

# Hoofdstuk 7

## Conclusies

### 7.1 Algemene besluitvorming

In het kader van dit eindwerk werd onderzoek verricht naar het effect van luchtbelvormers op de duurzaamheid van beton met vliegas. Daartoe werden enkele duurzaamheidsparameters van naderbij bestudeerd, voor 6 verschillende betonmengelingen: een referentiemengeling met en zonder luchtbelvormer, een eerste vliegasbeton met een vliegas type I (FA1) dat 50% van het cement verving, met en zonder luchtbelvormer en een tweede vliegasbeton met een vliegas type II (FA2) dat 50% van het cement verving. Het voornaamste verschil tussen de 2 vliegassen was dat FA1 een kleinere 45µm-fijnheid bezat dan het FA2 en zodoende dus een fijner vliegas was. De water/cement-factor van de referentiemengeling bedroeg 0,50 en de water/bindmiddel-factor van de HVFA-mengelingen 0,35. Alle proeven werden uitgevoerd zowel op een ouderdom van 1 maand als 3 maand.

Gezien de titel van dit afstudeerwerk, was het de bedoeling enkel het effect van de luchtbelvormer te bestuderen op de duurzaamheid van beton, en dan voornamelijk op vliegasbeton. In deze masterproef werden echter per duurzaamheidsparameter ook nog andere vergelijkingen gemaakt (tussen verschillende leeftijden, en tussen referentiebeton en vliegasbeton). Per duurzaamheidsparameter werden dan ook de belangrijkste besluiten omtrent alle vergelijkingen vermeld in een aparte paragraaf. Ook werden tussen de verschillende duurzaamheidsparameters enkele verbanden gezocht. In deze paragraaf worden de meest relevante besluiten in overeenstemming met de titel van dit afstudeerwerk nogmaals geformuleerd: specifiek omtrent de rol van de additie van een luchtbelvormer in de duurzaamheid van vliegasbeton.

Het eerste wat onderzocht werd was de **druksterkte** van de betonmengelingen. Er werd gevonden dat voor elke mengeling met LBV, de druksterkte significant lager was dan voor de overeenkomstige mengeling zonder LBV, met het grootste verschil tussen de referentiemengelingen. De luchtbelvormer induceert luchtholtes in het beton, die het beton

poreuzer en dus minder sterk maken. Het effect van de LBV heeft in mindere mate een effect op het vliegasbeton.

Verder werd ook de **capillaire wateropslorping** onderzocht. Blijkbaar zorgt de additie van LBV niet voor een noemenswaardige verandering van de opslorplingscoëfficiënten en de totale opslorping na 336h. Misschien zijn de ingebrachte luchtholtes van een te grote aard zodat ze bijna geen bijkomende capillaire zuiging opwekken.

Ook werd onderzoek verricht naar de **gasdoorlatendheid** van de betonsamenstellingen. Uit het oogpunt van gaspermeabiliteit lijkt het meest duurzame beton het beton dat de minste gasdoorlatendheid vertoont. Een mogelijk transportmechanisme voor schadelijke gassen is namelijk de doorlatendheid t.g.v. een drukgradiënt. Aangezien carbonatatiegeïnitieerde corrosie het gevolg is van het binnendringen van  $\text{CO}_2$ - en  $\text{O}_2$ -moleculen in het beton, kan de gasdoorlatendheid een eerste indicatie geven van de weerstand van het beton tegen corrosie. Additie van een luchtbelvormer in beton zorgt voor een stijging van de gaspermeabiliteit, zowel bij traditioneel beton als vliegasbeton. De luchtbelvormer brengt dus waarschijnlijk niet alleen een systeem van geïsoleerde luchtbellens in het beton, maar zorgt er waarschijnlijk ook voor dat de poriën met elkaar in verbinding staan.

Voorts werden ook de open **capillaire, totale en gelporositeiten** bepaald. Daarmee kan een idee worden verkregen van de mate waarin het beton van aan de buitenzijde toegankelijk is voor schadelijke agentia. Zo kunnen uitspraken gedaan worden over het duurzaamheidsgedrag: zo zal een poreuzer beton bijvoorbeeld gevoeliger zijn voor wapeningscorrosie, door de indringing van  $\text{O}_2$  in het beton. Het toevoegen van luchtbelvormer zorgde zowel bij de referentiemengeling als bij de FA2-mengeling voor een significante toename van de capillaire en totale porositeit. De gemiddelde waarden voor de porositeiten van de FA1-mengeling leken ook toe te nemen maar na een statistische analyse kon besloten worden dat dit verschil niet significant was. Daarom werd het idee geopperd dat de fijnere vliegas de luchtbelvormer meer zal adsorberen en daardoor dus minder luchtbellens zullen ingebracht worden, waardoor zijn effect minder waarneembaar wordt. Additie van luchtbelvormer lijkt dus de porositeit te vergroten, dus zorgt waarschijnlijk voor de inbreng van poriën die toch geconnecteerd zijn, aangezien de open porositeit net gebaseerd is op poriën die met elkaar verbonden zijn.

Ook werd een **airvoid-analyse** uitgevoerd. Wanneer spacing-factor, luchtgehalte en koordelengtedistributie samen geanalyseerd werden, bleek dat toevoeging van een LBV bij HVFA-mengelingen niet zorgde voor een extra gehalte aan lucht, maar eerder een groter percentage aan fijnere poriën en zo een kleinere afstandsfactor, waardoor de vorstbestandheid verbeterd zou moeten worden. In traditioneel beton werd door toevoeging van LBV het luchtgehalte sterk vergroot, en dit door het inbrengen van grote luchtholten eerder dan fijnere poriën. Algemeen verbeterde de inbreng van LBV de parameters in die mate, dat alle mengelingen waaraan LBV is toegevoegd, bestand zouden moeten zijn tegen vorstdooicycli.

**Microscopische analyse op slijpplaatjes** is ook gebeurd voor het onderzoek van deze masterproef. Daarbij werd zowel een kwalitatieve als een kwantitatieve analyse gedaan. Er kon worden besloten dat er telkens een verschil was tussen de mengelingen met en zonder LBV, maar dat dat verschil het minst uitgesproken was bij de FA1-mengelingen. LBV zorgt voor de inbreng van een uniform verdeeld luchtbellensysteem in alle 3 de mengelingen. Het verschil tussen de 3 mengelingen met LBV zat vooral in de poriëngrootte. De poriën die ingebracht werden bij de vliegasmengelingen zijn fijner (20 à 350  $\mu\text{m}$ ) dan degene ingebracht in het traditionele beton (50 à 600  $\mu\text{m}$ ). De totale hoeveelheid ingebrachte lucht in het traditionele beton en het FA2-beton lijken gelijk, terwijl er duidelijk minder lucht werd ingebracht in het FA1-beton volgens de visuele analyse. Dit is slechts een kwalitatieve analyse. Kwantitatief konden hierover geen uitspraken gedaan worden en moest vergeleken worden met de resultaten uit de airvoid-analyse. De combinatie van LBV en toevoeging van vliegass zorgde volgens deze resultaten voor een afname van de gemiddelde poriëndiameter.

Wanneer tot slot **vorst-dooiproeven met dooizouten** werden uitgevoerd werd gevonden dat de additie van luchtbelvormers bij elke mengeling zorgde voor een verbetering van de vorstbestandheid door een vermindering van de afschilfering. De luchtbelvormer doet dus hetgeen waarvoor hij bedoeld is: het inbrengen van expansieruimtes voor bevriezend water in het beton om zo de vorstbestandheid te vergroten. FA1 lijkt de LBV meer te adsorberen aangezien de vermindering van de afschilfering, met dank aan de toevoeging van de LBV, tussen FA(1)50 en FA(1)50A maar met een factor 2 vermindert terwijl de afschilfering tussen FA(2)50 en FA(2)50A met een factor 5 vermindert. Alle mengelingen waaraan LBV

is toegevoegd halen ook de norm waarbij de maximale afschilfering op 1 kg/m<sup>2</sup> werd gesteld.

Algemeen gesteld zorgt de additie van luchtbelvormer dus voor hetzelfde effect op traditioneel beton als op vliegasbeton: een nefast effect op de open porositeit en de gasdoorlatendheid, geen effect op de capillaire wateropsorping en een positief effect op de vorst-dooibestandheid in combinatie met dooizouten. Deze effecten zijn des te opvallender naarmate gebruik gemaakt wordt van een grover bindmiddel, dat de luchtbelvormer niet adsorbeert.

## **7.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek**

Een aantal belangrijke elementen voor verder onderzoek hebben zich in de loop van deze masterproef aangediend. Bijvoorbeeld bij de vorst-dooibestandheid op 3 maand ouderdom werd bij de mengeling FA(2)50A een geheel onverwacht meetresultaat teruggevonden. Er wordt aanbevolen deze meting opnieuw uit te voeren, om een logischer resultaat te bekomen en zo de eerder getrokken conclusies te kunnen bevestigen. Indien zich opnieuw een onverwachte waarde aandient, dienen misschien andere verklaringen voor dit fenomeen gevonden te worden.

In de literatuurstudie werd al aangegeven dat verschillende soorten vliegas vrij uiteenlopende chemische karakteristieken en samenstellingen kunnen hebben (gloeiverlies, fijnheid, glasgehalte). In dit thesisonderzoek werden vliegassen gebruikt die vooral qua fijnheid heel verschillend waren. Dit gaf een duidelijke weerslag in de microstructuur van het beton, de duurzaamheidseigenschappen, en de interactie met de LBV. Interessant zou zijn om na te gaan of ook een verschillend gloeiverlies en glasgehalte verschillende duurzaamheidseigenschappen in positieve of negatieve zin beïnvloeden. Ook de mate waarin de verschillende vliegassen zullen hydrateren, is een belangrijk te onderzoeken punt.

Bij de vorst-dooibestandheid werd teruggevonden dat HVFA-beton doorgaans minder goed presteert dan traditioneel cementbeton. Hiervoor werd echter nog geen verklaring gevonden, maar er werd wel een idee geopperd: misschien komt het grote verschil in de vorst-dooibestandheid tot stand omwille van het feit dat de oppervlaktelaag van vliegasbeton andere karakteristieken heeft, en veel minder sterkte vertoont dan het beton in de massa genomen. Er wordt aangeraden onderzoek te verrichten specifiek op het verschil tussen de

eigenschappen van die oppervlaktelaag ten opzichte van het beton in de massa, voor vliegasbeton, om op die manier misschien een verklaring te kunnen vinden voor de grotere afschilfering.

## **Bijlage A**

### **Productfiche luchtbelvormer Micro-Air 103**

**con.4%**



## **Bijlage B**

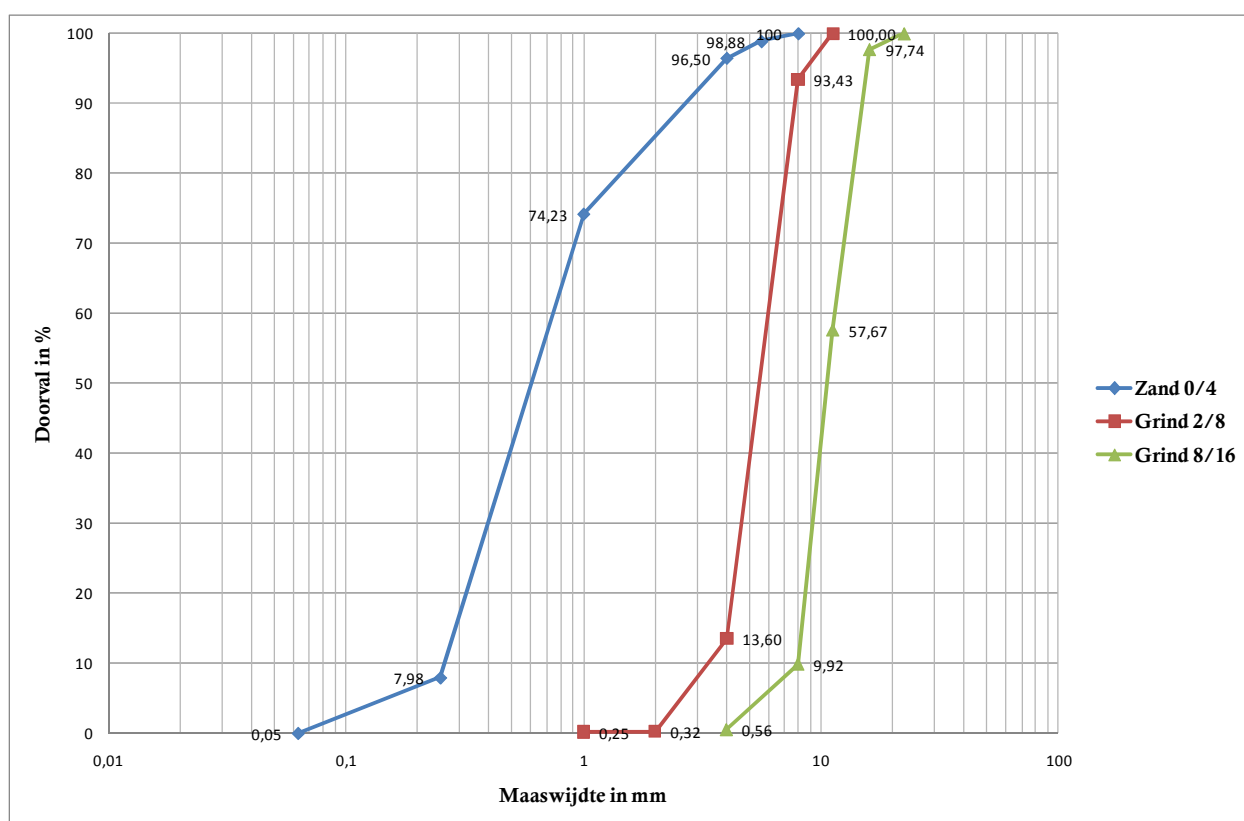
### **Productfiche superplastificeerder Glenium**

**51 con.35%**

## Bijlage C

# Korrelverdelingsdiagramma's van het gebruikte zand en de gebruikte granulaten

- Zand 0/4
- Rolgrind 2/8
- Rolgrind 8/16



## Bijlage D

### Resultaten proeven op vers beton

|                 | [ ]               | T(0,45) | T(0,45)A | FA(1)50 | FA(1)50A | FA(2)50 | FA(2)50A |
|-----------------|-------------------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| Slumpflow       | mm                | 60      | 130      | 475     | 640      | 591     | 311,5    |
| Schoktafel      | mm                | 495     | 552,5    | -       | -        | -       | 551,5    |
| Volume lucht    | %                 | 2,8     | 6,6      | 2,6     | 5,2      | 2,8     | 4,9      |
| Volumegewicht   | kg/m <sup>3</sup> | 2400    | 2256     | 2319    | 2244     | 2394    | 2281     |
| Totale meentijd | min.              | 7       | 7,5      | 7       | 8        | 5       | 7        |

# Bijlage E

## Resultaten uit de capillaire wateropsorping

Tabel 10: Getalwaardes capillaire wateropsorping op 1 maand ouderdom

| 1 maand ouderdom |                                       |                                       |                                     |                                       |                                       |                                     |
|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
|                  | 40° droging                           |                                       |                                     | 105° droging                          |                                       |                                     |
|                  | S <sub>1</sub> [kg/m <sup>2</sup> √h] | S <sub>2</sub> [kg/m <sup>2</sup> √h] | Q <sub>c</sub> [kg/m <sup>2</sup> ] | S <sub>1</sub> [kg/m <sup>2</sup> √h] | S <sub>2</sub> [kg/m <sup>2</sup> √h] | Q <sub>c</sub> [kg/m <sup>2</sup> ] |
| T(0,45)          | 0,311 ± 0,012                         | 0,119 ± 0,006                         | 3,189 ± 0,078                       | 0,477 ± 0,066                         | 0,335 ± 0,029                         | 7,641 ± 0,655                       |
| T(0,45)A         | 0,326 ± 0,000                         | 0,127 ± 0,001                         | 3,208 ± 0,086                       | 0,557 ± 0,033                         | 0,317 ± 0,017                         | 7,139 ± 0,161                       |
| FA(1)50          | 0,468 ± 0,023                         | 0,152 ± 0,008                         | 4,278 ± 0,164                       | 0,425 ± 0,003                         | 0,199 ± 0,012                         | 5,275 ± 0,261                       |
| FA(1)50A         | 0,425 ± 0,023                         | 0,163 ± 0,003                         | 4,095 ± 0,081                       | 0,437 ± 0,018                         | 0,258 ± 0,006                         | 5,996 ± 0,078                       |
| FA(2)50          | 0,487 ± 0,012                         | 0,160 ± 0,004                         | 4,496 ± 0,046                       | 0,771 ± 0,067                         | 0,383 ± 0,036                         | 9,292 ± 0,804                       |
| FA(2)50A         | 0,720 ± 0,010                         | 0,174 ± 0,006                         | 4,798 ± 0,157                       | 0,734 ± 0,028                         | 0,351 ± 0,008                         | 8,498 ± 0,177                       |

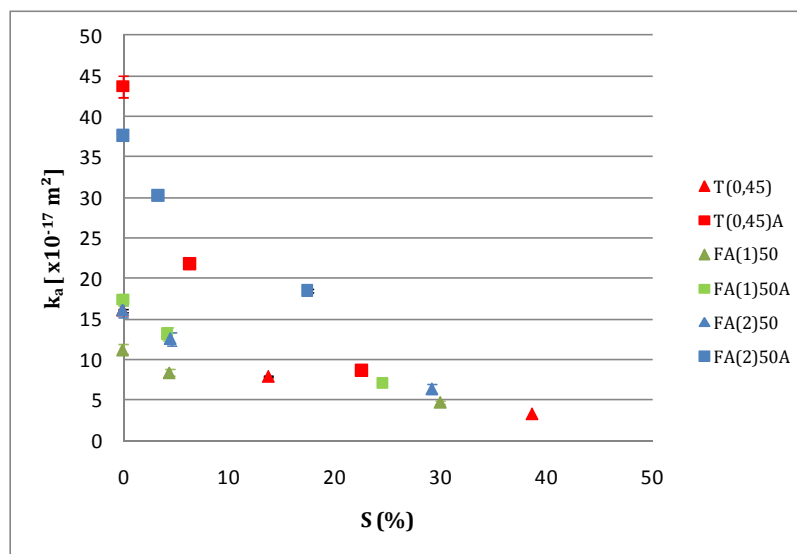
Tabel 11: Getalwaardes capillaire wateropsorping op 3 maand ouderdom

| 3 maand ouderdom |                                       |                                       |                                     |
|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
|                  | 40° droging                           |                                       |                                     |
|                  | S <sub>1</sub> [kg/m <sup>2</sup> √h] | S <sub>2</sub> [kg/m <sup>2</sup> √h] | Q <sub>c</sub> [kg/m <sup>2</sup> ] |
| T(0,45)          | 0,205 ± 0,024                         | 0,116 ± 0,004                         | 2,914 ± 0,118                       |
| T(0,45)A         | 0,345 ± 0,026                         | 0,144 ± 0,008                         | 3,695 ± 0,083                       |
| FA(1)50          | 0,539 ± 0,039                         | 0,129 ± 0,001                         | 4,129 ± 0,064                       |
| FA(1)50A         | 0,472 ± 0,026                         | 0,147 ± 0,005                         | 4,039 ± 0,231                       |
| FA(2)50          | 0,569 ± 0,060                         | 0,110 ± 0,001                         | 3,810 ± 0,164                       |
| FA(2)50A         | 0,439 ± 0,060                         | 0,125 ± 0,006                         | 3,817 ± 0,216                       |

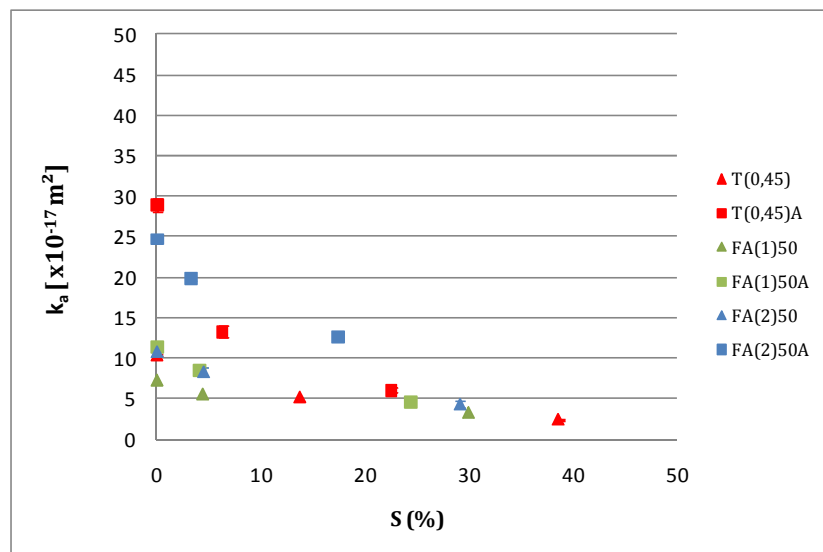
# Bijlage F

## Resultaten uit de gaspermeabiliteitsproef

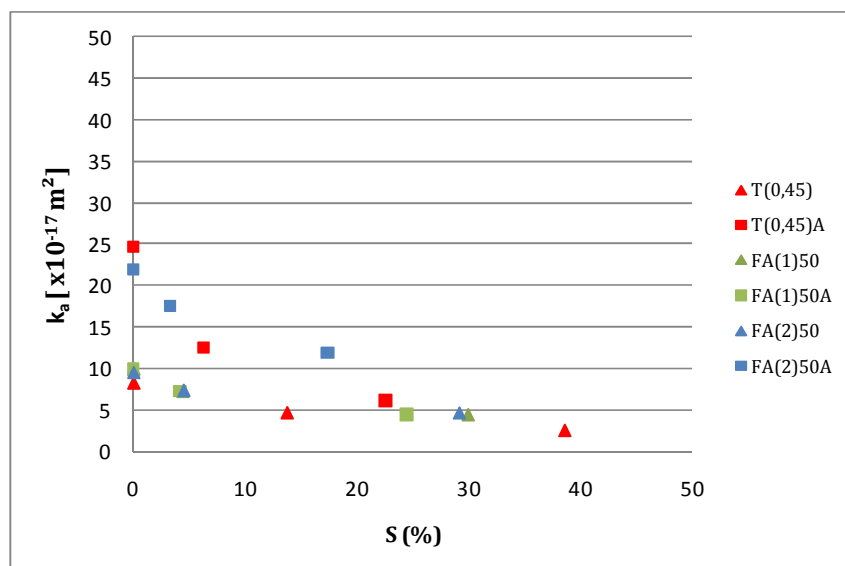
### F.1 Grafische voorstelling schijnbare permeabiliteitscoëfficiënt



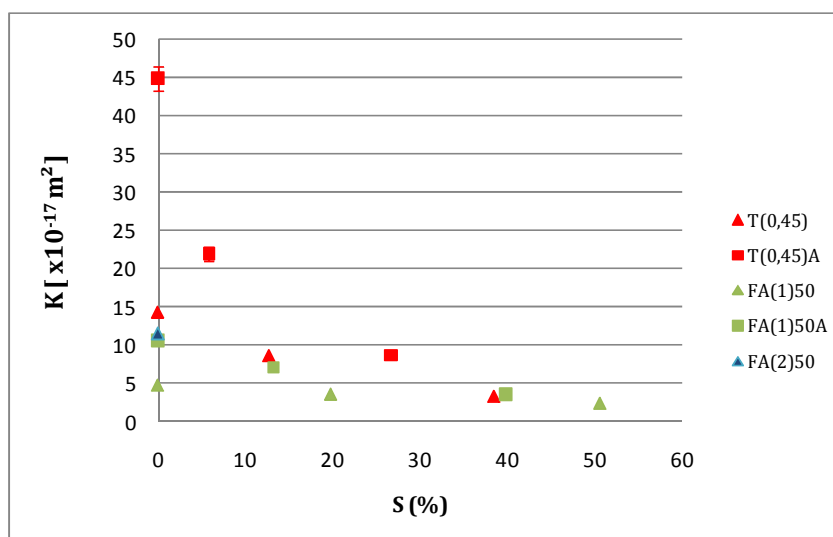
Figuur 54: Schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt op 1 maand ouderdom bij  $P_1 = 2$  bar



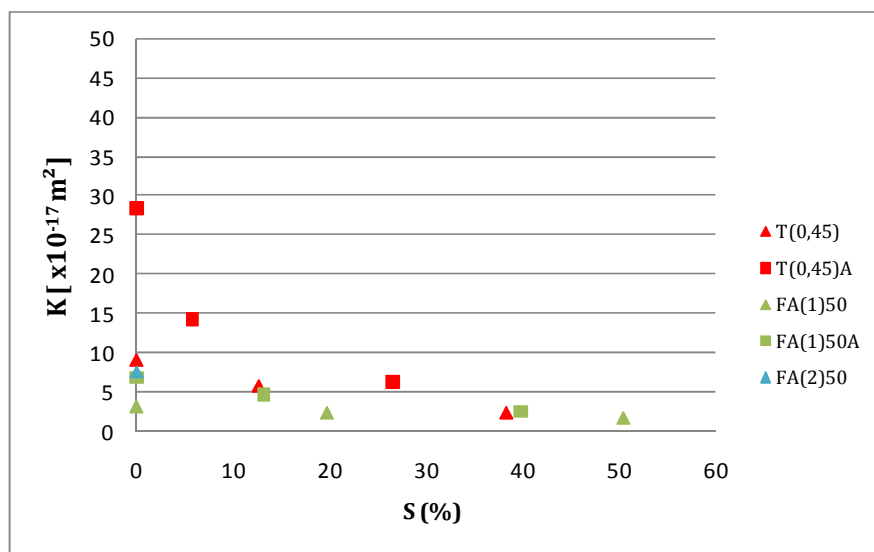
Figuur 55: Schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt op 1 maand ouderdom bij  $P_1 = 3$  bar



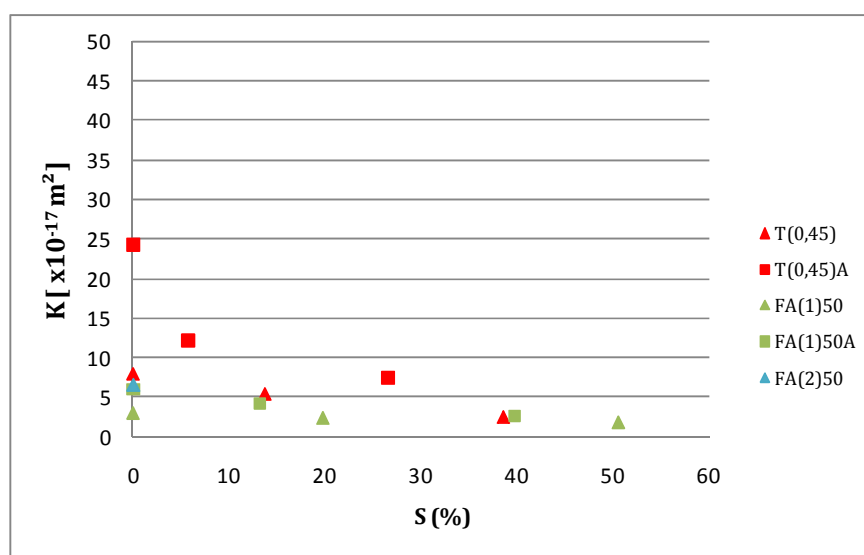
Figuur 56: Schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt op 1 maand ouderdom bij  $P_1 = 4$  bar



Figuur 57: Schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt op 3 maand ouderdom bij  $P_1 = 2$  bar



Figuur 58: Schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt op 3 maand ouderdom bij  $P_1 = 3$  bar



Figuur 59: Schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt op 3 maand ouderdom bij  $P_1 = 4$  bar

## F.2 Intrinsieke gaspermeabiliteitscoëfficiënt volgens Klinkenberg

Tabel 12: Getalwaardes intrinsieke gaspermeabiliteitscoëfficiënt berekend met  $P_M$

|          | 1 maand ouderdom |                                     | 3 maand ouderdom |                                     |
|----------|------------------|-------------------------------------|------------------|-------------------------------------|
|          | S (%)            | $k_i [\times 10^{-17} \text{ m}^2]$ | S (%)            | $k_i [\times 10^{-17} \text{ m}^2]$ |
| T(0,45)  | 39               | 1,14                                | 38               | 1,08                                |
|          | 14               | -0,69                               | 13               | 0,02                                |
|          | 0                | -4,09                               | 0                | -2,54                               |
| T(0,45)A | 23               | 1,67                                | 27               | 4,64                                |
|          | 6                | -3,18                               | 6                | -3,48                               |
|          | 0                | -5,82                               | 0                | -8,88                               |
| FA(1)50  | 30               | 0,54                                | 51               | 0,82                                |
|          | 4                | -0,01                               | 20               | 0,33                                |
|          | 0                | -1,75                               | 0                | 0,06                                |
| FA(1)50A | 24               | 0,12                                | 40               | 0,79                                |
|          | 4                | -2,31                               | 13               | 0,53                                |
|          | 0                | -2,36                               | 0                | -1,49                               |
| FA(2)50  | 29               | 1,33                                | -                | -                                   |
|          | 4                | -1,07                               | -                | -                                   |
|          | 0                | -1,02                               | -                | -                                   |
| FA(2)50A | 17               | 0,88                                | -                | -                                   |
|          | 3                | -3,11                               | -                | -                                   |
|          | 0                | -3,66                               | -                | -                                   |

# Bijlage G

## Resultaten m.b.t. de porositeit

Tabel 13: Getalwaarden voor de verschillende porositeiten

|          | 1 maand ouderdom    |                |                     |                |               |                | 3 maand ouderdom    |                |                     |                |               |                |
|----------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------|----------------|
|          | cap. por. bij 40° C |                | tot. por. bij 105°C |                | gelporositeit |                | cap. por. bij 40° C |                | tot. por. bij 105°C |                | gelporositeit |                |
|          | $\bar{X}$ [%]       | $\sigma_f$ [%] | $\bar{X}$ [%]       | $\sigma_f$ [%] | $\bar{X}$ [%] | $\sigma_f$ [%] | $\bar{X}$ [%]       | $\sigma_f$ [%] | $\bar{X}$ [%]       | $\sigma_f$ [%] | $\bar{X}$ [%] | $\sigma_f$ [%] |
| T(0,45)  | 7,77                | 0,17           | 12,81               | 0,13           | 5,03          | 0,19           | 7,70                | 0,20           | 13,02               | 0,22           | 5,32          | 0,13           |
| T(0,45)A | 11,09               | 0,19           | 16,85               | 0,17           | 5,76          | 0,22           | 9,50                | 0,34           | 15,95               | 0,14           | 6,45          | 0,40           |
| FA(1)50  | 10,54               | 0,31           | 14,05               | 0,21           | 3,51          | 0,16           | 8,95                | 0,32           | 14,86               | 0,21           | 5,92          | 0,23           |
| FA(1)50A | 11,04               | 0,31           | 14,55               | 0,24           | 3,51          | 0,13           | 9,53                | 0,46           | 15,44               | 0,57           | 5,90          | 0,38           |
| FA(2)50  | 9,98                | 0,13           | 14,10               | 0,11           | 4,12          | 0,11           | 8,17                | 0,20           | 14,53               | 0,08           | 6,36          | 0,25           |
| FA(2)50A | 11,73               | 0,21           | 17,26               | 0,13           | 5,52          | 0,34           | 11,64               | 0,39           | 17,37               | 0,17           | 5,73          | 0,53           |



# Bijlage H

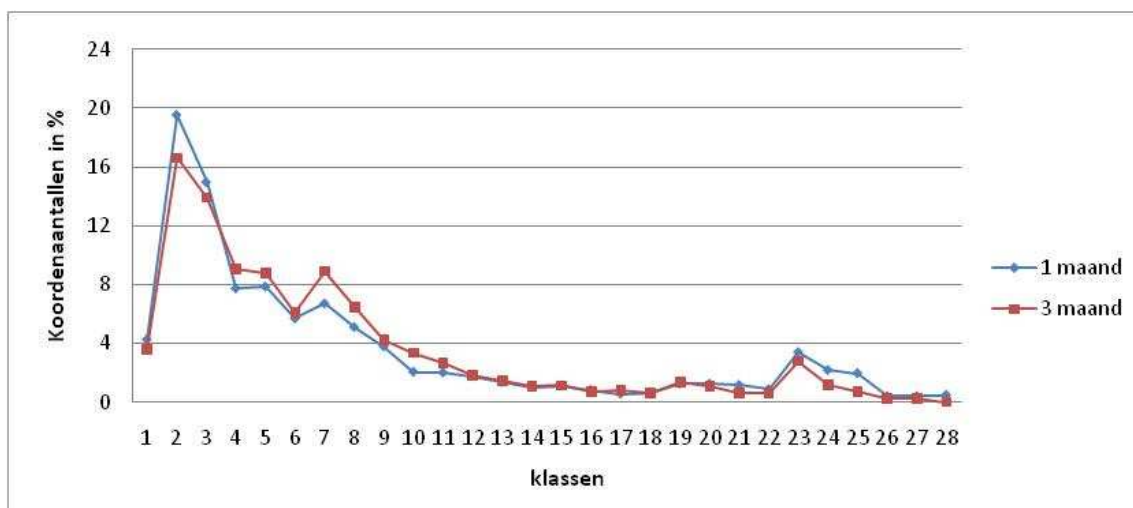
## Resultaten uit de airvoid-analyse

Tabel 14: Getalwaarden van de resultaten op 1 maand ouderdom

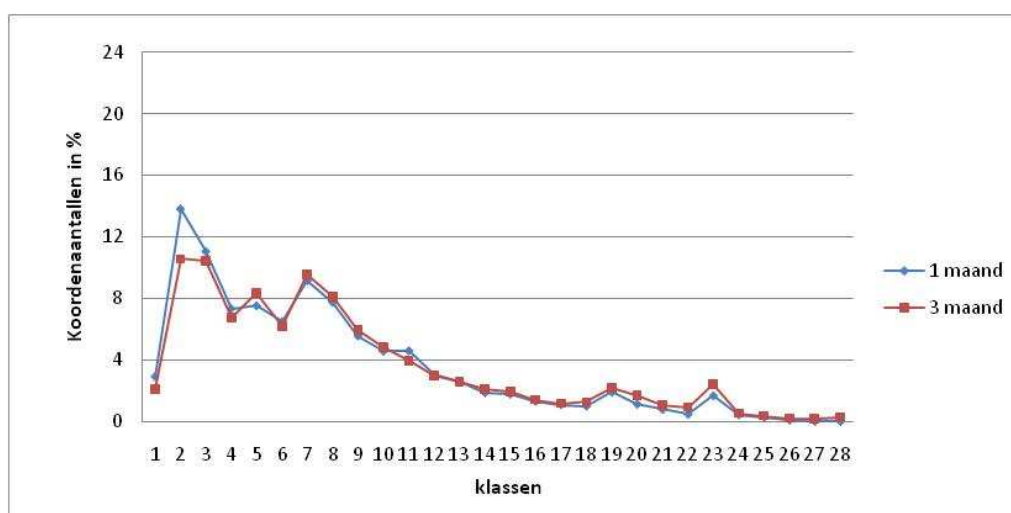
|          | <b>A<sub>a</sub> (%)</b> |                | <b>L<sub>S</sub> (mm)</b> |                | <b>α<sub>a</sub> (mm<sup>-1</sup>)</b> |                | <b>l<sub>mean</sub> (mm)</b> |                |
|----------|--------------------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|
|          | $\bar{x}$                | S <sub>f</sub> | $\bar{x}$                 | S <sub>f</sub> | $\bar{x}$                              | S <sub>f</sub> | $\bar{x}$                    | S <sub>f</sub> |
| T(0,45)  | 2,65                     | 0,21           | 0,291                     | 0,013          | 22,4                                   | 1,3            | 0,183                        | 0,011          |
| T(0,45)A | 9,02                     | 0,23           | 0,087                     | 0,005          | 34,4                                   | 1,3            | 0,118                        | 0,005          |
| FA(1)50  | 3,51                     | 0,23           | 0,282                     | 0,025          | 23,3                                   | 1,9            | 0,180                        | 0,014          |
| FA(1)50A | 4,75                     | 0,39           | 0,116                     | 0,004          | 48,1                                   | 2,9            | 0,085                        | 0,005          |
| FA(2)50  | 2,96                     | 0,26           | 0,252                     | 0,014          | 28,2                                   | 1,8            | 0,146                        | 0,010          |
| FA(2)50A | 5,53                     | 0,50           | 0,104                     | 0,010          | 51,6                                   | 2,9            | 0,078                        | 0,005          |

Tabel 15: Getalwaarden van de resultaten op 3 maand ouderdom

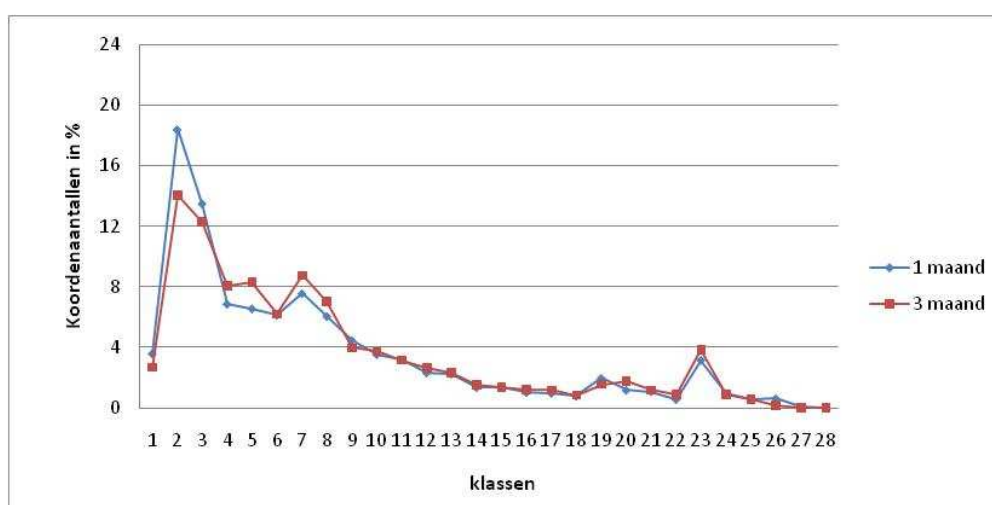
|          | <b>A<sub>a</sub> (%)</b> |                | <b>L<sub>S</sub> (mm)</b> |                | <b>α<sub>a</sub> (mm<sup>-1</sup>)</b> |                | <b>l<sub>mean</sub> (mm)</b> |                |
|----------|--------------------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|
|          | $\bar{x}$                | S <sub>f</sub> | $\bar{x}$                 | S <sub>f</sub> | $\bar{x}$                              | S <sub>f</sub> | $\bar{x}$                    | S <sub>f</sub> |
| T(0,45)  | 4,54                     | 0,38           | 0,163                     | 0,014          | 32,1                                   | 2,1            | 0,128                        | 0,007          |
| T(0,45)A | 11,27                    | 0,38           | 0,076                     | 0,005          | 31,0                                   | 1,1            | 0,130                        | 0,005          |
| FA(1)50  | 2,60                     | 0,24           | 0,344                     | 0,024          | 21,9                                   | 2,0            | 0,194                        | 0,017          |
| FA(1)50A | 3,89                     | 0,44           | 0,178                     | 0,011          | 34,8                                   | 2,0            | 0,117                        | 0,006          |
| FA(2)50  | 3,13                     | 0,33           | 0,305                     | 0,036          | 25,3                                   | 3,7            | 0,186                        | 0,027          |
| FA(2)50A | 5,65                     | 0,65           | 0,131                     | 0,017          | 43,7                                   | 4,9            | 0,099                        | 0,010          |



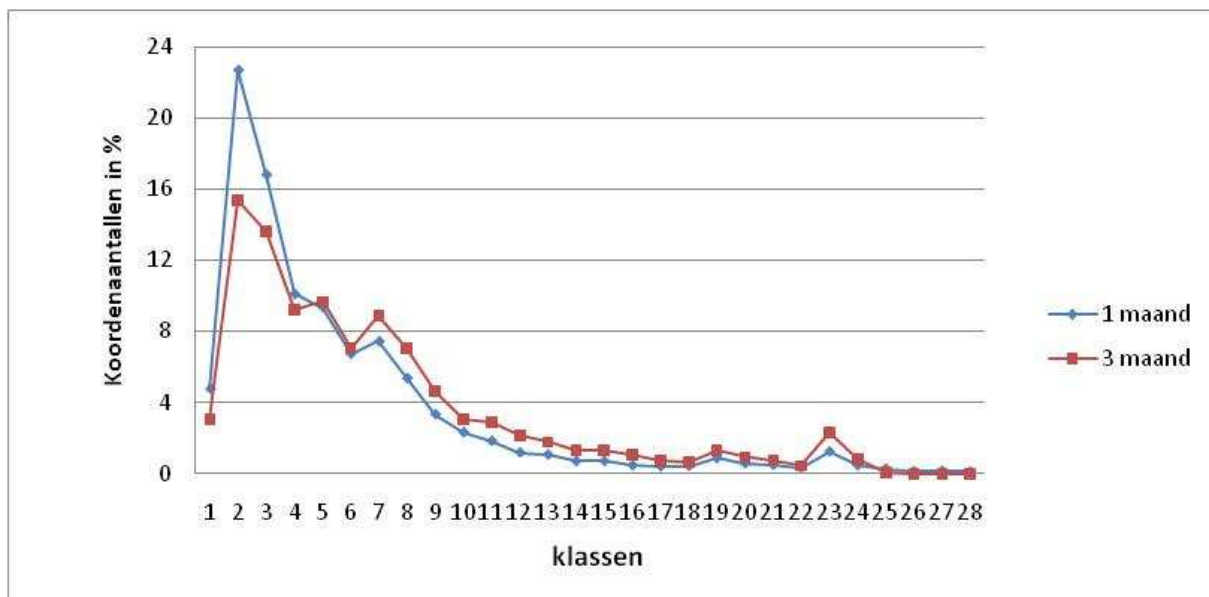
Figuur 60: Koordlengtedistributie T(0,45)



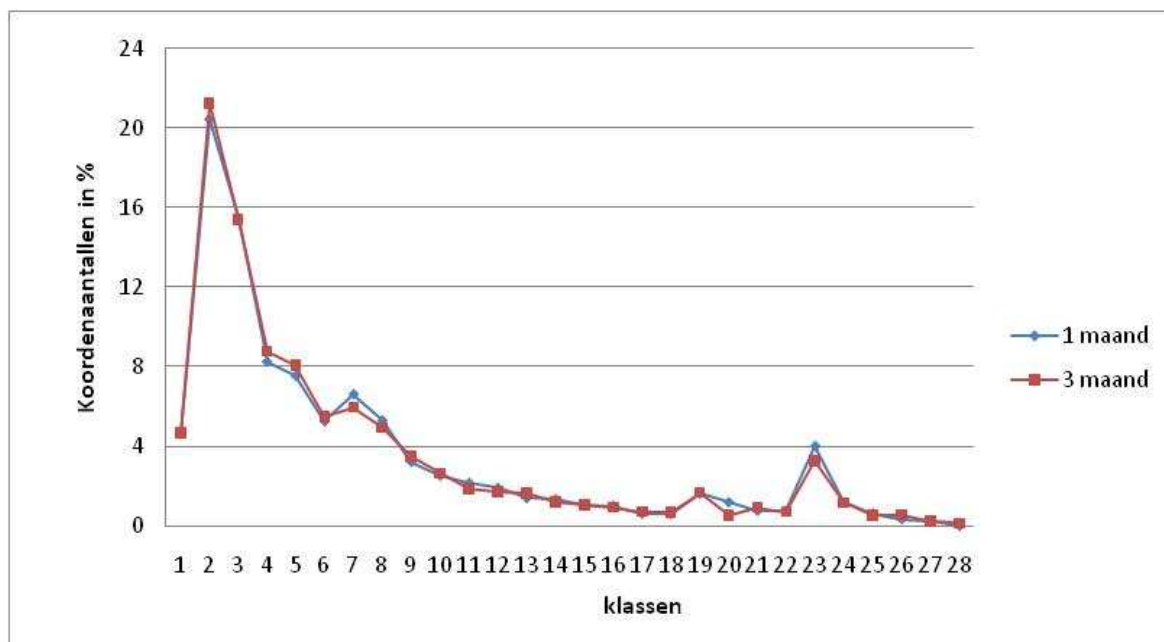
Figuur 61: : Koordlengtedistributie T(0,45)A



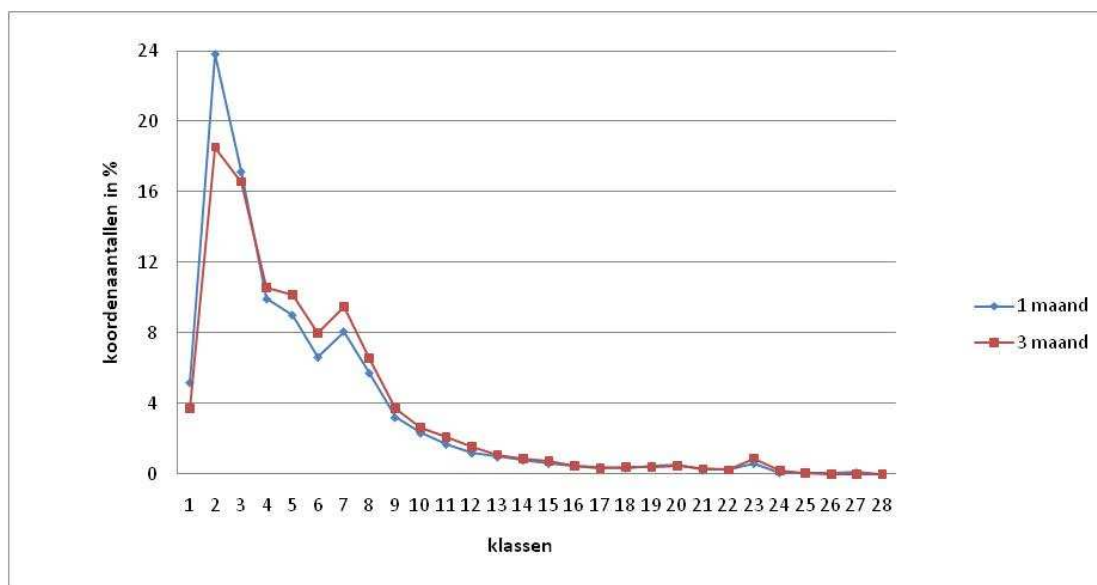
Figuur 62: Koordlengtedistributie FA(1)50



Figuur 63: Koordlengtedistributie FA(1)50A



Figuur 64: Koordlengtedistributie FA(2)50



Figuur 65: Koordlengtedistributie FA(2)50A

Tabel 16: Verdeling in klassen naargelang de koordelengte volgens RapidAir 457

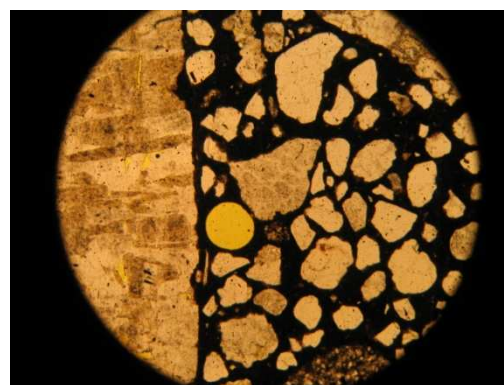
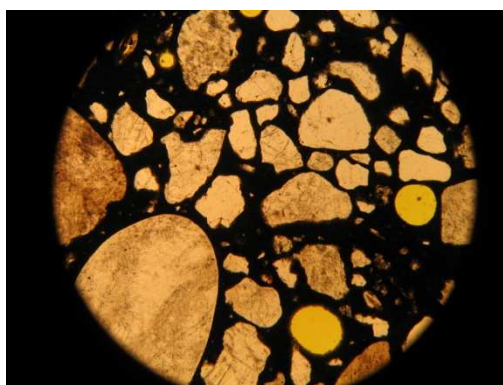
| Klasse | Koordlengtes (µm) |
|--------|-------------------|
| 1      | 0-10              |
| 2      | 10-20             |
| 3      | 20-30             |
| 4      | 30-40             |
| 5      | 40-50             |
| 6      | 50-60             |
| 7      | 60-80             |
| 8      | 80-100            |
| 9      | 100-120           |
| 10     | 120-140           |
| 11     | 140-160           |
| 12     | 160-180           |
| 13     | 180-200           |
| 14     | 200-220           |
| 15     | 220-240           |
| 16     | 240-260           |
| 17     | 260-280           |
| 18     | 280-300           |
| 19     | 300-350           |
| 20     | 350-400           |
| 21     | 400-450           |
| 22     | 450-500           |
| 23     | 500-1000          |
| 24     | 1000-1500         |
| 25     | 1500-2000         |
| 26     | 2000-2500         |
| 27     | 2500-3000         |
| 28     | 3000-4000         |

# Bijlage I

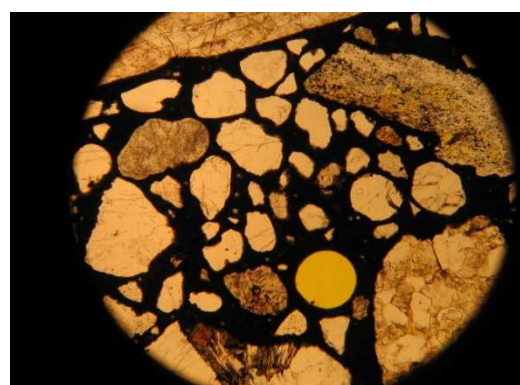
## Resultaten uit de fluorescentiemicroscopie

### I.1 Vergelijk tussen bekistingsvlak – niet-bekistingsvlak

De foto met het bekistingsvlak staat telkens links, de foto met het niet-bekistingsvlak staat telkens rechts.

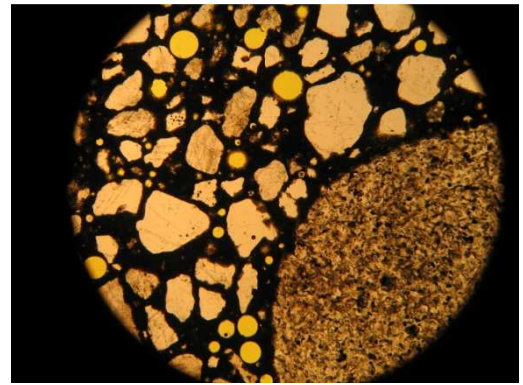
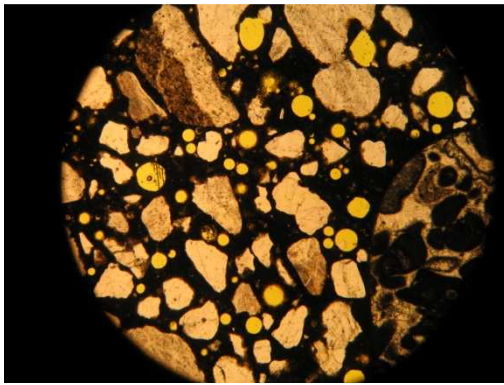


Figuur 66: T(0,45) 1 maand ouderdom

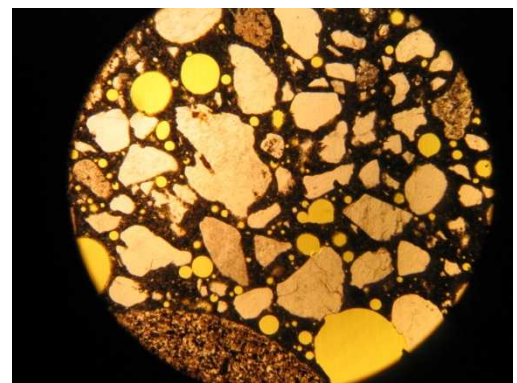
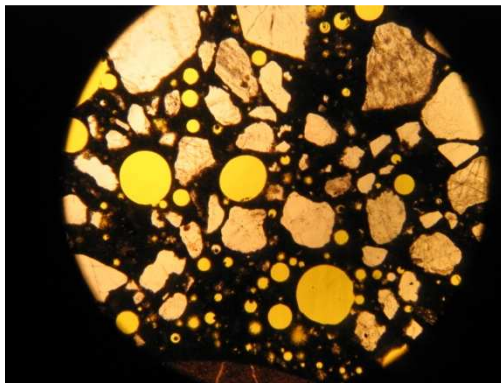


Figuur 67: T(0,45) 3 maand ouderdom

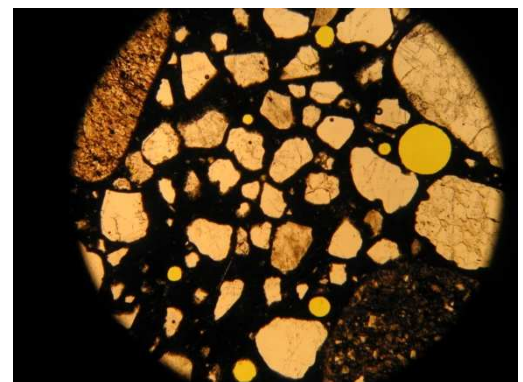




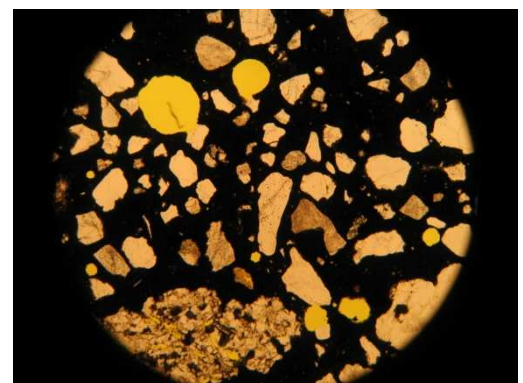
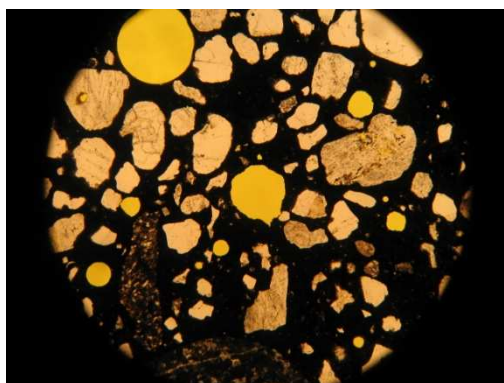
Figuur 68: T(0,45)A 1 maand ouderdom



Figuur 69: T(0,45)A 3 maand ouderdom

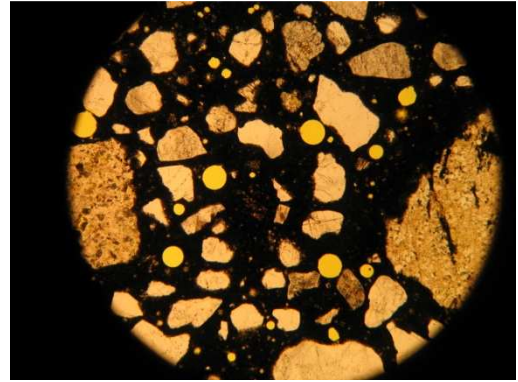
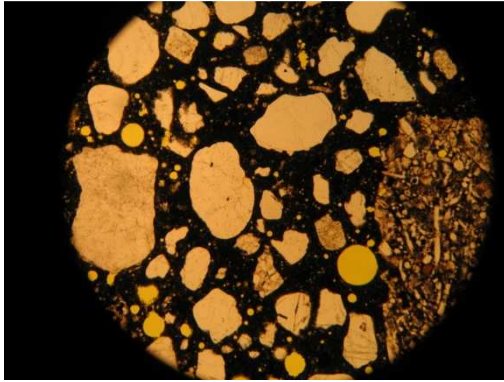


Figuur 70: FA(1)50 1 maand ouderdom

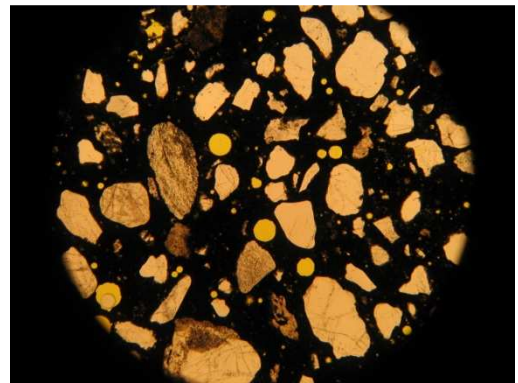
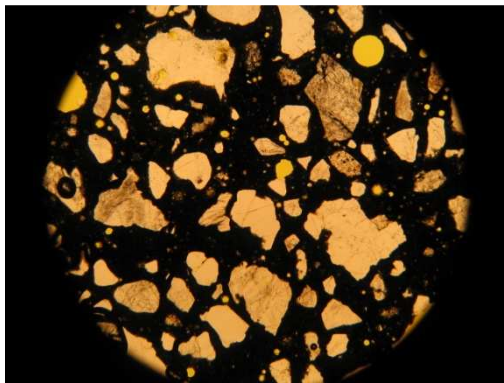


Figuur 71: FA(1)50 3 maand ouderdom

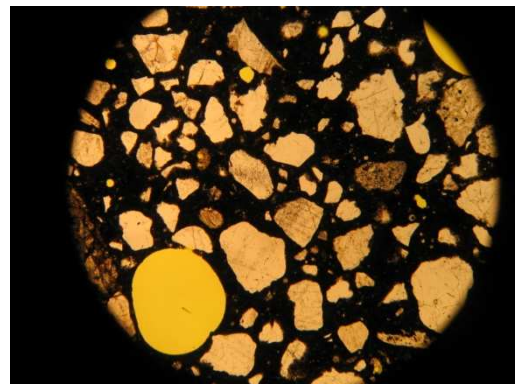




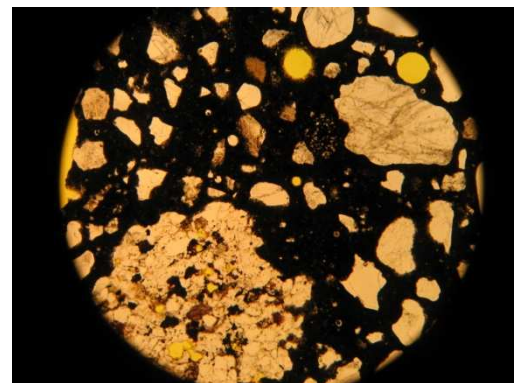
Figuur 72: FA(1)50A 1 maand ouderdom



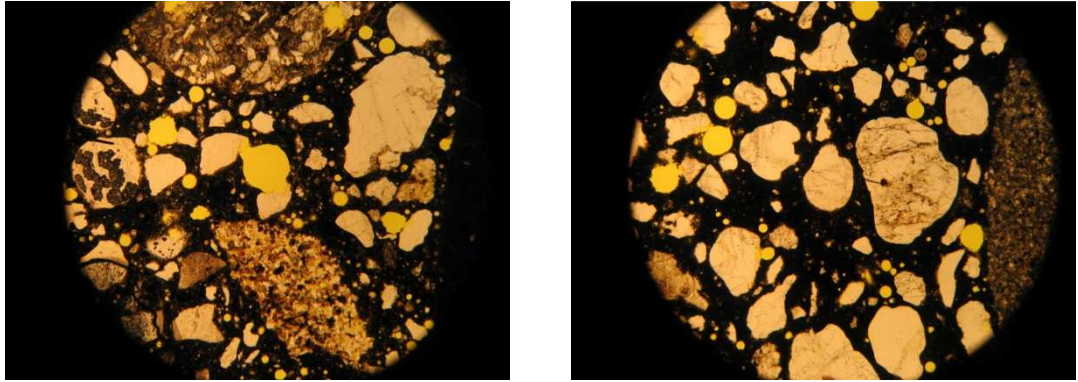
Figuur 73: FA(1)50A 3 maand ouderdom



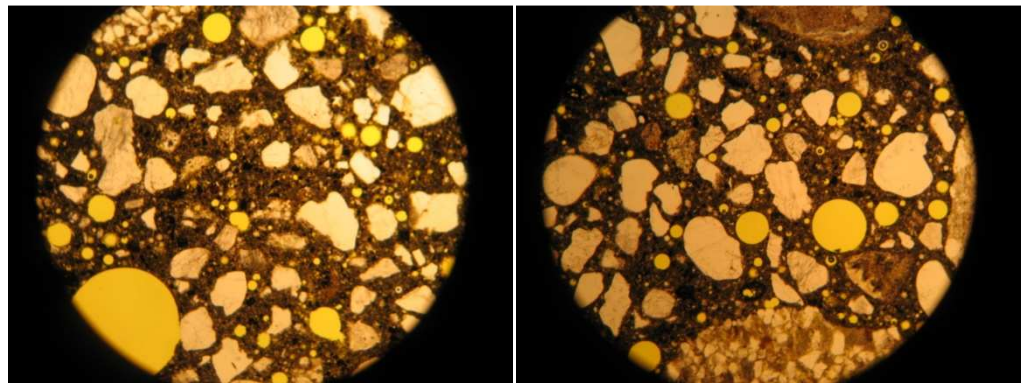
Figuur 74: FA(2)50 1 maand ouderdom



Figuur 75: FA(2)50 3 maand ouderdom



Figuur 76: FA(2)50A 1 maand ouderdom



Figuur 77: FA(2)50A 3 maand ouderdom

## I.2 Getalwaarden kwantitatieve analyse via ImageJ

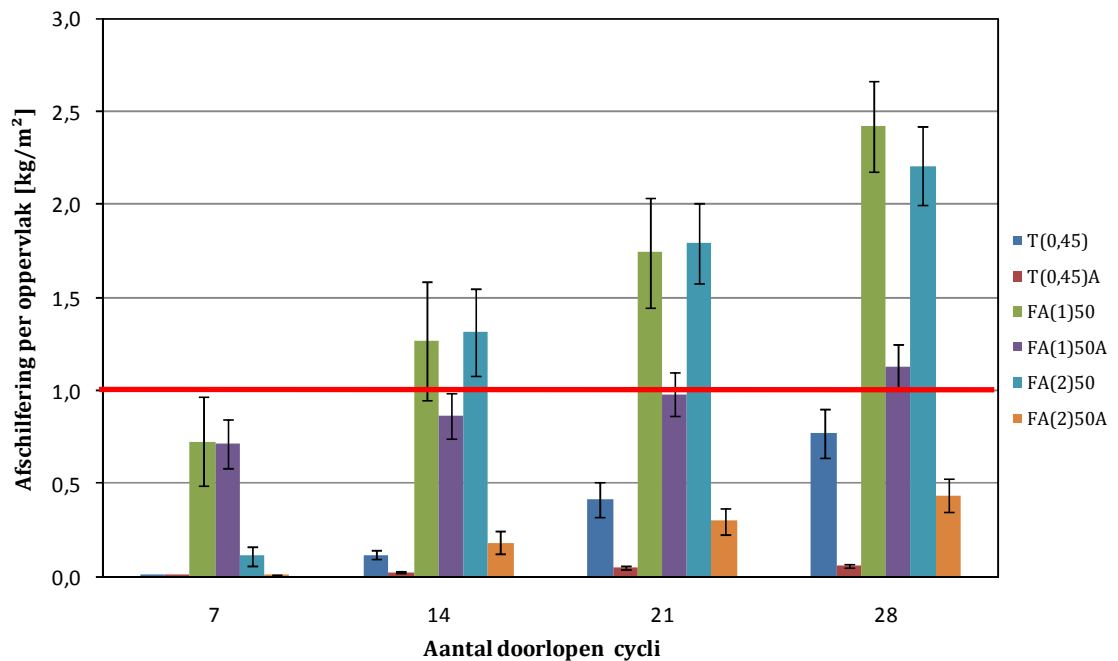
Tabel 17: Getalwaardes resultaten luchtgehalte uit ImageJ

|          | 1 maand ouderdom |           |                     |           | 3 maand ouderdom |           |                     |           |
|----------|------------------|-----------|---------------------|-----------|------------------|-----------|---------------------|-----------|
|          | bekistingsvlak   |           | niet-bekistingsvlak |           | bekistingsvlak   |           | niet-bekistingsvlak |           |
|          | $\bar{x}$ (%)    | $s_f$ (%) | $\bar{x}$ (%)       | $s_f$ (%) | $\bar{x}$ (%)    | $s_f$ (%) | $\bar{x}$ (%)       | $s_f$ (%) |
| T(0,45)  | 2,84             | 0,39      | 1,89                | 0,11      | 2,92             | 0,83      | 1,89                | 0,30      |
| T(0,45)A | 7,40             | 2,58      | 2,88                | 0,21      | 9,55             | 0,47      | 8,64                | 1,23      |
| FA(1)50  | 2,15             | 0,30      | 2,19                | 0,41      | 2,06             | 0,20      | 1,25                | 0,26      |
| FA(1)50A | 6,15             | 0,48      | 3,17                | 0,78      | 2,32             | 0,27      | 2,88                | 0,58      |
| FA(2)50  | 1,29             | 0,07      | 1,29                | 0,93      | 2,02             | 0,57      | 1,20                | 0,28      |
| FA(2)50A | 4,43             | 0,38      | 3,53                | 0,87      | 5,63             | 1,53      | 2,97                | 0,39      |

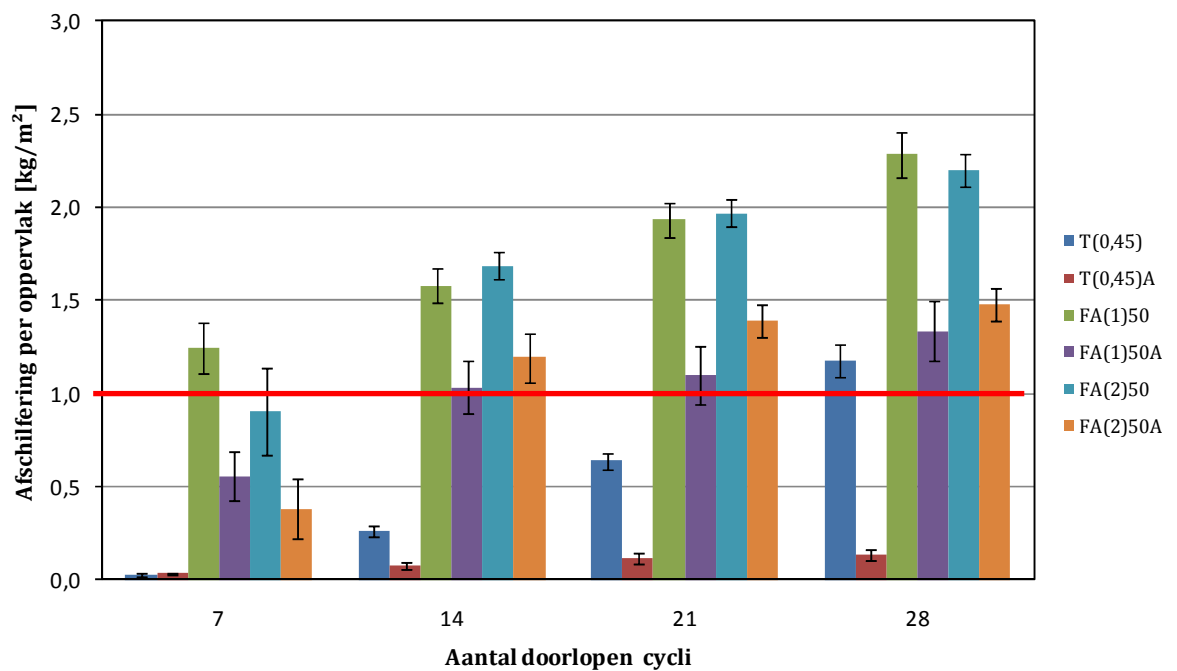


## Bijlage J

### Resultaten uit de vorst-dooiproef in combinatie met dooizouten



Figuur 78: Gemiddelde afschilfering op 1 maand ouderdom



Figuur 79: Gemiddelde afschilfering op 3 maand ouderdom

**Tabel 18: Afschilfering van de proefstukken op 1 maand ouderdom na aantal doorlopen cycli**

| # cycli | Afschilfering op 1 maand na aantal doorlopen cycli [kg/m <sup>2</sup> ] |       |           |       |           |       |           |       |           |       |           |       |
|---------|-------------------------------------------------------------------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|         | T(0,45)                                                                 |       | T(0,45)A  |       | FA(1)50   |       | FA(1)50A  |       | FA(2)50   |       | FA(2)50A  |       |
|         | $\bar{x}$                                                               | $s_f$ | $\bar{x}$ | $s_f$ | $\bar{x}$ | $s_f$ | $\bar{x}$ | $s_f$ | $\bar{x}$ | $s_f$ | $\bar{x}$ | $s_f$ |
| 7       | 0,01                                                                    | 0,00  | 0,00      | 0,00  | 0,73      | 0,24  | 0,71      | 0,13  | 0,11      | 0,05  | 0,01      | 0,00  |
| 14      | 0,12                                                                    | 0,03  | 0,03      | 0,01  | 1,27      | 0,32  | 0,86      | 0,12  | 1,32      | 0,24  | 0,18      | 0,06  |
| 21      | 0,42                                                                    | 0,09  | 0,05      | 0,01  | 1,74      | 0,30  | 0,98      | 0,12  | 1,79      | 0,22  | 0,30      | 0,07  |
| 28      | 0,77                                                                    | 0,13  | 0,06      | 0,01  | 2,42      | 0,24  | 1,13      | 0,12  | 2,21      | 0,21  | 0,44      | 0,09  |

**Tabel 19: Afschilfering van de proefstukken op 3 maand ouderdom na aantal doorlopen cycli**

| # cycli | Afschilfering op 3 maand na aantal doorlopen cycli [kg/m <sup>2</sup> ] |       |           |       |           |       |           |       |           |       |           |       |
|---------|-------------------------------------------------------------------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|         | T(0,45)                                                                 |       | T(0,45)A  |       | FA(1)50   |       | FA(1)50A  |       | FA(2)50   |       | FA(2)50A  |       |
|         | $\bar{x}$                                                               | $s_f$ | $\bar{x}$ | $s_f$ | $\bar{x}$ | $s_f$ | $\bar{x}$ | $s_f$ | $\bar{x}$ | $s_f$ | $\bar{x}$ | $s_f$ |
| 7       | 0,03                                                                    | 0,01  | 0,03      | 0,01  | 1,24      | 0,13  | 0,56      | 0,13  | 0,90      | 0,24  | 0,38      | 0,16  |
| 14      | 0,26                                                                    | 0,03  | 0,07      | 0,02  | 1,58      | 0,09  | 1,03      | 0,14  | 1,69      | 0,07  | 1,19      | 0,13  |
| 21      | 0,63                                                                    | 0,04  | 0,11      | 0,03  | 1,93      | 0,09  | 1,10      | 0,16  | 1,97      | 0,07  | 1,39      | 0,09  |
| 28      | 1,17                                                                    | 0,09  | 0,13      | 0,03  | 2,28      | 0,12  | 1,33      | 0,16  | 2,20      | 0,08  | 1,47      | 0,09  |

**Tabel 20: Afschilfering van de proefstukken na 28 cycli**

|          | 1 maand ouderdom               |                            | 3 maand ouderdom               |                            |
|----------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|
|          | $\bar{x}$ [kg/m <sup>2</sup> ] | $s_f$ [kg/m <sup>2</sup> ] | $\bar{x}$ [kg/m <sup>2</sup> ] | $s_f$ [kg/m <sup>2</sup> ] |
| T(0,45)  | 0,77                           | 0,13                       | 1,17                           | 0,09                       |
| T(0,45)A | 0,06                           | 0,01                       | 0,13                           | 0,03                       |
| FA(1)50  | 2,42                           | 0,24                       | 2,28                           | 0,12                       |
| FA(1)50A | 1,13                           | 0,12                       | 1,33                           | 0,16                       |
| FA(2)50  | 2,21                           | 0,21                       | 2,20                           | 0,08                       |
| FA(2)50A | 0,44                           | 0,09                       | 1,47                           | 0,09                       |

# Bijlage K

## Vergelijking luchtgehaltes uit meerdere proeven

Tabel 21: Vergelijking luchtgehaltes bij vers en verhard beton

|          | vers beton |         | verhard beton 1m |        | verhard beton 3m |        |
|----------|------------|---------|------------------|--------|------------------|--------|
|          | geschat    | bekomen | AVA              | ImageJ | AVA              | ImageJ |
| T(0,45)  | 5,25       | 2,80    | 2,65             | 1,89   | 4,54             | 1,89   |
| T(0,45)A | 8,19       | 6,60    | 9,02             | 2,88   | 11,27            | 8,64   |
| FA(1)50  | 4,30       | 2,60    | 3,51             | 2,19   | 2,60             | 1,25   |
| FA(1)50A | 9,59       | 5,20    | 4,75             | 3,17   | 3,89             | 2,88   |
| FA(2)50  | 5,05       | 2,80    | 2,96             | 1,29   | 3,13             | 1,20   |
| FA(2)50A | 9,01       | 4,90    | 5,53             | 3,53   | 5,65             | 2,97   |

# Referentielijst

- Al-Amoudi O.S.B., Al-Kutti W.A., Ahmad S. , Maslehuddin M. (2009). *Correlation between compressive strength and certain durability indices of plain and blended cement concretes*, Cement & Concrete Composites 31, p. 672–676
- Annerel E. (2006) *Structuur en uitzicht van zelfverdichtend beton*, Scriptie, Universiteit Gent
- ASTM C457 (2000) – Standard test method for microscopical determination of parameters of the air void system in hardened concrete, Pennsylvania
- Audenaert K., (2006). *Transportmechanismen in zelfverdichtend beton in relatie met carbonatatie en chloridepenetratie*, doctoraatsthesis, Universiteit Gent
- Baltrus J.P., LaCount R.B. (2001). *Measurement of adsorption of air-entraining admixture on fly ash in concrete and cement*, Cement and Concrete Research 31 p. 819-824
- Berry E.E., Hemmings R.T., Zhang M.-H., Cornelius B.J., Golden D.M., (1994). *Hydration in High-Volume Fly Ash Concrete Binders*, ACI Materials Journal Vol. 91 No. 4, July-August 1994, p. 382-289
- Betoniek op CD-ROM 1970 - 2000
- Biolzi L., Guerrini G.L., Rosati G., (1999). *Frost durability of very high performance based materials*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 11 No. 2 May 1999
- Boel V. (2007). *Microstructuur van zelfverdichtend beton in relatie met gaspermeabiliteit en duurzaamheidsaspecten*, doctoraatsthesis, Universiteit Gent
- Chatterji S., (2002). *Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents*, Cement and Concrete Composites 25 p. 759-765

- Chindaprasirt P., Jaturapitakkul C., Sinsiri T., (2005). *Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste*, Cement & Concrete Composites 27, p. 425–428
- Chindaprasirt P., Jaturapitakkul C., Sinsiri T., (2007). *Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste*, Construction and Building Materials, p.1534-1541
- Chindaprasirt P., Rukzon S., (2009). *Pore Structure Changes of Blended Cement Pastes Containing Fly Ash, Rice Husk Ash and Palm Oil Fuel Ash Caused by Carbonation*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 21 No. 11, November
- Cox K., De Belie N., (2007). *Durability behavior of high-volume fly ash concrete*, International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies
- Dhir R.K., Hewlett P.C., Chart Y.N. (1987) *Near-surface characteristics of concrete – Assessment and development of insitu test methods*, Magazine of Concrete Research, 39 (141), 183
- Dhir R.K., McCarthy M.J., Magee B.J.,(1998). *Impact of BS EN 450 PFA on concrete construction in the UK*, Construction and Building Materials, Vol. 12 No. 1, p. 59-74
- Du L., Folliard K.J. (2004) *Mechanisms of air entrainment in concrete*, Cement and Concrete Research 35 p. 1463-1471
- Freeman E., Gao Y., Hurt R., Suuberg E., (1996). *Interactions of carbon-containing fly ash with commercial air-entraining admixtures for concrete*, Fuel Vol. 78 (8) p. 761-765
- Gallé C. (2001). *Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry, a comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying*, Cement and Concrete Research, Vol. 31, p.1467-1477
- Gopalan M.K., (1996). *Sorptivity of fly ash concretes*, Cement and Concrete Research, Vol. 26 No. 8, p. 1189-1197

- Gonen T., Yazicioglu S., (2007). *The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete*, Construction and Building Materials 21, p. 1040-1045
- Hill R.L., Sarkar S.L., Rathbone R.F., Hower J.C. (1997). *An Examination of Fly Ash Carbon and its Interactions with Air Entraining Agent*, Cement and Concrete Research 27(2) p. 193-204
- Kearsley E.P., Wainwright P.J., (2001) *Porosity and permeability of foamed concrete*, Cement and Concrete Research 31, p. 805-812
- Khan M.I., Lynsdale C.J., Waldron P., (2000). *Porosity and strength of PFA/SF/OPC ternary blended paste*, Cement and Concrete Research 30, p. 1225-1229
- Khan M.I., Lynsdale C.J., (2002). *Strength, permeability and carbonation of high-performance concrete*, Cement and Concrete Research 32, p.123-131
- Khan M.I. (2003) *Permeation of High Performance Concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 15 No. 1, February
- Kuroda M., Watanabe T., Terashi N., (2000). *Increase of bond strength at interfacial transition zone by the use of fly ash*, Cement and Concrete Research 30, p.253-258
- Lammertijn S. (2007). *Carbonatatie en chloride-indringing bij hoog-volume-vliegasbeton (HVFA-beton)*. Scriptie, Universiteit Gent
- Levitt M. (1969). *Proceedings of Symposium on Non-Destructive Testing of Concrete and Timber*, Institute of Civil Engineers, London, 23
- Martyr N.S., Ferraris C.F. (1997). *Capillary transport in mortars and concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 27 No. 5 p. 747-760
- Mather B. (1999) *Use of admixtures to produce concrete that will be immune to the effects of freezing and thawing*, RILEM Proceedings, Vol. 5 p. 245-254
- Mehta P.M., Monteiro P.J.M. (2001) *Concrete microstructure, properties and materials*, 2<sup>nd</sup> edition, University of California, 239p.

Mohamed O.A., Rens K.L., Stalnaker J.J. (1998) *Factors affecting resistance of concrete to freezing and thawing damage*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 12 No. 1 (February, 2000)

NBN B 05-202 (1976) *Proeven op bouwmaterialen – Vorstbestendigheid - Porometrie*

NBN B15-217 (1984) *Proeven op beton – Wateropslorping door capillariteit*

NBN B 15-220 (1988) *Proeven op beton - Bepaling van de druksterkte*

NBN EN 206-1 (2000) *Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity*

NBN EN 12350-7 (2000) *Beproeving van betonspecie – deel 7: luchtgehalte – drukmethode.*

NBN EN 1338 (2003) *Betonstraatstenen –Eisen en beproevingsmethoden*

NBN B15-001 (2004) *Supplément à la NBN EN 206-1 – Béton - Spécification, performances, production et conformité*

NBN EN 196-1 (2005) *Beproevingsmethoden voor cement - Deel 1: Bepaling van de sterkte*

NBN EN 450-1 (2007) *Fly ash for concrete - Part 1: Definition, specifications and conformity criteria*

Nokken M.R. & Hooton R.D. (2002). *Dependence of absorption on degree of saturation of concrete*, Cement Concrete and Aggregates, Vol. 24 no.1 p. 20-24

Papadakis V.G., Fardis M.N., Vayenas C.G. (1991) *Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete*, ACI Materials Journal, Vol. 8 No. 2, March- April 1991, p. 186-195

Papadakis V.G., Fardis M.N., Vayenas C.G. (1992) *Hydration and Carbonation of Pozzolanic Cements*, ACI Materials Journal, Vol. 89 No.2, March-April 1992, p. 119-130

PCA (2010), [http://www.cement.org/tech/faq\\_air\\_content.asp](http://www.cement.org/tech/faq_air_content.asp), Portland Cement Association

Pedersen K.H., Jensen A.D., Skjoth-Rasmussen M.S., Dam-Johansen K.(2007). *A review of the interference of carbon containing fly ash with air entrainment in concrete*, Progress in Energy and Combustion Science 34 p. 135-154

Peng G.-F., Ma Q. , Hu H.-M., Gao R., Yao Q.-F., Liu Y.-F., (2007) *The effects of air entrainment and pozzolans on frost resistance of 50–60 MPa grade concrete*, Construction and Building Materials 21, p. 1034–1039

Pigeon M., Marchand J., Pleau R. (1995) *Frost resistant concrete*, Construction and Building Materials, Vol. 10 No. 5 p. 339-348

Poon C.S., Wong Y.L., Lam K. (1997). *The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly-ash cement pastes and mortars*, Construction and Building Materials, Vol. 11 No. 7-8, p. 383-393

Poon C.S., Lam L., Wong Y.L. (1999) *Effects of fly ash and silica fume on interfacial porosity of concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 11 No. 3 August 1999

Powers T.C. (1954) *Void spacing as a basic for producing air-entrained concrete*, Journal of American Concrete Institute 26(9), p. 184-211

RILEM (1999) *RILEM TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability*, Materials and structures Vol. 32, p. 174-179, April 1999

Saricimen H., Maslehuddin M., Al-Tayyib A.J., Al-Mana A.I., (1995). *Permeability and Durability of Plain and Blended Cement Concretes Cured in Field and Laboratory Conditions*, ACI Materials Journal Vol. 92 No.2, March – April 1995, p. 111-116



Shafiq N., Nuruddin M. F. and Kamaruddin I. (2007) *Comparison of engineering and durability properties of fly ash blended cement concrete made in UK and Malaysia*, Advances in Applied Ceramics 2007 Vol. 106 No. 6

Saffiudin Md., Hearn N., (2005). *Comparison of ASTM saturation techniques for measuring the permeable porosity of concrete*, Cement and Concrete Research 35, p. 1008-1013

Skjetne E., Auriault J.-L. (1999). *Homogenization of wall-slip gas flow through porous media*, Transport in porous media vol. 36, p. 293-306

Sutter L.L., Van Dam T., Thomas M. (2002). *Evaluation of methods for characterizing air-void systems in Wisconsin paving concrete*, Transportation Materials Research Center, Michigan Technology University

Valenza J.J., Scherer G.W., (2007). *A review of salt scaling: I. Phenomenology*, Cement and Concrete Research 37, p.1007-1021

Valenza J.J., Scherer G.W., (2007). *A review of salt scaling: II. Mechanisms*, Cement and Concrete Research 37, p.1022-1034

Van den Heede Ph. (2008) *Porositeit en transporteigenschappen van 'groene' betonsoorten*, Scriptie, Universiteit Gent

Zhang M.H., (1995) *Microstructure, crack propagation and mechanical properties of cement pastes containing high volumes of fly ashes*, Cement and Concrete Research, Vol. 25 No. 6, p. 1165 – 1178

Zhang D.S. (1996). *Air Entrainment in Fresh Concrete with PFA*, Cement and Concrete Composites 18, p. 409-416

# Lijst van figuren

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figuur 1: De werking van een luchtbelvormer in betonspecie (Betoniek) .....                                                                                             | 6  |
| Figuur 2: Adsorptieplaatsen voor luchtbelvormers aan het lucht/water-oppervlak en aan het koolstofoppervlak (Pedersen et al., 2007) .....                               | 11 |
| Figuur 3: Schematische weergave van de verdeling van luchtbellens in beton met de afstandsfactor (Betoniek) .....                                                       | 20 |
| Figuur 4: Gefitte trendlijn aan luchtgehalte i.f.v. dosis luchtbelvormer .....                                                                                          | 29 |
| Figuur 5: Proefopstelling vacuümverzadiging: vacuümtank .....                                                                                                           | 35 |
| Figuur 6: Proefopstelling capillariteit .....                                                                                                                           | 37 |
| Figuur 7: Permeameter type "CEMBUREAU" .....                                                                                                                            | 39 |
| Figuur 8: Proefstuk in rubberen band tegen zuurstoflekken .....                                                                                                         | 39 |
| Figuur 9: Aandeel van niet-viskeuze en viskeuze stroming .....                                                                                                          | 41 |
| Figuur 10: Temperatuurschema vorst-dooicycli (per 24u) .....                                                                                                            | 42 |
| Figuur 11: Microscoop Leica DM LP .....                                                                                                                                 | 43 |
| Figuur 12: Aanduiding foto-opnameplaatsen op slijpplaatje (afmetingen in mm) .....                                                                                      | 44 |
| Figuur 13: Links: foto onder doorvallend gepolariseerd licht. Rechts: foto onder doorvallend fluorescerend licht .....                                                  | 45 |
| Figuur 14: Links: origineel fotobeeld & Rechts: bewerkt 'Hue'-interval .....                                                                                            | 46 |
| Figuur 15: 'Binary'-foto in ImageJ .....                                                                                                                                | 46 |
| Figuur 16: RapidAir 457 (foto vanop <a href="http://www.concrete-experts.com">www.concrete-experts.com</a> ) .....                                                      | 47 |
| Figuur 17: Voorbereiding gepolijst proefstuk met zwarte inktstift en BaSO <sub>4</sub> -poeder .....                                                                    | 48 |
| Figuur 18: Bijkleuren van een poreus granulaat .....                                                                                                                    | 49 |
| Figuur 19: Plaatsing van het proefstuk in de RapidAir 457 ( <a href="http://www.concrete-experts.com">www.concrete-experts.com</a> ) .....                              | 49 |
| Figuur 20: Afgelegd pad volgens 'linear traverse' methode .....                                                                                                         | 50 |
| Figuur 21: Evenwichtig aantal 'probe lines' bij het scannen met de RapidAir 457 .....                                                                                   | 51 |
| Figuur 22: Karakteristieke kubusdruksterktes betonmengelingen .....                                                                                                     | 55 |
| Figuur 23: Voorbeeld verwerking gegevens capillariteitsproef (T(0,45), 1 maand ouderdom, 40° droging) .....                                                             | 58 |
| Figuur 24: Capillaire opslorplingscoëfficiënt van het eerste tijdsinterval S <sub>1</sub> .....                                                                         | 58 |
| Figuur 25: Capillaire opslorplingscoëfficiënt van het tweede tijdsinterval S <sub>2</sub> .....                                                                         | 58 |
| Figuur 26: Totale capillaire opslorping na 336h .....                                                                                                                   | 59 |
| Figuur 27: Het debiet Q i.f.v. (P <sub>1</sub> <sup>2</sup> -P <sub>2</sub> <sup>2</sup> ) bij verschillende verzadigingsgraden voor T(0,45)A op 3 maand ouderdom ..... | 62 |
| Figuur 28: Schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt [x 10 <sup>-17</sup> m <sup>2</sup> ] bij verzadigingsgraad 0% en P <sub>1</sub> = 3 bar .....                      | 64 |
| Figuur 29: Gefitte curves aan de schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt i.f.v. 100-S (%) .....                                                                        | 66 |
| Figuur 30: Capillaire porositeit bij droging 40°C .....                                                                                                                 | 68 |
| Figuur 31: Totale porositeit bij droging 105°C .....                                                                                                                    | 69 |
| Figuur 32: Gelporositeit .....                                                                                                                                          | 69 |
| Figuur 33: Luchtgehalte van de air-void-proefstukken .....                                                                                                              | 74 |
| Figuur 34: Spacing factor bij de verschillende air-void-proefstukken .....                                                                                              | 74 |

|                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figuur 35: Specifieke oppervlakte van de air-void-proefstukken.....                                                                                            | 75  |
| Figuur 36: Gemiddelde koordlengte van de air-void-proefstukken .....                                                                                           | 75  |
| Figuur 37: Koordlengtedistributie op 1 maand ouderdom .....                                                                                                    | 76  |
| Figuur 38: Koordlengtedistributie op 3 maand ouderdom .....                                                                                                    | 76  |
| Figuur 39: T(0,45) en T(0,45)A op 1 maand ouderdom .....                                                                                                       | 81  |
| Figuur 40: T(0,45) en T(0,45)A op 3 maand ouderdom .....                                                                                                       | 82  |
| Figuur 41: FA(1)50 en FA(1)50A op 1 maand ouderdom.....                                                                                                        | 82  |
| Figuur 42: FA(1)50 en FA(1)50A op 3 maand ouderdom.....                                                                                                        | 82  |
| Figuur 43: FA(2)50 en FA(2)50A op 1 maand ouderdom.....                                                                                                        | 83  |
| Figuur 44: FA(2)50 en FA(2)50A op 3 maand ouderdom.....                                                                                                        | 83  |
| Figuur 45: Resultaten kwantitatieve analyse met Image J - percentage lucht op foto .....                                                                       | 85  |
| Figuur 46: Afschilfering na 28 cycli.....                                                                                                                      | 87  |
| Figuur 47: Vergelijking geschat en opgemeten luchtgehalte .....                                                                                                | 93  |
| Figuur 48: Vergelijking luchtgehaltes op 1 maand ouderdom .....                                                                                                | 94  |
| Figuur 49: Vergelijking luchtgehaltes op 3 maand ouderdom .....                                                                                                | 94  |
| Figuur 50: Gemiddelde kubusdruksterkte in functie van de open porositeiten .....                                                                               | 96  |
| Figuur 51: Verband tussen gaspermeabiliteitscoëfficiënt en capillaire porositeit .....                                                                         | 97  |
| Figuur 52: Correlatie tussen de capillaire porositeit (AA' en B) en de opslorplingscoëfficiënt (respectievelijk $S_1$ en $S_2$ ) op 1 en 3 maand ouderdom..... | 98  |
| Figuur 53: Afschilfering na 28 cycli.....                                                                                                                      | 100 |
| Figuur 54: Schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt op 1 maand ouderdom bij $P_1 = 2$ bar .....                                                                | 112 |
| Figuur 55: Schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt op 1 maand ouderdom bij $P_1 = 3$ bar .....                                                                | 112 |
| Figuur 56: Schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt op 1 maand ouderdom bij $P_1 = 4$ bar .....                                                                | 113 |
| Figuur 57: Schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt op 3 maand ouderdom bij $P_1 = 2$ bar .....                                                                | 113 |
| Figuur 58: Schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt op 3 maand ouderdom bij $P_1 = 3$ bar .....                                                                | 113 |
| Figuur 59: Schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt op 3 maand ouderdom bij $P_1 = 4$ bar .....                                                                | 114 |
| Figuur 60: Koordlengtedistributie T(0,45) .....                                                                                                                | 117 |
| Figuur 61: Koordlengtedistributie T(0,45)A .....                                                                                                               | 117 |
| Figuur 62: Koordlengtedistributie FA(1)50 .....                                                                                                                | 117 |
| Figuur 63: Koordlengtedistributie FA(1)50A .....                                                                                                               | 118 |
| Figuur 64: Koordlengtedistributie FA(2)50 .....                                                                                                                | 118 |
| Figuur 65: Koordlengtedistributie FA(2)50A .....                                                                                                               | 119 |
| Figuur 66: T(0,45) 1 maand ouderdom .....                                                                                                                      | 120 |
| Figuur 67: T(0,45) 3 maand ouderdom .....                                                                                                                      | 120 |
| Figuur 68: T(0,45)A 1 maand ouderdom.....                                                                                                                      | 121 |
| Figuur 69: T(0,45)A 3 maand ouderdom.....                                                                                                                      | 121 |
| Figuur 70: FA(1)50 1 maand ouderdom.....                                                                                                                       | 121 |
| Figuur 71: FA(1)50 3 maand ouderdom.....                                                                                                                       | 121 |
| Figuur 72: FA(1)50A 1 maand ouderdom .....                                                                                                                     | 122 |
| Figuur 73: FA(1)50A 3 maand ouderdom .....                                                                                                                     | 122 |

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| Figuur 74: FA(2)50 1 maand ouderdom.....                      | 122 |
| Figuur 75: FA(2)50 3 maand ouderdom.....                      | 122 |
| Figuur 76: FA(2)50A 1 maand ouderdom.....                     | 123 |
| Figuur 77: FA(2)50A 3 maand ouderdom.....                     | 123 |
| Figuur 78: Gemiddelde afschilfering op 1 maand ouderdom ..... | 124 |
| Figuur 79: Gemiddelde afschilfering op 3 maand ouderdom ..... | 124 |

# Lijst van tabellen

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabel 1: Karakteristieken van de gebruikte vliegas en het cement .....                          | 27  |
| Tabel 2: Chemische samenstelling van de gebruikte vliegas en het cement.....                    | 27  |
| Tabel 3: Mortelsamenstellingen .....                                                            | 27  |
| Tabel 4: Luchtbelvormerdoseringen bij de verschillende mortels .....                            | 28  |
| Tabel 5: Luchtgehaltes bij verschillende doseringen luchtbelvormer .....                        | 28  |
| Tabel 6: Samenstelling verschillende betonmengelingen .....                                     | 33  |
| Tabel 7: Druksterktes op een ouderdom van 28 dagen en 90 dagen .....                            | 55  |
| Tabel 8: Getalwaardes schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt $k_a$ .....                      | 63  |
| Tabel 9: Getalwaardes gemiddelde porositeiten proefstukken A & A' en B .....                    | 69  |
| Tabel 10: Getalwaardes capillaire wateropsorping op 1 maand ouderdom.....                       | 111 |
| Tabel 11: Getalwaardes capillaire wateropsorping op 3 maand ouderdom.....                       | 111 |
| Tabel 12: Getalwaardes intrinsieke gaspermeabiliteitscoëfficiënt berekend met $P_M$ .....       | 114 |
| Tabel 13: Getalwaardes voor de verschillende porositeiten .....                                 | 115 |
| Tabel 14: Getalwaardes van de resultaten op 1 maand ouderdom .....                              | 116 |
| Tabel 15: Getalwaardes van de resultaten op 3 maand ouderdom .....                              | 116 |
| Tabel 16: Verdeling in klassen naargelang de koordelengte volgens RapidAir 457 .....            | 119 |
| Tabel 17: Getalwaardes resultaten luchtgehalte uit ImageJ.....                                  | 123 |
| Tabel 18: Afschilfering van de proefstukken op 1 maand ouderdom na aantal doorlopen cycli ..... | 125 |
| Tabel 19: Afschilfering van de proefstukken op 3 maand ouderdom na aantal doorlopen cycli ..... | 125 |
| Tabel 20: Afschilfering van de proefstukken na 28 cycli.....                                    | 125 |
| Tabel 21: Vergelijking luchtgehaltes bij vers en verhard beton .....                            | 126 |