Porositeit en transporteigenschappen van 'groene' betonsoorten

Philip Van den Heede

Promotor: prof. dr. ir. Nele De Belie Begeleiders: ir. Elke Gruyaert, ir. Gert Baert

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van Burgerlijk ingenieur-architect

Vakgroep Bouwkundige constructies Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe Faculteit Ingenieurswetenschappen Academiejaar 2007-2008



Voorwoord

Toen ik vijf jaar geleden mijn middelbaar diploma behaalde kwam ik voor een bijzonder moeilijke keuze te staan. Er waren namelijk twee studietakken waarin ik wilde verdergaan. Vooreerst was ik gefascineerd door alles wat met geologie en steenachtige materialen te maken had. Daarnaast ging mijn interesse ook uit naar het architectenberoep en de bouwpraktijk. Uiteindelijk koos ik voor de opleiding burgerlijk ingenieur-architect. De afgelopen vijf jaar zijn ongetwijfeld zeer gevarieerd en boeiend geweest, maar die hebben mijn fascinatie voor geologie niet kunnen verdringen.

Pas toen ik vorig jaar kennismaakte met de vakken 'Gewapend beton' van prof. dr. ir. Luc Taerwe en 'Betontechnologie' van prof. dr. ir. Geert De Schutter kwam daar enigszins verandering in. Ineens drong het tot me door dat de bouwtechniek en de geologie van de steenachige materialen wel heel nauw aan elkaar verwant kunnen zijn. Zo is het bouwmateriaal beton eigenlijk ook een steen, maar dan één die op artificiële wijze tot stand komt. Bovendien kunnen de eigenschappen ervan tot op zekere hoogte door de mens worden gestuurd, wat niet kan gezegd worden van de natuurlijke steenachtige materialen. Dit vond ik op zich zo'n boeiend gegeven dat ik me er in mijn scriptiejaar verder wilde in verdiepen.

In de eerste plaats zou ik prof. dr. ir. Nele De Belie willen bedanken omdat zij architectuurstudenten de mogelijkheid biedt scriptieonderwerpen rond duurzaamheidsaspecten van beton te kiezen en omdat zij bereid was mij als scriptiestudent in haar onderzoeksgroep op te nemen. Daarnaast gaat mijn dank ook uit naar prof. dr. ir. Luc Taerwe, hoofd van de onderzoeksgroep, omdat ik in het kader van deze scriptie gedurende het hele jaar door onderzoek mocht verrichten aan het Laboratorium Magnel voor Betononderzoek. Dit werk zou zeker nooit tot stand gekomen zijn zonder de hulp van mijn twee scriptiebegeleiders Gert Baert en Elke Gruyaert, waarvoor hartelijk dank. Onnoemelijke keren ben ik bij hen komen aankloppen met vragen en problemen en altijd waren ze bereid te helpen zoeken naar een oplossing. Ik denk in het bijzonder aan hun bereidheid tot verdere opvolging van mijn proeven tijdens de lessen en de examens en het tussendoor doornemen van het reeds bij elkaar geschreven tekstmateriaal. Ook konden ze als geen ander soms een helder licht laten schijnen op proefresultaten die op het eerste zicht soms volkomen onlogisch leken. Bovendien vormden ze in dit alles een hecht team. Van een complementair duo gesproken!

Ik zou ook alle technische personeelsleden van het Labo Magnel willen bedanken. Zij hebben mij steeds bijgestaan bij de vervaardiging van de proefstukken, het zaag- en boorwerk, het uitvoeren van drukproeven, het aanleren van sommige proeven, enz. Samen met het ander personeel zorgden zij voor de goede werksfeer het hele jaar door. Een bijzonder woord van dank zou ik willen richten aan doctoraalstudent Qiang Yuan. Met hem had ik regelmatig boeiende conversaties tijdens het soms lange wachten bij de gaspermeabiliteitsproeven.

Bij het beëindigen van mijn studies zou ik mij ook even willen richten tot alle professoren en assistenten die bij mijn opleiding betrokken waren. Ik ben hen dank verschuldigd omdat ze mij gedurende het hele studietraject veel inzichten hebben bijgebracht in de bijzondere wereld van de architectuur.

Tot slot mag ik zeker mijn ouders en broers niet vergeten. Gedurende die vijf jaar stonden ze voor me klaar om waar het kon bij te springen. Ze hebben in noodsituaties meegeholpen aan maquettes, teksten doorworsteld, enz. Ook waren ze gedurende al die jaren een luisterend oor wanneer het niet wilde lukken met de architectuurontwerpen. Een dergelijke uitlaatklep was voor mij onontbeerlijk. Merci!

Ouwegem, juni 2008

Philip Van den Heede

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

Porositeit en transporteigenschappen van 'groene' betonsoorten

Philip Van den Heede

Promotor: prof. dr. ir. Nele De Belie Begeleiders: ir. Elke Gruyaert, ir. Gert Baert

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van Burgerlijk ingenieur-architect

Vakgroep Bouwkundige constructies Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe Faculteit Ingenieurswetenschappen Academiejaar 2007-2008

Samenvatting

In het licht van de versnelde opwarming van de aarde mede door toedoen van de mens, is een vermindering van de uitstoot van broeikasgassen meer dan ooit aan de orde. Aangezien de productie van cement gepaard gaat met een belangrijke CO_2 -emissie, is het nuttig op zoek te gaan naar meer ecologische alternatieven. Deze bestaan erin een aanzienlijk deel van het cement in beton te vervangen door vliegas of hoogovenslakken, allebei nevenproducten uit andere industrietakken die zo een nuttige bestemming krijgen. Het materiaal vliegas vertoont puzzolane eigenschappen, wat betekent dat het zal reageren met het $Ca(OH)_2$ dat vrijkomt bij de hydratatie van Portland cement. Hoogovenslakken daarentegen zijn latent-hydraulisch. Daarbij fungeert het $Ca(OH)_2$ afkomstig van het cement als activator. Omtrent het duurzaamheidsgedrag en de microstructuur van hoog-volume-vliegasbeton (HVFA-beton) en beton met hoogovenslakken is verder onderzoek nog steeds aan de orde. In dit eindwerk zal vooral worden ingegaan op de open porositeit, de gaspermeabiliteit en de capillaire wateropslorping. Voor het onderzoek werden in totaal 8 betonmengelingen met een variërend vliegasgehalte en 4 met een verschillend slakkenpercentage vervaardigd.

De open porositeit omvat alle poriën die toegankelijk zijn vanaf het betonoppervlak, waardoor deze parameter de toegankelijkheid voor schadelijke stoffen karakteriseert. Voor HVFA-beton wordt ze gekenmerkt door belangrijke wijzigingen op langere termijn onder invloed van de puzzolane reactie. Zo zal de capillaire porositeit na verloop van tijd dalen, terwijl de gelporositeit eerder toeneemt. Bij beton met hoogovenslakken blijkt de porositeit minder sterk te evolueren in de tijd. Onderzoek naar de invloed van een verhoogde CO₂-concentratie op de porositeit wijst uit dat de grote carbonatatiegevoeligheid van beton met hoogovenslakken gepaard gaat met een stijging van de capillaire porositeit ten koste van de gelporositeit.

Naast de beschikbaarheid van $Ca(OH)_2$ is de gasdoorlatendheid een belangrijke indicator voor carbonatatie. Voor beide betonsoorten blijkt de gaspermeabiliteit toe te nemen in functie van de cementvervanging. Samen met de afname van $Ca(OH)_2$ onder invloed van respectievelijk de puzzolane en latent-hydraulische reacties bij HVFA-beton en beton met hoogovenslakken, wordt bij dergelijke betonsoorten een versnelde indringing van CO_2 verwacht. Voor beton met hoogovenslakken wordt dit ook experimenteel aangetoond.

Capillaire stroming treedt op wanneer een niet verzadigd materiaal in aanraking komt met een vloeistof. Met het risico op wapeningscorrosie in het achterhoofd, neemt beton best zo weinig mogelijk water op. HVFA-beton wordt over het algemeen gekenmerkt door een grotere capillaire wateropslorping dan traditioneel beton. Bij beton met hoogovenslakken is het verschil met de referentiemengeling veel minder uitgesproken. Voor beide betonsoorten neemt de zone nabij het bekistingsvlak meer water op dan de kernzone.

Specifiek voor HVFA-beton wordt de invloed van luchtbelvormers op de microstructuur geëvalueerd. Deze hulpstof creëert een systeem van kleine geïsoleerde luchtbellen in het beton waardoor de vorstweerstand verbetert. De luchtholten maken normaal gezien geen deel uit van de open porositeit. Zonder luchtbelvormers worden wel systematisch lagere open porositeiten gemeten. Qua gaspermeabilteit en capillaire wateropslorping worden geen éénduidige verschillen waargenomen.

Onderzoek naar het effect van het cement- en vliegastype wijst uit dat beide componenten wel degelijk een invloed hebben op de porositeit en de transporteigenschappen. Een ander vliegastype levert systematisch lagere waarden op voor de open porositeit en de gasdoorlatendheid. Beton op basis van Portland HSR-cement en vliegas gedraagt zich ook anders dan een referentiemengeling met hetzelfde cement.

Trefwoorden: HVFA-beton, hoogovenslakken, porositeit, gaspermeabiliteit, capillariteit, luchtbelvormers

Porosity and Transport Properties of 'Green' Concretes

Philip Van den Heede

Supervisor(s): prof. dr. ir. N. De Belie, ir. E. Gruyaert, ir. G. Baert

Abstract— In this article the results of a research conducted on the durability behavior and microstructure of two 'green' concrete types, namely high-volume fly ash concrete (HVFA concrete) and concrete containing large amounts of blast-furnace slag (BFS) are described. Therefore, several concrete mixtures with varying cement replacement levels were tested for porosity, gas permeability and capillary sorption. Specifically for HVFA concrete, the influence of an air entraining agent on these characteristics was evaluated, together with the use of different cement and fly ash types and water-to-cementitious material ratios (W/CM). Finally, the relationship between porosity and carbonation of BFS concrete was investigated.

Keywords— HVFA concrete, blast-furnace slag, porosity, gas permeability, capillary sorption, air entraining agents

I. INTRODUCTION

Within the concrete industry the production of cement is one of the primary sources of CO_2 emissions, which are held responsible for the greenhouse effect. By replacing a part of the cement used in concrete with by-products of other industries these emissions can be reduced. Because of the large application of concrete worldwide, even small reductions can make a big difference [1]. High cement replacement levels will thus be even more advantageous.

Fly ash is one of those replacing materials. It is a by-product of the combustion of pulverised coal and has pozzolanic properties. This means it will react with the $Ca(OH)_2$ originating from the cement hydration.

On the contrary blast-furnace slag is a latent-hydraulic material coming from the steel industry. Just like cement it will react with water, but very slowly. Therefore the material needs to be activated in some way. This can be achieved by the cement hydration product $Ca(OH)_2$.

The current knowledge about the durability behavior and microstructure of HVFA concrete and concrete containing large amounts of BFS, still needs improvement. This paper makes a contribution by characterising the porosity, the gas permeability and the capillary sorption of these two 'green' concretes.

II. CONCRETE MIXTURES

Eight different mixtures were made for the research on HVFA concrete: two reference mixtures (1, 5), one mixture with 35% (2), four mixtures with 50% (3, 6, 7, 8) and one mixture with 67% of the cement replaced by fly ash (4). The mixtures (1, 3, 5, 6) differed regarding the type of cement

used: CEM I 52.5 N in (1, 3) and CEM I 52.5 N HSR in (5, 6). In mixture (7) another fly ash was used in combination with CEM I 52.5 N. Except for mixture (8) all the other mixtures had a W/CM ratio of 0.4. Mixture (8) was the same as mixture (3) but with a W/CM ratio of 0.5. In all mixtures the amount of binder was kept constant at 400 kg/m³. To obtain a sufficient workability, a superplasticizer was added to the mixtures (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7).

Concerning BFS concrete, four different mixes were tested with a W/CM ratio of 0.5. The cement-by-slag replacement levels amounted to 0%, 50%, 70% and 85%. The total amount of binder was kept constant at 350 kg/m³. No admixtures were applied.

III. TEST RESULTS

A. Porosity

Using the vacuum saturation technique [NBN B05-201 (1976)] the amount of pores in contact with the exterior is determined. This parameter, also known as the open porosity, indicates to what extent (harmful) substances can penetrate into the concrete and therefore predicts the durability behavior. By drying in advance the specimens successively at 40 °C and 105 °C to constant mass, rough estimations of the capillary porosity and gel porosity can be made [2].

Due to the slow pozzolanic reaction of the fly ash, it takes a while for the capillary porosity of HVFA concrete to decrease (Fig. 1). A decrease in capillary porosity normally results in an increasing amount of finer gel pores. However, when the cement replacement level is rather high as in mixture (4) no significant reduction in capillary pores is observed.



Fig. 1 Capillary porosity (%) at different ages for the concrete mixtures (1, 2, 3, 4), including standard deviation on individual measurements

The former conclusions are not applicable to BFS concrete. The latent-hydraulic reaction of the slag starts much sooner and moves on more gradually. As a consequence no important decrease in capillary pores will be seen.

Investigation of the relationship between porosity and carbonation of slag concrete shows an increase in capillary pores if the measured carbonation depths of the test specimens increase. The final result is a much more accessible pore structure.

B. Gas permeability

The gas permeability is a transport property of concrete which is strongly related to important durability problems. When gases like O_2 and CO_2 penetrate into the concrete quite easily, problems with corrosion of the steel reinforcements are very likely to occur. This characteristic was determined using the 'cembureau' permeameter as described in RILEM TC 116-PCD (1999) [3]. For both 'green' concrete types an increase in gas permeability is seen if more cement is replaced by fly ash or slag. Fig. 2 shows the results for BFS concrete at the age of one month.

C. Capillary sorption

Capillary flow takes place when unsaturated concrete is in contact with a fluid, in this case water. In general, the amount of water absorbed through capillary suction should be kept as low as possible to avoid durability problems such as corrosion. Sorption coefficients are calculated by taking the results of sorptivity tests based on NBN B15-217 (1984). HVFA concrete and BFS concrete both absorb water faster than ordinary Portland cement concretes (OPC concretes).

D. Influence of air entraining agents

By adding air entraining agents to the mixtures a system of small isolated air bubbles is introduced into the concrete, which will improve the frost resistance significantly [4]. Normally the air bubbles are not forming part of the open porosity. However, by comparing the open porosities of the mixtures (1, 2, 3, 4) with those found by Lammertijn (2007) for similar mixtures containing an air entraining agent, it can be concluded that the use of this admixture leads to higher open capillary porosities [5]. The phenomenon occurs with mixtures containing fly ash and reference concretes.



Fig. 2 Gas permeability k_a (. $10^{-16}\ m^2)$ of the BFS concrete mixtures at the age of one month for three different pressures and a saturation degree of 0%

E. Influence of cement and fly ash type and W/CM ratio

When CEM I 52,5 N HSR is used in concrete a slower hydration rate and strength development must be taken into account [6]. It normally results in a lower capillary porosity, a lower gas permeability (Fig. 3) and a lower sorptivity at a later age in comparison with mixture (1). This is confimed by the experiments. The same assumptions can not be made for concrete containing CEM I 52,5 N HSR and fly ash as mixture (6). Already after one month the gas permeability and sorptivity are lower in comparison with mixture (3), although a higher capillary porosity is measured.



Fig. 3 Gas permeability k_a ($.10^{-16} \text{ m}^2$) of the concrete mixtures (1, 5, 3, 6, 7, 8) at the age of three months for three different pressures and a saturation degree of 0%

The use of fly ash of a different origin in mixture (7) results in capillary porosities similar to those of the references. The gas permeability on the other hand shows significant lower values (Fig. 3). A similar capillary sorption behavior is seen as in mixture (3). The reason why the fly ash, used in mixture (7), reacts like that still needs further research.

A rise in W/CM ratio (0.5 instead of 0.4) as in mixture (8) results in higher values for all tests (e.g. Fig. 3 for gas permeability). The W/CM ratio should be kept as low as possible to achieve a less open and accessible concrete.

IV. CONCLUSIONS

In general, high replacement levels of cement by fly ash will result in a more open and accessible pore structure for the concrete, although the use of a different cement and fly ash type for the 50% mixtures can sometimes prove otherwise. For these mixtures it is not easy to predict the porosity and transport properties. So it is hard to say whether these concretes will have a better or worse corrosion resistance.

A large amount of blast-furnace slag in concrete will cause a higher gas permeability and capillary sorption. Unlike the hydration of fly ash, the latent-hydraulic reaction of the slag does not cause a significant drop in capillary porosity with time. BFS concrete also seems to be very sensitive to carbonation, which causes a rise in capillary porosity.

REFERENCES

- [1] Flower D. J. M. and Sanjayan J. G., *Geen house gas emissions due to concrete*, Int J LCA, 2007.
- [2] Audenaert K., *Transportmechanismen in zelfverdichtend beton in relatie met carbonatatie en chloridepenetratie*, Ghent University, 2006.
- [3] RILEM TC 116-PCD, Permeability of concrete as a criterion of its durability, Materials and Structures, 1999.
- [4] Du L., Folliard K. J., Mechanisms of air entrainment in concrete, Cement and Concrete Research, 2005.
- [5] Lammertijn S., *Carbonatatie en chloride-indringing bij hoog-volumevliegasbeton (HVFA-beton)*, Ghent University, 2007.
- [6] Neville A. M., *Properties of Concrete*, Fourth and Final Edition, Longman Group Limited, 1995.

Inhoudsopgave

Vo	orwo	ord		i
0	verzio	ht		iv
Ex	tend	ed abstr	ract	vi
In	houd	sopgavo	e	viii
Af	korti	ngen er	n symbolen	xiii
1	Inle	iding		1
2	Lite	ratuurs	studie	4
	2.1	Porosi	iteit	4
		2.1.1	Inleiding	4
		2.1.2	Types water	5
		2.1.3	Capillaire porositeit	7
		2.1.4	Gelporositeit	
		2.1.5	Invloed van de droogmethode	
		2.1.6	Invloed van de verzadigingsmethode	
		2.1.7	Besluit	
	2.2	Transp	porteigenschappen	
		2.2.1	Inleiding	
				14

3

	2.2.3	Capillaire wateropslorping	
	2.2.4	Besluit	
2.3	Hoog-	-volume-vliegasbeton	
	2.3.1	Definitie	
	2.3.2	Voorgeschiedenis	
	2.3.3	Soorten	
	2.3.4	Hydratatie	
	2.3.5	Porositeit en transporteigenschappen	
	2.3.6	Invloed van het gebruik van luchtbelvormers	
	2.3.7	Invloed van het type vliegas	
	2.3.8	Interactie luchtbelvormer-vliegas	
	2.3.9	Invloed van het type cement	
	2.3.10) Invloed van de W/CM-factor	
2.4	Beton	met hoogovenslakken	
	2.4.1	Definitie	
	2.4.2	Voorgeschiedenis	
	2.4.3	Hydratatie	
	2.4.4	Porositeit en transporteigenschappen	
	2.4.5	Invloed van de carbonatatie	
Mat	terialen	en methoden	47
3.1	Mater	ialen	
	3.1.1	Samenstelling en korrelverdeling	
	3.1.2	HVFA-mengelingen	
	3.1.3	Mengelingen met hoogovenslakken	
3.2	Metho	oden	
	3.2.1	Vervaardiging	
	3.2.2	Druksterkte	
	3.2.3	Wateropslorping onder vacuüm	
	3.2.4	Gaspermeabiliteit	

3.2.5	Capillaire wateropslorping	.61
3.2.6	Carbonatatie	. 62

4	Res	ultaten	HVFA-beton	66
	4.1	Verwe	erkbaarheid en luchtgehalte	
	4.2	Druks	terkte	
	4.3	Water	opslorping onder vacuüm	
		4.3.1	Open porositeit in functie van de ouderdom	
		4.3.2	Open porositeit in functie van de cementvervanging	74
		4.3.3	Invloed van luchtbelvormers	74
		4.3.4	Invloed van cementtype, vliegastype en W/CM-factor	
	4.4	Gaspe	rmeabiliteit	
		4.4.1	Gaspermeabiliteit in functie van de ouderdom	
		4.4.2	Gaspermeabiliteit in functie van de druk	
		4.4.3	Gaspermeabiliteit in functie van de cementvervanging	
		4.4.4	Invloed van luchtbelvormers	
		4.4.5	Invloed van cementtype, vliegastype en W/CM-factor	
	4.5	Capill	aire wateropslorping	
		4.5.1	Capillaire wateropslorping in functie van de ouderdom	
		4.5.2	Capillaire wateropslorping in functie van de cementvervanging	
		4.5.3	Capillaire wateropslorping in functie van de droogtemperatuur	
		4.5.4	Invloed van luchtbelvormers	
		4.5.5	Invloed van cementtype, vliegastype en W/CM-factor	96
5	Res	ultaten	beton met hoogovenslakken	99
	5.1	Verwe	erkbaarheid en luchtgehalte	
	5.2	Druks	terkte	
	5.3	Water	opslorping onder vacuüm	
		5.3.1	Open porositeit in functie van de ouderdom	
		5.3.2	Open porositeit in functie van de cementvervanging	
	5.4	Gaspe	rmeabiliteit	
		5.4.1	Gaspermeabiliteit in functie van de ouderdom	
		5.4.2	Gaspermeabiliteit in functie van de druk	
		5.4.3	Gaspermeabiliteit in functie van de cementvervanging	
	5.5	Capill	aire wateropslorping	111
		5.5.1	Capillaire wateropslorping in functie van de ouderdom	111
		5.5.2	Capillaire wateropslorping in functie van de cementvervanging	113

B Druksterkte

C Open porositeit Lammertijn (2007)

		5.5.3	Capillaire wateropslorping in functie van de droogtemperatuur	
	5.6	Carbo	natatie	
		5.6.1	Carbonatatiediepte en carbonatatiecoëfficiënt	
		5.6.2	Porositeit na carbonatatie	117
6	Disc	ussie		129
	6.1	HVFA	A-beton	
		6.1.1	Evaluatie porositeit	
		6.1.2	Vergelijking experimentele en theoretische porositeit	
		6.1.3	Verband porositeit-druksterkte	
		6.1.4	Verband porositeit-cementtype	
		6.1.5	Verband porositeit-vliegastype	
		6.1.6	Verband porositeit-gaspermeabiliteit	
		6.1.7	Verband porositeit-capillaire wateropslorping	
	6.2	Beton	met hoogovenslakken	141
		6.2.1	Evaluatie porositeit	141
		6.2.2	Verband porositeit-druksterkte	
		6.2.3	Verband gaspermeabiliteit-druksterkte	
		6.2.4	Verband porositeit-carbonatatie	144
7	Con	clusies		147
	7.1	Beslu	itvorming	147
	7.2	Voors	stellen voor verder onderzoek	
A	Kor	relverd	leling	152
	A.1	Zand.		
	A.2	Granu	ılaten	
	A.3	Vliega	as	

160

155

D	Gaspermeabiliteit		161
	D.1	HVFA-beton	
	D.2	Beton met hoogovenslakken	
E	Cap	illaire wateropslorping	165
	E.1	HVFA-beton	
	E.2	Beton met hoogovenslakken	
F	Cor	relaties	172
	F.1	HVFA-beton	
	F.2	Beton met hoogovenslakken	
Bi	bliogi	rafie	176
Lij	jst va	n figuren	182
Lij	jst va	n tabellen	188

Afkortingen en symbolen

α	Hydratatiegraad	-
α_u	Ultieme hydratatiegraad voor Portland cement	-
Δ	Verschil	
Δh	Potentiaalverschil	m
θ	Vochtigheidsgraad	-
θ_d	Volumefractie vloeistof in droge toestand	-
θ_s	Volumefractie vloeistof bij verzadiging	-
λ	x/\sqrt{t}	$m/s^{1/2}$
μ	Dynamische viscositeit	Ns/m²
ρ_{beton}	Droge schijnbare dichtheid van het beton	kg/m³
$ ho_c$	Massadichtheid van cement	kg/m³
$ ho_F$	Massadichtheid van filler	kg/m³
$ ho_G$	Massadichtheid van granulaten	kg/m³
ρ_i	Massadichtheid van de gebruikte vloeistof	kg/m³
ρ_{VA}	Massadichtheid van vliegas	kg/m³
$\rho_{\rm w}$	Massadichtheid van de vloeistof (water)	kg/m³
ρ_Z	Massadichtheid van zand	kg/m³
σ	Standaardafwijking op de individuele waarden	
φ	Porositeit	-
ϕ_{cap}	Capillaire porositeit	-
ϕ_{cap} theoretisch	Theoretische capillaire porositeit [Lammetijn (2007)]	-
φcarb	Porositeit van de gecarbonateerde zone	-
ϕ_{gel}	Gelporositeit	-
<i>φ</i> ntcarb	Porositeit van de niet-gecarbonateerde zone	-

ϕ_{proef}	Bij vacuümverzadiging bepaalde porositeit	-
ϕ_{tot}	Totale porositeit	-
a	Hoeveelheid carbonateerbaar materiaal per volume-eenheid	
	beton	mol/m³
с	Concentratie	mol/m³
c ₀	Hoeveelheid cement	kg
c ₁	CO ₂ -concentratie aan het oppervlak	mol/m³
c ₂	CO ₂ -concentratie voorbij het carbonatatiefront	mol/m³
\mathbf{f}_{ccub}	Gemiddelde druksterkte	N/mm²
\mathbf{f}_{ck}	Karakteristieke druksterkte	N/mm²
\mathbf{f}_{cm}	Gemiddelde druksterkte	N/mm²
h	Hoogte van het proefstuk	mm
k _a	Schijnbare gaspermeabiliteit	m²
k _{a(S=0)}	Schijnbare gaspermeabiliteit bij verzadigingsgraad $S = 0\%$	m²
$k_{a(S=x)}$	Schijnbare gaspermeabiliteit bij verzadigingsgraad $S = x\%$	m²
k _{a1}	Schijnbare gaspermeabiliteit bij de eerste meting	m²
k _{a2}	Schijnbare gaspermeabiliteit bij de tweede meting	m²
k _{a3}	Schijnbare gaspermeabiliteit bij de derde meting	
	(verzadigingsgraad 0%)	m²
m_1	Massa voor de eerste gaspermeabiliteitsmeting	kg
m ₂	Massa voor de tweede gaspermeabiliteitsmeting	kg
m _d	Massa van het droge proefstuk	kg
m _{d105°C}	Droge massa na droging bij 105 °C	kg
$m_{d80^\circ C}$	Droge massa na droging bij 80 °C	kg
m_l	Massa van het verzadigde proefstuk in een vloeistof	kg
m _s	Massa van het met vloeistof verzadigde proefstuk	kg
pН	zuurtegraad	-
s _f	Standaardafwijking druksterkte	N/mm²
t	Tijd	S
W	Massatoename per eenheid van oppervlakte of	kg/m²
	gemiddelde stijghoogte	mm
\mathbf{W}_0	Hoeveelheid water	kg
X	Carbonatatiediepte	m

Х	Doorstromingslengte (in 2.2.3)	m
X _{CARB}	Carbonatatiediepte na bewaring in de carbonatatiekast	mm
X _{NAT}	Carbonatatiediepte na bewaring in de natte kast	mm
А	Carbonatatiecoëfficiënt	m/s ^{1/2}
А	Doorstromingsoppervlakte, loodrecht op stroomlengte L	m²
A _{lucht}	Carbonatatiecoëfficiënt bij CO ₂ -cencentratie van 0,03%	
	(cfr. lucht) r	nm/week ^{1/2}
Aproef	Carbonatatiecoëfficiënt bij CO ₂ -cencentratie van 10% r	nm/week ^{1/2}
C(HSR)	CEM I 52,5 N HSR	-
C(I)	CEM I 52,5 N	-
C/CM	Verhouding cement tot bindmiddel	-
CANMET	Canada Centre for Mineral and Energy Technology	-
CARB	Na bewaring in de carbonatatiekast	-
СМ	Bindmiddel of cementeerbaar materiaal	-
CSH	Calciumsilicaathydraten	-
D	Capillaire diffusiviteit	m³/s
D	Diffusiecoëfficiënt	m²/s
F	Hoeveelheid filler	kg
F1, F2,	Consitentieklassen flow	-
FA	Vliegas (Fly Ash)	-
FA/CM	Verhouding vliegas tot bindmiddel	-
FAXX	Vliegasmengeling met XX% vliegas	-
G	Hoeveelheid granulaten	-
G_1	Capillaire opslorpingscoëfficiënt voor de randzone	$kg/m^2s^{1/2}$
G_2	Capillaire opslorpingscoëfficiënt voor de kernzone	$kg/m^2s^{1/2}$
GGBFS	Ground Granulated Blast Furnace Slag	-
HSR	Verhoogde bestandheid tegen sulfaten	-
HVFA	Hoog-Volume-Vliegas (High-Volume Fly Ash)	-
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	-
J	flux of stroomsnelheid per oppervlakte-eenheid	mol/m²s
Κ	hydraulische conductiviteit of doorlatendheid	m/s
K _{MC90}	theoretische gasdoorlatendheid [CEB/FIP Model Code 90 (1991)] m²
L	Doorstromingslengte	m

LA	Laag alkaligehalte	-
LBV	Luchtbelvormer	-
LH	Lage hydratatiewarmte	-
LOI	Gloeiverlies (Loss on ignition)	-
Μ	Maximale hoeveelheid vliegas die kan gehydrateerd worden	
	[Jiang et al. (2000)]	-
NAT	Na bewaring in de natte kast	-
P ₁	Stroomopwaartse druk	bar
P_2	Stroomneerwaartse druk	bar
Q	Debiet	m³/s
R ²	Correlatiecoëfficiënt	-
REF	Referentiemengeling	-
RV	Relatieve Vochtigheid	-
S	Capillaire opslorpingscoëfficiënt indien w in kg/m² [G] of	$kg/m^2s^{1/2}$
	capillaire opslorpingscoëfficiënt indien w in mm [H]	$mm/s^{1/2}$
S	Verzadigingsgraad	-
S1, S2,	Consistentieklassen slump	-
SX	Mengeling met X% hoogovenslakken	-
TGA	Thermogravimetrische analyse	-
V	Volume van het proefstuk	m³
VA	Hoeveelheid vliegas	kg
VAC	Na vacuümverzadiging	-
V _{beton}	Droge betonvolume	m ³
\mathbf{V}_{g}	Volumefractie met water gevulde gelporiën	-
V_{hc}	Volumefractie cementgel of gehydrateerd cement	-
V_{hp}	Volumefractie vaste hydratatieproducten	-
V_{nhc}	Volumefractie niet-gehydrateerd cement	-
Vs	Volumefractie gevormde capillaire holten	-
$V_{vloeistof}$	Volume vloeistof in de poriën	m ³
$V_{\rm w}$	Volumefractie vrij of capillair water	-
W	W/CM-factor	-
W/C	Water-Cement-factor	-
W/CM	Water-Cementeerbaar Materiaal-factor	-
Z	Hoeveelheid zand	kg

Hoofdstuk 1

Inleiding

De laatste decennia is de mens er zich meer en meer van bewust geworden dat zijn activiteiten een wezenlijke impact zouden kunnen hebben op het broeikaseffect, een problematiek die vandaag de dag bijzonder actueel is. Dit heeft ertoe geleid dat een aantal jaar terug de Kyoto-normen in voege zijn getreden om de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen aan banden te leggen. In het vierde rapport van het IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) van begin 2007, staat te lezen dat het nu voor meer dan 90 procent zeker is dat de versnelde opwarming van de aarde kan toegeschreven worden aan menselijke activiteiten. Sommige wetenschappers beweren dat het louter naleven van het huidige Kyoto-protocol zelfs onvoldoende is en dat er grotere inspanningen zullen moeten geleverd worden om het tij vooralsnog te doen keren. De mens heeft er dus alle belang bij dat de emissie van CO₂, een van de voornaamste broeikasgassen, in de nabije toekomst zoveel mogelijk wordt teruggeschroefd.

Een van de sectoren die verantwoordelijk is voor een belangrijk aandeel in de CO₂-uitstoot is de betonindustrie, meer bepaald de productie van Portlandklinker. Volgens Humphreys en Mahasenan (2002) moet zo'n 5% van de globale antropogene CO₂-emissie daar worden gezocht. Het productieproces vergt niet alleen zeer veel energie, zo'n 4 GJ/ton [Malhotra en Mehta (2005)], het zorgt er ook voor dat heel wat schadelijke stoffen, waaronder CO₂, in de atmosfeer terechtkomen. Indien de vereiste hoeveelheid energie wordt geleverd door centrales die ook broeikasgassen produceren, is de Portland cementindustrie eigenlijk op twee manieren verantwoordelijk voor de versnelde opwarming van de aarde.

In die optiek dient de ontwikkeling van 'groene' betonsoorten te worden gezien. Daarbij zouden bijproducten van andere industrieën, zoals vliegas en hoogovenslakken, het Portland cement gedeeltelijk gaan vervangen, waardoor de negatieve impact van de cementproductie sterk kan afnemen. In Australië heeft onderzoek uitgewezen dat betonmengelingen waarbij 40% van het cement vervangen wordt door hoogovenslakken, het CO₂-equivalent/m³ zouden reduceren met zo'n 22%. Mengelingen met 25% vliegas gaven een reductie van 13-15% [Flower en Sanjayan (2007)]. Bovendien krijgen de bovengenoemde bijproducten een nuttige bestemming door ze als cementvervanging aan te wenden en worden ze niet langer als afvalproducten beschouwd.

Een gedeeltelijke vervanging van het cement is op zich niet nieuw. Het toevoegen van vliegas en hoogovenslakken aan beton wordt in de praktijk al jaren vrij courant toegepast. De motieven hiervoor waren eerder van economische dan van ecologische aard. Aangezien cement de duurste component van beton is, lijkt het uiteraard interessant als cement gedeeltelijk kan gesubstitueerd worden door goedkopere stoffen. Tot op heden is het vervangingspercentage echter altijd vrij beperkt gebleven en dit om de eenvoudige reden dat er nog steeds onvoldoende kennis voorhanden is omtrent het duurzaamheidgedrag van hoog-volume-vliegasbeton (HVFA-beton) en beton met een hoog percentage aan hoogovenslakken. Verder onderzoek daaromtrent is dan ook nog altijd aangewezen.

Er bestaan twee benaderingswijzen om uitspraken te doen over de duurzaamheid van beton. Enerzijds kan beton rechtstreeks blootgesteld worden aan verschillende fenomenen waartegen het een voldoende weerstand zou moeten kunnen bieden. Een dergelijke aanpak laat toe om te kijken in welke mate beton beschadigd wordt, maar vertelt niet welke mechanismen er aan de basis van liggen.

Anderzijds is het mogelijk om uitspraken te doen over de duurzaamheid aan de hand van een studie van de microstructuur. Deze kan onder meer gekarakteriseerd worden door de porositeit en de transporteigenschappen van het beton. In dit eindwerk zullen deze parameters bestudeerd worden voor HVFA-beton en beton met een hoog percentage aan hoogovenslakken. Er zijn tal van methoden beschikbaar om de porositeit te bepalen. Dit gaat van zeer eenvoudige technieken zoals bijvoorbeeld de wateropslorping onder vacuüm, tot meer complexe proefmethoden, met name elektronenmicroscopie, air void analyse, kwikporosimetrie, ... Niettegenstaande het feit dat deze laatste technieken een heel stuk duurder uitvallen, leveren ze niet altijd betere resultaten op. Daarom wordt in dit eindwerk geopteerd voor de wateropslorping onder vacuüm. Voor de bepaling van de transporteigenschappen wordt eveneens gebruik gemaakt van meer eenvoudige technieken. De mate waarin gassen zich doorheen beton verplaatsen, wordt afgeleid uit gaspermeabiliteitsproeven, terwijl het vloeistoftransport dan weer volgt uit proeven die de wateropslorping meten.

Het spreekt vanzelf dat de microstructuur en de duurzaamheid van beton hand in hand gaan. Het zou dan ook aangewezen zijn om beide aspecten samen te bestuderen. Aangezien het onderzoeksprogramma te uitgebreid zou worden, zal hier enkel worden ingegaan op de porositeit en de transporteigenschappen van HVFA-beton en beton met hoogovenslakken als eerste indicatoren voor de duurzaamheid. Een studie van de verschillende schadefenomenen op lange termijn valt echter buiten het kader van dit werk.

Daarnaast zal er ook gekeken worden naar de verschillende factoren die de porositeit en de transporteigenschappen zouden kunnen beïnvloeden. Over HVFA-beton blijft de literatuur daaromtrent dikwijls nogal vaag.

Zo wordt doorgaans vrij gemakkelijk aanvaard dat hulpstoffen zoals luchtbelvormers, slechts een te verwaarlozen invloed zouden hebben op deze parameters. In dit eindwerk zal worden nagegaan of dit effectief het geval is.

Ook is het niet altijd duidelijk of het type cement dat gebruikt wordt, nu al dan niet een rol speelt. Bovendien is van vliegas geweten dat eigenschappen zoals het gloeiverlies en de fijnheid, kunnen verschillen al naargelang de herkomst. Er zal daarom worden nagegaan in welke mate de hierboven vermelde onderzoeksparameters erdoor beïnvloed worden.

Beton met vliegas heeft doorgaans een grotere verwerkbaarheid, waardoor er minder water kan gebruikt worden. Het is daarom nuttig eens te kijken hoe de porositeit en de transporteigenschappen variëren in functie van de 'water-cementeerbaar materiaal'-factor (W/CM-factor).

Deze invloedsfactoren worden hier enkel bekeken voor HVFA-beton. Daar er aan het Laboratorium Magnel voor Betononderzoek al een aantal jaar onderzoek verricht wordt naar dit type beton, is het mogelijk om meerdere factoren tegelijkertijd te onderzoeken en dan een vergelijking te maken met reeds beschikbare proefresultaten. Het onderzoek naar beton met hoogovenslakken daarentegen, loopt nog niet zo lang waardoor minder parameters onder de loep kunnen worden genomen. Er zal wel worden getracht om voor beide betonsoorten uitgaande van de porositeit en de transporteigenschappen, uitspraken te doen over de duurzaamheid. Zo zal bijvoorbeeld specifiek voor beton met hoogovenslakken worden nagegaan hoe de porositeit verband houdt met de mogelijke carbonatatie van het beton en omgekeerd.

Hoofdstuk 2

Literatuurstudie

2.1 Porositeit

2.1.1 Inleiding

De porositeit is een maat voor het totale volume poriën dat in het beton aanwezig is. De sterkte en de duurzaamheid hangen in belangrijke mate af van deze parameter. Poreus beton vertoont immers een geringere sterkte en is toegankelijker voor schadelijke stoffen. Beton met een lage porositeit geniet daarom de voorkeur.

Met betrekking tot de aantasting van buitenaf is voornamelijk de open porositeit van belang. Deze omvat de poriën die via de buitenoppervlakken van het beton toegankelijk zijn. Het spreekt vanzelf dat vooral de grote poriën het duurzaamheidsgedrag bepalen, aangezien de schadelijke vloeistoffen en gassen de gemakkelijkste weg zullen volgen bij het binnendringen van het beton. Een bijkomende vereiste voor transport is dat de poriën op een of andere manier met elkaar in verbinding staan. Grote luchtporiën die niet opgenomen zijn in een netwerk van holtes, zullen daarom het transportgedrag maar in beperkte mate beïnvloeden. Ze liggen doorgaans wel aan de basis van een geringere sterkte van het beton. Wat de duurzaamheid betreft, zullen vooral de capillaire poriën van belang zijn [Audenaert (2006)]. De diameter van deze poriën varieert tussen de 10 en 500 nm [Mindess en Young (1981)]. Holtes met nog kleinere afmetingen worden geclassificeerd als gelporiën. In de praktijk wordt 10 nm niet altijd als grens aangenomen. In [Espinoza en Franke (2006)] waar de poriënstructuur wordt gekarakteriseerd met behulp van kwikporosimetrie, komt de overgang tussen capillaire poriën en gelporiën overeen met een

straal van 25 nm. Tabel 2.1 geeft een overzicht van de in het artikel gehanteerde poriënindeling.

naam	straal	omschrijving
gelporiën	< 1,0 nm	micro-gelporiën
	1,0 – 25 nm	meso-gelporiën
capillaire poriën	25 – 50 nm	micro-capillaire poriën/meso capillaire poriën
	50 nm – 1 μm	macro-capillaire poriën

Tabel 2.1: Classificatie van de holten [Espinosa en Franke (2006)]

Dat het onderscheid tussen beide types poriën niet altijd eenduidig vastligt, blijkt onder meer ook uit de door St John et al. (1998) vooropgestelde classificatie. Hierbij worden holten met afmetingen tussen 2,5 en 10 nm zowel gelporiën als capillaire poriën genoemd, zoals blijkt uit Tabel 2.2. De omschrijving geeft aan dat het toch eerder om kleine capillairen gaat. Dit doet evenwel de vraag rijzen waarom ze niet gewoon tot de capillaire poriën worden gerekend.

naam	diameter	omschrijving	beïnvloede eigenschappen
gelporiën	< 0,5 nm	'interlayer' nanoporiën	krimp en kruip
	0,5 – 2,5 nm	nanoporiën	krimp en kruip
gelporiën en capillaire	2,5 – 10 nm	kleine capillairen	krimp tussen 50% en 80%
poriën			relatieve vochtigheid
capillaire poriën	10 – 50 nm	medium capillairen	sterkte,
			doorlaatbaarheid,
	0,05 – 10 µm	grote capillairen	krimp hoge relatieve
			vochtigheid, sterkte,
			doorlaatbaarheid
luchtholten	0,005 – 1,0 mm	ingebrachte luchtholten	sterkte
	0,01 mm – groot	ingesloten luchtholten	sterkte
	0,25 – 2 mm	schuim (cellenbeton)	sterkte en volumemassa

Tabel 2.2: Classificatie van de holten [St John et al. (1998)]

Zowel de capillaire poriën als de gelporiën staan in relatie met de verschillende types water die in cementgebonden materialen voorkomen. Daarom is het van belang om daar in de volgende paragraaf op in te gaan. Daarnaast zullen ook de capillaire porositeit, de verschillende invloedsfactoren en de gelporositeit worden toegelicht.

2.1.2 Types water

In de literatuur [Feldman en Serada (1968), Taerwe en De Schutter (1996-2006), Audenaert (2006)] wordt doorgaans een onderscheid gemaakt tussen drie types water.

1. Vrij of capillair water

Dit is de hoeveelheid water die zal verdampen wanneer het cementgebonden materiaal blootgesteld wordt aan een temperatuur van 105 °C. Net zoals bij het fysisch gebonden water zal de hoeveelheid vrij water in belangrijke mate afhangen van de relatieve vochtigheid (RV).

2. Fysisch gebonden water

Dit type water, ook wel het gelwater genoemd, zal eveneens verdampen bij 105 °C. Het bestaat voor een deel uit water dat fysisch geadsorbeerd is aan het oppervlak van de hydratatieproducten van het beton. De rest zit vervat in een monomoleculaire waterfilm die tussen de vlakke kristallisatieproducten gebonden is en als 'interlayer water' wordt gedefinieerd. De mate waarin dit type water voorkomt is ook hier sterk afhankelijk van de relatieve vochtigheid. Wanneer deze eerder aan de lage kant is, wordt soms maar één laagje water fysisch gebonden aan het oppervlak van de hydratatieproducten. Hoge relatieve vochtigheden daarentegen, zullen er dan weer voor zorgen dat veel meer watermoleculen gebonden worden. Op plaatsen waar de hydratatieproducten van het cementgebonden materiaal dicht bij elkaar liggen, zal het fysisch gebonden water gaan condenseren als capillair water. Bij een RV van ongeveer 80 % zullen de gelporiën volledig gevuld zijn met water.

3. Chemisch gebonden water

Het chemisch gebonden water is een vast onderdeel van de reactieproducten en wordt in de praktijk bepaald door het materiaal te verwarmen tot 1000 °C. In tegenstelling tot de twee vorige types water, zal het dus niet verdampen bij 105 °C. Ook de relatieve vochtigheid speelt hier geen rol.

Fig. 2.1 is een schematische weergave van de verharde microstructuur van cementpasta en de verschillende types water die erin voorkomen [Feldman en Serada (1968)].



Fig. 2.1: Microstructuur en types water in verharde cementpasta [Feldman en Serada (1968)]

2.1.3 Capillaire porositeit

Theoretische capillaire porositeit

Het hierboven genoemde vrij of capillair water bevindt zich in de capillaire poriën van het beton. Volgens de poriëntheorie van Powers en Brownyard (1946-1947) worden deze poriën gevormd bij de hydratatie doordat de vaste hydratatieproducten een kleiner absoluut volume innemen dan de som van de absolute volumes aan water en cement. Zelfs in het geval dat de juiste hoeveelheid water wordt gebruikt, zal voor Portland cement het volume aan vrije holten toch zo'n 18,5% van het totale betonvolume uitmaken [Powers en Brownyard (1946-1947)]. Een teveel aan water zal dit poriënvolume nog extra doen toenemen. Specifiek voor cementpasta's worden in functie van de toenemende hydratatiegraad α verschillende volumefracties onderscheiden, namelijk de gevormde capillaire holten (V_s), het vrij of capillair water (V_w), het niet-gehydrateerd cement (V_{nhc}) en de cementgel of het gehydrateerd cement (V_{hc}). De laatste fractie wordt opgesplitst in de vaste hydratatieproducten (V_{hp}) enerzijds, en de met water gevulde gelporiën (V_g) anderzijds. De volumetrische opbouw van de cementpasta in functie van de hydratatiegraad α wordt grafisch voorgesteld in Fig. 2.2. Het schema is ontleend aan Audenaert (2006).



Fig. 2.2: Volumetrische opbouw van de cementpasta in functie van de hydratatiegraad [Audenaert (2006)]

De verhouding van het totaal volume aan capillaire poriën dat met een vloeistof kan worden gevuld ($V_{vloeistof}$), over het droge betonvolume (V_{beton}) bepaalt de capillaire porositeit.

Algemeen kan de porositeit in formulevorm als volgt worden weergegeven [Audenaert (2006)]:

$$\varphi = \frac{V_{vloeistof}}{V_{beton}} = \frac{\frac{m_s - m_d}{\rho_w}}{\frac{m_d}{\rho_{beton}}} = \frac{\frac{m_s - m_d}{\rho_w}}{V} = \frac{m_s - m_d}{V\rho_w}$$
(2-1)

Daarin zijn de volumes telkens vervangen door de verhouding van de desbetreffende massa's over de overeenkomstige dichtheden. De verkregen formule bevat als parameters: de massa van het met vloeistof verzadigde proefstuk m_s [kg], de massa van het droge proefstuk m_d [kg], de dichtheid van de vloeistof ρ_w [kg/m³] en de droge schijnbare dichtheid van het beton ρ_{beton} [kg/m³]. In een volgende stap wordt de noemer van de

formule terug vervangen door het volume van het proefstuk V [m³]. Volgens de wet van Archimedes kan het volume V eenvoudig worden bepaald met behulp van de formule:

$$V = \frac{m_s - m_l}{\rho_i} \tag{2-2}$$

Daarbij staat m_s voor de massa van het met vloeistof verzadigde proefstuk [kg], m_l voor de massa van het verzadigde proefstuk in een vloeistof [kg] en ρ_i voor de dichtheid van de gebruikte vloeistof [kg/m³].

Indien voor de bepalingen van de porositeit en het volume van het proefstuk dezelfde vloeistof wordt gebruikt, dan kan formule (2-1) zodanig worden omgevormd dat ze nog slechts afhankelijk is van drie parameters, met name m_s , m_d en m_l :

$$\varphi = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_l} \tag{2-3}$$

Experimentele capillaire porositeit

De massa's voorkomend in formule (2-3), kunnen experimenteel op een vrij eenvoudige manier worden bepaald door middel van o.a. ovendroging en een wateropslorping onder vacuüm. Een beschrijving van de gehanteerde proefmethode is terug te vinden in paragraaf 3.2.3.

Invloed van de droogtemperatuur en de droogperiode

Om uit formule (2-3) specifiek de capillaire porositeit te kunnen afleiden, dient de droge massa m_d te worden gedefinieerd. Deze massa stemt overeen met de betonmassa waaruit enkel het vrij of capillair water verdwenen is. Daarvoor moeten de proefstukken bij een bepaalde temperatuur worden gedroogd tot constante massa.

In Audenaert (2006) wordt een temperatuur van 40 ± 5 °C naar voor geschoven. Na een droogtermijn van 14 dagen is het verdere massaverlies over 24 uur doorgaans kleiner dan 0,1% van de massa. Om na te gaan in welke mate het totale massaverlies zo wordt onderschat, zijn in Audenaert (2006) ook betonproefstukken gedroogd geweest over een periode van 3,5 jaar. Daaruit is gebleken dat bij een droogperiode van 14 dagen de onderschatting van het totale massaverlies zo'n 1,7% bedraagt. Dit betekent dat er na 14

dagen nog altijd water in de de holten aanwezig is en de capillaire porositeit bijgevolg wordt onderschat.

In Lammertijn (2007) wordt 45 ± 2 °C als droogtemperatuur aangenomen. Ook daar wordt melding gemaakt van een onderschatting van de porositeit met ongeveer 2%.

Het water dat er niet is uitgegaan na 14 dagen drogen bij 40 ± 5 °C, bestaat voor een deel uit vrij of capillair water en voor een deel uit gelwater [Audenaert (2006)]. In beton op basis van Portland cement zijn er maximaal 4 lagen watermoleculen geadsorbeerd [Powers en Brownyard (1946-1947)]. Volgens Powers (1960) blijven er bij langdurig droge omstandigheden (25 °C en 40-50% RV) nog ongeveer 2 van de 4 moleculair gebonden lagen die deel uitmaken van het gelwater, over.

Langdurig drogen bij 40 \pm 5 °C resulteert dus eigenlijk al in een overschatting van de capillaire porositeit, aangezien reeds een deel van het gelwater aan het beton onttrokken wordt (zie Fig 2.3).



Fig. 2.3: Grafische voorstelling capillaire porositeit

Invloed van de relatieve vochtigheid

In paragraaf 2.1.2 werd reeds gesteld dat een hoge relatieve vochtigheid in de capillaire poriën ervoor kan zorgen dat een deel van het fysisch gebonden water kan gaan condenseren als vrij water. Daarom is het van belang dat er naast een vaste temperatuur ook een bepaalde relatieve vochtigheid wordt aangehouden bij het drogen. In Audenaert (2006) bedraagt deze 40%.

2.1.4 Gelporositeit

De gelporiën maken deel uit van het gehydrateerd cement dat opgebouwd is uit een structuur van calciumsilicaathydraten (CSH). De dichtheid van deze structuur neemt af met de afstand tot de kern van de gehydrateerde cementkorrel. Bijgevolg vertonen de CSH nabij de kern een hogere dichtheid en dus een lagere gelporositeit [Audenaert (2006)]. Deze gelporositeit is gelijk aan de verhouding van het volume aan dit type poriën ten opzichte van het totale betonvolume. Opnieuw kan deze porositeit, zij het op een onrechtstreekse manier, worden bepaald aan de hand van formule (2-3). De massa m_d die daarvoor moet worden gehanteerd, komt overeen met de massa van het proefstuk waaruit naast het capillair water ook het gelwater verdwenen is. Deze massa is op een eenvoudige manier te bepalen door de proefstukken te drogen bij 105 °C tot constante massa. Met deze droge massa kan de totale porositeit (φ_{tot}) worden berekend. De eigenlijke gelporositeit (φ_{cap}) van af te trekken:

$$\varphi_{gel} = \varphi_{tot} - \varphi_{cap} \tag{2-4}$$

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 dehydratatieproces 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.

2.1.5 Invloed van de droogmethode

Naast de droogtemperatuur, de droogperiode en de relatieve vochtigheid, kan ook de droogmethode de porositeit beïnvloeden. In dit eindwerk wordt gebruik gemaakt van slechts één droogtechniek, namelijk het ovendrogen. Andere drogingstechnieken zijn onder meer vacuümdrogen en vriesdrogen. Om de porositeit te bepalen kan in plaats van te drogen, het aanwezige water ook door een solvent vervangen worden. Volgens gegevens uit de literatuur zouden, al naargelang de gehanteerde techniek, verschillende resultaten voor de porositeit worden bekomen.

Zo stelt Gallé (2001) bijvoorbeeld vast dat de droogmethode een niet te verwaarlozen invloed heeft op de totale waterporositeit (ϕ_{tot}) van cementachtige materialen. Droging in een oven bij 60 °C en vacuümdroging zouden gelijkaardige resultaten voor de totale porositeit opleveren. Vriesdrogen zou dan weer lagere waarden geven.

Volgens Espinosa en Franke (2006) zou vriesdroging echter een onomkeerbare verandering in de poriënstructuur teweegbrengen. De onttrekking van het niet bevroren gelwater uit de microporiën zorgt immers voor een samendrukking van de cementgel met een instorting van de CSH-microstructuur tot gevolg. Daardoor kan het zijn dat de meso-gelporiën geheel of gedeeltelijk worden ingesloten door de cementgel en er na droging meer water aanwezig blijft. De poriën die daardoor minder toegankelijk zijn, worden ook wel 'ink bottle'-poriën genoemd. Bovendien gaat de samendrukking van de cementgel gepaard met een toename van de capillaire porositeit. Vriesdroging leidt met andere woorden tot een grovere poriënstructuur.

2.1.6 Invloed van de verzadigingsmethode

Naast de drogingstechniek, kan de gebruikte verzadigingsmethode ter bepaling van de porositeit een rol spelen. In Safiuddin en Hearn (2005) worden drie verzadigingstechnieken zoals beschreven in ASTM, geëvalueerd, namelijk de verzadiging met koud water, de verzadiging met kokend water en de vacuümverzadiging. Daarbij zou de laatste techniek hogere waarden voor de porositeit opleveren. De laagste porositeiten worden bekomen bij verzadiging met koud water. Voor dit eindwerk werd echter alleen gebruik gemaakt van de vacuümverzadiging.

2.1.7 Besluit

Zowel de capillaire porositeit als de gelporositeit kunnen experimenteel op een vrij eenvoudige manier door middel van een vacuümverzadiging na ovendroging worden bepaald. Daarbij dient te worden vermeld dat andere droog- en verzadigings-technieken doorgaans andere resultaten voor de verschillende porositeiten zullen opleveren. In het geval van ovendroging spelen de droogtemperatuur, de droogperiode en de relatieve vochtigheid een belangrijke rol.

2.2 Transporteigenschappen

2.2.1 Inleiding

De mate waarin beton toegankelijk is voor schadelijk stoffen, geldt als een fundamentele parameter voor de duurzaamheid. Een nadere studie van de verschillende transportmedia die de indringing van deze stoffen mogelijk maken, is daarom aangewezen. Het betreft het transport door middel van gassen en vloeistoffen. Bovendien kunnen de genoemde media zelf schade veroorzaken. Volgens Lammertijn (2007) is met de aanwezigheid van zuurstofgas en water immers al aan twee van de drie voorwaarden voldaan voor wapeningscorrosie. Indien daarnaast ook koolstofdioxide het beton kan binnendringen, zal het wapeningsstaal onder invloed van carbonatatie een depassivering ondergaan en is ook aan de derde corrosievoorwaarde voldaan. Dit laatste fenomeen wordt meer uitgebreid behandeld in paragraaf 2.4.5.

Wat het gastransport betreft zijn er twee mechanismen die spelen, namelijk gasdoorlatendheid ten gevolge van een drukgradiënt en diffusie ten gevolge van een concentratiegradiënt.

Volgens Audenaert (2006) zou het laatste mechanisme voor een bouwmateriaal als beton, op enkele uitzonderingen na, enkel van belang zijn wanneer aan beide zijden van de constructie lucht voorkomt met een verschillende relatieve vochtigheid. Het gaat daarbij telkens om een mengsel van lucht en waterdamp, waarvan de waterdampconcentratie verschilt.

Voor HVFA-beton en beton met hoogovenslak zal hier enkel het eerste mechanisme worden onderzocht. Een duidelijk voorbeeld uit de praktijk van gastransport door een drukgradiënt is de doordringing van beton met O_2 - en CO_2 -gas onder invloed van de winddruk.

Het vloeistoftransport hangt af van twee transportmechanismen. Enerzijds is er de waterdoorlatendheid onder invloed van een drukgradiënt. Anderzijds kunnen vloeistoffen ook worden opgenomen door capillaire opzuiging ten gevolge van verschillen in oppervlaktespanning. In dit eindwerk zal voor HVFA-beton en beton met hoogovenslakken enkel het laatste mechanisme worden bestudeerd.

Volgens Audenaert (2006) zal het eerste mechanisme voor een 'goed' beton in normale omstandigheden minder sterk doorwegen. Een evaluatie van de waterdoorlatendheid zou pas aan de orde zijn in situaties waar betonconstructies vloeistoffen moeten kunnen tegenhouden. Daarnaast zou deze parameter ook gelden als een betrouwbare indicator waarmee de invloed van scheuren op de duurzaamheid kan worden nagegaan. Daar geen van beide zaken tot de doelstellingen van dit onderzoek behoort, zal de waterdoorlatendheid hier niet verder worden behandeld.

Een nadere toelichting van de capillaire wateropslorping, het tweede mechanisme, is wel aangewezen, aangezien het fenomeen zich in de meeste betonconstructies voordoet. Bovendien kan de capillaire opslorping in verband gebracht worden met de in paragraaf 2.1 behandelde porositeit [Audenaert (2006)]

2.2.2 Gaspermeabiliteit

Theoretische gaspermeabiliteit

Een theoretische uitdrukking voor de gaspermeabiliteit of de gasdoorlatendheid ten gevolge van een drukgradiënt, is gebaseerd op de wet van Darcy voor stationaire laminaire viskeuze stroming doorheen een verzadigd poreus medium (2-5):

$$Q = AK \frac{\Delta h}{L} \tag{2-5}$$

met:	Q	=	debiet [m ³ /s]
	А	=	doorstromingsoppervlakte, loodrecht op L [m ²]
	Κ	=	hydraulische conductiviteit of doorlatendheid [m/s]
	Δh	=	potentiaalverschil [m]
	L	=	doorstromingslengte [m]

Het genoemde potentiaalverschil komt overeen met het hoogteverschil tussen de vloeistofniveaus van de piëzometers aan het begin en uiteinde van het medium. Uit formule (2-5) kan de volgende uitdrukking voor de gaspermeabiliteit worden afgeleid:

$$k_a = \frac{2Q}{A} \frac{\mu L P_2}{\left(P_1^2 - P_2^2\right)}$$
(2-6)

met:	k _a	=	schijnbare gaspermeabiliteit [m²]	
	Q	=	debiet [ml/s]	
	μ	=	dynamische viscositeit [Ns/m ²]	
		=	2,02.10 ⁻⁵ Nsm ⁻² (voor O ₂ bij 20 °C)	
	L	=	doorstromingslengte van het proefstuk [m]	
	А	=	doorstromingsoppervlakte, loodrecht op L [m ²]	
	\mathbf{P}_1	=	stroomopwaartse druk [bar]	
	P_2	=	stroomneerwaartse druk [bar]	

Voor de bewijsvoering van deze formule wordt verwezen naar Boel (2006).

Experimentele gaspermeabiliteit

Bij de experimentele bepaling van de gaspermeabiliteit wordt het debiet van een inert gas doorheen beton opgemeten bij een bepaalde druk. Daarmee kan dan de gaspermeabiliteit worden berekend op basis van formule (2-6). Dit levert echter maar een schatting op van de werkelijke gasdoorlatendheid, aangezien de wet van Darcy niet zomaar toepasbaar is op gassen vanwege hun samendrukbaarheid en hun niet-viskeus karakter. Bovendien gaat de formule enkel op voor laminaire stroming van gassen. Dit regime zou niet in alle poriën van het netwerk gelden. Soms is de stroming immers van moleculaire aard en kan de wet van Darcy niet worden ingeroepen. De gaspermeabiliteitscoëfficiënt varieert dan met de opgelegde druk [Abbas et al. (1999)].

De coëfficiënt k_a uit formule (2-6) wordt daarom de schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt genoemd.

Invloed van de verzadigingsgraad

Volgens Abbas et al. (1999) neemt de schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt toe naarmate de verzadigingsgraad afneemt. Wanneer minder poriën gevuld zijn met water, kan een gas zich immers gemakkelijker een weg banen doorheen het poriënnetwerk. Er staan dan meer droge poriën met elkaar in verbinding.

Om de invloed van de verzadigingsgraad op de gaspermeabiliteit beter te kunnen evalueren, wordt een relatieve gaspermeabiliteit k_r gedefinieerd. Daarbij wordt er van uitgegaan dat de verzadigingsgraad over het hele proefstuk constant is [Verdier (2004)]. De parameter komt overeen met de verhouding van de schijnbare gaspermeabiliteit bij een verzadigingsgraad S = x % ($k_{a(S=x)}$) tot de schijnbare gaspermeabiliteit bij verzadigingsgraad S = 0 % ($k_{a(S=0)}$). De relatieve gaspermeabiliteit maakt een vergelijking van de gasdoorlatendheid bij verschillende verzadigingsgraden mogelijk.

Voor de vergelijking van verschillende betonsoorten onderling, is het aangewezen om gewoon naar de schijnbare gaspermeabiliteit van de droge proefstukken te kijken [Boel (2006)].

Invloed van de droogtemperatuur

Volgens Carcassès et al. (2002) hangt de keuze van de droogtemperatuur af van een aantal parameters.

Vooreerst is er de vooropgestelde duur van de proef. Indien een snelle bepaling van de gaspermeabiliteit gewenst is, zal bij een hogere temperatuur gedroogd moeten worden. Droging bij 105 °C is in dergelijke gevallen aangewezen.

Als het daarentegen eerder de bedoeling is om de gaspermeabiliteit bij zoveel mogelijk verzadigingsgraden te kennen, dan is een lage droogtemperatuur van bijvoorbeeld 50 °C aan de orde. Dit betekent evenwel dat de proef vrij veel tijd in beslag zal nemen.

Een lage droogtemperatuur kan bovendien ook de voorkeur genieten om zeker te zijn dat de poriënstructuur niet beschadigd wordt bij droging. In paragraaf 2.1.4 werd reeds gewezen op de mogelijke risico's van droging bij 105 °C. In Gardner et al. (2005) wordt onderzocht in hoeverre de eigenlijke gasdoorlatendheid afhangt van de droogtemperatuur. De gaspermeabiliteit na droging tot constante massa wordt er bepaald voor twee droogtemperaturen, namelijk 85 en 105 °C. De bekomen resultaten zouden weinig van elkaar verschillen. Daaruit wordt geconcludeerd dat de eventuele geringe beschadiging die na droging bij 105 °C optreedt, maar een geringe invloed heeft op de gasdoorlatendheid.

Voor de bepaling van de gaspermeabiliteit maken Gardner et al (2005) echter gebruik van een 'Nitrogen Gas Relative Permeability Test'. Niettegenstaande het feit dat deze techniek op basis van stikstofgas dan wel sterk mag verschillen van de permeameter die gebruikt wordt door Carcassès et al. (2002), zijn de bevindingen omtrent de droogtemperatuur vermoedelijk algemeen geldig.

De droogprocedure die uiteindelijk door Carcassès et al. (2002) wordt voorgesteld is een compromis. Door eerst te drogen bij 80 °C en pas daarna bij 105 °C, kan de gaspermeabiliteit toch binnen een aanvaardbare termijn bij 3 verschillende verzadigingsgraden worden bepaald. Deze procedure wordt ook in dit eindwerk gevolgd. Ze wordt nader toegegelicht in paragraaf 3.2.4.

2.2.3 Capillaire Wateropslorping

Capillaire stroming komt tot stand wanneer een niet verzadigd materiaal in aanraking komt met een vloeistof. Volgens Audenaert (2006) zijn er in dat geval twee mogelijke scenario's.

- Wanneer het materiaal vrij lang in contact is met de vloeistof, kan zich na verloop van tijd een permanent regime instellen. Het voorbeeld wordt gegeven van een betonconstructie die met één zijde onafgebroken is blootgesteld aan water. Indien het opgeslorpte water langs de andere zijde kan verdampen, kan een permanent regime worden bereikt.
- 2. Indien het materiaal niet permanent in aanraking is met de vloeistof, zal van een permanent regime geen sprake zijn. Daarbij wordt het voorbeeld aangehaald van een betonconstructie waarvan een van de oppervlakken tijdelijk is blootgesteld aan een regenbui.

Het spreekt vanzelf dat beide scenario's in de praktijk vrij courant voorkomen.

Theoretische capillaire wateropslorping

De formule voor de capillaire wateropslorping kan net als die voor de gaspermeabiliteit worden afgeleid vertrekkende van de wet van Darcy (2-5). Na enige bewijsvoering bekomt Audenaert (2006) de volgende uitdrukking:

$$-\frac{\lambda}{2}\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(D\frac{d\theta}{d\lambda} \right)$$
(2-7)

Met:	λ	=	$x/\sqrt{t} [m/s^{1/2}]$
	θ	=	vochtigheidsgraad [-]
	D	=	capillaire diffusiviteit [m ³ /s]
	х	=	doorstromingslengte [m]
	t	=	tijd [s]

Deze vergelijking is oplosbaar bij $\theta = \theta_s$ voor $\lambda = 0$ en bij $\theta = \theta_d$ voor $\lambda \rightarrow \infty$, met θ_s de volumefractie vloeistof bij verzadiging en θ_d de volumefractie vloeistof in droge toestand. Uitdrukking (2-8) geeft de globale oplossing voor vergelijking (2-7):

$$x(\theta, t) = \lambda(\theta) t^{\frac{1}{2}}$$
(2-8)

Daaruit blijkt dat de doorstroomlengte x functie is van de vochtigheidsgraad θ en de tijd t. De hoeveelheid geabsorbeerde vloeistof volgt daarbij een \sqrt{t} -verband. Integratie van voorgaande uitdrukking levert de totale hoeveelheid geabsorbeerde vloeistof w in functie van de tijd op:

$$w = \int_{\theta_d}^{\theta_s} x d\theta = t^{\frac{1}{2}} \int_{\theta_d}^{\theta_s} \lambda(\theta) d\theta = S t^{\frac{1}{2}}$$
(2-9)

De parameter w kan op twee manieren worden weergegeven, namelijk als massatoename per eenheid van oppervlakte [kg/m²] of als gemiddelde stijghoogte [mm]. In het eerste geval wordt de opslorpingscoëfficiënt S uitgedrukt in kg/m²s^{1/2}, in het tweede geval geldt mm/s^{1/2} als eenheid. De opslorpingscoëfficiënten worden dan respectievelijk G en H genoemd. Aangezien volgens Audenaert (2006) de gemiddelde stijghoogte in het beton niet altijd even gemakkelijk te bepalen is, zal hier enkel worden gekeken naar de gemiddelde massatoename per oppervlakte-eenheid.

Experimentele capillaire wateropslorping

Het theoretisch model (2-9) wordt in Audenaert (2006) ook getoetst aan proefresultaten voor zelfverdichtend beton en traditionele betonsamenstellingen. Het vooropgestelde model blijkt echter geen uitgesproken lineair verloop te vertonen. Voor de massatoename in functie van \sqrt{t} worden curven gevonden die aanvankelijk snel stijgen en daarna afvlakken. Er is met andere woorden sprake van twee opslorpingscoëfficiënten voor de massatoename, namelijk G₁ en G₂. De eerste coëfficient wordt gevonden door de richtingscoëfficiënt te nemen van het snel stijgende gedeelte van de curve. Dit stemt overeen met de massatoename over de eerste zes uur van de proef. G₂ komt dan weer overeen met de richtingscoëfficiënt van het curvegedeelte op langere termijn (vanaf 72 uur na het opstarten tot het einde van de proef). Voor een beschrijving van het exacte proefverloop wordt verwezen naar paragraaf 3.2.5.

De twee opslorpingscoëfficiënten zijn volgens Audenaert (2006) toe te schrijven aan een verschillende samenstelling van de kern- en randzone van het beton. In de directe omgeving van 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. Voortgaande op deze veronderstelling, wordt het bestaan van twee opslorpingscoëfficiënten eveneens verwacht bij HVFA-beton en beton met hoogovenslakken.

Invloed van de verzadigingsgraad

Zoals formule (2-9) aangeeft, is naast de tijd t ook de vochtigheidsgraad θ bepalend voor de capillaire wateropslorping. Hoe hoger het initieel vochtgehalte van het beton ligt, des te lager de absorptie zal zijn. Dit wordt in de literatuur onder meer door Martys en Ferraris (1997) en Nokken en Hooton (2002) op basis van proefresultaten bevestigd. De temperatuur en de relatieve vochtigheid waarbij de proefstukken vóór de test worden bewaard, zullen daarbij een belangrijke rol spelen.

Invloed van de droogtemperatuur

Om het verband te kunnen nagaan met de in paragraaf 2.1 behandelde porositeiten, zullen voor de proeven ter bepaling van de capillaire opslorping dezelfde droogtemperaturen worden aangehouden als voor de porositeitsproeven, namelijk 40 en 105 °C. Voor een
kritische evaluatie van de droogtemperaturen wordt opnieuw verwezen naar paragrafen 2.1.3 en 2.1.4.

Invloed van de poriënstructuur

Nokken en Hooton (2002) geven 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.

Volgens Powers (1947) zijn de poriënafmetingen van betonsamenstellingen met een lage W/CM-factor kleiner. Bovendien staan de poriën ook minder met elkaar in verbinding. In Nokken en Hooton (2002) worden lagere capillaire opslorpingen waargenomen voor lagere W/CM-factoren. Een verminderde connectiviteit van de poriën zou dus de overhand hebben op een eventuele verfijning van de poriënstructuur door een lagere W/CM-factor.

De capillariteitsproeven werden uitgevoerd op cilinders met een diameter van 100 mm en een hoogte van 50 mm, afkomstig uit boorkernen. Er was dus geen sprake van een verschil in samenstelling tussen de kern en de randzone van de proefstukken, aangezien er geen afstrijk- en bekistingsvlakken waren. Volgens Nokken en Hooton (2002) is het verschil in initiële wateropslorping en de opslorping op langere termijn te wijten aan de verminderde connectiviteit van de poriën.

2.2.4 Besluit

Formules voor zowel de gasdoorlatendheid ten gevolge van een drukgradiënt, als de wateropname door capillaire opslorping, volgen uit de wet van Darcy. Bij de experimentele bepaling van de overeenkomstige gaspermeabiliteits- en wateropslorpingscoëfficiënten zijn de verzadigingsgraad en de droogtemperatuur de voornaamste invloedsfactoren. Ook de poriënstructuur speelt een rol. Zo kan de stroming van gassen doorheen een poreus medium bij bepaalde poriënafmetingen niet als laminair worden beschouwd. In dergelijke gevallen is formule (2-6) eigenlijk niet geldig. Voor de capillaire wateropslorping zijn de afmetingen en de connectiviteit van de poriën van belang.

2.3 Hoog-volume-vliegasbeton

2.3.1 Definitie

Hoog-volume-vliegasbeton (HVFA-beton) is een beton waarbij een groot percentage van het cement (50% of meer) door het puzzolaan vliegas wordt vervangen. Vliegas is een nevenproduct van de verbranding van poederkool in elektriciteitscentrales. De as wordt met behulp van elektrostatische en mechanische filters uit de geproduceerde rookgassen gehaald. Naast het gebruik als extra fijne vulstof in beton kan het product vanwege zijn puzzolane eigenschappen ook als gedeeltelijke cementvervanging worden aangewend. Op die manier heeft dit materiaal, dat vroeger eigenlijk louter als afvalproduct werd gezien, toch nog een nuttige bestemming gekregen.

2.3.2 Voorgeschiedenis

Zoals hierboven reeds werd aangegeven, bezit vliegas puzzolane eigenschappen. Het begrip 'puzzolaan' heeft betrekking op de plaats Pozzuoli in de omgeving van Napels [Malhorta, Mehta (1996)]. Sinds de uitbarsting van de Vesuvius in 79 n.C, werd daar in grote hoeveelheden vulkanische tufsteen aangetroffen. De Romeinen voegden deze puzzolaanaarde toe aan kalkmortel om het mengsel hydraulisch te maken. Het gebruik van natuurlijke puzzolanen dateert echter al van veel vroeger. Natuurlijke puzzolanen worden doorgaans aangetroffen in gebieden waar vulkanische activiteit heerst of is geweest.

De productie van kunstmatige puzzolanen zoals onder meer vliegas, is daarentegen van veel recentere datum. In 1914 werd ontdekt dat vliegas qua chemische samenstelling grote gelijkenissen vertoont met de natuurlijke puzzolanen. 23 jaar later kwam er duidelijkheid omtrent de specifieke chemische werking van het materiaal [Taerwe en De Schutter (1996-2006)]. De verbranding van poederkool in elektriciteitscentrales kwam pas algemeen in gebruik na de Tweede Wereldoorlog [Bijen (1996)]. In de decennia die daarop volgden, werden de mogelijkheden afgetast om vliegas in cement en beton te gebruiken.

Tot in de jaren '80 van vorige eeuw bleef het percentage cement dat door vliegas vervangen werd, altijd vrij beperkt. In 1986 werd het begrip 'hoog-volume-vliegasbeton' voor het eerst geïntroduceerd door Malhorta van het CANMET (Canada Centre for Mineral and Energy technology) [Malhorta en Mehta (2005)]. Verder onderzoek naar het duurzaamheidsgedrag van HVFA-beton is tot op heden nog altijd aan de orde.

2.3.3 Soorten

Volgens [ASTM C618-03 (2003)] kan vliegas worden onderverdeeld in twee categorieën.

• Klasse C

Deze soort heeft een vrij hoog calciumgehalte (soms meer dan 10 %). Hierdoor heeft de vliegas naast puzzolane ook in zekere mate hydraulische eigenschappen.

• Klasse F

Dit type vliegas heeft een laag calciumgehalte en vertoont daardoor een uitsluitend puzzolane werking. Vliegas afkomstig uit België behoort tot deze klasse.

2.3.4 Hydratatie

Door de aanwezigheid van een puzzolaan materiaal verloopt de hydratatie van HVFAbeton in twee fasen.

Eerst zal het aanwezige cement met het aanmaakwater reageren tot onoplosbare calciumsilicaathydraten (CSH). Als bijkomend reactieproduct wordt $Ca(OH)_2$ gevormd. Vervolgens zal de vliegas daarmee een reactie aangaan waaruit opnieuw CSH ontstaan [Lammertijn (2007)]. De betrokken reactievergelijkingen zien er als volgt uit:

1) Portland cement:
$$C_3S + H_2O \rightarrow CSH + Ca(OH)_2$$

2) Puzzolaan: $Vliegas + Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow CSH$

Een dergelijk hydratatieverloop zal de eigenschappen van HVFA-beton in belangrijke mate bepalen, en dit zowel op het vlak van sterkte als van duurzaamheid.

2.3.5 Porositeit en transporteigenschappen

Volgens Malhorta en Mehta (2005) vertoont HVFA-beton een lage waterpermeabiliteit onder druk. Wanneer cilindervormige betonproefstukken onderworpen worden aan een uniaxiale stroming bij een uniaxiale druk van 2,7 MPa, bedraagt de waterdoorlatendheid 10⁻¹³ m/s. Gelijkaardige mengelingen louter en alleen op basis van Portland cement, leveren waarden op die ongeveer een factor 10 hoger liggen. Het verschil wordt toegeschreven aan de lagere porositeit en de discontinue poriënstructuur van HVFA-beton.

In Shafiq en Cabrera (2004) wordt de totale porositeit bepaald van betonmengelingen met 0%, 40% en 50% vliegas. De W/CM-factor bedroeg respectievelijk 0,55; 0,49 en 0,48. Een deel van de proefstukken werd eerst vochtig nabehandeld in een 'fog room', een ander deel kreeg een droge nabehandeling (20 °C en 65% RV). Alvorens ze te beproeven, werden de proefstukken bij vier verschillende relatieve vochtigheden (75, 65, 40 en 12%) bewaard tot constante massa. Uit het onderzoek blijkt dat de mengelingen met 50% vliegas, na een vochtige nabehandeling bij een hoge relatieve vochtigheid, de laagste totale porositeit vertonen. Beton met vliegas presteert op dat vlak dus beter dan traditioneel beton. Bij de vliegasmengelingen worden bij een langere vochtige nabehandeling ook lagere waarden voor de gaspermeabiliteit, de waterdoorlatendheid onder druk en de zuurstofdiffusie gevonden. In het geval van een droge nabahandeling geeft het traditioneel beton betere resultaten.

Ramezanianpour en Malhorta (1995) komen tot analoge bevindingen wat nabehandeling betreft. Om een zo laag mogelijke porositeit te kunnen realiseren, is een continue vochtige nabehandeling, zeker in het geval van HVFA-beton, noodzakelijk. Desondanks geeft een beton met 58% vliegas en een W/CM-factor van 0,35 toch nog altijd een hogere porositeit dan een gewone Portland cementmengeling met een W/CM-factor van 0,5.

Uit het onderzoek van Tracz en Śliwiński (2006) naar de invloed van het cementtype op de de gaspermeabiliteit van beton met hoge sterkte, blijkt dat de hoogste waarden worden bekomen voor cement waaraan 27% vliegas met een hoog silicagehalte is toegevoegd. Mengelingen op basis van normaal Portland cement, cement met 10% silica fume of cement met 32 of 51% hoogovenslakken, geven lagere waarden. Door middel van kwikporosimetrie wordt bij de mengeling met het eerstgenoemde cement ook een hoger percentage poriën groter dan 100 nm vastgesteld, hetgeen wijst op een hogere capillaire porositeit.

In Gopalan (1996) worden voor de capillaire wateropslorping bij beton met 40% vliegas lagere wateropslorpingscoëfficiënten [mm/uur^{1/2}] gevonden dan bij traditionele mengelingen. De enige voorwaarde is wel dat de vliegasmengelingen gedurende 7 dagen een vochtige nabehandeling ($23 \pm 2 \ ^{\circ}$ C en 95 $\pm 3\%$ RV) krijgen. Na een droge nabehandeling ($23 \pm 2 \ ^{\circ}$ C en 50 $\pm 3\%$ RV) presteert beton met vliegas immers minder goed dan traditioneel beton.

2.3.6 Invloed van het gebruik van luchtbelvormers

Definitie

Een luchtbelvormer is een hulpstof die aan het verse betonmengsel wordt toegevoegd om een groot aantal kleine, geïsoleerde luchtbellen te genereren en na uitharding in stand te houden. Op deze manier kan een beton met een verhoogde vorstweerstand geconcipieerd worden.

Voorgeschiedenis

Het kunstmatig inbrengen van luchtbellen in beton is een techniek die destijds werd ontwikkeld in de VS. Het gunstig effect ervan op de vorstweerstand van beton werd eigenlijk bij toeval ontdekt. In de jaren '30 van vorige eeuw werd op een gegeven moment vastgesteld dat bepaalde betonnen wegdekken veel beter bestand waren tegen aantasting door vorst en dooizouten dan andere. Omdat de prestaties zo sterk verschilden, werd een uitgebreid onderzoek ingesteld naar dit fenomeen. Daaruit bleek dat de aanwezigheid van talk, harsen en smeerolie in het beton zorgt voor meer fijn verdeelde luchtbellen waardoor een betere weerstand tegen vorst- en dooizoutenschade gerealiseerd wordt [Wright (1953), van de Fliert (1955)].

Werking

In verschillende publicaties wordt de goede verspreiding van luchtbellen over het beton aan een verlaagde oppervlaktespanning toegeschreven.

Bosschart (1951) legt dit principe uit aan de hand van een luchtbel en een zeepbel in een glas water. Een luchtbel in water heeft de neiging om samen te trekken tot een bol met een zo klein mogelijke oppervlakte. Het is alsof er rond de aanwezige lucht een dun vlies gevormd wordt. Wanneer een tweede luchtbel in de buurt komt, zullen ze versmelten tot één grote bel met opnieuw een zo klein mogelijke oppervlakte. Er wordt gesteld dat deze luchtbellen een grote oppervlaktespanning vertonen. Indien dergelijke bellen in de betonspecie aanwezig zijn, verzetten ze zich tegen elke vorm van verdichting. De granulaten kunnen niet dichter bij elkaar komen en de zandkorrels worden verhinderd de holtes tussen de grovere granulaten op te vullen. Tijdens het uitdrogen breken de

luchtbellen en indien de lucht kan ontsnappen, blijft er een holte achter die met water kan gevuld worden.

Zeepbellen in water daarentegen, gedragen zich helemaal anders. Ze laten zich veel gemakkelijker vervormen en opdelen in kleinere bellen. Omwille van hun specifieke moleculaire opbouw, vertonen zepen een lage oppervlaktespanning. Een zeepmolecule bestaat immers uit twee delen: een kop die zeer goed oplost in water, en een staart die prefereert in lucht te vertoeven (zie Fig. 2.4).



Fig. 2.4: Zeepmoleculen met hydrofiele kop en hydrofobe staart [Du en Folliard (2005)]

De zeepmoleculen willen dus zoveel mogelijk deel uitmaken van de zeepbel, waardoor het oppervlak vergroot en de oppervlaktespanning daalt. Een dergelijke zeepbel in beton schept veel minder problemen op het vlak van verdichting. Zo zullen de zandkorrels zich veel gemakkelijker tussen de grovere granulaten begeven. Bovendien delen de zeepbellen zich vrij vlug op in kleinere bellen met een groter luchtoppervlak, waardoor nog meer zeepmoleculen kunnen worden opgenomen. Uit deze redenering volgt ook dat zeepbellen niet zullen samenvloeien, want dit zou betekenen dat er moleculen moeten wijken. Op die manier is het mogelijk zeer veel kleine, fijn verdeelde luchtbellen in het beton te genereren. Bosschart (1951) geeft echter aan dat zepen in de praktijk nooit kunnen worden aangewend als luchtbelvormer, aangezien ze reageren met cement tot een onoplosbare kalkzeep die de hydratatie bemoeilijkt. De producten die wel in aanmerking komen als luchtbelvormer, worden beschreven in de volgende paragraaf.

Types luchtbelvormer

Chatterji (2003) onderscheidt twee soorten luchtbelvormers. De eerste soort omvat alle producten die met het $Ca(OH)_2$ in de cementpasta reageren tot onoplosbare calciumzouten. De werking van een dergelijk type luchtbelvormer steunt niet op de verlaging van de oppervlaktespanning. Het is de aanwezigheid van de hydrofobe calciumzouten ter hoogte van de contactvlakken tussen water, lucht en cement, die ervoor zorgt dat een systeem van luchtbellen ontstaat. Helmuth (1961) toonde echter aan dat de calciumzouten ondanks hun hydrofoob karakter, niet kunnen verhinderen dat 36% van de gecreëerde holtes zich toch vullen met water. Onder dit type luchtbelvormers worden onder meer vinsolhars, natriumadipaat en natriumoleaat gerekend.

De synthetische tensiden vormen de tweede soort. Het zijn ketens van alifatische en/of aromatische koolwaterstoffen met een wateroplosbare groep zoals -SO₄, -SO₃ of -OH aan één kant. De calciumzouten die hier ontstaan, zijn wel oplosbaar in water. Veel van deze luchtbelvormers vertonen een zogenaamd 'Krafft-punt', waaronder de oplosbaarheid sterk afneemt. Dergelijke luchtbelvormers dienen dan ook boven deze kritische temperatuur bewaard te worden. De werking van deze stoffen steunt op de verlaging van de oppervlaktespanning. Voorbeelden van dergelijke luchtbelvormers zijn natriumdecyl-sulfonaat en dodecylhexaoxyethyleen.

Verband met de vorstaantasting

Zoals reeds werd aangegeven, zullen kunstmatig gegenereerde luchtbellen de vorstweerstand van het beton gevoelig verhogen. Om de werking van luchtbelvormers beter te begrijpen, worden eerst de mechanismen van de vorst- en dooiaantasting besproken. In de literatuur worden verschillende theorieën naar voor geschoven.

Vooreerst is er de theorie van Powers die steunt op het **hydraulische drukmechanisme** [Boel (2006), Mehta (2001)]. Wanneer beton aan vorst wordt blootgesteld, begint er zich op bepaalde plaatsen ijs te vormen. Aangezien de faseovergang van water naar ijs gepaard gaat met een volumetoename van 9 %, betekent dit dat het nog niet bevroren water op een of andere manier zal moeten wijken. Lukt dit niet, dan kunnen zich lokaal hydraulische overdrukken ontwikkelen met interne spanningen tot gevolg. Wanneer de treksterkte van de cementsteen overschreden wordt, zullen er microscheuren ontstaan die een nefaste invloed hebben op de mechanische sterkte en de duurzaamheid. Uitgaande van deze theorie, wordt de vorstweerstand van beton met luchtbelvormer verbeterd doordat nog niet bevroren water kan uitwijken naar de aanwezige luchtholtes, zodanig dat er zich nergens spanningen kunnen ontwikkelen. Hierdoor verkleint de kans op vorstschade aanzienlijk.

De bovengenoemde theorie wordt ook beschreven in Chatterji (2003). Daarin staat dat volgens Powers, de chemische structuur van de luchtbelvormers geen enkele invloed heeft op de vorstweerstand. De bevindingen van Powers worden ook kritisch geëvalueerd door Helmuth (1961), een van zijn medewerkers. Deze laatste deed een aantal vaststellingen die niet te verklaren zijn met Powers' theorie. Zo zouden de ingebrachte luchtbellen helemaal niet leeg zijn: 36% ervan zou zich binnen de 24 uur vullen met water. Door de oppervlaktespanning verdeelt dit water zich in ringvormige lagen over het luchtbeloppervlak. Aangezien Powers aangeeft dat de ijsvorming homogeen verloopt, zou die daar juist moeten beginnen. Dit wil zeggen dat bij verdere ijsvorming, de watertoevoer naar de luchtbellen onmogelijk wordt. Daarnaast stelde Helmuth (1960) ook vast dat de capillaire poriën en de gelporiën helemaal niet hoeven verzadigd te zijn om schade te hebben. Op basis van deze bevindingen weerlegde hij het hydraulische overdrukmechanisme. Hij slaagde er evenwel niet in om dit te verklaren, met als gevolg dat de voorkeur is blijven uitgaan naar de stellingen van Powers.

De **capillaire ijslenstheorie** staat bijna haaks op de theorie van Powers. Het nog niet bevroren water zou helemaal niet uit de bevriezingszone worden verdreven, maar eerder worden aangetrokken. Er wordt verondersteld dat het aanwezige water eerst in de grote poriën zal bevriezen en pas daarna in de kleine, aangezien het vriespunt van water omgekeerd evenredig is met de straal van de porie [Baron (1993)], wat blijkt uit Fig. 2.5.



Fig. 2.5: Verband tussen de straal van de poriën en de temperatuur waarbij water bevriest [Baron (1993)]

Wanneer al het water in een grote porie bevroren is, zal water uit de kleinere poriën migreren naar de grote. Dit is te verklaren aan de hand van het ijsoverdrukmechanisme. Door een drukverschil tussen de grote porie en de nabijgelegen kleinere poriën, kan het ijskristal steeds verder aangroeien. De drukgradiënt is het gevolg van de oppervlaktespanning tussen water en ijs (cfr. de capillaire spanning tussen lucht en water). Hoe kleiner de straal van de omliggende kleinere poriën, des te groter is de overdruk in de grotere porie. Deze overdrukken creëren opnieuw trekspanningen in de cementsteen, waardoor microscheuren kunnen ontstaan. De ijsoverdruk is vooral afhankelijk van de transportsnelheden van het water en/of de waterdamp. Deze zijn over het algemeen niet erg hoog, zodanig dat het ijsoverdrukmechanisme maar een rol begint te spelen bij langdurige vorstperioden. De vorstwerende werking van luchtbelvormers is op basis van de capillaire ijslenstheorie als volgt te verklaren. Door de aanwezigheid van een grote hoeveelheid luchtbellen met quasi dezelfde afmetingen, zal er geen transport van water optreden. Ijsoverdrukken blijven daardoor uit.

Later poneerde Powers nog een tweede theorie [Boel (2006)], namelijk dat het **osmotische drukmechanisme** aan de basis zou liggen van eventuele vorstschade. De concentratie aan alkaliën in het poriënwater en het feit dat de temperatuur waarbij water bevriest, afhangt van de grootte van de poriën, zijn de twee invloedsfactoren die daarbij belangrijk zijn.

Zoals reeds in de voorgaande theorie werd aangegeven, treedt er eerst ijsvorming van zuiver water op in de grote poriën. Hierdoor verhoogt de alkaliniteit van het nog niet bevroren water. Dit heeft voor gevolg dat uit de omringende cementpasta een minder geconcentreerde oplossing naar de luchtholten wordt toegetrokken om het thermodynamisch evenwicht te kunnen bewerkstelligen. Er is dus sprake van een alkaliconcentratiegradiënt die leidt tot een verlaagde alkaliconcentratie van het resterende onbevroren water, waardoor bijkomend ijs kan gevormd worden. Zolang er een uitgesproken luchtholtesysteem in het beton aanwezig is, levert dit mechanisme geen problemen op. Zoniet zullen onder invloed van het blijvende concentratieverschil de osmotische drukken blijven toenemen. Op een gegeven moment wordt de treksterkte van het beton overschreden en ontstaat er vorstschade.

Copuroğlu (2006) geeft een beschrijving van de **dooitheorie**. Zo zou de vorstschade niet optreden tijdens het vriezen, maar eerder tijdens het dooien. Wanneer de temperatuur terug naar omhoog gaat, ontstaan spanningen omdat de thermische uitzettingscoëfficiënt van ijs

vijf maal groter is dan die van beton. Ook in dit geval zal de aanwezigheid van een adequaat luchtholtesysteem het risico op vorstschade aanzienlijk reduceren.

De eerste twee mechanismen, met name het hydraulische drukmechanisme en het ijsoverdrukmechanisme, worden als de voornaamste oorzaken van vorstschade gezien. De aanwezigheid van luchtbelvormers in beton zorgt ervoor dat beide fenomenen geen nadelige gevolgen meer hebben. Het kunstmatig ingebrachte luchtholtesysteem fungeert immers als expansieruimte voor het bevriezende water. Deze holtes zouden zelfs bij volledige verzadiging open blijven, aangezien er door de luchtbelvormer een water-afstotende laag gevormd wordt op de binnenwanden [Boel (2006)].

Het luchtholtesysteem in relatie tot de vorstweerstand

In Boel (2006) wordt ook ingegaan op de eigenschappen van het luchtholtesysteem die invloed hebben op de vorst-dooibestandheid. Een voldoende hoog luchtgehalte volstaat immers niet. Hierna wordt een kort overzicht gegeven van de verschillende invloedsfactoren.

Een vorstbestendig beton heeft een minimum **luchtgehalte**. De afstand tussen de holtes mag niet te groot zijn. Daartegenover staat dat het aandeel lucht ook niet te hoog mag zijn. Elke procent lucht in beton correspondeert met een afname van de druksterkte met 5%. Om die reden bedraagt het volume lucht meestal maar 4 à 6% [Taerwe en De Schutter (1996-2006), Mehta (2001)]. Tenslotte mag het totale volume aan luchtholten niet te groot zijn om een te grote doorlatendheid te vermijden.

In de praktijk blijkt het niet altijd evident te zijn om een bepaald luchtgehalte daadwerkelijk in het beton te realiseren. Vaak overschrijdt het finale luchtgehalte de vooropgestelde waarde, wat niet altijd wenselijk is. Dit probleem werd onder meer vastgesteld door Weigel et al. (1990) bij gebruik van de luchtbelvormer 'MicroAir'. Onderzoek wees uit dat het luchtgehalte in de eerste 20 minuten na het samenvoegen van de verschillende bestanddelen nog toeneemt en zich pas daarna stabiliseert. Een te vroege opmeting van de hoeveelheid lucht leidt dus tot een onderschatting van het werkelijke luchtgehalte.

De **afstandsfactor** is de gemiddelde afstand die het water binnen de cementpasta moet afleggen om een luchtholte te bereiken. De onderlinge afstand tussen de verschillende holten is veel belangrijker dan het totale luchtgehalte. In geval van keuze tussen grote luchtbellen met een grote afstandsfactor of een groot aantal kleine luchtbellen met een veel kleinere afstandsfactor, zal de tweede mogelijkheid de voorkeur genieten. Doorgaans wordt 200 μ m als maximale afstandsfactor aangenomen [Taerwe en De Schutter (1996-2006)].

Uit het voorgaande blijkt dus dat eerder een groot **aantal** kleine luchtbellen verkozen wordt. Volgens Boel (2006) spelen vooral de luchtholten met een **diameter** kleiner dan 300 μ m een rol wat de vorstbestandheid betreft. Taerwe en De Schutter (1996-2006) stellen dat de diameter van de holtes meestal begrepen is tussen de 50 en 150 μ m.

2.3.7 Invloed van het type vliegas

In paragraaf 2.3.3 werden twee types vliegas onderscheiden op basis van het aanwezige calciumgehalte, namelijk klasse C en klasse F vliegas. Dit betekent echter niet dat verschillende stalen vliegas van dezelfde klasse in samenstelling volledig aan elkaar gelijk zijn.

Herkomst

Vliegas kan nogal verschillen al naargelang de herkomst. Malhorta en Mehta (2005) zijn de mening toegedaan dat er naar de toekomst toe, toch een zekere uniformisering moet mogelijk zijn mits de nodige inspanningen. Het streven naar een homogener vliegas is economisch verantwoord, aangezien er zo grotere hoeveelheden in de betonindustrie kunnen worden aangewend waardoor er minder kosten uitgaan naar de opslag van dit nevenproduct van de kolencentrales.

Chemische samenstelling

De chemische samenstelling van vliegas afkomstig van dezelfde kolencentrale, kan ook sterk variëren. Veel zou te maken hebben met de herkomst van de gebruikte kolen en de afregeling van de verbrandingsovens. Volgens Malhorta en Mehta (2005) hangen de puzzolane eigenschappen van vliegas niet zozeer af van de chemische samenstelling, maar van de mineralogie en de korrelafmetingen. Ook zouden de meeste moderne kolencentrales over het algemeen vliegas van vrij goede kwaliteit leveren. Dergelijk vliegas wordt gekenmerkt door een laag koolstofgehalte en een hoog percentage aan glasachtig materiaal. 75% van de deeltjes of meer, hebben een diameter die kleiner is dan 45 µm.

Invloed van de reductie van NO_x, SO_x en fijn stof

De bevindingen van Malhorta en Mehta (2005) gaan echter voorbij aan het feit dat de huidige generatie vliegas toch enigszins verschilt van die van enkele decennia geleden. In de loop der jaren werden overal immers veel inspanningen geleverd om de uitstoot van stikstofhoudende oxiden (NO_x) sterk terug te schroeven [Malhorta en Mehta (1996)]. Dit geldt ook voor de door fossiele brandstoffen aangedreven elektriciteitscentrales waar vliegas geproduceerd wordt. In de VS bijvoorbeeld, heeft de invoering van de 'Clean Air Act'-amendementen in 1990 er bijvoorbeeld toe geleid dat heel wat krachtcentrales verplicht werden over te schakelen naar branders met een lage NO_x-uitstoot [Hill et al. (1997)]. Volgens een rapport van het 'Dutch Center for Civil Engineering Research and Codes' (1991) kan de emissie van NO_x worden verminderd door de gebruikelijke verbrandingstemperatuur in dergelijke centrales naar omlaag te halen. Dit heeft uiteraard een weerslag op de kwaliteit van de vliegas. Doordat de fossiele brandstoffen bij een lagere temperatuur worden verstookt, gebeurt het dat de vliegasmineralen met een hoog smeltpunt niet volledig zullen smelten. Bijgevolg ontstaan er meer conglomeraten van aan elkaar gesinterde deeltjes in plaats van de afzonderlijke sferische deeltjes die bij hogere temperaturen worden gevormd. Aangezien hierdoor het gehalte aan deeltjes kleiner dan 10 µm daalt, zullen de reactiviteit en de pakkingsdichtheid van de vliegas verminderen. Dergelijke vliegas is daardoor van een iets lagere kwaliteit. Volgens Hill et al. (1997) zouden de mindere prestaties eerder toe te schrijven zijn aan de aanwezigheid van meer onverbrande koolstof.

Het inperken van de NO_x -emissie is slechts één aspect. Bij de verbranding dient ook de uitstoot van **zwavelhoudende oxiden** (**SO**_x) zo minimaal mogelijk te worden gehouden. Het gebruik van kolen met een laag zwavelgehalte biedt echter niet meteen een oplossing aangezien daardoor de emissie van **fijn stof** in de hand wordt gewerkt. Vliegas moet immers een lading hebben om door de elektrostatische filters uit de rookgassen te kunnen worden gehaald. Bij de verbranding van kolen met een laag zwavelgehalte, is de geproduceerde vliegas minder goed in staat zijn lading te handhaven [Defrancq (2007)], waardoor de fijne deeltjes de lucht worden ingestuurd. Door zwavel- of

ammoniumverbindingen in de rookgasstroom te injecteren kan dit probleem enigszins verholpen worden. De eerste optie is uiteraard niet zo bevorderlijk voor het milieu aangezien de SO_x -emissies hierdoor opnieuw toenemen. De tweede optie kan dan weer tot complicaties leiden wanneer dergelijk vliegas wordt aangewend in beton. Wanneer ammoniumverbindingen reageren met het alkalisch cement kan daaruit zuiver ammoniak ontstaan met geurhinder tot gevolg. Een zorgvuldige dosering van de gebruikte hoeveelheden is daarom noodzakelijk zodat enkel de efficiëntie van de elektrostatische filters verhoogt, zonder dat de verbindingen door de vliegas worden opgenomen [Jones et al. (2006)].

Invloed van bijstookmateriaal

Tegenwoordig worden aan de fossiele brandstoffen bijstookmaterialen, zoals biomassa en plantaardige materie, toegevoegd ter beperking van de CO₂-uitstoot. Zolang deze secundaire brandstoffen maar in beperkte mate worden aangewend, heeft dit weinig gevolgen voor de vliegas die eruit voortkomt. Een nauwgezette controle daaromtrent is echter wel nog altijd aangewezen [Jones et al. (2006)]. Daarom worden in NBN EN 450-1 (2005) beperkingen opgelegd inzake de toegelaten hoeveelheid en het type bijstookmateriaal. Door deze restricties in acht te nemen, wordt er voor gezorgd dat de eigenschappen van vliegas, geproduceerd met of zonder bijstookmateriaal, niet significant van elkaar verschillen. Experimenteel onderzoek gevoerd door Jones et al. (2006), bevestigt deze bevindingen.

Een evoluerende regelgeving

De ontwikkeling van de huidige generatie vliegas is gedurende al die jaren gepaard gegaan met een sterke evolutie in de regelgeving rond het gebruik van dit materiaal in beton [Jones et al. (2006)]. Vanaf de eerste toepassing in de jaren '30 van vorige eeuw, werden er al specifieke eisen gesteld aan dit puzzolaan. In een van de eerste grondige technische beoordelingen van vliegas door Davis et al. (1937), werden reeds beoordelingscriteria over het gloeiverlies en de 45µm-fijnheid, die in de meest recente Europese norm NBN EN 450-1 (2005) nog altijd aan de orde zijn, naar voor geschoven.

Het gloeiverlies

Het gloeiverlies (Loss On Ignition: LOI) is een parameter die traditioneel wordt bepaald voor cement, om op een conventionele manier de kwaliteit ervan te karakteriseren. Daarbij wordt het potentiële massaverlies opgemeten, nadat het cement gedurende 1 uur verhit werd bij temperaturen van om en bij de 1000 °C. Op basis daarvan kan dan de aanwezigheid van niet tot klinker gesinterde kalk- en magnesiumverbindingen worden nagegaan [Taerwe en De Schutter (1996-2006)].

Volgens NBN B 12-001 (1994) mag het gloeiverlies van een cementsoort CEM I niet groter zijn dan 5%. Voor cementsoorten die vliegas kunnen bevatten, zoals CEM II en CEM V, zijn geen grenswaarden opgegeven.

Het gloeiverlies kan ook specifiek voor vliegas worden bepaald. De bekomen waarden hebben te maken met de aanwezigheid van onverbrand koolstofhoudend materiaal. Een hoger gloeiverlies resulteert in een hoger specifiek oppervlak van de vliegas, wat een aantal gevolgen heeft indien het product wordt aangewend in beton. Zo zal er meer aanmaakwater nodig zijn om een beton met een normale consistentie te bekomen. Er zullen bijvoorbeeld ook grotere hoeveelheden luchtbelvormer aan het verse betonmengsel moeten worden toegevoegd om een voldoende hoog luchtgehalte te bekomen. Hetzelfde geldt voor andere hulpstoffen zoals waterreduceerders. Het gloeiverlies heeft dan wel geen invloed op de sterkteontwikkeling van het beton, toch kan het luchtgehalte, bij toepassing van luchtbelvormers, significant verschillen met het gloeiverlies, hetgeen wel tot uiting zal komen in de druksterkte [Jones et al. (2006)].

Er is met andere woorden wel degelijk sprake van een zekere interactie van dergelijke hulpstoffen met de aanwezige vliegas. In paragraaf 2.3.8 wordt deze interactie met betrekking tot luchtbelvormers nader bestudeerd.

In NBN EN 450-1 (2005) worden op basis van het gloeiverlies, drie categorieën vliegas toegelaten:

- Categorie A: $LOI \le 5,0\%$
- Categorie B: $2,0\% \leq \text{LOI} \leq 7,0\%$
- Categorie C: $4,0\% \leq \text{LOI} \leq 9,0\%$

De fijnheid

Net zoals bij cement kan ook voor vliegas de maalfijnheid door middel van zeving worden bepaald. Daarbij wordt gebruik gemaakt van een zeef met een maasopening van 45 μ m. Afhankelijk van de hoeveelheid materiaal die op de zeef blijft liggen, onderscheidt NBN EN 450-1 (2005) twee fijnheidscategoriën voor vliegas:

- Categorie N: zeefrest $\leq 40\%$ met een limiet van $\pm 10\%$ op de gemiddelde waarde
- Categorie S: zeefrest $\leq 12\%$

Andere parameters

Naast het gloeiverlies en de maalfijnheid worden voor vliegas nog heel wat andere parameters bepaald zoals het oxidegehalte, de vereiste hoeveelheid water, de autoclaafexpansie, de activiteitsindex, de dichtheid van de vliegasdeeltjes, enz. In de huidige norm NBN EN 450-1 (2005) zijn de bepalingen rond deze parameters echter weinig veranderd ten opzichte van vroeger. De bespreking ervan komt daarom in dit eindwerk niet aan bod.

2.3.8 Interactie luchtbelvormer-vliegas

Relatie luchtbelvormer-beton met vliegas

In het kader van dit eindwerk is het interessant om te weten of het gebruik van luchtbelvormers specifieke gevolgen heeft voor de porositeit en de transporteigenschappen van beton met vliegas. In hoofdstuk 1 werd er reeds op gewezen dat de literatuur daaromtrent nogal vaag blijft. Artikels over luchtbelvormers focussen doorgaans enkel op de verbetering van de weerstand tegen vorst- en dooiaantasting van het beton door het incorporeren van dergelijke hulpstoffen [Chatterji (2003)]. Een duurzaam beton is echter meer dan alleen een vorstbestendig beton. Het is dus ook noodzakelijk dat de porositeit en de transporteigenschappen telkens worden geëvalueerd. Ze gelden immers als eerste indicatoren voor de mogelijke aantasting door carbonatatie of chloride-indringing, twee schadefenomenen die aan de basis liggen van wapeningscorrosie [Lammertijn (2007)]. Er wordt echter vrij gemakkelijk aanvaard dat luchtbelvormers een systeem van geïsoleerde luchtbellen in het beton tot stand brengen. De luchtholten zouden dus geen deel uitmaken aanwezige poriënnetwerk en bijgevolg de open porositeit en van het de

transporteigenschappen niet beïnvloeden. Wellicht omwille van de vrij algemeen aanvaarde opvatting over deze hulpstof, werden de bovengenoemde parameters nog te weinig onderzocht.

Als in de literatuur melding wordt gemaakt van het transportgedrag, dan is dit doorgaans vrij kort. In Kropp (1995) beweert Kasai (1986) bijvoorbeeld over een traditioneel beton met een zetmaat van 20 cm, dat de in-situ gas- en waterpermeabiliteit nauwelijks beïnvloed worden door de toevoeging van luchtbelvormers. Bij beton met een lagere zetmaat zou de permeabiliteit zelfs afnemen door het verdichtingsproces dat met het inbrengen van de luchtbellen gepaard gaat. Waar die verdichting precies op slaat is echter niet helemaal duidelijk. Over de porositeit en de transporteigenschappen bij het gebruik van luchtbelvormers in beton met vliegas is er nog minder terug te vinden.

Relatie vliegas-luchtbelvormer

In schril contrast met het weinige materiaal over de *relatie luchtbelvormer-beton met vliegas*, staat de uitgebreide hoeveelheid informatie over het omgekeerde verband, meer bepaald de invloed van de aanwezigheid van vliegas op het gebruik van luchtbelvormers.

Zo worden in Zhang (1996) de resultaten gegeven van een experimenteel onderzoek naar de invloeden van het type en de hoeveelheid vliegas op de vereiste dosis luchtbelvormer om een luchtgehalte van $5,5 \pm 0,5\%$ te bekomen. Daaruit blijkt dat de doseringsindex van een luchtbelvormer op basis van vinsolhars en synthetische surfactanten, proportioneel toeneemt met de gebruikte hoeveelheid vliegas. Het lineair verband geldt voor verschillende types vliegas, alleen de richtingscoëfficiënten van de gevonden rechten zijn verschillend. Dit wijst erop dat vliegas, al naargelang zijn herkomst, de vereiste dosis luchtbelvormer in meer of mindere mate beïnvloedt.

Een gelijkaardig verschil in helling is ook terug te vinden wanneer verschillende types luchtbelvormer toegepast worden op eenzelfde vliegas. Zo blijkt bijvoorbeeld zuiver vinsolhars als luchtbelvormer gevoeliger te zijn voor de aanwezigheid van vliegas dan hetzelfde hars in combinatie met synthetische surfactanten.

Bij nog een andere soort luchtbelvormer op basis van het zout van een vetzuur, blijkt de dosering dan weer niet alleen af te hangen van het gehalte aan vliegas, maar ook van de totale hoeveelheid cementeerbaar materiaal. De auteur heeft er ook een mogelijke verklaring voor. De gepolariseerde moleculen van de luchtbelvormer zouden worden aangetrokken door het oppervlak van de cementeerbare deeltjes, waardoor er minder luchtbelvormer beschikbaar is voor het creëren van de luchtbellen. Dit verschijnsel zou minder sterk spelen naarmate de totale hoeveelheid cementeerbaar materiaal groter is. De oorzaak zou de grotere beschikbaarheid van oplosbare kalk zijn en de daaruit volgende neerslag van het vetzuur als calciumzout op het oppervlak van de cementeerbare deeltjes.

Wat de variatie in luchtgehalte betreft, blijken de luchtbelvormers op basis van vetzuren ondanks hun hoge doseringsindex, toch het best te presteren. De herkomst van de vliegas blijkt ook minder een rol te spelen en de hoeveelheid lucht die tijdens het verwerken van het beton verloren gaat, zou eerder beperkt zijn.

De proefresultaten van Zhang (1996) tonen dus aan dat de vereiste dosis luchtbelvormer in beton met vliegas evenzeer afhangt van de aard van de vliegas als van het type luchtbelvormer. Deze empirische vaststelling is in zekere zin een bevestiging van andere vermeldingen in de literatuur, waar gesteld wordt dat er aan beton met vliegas in vergelijking met traditioneel beton meer luchtbelvormer moet worden toegevoegd om een vooropgesteld luchtgehalte te realiseren [Sturrup (1983), Wesche (1991), Malhorta en Mehta (1996)]. Tot dezelfde conclusie komt Deja (2003) voor beton op basis van hoogovenslakken. Volgens Malhorta en Mehta (1996) zou bovendien het gebruik van luchtbelvormers in combinatie met superplastificeerders eveneens problemen geven om het luchtgehalte te controleren en in stand te houden.

In Zhang (1996) is echter niet meteen een duidelijke verklaring terug te vinden voor de toename van de vereiste hoeveelheid luchtbelvormer. Doorgaans wordt deze verhoging toegeschreven aan het koolstofgehalte van de vliegas. Zoals reeds in paragraaf 2.3.7 werd aangegehaald, zou het gloeiverlies een maat zijn voor het gehalte aan organisch materiaal. Gebler en Klieger (1983) schrijven daarover het volgende:

'Naarmate het gehalte aan organisch materiaal, het koolstofgehalte en het gloeiverlies van vliegas toenemen, zal de vereiste hoeveelheid luchtbelvormer toenemen, evenals het luchtverlies van het nog plastische beton.'

Het vermelde luchtverlies zou ook afhangen van de vliegasklasse. Zo zouden luchtbelvormers in combinatie met klasse C vliegas stabieler zijn dan wanneer ze voorkomen in beton met vliegas van klasse F.

37

In Gebler en Klieger (1983) worden het gehalte aan organisch materiaal, het koolstofgehalte en het gloeiverlies vermeld alsof het bijna synoniemen zijn. Volgens Lane en Best (1982) blijkt dit inderdaad het geval te zijn, aangezien bij de bepaling van het gloeiverlies het grootste massaverlies te wijten is aan koolstof. Op basis van experimenteel onderzoek wordt bovendien ook een lineair verband aangetoond tussen het gloeiverlies van vliegas en de vereiste dosis luchtbelvormer. Volgens Malhorta en Mehta (1996) heeft het koolstofhoudend materiaal in vliegas een hoog specifiek oppervlak waardoor luchtbelvormers in belangrijke mate zullen worden geadsorbeerd. Volgens Hoarty en Hodgkinson (1990) kan dit fenomeen worden tegengegaan door aan de luchtbelvormers doelbewust een meer polaire stof toe te voegen. Die stoffen zullen dan geadsorbeerd worden, terwijl de eigenlijke luchtbelvormer volledig kan worden gebruikt om het kunstmatige luchtholtesysteem tot stand te brengen. Een voorbeeld van een dergelijke luchtbelvormer is 'Cormix Stablair'. Dit product is samengesteld uit twee zouten afgeleid van natuurlijke vetzuren, namelijk natriumdecanoaat en natriumoctanoaat. Daarvan is natriumdecanoaat het actieve ingrediënt dat instaat voor de luchtbelvorming. Het natriumoctanoaat fungeert dan als de meer polaire stof met de preferentiële adsorptiekenmerken.

Wanneer het in vorige paragraaf beschreven verband tussen het gloeiverlies en de dosering van de luchtbelvormer echter geverifieerd wordt aan de hand van de proefresultaten beschreven in Zhang (1996), dan blijkt dit niet te voldoen. Bij de vergelijking van 3 soorten vliegas met elk een verschillend gloeiverlies, is er geen sprake van een proportionele relatie tussen de doseringsindex en de hoeveelheid vliegas of het gloeiverlies. Daarom wordt in Du en Folliard (2005) het gloeiverlies als criterium voor de dosering van de luchtbelvormer ter discussie gesteld. Daarbij komt nog dat in Hill et al. (1997) eveneens beschreven staat dat het verband tussen de dosering van de luchtbelvormer en het gloeiverlies van de vliegas niet opgaat. Onderzoek heeft daar uitgewezen dat er een omgekeerde relatie bestaat tussen de prestaties van een luchtbelvormer en de verhouding van de hoeveelheid isotrope (amorfe) tot de hoeveelheid anisotrope (kristallijne) koolstof in de vliegas.

De prestaties van de luchtbelvormers zouden dus wel degelijk afhangen van het koolstofhoudend materiaal in vliegas, alleen zou het gloeiverlies niet de juiste parameter zijn om dit fenomeen te evalueren. Nochtans worden tegenwoordig vooral daaraan beperkingen opgelegd in normeringen. Volgens de Amerikaanse standaardnorm ASTM C618-03 (2003) ligt de gloeiverliesgrens voor zowel klasse C als klasse F vliegas op 6%. Hetzelfde percentage wordt gehanteerd in de Britse normen. Canadese normen vermelden identieke waarden voor klasse C vliegas, maar aanvaarden 12% als grenswaarde in het geval van klasse F vliegas.

In Malhorta en Mehta (2005) wordt met betrekking tot HVFA-beton niet gesproken over het gloeiverlies maar over het koolstofgehalte. Bij koolstofgehaltes hoger dan 4% zouden problemen kunnen rijzen om bepaalde luchtgehaltes te realiseren. In dergelijke gevallen moet worden overwogen om over te schakelen naar een ander vliegas of naar de hierboven beschreven speciale luchtbelvormers. Over het algemeen zal in beton met vliegas toch meer luchtbelvormer moeten worden aangewend. De meerkost die daarmee gepaard gaat zou eerder te verwaarlozen zijn. Deze bevinding wordt bevestigd in Bijen (1998) waar specifiek de economische impact van hulpstoffen wordt geëvalueerd.

2.3.9 Invloed van het type cement

Bij de vervaardiging van beton wordt al naargelang de aard van de toepassing gebruik gemaakt van verschillende cementtypes. Het kan gaan om een cement met een lage hydratatiewarmte (LH), een cement met een laag alkaligehalte (LA), een cement met een verhoogde bestandheid tegen sulfaten (HSR), enz. Het is dus van belang te weten hoe al deze cementtypes zich in combinatie met vliegas gedragen en dan vooral op het vlak van de porositeit en de transporteigenschappen van het verkregen beton.

In het kader van dit eindwerk werd daarom naast het gebruikelijke Portland cement, ook één ander type cement bestudeerd, namelijk HSR-cement. De precieze werking ervan wordt hier kort behandeld. Voor een meer uitgebreide bespreking van dit soort cement wordt verwezen naar Neville (1995).

HSR-cement werd destijds ontwikkeld voor betontoepassingen met een verhoogd risico op sulfaataantasting.

Indien in dergelijke omstandigheden wordt geopteerd voor een gewoon Portland cement, zal het verharde beton op termijn scheuren gaan vertonen door uitgestelde ettringietvorming. Dit komt omdat bij de cementproductie CaSO₄ aan de Portlandklinker wordt toegevoegd. Deze toevoeging is nodig om te voorkomen dat het klinkermineraal tricalciumaluminaat (C_3A) te snel zou binden tijdens de hydratatie. De aanwezigheid van $CaSO_4$ maakt dat er ettringiet ($C_3A.3CaSO_4.H_{32}$) ontstaat dat bij de uitharding op zijn beurt zal worden omgezet in het eraan verwante monosulfaat ($C_3A.CaSO_4.H_{18}$). Wanneer de laatstgenoemde verbinding echter in contact komt met sulfaten, zal ze terug omgevormd worden tot ettringiet. Dit is een expansieve reactie aangezien er in één keer wordt overgegaan van een verbinding met 18 naar een met 32 watermoleculen. De ermee gepaard gaande volumetoename resulteert finaal in een vertakt en verspreid scheurpatroon over het beton. Door gebruik te maken van HSR-cement met een laag C_3A -gehalte kan dit schadefenomeen worden vermeden.

De keuze om de invloed van HSR-cement op de porositeit en transporteigenschappen van HVFA-beton in dit eindwerk op te nemen, is voortgevloeid uit de doctoraalstudie van Gert Baert. Bij isotherme calorimetrische metingen van mortelpasta's op basis van cement en vliegas, wordt voor Portland cement in combinatie met vliegas een derde hydratatiepiek waargenomen in de warmteontwikkelingscurve (zie Fig. 2.6). Deze piek wordt aan de vorming van ettringiet rond de vliegasdeeltjes toegeschreven. Indien een cement met een laag C_3A -gehalte gebruikt wordt, treedt deze piek niet op [Baert et al. (2006)].



Fig. 2.6: Warmteontwikkeling q in functie van de tijd voor pasta's van vliegas met gewoon Portland cement, C(I) of Portland HSR-cement, C(HSR) [Baert et al. (2006)]

Het is dus duidelijk dat het type cement het hydratatieverloop beïnvloedt. Cement met een laag C_3A -gehalte zal bovendien andere hydratatieproducten opleveren dan traditioneel Portland cement, hetgeen hoe dan ook een invloed zal hebben op de microstructuur van het beton. Het is ook mogelijk dat ettringietvorming de bereikbaarheid van de vliegas en bijgevolg de puzzolane reactie bemoeilijkt. Daarom is het nuttig de bovengenoemde duurzaamheidsparameters van HVFA-beton met HSR-cement te onderzoeken.

2.3.10 Invloed van de W/CM-factor

Het is geweten dat vliegas in beton leidt tot een betere verwerkbaarheid. Dit komt omdat vliegas voornamelijk bestaat uit glasachtige holle bolvormige deeltjes (zie Fig. 2.7, links) met een groot smerend effect [Malhorta en Mehta (1996)].

De aanwezigheid van hoogovenslakken in beton gaat eveneens gepaard met een betere verwerkbaarheid. Nochtans zijn deze slakken in tegenstelling tot vliegas eerder hoekig van vorm (zie Fig. 2.7, rechts), zoals blijkt uit beelden gemaakt met een elektronenmicroscoop [Wan et al. (2004)].



Fig. 2.7: SEM-opnamen van vliegas [Lammertijn (2007)] en hoogovenslakken [Wan et al. (2004)]

Volgens Helmuth (1987) is de betere verwerkbaarheid in beide gevallen eerder toe te schrijven aan een soort adsorptie-dispersiemechanisme zoals ook bij superplastificeerders wordt waargenomen. Daarbij worden de fijne vliegasdeeltjes geadsorbeerd door de cementdeeltjes met een tegengestelde lading, waardoor de cementdeeltjes minder gaan samenvlokken en er dus minder water nodig is. Dit maakt het mogelijk om voor beton met vliegas een lagere W/CM-factor te hanteren, zonder dat de verwerkbaarheid in het gedrang komt. Ook voor het verharde beton levert dit voordelen op. Zo zal er meer cement gehydrateerd zijn en zullen minder capillaire holten voorkomen, wat resulteert in een

hogere sterkte en een betere duurzaamheid. Een verhoging van de W/CM-factor zal het omgekeerde effect hebben.

2.4 Beton met hoogovenslakken

2.4.1 Definitie

Beton met hoogovenslakken is een beton waarbij een groot gedeelte van het cement vervangen is door hoogovenslakken. In tegenstelling tot vliegas, een nevenproduct van de verbranding van poederkool in elektrische centrales, zijn deze slakken afkomstig uit een heel andere industrietak, namelijk de staalindustrie. Bij de productie van ijzer worden ijzererts, cokes en kalk als smeltstof verhit in hoogovens. De slakken ontstaan doordat het ijzererts in de hoogovens gaat reageren met de smeltstof. Ze worden gekenmerkt door een een dichtheid die lager is dan die van de metaalhoudende materialen, waardoor ze bovendrijven en gemakkelijk kunnen worden afgescheiden. Door de slakken vervolgens af te schrikken met water worden korrels verkregen met een diameter van 1 à 5 mm. Onder deze vorm vertonen de slakken een latent hydraulisch gedrag. In veel gevallen wordt voor het vervaardigen van beton met hoogovenslakken gebruik gemaakt van kant en klare hoogovencementen. Dit betekent dat de slakken vooraf reeds in bepaalde verhoudingen met Portland cement werden gemengd. In het kader van dit eindwerk werd er voor gekozen om de slakken als afzonderlijk bestanddeel aan het betonmengsel toe te voegen als gedeeltelijke cementvervanging.

2.4.2 Voorgeschiedenis

De techniek om de hoogovenslakken af te schrikken met water werd ontwikkeld in Duitsland in 1853, zo'n 30 jaar na de uitvinding van Portland cement [Malhorta, Mehta (1996)]. Het zou echter nog een aantal jaren duren vooraleer dit materiaal zijn ingang vond in de betonindustrie. Een van de eerste hoogovencementen op basis van slakken, namelijk Portland klinker en gips/anhydriet, kwam pas in 1888 op de markt.

2.4.3 Hydratatie

Hoogovenslakken vertonen een latent-hydraulisch gedrag. Dit betekent dat ze in contact met water wel degelijk zullen verharden, zij het aan een zeer laag tempo. Daarom zijn hoogovenslakken niet geschikt om als zelfstandig hydraulisch bindmiddel te worden gebruikt. In combinatie met gewoon Portland cement kan de hydratatie van de hoogovenslakken wel aan een voldoende hoge snelheid plaatsvinden. De hydratatie van het cement levert immers Ca(OH)₂, een verbinding die als activator optreedt voor de slakreactie [Taerwe en De Schutter (1996-2006)]. Ca(OH)₂ is een van de reactieproducten bij de hydratatie van cement. Net zoals bij beton met vliegas verloopt de hydratatie dus in twee fasen:

- 1) Portland cement: $C_3S + H_2O \rightarrow CSH + Ca(OH)_2$
- 2) Hoogovenslakken: $slakken + Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow CSH$

Volgens Hill en Sharp (2002) werkt bij een hoog slakkengehalte het $Ca(OH)_2$ niet alleen als activator, maar wordt de verbinding tijdens de slakreactie eveneens verbruikt. Ook Chen (2006) geeft aan dat de hydratatie van hoogovenslakken gepaard gaat met een groot verbruik aan $Ca(OH)_2$.

2.4.4 Porositeit en transporteigenschappen

Over de porositeit en transporteigenschappen van beton waarin hoogovenslakken voorkomen, is in de literatuur onder meer het volgende terug te vinden:

Volgens Song en Saraswathy (2006) zorgt een gedeeltelijke vervanging van Portland cement door hoogovenslakken voor een minder poreus en permeabel beton. De gunstige werking van de slakken is het gevolg van een gewijzigde microstructuur waarbij meer capillaire poriën gevuld zijn met een CSH-gel met lage dichtheid. Microscopische opnamen van beton op basis van gewoon Portland cement en beton met een slakvervanging van 60%, bevestigen dit fenomeen. In het laatste geval worden immers kleinere capillaire poriën aangetroffen.

De fijnere poriënstructuur wordt door Cheng et al. (2005) in verband gebracht met een lagere waterpermeabiliteit onder druk. Deze eigenschap wordt echter ook deels toegeschreven aan het feit dat er minder thermische scheuren zullen voorkomen. Tijdens de hydratatie komt er bij beton met hoogovenslakken immers minder hydratatiewarmte vrij. Voor cementvervangingen tot 50% wordt bij beton op basis van hoogovencement een gelijkaardige gaspermeabiliteit vastgesteld als bij traditioneel beton. Een slakpercentage van 70% geeft aanleiding tot een geringe toename in permeabiliteit [Osborne (1997)].

2.4.5 Invloed van de carbonatatie

Werkingsmechanisme

Bij carbonatatie treedt er een reactie op tussen CO₂ uit de lucht en het bij hydratatie van cement gevormde Ca(OH)₂:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \tag{2-10}$$

Onder invloed van de carbonatatiereactie daalt de hoeveelheid vrije kalk en bijgevolg ook de pH-waarde. Dit proces speelt een belangrijke rol bij de carbonatatiegeïnitieerde corrosie van het wapeningstaal in beton. In normale omstandigheden zal de wapening niet gaan corroderen omwille van de beschermende werking van het omringend beton. Het daar aanwezige poriënwater is immers sterk alkalisch door de hydroxylionen afkomstig van het Ca(OH)₂, een van de hydratatieproducten van Portland cement. De OH-ionen zullen met het ijzer van de wapening reageren tot Fe(OH)₂. Deze verbinding slaat neer op het wapeningsstaal en zal zo een beschermende laag vormen die de passiveringslaag wordt genoemd. Om te kunnen spreken van een gepassiveerde wapening dient de pH van het poriënwater tussen 9 en 14 te liggen.

Wanneer $Ca(OH)_2$ echter door het binnengedrongen CO_2 wordt geconsumeerd, zijn er minder hydroxylionen ter beschikking. Bijgevolg zal de pH van het poriënwater dalen. Vanaf het ogenblik dat de pH-waarde onder de kritieke grens van pH 9 gaat, treedt een depassivering van de wapening op. De beschermingslaag is bijgevolg niet meer toereikend waardoor corrosie vrij spel krijgt [Lammertijn (2007)].

Invloedsfactoren

Uit het voorgaande blijkt duidelijk dat er $Ca(OH)_2$ moet beschikbaar zijn opdat carbonatatie zou kunnen optreden. In Jiang et al. (2000) wordt gesproken over de aanwezigheid van **carbonateerbaar materiaal**.

In paragraaf 2.4.3 werd reeds aangegeven dat voor de hydratatie van hoogovenslakken $Ca(OH)_2$ nodig is. Dit betekent dat er minder calciumhydroxide kan reageren met CO_2 , wat het carbonatatiefront sneller doet opschuiven.

Volgens Jiang et al. (2000) is er nog een andere factor die de carbonatatiesnelheid in belangrijke mate beïnvloedt, namelijk de **gasdoorlatendheid** van het beton. Naarmate de **porositeit** van beton lager ligt, zullen de CO₂-moleculen het beton moeilijker binnendringen en zal carbonatatie minder snel optreden.

Doordat twee elkaar tegenwerkende factoren een rol spelen, is het niet zo evident te voorspellen wat het carbonatatiegedrag van beton met hoogovenslakken als cement-vervanging zal zijn. Lammertijn (2007) komt tot dezelfde vaststelling voor HVFA-beton. Daarnaast moet volgens Ngala en Page (1997) ook nog eens rekening worden gehouden met een porositeitswijzigingen ten gevolge van carbonatatie. Zo zou de totale porositeit over het algemeen niet veranderen. Alleen ontstaan er in de loop van het carbonatatieproces meer grote (> 30 nm) en minder kleine poriën, hetgeen nadelige gevolgen heeft voor de duurzaamheid. In Neville (1995) wordt dan weer melding gemaakt van een zekere verdichting van de poriënstructuur na carbonatatie door afzetting van CaCO₃ in de holten.

Specifiek over de carbonatatie van beton met hoogovenslakken is in de literatuur onder meer het volgende terug te vinden. Beton op basis van hoogovencement vertoont een gelijkaardig carbonatatiegedrag als traditioneel beton, zolang de cementvervanging niet meer dan 50% bedraagt. Een slakpercentage van 70% geeft duidelijk grotere carbonatatiedieptes. Dit komt het sterkst tot uiting bij een beschutte betonconstructie die gemakkelijker kan opdrogen [Osborne (1997)]. Aangezien CO₂-moleculen in lucht immers 10.000 keer sneller diffunderen dan in water, zal beton dat continu aan droge omstandigheden wordt blootgesteld, veel sneller carbonateren [Audenaert (2006), Neville (1995)].

Een goede nabehandeling van beton op basis van hoogovenslakken is uiteraard essentieel. Op die manier wordt immers een dichtere structuur bekomen doordat zich reeds stabielere, minder oplosbare verbindingen hebben gevormd tussen de latent-hydraulische slakken en het aanwezige $Ca(OH)_2$ [Taerwe en De Schutter (1996-2006)]. De diffusiecoëfficiënt voor CO_2 zal bijgevolg lager liggen. Anderzijds betekent een verminderde beschikbaarheid van Ca(OH)₂ dat het carbonatatiefront sneller zal opschuiven. Het is niet meteen duidelijk welk effect zal domineren.

Theoretische benadering

In de veronderstelling dat de flux een maat is voor diffusie, kan de beweging van CO_2 doorheen beton worden benaderd met de eerste wet van Fick:

$$J = -D\frac{dc}{dx} \tag{2-11}$$

Met:	J	=	flux of stroomsnelheid per oppervlakte-eenheid [mol/m ² s]
	D	=	diffusiecoëfficiënt [m ² /s]
	с	=	concentratie [mol/m ³]
	Х	=	afstand of carbonatatiediepte [m]

Daarbij wordt wel als benadering aangenomen dat zich een front van CO_2 doorheen het beton beweegt met een constante concentratiegradiënt in de tijd. Ook wordt er vanuit gegaan dat de diffusiecoëfficiënt D constant blijft. Na enige bewijsvoering bekomt Audenaert (2006) voor de carbonatatiediepte x [m] het volgende \sqrt{t} -verband:

$$x = A\sqrt{t} \tag{2-12}$$

Daarin is A:

$$A = \sqrt{2\frac{D}{a}(c_1 - c_2)}$$
(2-13)

Met:	А	=	carbonatatiecoëfficiënt
	D	=	diffusiecoëfficiënt [m ² /s]
	a	=	hoeveelheid carbonateerbaar materiaal per volume-eenheid
			beton [mol/m ³]
	c_1	=	CO ₂ -concentratie aan het betonoppervlak [mol/m ³]
	c_2	=	CO ₂ -concentratie voorbij het carbonatatiefront [mol/m ³]

In werkelijkheid is A geen constante in de tijd waardoor de curve die door vergelijking (2-12) wordt bepaald, na verloop van tijd zal afvlakken. De verschillende oorzaken hiervoor worden beschreven in Audenaert (2006).

Experimentele bepaling

Doorgaans wordt de carbonatatiediepte visueel bepaald aan de hand van de kleurindicator fenolfthaleïne met een omslaggebied tussen pH 8,3 en 10 [RILEM CPC-18 (1984)]. Voor dit eindwerk werd gebruik gemaakt van deze techniek. De daarbij gevolgde procedure wordt nader toegelicht in paragraaf 3.2.6.

Malhorta en Mehta (2005) geven aan dat deze techniek niet geschikt is voor HVFA-beton. Een kleurindicator toont immers enkel aan of de pH al dan niet daalt, zonder informatie te verschaffen over de precieze oorzaak. Aangezien naast carbonatatie ook de puzzolane reactie tussen de vliegas en het Ca(OH)₂ aanleiding kan geven tot een verlaging van de pH, is het moeilijk uit te maken welke invloedsfactor gespeeld heeft.

Bij beton met hoogovenslakken wordt eveneens $Ca(OH)_2$ gebruikt, zij het als activator. Het is dus mogelijk dat dezelfde moeilijkheid zich ook daar stelt.

Wat de oorzaak ook is, een afname in alkaliniteit zal hoe dan ook problemen geven op het vlak van duurzaamheid. Het gebruik van fenolfthaleïne is in die optiek wel te rechtvaardigen.

Hoofdstuk 3

Materialen en methoden

3.1 Materialen

3.1.1 Samenstelling en korrelverdeling

Hierna volgt een overzicht van alle materialen die in de verschillende betonmengelingen werden gebruikt.

Cement

Voor alle mengelingen werd gewerkt met Portland cement van het type CEM I 52,5 N met uitzondering van twee mengelingen waar een cement met een verhoogde sulfaatweerstand (CEM I 52,5 N HSR) werd gebruikt. De chemische samenstelling van beide cementtypes is terug te vinden in Tabel 3.1. Ze werd bepaald conform de norm NBN EN 196-2 (2005).

Tabel 3.1: Chemische samenstelling van CEM I 52,5 N en CEM I 52,5 N HSR

%	CEM I 52,5 N	CEM I 52,5 N HSR
gloeiverlies	2,12	0,9
CO ₂	0,65	-
SO ₃	3,07	2,5
Onoplosbaar in HCl en Na ₂ CO ₃	0,21	-
SiO ₂	18,73	21,1
CaO	63,12	64,1
MgO	1,02	1,0
Fe ₂ O ₃	3,99	5,0
Al ₂ O ₃	4,94	3,8
K ₂ O	0,77	0,57
Na ₂ O	0,41	0,15

Uitgaande van de in Tabel 3.1 weergegeven percentages voor CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ en SO₃ kunnen met behulp van de formules van Bogue de gehaltes van de verschillende cementmineralen (C₃S, C₂S, C₃A en C₄AF) worden berekend [Taerwe en De Schutter (1996-2006)]. De resultaten van deze berekening zijn terug te vinden in Tabel 3.2.

Tabel 3.2: Gehalte aan C₃S, C₂S, C₃A en C₄AF in CEM I 52,5 N en CEM I 52,5 N HSR volgens Bogue

%	CEM I 52,5 N	CEM I 52,5 N HSR
C ₃ S	66,90	60,72
C_2S	3,31	14,78
C ₃ A	6,35	1,62
C ₄ AF	12,13	15,20

Om een verhoogde sulfaatweerstand te realiseren is het gehalte aan C_3A in CEM I 52,5 N HSR laag. Dit blijkt ook duidelijk uit de bovenstaande tabel.

Vliegas

Bij de HVFA-mengelingen werden 2 types vliegas aangewend: FA(1) en FA(2). In beide gevallen ging het om een klasse F vliegas, alleen de herkomst was verschillend. Tabel 3.3 toont de resultaten van de chemische analyses van beide vliegassen, bepaald met X-stralen-fluorescentie volgens pr EN 196-2.2 (2005). De korrelverdeling van de gebruikte vliegas is terug te vinden in Bijlage A.

%	FA(1)	FA(2)
gloeiverlies	3,53	5,24
CaO	2,51	2,47
SiO ₂	53,06	49,34
Al ₂ O ₃	23,96	24,55
Fe ₂ O ₃	6,50	6,23
P ₂ O ₅	0,35	0,32
MgO	1,79	1,73
K ₂ O	3,32	3,84
Na ₂ O	1,08	0,52
Na-equivalent	3,27	3,04
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	83,51	80,12

 Tabel 3.3: Chemische samenstelling vliegas

Hoogovenslakken

De gebruikte hoogovenslakken werden geanalyseerd volgens de normen NBN EN 196-2 (2005) en NBN EN 196-21 (1991). De resultaten van de analyses zijn weergegeven in Tabel 3.4.

Tabel 3.4: Chemische samenstelling hoogovenslakken

%	Hoogovenslakken	
gloeiverlies	0,48	
koolstofdioxide	0,36	
zwavelzuuranhydride	1,62	
onoplosbaar in HCl en Na ₂ CO ₃	0,16	
totaal silica	33,86	
calciumoxide	42,64	
magnesiumoxide	7,39	
ijzer(III)oxide	0,69	
aluminiumoxide	8,91	
chloride	0,013	
sulfide	0,72	
natriumoxide	0,28	
kaliumoxide	0,52	
totale alkaliniteit	0,62	
mangaan	0,186	

Zand

Zowel voor de HVFA-mengelingen als voor de mengelingen met hoogovenslakken werd gebruik gemaakt van zand met een korrelmaat 0/4. In Bijlage A wordt de korrelverdeling van het zand weergegeven.

Granulaten

Alle betonmengelingen bevatten twee types granulaten met een verschillende korrelmaat, namelijk grind 2/8 en rolgrind 8/16. Voor de korrelverdeling van beide granulaten wordt opnieuw verwezen naar Bijlage A

Hulpstoffen

Bij de betonmengelingen met vliegas werd een superplastificeerder op basis van carboxylether (Glenium 51) toegevoegd om de verwerkbaarheid te verbeteren. Deze mengelingen werden vergeleken met reeds bestaande HVFA-mengelingen die naast dezelfde superplastificeerder ook een luchtbelvormer bevatten [Lammertijn (2007)]. Het betreft MICRO-AIR 103, een luchtbelvormer op basis van een waterige oplossing van een

vetzuur/polyglycol. Volgens de productfiche kan deze hulpstof zonder problemen worden toegepast in beton met vliegas. Aan de betonmengelingen met hoogovenslakken werd geen enkele hulpstof toegevoegd.

3.1.2 HVFA-mengelingen

Voor het onderzoek naar de porositeit en de transporteigenschappen van HVFA-beton werden in totaal acht mengelingen gemaakt. De naam van elk van deze mengelingen bestaat uit drie codes. De eerste code komt overeen met het gebruikte cementtype. Zo staan C(I) en C(HSR) respectievelijk voor CEM I 52,5 N en CEM I 52,5 N HSR. Vervolgens wordt de verhouding cement tot bindmiddel weergegeven (C/CM). De tweede code wijst op het type vliegas dat gebruikt werd en wordt gevolgd door de verhouding vliegas tot bindmiddel (FA/CM). Met de term bindmiddel wordt hier de totale hoeveelheid cementeerbaar materiaal bedoeld (cement + vliegas). De verhouding van water tot bindmiddel (W/CM) wordt aangeduid door de derde code W.

De eerste vier betonmengelingen hadden dezelfde samenstelling als de HVFAmengelingen die in Lammertijn (2007) bestudeerd werden, met als enig verschil dat er geen luchtbelvormer werd toegevoegd. Op die manier kon worden nagegaan of de aanwezigheid van deze hulpstof in HVFA-beton de porositeit en de transporteigenschappen op een significante wijze beïnvloedt. Het betreft:

[1]	C(1)100FA0W40:	100% Portland cement, 0% vliegas, W/CM 0,4
[2]	C(I)65FA(2)35W40:	65% Portland cement, 35% vliegas (2), W/CM 0,4
[3]	C(I)50FA(2)50W40:	50% Portland cement, 50% vliegas (2), W/CM 0,4
[4]	C(1)33FA(2)67W40:	33% Portland cement, 67% vliegas (2), W/CM 0,4

Elk van deze mengelingen werd vervaardigd in 2 reeksen: [1a] en [1b], [2a] en [2b], [3a] en [3b], [4a] en [4b]. Bijkomend werden nog mengelingen [1c] en [2c] gemaakt ter controle van de druksterkte. In Tabel 3.5 wordt de samenstelling van deze mengelingen per m³ weergegeven.

	[1]	[2]	[3]	[4]
zand 0/4 [kg/m ³]	686	668	660	652
granulaat 2/8 [kg/m³]	451	437	432	427
granulaat 8/16 [kg/m³]	694	678	668	660
CEM I 52,5 N [kg/m ³]	400	260	200	132
water [kg/m ³]	160	160	160	160
FA(2) [kg/m ³]	0	140	200	268
luchtbelvormer [ml/m³]	0	0	0	0
superplastificeerder [ml/m ³]	1000	818	1000	750
W/CM	0,4	0,4	0,4	0,4

Tabel 3.5: Betonsamenstelling mengelingen [1], [2], [3] en [4]

Uit Tabel 3.5 blijkt dat de hoeveelheid cementeerbaar materiaal (cement + vliegas), evenals het watergehalte voor de vier mengelingen constant blijft. Zoals in paragraaf 2.3.10 reeds aan bod kwam, hebben betonmengelingen met vliegas doorgaans een grotere verwerkbaarheid. Dit maakt het in principe mogelijk om de W/CM-factor te verlagen bij toenemende cementvervanging door vliegas. Omdat dit eindwerk onder meer tot doel heeft na te gaan of het gebruik van luchtbelvormers een invloed heeft op de porositeit en de transporteigenschappen van HVFA-beton, is het van belang dat analoge samenstellingen als in Lammertijn (2007) worden gehanteerd. Daar werd de W/CM-factor constant gehouden om andere invloedsfactoren dan de vliegasvervanging uit te sluiten. De verwerkbaarheid van de betonmengelingen werd gegarandeerd door superplastificeerder toe te voegen.

Tabel 3.6 toont de betonsamenstellingen die in Lammertijn (2007) onderzocht werden. Het betrof vier mengelingen met een variërend percentage vliegas:

- REF: 100% Portland cement, 0% vliegas
- FA35: 65% Portland cement, 35% vliegas
- FA50: 50% Portland cement, 50% vliegas
- FA67: 33% Portland cement, 67% vliegas

	DFF	FA 35	FA 50	E167
	NL/F	FA35	FA30	FA0/
zand 0/4 [kg/m ³]	686	668	660	652
granulaat 2/8 [kg/m³]	451	437	432	427
granulaat 8/16 [kg/m³]	694	678	668	660
CEM I 52,5 N [kg/m ³]	400	260	200	132
water [kg/m ³]	160	160	160	160
FA [kg/m ³]	0	140	200	268
luchtbelvormer [ml/m³]	270	350	400	400
superplastificeerder [ml/m³]	1080	486	473	342
W/CM	0,4	0,4	0,4	0,4

Tabel 3.6: Betonsamenstelling mengelingen Lammertijn (2007)

Naast onderzoek naar de invloed van een luchtbelvormer op de porositeit en transporteigenschappen van HVFA-beton, werden nog een aantal andere mogelijke invloedsfactoren bestudeerd, namelijk het type cement, het type vliegas en de W/CM-factor. Hiervoor werden de volgende vier betonmengelingen aangemaakt:

- [5] *C(HSR)100FA0W40*: 100% Portland HSR-cement, 0% vliegas (2), W/CM 0,4
- [6] *C(HSR)50FA(2)50W40*: 50% Portland HSR-cement, 50% vliegas (2), W/CM 0,4
- [7] *C*(*I*)50FA(*I*)50W40: 50% Portland cement, 50% vliegas (1), W/CM 0,4
- [8] *C*(*I*)50FA(2)50W50: 50% Portland cement, 50% vliegas (2), W/CM 0,5

De mengelingen [5] en [6] op basis van cement met een verhoogde sulfaatweerstand CEM I 52,5 N HSR, werden vergeleken met [1] en [3] die Portland cement CEM I 52,5 N bevatten. Op die manier kon worden nagegaan of het type cement een invloed heeft op de porositeit en de transporteigenschappen. Daarnaast kon ook de vergelijking worden gemaakt tussen [3] en [7] om het vliegastype als invloedsparameter te evalueren. Ten slotte was er nog mengeling [8], een HVFA-mengeling met een verhoogde W/CM-factor waarmee kon worden nagegaan welke rol deze factor precies speelt. Het spreekt vanzelf dat deze bijkomende mengelingen ook kunnen worden vergeleken met de andere vliegasmengelingen op de verschillende leeftijden.

De samenstelling van de betonmengelingen [5], [6], [7] en [8] wordt in Tabel 3.7 gegeven.

	[5]	[6]	[7]	[8]
zand 0/4 [kg/m ³]	686	660	660	620
granulaat 2/8 [kg/m³]	451	432	432	405
granulaat 8/16 [kg/m³]	694	668	668	628
CEM I 52,5 N [kg/m ³]	0	0	200	200
CEM I 52,5 N HSR [kg/m ³]	400	200	0	0
water [kg/m ³]	160	160	160	200
FA(1) [kg/m ³]	0	0	200	0
FA(2) [kg/m ³]	0	200	0	200
luchtbelvormer [ml/m³]	0	0	0	0
superplastificeerder [ml/m³]	1000	1000	1000	0
W/CM	0,4	0,4	0,4	0,5

Tabel 3.7: Betonsamenstelling mengelingen [5], [6], [7] en [8]

Ook voor deze mengelingen werd de hoeveelheid cementeerbaar materiaal constant gehouden op 400 kg/m³. Bij mengeling [8] werd de verhoogde W/CM-factor gerealiseerd door meer water toe te voegen, namelijk 200 kg/m³ in plaats van de 160 kg/m³. Dit zorgde er meteen voor dat de verwerkbaarheid van deze laatste mengeling een stuk hoger kwam te liggen, waardoor de toevoeging van super-plastificeerder overbodig was.

3.1.3 Mengelingen met hoogovenslakken

De porositeit en de transporteigenschappen van beton met hoogovenslakken werden aan de hand van 4 mengelingen bestudeerd:

- SO: 100% Portland cement, 0% hoogovenslakken
- S50: 50% Portland cement, 50% hoogovenslakken
- S70: 30% Portland cement, 70% hoogovenslakken
- S85: 15% Portland cement, 85% hoogovenslakken

De betonsamenstelling van deze mengelingen is terug te vinden in Tabel 3.8. Elke mengeling werd een driemaal hernomen om over voldoende proefstukken te kunnen beschikken. De verschillende mengelingen S0 bijvoorbeeld worden dan als volgt aangeduid: S0/1, S0/2 en S0/3. Hetzelfde systeem geldt ook voor de andere betonsamenstellingen.

In tegenstelling tot de HVFA-mengelingen werd voor de mengelingen met hoogovenslakken steeds \pm 350 kg/m³ cementeerbaar materiaal (cement + slakken) vooropgesteld. De W/CM-factor bedroeg telkens 0,5. Nergens werden hulpstoffen zoals luchtbelvormers en superplastificeerders aangewend om zoveel mogelijk invloedsfactoren uit te sluiten.

	S0	S50	S70	S85
zand 0/4 [kg/m ³]	791	788	787	785
granulaat 2/8 [kg/m³]	425	423	423	422
granulaat 8/16 [kg/m³]	618	616	615	613
CEM I 52,5 N [kg/m ³]	350	174	104	52
water [kg/m ³]	175	174	174	174
hoogovenslakken [kg/m³]	0	174	244	295
luchtbelvormer [ml/m ³]	0	0	0	0
superplastificeerder [ml/m³]	0	0	0	0
W/CM	0,5	0,5	0,5	0,5

Tabel 3.8: Betonsamenstelling mengelingen S0, S50, S70 en S85

3.2 Methoden

3.2.1 Vervaardiging

Alle mengelingen werden conform de norm NBN B 15-001 (2004) vervaardigd. Om de verwerkbaarheid van de verschillende betonmengelingen te karakteriseren werden telkens de zetmaat met de Abrams-kegel (slump test) en de uitspreiding op de schoktafel (flow test) bepaald.

Op basis van de meetwaarden voor de zetmaat, bepaald volgens de norm NBN-EN 12350-2 (1999), kan aan het beton een consistentieklasse S1, S2, S3, S4 of S5 worden toegekend. Beton met een klasse S1 komt overeen met een geringe inzakking van de betonspecie na het verwijderen van de Abrams-kegel en wijst dus op een weinig verwerkbaar beton. Een klasse S5 daarentegen heeft dan weer betrekking op een zeer verwerkbaar beton.

Bij de flow test conform de norm NBN B 15-233 (1982), wordt de gemiddelde diameter van de uitgespreide betonspecie op de schoktafel bepaald. Een diametertoename met 60 mm wordt daarbij als eenheid voor de classificatie gehanteerd. Dit resulteert in de klassen F1, F2, F3, F4, F5 en F6. In het geval van een zeer vloeibaar beton, werd de flow test niet uitgevoerd. Bij de mengelingen met hoogovenslakken werd de schokmaat niet bepaald.

Buiten deze parameters met betrekking tot de verwerkbaarheid, werd net na het mengen ook het initiële luchtgehalte van de verschillende betonmengelingen gemeten met behulp van een luchtgehaltemeter. Dit gebeurde volgens de norm NBN EN 12350-7 (2000).

De bovengenoemde parameters, samen met het experimenteel bepaalde volumegewicht en de mengtijd van het beton worden weergegeven in Tabel 3.9. Voor de mengelingen S0, S50, S70 en S85 bedroeg de mengtijd telkens 3 minuten. Daarbij werden de vaste bestanddelen (cement, slakken, zand en granulaten) eerst gedurende 1 minuut droog gemengd. Na toevoegen van het water, werd het mengsel nog 2 minuten nat gemixt. Voor de vliegasmengelingen geldt een standaardmengtijd van 5 minuten omdat na 3 minuten nog eens superplastificeerder werd toegevoegd. Wanneer de betonspecie na 2 minuten van bijkomend mixen nog niet voldoende verwerkbaar bleek, werd nog extra superplastificeerder toegevoegd, hetgeen de soms langere mengtijd verklaart.

Mengeling		Slump [mm]	Flow [mm]	Vol. Gewicht [kg/m ³]	Luchtgehalte [%]	Mengtijd [min]
	[1a]	S1	F3	2410	1,70	5
C(I)100FA0W40	[1b]	S1	F2	2430	1,50	5
	[1c]	S1	F2	2438	1,60	5
	[2a]	S3	F4	2360	2,00	8
C(I)65FA(2)35W40	[2b]	S4	-	2360	1,95	9
	[2c]	S2	F4	2338	2,00	5
C(1)50EA(2)50W40	[3 a]	S5	F6	2330	1,90	7
C(1)50FA(2)50W40	[3b]	S4	F5	2320	1,95	5
C(1)33EA(2)67W/0	[4a]	S2	F3	2260	2,70	10
C(1)55FA(2)07 W40	[4b]	S2	F3	2280	2,35	5
C(HSR)100FA0W40	[5]	S4	F5	2430	1,40	5
C(HSR)50FA(2)50W40	[6]	S5	-	2320	1,50	7
C(I)50FA(1)50W40	[7]	S5	-	2340	1,60	6
C(I)50FA(2)50W50	[8]	S5	-	2270	1,35	5
	S0/1	S 1	-	-	-	3
S0	S0/2	S2	-	2480	2,10	3
	S0/3	S 1	-	2370	2,70	3
	S50/1	S2	-	-	-	3
S50	S50/2	S1	-	2360	1,90	3
	S50/3	S 1	-	2370	2,10	3
	S70/1	S 1	-	2380	1,80	3
S70	S70/2	S1	-	2360	1,70	3
	S70/3	S 1	-	2340	2,10	3
	S85/1	S2	-	2360	2,10	3
S85	S85/2	S 1	-	2360	1,80	3
	S85/3	S 1	-	2350	1,90	3

 Tabel 3.9: Overzicht parameters bepaald bij de vervaardiging van de betonmengsels
Na vervaardiging werden alle proefstukken opgeslagen in een geklimatiseerde ruimte bij een temperatuur van 20 ± 2 °C en een relatieve vochtigheid (RV) van minimaal 90% totdat ze de gewenste ouderdom hadden.

3.2.2 Druksterkte

De porositeit en de transporteigenschappen van de verschillende betonmengelingen werden bestudeerd na 1, 3 en 6 maanden. Op deze tijdstippen werd telkens een drukproef volgens de norm NBN B 15-220 (1970) uitgevoerd. De evolutie van de druksterkte in de tijd geeft een beeld van de puzzolane en de latent-hydraulische reacties die respectievelijk in HVFAbeton en beton met hoogovenslakken optreden. De drukproeven werden uitgevoerd op kubussen met een zijde van 150 mm.

3.2.3 Wateropslorping onder vacuüm

De wateropslorping onder vacuüm, ook wel de vacuümverzadiging genoemd, is een proef waarmee de porositeit van beton kan worden bepaald. Aangezien het daarbij enkel gaat om de poriën die vanaf de buitenzijde van het beton toegankelijk zijn, de zogenaamde open porositeit, betreft het een ruwe schatting van de eigenlijke porositeit.

De proefprocedure staat beschreven in de norm NBN B 05-201 (1976). De gebruikte proefstukken waren cilinders met een diameter van 100 mm en een hoogte van 50 mm. Ze werden geboord uit een kubus met een zijde van 150 mm, evenwijdig met het afstrijkvlak, en nadien in 3 stukken gezaagd. Dit leverde per kubus drie proefstukken op. Twee ervan (A en A') hadden een boven- of ondervlak dat overeenstemde met een bekistingsvlak van de oorpronkelijke kubus. Het derde proefstuk (B) werd uit de massa van de kubus gehaald. De proef werd telkens uitgevoerd op 6 of 9 cilinders afhankelijk van het aantal beschikbare kubussen.

Op een ouderdom van 1, 3 en 6 maanden werden de proefstukken gedurende ongeveer 14 dagen in de oven bij 40 ± 5 °C geplaatst totdat het massaverlies over een tijdspanne van 24 uur kleiner was dan 0,1%. In die periode evolueerde de relatieve vochtigheid in de oven vrij snel van ongeveer 50% naar 20%. De droge massa's m_d werden bepaald en vervolgens werden de proefstukken in een vacuümtank (Fig. 3.1) geplaatst.



Fig. 3.1: Vacuümtank voor wateropslorping onder vacuüm

Na het bereiken van vacuüm onder een absolute druk van 2,7 kPa, werd dit gedurende 2,5 uur aangehouden, waarna water aan een snelheid van ~ 5 cm/uur werd toegevoegd. Na volledige onderdompeling van de proefstukken, werd het vacuüm opgegeven en werden de cilinders nog 24 uur onder water bewaard (Fig. 3.2).



Fig. 3.2: Ondergedompelde proefstukken in de vacuümtank

Daarna werden de massa's onder water m_l en de verzadigde massa's m_s bepaald. De proefstukken werden dan bij 105 °C gedroogd tot constante massa waarna de hele proefprocedure nog eens werd herhaald.

Deze proefprocedure laat toe de capillaire, de totale en de gelporositeit te bepalen op basis van de formules (2-3) en (2-4).

3.2.4 Gaspermeabiliteit

De gasdoorlatendheid van de bestudeerde betonmengelingen werd bepaald conform de procedure vastgelegd in RILEM TC 116-PCD (1999). Deze methode werd ook toegepast in Boel (2006).

De proef werd uitgevoerd op drie cilindervormige proefstukken met een diameter van 150 mm en een hoogte van 50 mm, gehaald uit de massa van een plaat met als afmetingen 400 x 400 x 100 mm³. De gasdoorlatendheid werd onderzocht op 1, 3 en 6 maanden ouderdom. Voorafgaand aan de eigenlijke proef, werden de drie proefstukken gedroogd bij 80 °C totdat het massaverlies over 24 uur minder dan 0,1% bedroeg. Vervolgens werden de proefstukken vacuüm verzadigd, waarna ze in drie fasen terug werden gedroogd. Aan het einde van elke droogfase werd telkens een gaspermeabiliteitsmeting uitgevoerd. Het drogen in drie fasen liet toe om de gasdoorlatendheid te bepalen bij verschillende verzadigingsgraden. In Tabel 3.10 wordt het verloop van de daarbij gevolgde proefprocedure weergegeven.

De procedure is grotendeels gebaseerd op Carcassès (2002). In het kader van dit eindwerk werden toch een aantal wijzigingen doorgevoerd. Zo werd er iets langer gedroogd bij 80 °C (\pm 14 dagen) om er zeker van te zijn dat alle mengelingen binnen de vooropgestelde tijdspanne hun constante massa hadden bereikt. Om dezelfde reden werd de laatste permeabiliteitsmeting in tegenstelling tot wat Tabel 3.10 aangeeft, dikwijls een aantal dagen later uitgevoerd. Het is essentieel dat het massaverlies van de proefstukken over 24 uur kleiner is dan 0,1% aangezien de andere verzadigingsgraden uit deze droge massa's volgen en alleen dan een correcte vergelijking tussen de verschillende mengelingen mogelijk is.

Bij het stapsgewijs drogen werden de proefstukken verschillende keren gedeeltelijk of geheel omwikkeld met aluminiumfolie. Eerst werd de mantel van de proefstukken bedekt. Op die manier werd radiaal vochttransport vermeden. Vervolgens werden de proefstukken volledig ingepakt in aluminiumfolie om een homogene redistributie van het vocht te verkrijgen. De dag daarna werden de volledig ingepakte proefstukken in een geklimatiseerde ruimte bij 20 °C en 60% RV gelegd om zonder al te veel vochtverlies af te koelen voor de eerste gaspermeabiliteitsmeting. Het volledig omwikkelen van de proefstukken werd om gelijkaardige redenen ook toegepast in de aanloop naar de tweede meting. Voorafgaand aan de laatste meting werd dit ook gedaan om er zeker van te zijn dat de proefstukken op constante massa bleven.

Dag	Instructie	Meting
0 (ma)	de proefstukken drogen bij 80 °C tot constante massa	
10 (do)	de proefstukken wegen	
11 (vr)	de proefstukken wegen	
14 (ma)	de proefstukken uit de oven halen en wegen	m _{d80°C}
	vacuümverzadiging (3u vacuüm, water er langzaam inlaten en vacuüm opgeven)	
15 (di)	proefstukken wegen onder water	ml
	proefstukken verzadigd wegen	ms
	de mantel van de proefstukken met Al-folie omwikkelen	
	de proefstukken opnieuw wegen	
	de proefstukken terug in de oven plaatsen bij 80 °C	
16 (wo)	de proefstukken volledig omwikkelen in Al-folie en terug in de oven plaatsen (+	
	wegingen)	
17 (do)	de proefstukken uit de oven halen en bewaren bij 20 °C en 60% RV	
18 (vr)	de proefstukken wegen	m1
	de eerste permeabiliteitsmeting uitvoeren bij 2, 3 en 4 bar	k _{a1}
	de proefstukken verder drogen bij 80 °C	
21 (ma)	de proefstukken volledig omwikkelen in Al-folie en terug in de oven plaatsen (+ wegingen)	
22 (di)	de proefstukken uit de oven halen en bewaren bij 20 °C en 60% RV	
23 (wo)	de proefstukken wegen	m ₂
	de tweede permeabiliteitsmeting uitvoeren bij 2, 3 en 4 bar	k _{a2}
	de proefstukken verder drogen bij 105 °C tot constante massa	
28 (ma)	de proefstukken uit de oven halen en bewaren bij 20 °C en 60% RV	
29 (di)	de proefstukken wegen	m _{d105°C}
	de derde permeabiliteitsmeting uitvoeren bij 2, 3 en 4 bar	k _{a3}

 Tabel 3.10: Procedure ter bepaling van de gaspermeabiliteit

Voor de eigenlijke permeabiliteitsmetingen werd gebruik gemaakt van een 'Cembureau' permeameter (Fig. 3.3).



Fig. 3.3: 'Cembureau' permeameter

Daarbij werden telkens drie van de eerder beschreven proefstukken in recipiënten geplaatst die volledig luchtdicht konden worden afgesloten. Dit was mogelijk door rond de proefstukken een band op te pompen (Fig. 3.4). Het zuurstofgas, ingebracht onder een druk van 2, 3 en 4 bar, kon op deze manier niet zijdelings weglekken en werd aldus doorheen de proefstukken gestuurd.



Figuur 3.4: Luchtdichte recipiënten voor de proefstukken

Nadat de gasdoorstroming een steady state situatie had bereikt, werd het doorgelaten gasdebiet opgemeten met behulp van een zeepbelmeter. Het gemeten debiet is telkens een gemiddelde over de drie proefstukken. Bijgevolg kan de variabiliteit tussen de monsters niet worden nagegaan. Wel werd telkens de standaardafwijking over de verschillende tijdsmetingen bepaald. Deze was steeds verwaarloosbaar klein.

3.2.5 Capillaire wateropslorping

De hier aangewende methode ter bepaling van de capillaire wateropslorping, is deels op de norm NBN B 05-201 (1976) en deels op de norm NBN B 15-217 (1984) gebaseerd. De eerste norm kwam reeds aan bod in paragraaf 3.2.3 waarin de wateropslorping onder vacuüm werd beschreven. Daarin wordt aangegeven dat de proefstukken die een vacuümverzadiging hebben ondergaan, ook gebruikt kunnen worden voor de proef ter bepaling van de capillaire wateropslorping. Deze metingen lopen over een periode van 14 dagen. De tweede norm handelt specifiek over de wateropslorping door capillariteit. De daarbij gebruikte proefstukken worden slechts gedurende 3 dagen getest.

In tegenstelling tot wat NBN B 15-201 (1976) voorschrijft, werd gebruik gemaakt van proefstukken die enkel voor deze proef werden vervaardigd. Het betrof kubussen met een zijde van 150 mm. Wanneer de proefstukken de gewenste ouderdom (1, 3 of 6 maand) hadden bereikt, werden ze eerst bij 40 ± 5 °C gedroogd tot constante massa. Doorgaans nam dit droogproces ongeveer 14 dagen in beslag. Daarna konden de proefstukken worden voorbereid voor de eigenlijke capillariteitsproef. Eerst werden de massa's en de afmetingen van de proefstukken opgemeten. Vervolgens werden de zijden van de kubussen grenzend aan het vlak dat werd ondergedompeld (3 bekistingsvlakken en het afstrijkvlak), afgeplakt met een zelfklevende aluminiumtape met een breedte van ~ 100 mm. Net voor de aanvang van de proef werden de proefstukken nog eens gewogen. De kubussen werden dan op steunen in een afgesloten bak met water geplaatst, waarbij het waterpeil zich op 5 ± 1 mm boven het ondervlak van elk proefstuk bevond (Fig. 3.5). De waterbak stond opgesteld in een geklimatiseerde ruimte bij 20 °C en 60% RV.

Gedurende de eerste 6 uren werd de capillaire wateropname om het uur bepaald door weging van de proefstukken. Aan de hand van deze massa's wordt de capillaire opslorpingscoëfficiënt G_1 bepaald (zie paragraaf 2.2.3). Daarna volgden nog metingen op 24 u, 72 u, 168 u (7 dagen), 240 u (10 dagen) en 336 u (14 dagen) waaruit de capillaire opslorpingscoëfficiënt G_2 volgt (zie paragraaf 2.2.3). Voorafgaand aan de wegingen, werd het ondervlak van de kubussen telkens oppervlaktedroog gewreven met een vochtig zeemvel terwijl het ondergedompeld vlak naar onder gericht bleef. Na 14 dagen werden de kubussen uit de waterbak gehaald, gedurend 1 dag bewaard bij 20 °C en 60% RV en daarna in een oven bij 105 °C geplaatst. Wanneer de proefstukken opnieuw hun constante massa hadden bereikt, werden ze nog 24 uren ingepakt in de geklimatiseerde ruimte bij 20 °C en 60% RV bewaard om af te koelen. De volgende dag kon de capillariteitsproef opnieuw worden opgestart.



Fig. 3.5: Proefopstelling capillaire wateropslorping

3.2.6 Carbonatatie

Specifiek voor beton met hoogovenslakken werd onderzocht in welke mate eventuele carbonatatie van het beton de porositeit beïnvloedt. Hiertoe werden betonproefstukken gelijktijdig bewaard in de carbontatiekast ($20 \pm 2 \, ^{\circ}$ C, 60% RV en 10 vol.% CO₂) en de natte kast ($20 \pm 2 \, ^{\circ}$ C en > 90% RV), waarna aan de hand van een vacuümverzadiging het verschil in porositeit tussen gecarbonateerde en niet-gecarbonateerde proefstukken werd bepaald. De aangewende proefstukken waren gelijkaardig aan de proefstukken gebruikt voor de wateropslorping onder vacuüm, namelijk cilinders met een diameter van 100 mm

en een hoogte van 50 mm die per 3 geboord en gezaagd werden uit een kubus met een zijde van 150 mm. Voorafgaand aan de proef werden de manteloppervlakken van de cilinders voorzien van een coating en werden de boven- of ondervlakken afgedicht met een stuk aluminiumfolie (Fig. 3.6).



Fig. 3.6: Gecoat proefstuk voorzien van aluminiumfolie

Op die manier konden de proefstukken maar langs één zijde carbonateren, waardoor de indringdieptes op een éénduidige wijze konden worden bepaald. Voor de B-proefstukken, gehaald uit de massa van de kubussen, speelde de positie van de aluminiumfolie geen rol. Bij de proefstukken A en A' daarentegen, werd het bekistingsvlak telkens vrij gelaten en de aluminiumfolie op de andere kant aangebracht.

De eigenlijke proefprocedure verliep als volgt. Op een ouderdom van 1, 3 en 6 maanden werden 6x3 proefstukken getest. Hiervan werden er telkens 3x3 proefstukken in de carbonatatiekast ($20 \pm 2 \ ^{\circ}$ C, 60% RV en 10 vol.% CO₂) en 3x3 proefstukken in de natte kast ($20 \pm 2 \ ^{\circ}$ C en > 90% RV) bewaard. De laatste reeks proefstukken fungeerde daarbij als referentie. De periode waarover de 3x3 proefstukken aan een verhoogde CO₂concentratie werden blootgesteld, varieerde van 4 tot 24 weken. De referentieproefstukken werden in functie van deze blootstellingstijd even lang in de geklimatiseerde ruimte ondergebracht. Tabel 3.11 geeft een overzicht van het precieze proefverloop.

Ouderdom	Weken carbonatatiekast	Proefstukken	Weken natte kast	Proefstukken
		1A		4A
	4 weken	1B	4 weken	4B
		1A'		4A'
		2A		5A
1 maand	16 weken	2B	16 weken	5B
		2A'		5A'
		3A		6A
	24 weken	3B	24 weken	6B
		3A'		6A'
		1A		4A
	4 weken	1B	4 weken	4B
		1A'		4A'
		2A		5A
3 maand	16 weken	2B	16 weken	5B
		2A'		5A'
		3A		6A
	24 weken	3B	24 weken	6B
		3A'		6A'
		1A		4A
	4 weken	1B	4 weken	4B
		1A'		4A'
		2A		5A
6 maand	16 weken	2B	16 weken	5B
		2A'		5A'
		3A		6A
	24 weken	3B	24 weken	6B
		3A'		6A'

Tabel 3.11: Blootstellingstijden carbonatatie

Na 4, 16 en 24 weken werden de proefstukken en de referenties respectievelijk uit de carbonatatiekast en de natte kast gehaald, waarna de proefprocedure ter bepaling van de capillaire en de totale porositeit zoals beschreven in paragraaf 3.2.3, werd gevolgd.

Na afloop daarvan werden alle proefstukken gespleten om de breukvlakken te kunnen besprenkelen met een fenolfthaleïneoplossing (Fig. 3.7).

De niet-gecarbonateerde zones met een pH-waarde hoger dan 9 à 10 geven een paarse kleur, terwijl de gecarbonateerde zones met een lagere pH geen verkleuring vertonen. Op die manier kon de carbonatatiediepte vrij eenvoudig worden bepaald.

Daarbij wordt vertrekkende vanaf het midden van elk proefstuk, om de 10 mm de indringdiepte bepaald (-40, -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40). De randen (-50 en 50) worden niet meegerekend omdat daar de CO_2 -moleculen ook in beperkte mate langsheen het gecoate manteloppervlak het beton binnendringen, wat een vertekend beeld zou geven.



Figuur 3.7: Bepaling van de carbonatatiediepte met behulp van een fenolfthaleïneoplossing

Hoofdstuk 4

Resultaten HVFA-beton

4.1 Verwerkbaarheid en luchtgehalte

In Tabel 3.9 werd reeds een overzicht gegeven van de verschillende parameters die kort na de vervaardiging van het beton werden bepaald. Het betrof de consistentieklassen van slump en flow, het volumegewicht, het luchtgehalte en de mengtijd. Om het gebruik van luchtbelvormers in HVFA-beton te evalueren, is het nuttig om de in Tabel 3.9 opgenomen luchtgehaltes van de mengelingen [1], [2], [3] en [4] te vergelijken met de luchtgehaltes voorkomend in de mengelingen van Lammertijn (2007). Op de aanwezigheid van luchtbelvormers na, zijn beide mengelingen analoog, zodat optredende verschillen enkel toe te schrijven zijn aan de onderzochte hulpstof. De luchtgehaltes van de te vergelijken mengelingen worden weergegeven in Tabel 4.1.

Met luchtbelvormer										
Mengeling	lucht [%]	Mengeling	lucht [%]	Mengeling	lucht [%]	Mengeling	lucht [%]			
REF/1	5,60	FA35/1	4,10	FA50/1	5,50	FA67/1	4,10			
REF/2	3,00	FA35/2	4,15	FA50/2	4,80	FA67/2	4,00			
REF/3	3,45	FA35/3	4,10	FA50/3	4,50	FA67/3	4,90			
REF/4	3,30	FA35/4	4,20	FA50/4	4,00	FA67/4	3,95			
REF/5	1,80	FA35/5	4,50	FA50/5	3,60	FA67/5	4,00			
REF/6	2,10	FA35/6	3,95	FA50/6	3,25	FA67/6	4,30			
REF/7A	3,50									
REF/7B	3,90									
Gem.	3,33	Gem.	4,17	Gem.	4,28	Gem.	4,21			
Zonder lucht	belvormer									
Mengeling	lucht [%]	Mengeling	lucht [%]	Mengeling	lucht [%]	Mengeling	lucht [%]			
[1a]	1,70	[2a]	2,00	[3a]	1,90	[4a]	2,70			
[1b]	1,50	[2b]	1,95	[3b]	1,95	[4b]	2,35			
[1c]	1,60	[2c]	2,00							
Gem.	1,60	Gem.	1,98	Gem.	1,93	Gem.	2,53			

Tabel 4.1: Luchtgehaltes van HVFA-mengelingen met en zonder luchtbelvormer

Uit bovenstaande tabel blijkt duidelijk dat luchtbelvormers het luchtgehalte aanzienlijk doen toenemen. De luchtgehaltes bij Lammertijn (2007) bedragen gemiddeld 4%. In functie van deze vooropgestelde waarde werd de dosering van de luchtbelvormer bepaald. Het gemiddelde luchtgehalte bij de mengelingen zonder luchtbelvormer bedraagt slechts circa 2%. Enkel REF/5 en REF/6 geven dergelijke lage waarden bij gebruik van een luchtbelvormer. Omwille daarvan werd dezelfde betonsamenstelling door Lammertijn (2007) hernomen, maar dan met toevoeging van meer luchtbelvormer. Dit leverde voor de mengelingen REF/7A en REF/7B opnieuw waarden op die vergelijkbaar waren met deze van de andere mengelingen met luchtbelvormer. De precieze reden waarom aan twee REF-mengelingen meer luchtbelvormer diende te worden toegevoegd, is niet meteen duidelijk. Zoals aangegeven in de literatuurstudie zou een hogere dosering eerder vereist zijn bij mengelingen die vliegas bevatten.

Een heel ander aspect is de evolutie van het luchtgehalte in de tijd. De vraag stelt zich in hoeverre het initieel bepaalde luchtgehalte overeenstemt met het luchtgehalte op latere leeftijd. In Cox en De Belie (2007) worden door middel van een 'air void analyser' de luchtgehaltes op 1 en 3 maanden ouderdom bij de mengelingen van Lammertijn (2007) bepaald. De bekomen resultaten worden weergegeven in Tabel 4.2.

Mongoling	luchtgehalte [%]				
Mengening	1 maand	3 maanden			
REF	3,78	2,57			
FA35	4,68	3,30			
FA50	6,12	3,09			
FA67	5,03	5,93			

Tabel 4.2: Luchtgehaltes op 1 en 3 maanden ouderdom [Cox en De Belie (2007)]

Opgemerkt wordt dat de luchtgehaltes bij de vliegasmengelingen op 1 maand ouderdom hoger zijn dan 4%. Dit komt het sterkst tot uiting bij de mengelingen FA50 en FA67. Na 3 maanden wordt enkel bij FA67 een beduidend hogere waarde bekomen. Alhoewel de luchtgehaltes in Cox en De Belie (2007) aan de hand van een totaal verschillende methode werden bepaald, kan hieruit toch worden besloten dat het initiële luchtgehalte niet altijd precies met het luchtgehalte op latere leeftijd overeenstemt.

4.2 Druksterkte

Voor de resultaten van de drukproeven wordt verwezen naar Bijlage B. Daarin zijn ook de druksterktes van de betonmengelingen die door Lammertijn (2007) bestudeerd werden, opgenomen. Dit biedt de mogelijkheid om de vergelijking te maken tussen HVFAmengelingen met en zonder luchtbelvormer. De gemiddelde druksterktes na 28 dagen van de te vergelijken mengelingen worden samen met de bijhorende standaardafwijkingen (σ) op de individuele waarden weergegeven in Tabel 4.3.

Ν	let luchtbelvorm	ner	Zo	Verschil		
Mengeling	$f_{ccub} \left[N/mm^2 \right]$	σ [N/mm ²]	Mengeling	$f_{ccub} \left[N / mm^2 \right]$	σ [N/mm ²]	[%]
REF	60,54	2,51	[1]	68,84	6,82	12
FA35	42,90	1,66	[2]	51,63	0,51	17
FA50	34,42	2,53	[3]	38,55	1,32	11
FA67	22,14	1,57	[4]	23,97	0,81	8

Tabel 4.3: Gemiddelde druksterktes van HVFA-mengelingen met en zonder luchtbelvormer na 28 dagen

In Tabel 4.3 komt duidelijk naar voor dat de aanwezigheid van luchtbelvormer gepaard gaat met een reductie in druksterkte. In de literatuurstudie wordt aangegeven dat per procent lucht in het beton, de druksterkte doorgaans afneemt met 5%. Zoals blijkt uit paragraaf 4.1 worden voor de betonmengelingen met en zonder luchtbelvormer, luchtgehaltes gemeten die respectievelijk 4 en 2% bedragen. Dit betekent dat de reductie in druksterkte ongeveer 10% zou moeten bedragen. Met uitzondering van de mengelingen met 35% vliegas, lijken de experimentele resultaten behoorlijk hieraan te voldoen.

4.3 Wateropslorping onder vacuüm

Tabel 4.4 geeft een overzicht van de gemiddelde capillaire en totale porositeiten van de mengelingen [1] t.e.m. [8] op de verschillende leeftijden. Daarbij wordt eerst een onderscheid gemaakt tussen de porositeiten van de A-proefstukken (A en A') en de B-proefstukken. Daarnaast worden ook de algemene gemiddelden van de proefstukken A, A' en B met de bijhorende standaardafwijkingen (σ) op de individuele waarden weergegeven.

De gelporositeiten berekend als het verschil tussen de capillaire en de totale porositeiten, zijn terug te vinden in Tabel 4.5. Daarbij werd dezelfde onderverdeling als in de voorgaande tabel gehanteerd.

Mengeling		Cap.	Porositeit b	ij 40 ± 5 °C	C[%]	Totale Porositeit bij $105 \pm 2 \degree C [\%]$			
Ouderdom [maand	1]	AA'	В	ABA'	σ _{ABA'}	AA'	В	ABA'	σ _{ABA'}
[1]	1	5,62	5,45	5,56	0,20	12,34	12,38	12,36	0,27
[1]	3	6,18	5,41	5,93	0,42	11,85	12,61	12,10	0,64
C(I)100FA0W40	6	6,06	5,35	5,82	0,44	12,74	12,92	12,80	0,71
[2]	1	10,46	9,63	10,18	0,82	14,36	14,72	14,48	0,45
[2]	3	4,86	4,85	4,86	0,29	13,73	14,03	13,83	0,25
C(I)65FA(2)35W40	6	-	6,19	6,19	0,53	-	15,12	15,12	0,58
[2]	1	9,88	9,53	9,76	0,48	14,93	15,31	15,05	0,33
[3]	3	8,66	8,00	8,44	0,53	15,34	15,99	15,56	0,40
C(I)50FA(2)50W40	6	8,33	7,16	7,94	0,72	15,75	15,55	15,68	0,38
[4]	1	11,89	11,66	11,81	0,37	16,46	16,69	16,54	0,34
[4]	3	12,33	11,74	12,14	0,58	16,22	16,63	16,33	0,31
C(I)33FA(2)67W40	6	12,28	11,77	12,11	0,63	16,30	16,74	16,45	0,36
[5]	1	6,59	6,36	6,51	0,16	12,48	12,55	12,50	0,39
C(HSR)100FA0W40	3	5,62	5,43	5,56	0,28	12,04	12,39	12,16	0,27
[6]	1	12,53	12,26	12,44	0,30	15,31	15,41	15,35	0,22
C(HSR)50FA(2)50W40	3	11,16	10,53	10,95	0,57	14,99	15,82	15,27	0,56
[7]	1	8,86	8,18	8,63	0,48	14,75	14,76	14,75	0,48
C(I)50FA(1)50W40	3	6,05	5,21	5,77	0,78	14,38	14,22	14,33	0,18
[8]	1	13,16	13,00	13,11	0,26	17,21	17,37	17,26	0,39
C(I)50FA(2)50W50	3	12,09	11,32	11,83	0,94	17,99	17,94	17,97	0,54

Tabel 4.4: Capillaire en totale porositeiten van [1] t.e.m. [8] op 1, 3 en 6 maanden ouderdom

Tabel 4.5: Gelporositeiten van [1] t.e.m. [8] op 1, 3 en 6 maanden ouderdom

Mengeling	Gelporositeit [%]						
Ouderdom [maan	d]	AA'	В	ABA'	$\sigma_{ABA'}$		
[1]	1	6,73	6,94	6,80	0,21		
	3	5,66	7,20	6,17	0,94		
C(I)100FA0W40	6	6,68	7,57	6,98	0,68		
[2]	1	4,12	5,34	4,30	0,81		
[2]	3	8,87	9,18	8,97	0,29		
C(I)65FA(2)35W40	6	-	8,93	8,93	0,66		
[3]	1	4,86	6,09	5,29	0,62		
[5]	3	6,68	7,99	7,12	0,86		
C(I)50FA(2)50W40	6	7,42	8,39	7,74	0,62		
[4]	1	4,57	5,11	4,72	0,36		
[+]	3	3,85	4,89	4,19	0,67		
C(I)33FA(2)67W40	6	4,02	4,97	4,34	0,83		
[5]	1	5,90	6,19	5,99	0,47		
C(HSR)100FA0W40	3	6,42	6,96	6,60	0,38		
[6]	1	2,78	3,15	2,90	0,26		
C(HSR)50FA(2)50W40	3	3,83	5,30	4,32	0,81		
[7]	1	5,89	6,59	6,12	0,58		
C(I)50FA(1)50W40	3	8,33	9,01	8,56	0,77		
[8]	1	4,05	4,37	4,16	0,24		
C(I)50FA(2)50W50	3	5,90	6,62	6,14	0,70		

Uit Tabel 4.4 blijkt onder meer dat de capillaire porositeiten van de B-proefstukken steeds iets lager liggen dan die van de A-proefstukken. Het verschil bedraagt gemiddeld ongeveer 0,5%. Dit fenomeen valt wellicht te verklaren 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 komt dit verschil veel minder tot uiting. Ook al is het verschil weliswaar niet significant te noemen, toch leveren de B-proefstukken vaak iets grotere totale porositeiten op.

Wanneer er geen verschil bestaat in totale porositeit van de A- en B-proefstukken, gaat een kleinere capillaire porositeit automatisch gepaard met een grotere gelporositeit. Dit blijkt ook uit Tabel 4.5, waar voor de B-proefstukken de hoogste waarden worden genoteerd. In de gevallen waar de totale porositeiten van de B-proefstukken hogere waarden geven dan die van de A-proefstukken, komt het verschil in gelporositeit nog sterker tot uiting, wat uiteraard logisch is. Proefstukken die uit de massa van het beton zijn genomen, worden met andere woorden gekenmerkt door een fijnere poriënstructuur. Door ervoor te zorgen dat er voldoende dekking aanwezig is, zal de wapening zich in de minder poreuze massa van het beton bevinden. Schadelijke stoffen zullen dan minder gemakkelijk tot het wapeningsstaal kunnen doordringen.

4.3.1 Open porositeit in functie van de ouderdom

De Figuren 4.1, 4.2 en 4.3 tonen hoe de porositeiten evolueren in functie van de ouderdom.

Capillaire porositeit (Fig. 4.1)

De capillaire porositeit van de mengeling zonder vliegas [1] kent een vrij constant verloop over de verschillende leeftijden. Dit is vrij logisch aangezien buiten de hydratatie van het cement geen secundaire reacties doorgaan. Bij de mengelingen [2] en [3] die respectievelijk 35 en 50% vliegas bevatten, is de capillaire porositeit na 3 en 6 maanden duidelijk gedaald in vergelijking met de meetresultaten na 1 maand. De sterkste terugval wordt waargenomen binnen een termijn van 3 maanden en kan wellicht toegeschreven worden aan de optredende puzzolane reactie.

Daarna kent mengeling [3] nog een lichte afname in capillaire porositeit. Bij mengeling [2] daarentegen is de porositeit na 6 maanden opnieuw enigszins toegenomen, wat op het eerste zicht vreemd lijkt. Bovendien heeft deze capillaire porositeit na 6 maanden enkel

betrekking op B-proefstukken (zie Tabellen 4.4 en 4.5), waarvoor eigenlijk lagere waarden worden verwacht. Wel zijn de resultaten na 3 en 6 maanden afkomstig van twee verschillende betonmengelingen (resp. [2b] en [2a]), hetgeen de afwijkende porositeit mogelijks kan verklaren. Voor beide mengelingen werd immers een significant verschil in druksterkte waargenomen (zie Bijlage B).

In Fig. 4.2 is bij mengeling [2] na 6 maanden ook een toename van de totale porositeit waarneembaar. Dit betekent dat de verhouding capillaire porositeit / totale porositeit maar een beperkte toename kent. Na 3 maanden wordt 35% van de totale porositeit ingenomen door capillaire poriën, terwijl dit na 6 maanden oploopt tot 40%.

Bij mengeling [4] is terug sprake van een quasi constant verloop. Ondanks het aanzienlijke gehalte vliegas (67%) wordt er toch geen afname in capillaire porositeit waargenomen. Een te kleine hoeveelheid cement levert wellicht te weinig $Ca(OH)_2$, waardoor puzzolane reactie moeilijk kan optreden. Bij Lammertijn (2007) neemt de capillaire porositeit van dezelfde betonsamenstelling met luchtbelvormer echter wel af in functie van de tijd.



Fig. 4.1: Capillaire porositeit van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 in functie van de ouderdom

Totale porositeit en gelporositeit (Fig. 4.2 en 4.3)

De totale porositeit van de referentiemengeling [1] wordt naar analogie met de capillaire porositeit gekenmerkt door een quasi constant verloop tussen 1 en 3 maanden ouderdom. Het is wel nogal vreemd dat er na 6 maanden terug een toename van de totale porositeit wordt waargenomen. Gezien de aanzienlijke spreiding op de meetresultaten bij mengeling [1], is deze stijging eerder verwaarloosbaar en kan een vrij constant verloop worden aangenomen. Bij mengeling [2] is de totale porositeit na 6 maanden sterker toegenomen. Mogelijks heeft dit opnieuw te maken met het feit dat voor de metingen op 3 en 6 maanden ouderdom verschillende betonmengelingen (resp. [2b] en [2a]) gebruikt werden.

De totale porositeit van mengeling [3] is licht toegenomen na 3 maanden en blijft daarna quasi constant. De gelporositeit is blijkbaar iets meer toegenomen dan dat het aandeel aan capillaire poriën gedaald is.

Mengeling [4] met 67% vliegas vertoont een praktisch constant porositeitsverloop, wat terug wijst op problemen met de reactie van de vliegas.

Algemeen kan gesteld worden dat het optreden van puzzolane reacties bij mengelingen met vliegas eerder een beperkte invloed heeft op de totale porositeit in vergelijking met de capillaire porositeit.



Fig. 4.2: Totale porositeit van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 in functie van de ouderdom

Wat de gelporositeit betreft, vertonen de mengelingen [2] en [3] een duidelijke toename na 3 maanden. Na de sterke stijging is bij mengeling [2] een constant verloop zichtbaar. Bij mengeling [3] daarentegen blijft de gelporositeit na 3 maanden weliswaar verder toenemen, zij het in mindere mate. Dit zou er kunnen op wijzen dat de puzzolane reactie bij mengeling [2] met 35% vliegas reeds grotendeels heeft plaatsgevonden na 3 maanden. Bij mengeling [3] met 50% vliegas zouden wel nog voldoende vliegas en Ca(OH)₂ beschikbaar zijn om verder te kunnen reageren.

Voor mengeling [4] met 67% vliegas blijkt het omgekeerde te gelden en is de gelporositeit na 3 maanden licht gedaald om vervolgens vrij constant te blijven. Wellicht heeft een tekort aan Ca(OH)₂ ervoor gezorgd dat de puzzolane reactie niet of weinig is doorgegaan.

De gelporositeit van mengeling [1] toont eerst een beperkte daling tussen 1 en 3 maanden ouderdom om dan na 6 maanden opnieuw ietwat te stijgen. Het verloop is gelijkaardig aan dat van de totale porositeit. Gezien de spreiding van de meetresultaten kan terug een vrij constant verloop worden aangenomen, wat aannemelijker is voor een betonmengeling zonder vliegas.



Fig. 4.3: Gelporositeit van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 in functie van de ouderdom

4.3.2 Open porositeit in functie van de cementvervanging

Capillaire porositeit (Fig. 4.1)

De referentiemengeling [1] vertoont over het algemeen een lagere capillaire porositeit dan de vliegasmengelingen. Enkel met mengeling [2] wordt onder invloed van de puzzolane reactie na 3 maanden een lagere waarde bekomen. Op langere termijn is de capillaire porositeit van de mengeling met 35% vliegas quasi analoog aan deze van de referentie. Zoals reeds werd aangegeven in paragraaf 4.3.1, is ook bij mengeling [3] een afname van de capillaire porositeit waarneembaar na verloop van tijd. Deze is echter niet van die grootteorde dat de mengeling met vliegas op termijn een even kleine porositeit vertoont als de referentiemengeling. De grootste capillaire porositeit wordt waargenomen bij mengeling [4] met 67% vliegas. Betonsamenstellingen met dergelijke hoge percentages vliegas zijn dus veel toegankelijker voor schadelijke stoffen.

Totale porositeit en gelporositeit (Fig. 4.2 en 4.3)

De totale porositeit neemt toe in functie van het gehalte vliegas. Op te merken valt dat de totale porositeiten van alle mengelingen met vliegas vrij dicht bij elkaar liggen. De bekomen waarden voor de referentie liggen een heel stuk lager.

Referentiemengeling [1] vertoont de grootste initiële gelporositeit. Vanaf een ouderdom van 3 maanden geven de betonmengelingen [2] en [3] echter nog hogere waarden. Deze toename is het meest uitgesproken bij de mengeling met 35% vliegas. Daar zowel mengelingen [2] als [3] gekenmerkt worden door een hogere gelporositeit, wordt voor beiden een lagere capillaire porositeit verwacht dan bij mengeling [1]. Fig. 4.1 geeft echter aan dat dit enkel het geval is voor mengeling [2]. Dit komt omdat mengeling [3] over de ganse lijn een hogere totale porositeit vertoont dan mengeling [2].

4.3.3 Invloed van luchtbelvormers

De door Lammertijn (2007) vastgestelde porositeiten bij de betonmengelingen met luchtbelvormer zijn terug te vinden in Bijlage C.

1 maand (Fig. 4.4 en 4.5)



Fig. 4.4: Porositeiten van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 zonder luchtbelvormer (LBV) op 1 maand ouderdom



Fig. 4.5: Porositeiten van REF, FA35, FA50 en FA67 met luchtbelvormer (LBV) op 1 maand ouderdom

Onderlinge vergelijking van de betonsamenstellingen met luchtbelvormer (REF, FA35, FA50 en FA67) en zonder luchtbelvormer ([1], [2], [3] en [4]) op 1 maand ouderdom, wijst uit dat zowel de capillaire als de totale porositeiten lagere waarden opleveren wanneer de hulpstof in kwestie niet wordt toegevoegd. Dit verschil is 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. Een quasi gelijke toename van beide porositeiten bij gebruik van luchtbelvormers, zal ervoor zorgen dat de gelporositeit niet verandert. Een grotere of kleinere stijging van de totale ten opzichte van de capillaire porositeit geeft aanleiding tot een toegenomen, respectievelijk afgenomen gelporositeit.

3 maanden (Fig. 4.6, Fig. 4.7)

Na 3 maanden gelden dezelfde bevindingen als op 1 maand ouderdom. Alleen is er bij mengeling [4] en FA67 niet langer een verschil in capillaire porositeit waarneembaar. Daardoor vertoont FA67 ook een grotere gelporositeit dan [4], en dit in tegenstelling tot de referentie en de andere vliegasmengelingen met luchtbelvormer



Fig. 4.6: Porositeiten van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 zonder luchtbelvormer (LBV) op 3 maanden ouderdom



Fig. 4.7: Porositeiten van REF, FA35, FA50 en FA67 met luchtbelvormer (LBV) op 3 maanden ouderdom

6 maanden (Fig. 4.8, Fig. 4.9)



Fig. 4.8: Porositeiten van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 zonder luchtbelvormer (LBV) op 6 maanden ouderdom



Fig. 4.9: Porositeiten van REF, FA35, FA50 en FA67 met luchtbelvormer (LBV) op 6 maanden ouderdom

Na 6 maanden zijn alle mengelingen met luchtbelvormer opnieuw gekenmerkt door een grotere capillaire en totale porositeit ten opzichte van deze zonder luchtbelvormer. De totale porositeit is op deze leeftijd echter niet veel groter, wat ervoor zorgt dat de mengelingen met luchtbelvormer allemaal een kleinere gelporositeit vertonen.

Besluit

Tabel 4.6 geeft nog eens een overzicht van de waargenomen porositeitsverschillen ($\Delta \phi$) tussen de mengelingen met en zonder luchtbelvormer op de verschillende leeftijden. Negatieve waarden voor de gelporositeit wijzen erop dat de mengelingen met luchtbelvormer lagere meetresultaten geven. Slechts in twee gevallen geldt het omgekeerde. Zoals hierboven reeds werd aangegeven, komt dit doordat de totale porositeit sterker is toegenomen dan de capillaire porositeit. Daarnaast blijkt uit Tabel 4.6 ook dat er geen evenredig verband bestaat tussen het porositeitsverschil en het gehalte aan vliegas.

Algemeen kan gesteld worden dat de toevoeging van luchtbelvormer niet alleen leidt tot een verhoging van het initiële luchtgehalte van het beton met ongeveer 2% (zie 3.2.1 en 4.1), maar ook tot een gewijzigde open porositeit. Zo is de totale porositeit op 1 maand ouderdom gemiddeld gemiddeld 2,7% hoger. Het verschil neemt echter af in functie van de tijd. Na 6 maanden bedraagt het gemiddeld immers nog maar 0,7%. Het capillaire

porositeitsverschil na 1 maand is gelijk aan 2,8%. Tussen 1 en 3 maanden ouderdom neemt het verschil terug af, om na 6 maanden weer toe te nemen tot ongeveer 2,4%. Pas op 6 maanden ouderdom worden bij alle mengelingen met luchtbelvormer lagere gelporositeiten gemeten. De meetresultaten zijn gemiddeld 1,7% lager dan deze van de mengelingen zonder luchtbelvormer.

Ouderdom [m]		1			3			6		
Porositeitsverschil [%]		$\Delta \phi_{cap}$	$\Delta \phi_{tot}$	$\Delta \phi_{gel}$	$\Delta \phi_{cap}$	$\Delta \phi_{tot}$	$\Delta \phi_{gel}$	$\Delta \phi_{cap}$	$\Delta \phi_{tot}$	$\Delta \phi_{gel}$
	0	2,86	2,60	-0,27	2,55	1,23	-1,32	2,46	0,64	-1,82
vliegasgehalte [%]	35	1,36	3,42	2,06	4,86	1,72	-3,14	3,94	0,90	-3,03
	50	4,51	3,28	-1,23	1,74	0,82	-0,92	2,32	1,07	-1,25
	67	2,56	1,38	-1,17	0,07	0,94	0,86	0,99	0,36	-0,63

Tabel 4.6: Porosteitsverschillen betonsamenstellingen met en zonder luchtbelvormer

4.3.4 Invloed van cementtype, vliegastype en W/CM-factor

In de Figuren 4.10 en 4.11 worden een aantal mengelingen onderling met elkaar vergeleken op 1 en 3 maanden ouderdom. Vooreerst wordt de invloed van het cementtype op de porositeit geëvalueerd bij de referentie. Daarbij wordt gekeken naar de referentiemengelingen [1] en [5], die respectievelijk CEM I 52,5 N en CEM I 52,5 N HSR bevatten. Vervolgens wordt de invloed van dezelfde twee cementtypes bestudeerd bij de betonsamenstellingen [3] en [6] met een gehalte aan vliegas van 50%. Daarnaast wordt ook het effect van een ander type vliegas bekeken bij een mengeling met eenzelfde percentage vliegas [7]. Tot slot wordt aan de hand van mengeling [8] onderzocht wat de gevolgen zijn van een verhoogde W/CM-factor op de porositeit.

1 maand (Fig. 4.10)

Wat de referenties [1] en [5] betreft, is een quasi analoge totale porositeit waarneembaar. Een iets groter verschil valt op te merken bij zowel de capillaire als de gelporositeit. In vergelijking met de verschillen die worden vastgesteld bij de mengelingen met vliegas, zijn deze bij de referenties eerder verwaarloosbaar te noemen.



Fig. 4.10: Porositeiten van [1] C(I)100FA0W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W50 op 1 maand ouderdom

De mengelingen [3], [6] en [7] met 50% vliegas vertonen ook een vrij gelijkaardige totale porositeit. Wel is het aandeel aan capillaire poriën en gelporiën sterk verschillend. De grootste capillaire porositeit wordt vastgesteld bij de mengeling op basis van HSR-cement [6], de laagste bij de mengeling met vliegas FA(1) [7]. De aanwezigheid van dit type vliegas zorgt ervoor dat deze 50%-mengeling het best presteert qua porositeit. Het gebruik van HSR-cement daarentegen blijkt eerder een nefaste invloed te hebben. Om dit te kunnen verklaren is enige notie van de eigenschappen van CEM I 52,5 N HSR vereist. In paragraaf 6.1.4 wordt daar dieper op ingegaan.

Een W/CM-factor van 0,5 bij mengeling [8] met 50% vliegas resulteert in de hoogste totale porositeit. De capillaire poriën hebben hierin het grootste aandeel, wat uiteraard de duurzaamheid niet ten goede komt. Dit is een bevestiging van de bevindingen in de literatuur (paragraaf 2.1.3), waar gesteld werd dat te veel aanmaakwater in een bijkomende capillaire porositeit resulteert.

3 maanden (Fig. 4.11)

Het algemene porositeitsverloop na 3 maanden is quasi volledig analoog. De mengelingen [1] en [5] verschillen opnieuw nauwelijks van elkaar. Wel is de capillaire porositeit van referentie [5] op basis van Portland HSR-cement na 3 maanden kleiner dan deze van [1], terwijl na 1 maand het omgekeerde geldt. In paragraaf 6.1.4 wordt daaromtrent een nadere verklaring gegeven. Bij de mengelingen met 50% vliegas vertoont [6] opnieuw de hoogste capillaire porositeit. In vergelijking met de situatie na 1 maand is de capillaire porositeit na 3 maanden wel telkens afgenomen bij [3], [6] en [7]. De hoogste gelporositeit wordt opnieuw waargenomen bij de mengeling met het andere type vliegas [7]. Ook valt op te merken dat de capillaire en de gelporositeit van [7] respectievelijk lager en hoger zijn dan deze van referentie [1].

Ondanks de geringe afname in capillaire porositeit, blijft mengeling [8] na 3 maanden nog altijd de meest poreuze betonsamenstelling.



Fig. 4.11: Porositeiten van [1] C(I)100FA0W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W50 op 3 maanden ouderdom

Besluit

Samenvattend kan op basis van paragraaf 4.3.4 het volgende worden geconcludeerd.

- De aanwezigheid van HSR-cement in combinatie met vliegas heeft een nefaste invloed op de porositeit en bevordert de toegankelijkheid voor schadelijke stoffen. Een groot deel van het poriënvolume wordt immers ingenomen door capillaire poriën. Dit is niet het geval bij betonsamenstellingen met enkel CEM I 52,5 N HSR.
- 2) Het gebruik van vliegas FA(1) geeft na 3 maanden aanleiding tot een hogere gelporositeit en een lagere capillaire porositeit dan bij de referentie [1]. Mogelijke oorzaken hiervan komen aan bod in paragraaf 6.1.5.
- 3) Een verhoogde W/CM-factor resulteert in een poreuzer beton, ook wanneer een deel van het cement vervangen wordt door vliegas. Om een duurzaam beton te bekomen dient de W/CM-factor steeds zo laag mogelijk te worden gehouden.

4.4 Gaspermeabiliteit

Voor de onderlinge vergelijking van de verschillende mengelingen zal enkel gekeken worden naar de gaspermeabiliteit bij verzadigingsgraad 0%.

4.4.1 Gaspermeabiliteit in functie van de ouderdom

De Figuren 4.12, 4.13 en 4.14 tonen de meetresultaten van de mengelingen [1], [2], [3] en [4] op respectievelijk 1, 3 en 6 maanden ouderdom. Per mengeling wordt telkens de gasdoorlatendheid bij een druk van 2, 3 en 4 bar gegeven met de bijhorende, weliswaar zeer kleine standaardafwijking over de drie tijdsmetingen. Op basis van de bekomen gaspermeabiliteitscoëfficiënten k_a kan het volgende worden geconcludeerd.

Bij de referentie [1] wordt een toename in gasdoorlatendheid waargenomen tussen 1 en 3 maanden ouderdom. Pas daarna is er sprake van een constant verloop. De aanvankelijke stijging is nogal vreemd. Dit komt wellicht opnieuw doordat voor de metingen na 1 en 3 maanden proefstukken afkomstig van een verschillende betonmengeling (resp. [1b] en [1a]) werden gebruikt. Een gelijkaardig verloop wordt waargenomen bij mengeling [2] met 35% vliegas, terwijl eigenlijk wordt verwacht dat de gaspermeabiliteit in de eerste 3 maanden zou afnemen onder invloed van de puzzolane reactie. Voor de gaspermeabiliteitsproeven op de 3 leeftijden is telkens dezelfde mengeling gebruikt, wat bij de referentie niet het geval was. Een verschillende betonmengeling kan dus niet de verklaring zijn.

Bij de mengelingen [3] en [4] met respectievelijk 50 en 67% vliegas, lijkt de gasdoorlatendheid wel te dalen in de eerste 3 maanden. Na 6 maanden is bij [3] terug sprake van een lichte toename. Verwacht wordt dat de gaspermeabiliteit tussen 3 en 6 maanden ouderdom eerder daalt zoals bij [4] of constant blijft.

4.4.2 Gaspermeabiliteit in functie van de druk

Normaal gezien zou de schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt moeten afnemen onder toenemende druk. Volgens Boel (2006) wijst een dergelijk omgekeerd evenredig verband op laminaire stroming, hetgeen als voorwaarde geldt om formule (2-6) te mogen gebruiken voor de berekening van de gasdoorlatendheid. Zoals de onderstaande figuren aangeven, blijkt dit voor de mengelingen met een hoog gehalte aan vliegas (67%) echter niet het geval te zijn. Bij 4 bar worden immers hogere meetwaarden bekomen dan bij 3 bar. De vraag stelt zich of hier nog sprake is van laminaire stroming. Dit kan volgens Boel (2006) gecontroleerd worden door na te gaan of er een lineair verband bestaat tussen het verschil van de kwadratische drukken P_1^2 - P_2^2 [bar²] en het debiet Q [m³/s]. Dit blijkt voor alle mengelingen het geval te zijn (zie Bijlage D). Wel vertonen de mengelingen waarbij de gaspermeabiliteit niet daalt onder invloed van de toenemende druk, iets lagere correlatiewaarden, wat zou kunnen wijzen op een minder uitgesproken laminaire stroming. Dit fenomeen wordt door Boel (2006) echter alleen vastgesteld bij drukken hoger dan 4 bar en hogere verzadigingsgraden.

4.4.3 Gaspermeabiliteit in functie van de cementvervanging

1 maand (Fig. 4.12)

Na 1 maand is duidelijk te zien dat de gasdoorlatendheid bij 2, 3 en 4 bar toeneemt in functie van de cementvervanging. In vergelijking met de referentie zijn HVFAbetonsamenstellingen op jonge leeftijd veel toegankelijker voor O_2 en CO_2 , waardoor ze gevoeliger zijn voor carbonatatie en corrosie.



 Fig. 4.12:
 Schijnbare gaspermeabiliteit k_a voor [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 op 1 maand ouderdom

3 maanden (Fig. 4.13)

Op een leeftijd van 3 maanden lijkt de gaspermeabiliteit veel minder afhankelijk van de cementvervanging doordat de mengeling met 50% vliegas [3] lagere meetwaarden oplevert dan de mengeling met 35% vliegas [2]. Dit is mogelijks te verklaren doordat mengeling [2] voorafgaand aan de gaspermeabiliteitsmeting bij verzadigingsgraad 0%, een viertal weken langer in de oven van 105 °C werd bewaard. Het zou kunnen dat de proefstukken door een te lange droging meer uitgedroogd zijn of microscheuren zijn gaan vertonen. Wanneer dit laatste het geval is, kan zuurstofgas zich gemakkelijk doorheen het beton voortbewegen langs de scheuren. Beide fenomenen kunnen aanleiding geven tot een grotere gasdoorlatendheid.

Desondanks liggen de meetresultaten van de mengelingen [1], [2] en [3] na 3 maanden vrij dicht bij elkaar. Na verloop van tijd gaan de mengelingen [2] en [3] met respectievelijk 35 en 50% vliegas, onder invloed van de puzzolane reactie immers een gelijkaardige gaspermeabiliteit vertonen als de referentie [1].

Bij mengeling [4] is de gaspermeabilieit na 3 maanden wel afgenomen. De meetwaarden zijn echter nog altijd hoger dan deze van de mengelingen met een lagere cementvervanging.



Fig. 4.13: Schijnbare gaspermeabiliteit k_a voor [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 op 3 maanden ouderdom

6 maanden (Fig. 4.14)



Fig. 4.14: Schijnbare gaspermeabiliteit k_a voor [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 op 6 maanden ouderdom

Na 6 maanden is bij de mengelingen [1] en [2] een quasi gelijke gasdoorlatendheid waarneembaar. Tussen 3 en 6 maanden ouderdom is de gasdoorlatendheid nog verder gedaald, behalve bij mengeling [3]. De gaspermeabiliteit van mengeling [4] is ook verder gedaald maar niet genoeg om analoge waarden te halen als bij de referentie. De dalende trend is evenwel niet waarneembaar bij de porositeit (zie paragraaf 4.3.1).

Besluit

Algemeen kan gesteld worden dat mengelingen met een gehalte aan vliegas van 35%, mits een voldoende lange nabehandeling, even goed kunnen presteren qua gasdoorlatendheid als traditioneel beton. Voor de mengeling met 50% vliegas kan dit niet met zekerheid worden gezegd op basis van de meetresultaten op 3 en 6 maanden ouderdom. In het geval van grotere cementvervangingen door vliegas (67%), zal de gaspermeabiliteit op langere termijn weliswaar dalen. Toch zullen dergelijke HVFA-mengelingen een grotere doorlatendheid blijven vertonen. Mogelijks is dit te wijten aan de puzzolane reactie die niet volledig kan doorgaan bij gebrek aan Ca(OH)₂.

4.4.4 Invloed van luchtbelvormers

In deze paragraaf zal enkel de vergelijking worden gemaakt tussen de schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënten k_a van de mengelingen met en zonder luchtbelvormer op 1 maand ouderdom.

Met	luchtbelvo	rmer		Zonder luchtbelvormer				
Mengeling	2 bar	3 bar	4 bar	Mengeling	2 bar	3 bar	4 bar	
REF	1,62	1,07	1,19	[1] C(I)100FA0W40	1,13	0,73	0,59	
FA35	1,99	1,19	1,06	[2] C(I)65FA(2)35W40	1,65	1,11	0,96	
FA50	2,69	1,87	1,80	[3] C(I)50FA(2)50W40	2,69	1,91	2,07	
FA67	4,50	3,22	3,72	[4] C(I)33FA(2)67W40	5,01	3,85	4,97	

Tabel 4.7: Schijnbare gaspermeabiliteit k_a met en zonder luchtbelvormer op 1 maand ouderdom

Uit Tabel 4.7 blijkt dat enkel bij de referentie en de 35%-mengeling sprake is van een geringe afname van de gasdoorlatendheid wanneer geen luchtbelvormer wordt gebruikt. De mengeling met 50% vliegas geeft vrij analoge meetwaarden met en zonder luchtbelvormer. Bij een gehalte aan vliegas van 67% wordt een hogere gasdoorlatendheid gemeten in het geval geen luchtbelvormer werd aangewend, wat misschien nogal vreemd is. Bij de betonsamenstellingen met luchtbelvormer zijn de proefstukken altijd gedurende een vaste periode gedroogd geweest bij 105 °C. In paragraaf 3.2.4 werd reeds aangegeven

dat de droogperiode in het kader van dit eindwerk verlengd werd om er zeker van te zijn dat een constante massa werd bereikt. Het zou kunnen dat dit bij de mengelingen met luchtbelvormer niet altijd het geval was. Het nog aanwezige water kan er dan toe hebben geleid dat een lagere gaspermeabiliteit werd gemeten.

In tegenstelling tot wat werd vastgesteld bij de porositeit is er voor de gasdoorlatendheid hoe dan ook geen éénduidig verschil merkbaar tussen betonsamenstellingen met en zonder luchtbelvormer.

4.4.5 Invloed van cementtype, vliegastype en W/CM-factor

Om de invloed van het cementtype, het vliegastype en de W/CM-factor op de gasdoorlatendheid te evalueren, zullen opnieuw dezelfde mengelingen zoals bij de studie van de porositeit, met elkaar worden vergeleken.





Fig. 4.15: Schijnbare gaspermeabiliteit k_a voor [1] C(I)100FA0W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W50 op 1 maand ouderdom

In tegenstelling tot hetgeen bij de porositeit werd vastgesteld, is na 1 maand een duidelijker verschil in gasdoorlatendheid waarneembaar tussen de referenties [1] en [5]. Wel geeft mengeling [1] opieuw lagere meetwaarden dan mengeling [5]. Bij de mengelingen [3], [6]

en [7] met 50% vliegas vertoont [3] de grootste gasdoorlatendheid. Niettegenstaande het feit dat bij mengeling [6] een grotere capillaire porositeit werd vastgesteld, wordt blijkbaar toch een lagere gasdoorlatendheid gemeten die kleiner is dan deze van de referentie [5] op basis van hetzelfde Portland HSR-cement. De mengeling op basis van vliegas FA(1) [7] die reeds gekenmerkt was door een lage capillaire porositeit, blijkt ook een geringe gasdoorlatendheid te vertonen. De meetwaarden vallen zelfs lager uit dan deze van de referentie [1]. Naar analogie met de porositeit leidt een hogere W/CM-factor bij mengeling [8] ook tot een grotere gasdoorlatendheid.



3 maanden (Fig. 4.16)

Fig. 4.16: Schijnbare gaspermeabiliteit k_a voor [1] C(I)100FA0W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [3]
 C(I)50FA(2)50W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8]
 C(I)50FA(2)50W50 op 3 maanden ouderdom

Na 3 maanden wordt ongeveer hetzelfde verloop in gasdoorlatendheid waargenomen voor de verschillende mengelingen. Opnieuw verschillen de twee referenties van elkaar. In tegenstelling tot de situatie na 1 maand vertoont mengeling [1] nu de grootste gasdoorlatendheid. Wel is het nogal vreemd dat de gasdoorlatendheid van [1] tussen 1 en 3 maanden ouderdom is toegenomen. Mogelijks komt dit doordat het gaat om een herneming van dezelfde betonsamenstelling (resp. [1b] en [1a]) die blijkbaar enigszins afwijkt van de eerste mengeling. Er werd onder meer ook vastgesteld bij de druksterkte (zie Bijlage B) dat er verschillen waren tussen beide betonsamenstellingen. Na 3 maanden vertonen de mengelingen met vliegas nagenoeg analoge gasdoorlatendheden als op 1 maand ouderdom. Er is zelfs een geringe afname waar te nemen, behalve voor de mengelingen [6] en [7] waar de gasdoorlatendheden quasi constant bleven.

4.5 Capillaire wateropslorping

Tabel 4.8 toont de wateropslorpingscoëfficiënten G_1 en G_2 van de mengelingen [1] t.e.m. [8] met de bijhorende R²-waarden op de verschillende leeftijden.

1 m	1 maand									
	Mangaling	Cap.	opslorping	na droging	bij 40 °C	Cap. opslorping na droging bij 105 °C				
	weingening	R ²	G_1	R²	G_2	R ²	G_1	R ²	G ₂	
[1]	C(I)100FA0W40	0,991	0,254	0,999	0,071	0,998	0,706	0,991	0,258	
[2]	C(I)65FA(2)35W40	0,997	0,544	0,997	0,139	0,994	0,779	0,980	0,411	
[3]	C(I)50FA(2)50W40	0,996	0,631	0,999	0,217	0,998	1,137	0,995	0,746	
[4]	C(I)33FA(2)67W40	0,997	1,222	0,985	0,469	0,999	1,709	0,919*	0,565*	
[5]	C(HSR)100FA0W40	0,997	0,310	0,986	0,092	0,984	0,632	0,992	0,267	
[6]	C(HSR)50FA(2)50W40	0,983	0,534	0,997	0,191	0,980	0,957	1,000	0,534	
[7]	C(I)50FA(1)50W40	0,992	0,639	1,000	0,228	0,998	0,864	0,991	0,449	
[8]	C(I)50FA(2)50W50	0,995	1,015	0,997	0,416	0,999	2,491	0,900*	0,643*	
3 m	aanden									
	Mongoling	Cap.	opslorping	na droging	bij 40 °C	Cap. ops	lorping na c	lroging bij	105 °C	
	wiengening	R ²	G_1	R ²	G ₂	R ²	G ₁	R ²	G ₂	
[1]	C(I)100FA0W40	0,989	0,266	1,000	0,123	0,998	0,948	0,989	0,453	
[2]	C(I)65FA(2)35W40	0,995	0,309	0,987	0,076	0,997	0,721	0,990	0,416	
[3]	C(I)50FA(2)50W40	0,990	0,441	0,983	0,188	0,999	1,108	0,999	0,552	
[4]	C(I)33FA(2)67W40	0,996	0,852	0,978	0,229	1,000	1,431	0,994	0,623	
[5]	C(HSR)100FA0W40	0,983	0,172	0,997	0,078	0,999	0,603	0,997	0,227	
[6]	C(HSR)50FA(2)50W40	0,992	0,365	0,982	0,121	0,995	0,653	0,994	0,512	
[7]	C(I)50FA(1)50W40	0,995	0,418	0,987	0,111	0,979	0,724	0,978	0,334	
[8]	C(I)50FA(2)50W50	0,991	0,793	0,956*	0,138*	0,999	1,713	0,835*	0,822*	
6 m	aanden									
	Mangaling	Cap.	opslorping	na droging	bij 40 °C	Cap. opslorping na droging bij 105 °C				
	wiengening	R ²	G ₁	R ²	G ₂	R ²	G ₁	R ²	G ₂	
[1]	C(I)100FA0W40	0,978	0,206	0,976	0,082	0,999	0,850	0,995	0,349	
[2]	C(I)65FA(2)35W40	-	-	-	-	-	-	-	-	
[3]	C(I)50FA(2)50W40	0,996	0,501	0,984	0,127	0,999	1,126	0,987	0,558	
[4]	C(I)33FA(2)67W40	0,986	0,721	0,950	0,153	0,999	1,097	0,946*	0,516*	
[5]	C(HSR)100FA0W40	-	-	-	-	-	-	-	-	
[6]	C(HSR)50FA(2)50W40	-	-	-	-	-	-	-	-	
[7]	C(I)50FA(1)50W40	-	-	-	-	-	-	-	-	
[8]	C(I)50FA(2)50W50	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabel 4.8: Opslorpingscoëfficiënten G1 en G2 van [1] t.e.m. [8] op 1, 3 en 6 maanden ouderdom

* Onderschatting van G₂ door lagere R²-waarde

Zoals aangegeven in paragraaf 2.2.3 zijn G_1 en G_2 de richtingscoëfficiënten van de curve die verkregen wordt door de gemiddelde massatoename per oppervlakte-eenheid uit te zetten in functie van de vierkantswortel van de tijd. Deze curven zijn terug te vinden in Bijlage E.

Soms gebeurt het dat de proefstukken reeds vóór het einde van de proef sterk verzadigd zijn met water. De bovenzijden van de kubussen beginnen dan vochtig aan te voelen. Doorgaans treedt dit effect eerst op ter hoogte van het afstrijkvlak. Eens het opgezogen water de bovenzijde van de kubus heeft bereikt, verloopt de capillaire wateropname minder snel en begint de curve af te vlakken. Dit resulteert in een lagere R²-waarde (* in Tabel 4.8) voor de rechte die coëfficiënt G₂ bepaalt. Het fenomeen doet zich voor bij de mengeling met een gehalte aan vliegas van 67% [4] en bij de mengeling met de verhoogde W/CM-factor [8], en vooral na droging bij 105 °C. Door het afvlakkende deel van de curve niet in rekening te brengen, zal een grotere R²-waarde en ook een grotere opslorpingscoëfficiënt G₂ worden bekomen.

4.5.1 Capillaire wateropslorping in functie van de ouderdom

In de Figuren 4.17, 4.18, 4.19 en 4.20 worden de opslorpingscoëfficiënten G_1 en G_2 van de mengelingen [1] t.e.m. [4] na droging bij 40 en 105 °C weergegeven.



Fig. 4.17: G₁ van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 na droging bij 40 °C in functie van de ouderdom



Fig. 4.18: G₂ van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 na droging bij 40 °C in functie van de ouderdom

Na droging bij 40 °C wordt bij alle mengelingen op basis van vliegas een daling van beide opslorpingscoëfficiënten vastgesteld tussen 1 en 3 maanden ouderdom (Fig. 4.17, Fig. 4.18). Deze afname is waarschijnlijk toe te schrijven aan de puzzolane reactie die een verfijning van de poriënstructuur teweegbrengt. De sterkste terugval is te zien bij de mengeling met het hoogste gehalte aan vliegas [4], wat niet in overeenstemming is met de capillaire porositeit van de gelijknamige mengeling. Na 3 maanden is bij de mengelingen met vliegas eerder sprake van een constant verloop. In het geval van de referentie veranderen de beide opslorpingscoëfficiënten weinig in functie van de tijd. Bovendien wordt voor de capillaire porositeit ook een vrij constant verloop vastgesteld (zie Fig. 4.1).

Na droging bij 105 °C is voor opslorpingscoëfficiënt G_1 het volgende waarneembaar (Fig. 4.19). Wat de referentie betreft, vindt vreemd genoeg een stijging plaats tussen 1 en 3 maanden ouderdom. Na droging bij 40 °C was ook een zeer lichte stijging te zien, al was deze verwaarloosbaar. Wellicht komt dit doordat de capillaire wateropname na 3 maanden werd bepaald op een herneming van dezelfde betonsamenstelling [1a] die blijkbaar enigszins verschilt van de oorspronkelijke referentiemengeling [1b]. Dit verschil uit zich ook in de resultaten van de drukproeven (zie Bijlage B). Onder normale omstandigheden is wellicht opnieuw een vrij constant verloop in functie van de tijd te verwachten.
Bij de mengelingen [2] en [3] met respectievelijk 35 en 50% vliegas is quasi geen afname merkbaar tussen 1 en 3 maanden ouderdom. Bij mengeling [3] is zelfs sprake van een constant verloop over de ganse periode. De meetresultaten van mengeling [4] met 67% vliegas daarentegen, blijven afnemen in functie van de ouderdom, wat opnieuw niet klopt met de gemeten totale porositeit na droging bij 105 °C (zie Fig. 4.2)



Fig. 4.19: G₁ van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 na droging bij 105 °C in functie van de ouderdom

Het verloop in functie van de tijd van opslorpingscoëfficiënt G_2 na droging bij 105 °C wordt voorgesteld in Fig. 4.20. Om dezelfde reden die hierboven reeds werd aangehaald, neemt de wateropslorpingscoëfficiënt van de referentie toe tussen 1 en 3 maanden ouderdom. De mengeling [2] met 35% vliegas kent in die periode een vrij constant verloop, terwijl bij de mengeling met 50% vliegas [3] sprake is van een afname voorafgaand aan het constant verloop tussen 3 en 6 maanden ouderdom. Wat de mengeling met 67% vliegas [4] betreft, lijkt het meetresultaat op 1 maand ouderdom niet echt logisch aangezien het lager uitvalt dan dat van mengeling [3]. De opslorpingscoëfficiënt wordt echter gekenmerkt door een lagere R²-waarde (0,919), wat wijst op een afvlakking van de curve op lange termijn doordat alle capillaire kanalen gevuld raken met water. Wanneer het afvlakkend stuk achterwege wordt gelaten, resulteert dit in een hogere R²-waarde (0,984) en bijgevolg ook een hogere waarde voor G₂ (1,13). De aldus bekomen opslorpingscoëfficiënt is hoger dan

deze van mengeling [3] op 1 maand ouderdom. In die veronderstelling zal G_2 sterk dalen tussen 1 en 3 maanden ouderdom, om daarna nog in lichte mate af te nemen. Fig. 4.20 toont weliswaar nog een lichte afname tussen 3 en 6 maanden voor [4]. Opnieuw is echter sprake van een lagere R²-waarde (0,946), hetgeen wijst op een onderschatting van het meetresultaat.



Fig. 4.20: G₂ van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 na droging bij 105 °C in functie van de ouderdom

4.5.2 Capillaire wateropslorping in functie van de cementvervanging

Na droging bij 40 °C (Fig. 4.17 en 4.18)

Opslorpingscoëfficiënt G_1 neemt over het algemeen toe naarmate het gehalte vliegas hoger ligt. Het meetresultaat op 3 maanden ouderdom van de 35%-mengeling ligt echter dicht in de buurt van dat van de referentie. Op lange termijn liggen de opslorpingscoëfficiënten van [3] en [4] nog altijd beduidend hoger dan deze van de mengeling met 0% vliegas [1]. Zoals aangegeven in paragraaf 2.2.3 heeft de coëfficiënt G_1 betrekking op de randzone van het beton. 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.

Op basis van coëfficiënt G_2 kunnen uitspraken worden gedaan over de kernzone van het beton. Initieel neemt de opslorpingscoëfficiënt opnieuw duidelijk toe in functie van het gehalte aan vliegas. Op lange termijn valt echter op dat de meetwaarden van alle mengelingen vrij dicht bij elkaar liggen. In tegenstelling tot de randzone neemt de kernzone van HVFA-beton na een voldoende lange nabehandeling maar in beperkte mate meer water op via de capillairen dan de kernzone van traditioneel beton. Al na 3 maanden presteert de 35%-mengeling [2] zelfs beter dan de referentie [1].

Na droging bij 105 °C (Fig. 4.19 en 4.20)

Over het algemeen gelden dezelfde bevindingen als na droging bij 40 °C. Na 1 maand neemt de opslorpingscoëfficiënt G_1 toe in functie van de cementvervanging. Op 3 maanden ouderdom wordt enkel voor de mengeling met 35% vliegas [2] een lagere waarde gevonden dan bij de referentie. Na 6 maanden geven de mengelingen [3] en [4] vrijwel analoge resultaten, die nog altijd hoger liggen dan bij de 0%-mengeling [1].

Rekening houdend met de onderschatting van het meetresultaat van mengeling [4] op 1 maand ouderdom, neemt ook G_2 aanvankelijk toe in functie van de cementvervanging. Na 3 maanden geeft mengeling [2] opnieuw een beter resultaat dan de referentie. De kern- en randzone van de HVFA-mengelingen [3] en [4] nemen op termijn nog altijd gemakkelijker water op via de capillairen dan de betonsamenstelling op basis van enkel Portland cement.

4.5.3 Capillaire wateropslorping in functie van de droogtemperatuur

Bij een verhoging van de droogtemperatuur nemen G_1 en G_2 sterk toe. Zowel in de rand als in de kernzone van het beton wordt het water gemakkelijker opgenomen. 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.

4.5.4 Invloed van luchtbelvormers

Om na te gaan of de aanwezigheid van luchtbelvormers invloed heeft op de capillaire wateropname van beton met vliegas, worden in Tabel 4.9 de proefresultaten van de mengelingen met en zonder deze hulpstof na droging bij 40 °C met elkaar vergeleken.

Conjillaira anglorning na draging hij 40 °C an 1 maand audardam									
	i ping na u		<u>140 C 0</u>			7	1 1 1	.1 1	
Gehalte	Met luchtbelvormer			Gehalte	Zonder luchtbelvormer				
vliegas	R ²	G_1	R ²	G_2	vliegas	R ²	G_1	R ²	G_2
0%	0,997	0,443	1,000	0,118	0%	0,991	0,254	0,999	0,071
35%	0,990	0,499	0,998	0,150	35%	0,997	0,544	0,997	0,139
50%	1,000	0,529	1,000	0,244	50%	0,996	0,631	0,999	0,217
67%	0,965	0,744	0,994	0,462	67%	0,997	1,222	0,985	0,469
Capillaire opslorping na droging bij 40 °C op 3 maanden ouderdom									
Gehalte	Met luchtbelvormer			Gehalte	Zonder luchtbelvormer				
vliegas	R ²	G ₁	R ²	G ₂	vliegas	R ²	G ₁	R ²	G ₂
0%	0,996	0,359	0,873	0,094	0%	0,989	0,266	1,000	0,123
35%	0,999	0,625	0,995	0,143	35%	0,995	0,309	0,987	0,076
50%	1,000	0,731	0,992	0,201	50%	0,990	0,441	0,983	0,188
67%	1,000	1,062	0,981	0,338	67%	0,996	0,852	0,978	0,229
Capillaire opslor	rping na d	roging bi	j 40 °C op	o 6 maand	len ouderdom				
Gehalte]	Met lucht	belvorme	r	Gehalte	Zonder luchtbelvormer			er
vliegas	R ²	G ₁	R ²	G ₂	vliegas	R ²	G ₁	R ²	G ₂
0%	0,999	0,277	0,987	0,103	0%	0,978	0,206	0,976	0,082
35%	0,994	0,318	0,980	0,107	35%	-	-	-	-
50%	1,000	0,373	0,975	0,154	50%	0,996	0,501	0,984	0,127
67%	0,998	0,829	0,942	0,306	67%	0,986	0,721	0,950	0,153

Tabel 4.9: Opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van de mengelingen met en zonder luchtbelvormer na droging bij 40 °C

1 maand

Na 1 maand vertoont de referentie zonder luchtbelvormer duidelijk lagere opslorpingscoëfficiënten G_1 en G_2 in vergelijking met deze bekomen bij de referentie met luchtbelvormer. Bij de betonmengelingen met vliegas geldt voor coëfficiënt G_1 net het omgekeerde. Zonder luchtbelvormer worden immers hogere waarden bekomen. In het geval van coëfficiënt G_2 is weinig verschil merkbaar.

3 maanden

Op een ouderdom van 3 maanden vertonen alle betonsamenstellingen zonder luchtbelvormer een duidelijk lagere opslorpingscoëfficiënt G_1 . Hetzelfde geldt voor G_2 bij de mengelingen met 35 en 67% vliegas. Het al dan niet voorkomen van een luchtbelvormer heeft weinig invloed op de coëfficiënt G_2 van de referentie en de 50%-mengeling.

6 maanden

Na 6 maanden geven de referentie en de 67%-mengeling zonder luchtbelvormer opnieuw lagere waarden voor G_1 . Bij de 50%-mengeling is echter een toename waarneembaar. Wat

de coëfficiënt G_2 betreft wordt bij de 67%-mengeling zonder luchtbelvormer een duidelijk lagere waarde vastgesteld. De referentie en de 50%-mengeling tonen weinig verschil.

Besluit

Op basis van de hierboven besproken proefresultaten is er niet meteen een éénduidig verband af te leiden tussen het gebruik van luchtbelvormers en de capillaire wateropname.

4.5.5 Invloed van cementtype, vliegastype en W/CM-factor

Bijkomende invloedsfactoren zoals het cementtype, het vliegastype en de W/CM-factor die ook al werden bestudeerd in het kader van de porositeit en de gaspermeabiliteit, werden voor de capillaire wateropname enkel bekeken na voorafgaande droging bij 40 °C.



1 maand (Fig. 4.21)

Fig. 4.21: G₁ en G₂ van [1] C(I)100FA0W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W50 na droging bij 40 °C op 1 maand ouderdom

Onderlinge vergelijking van de referenties op basis van gewoon Portland cement [1] en Portland HSR-cement [5], wijst uit dat beide opslorpingscoëfficiënten (G_1 en G_2) van dezelfde grootteorde zijn, ook al is G_1 van [5] na 1 maand iets groter. Ook tussen de 50%-

mengelingen op basis van CEM I 52,5 N met FA(2) [3], CEM I 52,5 N HSR met FA(2) [6] en CEM I 52,5 N met FA(1) [7] is niet echt een duidelijk verschil waarneembaar, en zeker niet wat coëfficiënt G_2 betreft. De randzone van mengeling [6] neemt wel minder water op. Een hogere W/CM-factor bij mengeling [8] maakt dat de capillaire wateropname in de kern- en randzone gevoelig hoger ligt dan bij de 50%-mengelingen met een W/CM-factor van 0,4 [3] [6] [7].

3 maanden (Fig. 4.22)

Na 3 maanden wordt nagenoeg hetzelfde verloop vastgesteld als na 1 maand. Bij de meeste mengelingen worden ook lagere opslorpingscoëfficiënten gemeten, zeker wanneer het gaat om een betonsamenstelling op basis van vliegas. Dit is wellicht toe te schrijven aan de puzzolane reacties die na verloop van tijd doorgaan.

In het geval van de referentie [1] is bijna nauwelijks sprake van een daling van de capillaire wateropname, wat logisch is aangezien de poriënstructuur van [1] quasi niet verandert in functie van de tijd.





97

Referentie [5] vertoont wel een afname van G_1 na verloop van tijd, terwijl G_2 eerder constant blijft. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de doorgaans poreuzere randzone waarop G_1 betrekking heeft, na 3 maanden verder werd opgevuld met bijkomende hydratatieproducten van het cement. Daar in de minder poreuze kernzone minder cementeerbaar materiaal aanwezig is, zal daar veel minder sprake zijn van een verdere verdichting van de poriënstructuur in functie van de ouderdom. Bijgevolg zal de capillaire opslorpingscoëfficiënt in de kernzone slechts in zeer geringe mate afnemen.

Na 3 maanden is nog altijd de grootste wateropslorpingscoëfficiënt G1 waarneembaar bij de mengeling met een hogere W/CM-factor [8]. De coëfficiënt G₂ is echter zeer sterk afgenomen en is van dezelfde grootteorde als die bij de 50%-mengelingen met een lagere W/CM-factor [3] [6] [7]. Blijkbaar heeft een toename in W/CM-factor op langere termijn maar een beperkte invloed op de capillaire opslorping in de kernzone, wat misschien niet onmiddellijk wordt verwacht. Wel wordt G₂ na 3 maanden licht onderschat gezien de iets lagere R²-waarde (0,956).

Besluit

Van alle onderzochte parameters, heeft de W/CM-factor de grootste invloed op de gevoeligheid voor capillaire wateropname. De proeven op langere termijn tonen aan dat vooral de randzone het meest kritiek blijft.

Hoofdstuk 5

Resultaten beton met hoogovenslakken

5.1 Verwerkbaarheid en luchtgehalte

In Tabel 3.9 werden de consistentieklasse van de slump, het volumegewicht, het luchtgehalte en de mengtijd van de mengelingen met een variërend gehalte aan hoogovenslakken opgenomen. Daar bij deze betonsamenstellingen nergens gebruik is gemaakt van luchtbelvormer, is een nadere studie van het initiële luchtgehalte hier niet aan de orde. Wel valt misschien nog op te merken dat het luchtgehalte naar analogie met de vliegasmengelingen zonder luchtbelvormer ongeveer 2% bedraagt. Dit betekent dat invloedsfactoren zoals het soort cementeerbaar materiaal, de cementhoeveelheid en de W/CM-factor het initieel gemeten luchtgehalte niet beïnvloeden.

5.2 Druksterkte

Voor de resultaten van de drukproeven op 1, 3 en 6 maanden ouderdom wordt verwezen naar Bijlage B.

5.3 Wateropslorping onder vacuüm

Tabel 5.1 geeft een overzicht van de gemiddelde capillaire en totale porositeiten van de mengelingen S0, S50, S70 en S85 op de verschillende leeftijden. Net zoals bij de mengelingen op basis van vliegas wordt een onderscheid gemaakt tussen de porositeiten van de A-proefstukken (A en A') en de B-proefstukken, alvorens een globaal gemiddelde (ABA') met bijhorende standaardafwijking (σ) op de individuele waarden wordt gegeven. Uit Tabel 5.1 valt op te maken dat de capillaire porositeit van de B-proefstukken steeds een stuk lager ligt dan die van de A-proefstukken. Het verschil bedraagt gemiddeld ongeveer

1%. Net zoals bij de vliegasmengelingen kan dit vermoedelijk door het wandeffect worden verklaard. Bij de totale porositeit is een geringer verschil merkbaar. Ook al is het verschil weliswaar niet significant te noemen, toch leveren de B-proefstukken meestal zelfs iets hogere waarden op.

Mengeling		Cap. J	porositeit b	ij 40 ± 5 °C	C[%]	Totale porositeit bij $105 \pm 2 \degree C$ [%]			
Ouderdom [maand]		AA'	В	ABA'	σ _{ABA'}	AA'	В	ABA'	σ _{ABA'}
	1 m	11,75	10,78	11,43	0,80	15,48	14,82	15,26	0,59
S 0	3 m	10,02	9,15	9,73	0,52	14,59	14,72	14,64	0,30
	6 m	11,43	9,77	10,88	1,18	14,51	14,56	14,53	0,63
	1 m	11,17	10,01	10,79	0,67	15,93	15,74	15,87	0,28
S50	3 m	9,51	8,66	9,23	0,60	14,69	14,89	14,76	0,31
	6 m	11,45	10,66	11,19	0,53	15,07	15,30	15,15	0,28
	1 m	9,93	9,18	9,68	0,53	15,48	15,66	15,54	0,57
S 70	3 m	9,97	8,80	9,58	0,66	15,80	15,74	15,78	0,61
	6 m	9,47	8,50	9,15	0,58	15,51	15,72	15,58	0,28
	1 m	10,57	9,94	10,36	0,51	15,83	16,48	16,04	0,49
S85	3 m	11,21	10,08	10,83	0,67	16,11	16,76	16,32	0,48
-	6 m	9,94	8,86	9,58	0,66	15,92	16,19	16,01	0,43

Tabel 5.1: Capillaire en totale porositeiten van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom

De berekende gelporositeiten worden weergegeven in Tabel 5.2. Daarbij werd dezelfde onderverdeling aangehouden als in de voorgaande tabel.

Mengeling		Gelporositeit [%]						
Ouderdom [maand]		AA' B		ABA'	$\sigma_{ABA'}$			
	1 m	3,72	4,04	3,83	0,26			
S 0	3 m	4,57	5,58	4,91	0,53			
	6 m	3,08	4,78	3,65	1,14			
	1 m	4,76	5,72	5,08	0,64			
S50	3 m	5,18	6,24	5,53	0,77			
	6 m	3,62	4,64	3,96	0,54			
	1 m	5,55	6,48	5,86	0,60			
S 70	3 m	5,82	6,95	6,20	0,80			
	6 m	6,03	7,21	6,43	0,63			
	1 m	5,26	6,53	5,68	0,75			
S85	3 m	4,90	6,68	5,49	0,90			
	6 m	5,97	7,32	6,42	0,75			

Tabel 5.2: Gelporositeiten van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom

Een analoge totale porositeit voor de A- en B-proefstukken maakt dat een kleinere capillaire porositeit voor de B-proefstukken automatisch gepaard gaat met een grotere gelporositeit (zie Tabel 5.2). Proefstukken die uit de massa van het beton zijn genomen, vertonen met andere woorden een fijnere en minder toegankelijke poriënstructuur.

5.3.1 Open porositeit in functie van de ouderdom

Door de gemiddelde waarden van de verschillende porositeiten met de bijhorende standaardafwijkingen op de individuele waarden (σ) die in de Tabellen 5.1 en 5.2 werden samengebracht, uit te zetten in functie van de ouderdom, kan worden nagegegaan hoe ze evolueren tijdens het hydratatieproces (zie Figuren 5.1, 5.2 en 5.3).

Capillaire porositeit (Fig. 5.1)

Wat de capillaire porositeit betreft, is niet meteen een duidelijke trend waarneembaar in functie van de tijd.



Fig. 5.1: Capillaire porositeit van S0, S50, S70 en S85 in functie van de ouderdom

Zo wordt bij de betonmengelingen S0 en S50 een behoorlijke afname tussen 1 en 3 maanden ouderdom vastgesteld. Daarna stijgt de capillaire porositeit terug tot quasi analoge meetwaarden als na 1 maand. De aanvankelijke daling bij mengeling S50 is wellicht in zekere mate toe te schrijven aan de latent-hydraulische slakreactie, hoewel de

daling nogal sterk lijkt. De capillaire porositeit van referentie S0 neemt blijkbaar even veel af als deze van S50. Naar analogie met de referentie die bij het onderzoek naar HVFAbeton gebruikt werd, wordt eerder een constant verloop in de tijd verwacht. Gezien de vrij grote spreiding van de meetresultaten van S0 en S50 op de verschillende leeftijden, dient voor beide mengelingen de afname van de capillaire porositeit na 3 maanden wel enigszins gerelativeerd te worden.

Bij de betonsamenstellingen S70 en S85 die door een hoog slakkenpercentage gekenmerkt worden, is een ander porositeitsverloop waarneembaar. Tussen 1 en 3 maanden ouderdom kan van een vrij constant verloop worden gesproken, zij het wat minder uitgesproken bij mengeling S85. Daarna neemt de capillaire porositeit in beide gevallen af. In geval van S70 kan de daling gezien de spreiding van de meetresultaten, eerder als verwaarloosbaar worden beschouwd.

Totale porositeit en gelporositeit (Fig. 5.2 en 5.3)

Net zoals de capillaire nemen ook de totale porositeiten van de referentie S0 en de betonmengeling S50 af tussen 1 en 3 maanden ouderdom. Daarna wordt voor beide mengelingen een quasi constant verloop waargenomen. De aanvankelijke daling is wel minder sterk bij de referentie. Opnieuw wordt voor S0 over de ganse meetperiode eigenlijk een vrij constant verloop verwacht.



Fig. 5.2: Totale porositeit van S0, S50, S70 en S85 in functie van de ouderdom

Rekening houdend met de spreiding is bij de mengelingen S70 en S85 met een hoge cementvervanging, het verloop vrij constant tussen 1 en 6 maanden ouderdom. De optredende latent-hydraulische reacties brengen blijkbaar slechts geringe wijzigingen in de totale porositeit teweeg.



Fig. 5.3: Gelporositeit van S0, S50, S70 en S85 in functie van de ouderdom

Niettegenstaande het feit dat zowel de capillaire als de totale porositeit van de mengellingen S0 en S50 afnemen tussen 1 en 3 maanden ouderdom, is er toch sprake van een toename in gelporositeit. Dit betekent dat de totale porositeit in die periode minder sterk is gedaald dan de capillaire. Aangezien de hogere gelporositeiten na 3 maanden voortvloeien uit de bovengenoemde proefresultaten voor de capillaire porositeit, dient de toename na 3 maanden ook enigszins te worden gerelativeerd.

Voor de betonmengelingen S70 en S85 was wel sprake van een vrij constante totale porositeit in de tijd (Fig. 5.2). Het beschreven verloop van de capillaire porositeit (Fig. 5.1) resulteert dan logischerwijs in een gelporositeit die aanvankelijk vrij constant blijft en daarna toeneemt. Dit blijkt ook uit Fig. 5.3. Wel is de toename bij mengeling S70 eerder gering.

Besluit

Op basis van de gemeten porositeiten bij de referentie S0 en de mengeling S50 kunnen moeilijk sluitende conclusies worden getrokken omdat tussen 1 en 3 maanden ouderdom eigenlijk geen belangrijke daling in capillaire porositeit wordt verwacht, en zeker niet in het geval van de referentie S0. Een eventuele herhaling van de proeven op 3 maanden ouderdom lijkt dan ook aangewezen.

Bij de mengelingen S70 en S85 met een hoog slakkenpercentage kan voor de verschillende porositeiten een vrij constant verloop worden aangenomen tussen 1 en 3 maanden ouderdom. Na 6 maanden geldt dit enkel voor S70, aangezien de gelporositeit bij S85 is toegenomen. Het lijkt echter weinig waarschijnlijk dat deze stijging het gevolg is van een pas dan optredende latent-hydraulische slakreactie. Isotherme calorimetrische proeven die in het kader van de doctoraalstudie van Elke Gruyaert werden uitgevoerd, tonen immers aan dat al na 1 dag slakreacties doorgaan.

5.3.2 Open porositeit in functie van de cementvervanging

In deze paragraaf zullen de gevonden waarden voor de capillaire, de totale en de gelporositeit worden bestudeerd in functie van de toenemende cementvervanging (zie Figuren 5.4, 5.5 en 5.6).

1 maand (Fig. 5.4)

Na 1 maand wordt bij de vier mengelingen een quasi even grote totale porositeit vastgesteld. Wat de capillaire en de gelporositeit betreft zijn duidelijkere verschillen te zien. In vergelijking met de referentiemengeling vertonen alle mengelingen met hoogovenslakken een kleinere capillaire porositeit en een grotere gelporositeit. Van een evenredig verband tussen deze porositeiten en het slakkenpercentage is echter geen sprake. De mengelingen S70 en S85 lijken op 1 maand ouderdom het best te presteren, aangezien het aandeel fijne gelporiën daar groter is.



Mengeling

Fig. 5.4: Porositeiten van S0, S50, S70 en S85 op 1 maand ouderdom

3 maanden (Fig. 5.5)

Na 3 maanden is wel een verschil in totale porositeit waarneembaar. De betonmengelingen S0 en S50 geven analoge resultaten die duidelijk lager liggen dan deze van de mengelingen S70 en S85.

Qua capillaire porositeit zijn de meetresultaten van S0, S50 en S70 van dezelfde grootteorde. Rekening houdend met de grotere totale porositeit bij betonsamenstelling S70, is het aandeel capillaire poriën in verhouding lager. Voor betonmengeling S85 geldt ongeveer hetzelfde. De capillaire porositeit mag hier dan wel het hoogst zijn, de hoge totale porositeit maakt dat het percentage aan capillaire poriën ten opzichte van het totaal poriënvolume toch in de buurt komt van dat bij de andere mengelingen.

Alle mengelingen op basis van hoogovenslakken geven gelporositeiten die hoger liggen dan deze bij de referentie S0. Mengeling S50 presteert echter het best aangezien in dit geval een vrij hoge gelporositeit in combinatie met een lage totale porositeit wordt genoteerd.



■ cap. por. ■ tot. por. □ gelpor.

Fig. 5.5: Porositeiten van S0, S50, S70 en S85 op 3 maanden ouderdom

6 maanden (Fig. 5.6)



Fig. 5.6: Porositeiten van S0, S50, S70 en S85 op 6 maanden ouderdom

Na 6 maanden blijkt de totale porositeit wel toe te nemen naarmate meer cement door hoogovenslakken vervangen wordt. De capillaire porositeit (φ_{cap}) en de gelporositeit (φ_{gel}) worden daarom telkens in verhouding tot de totale porositeit (φ_{tot}) geëvalueerd, waarbij deze laatste gelijkgesteld wordt aan 100% (zie Tabel 5.3). Zoals uit Tabel 5.3 blijkt, is het aandeel capillaire poriën het grootst bij de mengelingen S0 en S50. Beide betonsamenstellingen geven gelijkaardige resultaten. Bij de mengelingen S70 en S85 zijn de respectievelijke aandelen aan capillaire poriën en gelporiën vrij gelijkaardig.

Tabel 5.3: ϕ_{cap}/ϕ_{tot} en ϕ_{gel}/ϕ_{tot} na 6 maanden

[%]	$\phi_{cap}\!/\phi_{tot}$	$\phi_{gel}\!/\phi_{tot}$
SO	74,9	25,1
S 50	73,9	26,1
S 70	58,8	41,3
S85	59,9	40,1

Besluit

Enkel bij de totale porositeit is op termijn sprake van een weliswaar weinig uitgesproken evenredig verband met de cementvervanging. Wat de aandelen capillaire en gelporiën betreft, blijken de mengelingen S70 en S85 met een hoog percentage aan hoogovenslakken, over het algemeen een kleinere capillaire porositeit en bijgevolg een fijnere poriënstructuur te vertonen.

5.4 Gaspermeabiliteit

Net zoals bij de HVFA-mengelingen wordt de gasdoorlatendheid van deze vier mengelingen bestudeerd bij verzadigingsgraad 0%.

5.4.1 Gaspermeabiliteit in functie van de ouderdom

De schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënten k_a van de verschillende betonsamenstellingen op 1, 3 en 6 maanden ouderdom worden respectievelijk weergegeven in de Figuren 5.7, 5.8 en 5.9. Per mengeling worden telkens de gasdoorlatendheden bij 2, 3 en 4 bar gegeven met de bijhorende, weliswaar zeer kleine standaardafwijkingen over de drie tijdsmetingen.

Bij onderlinge vergelijking kan worden geconstateerd dat de gasdoorlatendheid van de betonsamenstellingen S0 en S50 nauwelijks verandert in functie van de tijd. Tussen 1 en 3 maanden ouderdom is bij de mengelingen S70 en S85 eveneens een quasi constant verloop waarneembaar. Daarna gaat de gaspermeabiliteit vreemd genoeg terug toenemen. De stijging is het meest uitgeproken bij mengeling S85. Een mogelijk verklaring hiervoor is dat de proeven na 6 maanden werden uitgevoerd op hernemingen van de mengelingen S70 en S85 (resp. S70/1 en S85/1 i.p.v. S70/3 en S85/3). Daarbij werden bovendien druksterktes vastgesteld die gemiddeld respectievelijk 7 en 9 N/mm² lager waren dan deze van de eerste S70- en S85-mengelingen (zie Bijlage B). In hoofdstuk 6 wordt nader ingegaan op het verband tussen de gasdoorlatendheid en de druksterkte.

5.4.2 Gaspermeabiliteit in functie van de druk

Op de drie bestudeerde leeftijden neemt de schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt k_a bij alle mengelingen af onder toenemende druk (Fig. 5.7, 5.8 en 5.9), en dit in tegenstelling tot bepaalde mengelingen op basis van vliegas. Dit is in overeenstemming met RILEM TC 116-PCD (1999), waar een omgekeerd evenredig verband als bewijs geldt voor de afwezigheid van lekken. Volgens Boel (2006) wijst een dergelijk verband tevens op een laminaire stroming van het zuurstofgas, wat een van de voorwaarden was om formule (2-6) te mogen toepassen. Voor deze mengelingen blijkt er dus wat dat betreft geen probleem te bestaan. De laminaire stroming van het zuurstofgas wordt bovendien bevestigd in Bijlage D, waar voor alle betonsamenstellingen een lineair verband tussen het verschil van de kwadratische drukken P_1^2 - P_2^2 [bar²] en het debiet Q [m³/s] wordt aangetoond. Veel zal wellicht te maken hebben met het feit dat de gaspermeabiliteit hier bestudeerd wordt bij verzadigingsgraad 0% en bij drukken van maximaal 4 bar. Boel (2006) stelt immers vast dat hogere waarden voor beide parameters er kunnen voor zorgen dat het omgekeerd evenredig verband niet langer geldig is.

5.4.3 Gaspermeabiliteit in functie van de cementvervanging

1 maand (Fig. 5.7)

Op een leeftijd van 1 maand wordt voor alle drukken een toename van de gaspermeabiliteit in functie van het slakkenpercentage vastgesteld. De bekomen waarden voor de mengelingen S50 en S70 zijn ongeveer nog van dezelfde grootteorde als voor S0, terwijl de mengeling met een slakkenpercentage van 85% gekenmerkt wordt door een behoorlijk hoge gasdoorlatendheid. De gaspermeabiliteit is er ongeveer dubbel zo hoog als bij de 70%-mengeling.



Fig. 5.7: Schijnbare gaspermeabiliteit k_a voor S0, S50, S70 en S85 op 1 maand ouderdom

3 maanden (Fig. 5.8)



Fig. 5.8: Schijnbare gaspermeabiliteit k_a voor S0, S50, S70 en S85 op 3 maanden ouderdom

Op een ouderdom van 3 maanden worden analoge gasdoorlatendheden verkregen als op 1 maand.

6 maanden (Fig. 5.9)

Na 6 maanden is wel een uitgesproken toename van de gasdoorlatendheid in functie van de cementvervanging zichtbaar. Ook bestaat er een duidelijker verschil tussen de mengelingen S50 en S70. De gaspermeabiliteit van de 85%-mengeling is zeer sterk toegenomen en bedraagt nu zelfs meer dan het dubbel van de gasdoorlatendheid gemeten bij mengeling S70. Zoals aangegeven in paragraaf 5.4.1 moet de sterke stijging wel enigszins gerelativeerd worden, aangezien de proeven op 6 maanden ouderdom werden uitgevoerd op hernemingen van de mengelingen S70 en S85 (resp. S70/1 en S85/1 i.p.v. S70/3 en S85/3) die gekenmerkt werden door lagere druksterktes (zie Bijlage B).



2 bar 3 bar 4 bar

Fig. 5.9: Schijnbare gaspermeabiliteit k_a voor S0, S50, S70 en S85 op 6 maanden ouderdom

Besluit

Op basis van de bekomen proefresultaten kan worden besloten dat in vergelijking met de referentie, betonmengelingen op basis van hoogovenslakken door een grotere gasdoorlatendheid worden gekenmerkt, hoewel dit effect tot een vervangingspercentage van 70% eerder beperkt blijft. De verdere hydratatie van de slakken onder invloed van de latenthydraulische reactie doet de gaspermeabiliteit niet dalen.

5.5 Capillaire wateropslorping

De bekomen opslorpingscoëfficiënten G_1 en G_2 op de verschillende leeftijden na droging bij 40 en 105 °C zijn samengebracht in Tabel 5.4. Net zoals bij de HVFA-mengelingen werden ze afgeleid uit de curven die de gemiddelde massatoename per oppervlakteeenheid in functie van \sqrt{t} weergeven (zie Bijlage E). Daarnaast worden ook telkens de bijhorende R²-waarden vermeld. Zoals aangegeven in paragraaf 2.2.3, hebben de coëfficiënten G_1 en G_2 respectievelijke betrekking op de rand- en kernzone van het beton.

Tabel 5.4: Opslorpingscoëfficiënten G1 en G2 van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom

1 maand									
Mengeling	Cap. op	oslorping na	a droging bi	ij 40 °C	Cap. opslorping na droging bij 105 °C				
	R ²	G ₁	R ²	G ₂	R ²	G ₁	R ²	G ₂	
SO	0,989	0,598	0,999	0,247	0,999	1,576	0,876*	0,563*	
S50	0,994	0,747	0,981	0,182	0,998	1,374	0,922*	0,730*	
S70	0,993	0,582	0,998	0,220	0,999	1,246	0,993	0,676	
S85	0,998	0,744	0,988	0,265	0,999	0,973	0,987	0,497	
3 maanden									
Mengeling	Cap. op	slorping na	a droging bi	ij 40 °C	Cap. opslorping na droging bij 105 °C				
	R ²	G ₁	R ²	G ₂	R ²	G ₁	R ²	G ₂	
S 0	0,993	0,419	0,987	0,167	1,000	1,457	0,885*	0,554*	
S50	1,000	0,637	0,990	0,157	1,000	1,456	0,833*	0,597*	
S 70	0,996	0,594	0,967	0,150	-	-	-	-	
S85	0,996	0,676	0,949*	0,178*	-	-	-	-	
6 maanden									
Mengeling	Cap. op	oslorping na	a droging bi	ij 40 °C	Cap. opslorping na droging bij 105 °C				
	R ²	G ₁	R ²	G ₂	R ²	G ₁	R ²	G ₂	
SO	0,999	0,474	0,998	0,190	0,999	1,366	0,936*	0,593*	
S50	0,995	0,581	0,979	0,132	0,996	1,303	0,891*	0,654*	
S70	0,994	0,861	0,975	0,282	0,998	1,145	0,970	0,821	
S85	1,000	1,155	0,905*	0,113*	0,998	1,287	0,966	0,781	

* Onderschatting van G2 door lagere R2-waarde

5.5.1 Capillaire wateropslorping in functie van de ouderdom

Aangezien er na droging bij 105 °C niet op alle leeftijden meetresultaten beschikbaar zijn, worden in deze paragraaf enkel de meetresultaten na droging bij 40 °C grafisch weergegeven (Fig. 5.10 en 5.11). Daarnaast zullen de meetresultaten van de mengelingen S0 en S50 na droging bij 105 °C kort worden besproken.

Droging bij 40 °C (Fig. 5.10 en 5.11)

In het geval van de referentie en betonmengeling S50 is een lichte afname van de opslorpingscoëfficiënt G_1 waarneembaar tussen 1 en 3 maanden ouderdom. Daarna kan in

vergelijking met de aanvankelijke daling een vrij constant verloop worden aangenomen. Bij de betonsamenstellingen S70 en S85 daarentegen is tot op een ouderdom van 3 maanden slechts in zeer beperkte mate sprake van een toe- of afname van de capillaire opslorping. Na 6 maanden valt in beide gevallen echter een aanzienlijke stijging te noteren. Mogelijks is deze toename in zekere mate opnieuw te wijten aan het feit dat de betreffende monsters afkomstig zijn uit een herneming van dezelfde mengeling (resp. S70/1 en S85/1 i.p.v. S70/3 en S85/3) met een lagere druksterkte (zie Bijlage B).



Fig. 5.10: G1 van S0, S50, S70 en S85 na droging bij 40 °C in functie van de ouderdom

De opslorpingscoëfficiënten G_2 die op de kernzone van het beton betrekking hebben, vertonen gedurende de eerste 3 maanden bij de vier mengelingen een gelijkaardig dalend verloop. Pas daarna worden verschillen waargenomen. Zoals Tabel 5.4 aangeeft, is het bekomen meetresultaat voor de mengeling S85 na 6 maanden gekenmerkt door een duidelijk lagere R²-waarde, wat wijst op een onderschatting van G₂. Door de laatste 2 meetwaarden van de overeenkomstige massatoenamecurve (zie Bijlage D) niet in rekening te brengen brengen, komt G₂ hoger te liggen (0,1833). In die veronderstelling kennen de betonsamenstellingen S0, S50 en S85 een quasi ongewijzigd verloop tussen 3 en 6 maanden ouderdom. De capillaire wateropname van de mengeling S70 is echter toegenomen. Mogelijks komt dit doordat het opnieuw om een herneming van mengeling S70 gaat. In deze veronderstelling zou G₂ van mengeling S85 echter ook moeten toenemen, wat niet het geval is. De onderschatting van G₂ door de afvlakking van de curve is niet van die aard dat een stijgend verloop tussen 3 en 6 maanden ouderdom wordt verdoezeld.



← S0 - - S50 - S70 - × S85

Fig. 5.11: G₂ van S0, S50, S70 en S85 na droging bij 40 °C in functie van de ouderdom

Droging bij 105 °C (Tabel 5.4)

De gemeten opslorpingscoëfficiënten van de mengelingen S0 en S50 zijn van dezelfde grootteorde. Tussen 3 en 6 maanden ouderdom worden ze gekenmerkt door een quasi constant verloop. Wel blijkt de randzone van mengeling S50 na 1 maand iets minder water op te slorpen dan de referentie. Het omgekeerde geldt voot de kernzone.

5.5.2 Capillaire wateropslorping in functie van de cementvervanging

Uit Fig. 5.10 blijkt dat alle betonmengelingen op basis van hoogovenslakken met uitzondering van S70 na 1 maand, gekenmerkt worden door een grotere capillaire wateropname in de randzone dan de referentie. Wel is er geen sprake van een uitgesproken evenredig verband tussen de opslorpingscoëfficiënt G₁ en het aanwezige gehalte aan hoogovenslakken.

In het geval van de coëfficiënt G2 (Fig. 5.11) daarentegen, verschillen de mengelingen met hoogovenslakken veel minder van de referentie, zeker tussen 1 en 3 maanden ouderdom. Opnieuw valt geen evenredig verband met het slakkenpercentage waar te nemen.

Besluit

Het valt op dat de poreuzere randzone van het beton qua capillaire wateropname toch enigszins gevoeliger is voor de aanwezigheid van hoogovenslakken dan de kernzone. In het kader van de duurzaamheid dient daarmee rekening te worden gehouden.

5.5.3 Capillaire wateropslorping in functie van de droogtemperatuur

Op basis van de gegevens uit Tabel 5.4 kan worden besloten dat het opdrijven van de droogtemperatuur tot 105 °C, beide opslorpingscoëfficiënten doet toenemen. Doordat al het verdampbare water dan uit het beton verdwenen is, zal veel meer water kunnen worden opgenomen. Ook een eventuele beschadiging van de poriënstructuur ten gevolge van de hogere temperatuur kan niet volledig worden uitgesloten.

In Tabel 5.4 kan vaak minstens een verdubbeling van de opslorpingscoëfficiënten worden waargenomen. G_1 blijkt echter minder sterk toe te nemen bij mengeling S85 met het hoogste slakkenpercentage. De coëfficiënten G_2 vertonen wel voor alle betonsamenstellingen een beduidend hogere waarde. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat na droging bij 40 °C niet al het water uit de kernzone is verdwenen. Door te drogen bij 105 °C gaat dit water er wel uit en kan de kernzone veel meer capillair water opzuigen. Van de andere kant zou het ook kunnen dat droging bij 105 °C aanleiding geeft tot microscheuren die zorgen voor een grotere capillaire wateropname.

5.6 Carbonatatie

Aangezien het proefprogramma ter evaluatie van de carbonatatie op verschillende ouderdommen over een vrij lange periode liep, waren nog niet alle resultaten beschikbaar om in dit eindwerk te kunnen worden opgenomen. Het gaat dan in het bijzonder om de resultaten van de proefstukken die gedurende 16 of 24 weken aan carbonatatie worden blootgesteld. Enkel voor de proefstukken die aan de testen werden onderworpen op 1 maand ouderdom, zijn alle resultaten voorhanden. Op 3 maanden ouderdom ontbreken de meetwaarden na 24 weken carbonatatie, terwijl op een leeftijd van 6 maanden ook de resultaten na 16 weken carbonatatie nog niet kunnen worden verwerkt. Daarom zal in het kader van dit eindwerk vooral worden uitgegaan van de resultaten na 1 maand. Om de

invloed van de ouderdom te kunnen inschatten, zal waar mogelijk, de vergelijking met de reeds beschikbare resultaten op latere leeftijd worden gemaakt.

Wat de naamgeving van de proefresultaten betreft, wordt de volgende conventie gehanteerd. De carbonatatiedieptes en porositeiten van proefstukken die aan een verhoogde CO_2 -concentratie werden blootgesteld, worden als (CARB) aangeduid. De controle-proefstukken die overeenkomstig het carbonatatieregime over eenzelfde periode in een natte kast bij 20 °C en > 90% RV werden bewaard, krijgen de benaming (NAT) toebedeeld.

5.6.1 Carbonatatiediepte en carbonatatiecoëfficiënt

In Tabel 5.5 worden per mengeling de gemiddelde carbonatatiedieptes van de cilindervormige proefstukken in functie van de blootstellingstijd en de ouderdom weergegeven. In het geval van blootstelling aan carbonatatie worden ook telkens de standaardafwijkingen (σ) op de individuele waarden vermeld. Uit deze tabel kan het volgende worden geconcludeerd.

- Ongeacht de blootstellingstijd neemt de carbonatatiediepte op alle leeftijden toe naarmate het percentage aan hoogovenslakken stijgt. Bij de referentiemengeling S0 wordt nooit carbonatatie waargenomen. De controleproefstukken (NAT) zijn nooit gecarbonateerd met uitzondering van mengeling S85. De daar vastgestelde indringdieptes zijn echter te verwaarlozen.
- 2) Bij alle betonmengelingen op een ouderdom van 1 en 3 maanden neemt de indringdiepte toe in functie van de blootstellingstijd. De proefstukken van S50 die gedurende 24 weken aan een verhoogde CO₂-concentratie werden blootgesteld vertonen wel een iets lagere indringdiepte dan de proefstukken waarbij de blootstellingstijd 16 weken bedroeg.
- 3) Bij een vaste blootstellingstijd, daalt de gemiddelde carbonatatiediepte van alle mengelingen tussen 1 en 3 maanden ouderdom. Na 6 maanden is terug een lichte stijging waar te nemen, maar de bekomen waarde is nog steeds ongeveer de helft kleiner dan de indringdiepte op 1 maand ouderdom. Gezien de spreiding van de meetresultaten kan deze stijging als verwaarloosbaar worden beschouwd

ouderdom		1 maand									
blootstelling		4 weken			16 weken			24 weken			
indringdiepte [mm]		X _{NAT}	X _{CARB}	σ_{CARB}	X _{NAT}	X _{CARB}	σ_{CARB}	X _{NAT}	X _{CARB}	σ_{CARB}	
	S0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
mongoling	S50	0,0	3,8	2,1	0,0	8,6	2,4	0,0	6,9	3,6	
mengenng	S70	0,0	6,4	1,6	0,0	15,1	2,8	0,0	16,3	2,5	
	S85	0,9	15,4	2,3	0,5	27,9	3,0	0,8	48,2	0,8	
ouderdom			3 maanden								
blootstelling			4 weken			16 weken			24 weken		
indringdiepte [mm]		X _{NAT}	X _{CARB}	σ_{CARB}	X _{NAT}	X _{CARB}	σ_{CARB}	X _{NAT}	X _{CARB}	σ_{CARB}	
	S0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	
mongoling	S50	0,0	0,2	0,7	0,0	3,9	1,6	-	-	-	
mengening	S70	0,0	2,4	1,3	0,0	10,4	2,2	-	-	-	
	S85	0,5	6,9	1,4	0,9	22,2	3,9	-	-	-	
ouderdom			6 maanden								
blootstelling	5		4 weken	l	16 weken 2			24 weken			
indringdiepte [mm]		X _{NAT}	X _{CARB}	σ_{CARB}	X _{NAT}	X _{CARB}	σ_{CARB}	X _{NAT}	X _{CARB}	σ_{CARB}	
	S0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	
mongoline	S50	0,0	0,3	0,6	-	-	-	-	-	-	
mengenng	S 70	0,0	2,9	1,3	-	-	-	-	-	-	
	S85	0,0	7,7	2,1	-	-	-	-	-	-	

Tabel 5.5: Carbonatatiedieptes in functie van de blootstellingstijd en de ouderdom

Op basis van de proefresultaten op 1 maand ouderdom, kunnen de overeenkomstige carbonatatiecoëfficiënten worden bepaald door de gemiddelde indringdieptes uit te zetten in functie van de vierkantswortel van de blootstellingstijden en de richtingscoëfficiënt van de bekomen rechten te berekenen (zie Fig. 5.12).



Fig. 5.12: Trendlijnen ter bepaling van de carbonatatiecoëfficiënten op 1 maand ouderdom

De aldus bekomen carbonatatiecoëfficiënten en de bijhorende correlatiecoëfficiënten R² worden samengebracht in Tabel 5.6. A_{proef} is de coëfficiënt bij een CO₂-concentratie van 10%, wat overeenkomt met de instelling van de carbonatatiekast. In lucht is echter slechts 0,03% CO₂ aanwezig. Door de coëfficiënt A_{proef} te vermenigvuldigen met 0,055 wordt A_{lucht} (carbonatatiecoëfficiënt in de lucht) berekend [Audenaert (2006)]. De R²-waarde geeft aan hoe goed de trendlijn de opgemeten waarden benadert.

Mengeling	Aproef [mm/week ^{1/2}]	A _{lucht} [mm/week ^{1/2}]	R ²
S 0	0,00	0,000	-
S50	1,72	0,095	0,87
S7 0	3,50	0,193	0,99
S85	8,61	0,474	0,93

Tabel 5.6: Carbonatatiecoëfficiënten op 1 maand ouderdom

Zoals te verwachten was, neemt ook de carbonatatiecoëfficiënt toe met het gehalte aan hoogovenslakken.

5.6.2 Porositeit na carbonatatie

Vergelijking met de controleproefstukken (NAT)

In de hierna volgende figuren wordt de vergelijking gemaakt tussen de porositeiten van aan carbonatatie blootgestelde proefstukken (CARB) en de porositeiten van de overeenkomstige controlemonsters (NAT) op 1 maand ouderdom.

Alvorens daartoe over te gaan, is het nuttig te kijken in welke mate er een verschil bestaat tussen de gecoate referentieproefstukken en de niet gecoate proefstukken die louter en alleen gebruikt zijn voor de vacuümverzadiging (VAC). Er kunnen twee redenen aangehaald worden die een eventueel verschil verklaren. Vooreerst is het mogelijk dat de aangebrachte coating de open porositeit doet dalen doordat bij vacuümverzadiging minder water wordt opgenomen. Ten tweede zijn de gecoate proefstukken vier weken later getest geweest, waardoor het mogelijk is dat de hydratatie reeds verder gevorderd was en de porositeit bijgevolg gedaald is. De Figuren 5.13, 5.14, 5.15 tonen echter aan dat de verschillen tussen (NAT) en (VAC) eerder gering zijn.

Wat de invloed van carbonatatie betreft, is er niet meteen een éénduidige trend waar te nemen wanneer de blootstellingstijd slechts 4 weken bedraagt (zie Fig. 5.13, 5.14 en 5.15).



Fig. 5.13: Capillaire porositeit op 1 maand na 4 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT) en op 1 maand ouderdom (VAC)



Fig. 5.14: Totale porositeit op 1 maand na 4 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT) en op 1 maand ouderdom (VAC)



Fig. 5.15: Gelporositeit op 1 maand na 4 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT) en op 1 maand ouderdom (VAC)

Ten opzichte van de controleproefstukken (NAT) geven de carbonatatieproefstukken (CARB) lagere waarden voor de capillaire porositeit bij de mengelingen S0 en S50, terwijl voor de mengelingen S70 en S85 juist het omgekeerde geldt. Hetzelfde is van toepassing voor de totale porositeit met uitzondering van de mengeling S85. De controlemonsters (NAT) van de mengeling S0 geven een iets lagere gelporositeit in vergelijking met (CARB). De mengeling met 50% hoogovenslakken levert quasi analoge waarden op, terwijl de controleproefstukken van de mengelingen met 70% en 85% hoogovenslakken hogere gelporositeiten geven. Het is niet evident deze bevindingen in verband te brengen met de opgemeten carbonatatiedieptes. Aangezien bij de mengeling S0 geen carbonatatie werd vastgesteld, zouden de porositeiten van (CARB) en (NAT) moeten overeenkomen. Voor de totale en de gelporositeit blijkt dit redelijk te kloppen. Bij de capillaire porositeit is er sprake van een iets groter verschil.

De andere drie mengelingen zijn wel gecarbonateerd. Zoals blijkt uit paragraaf 5.6.1 is de indringdiepte groter naarmate meer cement door hoogovenslakken vervangen werd. Dit resulteert echter niet in allemaal grotere of allemaal kleinere porositeiten voor de drie betonsamenstellingen.

De porositeiten na een blootstellingstermijn van 16 weken worden weergegeven in de Figuren 5.16, 5.17 en 5.18.



Fig. 5.16: Capillaire porositeit op 1 maand na 16 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)



Fig. 5.17: Totale porositeit op 1 maand na 16 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)



Fig. 5.18: Gelporositeit op 1 maand na 16 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)

Voor de mengeling S0 ligt de capillaire porositeit van de controleproefstukken (NAT) iets hoger dan deze van de monsters die aan carbonatatie werden onderworpen. Het omgekeerde geldt bij de mengelingen S50, S70 en S85. Normaal gezien zou de opgemeten capillaire porositeit van S0 (CARB) niet mogen verschillen van S0 (NAT), want na een verblijf van 16 weken in de CO₂-kast, werd bij de desbetreffende proefstukken met behulp van fenolfthaleïne geen carbonatatie vastgesteld. De gehanteerde detectiemethode levert echter maar een ruwe schatting van de carbonatatiediepte op en laat niet toe beginnende carbonatatie op te sporen. Microscopisch onderzoek op slijpplaatjes is daarvoor meer aangewezen, maar kon echter niet worden uitgevoerd.

Na blootstelling aan een verhoogde CO₂-concentratie blijkt de capillaire porositeit van de proefstukken toe te nemen in functie van het aanwezige slakkenpercentage. Dit is niet het geval bij de controleproefstukken (NAT). Daar vertoont de mengeling S0 de grootste capillaire porositeit, terwijl de mengelingen S50, S70 en S85 lagere waarden geven die weliswaar licht toenemen naarmate de mengeling meer hoogovenslakken bevat. Het zou dus kunnen dat de latent-hydraulische reactie tot een fijnere poriënstructuur heeft geleid. Bij de mengeling met 0% slakken is er geen sprake van een secundaire hydratatiereactie met als gevolg dat de porositeit na 1 maand doorgaans nog weinig zal afnemen.

Wat de totale porositeit betreft kan uitgaande van Fig. 5.17 worden besloten dat de controleproefstukken (NAT) van alle vier de mengelingen hogere meetwaarden geven. Het verloop van de porositeiten in functie van de cementvervanging is vrij constant, en dit voor zowel de carbonatatie- als de controleproefstukken. De hoogste waarden worden vastgesteld bij mengeling S70, al is het verschil met de andere mengelingen niet zo groot. Wanneer de verhouding capillaire porositeit/totale porositeit bij de mengelingen met hoogovenslakken wordt beschouwd, dan is ze groter voor de gecarbonateerde proefstukken (CARB) dan voor de controleproefstukken (NAT).

Proefstukken die gedurende 16 weken in de carbonatatiekast (CARB) verbleven, vertonen een beduidend lagere gelporositeit dan hun overeenkomstige controleproefstukken (NAT), met uitzondering van de mengeling S0 (zie Fig. 5.18). Voor S0 is dit echter logisch aangezien bij deze mengeling ook geen carbonatatie werd vastgesteld. De carbonatatieproefstukken geven voor deze mengeling een iets hogere waarde, maar deze valt nog altijd binnen de foutenmarge. De gelporositeit van (CARB) is het laagst voor de mengeling waarvan het slakkenpercentage 85% bedraagt. De bekomen waarden voor de mengelingen S50 en S70 zijn vrij analoog. De gelporositeiten van de mengelingen met hoogovenslakken (CARB) liggen allemaal onder deze van de mengeling zonder slakken. Het omgekeerde is van toepassing voor de controleproefstukken (NAT) van de vier mengelingen. Daar vertonen de slakkenmengelingen een grotere gelporositeit. De bekomen waarden blijken ook onafhankelijk te zijn van het slakkenpercentage. Het feit dat de controleproefstukken van de mengelingen met hoogovenslakken hogere waarden geven, kan te maken hebben met de latent-hydraulische reactie tijdens de verdere hydratatie in de natte kast waardoor het aandeel aan fijne gelporiën toegenomen is. Van een dergelijke reactie is bij de 0%-mengeling geen sprake.

Zoals uit de Figuren 5.19, 5.20 en 5.21 blijkt, zijn de bevindingen na 24 weken vrij analoog aan deze na 16 weken.

Alleen bij de mengeling S50 is het verschil tussen de capillaire porositeit van de carbonatatie- en controleproefstukken veel minder uitgesproken. In verhouding tot de totale porositeit is het aandeel capillaire poriën nog altijd groter bij de proefstukken die aan carbonatatie werden blootgesteld.



Fig. 5.19: Capillaire porositeit op 1 maand na 24 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)



Fig. 5.20: Totale porositeit op 1 maand na 24 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)

De totale porositeit van de controlemonsters (NAT) is opnieuw groter dan deze van de carbonatatieproefstukken. In beide gevallen blijkt de totale porositeit licht te stijgen in functie van het slakkenpercentage.

Voor de mengeling S0 zijn de gelporositeiten van de controleproefstukken (NAT) en de monsters die aan carbonatatie werden blootgesteld (CARB), opnieuw quasi even groot. De gelporositeiten van de gecarbonateerde mengelingen met slakken zijn kleiner dan deze van hun overeenkomstige controleproefstukken. De porositeit neemt ook af in functie van het slakkenpercentage. Bij de controleproefstukken daarentegen is eerder het omgekeerde van toepassing, hoewel de meetwaarden van de mengelingen S70 en S85 vrij analoog zijn.



CARB NAT

Fig. 5.21: Gelporositeit op 1 maand na 24 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)

Invloed van de blootstellingstijd

Wat de capillaire porositeit (zie Fig. 5.22) betreft, wordt de mengeling S0 zonder hoogovenslakken gekenmerkt door een geringe daling naarmate de blootstellingstijd toeneemt. Het verminderde aantal capillaire poriën kan wellicht gewoon toegeschreven worden aan de verdere hydratatie van het cement. Met uitzondering van mengeling S70, vertonen alle betonsamenstellingen op basis van hoogovenslakken een grotere capillaire porositeit na 16 weken in vergelijking met deze na 4 weken. Het waargenomen verloop bij S50 en S85 kan mogelijks in verband gebracht worden met de opgemeten carbonatatiedieptes (zie Tabel 5.5). De capillaire porositeit van S70 kan echter in het geheel niet aan de indringdieptes worden gerelateerd.



Fig. 5.22: Capillaire porositeit van (CARB) in functie van de blootstellingstijd op 1 maand ouderdom



Fig. 5.23: Totale porositeit van (CARB) in functie van de blootstellingstijd op 1 maand ouderdom

Uit Fig. 5.23 kan worden afgeleid dat de totale porositeiten van alle betonsamenstellingen, behalve deze van S85, tussen 16 en 24 weken dalen in functie van de blootstellingstijd. Mogelijke oorzaken hiervoor zijn de verdere hydratatie van het cement en het doorgaan van de latent-hydraulische slakreactie. De mate waarin deze invloedsfactoren bijdragen tot de porositeitsdaling, kan worden nagegegaan door de vergelijking te maken met de totale porositeiten van de overeenkomstige controleproefstukken (NAT). Na 16 weken bijvoorbeeld bedraagt het porositeitsverschil tussen (CARB) en (NAT) gemiddeld 0,95% voor de 4 betonsamenstellingen (Fig. 5.17), terwijl na 24 weken een gemiddeld verschil van 1,1% wordt waargenomen (Fig. 5.20). Dit impliceert dat 0,15% te wijten moet zijn aan de carbonatatie zelf.

In het geval van de gelporositeit (zie Fig. 5.24) is mogelijks wel sprake van een éénduidig verband met de carbonatatiediepte (zie Tabel 5.5). Zo kent de referentie S0 een vrij constant verloop. Dit is in zekere zin logisch aangezien bij deze mengeling ook nooit carbonatatie werd vastgesteld. Bij de betonsamenstellingen met hoogovenslakken is sprake van een omgekeerd evenredig verband tussen de gelporositeit en de carbonatatiediepte. Zelfs de geringe toename aan gelporiën bij S50 na 24 weken blijkt overeen te komen met een kleinere carbonatatiediepte in vergelijking met de resultaten die na 16 weken worden bekomen.



Fig. 5.24: Gelporositeit van (CARB) in functie van de blootstellingstijd op 1 maand ouderdom

Invloed van de ouderdom

Om de invloed van de ouderdom op de verschillende porositeiten na carbonatatie te kunnen evalueren, wordt de vergelijking gemaakt tussen de meetresultaten na 1 en 3 maanden bij een blootstellingstijd van 16 weken (zie Figuren 5.25 en 5.26).



Fig. 5.25: Porositeiten van S0, S50, S70 en S85 op 1 maand ouderdom na 16 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)



Fig. 5.26: Porositeiten van S0, S50, S70 en S85 op 3 maanden ouderdom na 16 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)
Zo blijkt bij S0, S50, S70 en S85 slechts een gering verschil te bestaan tussen de totale porositeiten van (CARB) na 1 en 3 maanden. Wel is bij alle mengelingen sprake van een afname in capillaire porositeit en een toename in gelporositeit. Bij de overeenkomstige controleproefstukken (NAT) valt echter dezelfde trend waar te nemen, waardoor de herverdeling van capillaire poriën en gelporiën niet zo maar aan carbonatatie kan worden toegeschreven. Bij alle mengelingen behalve S70 is de afname in capillaire porositeit telkens kleiner bij de carbonatatieproefstukken (CARB) dan bij de controleproefstukken (NAT). Daarbij bestaat geen verband tussen het gehalte aan hoogovenslakken en de afname in capillaire porositeit. Na carbonatatie (CARB) bedraagt de afname gemiddeld 1,2%, terwijl een vochtige nabehandeling (NAT) gepaard gaat met een gemiddelde daling van 1,4%. Het verschil is dus eerder gering.

Besluit

- Onder invloed van carbonatatie treden wel degelijk wijzigingen op in de poriënstructuur bij beton op basis van hoogovenslakken. Naarmate de blootstellingstijd toeneemt zullen de gelporositeit en de capillaire porositeit respectievelijk dalen en stijgen.
- Bij blootstelling aan een verhoogde CO₂-concentratie neemt de capillaire porositeit iets minder af in functie van de ouderdom dan bij vochtige nabehandeling, al is dit verschil eerder beperkt.

De correlaties tussen de verschillende porositeiten en de carbonatatiediepte worden nader besproken in hoofdstuk 6.

Hoofdstuk 6

Discussie

In de hoofdstukken 4 en 5 werden per proef respectievelijk de meetresultaten voor HVFAbeton en beton met hoogovenslakken 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. Daarbij geldt de porossiteit telkens als vertrekpunt. Daarnaast worden de meetresultaten ook, zij het in beperkte mate, getoetst aan bestaande theoretische modellen.

6.1 HVFA-beton

6.1.1 Evaluatie porositeit

Alvorens over te gaan tot een kritische evaluatie van de porositeit bij HVFA-beton, is het nuttig algemeen stil te staan bij de precieze totstandkoming van de poriënstructuur. Volgens Audenaert (2006) starten de poriën van de verhardende cementpasta als een continu netwerk, dat meer en meer gesloten wordt naarmate de hydratatie vordert. Zoals reeds werd aangegeven in paragraaf 2.1.3 zijn de poriën in het verharde beton voornamelijk het gevolg van een volumereductie die optreedt tijdens de hydratatie [Powers en Brownyard (1946-1947)]. Wanneer door te drogen al het vrije water uit het beton verdwijnt, dan heeft de bij vacuümverzadiging bepaalde capillaire porositeit volgens Fig. 2.2 zowel betrekking op de capillaire holten (V_s) als op het volume dat daarvoor in genomen werd door het vrije water (V_w).

Het is geweten dat tijdens de hydratatie niet alle cement zal hydrateren. Op een gegeven moment zullen het vrije water en het resterende niet-gehydrateerde cement (V_{nhc}) dus niet verder met elkaar reageren tot gehydrateerd cement (V_{hc}). Bovendien worden er ten gevolge van de volumereductie bij hydratatie niet langer capillaire holten (V_s) bij gevormd. Daardoor zal de hierboven gedefinieerde capillaire porositeit nog weinig wijzigen. Op basis van Fig. 4.1 kan worden besloten dat dit na 1 maand inderdaad het geval is voor de referentie [1]. Wanneer er geen gehydrateerd cement (V_{hc}) meer bijkomt, zal ook de fractie gelwater niet langer toenemen. Dit verklaart ook het vrijwel constante verloop van de gelporositeit voor de referentie [1] vanaf 1 maand ouderdom (zie Fig. 4.3).

Bij vervanging van een deel van het cement door vliegas zal eerst het cement reageren. Aangezien er nu veel minder cement beschikbaar is, zal de hydratatie ervan ook sneller stoppen. Tijdens deze hydratatie worden minder capillaire holten (V_s) gevormd ten gevolge van de volumereductie, maar blijft er meer vrij water (V_w) over dan bij een zuivere cementpasta na hydratatie. In de veronderstelling dat de invloed van de puzzolane reactie op 1 maand ouderdom beperkt zal zijn, verklaart dit waarom op deze leeftijd hogere capillaire porositeiten worden gemeten voor de vliegasmengelingen (zie Fig. 4.1). Daarna zal de hydratatie van de vliegas echter veel meer een rol beginnen spelen. De vliegas begint dan te reageren met het Ca(OH)₂ afkomstig van het gehydrateerde cement. De daaruit voortkomende hydratatieproducten worden afgezet in capillaire holten, hetgeen aanleiding geeft tot een fijnere poriënstructuur en bijgevolg een lagere capillaire porositeit. Bij de vliegasmengelingen [2] en [3] is voor de capillaire porositeit sprake van een dalende trend in functie van de tijd.

Mengelingen met hoge gehaltes aan vliegas zoals [4] tonen echter een quasi constant verloop voor alle porositeiten in functie van de tijd (Fig. 4.1, 4.2 en 4.3). Vermoedelijk wordt de puzzolane reactie ernstig verstoord wanneer een te hoog percentage aan vliegas in beton wordt aangewend. Wellicht is dan gewoon te weinig cement voorhanden om voldoende Ca(OH)₂ te kunnen leveren voor de puzzolane reactie waardoor de aanwezige vliegas maar in zeer beperkte mate kan gaan reageren. Bovendien moet er rekening mee worden gehouden dat zelfs bij een voldoende beschikbaarheid van Ca(OH)₂ nooit al de vliegas zal hydrateren. Volgens Jiang et al. (2000) is de maximale hoeveelheid vliegas M (% van de totale hoeveelheid cementeerbaar materiaal) die kan gehydrateerd worden gelijk aan:

$$M = \frac{C_1 - 0.93S_1 - 0.55A_1 - 0.35F_1 - 0.70S_1}{0.93(S_2 - S_1) + 0.55(A_2 - A_1) + 0.35(F_2 - F_1) + 0.70(\overline{S_2} - \overline{S_1}) - (C_2 - C_1)}$$
(6-1)

Waarin C_i , S_i , A_i , F_i en $\overline{S_i}$ de hoeveelheden CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ en SO₃ in cement (i=1) en vliegas (i=2) zijn. Deze hoeveelheden zijn respectievelijk terug te vinden in Tabel 3.1 (CEM I 52,5 N) en Tabel 3.3 (FA(2)). Volgens deze formule is M gelijk aan 40,02% voor de vliegasmengelingen [2], [3] en [4]. In Lammertijn (2007) wordt voor gelijkaardige mengelingen met luchtbelvormer een waarde van 35,89% bekomen.

In mengelingen met vliegaspercentages die de M-waarde overschrijden zal dus niet alle vliegas kunnen hydrateren, hetgeen voor mengeling [4] met 67% vliegas dus zeker het geval is.

Dit alles draagt ertoe bij dat de capillaire porositeit van [4] na de hydratatie van het cement, nog maar weinig zal afnemen. Bijgevolg verandert ook het aandeel gelporiën nauwelijks.

6.1.2 Vergelijking experimentele en theoretische porositeit

Zoals in Audenaert (2006) wordt beschreven, is het volgens Powers mogelijk om op basis van de betonsamenstelling voor traditioneel beton de capillaire porositeit te berekenen. In Lammertijn (2007) werd getracht de door Powers voorgestelde formule aan te passen zodat ze ook kan gelden voor HVFA-beton. Een van de aldus bekomen formules ziet er als volgt uit:

$$\varphi_{cap} = \frac{\frac{w_0}{\rho_w} - 0,362}{\frac{c_0}{\rho_c} + \frac{VA}{\rho_{VA}} + \frac{w_0}{\rho_w} + \frac{F}{\rho_F} + \frac{G}{\rho_G} + \frac{Z}{\rho_Z}}$$
(6-2)

Daarin komen w₀, c₀, VA, F, G en Z respectievelijk overeen met de hoeveelheden water, cement, vliegas, filler, granulaten en zand [kg], terwijl ρ_w , ρ_c , ρ_{VA} , ρ_F , ρ_G en ρ_Z de overeenkomstige dichtheden [kg/m³] voorstellen. De coëfficiënt α is de hydratatiegraad en wordt gelijkgesteld aan de ultieme hydratatiegraad α_u voor Portland cement. Volgens Mills wordt deze parameter berekend op basis van formule (6-2).

$$\alpha_{u} = \frac{1.031^{W}/C}{0.194 + W/C} \tag{6-3}$$

In Lammertijn (2007) worden de experimentele porositeiten op 3 maanden ouderdom ook getoetst aan formule (6-1). Voor alle mengelingen bleek het voorgestelde theoretische model de gemeten waarden met 2 à 3% te onderschatten (Fig. 6.1). Rekening houdend met het feit dat de methode van de vacuümverzadiging eveneens gepaard gaat met een onderschatting van de werkelijke capillaire porositeit, is het verschil met de theoretische porositeit in werkelijkheid zelfs nog iets groter.



Fig. 6.1: Capillaire porositeit van REF, FA35, FA50 en FA67 na 3 maanden in functie van $\varphi_{cap \text{ theoretisch}}$ volgens Lammertijn (2007)

De proeven van Lammertijn (2007) werden echter uitgevoerd op betonmengelingen die een luchtbelvormer bevatten. Na vergelijking van de proefresultaten met deze van analoge mengelingen zonder luchtbelvormer, worden in het laatste geval telkens lagere capillaire porositeiten gemeten. Experimentele en theoretische porositeiten komen dan mogelijks beter overeen. Uit Fig. 6.2 blijkt echter dat dit enkel het geval is bij de referentie [1] en de vliegasmengelingen [3], [5] en [8]. De meetresultaten van de mengelingen [2] en [4] worden respectievelijk over- en onderschat.



Fig. 6.2: Capillaire porositeit van [1] t.e.m. [8] na 3 maanden in functie van $\varphi_{cap \text{ theoretisch}}$ volgens Lammertijn (2007)

In het geval van de 50%-mengelingen [6] en [7], waarbij enkel het cement- of vliegastype varieert, worden grote verschillen in capillaire porositeit waargenomen die echter niet door het theoretische model worden ondersteund. De gebruikte hoeveelheden van elke cementen vliegassoort zijn telkens de dezelfde. De enige manier om aan de hand van vergelijking (6-2) een onderscheid tussen 2 verschillende soorten vliegas te maken, bestaat erin per vliegastype de werkelijke massadichtheid in te voegen in plaats van een standaardmassadichtheid voor vliegas van 2200 kg/m³. Hetzelfde geldt wanneer verschillende cementsoorten worden gebruikt. Vermoedelijk zal deze ingreep niet volstaan om de experimentele capillaire porositeiten beter te benaderen. Veel zal immers ook afhangen van de mate waarin de vliegas zal reageren.

Dit wordt in formule (6-2) in rekening gebracht door de term 0,3VA, waarbij er wordt van uitgegaan dat in vergelijking met Portland cement, slechts 30% van het vliegas zal reageren. De lagere capillaire porositeit van mengeling [7] in vergelijking met die van

mengeling [3], impliceert echter dat de reactiegraad varieert met het gebruikte vliegastype. Vliegas FA(1) in [7] reageert blijkbaar beter dan vliegas FA(2) in [3]. Berekening van de M-waarde op basis van CEM I 52,5 N (Tabel 3.1) en FA(1) (Tabel 3.3) volgens formule (6-1) levert evenwel een lagere waarde (38,77%) op in vergelijking met de eerder berekende M-waarde van 40,02%. De reactiegraad van vliegas is dus ook nog afhankelijk van andere factoren dan deze in rekening gebracht in formule (6-1). Daarnaast is er de factor 0,362 in formule (6-2). Deze waarde werd door Powers bekomen voor Portland cement en kan dus niet zo maar worden toegepast op vliegas. Het is dus niet evident om de capillaire porositeit van HVFA-beton theoretisch te benaderen via formule (6-2). Verder onderzoek daaromtrent is dan ook aangewezen.

Formule (6-1) zal de capillaire porositeiten van betonsamenstellingen op basis van vliegas dus ook niet beter benaderen wanneer geen luchtbelvormer wordt toegepast. Normaal gezien zou het al of niet voorkomen van deze hulpstof ook maar een beperkte rol mogen spelen, aangezien de geïntroduceerde luchtholten geen deel uitmaken van de capillaire poriënstructuur. Stel dat deze luchtholten tijdens de vacuümverzadiging wel op een of andere manier gevuld worden met water, dan zouden de capillaire en de totale porositeiten ongeveer even veel moeten toenemen, waardoor de gelporositeit eigenlijk niet verandert. Tabel 4.6 geeft echter aan dat dit niet het geval is. De verschillende porositeiten bij de betonmengelingen met en zonder luchtbelvormer moeten daarom misschien eerder toegeschreven worden aan de hulpstof zelf in plaats van aan de luchtholten die erdoor worden gegenereerd. Mogelijks bemoeilijkt het gebruikte product in zekere mate de hydratatie van het beton. Het fenomeen doet zich echter niet alleen voor als gevolg van een mogelijke interactie tussen de luchtbelvormer en de aanwezige vliegas, want dezelfde tendens wordt ook waargenomen bij de referentiemengelingen.

6.1.3 Verband porositeit-druksterkte

Volgens de literatuur 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. In Fig. 6.3 wordt dit door correlatie geverifieerd voor de capillaire, de totale en de gelporositeit van de mengelingen [1] t.e.m. [8] op 1 en 3 maanden ouderdom.



Fig. 6.3: Correlatie porositeit – gemiddelde druksterkte f_{ccub} voor de meetresultaten van [1] t.e.m. [8] op 1 en 3 maanden ouderdom

Wat de capillaire porositeit betreft, is er duidelijk sprake van een vrij uitgesproken omgekeerd evenredig verband met de gemiddelde druksterkte. Zo vertoont de trendlijn een R^2 -waarde van 0,89. Dit verband gaat ook op voor de totale porositeit, zij het in iets mindere mate ($R^2 = 0,78$). Een poreuzere microstructuur gaat dus logischerwijs gepaard met een geringere druksterkte.

In het geval van de gelporositeit is een stijgende trend in functie van de druksterkte waarneembaar. Een groter aandeel fijne gelporiën geeft dus over het algemeen aanleiding tot een sterker beton. Het verband is evenwel minder sterk uitgesproken ($R^2 = 0,48$) in vergelijking met de twee vorige correlaties.

6.1.4 Verband porositeit-cementtype

In paragraaf 4.3.4 werden verschillende capillaire en gelporositeiten vastgesteld bij de betonmengelingen op basis van CEM I 52,5 N en CEM I 52,5 N HSR. Dit verschil kwam niet louter en alleen tot uiting in combinatie met vliegas, maar ook in beperktere mate bij de referenties. Om dit verschil te begrijpen dient even te worden stilgestaan bij de specifieke eigenschappen van Portland HSR-cement. CEM I 52,5 N HSR wordt gekenmerkt door een lager C_3A -gehalte, hetgeen in overeenstemming is met Tabel 3.2.

Door het lage C_3A -gehalte zal de sterkteontwikkeling op jonge leeftijd geringer zijn. De druksterkte op 28 dagen ouderdom zal bijgevolg lager zijn dan bij een referentie op basis van gewoon Portland cement. Bij Portland HSR-cement wordt wel een grotere druksterkte na 90 dagen verwacht [Audenaert (2006), Neville (1995)]. De hogere sterkte op latere leeftijd van referentie [5] op basis van Portland HSR-cement blijkt in overeenstemming te zijn met de drukproefresultaten (zie Bijlage B). Na 28 dagen zijn de druksterktes van [1] en [5] echter eerder analoog.

Gezien het uitgesproken omgekeerd evenredig verband tussen de druksterkte en de capillaire porositeit, zou deze trend ook daar tot uiting moeten komen. De capillaire porositeiten van [1] en [5] die in de Figuren 4.10 en 4.11 werden weergegeven, bevestigen de tragere sterkteontwikkeling van CEM I 52,5 N HSR. Bovendien wordt deze bevinding mede ondersteund door de gemeten gasdoorlatendheden van dezelfde betonmengelingen (zie Figuren 4.15 en 4.16), ook al is het omgekeerd evenredig verband tussen de gaspermeabiliteit en de druksterkte veel minder uitgesproken. De R²-waarde bedraagt immers maar 0,45 (zie Bijlage F).

In combinatie met vliegas komt de tragere sterkteontwikkeling van CEM I 52,5 N HSR minder tot uiting in de capillaire porositeit. Na 3 maanden is de capillaire porositeit van de mengeling op basis van Portland HSR-cement en vliegas [6] nog altijd hoger dan deze van de overeenkomstige betonsamenstelling met gewoon Portland cement en vliegas [3]. Vergelijking met de drukproefresultaten leert echter dat ook de druksterkte van [6] nog altijd lager is dan die bij [3], hetgeen de hogere capillaire porositeit van [6] verklaart. Bij mengeling [6] is de minder sterke toename in druksterkte tussen 1 en 3 maanden ouderdom wellicht te wijten aan de invloed van de puzzolane reactie. Door het sterk verminderde C_3A -gehalte in Portland HSR-cement verloopt de hydratatie immers trager en zal er ook minder snel voldoende Ca(OH)₂ beschikbaar zijn voor de reactie van de vliegas.

6.1.5 Verband porositeit-vliegastype

Het type vliegas dat gebruikt wordt blijkt wel degelijk een invloed te hebben op de porositeit. De in mengeling [7] aangewende vliegas FA(1) zorgt voor een lagere capillaire porositeit en een hogere gelporositeit in vergelijking met de andere 50%-mengelingen [3], [6] en [8] (zie Fig. 4.10). Bovendien presteert deze betonsamenstelling na 3 maanden zelfs beter dan de referentie [1] (zie Fig. 4.11). Na 1 maand blijkt mengeling [7] zelfs al een lagere gasdoorlatendheid te vertonen dan de referentie. Ook de druksterkte van mengeling

[7] benadert deze van de referentie [1] op 3 maanden ouderdom. Alleen op het vlak van capillair watertransport liggen de opslorpingscoëfficiënten voor mengeling [7] hoger dan deze bij [1], met uitzondering van G_2 na 3 maanden. De meetresultaten van de capillaire wateropslorping zijn over het algemeen van dezelfde grootteorde als bij de mengelingen [3] en [6] met 50% vliegas FA(2) (zie Fig. 4.21 en 4.22).

De vraag stelt zich waarin de vliegas FA(1) van mengeling [7] juist verschilt van de vliegas FA(2) die in de andere mengelingen gebruikt werd. Afgaande op de chemische samenstelling in Tabel 3.3 is niet meteen een duidelijk verschil waarneembaar. De gloeiverliezen van FA(1) en FA(2) geven wel enigszins andere waarden en bedragen respectievelijk 3,53% en 5,24%. Zoals aangegeven in paragraaf 2.3.7 zou een hoger gloeiverlies wijzen op een hoger gehalte aan onverbrande koolstof wat een nadelige invloed heeft op de kwaliteit van de vliegas. Het lagere gloeiverlies van FA(1) zou mogelijks de betere prestaties van mengeling [7] kunnen verklaren, al bestaat hieromtrent geen zekerheid.

Op basis van de korrelverdeling (zie Bijlage A) kan worden besloten dat vliegas FA(1) fijner is dan FA(2). Waarschijnlijk is vliegas FA(1) dus reactiever, wat de betere prestaties van mengeling [7] zou kunnen verklaren.

Er zijn echter nog andere verklaringen mogelijk. Zo zou ook het glasgehalte van de vliegas een rol kunnen spelen. Deze parameter kon echter nog niet worden bepaald.

Verder onderzoek naar de precieze oorzaak van het bijzondere gedrag van mengeling [7] lijkt hoe dan ook aangewezen.

6.1.6 Verband porositeit-gaspermeabiliteit

In Boel (2006) wordt op theoretische wijze aangetoond dat de gasdoorlatendheid van beton voornamelijk bepaald wordt door de capillaire poriën. De schijnbare gaspermeabiliteit k_a bij 2 bar in functie van de experimenteel bepaalde capillaire porositeit na 1 en 3 maanden, levert evenwel een minder goede correlatie op (zie Fig. 6.4).

Wel is in beperkte mate sprake van een stijgende trend. Lage capillaire porositeiten kunnen over het algemeen gelinkt worden aan een kleinere gasdoorlatendheid, terwijl voor de hoogste capillaire porositeiten meestal het omgekeerde geldt. Lammertijn (2007) stelt op 3 maanden ouderdom een gelijkaardige trend vast voor analoge mengelingen als [1], [2], [3] en [4], maar dan met luchtbelvormer.

In Fig. 6.4 valt op dat mengeling [6] vrij poreus is en toch gekenmerkt wordt door een eerder lage gasdoorlatendheid. Ook wat mengeling [7] betreft is de porositeit, gezien de zeer lage gaspermeabiliteit, toch nog relatief hoog. Onderlinge vergelijking van de Figuren 4.10 en 4.15 en de Figuren 4.11 en 4.16 bevestigt dit gegeven. Zo presteren de mengelingen [6] en [7] qua gasdoorlatendheid even goed of zelfs beter dan de referentie [1], terwijl dit voor de capillaire porositeit enkel bij mengeling [7] na 3 maanden kan gezegd worden. Het gebruik van een ander type cement of vliegas in HVFA-mengelingen blijkt dus wel degelijk een zekere invloed te hebben op het verband tussen de twee duurzaamheidsparameters.



Fig. 6.4: Correlatie capillaire porositeit – schijnbare gaspermeabiliteit k_a bij 2 bar en verzadigingsgraad 0% voor de meetresultaten van [1] t.e.m. [8] op 1 en 3 maanden ouderdom

De weinig uitgesproken correlatie tussen de capillaire porositeit en de gasdoorlatendheid doet vermoeden dat de gasdoorlatendheid zich ook minder goed tot de druksterkte zal verhouden. Zoals reeds werd aangegeven in paragraaf 6.1.4 bedraagt de R²-waarde maar 0,45 (zie Bijlage F).

In CEB/FIP Model Code 90 (1991) wordt een model weergegeven waarmee voor traditioneel beton uitgaande van de karakteristieke druksterkte f_{ck} , een ruwe schatting van de gasdoorlatendheid kan worden bekomen. De formule ziet er als volgt uit:

$$\log\left(\frac{K_{MC90}}{K_{g0}}\right) = -0.5 \frac{f_{ck}}{f_{ck0}}$$
(6-4)

Daarin worden K_{g0} en f_{ck0} respectievelijk gelijkgesteld aan 10^{-14} m² en 10 N/mm². De karakteristieke druksterkte kan worden berekend aan de hand van de gemiddelde druksterkte f_{cm} en de standaardafwijking s_f (zie Bijlage B):

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,645 \ s_f \tag{6-5}$$

In Tabel 6.1 worden de theoretische gaspermeabiliteiten K_{MC90} vergeleken met de gemeten schijnbare gaspermeabiliteiten k_a bij 3 bar na droging bij 105 °C (verzadigingsgraad 0%).

Tabel 6.1: gemeten k_a bij 3 bar na droging bij 105 °C (verzadigingsgraad 0%) en berekende K_{MC90} van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W50 op 1 en 3 maanden ouderdom

x 10 ⁻¹⁶ m ²		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
1 m	k _a	0,73	1,11	1,91	3,85	1,08	0,92	0,41	3,69
	K _{MC90}	0,04	0,52	1,52	7,32	0,05	1,78	0,51	6,65
3 m	k _a	1,41	1,67	1,56	3,10	0,81	0,89	0,42	3,35
	K _{MC90}	0,09	0,03	0,28	2,31	0,01	0,40	0,08	2,38

Bijna altijd is er sprake van een belangrijke onderschatting van de meetwaarden door het theoretisch model, behalve voor de mengelingen [4], [6], [7] en [8] op 1 maand ouderdom waar de meetwaarden worden overschat. Bij verzadigingsgraad 0% lijkt dit model dus niet meteen bruikbaar, noch voor de referentiemengelingen noch voor HVFA-beton.

6.1.7 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 redenering zou de capillaire wateropslorping bij beton in verband moeten worden gebracht met de fijnere gelporiën. Voor de bepaling van een verband tussen de porositeit en de capillaire wateropslorping is het aangewezen de iets grotere porositeiten van de A-proefstukken (A en A') te linken aan opslorpingscoëfficiënt G_1 omdat de initiële capillaire wateropslorping plaatsgrijpt in de poreuzere randzone van het beton nabij het bekistingsvlak. Opslorpingscoëfficiënt G_2 heeft betrekking op de kernzone van het beton met een porositeit die eerder door deze van de B-proefstukken zal benaderd worden. De correlaties 'gelporositeit (AA') - G_1 ' en 'gelporositeit (B) - G_2 ' leveren echter helemaal geen gunstige R²-waarden (max. 0,27) op (zie Bijlage F). Vaak kunnen hoge gelporositeiten zelfs worden gekoppeld aan een lage capillaire opslorping waardoor de algemene opvatting rond capillaire wateropslorping niet zo maar kan toegepast 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.

Tussen de capillaire porositeit (AA') en opslorpingscoëfficiënt G₁ na droging bij 40 °C blijkt een beter verband te bestaan ($\mathbb{R}^2 = 0,62$) (zie Bijlage F). Daarbij worden de meetrsultaten van alle mengelingen ([1] t.e.m. [8]) op 1 en 3 maanden ouderdom in beschouwing genomen. Wat G₂ betreft is de correlatie met de capillaire porositeit (B) al veel minder uitgesproken ($\mathbb{R}^2 = 0,49$) (zie Bijlage F). Over het algemeen kan echter worden gesteld dat hogere capillaire porositeiten vooral bijdragen tot een grotere initiële capillaire wateropslorping (G₁).

Gezien het verband tussen de capillaire porositeit en de druksterkte is het nuttig ook de relatie tussen de druksterkte en de capillaire wateropslorping te onderzoeken (zie Fig. 6.5).



Fig. 6.5: Correlatie capillaire opslorpingscoëfficiënt – gemiddelde druksterkte f_{ccub} voor de meetresultaten van [1] t.e.m. [8] op 1 en 3 maanden ouderdom

Voor opslorpingscoëfficiënt G_1 levert dit een vrij uitgesproken omgekeerd evenredig verband op ($R^2 = 0.82$). De correlatie tussen opslorpingscoëfficiënt G_2 en de druksterkte is iets minder gunstig ($R^2 = 0.67$).

6.2 Beton met hoogovenslakken

6.2.1 Evaluatie porositeit

Wanneer de in Fig. 5.1 weergegeven capillaire porositeiten worden vergeleken met deze van de vliegasmengelingen (zie Fig. 4.1) dan zijn onmiddellijk een aantal duidelijke verschillen waar te nemen. Deze vergelijking dient echter met de nodige omzichtigheid te gebeuren, aangezien de betonsamenstellingen van beide betontypes in menig opzicht van elkaar verschillen. Zo worden de mengelingen [1], [2], [3] en [4] gekenmerkt door een W/CM-factor van 0,4 waarbij de hoeveelheid cementeerbaar materiaal steeds 400 kg/m³ bedraagt. Bij de betonmengelingen S0, S50, S70 en S85 daarentegen zijn deze parameters respectievelijk gelijk aan 0,5 en 350 kg/m³. Zoals aangegeven in paragraaf 2.3.10 komen minder capillaire holten voor in beton met een lagere W/CM-factor. Dit komt ook duidelijk tot uiting in de meetresultaten. Het verklaart bijvoorbeeld waarom voor referentie [1] beduidend lagere capillaire porositeiten worden genoteerd dan voor referentie S0. Dit geldt echter niet voor de mengelingen met een hoge cementvervanging. Bij mengeling S85 is het slakkenpercentage immers hoger dan het vliegasgehalte in mengeling [4] (67%). Toch vertoont S85 lagere capillaire porositeiten. Ook lijken de meetwaarden van de slakkenmengelingen minder af te hangen van het slakkengehalte.

Afgezien daarvan is nog een ander duidelijk verschil waarneembaar. Met uitzondering van mengeling [4], neemt de capillaire porositeit van de betonmengelingen met vliegas telkens af in functie van de tijd. Vermoedelijk is dit het gevolg van de puzzolane reactie. Wanneer bij de slakkenmengelingen gekeken wordt naar de meetwaarden na 1 en 6 maanden, dan is van een duidelijke afname in capillaire porositeit geen sprake. De latent-hydraulische reactie van de hoogovenslakken verschilt in die zin van de puzzolane reactie bij vliegas. De resultaten van isotherme calorimetrische proeven die werden uitgevoerd in het kader van de doctoraalstudie van Elke Gruyaert, bevestigen ook dit gegeven. Daarbij wordt al na 1 dag slakreactie waargenomen. Bovendien zou de reactie eerder geleidelijk doorgaan in functie van de tijd, waardoor het aannemelijk lijkt dat er geen uitgesproken daling in capillaire porositeit wordt gemeten onder invloed van de hydratatie van de hoogovenslakken. Verder onderzoek daaromtrent is echter aangewezen.

6.2.2 Verband porositeit-druksterkte

In paragraaf 6.1.3 werd een vrij goed verband vastgesteld tussen de capillaire porositeit en de druksterkte. Voor de mengelingen met hoogovenslakken blijkt dit echter niet het geval te zijn (zie Fig. 6.6). Tussen de gelporositeit en de druksterkte valt nog minder dan bij de vliegasmengelingen een éénduidige trend waar te nemen.



Fig. 6.6: Correlatie porositeit – gemiddelde druksterkte f_{ccub} voor de meetresultaten van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom

Het ontbreken van deze verbanden is vermoedelijk gewoon te wijten aan het feit dat alle meetwaarden vrij dicht bij elkaar liggen, zeker wat de porositeiten betreft. Het bereik waarbinnen de proefresultaten liggen is te klein om een duidelijke trend te kunnen zien. Wanneer in Fig. 6.3 zou worden ingezoomd op dezelfde zone als deze waarbinnen de resultaten in Fig. 6.6 gelegen zijn, is het ook niet evident om een verband tussen de porositeit en de druksterkte te onderscheiden.

Om dezelfde reden zijn geen uitgesproken verbanden waarneembaar tussen de porositeit en de gaspermeabiliteit en ook niet tussen de porositeit en de capillaire wateropslorping. Voor

de volledigheid werden de correlaties tussen de verschillende parameters toch opgenomen in Bijlage F.

6.2.3 Verband gaspermeabiliteit-druksterkte

Niettegenstaande het zo goed als onbestaande verband tussen de capillaire porositeit en de druksterkte, is er wel een min of meer dalende trend waarneembaar wanneer de schijnbare gaspermeabiliteit k_a bij 2 bar en 0% verzadigingsgraad wordt uitgezet in functie van de gemiddelde druksterkte (zie Fig. 6.7). Net zoals in Boel (2006) is dit verband weliswaar niet sterk uitgesproken.



Fig. 6.7: Correlatie gemiddelde druksterkte f_{ccub} – schijnbare gaspermeabiliteit k_a bij 2 bar en verzadigingsgraad 0% voor de meetresultaten van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom

Toetsing van de gemeten gaspermeabiliteiten bij 3 bar na droging bij 105 °C (verzadigingsgraad 0%) aan het theoretische model (6-4) volgens CEB/FIP Model Code 90 (1991), toont aan dat de meetwaarden in belangrijke mate worden onderschat. Dit blijkt uit Tabel 6.2. Bij de mengelingen S0, S50, S70 en S85 komt dit nog sterker tot uiting dan bij de vliegasmengelingen (zie Tabel 6.1).

$\times 10^{-16} \text{ m}^2$		SO	S50	S70	S85
1 m	k _a	2,05	2,46	2,76	5,89
	K _{MC90}	0,21	0,38	1,08	1,99
2 m	k _a	1,92	2,74	2,64	5,91
5 111	K _{MC90}	0,28	0,38	0,43	0,95
6 m	k _a	2,01	2,66	3,85	10,34
	K _{MC90}	0,32	0,24	0,49	1,97

Tabel 6.2: gemeten k_a bij 3 bar na droging bij 105 °C (verzadigingsgraad 0%) en berekende K_{MC90} van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom

6.2.4 Verband porositeit-carbonatatie

Op basis van Tabel 5.5 kon worden geconcludeerd dat de betonmengelingen met hoogovenslakken gemakkelijker carbonateren dan de referentie. Onafhankelijk van de blootstellingstijd worden systematisch grotere indringdieptes opgemeten naarmate het slakkenpercentage toeneemt. In paragraaf 2.4.5 werden twee belangrijke invloedsfactoren voor carbonatatie aangehaald, namelijk de beschikbaarheid van het carbonateerbaar materiaal $Ca(OH)_2$ en de gasdoorlatendheid. Beide factoren dragen hier vermoedelijk bij tot de verhoogde carbonatatiegevoeligheid van beton met hoogovenslakken.

Verwacht wordt dat in dergelijke mengelingen minder $Ca(OH)_2$ voorkomt doordat er minder cement aanwezig is die deze verbinding kan leveren. Bovendien werkt het $Ca(OH)_2$ als activator van de hoogovenslakken en wordt bij de latent-hydraulische reactie ook een grote hoeveelheid $Ca(OH)_2$ verbruikt [Chen (2006)]. Doordat zo minder carbonateerbaar materiaal voorhanden is waarmee CO_2 kan reageren, zal het carbonatatiefront sneller opschuiven in het beton.

Ook worden de betonsamenstellingen met een hoog slakkengehalte gekenmerkt door een grotere gasdoorlatendheid, waaruit kan worden afgeleid dat CO₂-moleculen gemakkelijker in het beton zullen binnendringen. Dit zal carbonatatie mede in de hand werken.

In paragraaf 5.6.2 werd nagegaan in welke mate het carbonatatieproces een invloed heeft op de open porositeit van beton met hoogovenslakken. Uitgaande van reactievergelijking (2-10) kan wel degelijk een wijziging in de poriënstructuur worden verwacht. Bij carbonatatie wordt het $Ca(OH)_2$ immers omgezet in $CaCO_3$ dat een groter volume inneemt. Anderzijds kan ook CO_2 een rol spelen. In Ngala en Page (1997) werd de invloed van het carbonatatieproces op de porositeit bestudeerd voor beton met vliegas. Daarbij werd na carbonatatie een afname in totale porositeit en een toename in capillaire porositeit gemeten. De daling van het totaal poriënvolume zou te wijten zijn aan een opvulling van de gelporiën met $CaCO_3$. De grotere capillaire porositeit wordt toegeschreven aan CO_2 . Bij blootstelling zou een deel van de CSH-gel gaan ontbinden en aanleiding geven tot de vorming van silica-gel. Deze omzetting zou gepaard gaan met een herverdeling in poriënafmetingen wat de grotere capillaire porositeit zou kunnen verklaren. Dit laatste fenomeen zou specifiek bij beton met vliegas sterk tot uiting komen, aangezien meer CSH-gel gevormd wordt onder invloed van de puzzolane reactie.

De meetresultaten in paragraaf 5.6.2 voor beton met hoogovenslakken tonen een gelijkaardige tendens, en zeker wanneer de blootstellingstijd 16 of 24 weken bedraagt. Telkens worden lagere totale porositeiten en gelporositeiten en hogere capillaire porositeiten waargenomen. Bovendien liggen de capillaire porositeiten nog een stuk hoger wanneer enkel het gecarbonateerde deel van de proefstukken in beschouwing wordt genomen. Aangezien de proefstukken doorgaans nooit volledig gecarbonateerd zijn, is de bij vacuümverzadiging bepaalde porositeit (φ_{proef}) een gewogen gemiddelde van de porositeiten van de gecarbonateerde (φ_{carb}) en de niet-gecarbonateerde zone (φ_{ntcarb}). Wanneer voor het niet-gecarbonateerde deel de porositeit van het overeenkomstige controleproefstuk (NAT) wordt aangenomen, kan de porositeit van de gecarbonateerde zone voor het niet-gecarbonateerde deel formule:

waarin h en x respectievelijk de hoogte van het proefstuk en de carbonatatiediepte voorstellen. De aldus bekomen waarde voor φ_{carb} is echter nog altijd maar een ruwe benadering van de werkelijke porositeit, aangezien de rekenmethode in sterke mate afhangt van de nauwkeurigheid van de opgemeten carbonatatiediepte door middel van fenolfthaleïne. Aan de hand van microscopisch onderzoek op slijpplaatjes zou de indringdiepte preciezer kunnen worden bepaald. In Tabel 6.3 worden voor de mengelingen met hoogovenslakken S50, S70 en S85 de berekende capillaire porositeiten (φ_{carb}) vergeleken met de gemeten capillaire porositeiten (φ_{proef}) na een blootstellingstijd van 16 en 24 weken. Telkens blijkt φ_{carb} een stuk hoger te zijn dan φ_{proef} . De toename van de capillaire porositeit onder invloed van carbonatatie wordt met andere woorden onderschat. Het verschil wordt kleiner naarmate het gehalte aan hoogovenslakken stijgt. Aangezien de carbonatatiediepten toenemen met het slakkenpercentage is het logisch dat (φ_{proef}) meer en

meer (φ_{carb}) zal benaderen. Na 24 weken zijn bij mengeling S85 de gemeten en berekende porositeiten analoog, hetgeen wijst op volledige carbonatatie van de proefstukken.

Tabel 6.3: Capillaire porositeiten (φ_{proef}) en (φ_{carb}) van S50, S70 en S85 op 1 maand ouderdom na een blootstellingstijd van 16 en 24 weken.

Blootstellingstijd	Porositeit q	Mengeling						
[weken]	[%]	S50	S 70	S85				
16	ϕ_{proef}	10,01	10,89	12,65				
weken	ϕ_{carb}	15,71	14,29	14,46				
24	ϕ_{proef}	10,11	10,93	13,12				
weken	φ _{carb}	14,80	14,43	13,12				

De herverdeling van capillaire poriën en gelporiën is eveneens waarneembaar wanneer de porositeiten van de gecarbonateerde proefstukken worden uitgezet in functie van de indringdiepte. In Fig. 6.8 wordt dit weergegeven voor alle betonmengelingen met hoogovenslakken (S50, S70 en S85) op 1 maand ouderdom bij blootstellingstijden van 4, 16 en 24 weken. Dit resulteert respectievelijk in vrij uitgesproken stijgende en dalende trends voor de capillaire en de gelporositeit in functie van de indringdiepte.



Fig. 6.8: Correlatie carbonatatiediepte – porositeit voor de meetresultaten van S50, S70 en S85 op 1 maand ouderdom bij blootstellingstijden van 4, 16 en 24 weken

Dit alles laat vermoeden dat het carbonatatiegedrag van beton met hoogovenslakken in belangrijke mate overeenkomt met dat van vliegasbeton.

Hoofdstuk 7

Conclusies

7.1 Besluitvorming

In het kader van dit eindwerk werd onderzoek verricht naar de porositeit en het transportgedrag van twee 'groene' betonsoorten, met name HVFA-beton en beton met hoogovenslakken.

Wat de eerste soort betreft werden betonsamenstellingen onderzocht met een variërend vervangingsspercentage van cement door vliegas, namelijk twee met 0%, één met 35%, vier met 50% en één met 67%. Bij de twee referenties en twee mengelingen met 50% vliegas verschilde het gebruikte cementtype (CEM I 52,5 N of CEM I 52,5 N HSR). In één mengeling met 50% vliegas werd een ander vliegas gebruikt in combinatie met CEM I 52,5 N. Bij een laatste mengeling met 50% vliegas in combinatie met CEM I 52,5 N werd voor een W/CM-factor van 0,5 gekozen in plaats van de gebruikelijk W/CM-factor van 0,4 bij de andere mengelingen. Bij alle mengelingen bedroeg de totale hoeveelheid cementeerbaar materiaal 400 kg/m³.

De tweede betonsoort werd bestudeerd aan de hand van vier betonmengelingen met een variërend percentage aan hoogovenslakken (0%, 50%, 70% en 85%) in combinatie met CEM I 52,5 N, waarbij de totale hoeveelheid cementeerbaar materiaal constant gehouden werd op 350 kg/m³. De W/CM-factor bedroeg telkens 0,5%.

Alle proeven werden uitgevoerd op 1, 3 en 6 maanden ouderdom.

In wat volgt worden de voornaamste bevindingen van het onderzoek weergegeven.

De eerste parameter die werd bestudeerd is de **open porositeit**. Daarmee kan een idee worden verkregen van de mate waarin het beton van aan de buitenzijde toegankelijk is voor schadelijke agentia. Dit laat ook toe tot op zekere hoogte uitspraken te doen omtrent het duurzaamheidsgedrag. Zo zal een poreuzer beton bijvoorbeeld gevoeliger zijn voor wapeningscorrosie. Op basis van de aangewende proefmethode kon een ruwe schatting worden gemaakt van de **capillaire porositeit** en de **gelporositeit**. Vooral de grotere capillaire poriën worden gerelateerd aan de toegankelijkheid van het beton, aangezien de schadelijke vloeistoffen en gassen steeds de gemakkelijkste weg zullen volgen wanneer ze binnendringen.

Specifiek voor beton met vliegas wordt vastgesteld dat de capillaire en de totale porositeit op 1 maand ouderdom toenemen in functie van het gehalte aan vliegas. De trage puzzolane reactie van de vliegas zorgt op termijn wel voor een zekere verdichting van de poriënstructuur, waardoor het aandeel aan capillaire poriën daalt en de gelporositeit toeneemt. Enkel wanneer het gehalte aan vliegas niet te hoog is (35%), kan na 3 maanden een capillaire porositeit worden gehaald die analoog of zelfs lager is dan deze van een traditionele betonsamenstelling. Dit impliceert echter wel dat het beton voldoende lang dient te worden nabehandeld. Wanneer echter een zeer groot deel van het cement vervangen wordt door vliegas (67%), wordt nagenoeg geen verdichting van de poriënstructuur waargenomen. Bij dergelijke hoge vervangingspercentages wordt de puzzolane reactie wellicht verstoord door een tekort aan Ca(OH)₂, een van de hydratatieproducten van cement.

Wanneer in plaats van vliegas hoogovenslakken als cementvervanging worden toegepast, evolueert de porositeit anders. Zo wordt bij beton met hoogovenslakken na verloop van tijd geen duidelijke verdichting van de poriënstructuur waargenomen. In tegenstelling tot de puzzolane reactie van vliegas, vangt de latent-hydraulische reactie van de slakken veel vroeger aan, en dit in wezen al vanaf de eerste dag. Bovendien wordt de reactie gekenmerkt door een geleidelijker verloop waardoor na 6 maanden geen duidelijke afname in capillaire porositeit wordt waargenomen. Mogelijks verklaart dit waarom de meetresultaten van de slakkenmengelingen minder sterk afwijken van de overeenkomstige referentie.

Bij beton met hoogovenslakken werd ook de relatie tussen **open porositeit** en **carbonatatie** onderzocht. Voor HVFA-beton werd dit niet gedaan, aangezien de carbonatatie van deze betonsoort reeds werd bestudeerd in Lammertijn (2007).

Vooreerst zorgt de aanwezigheid van slakken al voor een snellere carbonatatie van het beton, en zeker wanneer het slakkengehalte 85% bedraagt. Als oorzaken worden de verminderde beschikbaarheid van carbonateerbaar materiaal en de grotere gasdoorlatendheid aangehaald. Daarnaast blijkt carbonatatie ook wijzigingen in de poriënstructuur teweeg te brengen. Zo gaat de blootstelling aan een verhoogde CO_2 -concentratie gepaard met een toename van de capillaire porositeit en een afname van de totale porositeit en de gelporositeit. Ngala en Page (1997) komen tot analoge bevindingen voor beton met vliegas.

Een tweede parameter die werd onderzocht is de **gaspermeabiliteit of gasdoorlatendheid onder druk**. Ook deze transporteigenschap kan in verband worden gebracht met het duurzaamheidsgedrag. Zoals hierboven wordt aangegeven, impliceert een grotere gasdoorlatendheid immers een grotere gevoeligheid voor carbonatatie. Zowel voor HVFAbeton als beton met hoogovenslakken neemt de gasdoorlatendheid in belangrijke mate toe in functie van de cementvervanging. Wanneer het vliegasgehalte van 50% naar 67% toeneemt, gaat dit bijvoorbeeld gepaard met een verdubbeling van de gasdoorlatendheid op 1 en 3 maanden ouderdom. Voor beton met hoogovenslakken worden voor slakkengehaltes tot 70% eerder geringe verschillen waargenomen in vergelijking met de referentie. De gaspermeabiliteit van een betonmengeling met 85% hoogovenslakken is echter op 1, 3 en 6 maanden ouderdom minstens dubbel zo hoog. Bij beton op basis van vliegas of hoogovenslakken moet dus steeds rekening worden gehouden met een verhoogd risico op carbonatatie en wapeningscorrosie, zeker wanneer het gehalte aan vliegas of hoogovenslakken oploopt tot respectievelijk 67 of 85%.

Als laatste parameter werd de **capillaire wateropslorping** bekeken. Deze capillaire stroming treedt op wanneer een onverzadigd beton in contact komt met water. Naar duurzaamheid toe dient de aanwezigheid van water in beton zo veel mogelijk te worden beperkt, aangezien water een van de basisvoorwaarden is voor corrosie. Na droging bij 40 °C neemt zowel bij HVFA-beton als bij beton met hoogovenslakken de zone in de omgeving van het bekistingsvlak onder invloed van het wandeffect sneller water op dan de kernzone. De randzones van beide betonsoorten worden gekenmerkt door een grotere capillaire wateropname in vergelijking met traditioneel beton. Dit geldt niet voor de opslorpingscoëfficiënten in de **kernzone** van het bekomen die van dezelfde grootteorde zijn als deze van de referentie. Het spreekt echter voor zich dat met het oog op eventuele

wapeningscorrosie vooral de transporteigenschappen van de **randzone** nabij het bekistingsoppervlak van belang zijn.

Specifiek voor HVFA-beton werd ook nagegaan in welke mate de drie bovengenoemde parameters worden beïnvloed door het **gebruik van luchtbelvormers**. Deze hulpstof verhoogt het luchtgehalte in beton met gemiddeld 2%, waardoor een grotere vorstweerstand kan worden gerealiseerd. De voornaamste conclusie daaromtrent is dat voor zowel de referentie als de vliegasmengelingen steeds **hogere capillaire en totale porositeiten** worden genoteerd wanneer een luchtbelvormer in het beton voorkomt. De porositeitsverschillen zijn echter geen functie van het vliegasgehalte. De gemiddelde verschillen op 1 maand ouderdom bedragen 2,8% voor de capillaire porositeit en 2,7% voor de totale porositeit. Het verschil in totale porositeit neemt wel duidelijk af in functie van tijd. Na 6 maanden wordt nog maar een verschil van 0,7% gemeten. Het is niet meteen duidelijk wat de precieze oorzaak is van de porositeitsverschillen. Dit zou verder moeten worden onderzocht.

Het door Lammertijn (2007) voorgestelde model voor de capillaire porositeit van vliegasbeton wordt niet beter benaderd wanneer de luchtbelvormer niet wordt aangewend. De meetwaarden van de referentie komen wel beter overeen met het model. Qua gasdoorlatendheid en capillaire wateropslorping wordt geen éénduidig verschil waargenomen tussen mengelingen met en zonder luchtbelvormer.

De porositeit en transporteigenschappen hangen ook in belangrijke mate af van het **cement** en de **vliegas** die worden aangewend in het beton. Een referentiemengeling op basis van **CEM I 52,5 N HSR** wordt gekenmerkt door een tragere sterkteontwikkeling, maar een hogere eindsterkte [Neville (1995)]. Dit wordt in verband gebracht met de capillaire porositeit, de gasdoorlatendheid en de capillaire wateropslorping die zouden moeten afnemen na verloop van tijd. Daardoor worden pas op latere leeftijd lagere waarden bekomen dan voor een referentie op basis van **CEM I 52,5 N**. Deze stelling gaat echter niet op voor CEM I 52,5 N HSR in combinatie met vliegas. Verder onderzoek daarrond lijkt dan ook aangewezen.

Bij een cementvervanging van 50% resulteert het gebruik van **een ander vliegas** met een lager gloeiverlies en een fijnere korrelverdeling in combinatie met CEM I 52,5 N, in een beton met een capillaire porositeit en gasdoorlatendheid die na 3 maanden respectievelijk analoog en lager zijn dan bij de referentiemengeling. Dit is een belangrijke conclusie,

aangezien tot hiertoe werd gesteld dat HVFA-beton poreuzer en toegankelijker is voor gassen dan traditioneel beton. Een juiste vliegaskeuze zou er kunnen toe bijdragen dat de prestaties van beide betonsoorten elkaar beter benaderen. Het is echter niet zeker of deze bevindingen ook gelden bij andere vliegasgehaltes. Ook verder onderzoek naar de precieze eigenschappen van de vliegas in kwestie dringt zich op, aangezien de verklaring misschien niet alleen bij het gloeiverlies en de korrelverdeling dient gezocht te worden.

Vliegasbeton met een **verhoogde W/CM-factor** wordt gekenmerkt door hogere capillaire en totale porositeiten, een hogere gasdoorlatendheid en een grotere capillaire wateropslorping. De W/CM-factor wordt dus best zo laag mogelijk gehouden.

7.2 Voorstellen voor verder onderzoek

Een aantal belangrijke pistes voor verder onderzoek dienen zich aan. De eerste kwam al even aan bod in de vorige paragraaf en behelst bijkomend onderzoek naar de invloed van het vliegastype. In de literatuurstudie kwam aan bod dat vliegas nogal kan verschillen al naargelang de herkomst, de afregeling van de verbrandingsovens en de aard van de brandstof. Parameters ter karakterisatie van de vliegas zijn ondermeer het gloeiverlies, de fijnheid en het glasgehalte. Om te kunnen nagaan welke eigenschappen precies een invloed hebben op de microstructuur van vliegasbeton, zouden meer vliegassoorten moeten worden getest in beton. Ook de mate waarin elk van deze vliegassen zal hydrateren, zou moeten worden bepaald.

Voor beide betonsoorten dient verder onderzoek te worden verricht naar de porositeit in het algemeen. Tegenwoordig wordt ervan uitgegaan dat door middel van een vacuümverzadiging na droging bij 40 °C een ruwe schatting van de capillaire porositeit wordt bekomen. Het is niet duidelijk of deze droogtemperatuur zomaar toepasbaar is voor alle betonsoorten. Het kan zijn dat het vrij of capillair water uit bepaalde betonsoorten sneller verdwijnt, waardoor de capillaire porositeit wordt overschat. Op basis van thermogravimetrische analyse (TGA) zou dit aspect kunnen worden geverifieerd.

Het zou ook nuttig zijn om specifiek voor beton met hoogovenslakken na te gaan hoe de latent-hydraulische reactie van de slakken verloopt, in welke mate daarbij $Ca(OH)_2$ verbruikt wordt en wat de verschillen zijn met een puzzolane reactie. Ook dit zou met thermogravimetrische analyse (TGA) kunnen worden nagegaan.

Bijlage A

Korrelverdeling



A.1 Zand

Fig. A.1: Korrelverdelingsdiagram zand 0/4 (levering 2006)



Fig. A.2: Korrelverdelingsdiagram zand 0/4 (levering 2007)

A.2 Granulaten



Fig. A.3: Korrelverdelingsdiagram grind 2/8



Fig. A.4: Korrelverdelingsdiagram rolgrind 8/16 (levering 2006)



Fig. A.5: Korrelverdelingsdiagram rolgrind 8/16 (levering 2007)

A.3 Vliegas



Fig. A.6: Korrelverdelingsdiagram vliegas FA(1) en FA(2)

Bijlage B

Druksterkte

B.1 HVFA-beton

 Tabel B.1:Gemiddelde
 druksterkte
 f_{ccub}
 [N/mm²]
 van
 [1]
 C(I)100FA0W40,
 [2]
 C(I)65FA(2)35W40,
 [3]

 C(I)50FA(2)50W40,
 [4]
 C(I)33FA(2)67W40,
 [5]
 C(HSR)100FA0W40,
 [6]
 C(HSR)50FA(2)50W40,
 [7]

 C(I)50FA(1)50W40 en
 [8]
 C(I)50FA(2)50W50 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom

Mengeling		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
f _{ccub} [N/mm ²]			[2]	[3]	[7]	[5]	[0]	[/]	[0]
	a	59,14	49,97	37,35	22,91	67,63	35,31	46,74	26,78
	а	63,43	48,02	37,03	23,60	70,35	36,28	47,09	25,29
	a	58,38	46,82	38,48	23,33	71,78	36,46	48,72	24,42
1	b	71,92	57,53	38,27	24,92	-	-	-	-
1 maand (28 dagen)	b	70,30	56,43	39,74	24,67	-	-	-	-
(20 dugen)	b	73,88	55,49	40,41	24,39	-	-	-	-
	c	77,07	52,05	-	-	-	-	-	-
	с	71,24	51,06	-	-	-	-	-	-
	c	74,21	51,78	-	-	-	-	-	-
	a	67,80	-	-	-	78,62	49,28	62,59	35,55
	a	63,81	-	-	-	79,69	48,96	63,82	35,04
3 maanden	a	63,63	-	-	-	81,85	48,33	62,82	33,12
(91 dagen)	b	72,83	74,44	51,60	37,07	-	-	-	-
	b	-	78,37	52,12	36,96	-	-	-	-
	b	-	72,19	51,46	33,66	-	-	-	-
	а	67,91	-	-	-	-	-	-	-
	а	-	-	-	-	-	-	-	-
6 maanden	a	-	-	-	-	-	-	-	-
(182 dagen)	b	-	-	61,28	42,17	-	-	-	-
	b	-	-	61,35	43,09	-	-	-	-
	b	-	-	60,43	44,37	-	-	-	-



Fig. B.1: Gemiddelde druksterkte f_{ccub} [N/mm²] van hernemingen a, b en (c) van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 op 28 dagen ouderdom



Fig. B.2: Gemiddelde druksterkte f_{ccub} [N/mm²] van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W50 in functie van de ouderdom

Aangezien de druksterktes van de hernemingen voor de mengelingen [1] en [2] nogal verschillen (zie Fig. B.1), is het van belang te weten op welke ouderdom ze worden getest op wateropslorping onder vacuüm, gaspermeabiliteit en capillaire wateropslorping. Daarom wordt in Tabel B.2 het proefschema van de mengelingen waarvoor hernemingen noodzakelijk waren, weergegeven.

Tabel B.2:	Proefschema mengelingen [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en
	[4] C(I)33FA(2)67W40

proef	wateropslo	gaspermeabiliteit			capillaire wateropslorping				
ouderdom	1 m	3 m	6 m	1 m	3 m	6 m	1 m	3 m	6 m
[1]	b	а	а	b	а	а	b	а	а
[2]	а	b	-	а	а	-	b	b	-
[3]	а	а	а	а	а	а	а	а	а
[4]	а	а	а	а	а	а	а	а	а

Verbanden tussen de druksterkte en de resultaten van de in Tabel B.2 vermelde proeven, worden nagegaan door te kijken naar de druksterktes van de voor de proef gebruikte herneming.

B.2 Beton met hoogovenslakken

Mengeling	50	850	\$70	C05		
f _{ccub} [N/mm ²]			550	570	- 202	
	/1	51,97	43,93	36,06	27,36	
	/1	50,33	42,41	36,29	23,66	
	/1	47,94	41,77	35,39	-	
1	/2	47,07	40,68	40,19	33,49	
1 maand (28 dagen)	/2	47,37	39,69	37,66	33,97	
(20 dagen)	/2	46,12	40,57	40,69	32,08	
	/3	54,67	49,94	40,61	34,67	
	/3	55,15	49,16	43,81	34,17	
	/3	53,85	48,94	41,63	34,71	
	/1	51,93	50,04	-	-	
	/1	53,12	52,46	-	-	
3 maanden	/2	-	58,61	39,27	39,77	
(91 dagen)	/2	-	58,70	40,38	39,55	
	/3	-	-	50,03	40,46	
	/3	-	-	54,23	40,43	
	/1	50,86	52,44	51,32	37,44	
6 maanden	/1	52,48	52,75	59,12	35,42	
(182 dagen)	/2	-	54,49	44,73	44,21	
	/2	-	58,15	46,10	42,13	

 $\label{eq:sterkte} \textbf{Tabel B.3:} Gemiddelde druksterkte f_{ccub} \ [N/mm^2] \ van \ S0, \ S50, \ S70 \ en \ S85 \ op \ 1, \ 3 \ en \ 6 \ maanden \ ouderdom$



Fig. B.3: Gemiddelde druksterkte f_{ccub} [N/mm²] van hernemingen /1, /2 en /3 van S0, S50, S70 en S85 op 28 dagen ouderdom



Fig. B.4: Gemiddelde druksterkte f_{ccub} [N/mm²] van S0, S50, S70 en S85 in functie van de ouderdom

Aangezien de druksterktes van de hernemingen /1, /2, en /3 voor alle mengelingen nogal verschillen (zie Fig. B.3), is het van belang te weten op welke ouderdom ze worden getest op wateropslorping onder vacuüm, gaspermeabiliteit, capillaire wateropslorping en carbonatatie. Daarom wordt in Tabel B.4 het proefschema van de mengelingen S0, S50, S70 en S85 die allemaal dienden hernomen te worden, weergegeven.

proef	wateropslorping onder vacuüm gaspermeabiliteit						
ouderdom	1 m	3 m	6 m	1 m	3 m	6 m	
S0	S0/3	S0/1	S0/1	S0/3	S0/1	S0/1	
S50	S50/3	S50/1	S50/1	S50/3	S50/1	S50/1	
S70	S70/3	S70/3	S70/1	S70/3	S70/3	S70/1	
S85	S85/3	S85/3	S85/1	S85/3	S85/3	S85/1	
proef	capilla	ire waterops	lorping	carbonatatie			
ouderdom	1 m	3 m	6 m	1 m	3 m	6 m	
S0	S0/3	S0/1	S0/1	S0/2	S0/2	S0/2	
S50	S50/3	S50/1	S50/1	S50/2	S50/2	S50/2	
S70	S70/3	S70/3	S70/1	S70/2	S70/2	S70/2	
S85	S85/3	S85/3	S85/1	S85/2	S85/2	S85/2	

Tabel B.4: Proefschema mengelingen S0, S50, S70 en S85

Verbanden tussen de druksterkte en de resultaten van de in Tabel B.4 vermelde proeven, worden nagegaan door te kijken naar de druksterktes van de voor de proef gebruikte herneming.

Bijlage C

Open porositeit Lammertijn (2007)

Mengeling		Cap. 1	Porositeit b	ij 45 ± 2 °C	C[%]	Totale Porositeit bij $105 \pm 2 \degree C [\%]$			
Ouderdom [maand]		AA'	В	ABA'	$\sigma_{ABA'}$	AA'	В	ABA'	σ _{ABA'}
	1	8,50	8,27	8,42	0,44	14,75	15,37	14,95	0,58
REF	3	8,70	8,02	8,47	0,40	13,29	13,39	13,33	0,21
	6	8,49	7,88	8,28	0,42	13,42	13,48	13,44	0,29
	1	12,00	10,63	11,55	0,79	18,15	17,41	17,90	0,56
FA35	3	9,99	9,19	9,72	0,67	15,60	15,46	15,55	0,46
	6	10,34	9,72	10,13	0,54	16,03	16,01	16,03	0,38
	1	14,45	13,92	14,28	0,60	18,28	18,45	18,33	0,45
FA50	3	10,50	9,54	10,18	0,55	16,40	16,33	16,37	0,39
	6	10,91	8,96	10,26	1,25	16,82	16,61	16,75	0,71
FA67	1	14,49	14,15	14,37	0,34	17,83	18,10	17,92	0,32
	3	12,36	11,90	12,21	0,66	17,30	17,20	17,27	0,34
	6	13,45	12,40	13,10	0,67	16,82	16,79	16,81	0,18

Tabel C.1: Capillaire en totale porositeiten van REF, FA35, FA50 en FA67 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom

Tabel C.2: Gelporositeiten van REF, FA35, FA50 en FA67 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom

Mengeling	Gelporositeit [%]						
Ouderdom [maa	AA'	В	ABA'	$\sigma_{ABA'}$			
	1	6,25	7,10	6,53	0,64		
REF	3	4,59	5,37	4,85	0,45		
	6	4,93	5,60	5,16	-		
	1	6,14	6,78	6,36	0,63		
FA35	3	5,61	6,27	5,83	0,86		
	6	5,69	6,29	5,90	-		
	1	3,82	4,52	4,06	0,43		
FA50	3	5,89	6,79	6,19	0,71		
	6	5,91	7,65	6,49	1,39		
	1	3,34	3,96	3,55	0,38		
FA67	3	4,94	5,30	5,06	0,63		
	6	3,37	4,39	3,71	0,61		

Bijlage D

Gaspermeabiliteit

D.1 HVFA-beton



Fig. D.1: Debiet Q in functie van de drukgradiënt (P₁²-P₂²) voor [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W50 op 1 maand ouderdom



Fig. D.2: Debiet Q in functie van de drukgradiënt (P₁²-P₂²) voor [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W50 op 3 maanden ouderdom



Fig. D.3: Debiet Q in functie van de drukgradiënt $(P_1^2 - P_2^2)$ voor [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 op 6 maanden ouderdom

D.2 Beton met hoogovenslakken



Fig. D.4: Debiet Q in functie van de drukgradiënt (P₁²-P₂²) voor S0, S50, S70 en S85 op 1 maand ouderdom

Fig. D.5: Debiet Q in functie van de drukgradiënt (P₁²-P₂²) voor S0, S50, S70 en S85 op 3 maanden ouderdom


Fig. D.6: Debiet Q in functie van de drukgradiënt (P₁²-P₂²) voor S0, S50, S70 en S85 op 6 maanden ouderdom

Bijlage E

Capillaire wateropslorping

E.1 HVFA-beton



Fig. E.1: Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W40 op 1 maand ouderdom na droging bij 40 °C



Fig. E.2: Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W40 op 1 maand ouderdom na droging bij 105 °C



Fig. E.3: Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W40 op 3 maanden ouderdom na droging bij 40 °C



Fig. E.4: Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W40 op 3 maanden ouderdom na droging bij 105 °C



Fig. E.5: Massatoename in functie van √tijd ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van [1] C(I)100FA0W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 op 6 maanden ouderdom na droging bij 40 °C



Fig. E.6: Massatoename in functie van √tijd ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van [1] C(I)100FA0W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 op 6 maanden ouderdom na droging bij 105 °C



E.2 Beton met hoogovenslakken

Fig. E.7: Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van S0, S50, S70 en S85 op 1 maand ouderdom na droging bij 40 °C



Fig. E.8: Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van S0, S50, S70 en S85 op 1 maand ouderdom na droging bij 105 °C



Fig. E.9: Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van S0, S50, S70 en S85 op 3 maanden ouderdom na droging bij 40 °C



Fig. E.10: Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van S0 en S50 op 3 maanden ouderdom na droging bij 105 °C



Fig. E.11: Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van S0, S50, S70 en S85 op 6 maanden ouderdom na droging bij 40 °C



Fig. E.12: Massatoename in functie van √tijd ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van S0, S50, S70 en S85 op 6 maanden ouderdom na droging bij 105 °C

Bijlage F

Correlaties

F.1 HVFA-beton



Fig. F.1: Correlatie schijnbare gaspermeabiliteit k_a bij 2 bar en verzadigingsgraad 0% - gemiddelde druksterkte f_{ccub} voor de meetresultaten van [1] t.e.m. [8] op 1 en 3 maanden ouderdom



Fig. F.2: Correlatie gelporositeit (AA') – capillaire opslorpingscoëfficiënt G_1 en gelporositeit (B) – capillaire opslorpingscoëfficiënt G_2 voor de meetresultaten van [1] t.e.m [8] op 1 en 3 maanden ouderdom



Fig. F.3: Correlatie capillaire porositeit (AA') – capillaire opslorpingscoëfficiënt G₁ en capillaire porositeit
(B) – capillaire opslorpingscoëfficiênt G₂ voor de meetresultaten van [1] t.e.m. [8] op 1 en 3 maanden ouderdom

F.2 Beton met hoogovenslakken



Fig. F.4: Correlatie capillaire, totale en gelporositeit – schijnbare gaspermeabiliteit k_a bij 2 bar en verzadigingsgraad 0% voor de meetresultaten van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom



◆ gelpor. (AA')-G1 ■ gelpor. (B)-G2

Fig. F.5: Correlatie gelporositeit (AA') – capillaire opslorpingscoëfficiënt G₁ en gelporositeit (B) – capillaire opslorpingscoëfficiënt G₂ voor de meetresultaten van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom



Fig. F.6: Correlatie capillaire porositeit (AA') – capillaire opslorpingscoëfficiënt G₁ en capillaire porositeit
(B) – capillaire opslorpingscoëfficiênt G₂ voor de meetresultaten van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom

Bibliografie

Abbas A., Carcasses M. & Ollivier J.-P. (1999), *Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation*, Materials and structures, Vol. 32, p. 3-8.

ASTM C618-03 (2003), Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.

Audenaert K. (2006), Transportmechanismen in zelfverdichtend beton in relatie met carbonatatie en chloridepenetratie, doctoraatsthesis, Universiteit Gent, 370 p.

Baert G., De Belie N., De Schutter G. & Hoste S. (2007), *Thermal analysis of cement-fly ash pastes*, Conference SCC 2007, Gent, 6 p.

Baron J. & Ollivier J.-P. (1993), *Presses de l'école nationale des ponts et chaussées*, Paris, 463 p.

Bijen J. (1996), *Benefits of slag and fly ash*, Construction and Building Materials, Vol. 10, n. 5, p. 309-314.

Boel V. (2006). *Microstructuur van zelfverdichtend beton in relatie met gaspermeabiliteit en duurzaamheidsaspecten*, doctoraatsthesis, Universiteit Gent, 319 p.

Bosschart R. A. J. (1951), Lucht in beton, voor- of nadeel?, Cement, Vol. 3, n. 1-2, p. 18-22.

Carcassès M., Abbas A., Ollivier J.-P. & Verdier J. (2002), *An optimised preconditioning procedure for gas permeability measurement*, Materials and Structures, Vol. 35, p. 22-27.

CEB/FIP Model Code 90 (1991), Design code, Thomas Telford, 437p.

Chatterji S. (2003), *Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents*, Cement and Concrete Composites, Vol. 25, n. 7, p. 759-765.

Chen W. (2006), *Hydration of slag cement, theory, modeling and application*, Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, p. 27-30.

Cheng A., Huang R., Wu J. K. & Chen C. H. (2005), *Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete*, Materials Chemistry and Physics, Vol. 93, p. 404-411.

Copuroğlu O. (2006), *The characterisation, improvement and modelling aspects of frost salt scaling of cement-based materials with a high slag content*, Doctoraatsthesis Technische Universiteit Delft, Nederland, 182 p.

Cox K. & De Belie N. (2007), *Durability behavior of high-volume fly ash concrete*, Universiteit Gent, 9p.

Davis R. E., Carlston R. W., Kelly J. W. & Davis H. E. (1937), *Properties of cements and concretes containing fly ash*, ACI Journal, Vol. 33, p. 577-612.

Defrancq J. (2007), Fysisch-chemische processen van de milieusanering, partim lucht en water, cursustekst, Universiteit Gent.

Deja J. (2003), *Freezing and de-icing salt resistance of blast furnace slag concretes*, Cement and Concrete Composites, Vol. 25, n. 3, p. 357-361.

Du L. & Folliard K. J. (2005), *Mechanisms of air entrainment in concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 35, n. 8, p. 1463-1471.

Dutch Center for Civil Engineering Research and Codes (1991), Fly ash as addition to concrete, Report No. 144, 99 p.

Espinosa R. M. & Franke L. (2006), *Influence of the age and drying process on pore structure and sorption isotherms of hardened cement paste*, Cement and Concrete Research, Vol. 36, p. 1969-1984.

Feldman R. & Serada P. (1968), A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties, Materials and Structures, n. 1, p. 509-519.

Flower D. J. M. & Sanjayan J. G. (2007), *Green house gas emissions due to concrete manufacture*, International Journal of LCA, Vol. 12, n. 5, p. 282-288.

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.

Gardner D. R., Lark R. J. & Barr B. (2005), *Effects of conditioning temperature on the strength and permeability of normal- and high-strength concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 35, p. 1400-1406.

Gebler S. & Klieger P. (1983), *Effect of fly ash on the air-void stability of concrete*, in Proceedings of the CANMET/ACI First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete Vol. 1, Ed. Malhorta V. M., American Concrete Institute SP-79, Detroit, p. 103-142.

Gopalan M. K. (1996), *Sorptivity of fly ash concretes*, Cement and Concrete Research, Vol. 26, n. 8, p. 1189-1197.

Helmuth R. A. (1960), *Discussion of the paper 'frost action in concrete' by P. Nerenst*, in Proceedings of the IV International Symposium on Chemistry of Cement, Vol. II, Washington DC, p. 829-833.

Helmuth R. A. (1961), *Dimensional changes of hardened Portland cement pastes caused* by temperature changes, Proc. Highway Research Board, Vol. 40, p. 315-336.

Helmuth R. A. (1987), *Fly ash in cement and concrete*, Portland Cement Association, 203 p.

Hill J. & Sharp J. H. (2002), *The mineralogy and microstructure of three composite cements with high replacement levels*, Cement and Concrete Composites, Vol. 24, p. 191-199.

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, Vol. 27, n. 2, p. 193-204.

Hoarty J. T. & Hodgkinson L. (1990), *Improved air entraining agents for use in concretes containing pulverised fuel ashes*, in Admixtures for Concrete: improvement of properties, Ed. Vázquez E., RILEM proceedings 5, p. 449-459.

Jiang L., Lin B. & Cai Y. (2000), A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 30, p. 699-702.

Jones M. R., Sear L. K. A., McCarthy M. J. & Dhir R. K. (2006), *Changes in coal fired power station fly ash: recent experiences and use in concrete*, AshTech 2006 – Ash Technology Conference hosted by the UKQAA, Joint Paper with University of Dundee and UKQAA, 28 p.

Kasai Y., Matsui I. & Aoki T. (1986), *Long term changes of air permeability by rapid test*, Trans. Japanese Concrete Institute, Vol. 8, p. 145-152.

Kropp J. & Hilsdorf H.K. (1995), *Performance Criteria for Concrete Durability*, RILEM Report 12, Londen, 327 p.

Lammertijn S. (2007), *Carbonatatie en chloride-indringing bij hoog-volume-vliegasbeton* (*HVFA-beton*), scriptie, Universiteit Gent, 171 p.

Lane R. O. & Best J. F. (1982), *Properties and use of fly ash in Portland cement concrete*, Concrete International, Vol. 4, n. 7, p. 81-92.

Malhorta V. M., Mehta P. K. (1996), *Pozzolanic and cementitious materials*, Advances in Concrete Technology Volume 1, Amsterdam, 191 p.

Malhorta V. M. & Mehta P. K. (2005), *High-performance, high-volume fly ash concrete:* materials, mixture proportioning, properties, construction practice, and case histories,

Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa, Canada, 124 p.

Martys N. S. & Ferraris C. F. (1997), *Capillary transport in mortars and concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 27, n. 5, p. 747-760.

Mehta P. M. & Monteiro P. G. M. (2001), *Concrete microstructure, properties and materials*, 2nd Edition, University of California, 239 p.

Mindess S. & Young J. (1981), Concrete, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

NBN B05-201 (1976), Proeven op bouwmaterialen – vorstbestendigheid – wateropslorpingsvermogen door capillariteit.

NBN B12-001 (1994), Cement: samenstelling en specificaties.

NBN B15-001 (2004), Aanvulling op NBN EN 206-1.

NBN B15-217 (1984), Proeven op beton – wateropslorping door capillariteit.

NBN B15-220 (1970), Proeven op beton – drukproef.

NBN B15-233 (1982), Betonspecie, bepaling van de consistentie, uitspreiding op de schoktafel.

NBN EN 196-2 (2005), Beproevingsmethoden voor cement – deel 2: chemische analyse van cement.

NBN EN 196-21 (1991), Beproevingsmethoden voor cement – bepaling van de gehalten chloride, koolstofdioxide en alkali van cement.

NBN EN 206-1 (2001), Beton – deel I: specificaties, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit.

NBN EN 450-1 (2005), Vliegas voor beton – deel 1: definitie, specificaties en overeenkomstigheidscriteria.

NBN EN 12350-2 (1999), Beproeving van betonspecie – deel 2: zetmaat.

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

Neville A. M. (1995), *Properties of concrete*, Fourth and final edition, Longman Group Limited, Essex, 844 p.

Ngala V. & Page C. (1997), *Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes*, Cement and Concrete Research, Vol. 27, n. 7, p. 995-1007.

Nokken M. R. & Hooton R. D. (2002), *Dependence of absorption on degree of saturation of concrete*, Cement Concrete and Aggregates, Vol. 24, n. 1, p. 20-24.

Osborne G. J. (1999), *Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete*, Cement and Concrete Composites, Vol. 21, p. 11-21.

Powers T. & Brownyard T. (1946-1947), *Studies of the physical properties of hardened cement paste (nine parts)*, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 43.

Powers T. (1947), A discussion of cement hydratation in relation to the curing of concrete, Portland Cement Association Research Bulletin, Vol. 27, p. 178-188.

Powers T. (1960), *Physical properties of cement paste*, Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington, p. 557-613.

Ramezanianpour A. A. & Malhorta V. M. (1995), *Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concrete incorporating slag, fly ash or silica fume*, Cement and Concrete Composites, Vol. 17, p. 125-133.

RILEM CPC 18 (1984), Measurement of hardened concrete carbonation depth, RILEM draft recommandation, Materials and Structures, Vol. 17, p 435-440.

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

Rixom R. (1998), *The economic aspects of admixture use*, Cement and Concrete Composites, Vol. 20, n. 2-3, p. 141-147.

Safiuddin M. & Hearn N. (2005), *Comparison of ASTM saturation techniques for measuring the permeable porosity of concrete*, Cement and Concrete Reasearch, Vol. 35, p. 1008-1013.

Shafiq N. & Cabrera J. G. (2004), *Effects of initial curing condition on the fluid transport properties in OPC and fly ash blended cement concrete*, Cement and Concrete Composites, Vol. 26, p. 381-387.

Song H.-W. & Saraswathy V. (2006), *Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag – an overview*, Journal of Hazardous Materials, B138, p. 226-233.

St John D., Poole A. W. & Sims I. (1998), Concrete petrography, a handbook of investigative techniques, Arnold Publishers, 474 p.

Sturrup V. R., Hooton R. D. & Clendenning T. G. (1983), *Durability of fly ash concrete*, in Proceedings of the CANMET/ACI First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete Vol. 1, Ed. Malhorta V. M., American Concrete Institute SP-79, Detroit, p. 47-69

Taerwe L. (1996), De Schutter G. (2006), *Betontechnologie + Aanvullingen*, cursustekst, Universiteit Gent.

Tracz T. & Śliwiński J. (2006), *Influence of the type of cement on the porosity and permeability of high-performance concrete*, in Seventh CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Supplementary Papers, Montréal, p. 601-615.

Van de Fliert C. (1955), *Voor- en nadelen van 'air-entraining agents' voor beton*, in Luchtbelvormers, air-entraining agents, ENCI prijsvraag 1955, ENCI-CEMIJ Amsterdam, p. 7-41.

Wan H., Shui Z. & Lin Z. (2004), Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties, Cement and Concrete Research, Vol. 34, p. 133-137.

Weigel T. A., Mohsen J. P. & Hagerty D. J., A study of some aspects of Microair as air entraining admixture in fly ash concrete, in Admixtures for Concrete: improvement of properties, Ed. E. Vázquez, RILEM proceedings 5, p. 578-582.

Wesche K. (1991), *Fly ash in concrete, properties and performance*, RILEM Report 7, Londen, 255 p.

Wright P. J. F. (1953), *Entrained air in concrete*, Institution of Civil Engineers, Vol. 2, p. 337-358.

Zhang D. S. (1996), *Air entrainment in fresh concrete with PFA*, Cement and Concrete Composites, Vol. 18, n. 6, p. 409-416.

Lijst van figuren

2.1	Microstructuur en types water in verharde cementpasta [Feldman en Serada (1968)]7
2.2	Volumetrische opbouw van de cementpasta in functie van de hydratatiegraad [Audenaert (2006)]
2.3	Grafische voorstelling capillaire porositeit
2.4	Zeepmoleculen met hydrofiele kop en hydrofobe staart [Du en Folliard (2005)]25
2.5	Verband tussen de straal van de poriën en de temperatuur waarbij water bevriest [Baron (1993)]
2.6	Warmteontwikkeling q in functie van de tijd voor pasta's van vliegas met gewoon Portland cement, C(I) of Portland HSR-cement, C(HSR) [Baert et al. (2006)]
2.7	SEM-opnamen van vliegas [Lammertijn (2007)] en hoogovenslakken [Wan et al. (2004)]
3.1	Vacuümtank voor wateropslorping onder vacuüm
3.2	Ondergedompelde proefstukken in de vacuümtank
3.3	'Cembureau' permeameter
3.4	Luchtdichte recipiënten voor de proefstukken
3.5	Proefopstelling capillaire wateropslorping
3.6	Gecoat proefstuk voorzien van aluminiumfolie
3.7	Bepaling van de carbonatatiediepte met behulp van een fenolfthaleïneoplossing 65
4.1	Capillaire porositeit van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 in functie van de ouderdom
4.2	Totale porositeit van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 in functie van de ouderdom
4.3	Gelporositeit van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 in functie van de ouderdom

4.4	Porositeiten van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 zonder luchtbelvormer (LBV) op 1 maand ouderdom
4.5	Porositeiten van REF, FA35, FA50 en FA67 met luchtbelvormer (LBV) op 1 maand ouderdom
4.6	Porositeiten van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 zonder luchtbelvormer (LBV) op 3 maanden ouderdom
4.7	Porositeiten van REF, FA35, FA50 en FA67 met luchtbelvormer (LBV) op 3 maanden ouderdom
4.8	Porositeiten van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 zonder luchtbelvormer (LBV) op 6 maanden ouderdom
4.9	Porositeiten van REF, FA35, FA50 en FA67 met luchtbelvormer (LBV) op 6 maanden ouderdom
4.10	Porositeiten van [1] C(I)100FA0W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W50 op 1 maand ouderdom
4.11	Porositeiten van [1] C(I)100FA0W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W50 op 3 maanden ouderdom
4.12	$ \begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$
4.13	$ \begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$
4.14	$ \begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$
4.15	$ \begin{array}{l} Schijnbare \ gaspermeabiliteit \ k_a \ voor \ [1] \ C(I)100FA0W40, \ [5] \ C(HSR)100FA0W40, \ [3] \\ C(I)50FA(2)50W40, \ [6] \ C(HSR)50FA(2)50W40, \ [7] \ C(I)50FA(1)50W40 \ en \ [8] \ C(I)50FA(2)50W50 \ op \\ 1 \ maand \ ouderdom \\ \end{array} $
4.16	$ \begin{array}{l} Schijnbare \ gaspermeabiliteit \ k_a \ voor \ [1] \ C(I)100FA0W40, \ [5] \ C(HSR)100FA0W40, \ [3] \\ C(I)50FA(2)50W40, \ [6] \ C(HSR)50FA(2)50W40, \ [7] \ C(I)50FA(1)50W40 \ en \ [8] \ C(I)50FA(2)50W50 \ op \ 3 \ maanden \ ouderdom \\ \hline \end{array} $
4.17	$ \begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$
4.18	$ \begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$
4.19	$ \begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$
4.20	$ \begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$
4.21	$ \begin{array}{l} G_1 \ en \ G_2 \ van \ [1] \ C(I)100FA0W40, \ [5] \ C(HSR)100FA0W40, \ [3] \ C(I)50FA(2)50W40, \ [6] \\ C(HSR)50FA(2)50W40, \ [7] \ C(I)50FA(1)50W40 \ en \ [8] \ C(I)50FA(2)50W50 \ na \ droging \ bij \ 40 \\ ^{\circ}C \ op \ 1 \ maand \ ouderdom \qquad \qquad$

4.22	$ \begin{array}{l} G_1 \ en \ G_2 \ van \ [1] \ C(I)100FA0W40, \ [5] \ C(HSR)100FA0W40, \ [3] \ C(I)50FA(2)50W40, \ [6] \\ C(HSR)50FA(2)50W40, \ [7] \ C(I)50FA(1)50W40 \ en \ [8] \ C(I)50FA(2)50W50 \ na \ droging \ bij \ 40 \\ ^{\circ}C \ op \ 3 \ maanden \ ouderdom \qquad \qquad$
5.1	Capillaire porositeit van S0, S50, S70 en S85 in functie van de ouderdom
5.2	Totale porositeit van S0, S50, S70 en S85 in functie van de ouderdom
5.3	Gelporositeit van S0, S50, S70 en S85 in functie van de ouderdom
5.4	Porositeiten van S0, S50, S70 en S85 op 1 maand ouderdom
5.5	Porositeiten van S0, S50, S70 en S85 op 3 maanden ouderdom
5.6	Porositeiten van S0, S50, S70 en S85 op 6 maanden ouderdom
5.7	Schijnbare gaspermeabiliteit k _a voor S0, S50, S70 en S85 op 1 maand ouderdom
5.8	Schijnbare gaspermeabiliteit k _a voor S0, S50, S70 en S85 op 3 maanden ouderdom
5.9	Schijnbare gaspermeabiliteit k _a voor S0, S50, S70 en S85 op 6 maanden ouderdom
5.10	G_1 van S0, S50, S70 en S85 na droging bij 40 °C in functie van de ouderdom 112
5.11	G_2 van S0, S50, S70 en S85 na droging bij 40 °C in functie van de ouderdom 113
5.12	Trendlijnen ter bepaling van de carbonatatiecoëfficiënten op 1 maand ouderdom 116
5.13	Capillaire porositeit op 1 maand na 4 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT) en op 1 maand ouderdom (VAC)
5.14	Totale porositeit op 1 maand na 4 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT) en op 1 maand ouderdom (VAC)
5.15	Gelporositeit op 1 maand na 4 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT) en op 1 maand ouderdom (VAC)
5.16	Capillaire porositeit op 1 maand na 16 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)
5.17	Totale porositeit op 1 maand na 16 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)
5.18	Gelporositeit op 1 maand na 16 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)
5.19	Capillaire porositeit op 1 maand na 24 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)
5.20	Totale porositeit op 1 maand na 24 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)
5.21	Gelporositeit op 1 maand na 24 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)
5.22	Capillaire porositeit van (CARB) in functie van de blootstellingstijd op 1 maand ouderdom

5.23	Totale porositeit van (CARB) in functie van de blootstellingstijd op 1 maand ouderdom
5.24	Gelporositeit van (CARB) in functie van de blootstellingstijd op 1 maand ouderdom
5.25	Porositeiten van S0, S50, S70 en S85 op 1 maand ouderdom na 16 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)
5.26	Porositeiten van S0, S50, S70 en S85 op 3 maanden ouderdom na 16 weken carbonatatiekast (CARB) of natte kast (NAT)
6.1	Capillaire porositeit van REF, FA35, FA50 en FA67 na 3 maanden in functie van $\varphi_{cap \ theoretisch}$ volgens Lammertijn (2007)
6.2	Capillaire porositeit van [1] t.e.m. [8] na 3 maanden in functie van φ_{cap} theoretisch volgens Lammertijn (2007)
6.3	Correlatie porositeit – gemiddelde druksterkte f_{ccub} voor de meetresultaten van [1] t.e.m. [8] op 1 en 3 maanden ouderdom
6.4	$ \begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$
6.5	Correlatie capillaire opslorpingscoëfficiënt – gemiddelde druksterkte f_{ccub} voor de meetresultaten van [1] t.e.m. [8] op 1 en 3 maanden ouderdom
6.6	Correlatie porositeit – gemiddelde druksterkte f_{ccub} voor de meetresultaten van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom
6.7	Correlatie gemiddelde druksterkte f_{ccub} – schijnbare gaspermeabiliteit k_a bij 2 bar en verzadigingsgraad 0% voor de meetresultaten van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom
6.8	Correlatie carbonatatiediepte – porositeit voor de meetresultaten van S50, S70 en S85 op 1 maand ouderdom bij blootstellingstijden van 4, 16 en 24 weken
A.1	Korrelverdelingsdiagram zand 0/4 (levering 2006)
A.2	Korrelverdelingsdiagram zand 0/4 (levering 2007)
A.3	Korrelverdelingsdiagram grind 2/8
A.4	Korrelverdelingsdiagram rolgrind 8/16 (levering 2006)
A.5	Korrelverdelingsdiagram rolgrind 8/16 (levering 2007)
A.6	Korrelverdelingsdiagram vliegas FA(1) en FA(2)
B.1	Gemiddelde druksterkte f_{ccub} [N/mm ²] van hernemingen a, b en (c) van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 op 28 dagen ouderdom
B.2	Gemiddelde druksterkte f_{ccub} [N/mm ²] van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W50 in functie van de ouderdom

- B.3 Gemiddelde druksterkte f_{ccub} [N/mm²] van hernemingen /1, /2 en /3 van S0, S50, Gemiddelde druksterkte f_{ccub} [N/mm²] van S0, S50, S70 en S85 in functie van de **B.4** Debiet Q in functie van de drukgradiënt $(P_1^2 - P_2^2)$ voor [1] C(I)100FA0W40, [2] D.1 C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W50 op 1 maand ouderdom D.2 Debiet Q in functie van de drukgradiënt $(P_1^2 - P_2^2)$ voor [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W50 op 3 maanden D.3 Debiet Q in functie van de drukgradiënt $(P_1^2 - P_2^2)$ voor [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 op 6 maanden ouderdom ... Debiet Q in functie van de drukgradiënt (P₁²-P₂²) voor S0, S50, S70 en S85 op 1 D.4 Debiet Q in functie van de drukgradiënt (P₁²-P₂²) voor S0, S50, S70 en S85 op 3 D.5 Debiet Q in functie van de drukgradiënt (P₁²-P₂²) voor S0, S50, S70 en S85 op 6 D.6 \sqrt{tijd} ter bepaling van E.1 in functie van de Massatoename capillaire opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W40 op 1 maand ouderdom na droging bij 40 °C E.2 Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W40 op 1 maand ouderdom na droging bij 105 °C E.3 \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire Massatoename in functie van opslorpingscoëfficiënten G₁ en G₂ van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W40 op 3 maanden ouderdom na droging bij 40 °C Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire E.4

E.5	Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G ₁ en G ₂ van [1] C(I)100FA0W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 op 6 maanden ouderdom na droging bij 40 °C
E.6	Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G ₁ en G ₂ van [1] C(I)100FA0W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40 op 6 maanden ouderdom na droging bij 105 °C
E.7	Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G ₁ en G ₂ van S0, S50, S70 en S85 op 1 maand ouderdom na droging bij 40 °C
E.8	Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G ₁ en G ₂ van S0, S50, S70 en S85 op 1 maand ouderdom na droging bij 105 °C
E.9	Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G ₁ en G ₂ van S0, S50, S70 en S85 op 3 maanden ouderdom na droging bij 40 °C
E.10	Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G ₁ en G ₂ van S0 en S50 op 3 maanden ouderdom na droging bij 105 °C
E.11	Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G ₁ en G ₂ van S0, S50, S70 en S85 op 6 maanden ouderdom na droging bij 40 °C
E.12	Massatoename in functie van \sqrt{tijd} ter bepaling van de capillaire opslorpingscoëfficiënten G ₁ en G ₂ van S0, S50, S70 en S85 op 6 maanden ouderdom na droging bij 105 °C
F.1	Correlatie schijnbare gaspermeabiliteit k_a bij 2 bar en verzadigingsgraad 0% – gemiddelde druksterkte f_{ccub} voor de meetresultaten van [1] t.e.m. [8] op 1 en 3 maanden ouderdom
F.2	Correlatie gelporositeit (AA') – capillaire opslorpingscoëfficiënt G_1 en gelporositeit (B) – capillaire opslorpingscoëfficiënt G_2 voor de meetresultaten van [1] t.e.m [8] op 1 en 3 maanden ouderdom
F.3	Correlatie capillaire porositeit (AA') – capillaire opslorpingscoëfficiënt G_1 en capillaire porositeit (B) – capillaire opslorpingscoëfficiênt G_2 voor de meetresultaten van [1] t.e.m. [8] op 1 en 3 maanden ouderdom
F.4	Correlatie capillaire, totale en gelporositeit – schijnbare gaspermeabiliteit k_a bij 2 bar en verzadigingsgraad 0% voor de meetresultaten van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom 174
F.5	Correlatie gelporositeit (AA') – capillaire opslorpingscoëfficiënt G_1 en gelporositeit (B) – capillaire opslorpingscoëfficiënt G_2 voor de meetresultaten van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom
F.6	Correlatie capillaire porositeit (AA') – capillaire opslorpingscoëfficiënt G_1 en capillaire porositeit (B) – capillaire opslorpingscoëfficiënt G_2 voor de meetresultaten van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom

Lijst van tabellen

2.1	Classificatie van de holten [Espinoza en Franke (2006)]
2.2	Classificatie van de holten [St John et al. (1998)]
3.1	Chemische samenstelling van CEM I 52,5 N en CEM I 52,5 N HSR
3.2	Gehalte aan C ₃ S, C ₂ S, C ₃ A en C ₄ AF in CEM I 52,5 N en CEM I 52,5 N HSR volgens Bogue
3.3	Chemische samenstelling vliegas
3.4	Chemische samenstelling hoogovenslakken
3.5	Betonsamenstelling mengelingen [1], [2], [3] en [4]
3.6	Betonsamenstelling mengelingen Lammertijn (2007)
3.7	Betonsamenstelling mengelingen [5], [6], [7] en [8]
3.8	Betonsamenstelling mengelingen S0, S50, S70 en S85
3.9	Overzicht parameters bepaald bij de vervaardiging van de betonmengsels
3.10	Procedure ter bepaling van de gaspermeabiliteit
3.11	Blootstellingstijden carbonatatie
4.1	Luchtgehaltes van HVFA-mengelingen met en zonder luchtbelvormer
4.2	Luchtgehaltes op 1 en 3 maanden ouderdom [Cox en De Belie (2007)]67
4.3	Gemiddelde druksterktes van HVFA-mengelingen met en zonder luchtbelvormer na 28 dagen
4.4	Capillaire en totale porositeiten van [1] t.e.m. [8] op 1, 3 en 6 maanden ouderdom
4.5	Gelporositeiten van [1] t.e.m. [8] op 1, 3 en 6 maanden ouderdom
4.6	Porositeitsverschillen betonsamenstellingen met en zonder luchtbelvormer
4.7	Schijnbare gaspermeabiliteit k _a met en zonder luchtbelvormer op 1 maand ouderdom

4.8	Opslorpingscoëfficiënten G ₁ en G ₂ van [1] t.e.m. [8] op 1, 3 en 6 maanden ouderdom
4.9	Opslorpingscoëfficiënten G ₁ en G ₂ van de mengelingen met en zonder luchtbelvormer na droging bij 40 °C
5.1	Capillaire en totale porositeiten van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom
5.2	Gelporositeiten van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom100
5.3	ϕ_{cap}/ϕ_{tot} en ϕ_{gel}/ϕ_{tot} na 6 maanden107
5.4	Opslorpingscoëfficiënten G ₁ en G ₂ van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom
5.5	Carbonatatiedieptes in functie van de blootstellingstijd en de ouderdom116
5.6	Carbonatatiecoëfficiënten op 1 maand ouderdom
6.1	Gemeten k_a bij 3 bar na droging bij 105 °C (verzadigingsgraad 0%) en berekende K_{MC90} van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W50 op 1 en 3 maanden ouderdom
6.2	Gemeten k_a bij 3 bar na droging bij 105 °C (verzadigingsgraad 0%) en berekende K_{MC90} van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom144
6.3	Capillaire porositeiten (φ_{proef}) en (φ_{carb}) van S50, S70 en S85 op 1 maand ouderdom na een blootstellingstijd van 16 en 24 weken
B .1	Gemiddelde druksterkte f_{ccub} [N/mm ²] van [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40, [4] C(I)33FA(2)67W40, [5] C(HSR)100FA0W40, [6] C(HSR)50FA(2)50W40, [7] C(I)50FA(1)50W40 en [8] C(I)50FA(2)50W50 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom
B.2	Proefschema mengelingen [1] C(I)100FA0W40, [2] C(I)65FA(2)35W40, [3] C(I)50FA(2)50W40 en [4] C(I)33FA(2)67W40
B.3	Gemiddelde druksterkte f_{ccub} [N/mm ²] van S0, S50, S70 en S85 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom157
B.4	Proefschema mengelingen S0, S50, S70 en S85
C.1	Capillaire en totale porositeiten van REF, FA35, FA50 en FA67 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom
C.2	Gelporositeiten van REF, FA35, FA50 en FA67 op 1, 3 en 6 maanden ouderdom