

Het gebruik van secundaire slakken in volledig recycleerbaar beton

Pieter Verlé

Promotor: prof. dr. Nele De Belie

Begeleiders: Mieke De Schepper, dr. ir. Elke Gruyaert

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

Vakgroep Bouwkundige Constructies

Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2010-2011



Het gebruik van secundaire slakken in volledig recycleerbaar beton

Pieter Verlé

Promotor: prof. dr. Nele De Belie

Begeleiders: Mieke De Schepper, dr. ir. Elke Gruyaert

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

Vakgroep Bouwkundige Constructies

Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2010-2011



Voorwoord

Bij het einde van het vorige academiejaar werd het kiezen van een thesisonderwerp voor een deel vereenvoudigd aangezien ik zeker iets wilde doen rond het materiaal beton. Voor velen is beton simpelweg een combinatie van cement, water en granulaten, maar als ingenieursstudent sta je veel meer stil bij alle mogelijke toepassingen die beton heeft en bij de vele mogelijkheden om de eigenschappen ervan te beïnvloeden. Die interesse gecombineerd met het principe van milieuvriendelijk bouwen leidde tot de keuze voor dit onderzoek rond koperslak, een bijproduct uit de koperindustrie met veelbelovende toepassingen. Ik wil dan ook in de eerste plaats Prof. Dr. Ir. Nele De Belie bedanken om mij de kans te geven een volledig academiejaar op dit onderwerp te kunnen werken.

Dit werk zou verder ook nooit tot stand gekomen zijn zonder de hulp van mijn begeleidster, Mieke De Schepper. Al van bij onze eerste ontmoeting voelde ik meteen dat ik bij haar terecht kon met al mijn vragen en problemen in verband met dit onderzoek. Ze was een grote steun en toeverlaat bij het opstellen, interpreteren en verbeteren van mijn resultaten en teksten. Daarnaast wil ik haar ook bedanken voor het opvolgen van mijn proeven wanneer ik deze zelf niet kon uitvoeren door lessen of examens. Voor dit alles een welgemeende dank u wel en hierbij wens ik haar nog veel succes met haar verdere onderzoek.

Daarnaast zou ik ook alle personeelsleden van het laboratorium Magnel willen bedanken. Ze stonden altijd klaar voor het vervaardigen van beton, het uitvoeren van drukproeven, het aanleren van proefmethoden en dergelijke meer. Zij zijn de stille kracht achter menig onderzoek dat in het laboratorium Magnel gevoerd wordt en verdienen het dan ook om vermeld te worden.

Ook mag ik zeker niet nalaten om al mijn vrienden en medestudenten te bedanken voor de vijf mooie jaren die het studentenleven mij gebracht heeft. Studeren aan de universiteit is alleen mogelijk mits de nodige portie plezier en ontspanning en daarvoor wil ik hen dan ook van harte bedanken.

Tot slot wil ik zeker en vast mijn ouders bedanken, die mij de kans gegeven hebben om verder te studeren. Samen met mijn broer hebben ze mij steeds geholpen waar mogelijk en hoewel ik dat niet altijd toon, ben ik hen daar ontzettend dankbaar voor. Bedankt om mij te brengen waar ik nu sta.

Ninove, augustus 2011

Pieter Verlé

Toelating tot bruikleen

De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef 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 masterproef.

The author gives permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use.

In the case of any other use, the limitations of the copyright have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation.

10-08-2011

Overzicht

HET GEBRUIK VAN SECUNDAIRE SLAKKEN IN VOLLEDIG RECYCLEERBAAR BETON

Pieter Verlé

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van

Master in de Ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Academiejaar 2010-2011

Promotor: Prof. Dr. Ir. Nele De Belie

Begeleidsters: Ir. Arch. Mieke De Schepper, Dr. Ir. Elke Gruyaert

Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen

Vakgroep Bouwkundige Constructies

Laboratorium Magnel voor Betononderzoek

Voorzitter: Prof. Dr. Ir. Luc Taerwe

Samenvatting

Wereldwijd is de sterkste groei in de CO₂-uitstoot afkomstig van de bouwsector. Daarnaast is het ook een zeer energievervlindende sector en wordt er in Vlaanderen jaarlijks minstens 11 miljoen ton bouw- en sloopafval geproduceerd, waarvan 80% inert steenachtig materiaal. Maar tegelijkertijd heeft net deze sector een veelbelovend potentieel om afvalstoffen te hergebruiken. Tot op heden worden afval- en bijproducten van de bouwindustrie vooral gerecycleerd in laagwaardige toepassingen of gewoon gedumpt. Nochtans zijn er ook hoogwaardige toepassingen mogelijk voor sommige van deze producten, zoals het gebruik van bijvoorbeeld vliegash al aangetoond heeft. Nog een stap verder is het volledig recycleerbaar beton. Dat beton wordt zo geproduceerd dat het op het einde van zijn levenscyclus kan dienen als enige grondstof voor de cementproductie. Daartoe wordt gestreefd naar een chemische samenstelling van het beton die gelijk is aan deze van een grondstoffenmengsel voor de cementproductie.

Ijzeroxide is één van de belangrijke oxides binnen de cementproductie, en dus worden er voor het volledig recycleerbaar beton grondstoffen gezocht die dit kunnen aanbrengen. Koperslak voldoet aan deze eis door zijn hoog gehalte aan ijzeroxide (ongeveer 50%) en het feit dat het tevens een bijproduct is dat op die manier een hoogwaardige toepassing vindt, is eveneens positief voor de totale milieupact van het volledig recycleerbaar beton. In dit onderzoek werd de invloed van het gebruik van koperslak ter vervanging van cement of granulaten op de eigenschappen van beton bestudeerd. Het heeft immers geen zin om koperslak te gebruiken in volledig recycleerbaar beton als het beton daardoor niet meer zou voldoen aan eisen in verband met druksterkte of duurzaamheid.

Door het aanwenden van bijproducten en afvalstoffen zoals koperslak in hoogwaardige toepassingen ontstaat een win-winsituatie. De producenten van deze materialen hebben een afzetmarkt waardoor de hoge kost van het dumpen verdwijnt, en de bouwsector kan goedkopere grondstoffen aanwenden dan de tot nu toe gebruikelijke natuurlijke grondstoffen. Op die manier is er ook winst voor het milieu, want zonder degelijk alternatief voor de natuurlijke grondstoffen, zal de bouwsector na 2010 jaarlijks 8-12 miljard ton natuurlijke granulaten vragen. Het mag duidelijk zijn dat dit de totale vernietiging van ons milieu betekent.

Koperslak is dus zo een bijproduct, het ontstaat bij de productie van koper en wordt nu voornamelijk gebruikt in laagwaardige toepassingen zoals in snijwerktuigen en als ballastlaag bij spoorwegen. Door zijn samenstelling en eigenschappen leent koperslak zich echter ook uitstekend tot het gebruik in hoogwaardige toepassingen. Zo vertoont het puzzolane eigenschappen wanneer het fijn gemalen wordt, en kan het door zijn hoog gehalte aan ijzererts zoals eerder gesteld ook dienen als alternatieve grondstof voor de cementproductie. Daarnaast heeft koperslak een hogere samendrukbaarheid dan natuurlijke granulaten en scherpe randen, waardoor het eveneens kan gebruikt worden als granulaat in mortel of beton. De scherpe randen zorgen dan voor een betere cohesie.

In dit onderzoek werden het gebruik van koperslak als puzzolaan materiaal en als granulaat in mortel en beton onderzocht. Voor het gebruik als puzzolaan materiaal werd de koperslak fijngemalen en werden cementpasta's en mortelproefstukken bereid met een oplopend percentage van het cement vervangen door koperslak. De resultaten in dit onderzoek tonen aan dat de puzzolane eigenschappen van de koperslak niet of nauwelijks tot uiting kwamen, een resultaat dat waarschijnlijk te wijten is aan het feit dat de koperslak niet zo fijn gemalen was als het cement.

Voor het gebruik van koperslak als granulaat werden zowel mortelproefstukken als betonmengsels geproduceerd. In de mortelproefstukken werd het zand in oplopende percentages vervangen door fijn koperslak en werd de druksterkte bepaald. Voor het gebruik in beton werden zes mengsels vervaardigd, met name twee referentiemengsels en vier mengsels met koperslak. De referentiemengsels zonder koperslak werden gebruikt als maatstaf om de duurzaamheid van het beton met koperslak te evalueren volgens de norm NBN EN 206-1 (2001). In de vier mengsels met koperslak werd ofwel een deel van de zandfractie vervangen, ofwel een deel van het grind, en dit met 20% of 40% vervanging ten opzichte van het totaal (zand + grind). Bij de betonmengsels werd eveneens de druksterkte bepaald, maar daarnaast werden ook een aantal eigenschappen in verband met de duurzaamheid bestudeerd. Zo werden de mengsels gecontroleerd op hun porositeit, gaspermeabiliteit, weerstand tegen carbonatatie, weerstand tegen dooizouten, weerstand tegen de diffusie van chloriden en vorstbestendigheid.

Uit het onderzoek blijkt dat het gebruik van koperslak zeer goede resultaten oplevert ter vervanging van de granulaten. Zo hebben zowel de mortelproefstukken als het beton een hogere druksterkte dan hun referenties zonder koperslak. Voor het beton is ook de duurzaamheid van de mengsels met koperslak over het algemeen gelijk of zelfs beter dan wanneer geen koperslak gebruikt wordt. Enkel de weerstand tegen dooizouten is duidelijk lager bij het gebruik van koperslak. Er moet wel rekening mee gehouden worden dat koperslak door zijn eigenschappen zorgt voor een teveel aan vrij water in de mortel of het beton en op die manier de eigenschappen beïnvloedt. De verwachting is dat nog betere resultaten zouden kunnen worden verkregen wanneer met dit teveel aan vrij water rekening wordt gehouden bij het bepalen van de W/C-factor.

Trefwoorden: koperslak, hydratatie, druksterkte, duurzaamheid

The use of secondary slags in Completely Recyclable Concrete

Pieter Verlé

Supervisor(s): Prof. Dr. Ir. Nele De Belie, Ir. Arch. Mieke De Schepper, Dr. Ir. Elke Gruyaert

Abstract— This paper describes the results of a research on the use of copper slag in cement paste, mortar and concrete. Copper slag is a by-product obtained during matte smelting and refining of copper [1]. Due to its properties and chemical composition, it can be used as a raw material in the production of cement and as a replacement for cement or aggregates in mortar and concrete production. To evaluate its effect on the hydration of cement paste and on the strength and durability of mortar and concrete, several mixtures were prepared with an increasing amount of copper slag replacing the cement or the aggregates.

Keywords—copper slag, hydration, compressive strength, durability

I. INTRODUCTION

The evolution in the construction of buildings has been enormous in the last decades. Unfortunately, there is a drawback to everything. The construction industry is a main producer of CO₂ and the amounts of energy used are enormous. Apart from that, vast amounts of raw materials are extracted from nature and every year, millions of tons of construction and demolition waste are produced.

A solution for these problems can be found in the recycling of waste materials. Hereby, less waste is dumped in stockpiles, less natural raw materials are extracted and also the amount of energy required for the production of new materials is reduced.

Copper slag is such a waste material. Current options for its management include low-value applications such as cutting tools or railroad ballast and disposal in slag dumps [1]. But due to its properties and chemical composition, it can also be used in high-value applications. Copper slag has a higher compressibility than natural aggregates and its sharp edges can enhance the cohesion of the concrete matrix when it is used as an aggregate. When ground, copper slag displays pozzolanic properties. This means it will react with the Ca(OH)₂ originating from the cement hydration. In that way, it can be used as a replacement for cement. This paper studies the use of copper slag as cement or aggregate substitute.

II. MIXTURES

A. Use of copper slag as a replacement for cement

Ground copper slag was used as a replacement for cement in paste and mortar. For the paste, 11 different samples were produced with an increasing amount of copper slag replacing the cement. The replacement levels ranged from 0% to 100% with steps of 10%. For these mixtures, the heat of hydration was recorded in order to observe the pozzolanic activity of the copper slag. The water to binding material ratio (W/BM) was

0.4. For the mortar, the amount of cement replaced was 0%, 20%, 40%, 50%, 60%, 80% and 100%. The compressive strength of these samples was examined in order to evaluate the pozzolanic effect of copper slag on the strength of cement mortars. For these samples, a W/BM ratio of 0.5 was used.

B. Use of copper slag as a replacement for aggregates

The use of copper slag as a replacement for aggregates was examined using mortars and concrete. In the mortars, the sand was replaced by fine copper slag in increasing ratios of 10% from 0% to 100%. The W/BM ratio used was 0.5. To evaluate the strength and durability of concrete mixtures incorporating copper slag as fine or coarse aggregate, six different mixtures were prepared. The first two were reference mixtures without copper slag and with a W/BM factor of 0.45 and 0.50. The four other mixtures contained 20% or 40% copper slag as fine (F) or coarse (G) aggregate. Their W/BM ratio was always equal to 0.45. The mixture proportions are given in Table 1.

Table 1: Concrete mixture proportions

	<i>ref</i> 0.45	<i>ref</i> 0.50	<i>SF</i> 0.20	<i>SF</i> 0.40	<i>SG</i> 0.20	<i>SG</i> 0.40
limestone sand 0/4 [kg/m ³]	762.3	761.7	383.2	0	786.3	836.6
fine copper slag [kg/m ³]	0	0	403.1	848.3	0	0
coarse copper slag [kg/m ³]	0	0	0	0	403.1	857.7
gravel 2/8 [kg/m ³]	449.9	449.6	464.0	488.3	311.9	169.9
gravel 8/16 [kg/m ³]	741.7	741.2	765.0	805.0	514.1	280.1
CEM I 52,5 N [kg/m ³]	340	320	340	340	340	340
water [kg/m ³]	153	160	153	153	153	153
superplast [ml/m ³]	0	0	680	680	680	680
W/BM ratio	0.45	0.50	0.45	0.45	0.45	0.45

III. TEST RESULTS

A. Use of copper slag as a replacement for cement

Both the cement pastes and the mortar pieces experience a negative influence from the use of copper slag. The total heat produced in the cement pastes decreases with an increasing level of copper slag, indicating an adverse effect on the creation of hydration products. These hydration products give strength to the mortars or the concrete. With that in mind, it is not surprising that the mortars containing copper slag as a replacement for cement have a lower compressive strength after 28 days as shown in Figure 1. The mortars have totally no strength when 100% of the cement is replaced by ground copper slag. It is assumed that the negative effect of the copper slag is due to the insufficient fineness of the copper

slag used in this study. Therefore its pozzolanic activities could not show properly, resulting in a decreasing strength of the cement mortars. This assumption is partially based on [2].

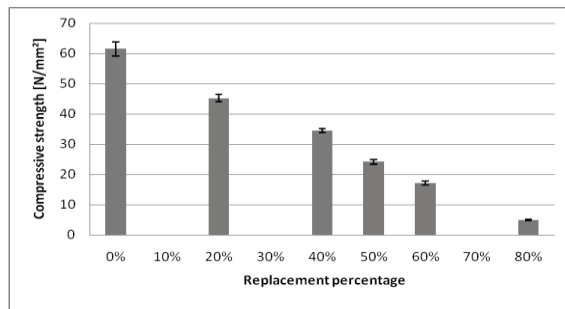


Figure 1: Compressive strength of mortars containing copper slag as a replacement for cement

B. Use of copper slag as a replacement for aggregates

1) Compressive strength

The mortars containing copper slag as a fine aggregate were tested on their compressive strength. The strength of the mortars increases with an increasing amount of copper slag until a certain percentage (40% after 7 days, 20% after 28 days). Higher percentages of replacement yield no further growth of the compressive strength, but also do not create a significant decrease compared to the maximum value at 40% and 20% replacement.

The concrete mixtures containing copper slag as fine or coarse aggregate were also tested on their compressive strength. The results indicate a positive influence of the use of copper slag in comparison with the reference mixture ref 0.45.

The explanation for both mortars and concrete can be found in the higher compressibility and the sharp edges of the copper slag in comparison with natural aggregates. These two factors cause the growth in compressive strength. The reason the strength does not rise any further after 40% or 20% replacement in the mortars, is probably the excess of free water created by the glassy appearance and the lower water absorption of the copper slag. The free water creates pores, adversely affecting the compressive strength at higher replacement levels [3].

2) Durability

Apart from their compressive strength, the concrete mixtures were also tested on some aspects of durability. The porosity, permeability, carbonation, freeze-thaw resistance (with or without de-icing agents) and resistance against chloride ingress were examined.

The results show that the replacement of aggregates by copper slag does not influence the porosity or the permeability of the concrete in a significant way. The porosity was measured using the vacuum saturation technique [NBN B 05-201 (1976)] whereas the permeability was determined using the 'cembureau' permeameter as described in RILEM TC 116-PCD (1993).

The resistance of the concrete against carbonation was investigated by subjecting the concrete samples to an increased level of carbon dioxide (10v%). The depth of carbonation was measured after 4 and 8 weeks of exposure, but no clear information was found in that short period of time. Longer research is needed to evaluate the influence of copper slag on the carbonation of concrete.

The effect that copper slag has on the resistance of concrete against the combined action of freeze-thaw cycles and de-icing agents, was investigated according to NBN EN 1339 (2003). The results indicate that all the concretes containing copper slag perform significantly worse than the reference concrete ref 0.45 and thus are not meeting NBN B 15-100 (2008). Nevertheless, when no de-icing agents are used, the concrete mixtures containing copper slag have a better resistance against the freeze-thaw cycles than ref 0.50, the mixture they have to be compared to according NBN EN 206-1 (2001). This result was obtained by a splitting tensile strength test as stated in NBN B 05-203 (1977) before and after 14 freeze-thaw cycles.

The last durability parameter investigated, was the resistance against chloride ingress. This was tested as described in NT Build 492 (1999) to determine the migration coefficient of the concrete. The results are displayed in Figure 2 and indicate a decrease in the migration coefficient when copper slag is used in comparison with ref 0.45, to which it has to be compared according to NBN EN 206-1 (2001). In that way, the concrete meets the requirements in NBN B 15-100 (2008).

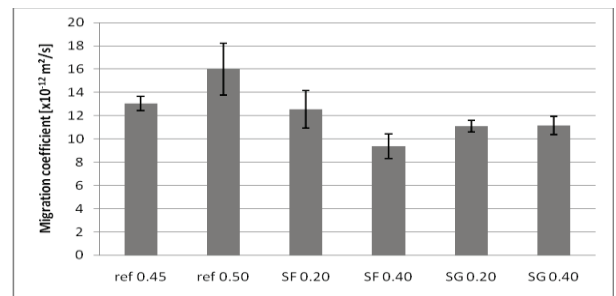


Figure 2: Migration coefficient for all the concrete mixtures

IV. CONCLUSIONS

The use of copper slag as a replacement for cement yielded a negative effect on the hydration of cement pastes and on the compressive strength of cement mortars. It is assumed that this is due to the insufficient fineness of the copper slag used in this research, which prevented the copper slag from exposing its pozzolanic properties.

The use of copper slag as a replacement for aggregates showed very good results. Only the resistance against freeze-thaw cycles in combination with de-icing agents was worse in the concrete containing copper slag than in the reference concrete. All other durability parameters were either not significantly different or even better in comparison with the reference concrete.

It can be said that there is a future for the use of copper slag as an aggregate. For the use of copper slag as a replacement for cement, further investigation is necessary.

V. REFERENCES

- [1] Shi C., Meyer C., Behnood A., *Utilization of copper slag in cement and concrete*, Resources, Conservation and Recycling, 2008.
- [2] Tixier R., Devaguptapu R., Mobasher B., *The effect of copper slag on the hydration and mechanical properties of cementitious mixtures*, Cement and Concrete Research, 1997.
- [3] Al-Jabri K.S., Al-Saidy A.H., Taha R., *Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete*, Construction and Building Materials, 2011.

Inhoudsopgave

VOORWOORD	i
OVERZICHT	iii
EXTENDED ABSTRACT	v
AFKORTINGEN EN SYMBOLEN	ix
1. INLEIDING	1
1.1. PROBLEEMSTELLING	1
1.2. DOELSTELLING	3
2. LITERATUURSTUDIE	4
2.1. INLEIDENDE BESCHOUWINGEN	4
2.1.1. Productie van koperslak	4
2.1.2. Eigenschappen van koperslak	5
2.1.3. Toepassingen van koperslak	8
2.2. HET GEBRUIK VAN KOPERSLAK IN DE CEMENTPRODUCTIE	10
2.3. HET GEBRUIK VAN KOPERSLAK TER VERVANGING VAN CEMENT	11
2.3.1. Algemeen	11
2.3.2. Koperslak als cementvervanger in cementpasta	11
2.3.3. Koperslak als cementvervanger in mortel	13
2.3.4. Koperslak als cementvervanger in beton	14
2.4. HET GEBRUIK VAN KOPERSLAK ALS GRANULAAT	16
2.4.1. Het gebruik van koperslak als fijn granulaat	17
2.4.2. Het gebruik van koperslak als grof granulaat	21
3. MATERIALEN EN METHODEN	22
3.1. GEBRUIKTE MATERIALEN	22
3.1.1. Cement	22
3.1.2. Zand	22
3.1.3. Koperslak	22
3.1.4. Overige granulaten	22
3.1.5. Superplast	22
3.2. MENGSELSAMENSTELLINGEN EN UITGEVOERDE PROEVEN	23
3.2.1. Cementpasta	23
3.2.2. Mortel	24
3.2.3. Beton	27
4. RESULTATEN EN DISCUSSIE	40
4.1. KOPERSLAK TER VERVANGING VAN HET BINDMIDDEL	40
4.1.1. Cementpasta	40
4.1.2. Mortel	44
4.2. KOPERSLAK TER VERVANGING VAN TOESLAGSTOFFEN	45

4.2.1.	Mortel (gebruik van koperslak als fijn granulaat)	45
4.2.2.	Beton (gebruik van koperslak als fijn en grof granulaat)	48
5.	CONCLUSIE	65
5.1.	ALGEMENE BESLUITEN	65
5.1.1.	Koperslak ter vervanging van het bindmiddel.....	65
5.1.2.	Koperslak ter vervanging van de toeslagstoffen	66
5.1.3.	Algemene evaluatie van het gebruik van koperslak.....	68
5.2.	VOORSTEL TOT VERDER ONDERZOEK	68
5.2.1.	Koperslak ter vervanging van het bindmiddel.....	68
5.2.2.	Koperslak ter vervanging van de toeslagstoffen	68
6.	BIJLAGEN	70
6.1.	KORRELVERDELINGSDIAGRAMMA	70
6.1.1.	Korrelverdelingsdiagram rivierzand 0/4.....	70
6.1.2.	Korrelverdelingsdiagram grof koperslak	70
6.1.3.	Korrelverdelingsdiagram rolgrind 2/8.....	71
6.1.4.	Korrelverdelingsdiagram rolgrind 8/16.....	71
6.1.5.	Korrelverdelingsdiagram CEM I 52,5 N en gemalen koperslak	72
6.2.	POROSITEIT.....	72
7.	BIBLIOGRAFIE	74
	LIJST VAN FIGUREN	77
	LIJST VAN TABELLEN	79

Afkortingen en symbolen

α	significantieniveau	-
μ	dynamische viscositeit van het doorstromingsgas	Pa.s
ρ_a	absolute volumemassa van een granulaat	kg/m ³
ρ_b	droge schijnbare dichtheid van het beton	kg/m ³
ρ_v	volumemassa van de gebruikte vloeistof in de picnometer	kg/m ³
ρ_w	volumemassa van het water	kg/m ³
ϕ	porositeit van het beton	-
A	doorstromingsoppervlak	m ²
CSH	symbolische notatie voor C ₃ S ₂ H ₃ , zie C ₃ S ₂ H ₃	-
C ₂ S	2CaO.SiO ₂ , dicalciumsilicaat, beliet	-
C ₃ S	3CaO.SiO ₂ , tricalciumsilicaat, aliet	-
C ₃ S ₂ H ₃	3CaO.2SiO ₂ .3H ₂ O, calciumsilicaathydraat, cementhydraat	-
C _n S	C ₃ S of C ₂ S	-
D	tijdsafhankelijke migratiecoëfficiënt	m ² /s
K	schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt	m ²
L	dikte van het proefstuk	m
M _a	massa droge vaste stof van een granulaat	kg
M _{pm}	massa van de picnometer	kg
M _{tot}	massa van picnometer, granulaatpoeder en water	kg
m _d	massa van het droge proefstuk	g
m _k	massa koperslak	g
m _l	massa van het verzadigde proefstuk onder water	g
m _s	massa van het verzadigde proefstuk	g
m _z	massa zand	g
m%	massaprocent	%

P	absolute toegepaste druk	Pa
P_a	absolute atmosferische druk	Pa
Q	doorstromingsdebiet	m ³ /s
R^2	correlatiecoëfficiënt	-
ref 0,45	referentiebeton met W/C-factor gelijk aan 0,45	-
ref 0,50	referentiebeton met W/C-factor gelijk aan 0,50	-
S	verzadigingsgraad	%
SEM	Scanning Electron Microscope	-
SF 0,20	beton met 20% vd granulaten vervangen door fijn koperslak	-
SF 0,40	beton met 40% vd granulaten vervangen door fijn koperslak	-
SG 0,20	beton met 20% vd granulaten vervangen door grof koperslak	-
SG 0,40	beton met 40% vd granulaten vervangen door grof koperslak	-
T	gemiddelde temperatuur van de anolitische oplossing	°C
T(0,45)	benaming voor ref 0,45 volgens NBN EN 206-1, zie ref 0,45	-
T(0,50)	benaming voor ref 0,50 volgens NBN EN 206-1, zie ref 0,50	-
t	tijd	s
U	aangebrachte spanning over het proefstuk	V
V	doorstroomde volume	ml
V_a	volume droge vaste stof van een granulaat	m ³
V_{beton}	volume van het droge beton	m ³
V_{pm}	volume van de picnometer	m ³
V_{water}	volume van de holten gevuld met water	m ³
vol%	volumepercent	%
W/C	massaverhouding van het water tot het cement	-
XC4	uit NBN EN 206-1 voor carbonatatie: wisselend nat en droog	-
XF3	uit NBN EN 206-1: hoge waterverzadiging zonder dooizouten	-
XF4	uit NBN EN 206-1: hoge waterverzadiging met dooizouten of zeewater	-
XS2	uit NBN EN 206-1: blijvend ondergedompeld in zeewater en brak water	-
x_d	gemiddelde indringingsdiepte	mm

1. Inleiding

1.1. Probleemstelling

De evoluties in de bouwsector zijn de laatste decennia haast niet meer bij te houden. Helaas is er ook een keerzijde aan de medaille. Ten eerste is er de grote uitstoot aan CO₂. In Najimi et al. (2011) wordt gesteld dat de sterkste groei in CO₂-uitstoot van de bouwsector komt. Binnen die sector is de cementproductie de grote slokop, met ongeveer 6360 MJ energie en 1 kubieke ton CO₂ per kubieke ton cement (Pourkhorshidi et al. (2010) geciteerd in Najimi, Sobhani et al. (2011)). Wereldwijd wordt de cementproductie verantwoordelijk geacht voor 7% van de CO₂-uitstoot (Meyer (2009)) geciteerd in Najimi, Sobhani et al. (2011)). Samenhangend met de CO₂-uitstoot, is er ook het immense energieverbruik. Aangezien 92% van het energieverbruik voor het maken van beton gelinkt is aan cement, is het duidelijk dat vooral de cementproductie dient aangepakt te worden om het energieverbruik van de betonsector te doen dalen (Najimi, Sobhani et al. (2011)).

Het tweede grote probleem is het gebruik van natuurlijke grondstoffen. Zowel voor de cementproductie als voor de granulaten in beton worden tot op heden vooral natuurlijke grondstoffen gebruikt. Deze zijn echter eindig. Dat dit in de toekomst problemen gaat geven wordt onderstreept in Tu et al. (2006) geciteerd in Al-Jabri et al. (2009a) en Al-Jabri et al. (2009b) waar gesteld wordt dat zonder degelijk alternatief, de bouwsector na 2010 jaarlijks 8-12 miljard ton natuurlijke granulaten zal vragen.

Tot slot produceert de bouwsector zeer veel bijproducten en afvalstoffen. Zo schat Verboven (2010) de jaarlijkse hoeveelheid bouw- en sloopafval in Vlaanderen op 11 miljoen ton, waarvan 80% inert steenachtig materiaal. Volgens Tam et al. (2006) wordt 90% van dat afval hergebruikt in laagwaardige toepassingen. Nochtans zijn er ook hoogwaardige toepassingen mogelijk.

Een oplossing die alle problemen tegelijk kan aanpakken, is recyclage. Door afvalstoffen en bijproducten niet te dumpen in stortplaatsen, maar eerder opnieuw te gaan gebruiken binnen de bouwsector worden elk van de drie gestelde problemen tot een zekere graad verholpen. Een gekend voorbeeld hiervan is hoogovenslak dat gebruikt wordt in hoogovencement. Hoogovenslak is een bijproduct van de productie van staal in de hoogovens van de metaalindustrie en vertoont puzzolane eigenschappen. Door een deel van het cement te vervangen door hoogovenslak, wordt dit niet gedumpt en wordt er minder Portlandcement gebruikt waardoor dus ook minder natuurlijke grondstoffen nodig zijn. Omdat de hoogovenslak enkel nog dient gemalen te worden in plaats van het calcinatieproces te doorlopen, wordt er voor de productie van hoogovencement ook veel minder energie verbruikt, waarbij ook de CO₂-uitstoot sterk wordt gereduceerd.

Recyclage is een goede zaak voor de producenten van afvalstoffen en bijproducten, voor de bouwsector en voor het milieu. De producenten hebben op die manier een afzetmarkt en vermijden de hoge kost voor het dumpen in stortplaatsen. De bouwsector kan de zeer dure natuurlijke grondstoffen vervangen door een goedkoper alternatief en het milieu vaart wel omdat er minder natuurlijke grondstoffen ontgonnen worden en de CO₂-uitstoot vermindert.

Nog een stapje verder in het hergebruiken van afvalstoffen is het principe van volledig recycleerbaar beton dat kadert binnen het 'Wieg tot wieg'-principe dat door McDonough et al. (2002) omschreven wordt als het ontwerpen van producten zodat ze op het einde van hun levensfase bij de ontmanteling

snel terug te brengen zijn tot delen die bestaan, tot materialen die biologisch afbreekbaar zijn of tot technische grondstoffen. Volledig recycleerbaar beton behoort tot de laatste categorie. In de ontwerpfase wordt dus al nagedacht over de recyclagetoepassing van het uiteindelijke afval. Hierbij wordt naar de chemische samenstelling van een grondstoffenmengsel voor de cementproductie gestreefd wanneer de chemische samenstelling van het beton bepaald wordt. Op die manier kan het beton op het einde van zijn levenscyclus als grondstof voor de cementproductie dienen.

IJzeroxide is één van de belangrijke oxides binnen de cementproductie, en dus worden er voor het volledig recycleerbaar beton grondstoffen gezocht die dit kunnen aanbrengen. Koperslak voldoet aan deze eis door zijn hoog gehalte aan ijzeroxide (ongeveer 50%) en het feit dat het tevens een bijproduct is dat op die manier een hoogwaardige toepassing vindt, is eveneens positief voor de totale milieu-impact van het volledig recycleerbaar beton. Dit onderzoek bestudeert de invloed van het gebruik van koperslak ter vervanging van cement of granulaten op de eigenschappen van beton. Het heeft immers geen zin om koperslak te gebruiken in het volledig recycleerbaar beton als het beton daardoor niet meer zou voldoen aan eisen in verband met druksterkte of duurzaamheid.

Koperslak ontstaat als bijproduct tijdens de productie van koper. De koperslak waarmee in dit onderzoek gewerkt wordt, wordt een secundaire slak genoemd omdat zij niet afkomstig is van het winnen van koper uit kopererts, maar van het winnen van koper uit afvalstoffen zoals afgedankte koperdraad van spoorleidingen. Door zijn samenstelling en eigenschappen is koperslak geschikt om als alternatief voor de natuurlijke grondstoffen te dienen in de betonsector. Het kan zelfs op drie verschillende manieren gebruikt worden. Telkens gaat het om een hoogwaardige toepassing, terwijl de toepassingen van koperslak tot hier toe eerder laagwaardig zijn, zoals in snijwerktuigen en als ballastlaag voor spoorwegen.

Ten eerste bevat koperslak zoals vermeld een hoog gehalte aan ijzer, waardoor het ijzererts kan vervangen in het calcinatieproces van cement. Bovendien heeft ijzererts de hoogste smelttemperatuur van alle grondstoffen voor de cementproductie. Bij het vervangen van dit ijzererts door koperslak, dat een lagere smelttemperatuur heeft, kan aldus de calcinatietemperatuur verlaagd worden waardoor de kostprijs voor de productie van het cement daalt zoals gesteld in Shi et al. (2008) door het verlagen van de benodigde hoeveelheid energie en de CO₂-uitstoot.

Ten tweede kan koperslak ook rechtstreeks gebruikt worden ter vervanging van cement. Koperslak vertoont immers puzzolane eigenschappen wanneer het fijn gemalen wordt. Dit betekent dat het kan reageren met Ca(OH)₂ tot vorming van calciumsilicaathydraat. Hiervoor is steeds een hoeveelheid cement nodig dat door hydratatie van C₃S en C₂S zorgt voor het aanmaken van Ca(OH)₂. Dit proces wordt Portlandactivatie genoemd. Een andere mogelijkheid is het toevoegen van Ca(OH)₂ van buitenaf, zodat geen Portland cement meer nodig is voor de hydratatie van de koperslak. Dit proces wordt alkali-activatie genoemd. Aangezien cement de duurste component is van beton, kan het gebruik van koperslak een serieuze besparing betekenen. Koperslak dient immers enkel nog te worden fijngemalen, terwijl voor de productie van cement het calcinatieproces doorlopen dient te worden. Volgens Shi et al. (2000) vraagt het fijnmalen van koperslak slechts ongeveer 10% van de energie nodig om Portland cement te maken. Dit betekent een serieuze winst aan energieverbruik en CO₂-uitstoot.

Een laatste toepassing van koperslak is ter vervanging van de granulaten in beton. Tot hiertoe worden vooral natuurlijke granulaten gebruikt in beton. Koperslak kan hiervoor een alternatief vormen. Het heeft een grotere samendrukbaarheid dan natuurlijke granulaten waardoor de sterkte van het beton

toeneemt en het zorgt met zijn scherpe randen tevens voor een betere cohesie van de betonmatrix. Door zijn glazig oppervlak en lage waterabsorptie zorgt koperslak echter ook voor een teveel aan vrij water in het beton, waarmee rekening dient gehouden te worden uit oogpunt van sterkte en duurzaamheid.

1.2. Doelstelling

Het grote probleem bij de aanwending van afvalstoffen en bijproducten is het wantrouwen tegenover hun efficiëntie. Natuurlijke grondstoffen worden al veel langer gebruikt en zorgen voor een sterk en duurzaam beton, waardoor niet snel overgeschakeld zal worden op andere producten waarvan het effect op de sterkte en de duurzaamheid van het beton niet goed gekend zijn.

In dit onderzoek wordt dan ook bestudeerd of koperslak kan dienen als alternatieve grondstof in de betonsector. Er wordt toegespitst op twee van de drie toepassingen vermeld in 1.1, met name het gebruik van koperslak ter vervanging van cement en het gebruik van koperslak ter vervanging van de granulaten.

Voor het gebruik van koperslak ter vervanging van cement wordt gebruik gemaakt van enerzijds cementpasta's en anderzijds mortelproefstukken. Bij beide wordt een oplopend percentage van het cement vervangen door gemalen koperslak. Op basis van isotherme calorimetrie wordt voor de cementpasta's bepaald welke invloed koperslak heeft op de hydratatie van de cementpasta. Van de mortelproefstukken wordt de druksterkte bepaald. Er wordt nagegaan hoe de puzzolane eigenschappen van koperslak tot uiting komen in de hydratatie en of ze een effect hebben op de druksterkte van de mortelproefstukken.

Voor het onderzoek naar koperslak ter vervanging van granulaten worden zowel mortelproefstukken als betonmengsels gebruikt. In de mortelproefstukken dient de koperslak als fijn granulaat, terwijl het in de betonmengsels enerzijds als fijn en anderzijds als grof granulaat dienst doet. Van de mortelproefstukken wordt enkel de druksterkte bepaald. Omdat alleen de druksterkte van beton met koperslak niet voldoende is om een oordeel te kunnen vellen over de aanwending ervan, worden voor de betonmengsels ook een hele reeks proeven uitgevoerd ter bepaling van de duurzaamheid. Zo wordt het beton onderzocht naar zijn porositeit, gaspermeabiliteit, weerstand tegen carbonatatie, weerstand tegen dooizouten, weerstand tegen de diffusie van chloriden en vorstbestendigheid. Voor elk van deze proeven wordt de slechtst mogelijke milieuklasse vooropgesteld volgens NBN EN 206-1 (2001) om te controleren of het beton voldoet aan de eisen opgesomd in NBN B 15-100 (2008).

Het hierna volgende hoofdstuk geeft een samenvatting van wat in de literatuur terug te vinden valt over de aanwending van koperslak tot hiertoe. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van alle materialen en methoden die in dit onderzoek gebruikt zijn terwijl in hoofdstuk 4 de resultaten van de proeven en een bespreking ervan kan teruggevonden worden. Hoofdstuk 5 sluit af met een conclusie van de resultaten uit dit onderzoek en er worden ook enkele voorstellen gedaan voor eventueel volgend onderzoek.

2. Literatuurstudie

2.1. Inleidende beschouwingen

2.1.1. Productie van koperslak

Zowel Arino et al. (1999), Shi en Qian (2000), Pavéz et al. (2004) als Shi, Meyer et al. (2008) geven een goede beschrijving van de productie van koperslak.

Koperslak ontstaat als een bijproduct bij het zuiveren van kopererts. Vroeger werd koper geproduceerd in hoogovens. Het kopergehalte in de slak was echter vrij hoog en het geproduceerde koper had nog veel nabewerking nodig. Tegenwoordig wordt de techniek van het mat smelten toegepast. In de smelt zitten vooral sulfiden en oxiden van ijzer en koper. Daarnaast is er ook SiO_2 , Al_2O_3 , CaO en MgO aanwezig. Tijdens dit proces worden twee vloeibare fases gecreëerd: onderaan de smelt het koperrijk mat (voornamelijk sulfiden) en bovenaan de slak (voornamelijk oxiden). Deze opsplitsing in twee fasen gebeurt vooral door de aanwezigheid van SiO_2 die een reactie aangaat met de oxiden tot sterk gebonden silicaat anionen die samenklitten en zo de slak vormen:



Het SiO_2 reageert niet met de sulfiden waardoor laatstgenoemde in het mat blijven. Ook het CaO en het Al_2O_3 worden toegevoegd om de slakstructuur te stabiliseren.

De vloeibare slakfase is lichter dan het koperrijk mat en drijft dus bovenaan waar het wordt verwijderd. Hierbij heeft de slak een temperatuur van 1000-1300°C. Het langzaam afkoelen van de slak zorgt voor een dicht, hard, kristallijn product, terwijl snelle afkoeling door afschrikken met water resulteert in gegranuleerde, amorfie slak. Bij Metallo-Chimique (het bedrijf waar de koperslak uit dit onderzoek vandaan komt) wordt vooral de laatste methode gehanteerd, hoewel ook het traag afkoelen wordt toegepast. Belangrijk om weten is dat de wijze waarop de slak wordt afgekoeld, een grote invloed heeft op zijn mineralogische en fysische eigenschappen. De amorfie koperslak heeft een hogere chemische stabiliteit dan de kristallijne vorm [Pavéz, Rojas et al. (2004)]. De koperslak wordt nadien dan gebroken of gemalen tot de gewenste korrelgrootte.

Op deze manier wordt per geproduceerde ton koper ongeveer 2,5 ton koperslak gemaakt. Een schatting door Gorai et al. (2003) becijferde een wereldwijde jaarlijkse productie van 24,6 miljoen ton koperslak met als koplopers de Verenigde Staten (4 miljoen ton per jaar) en Japan (2 miljoen ton per jaar) [Al-Jabri et al. (2011) en Najimi, Sobhani et al. (2011)].

De koperslak die in dit onderzoek gebruikt werd, is dus afkomstig van Metallo-Chimique uit Beerse. Dit is een secundaire koper-, lood-, tin- en nikkelproducent. Secundair betekent dat zij de metalen niet halen uit ertsen, maar wel uit afval zoals bijvoorbeeld koper uit afgedankte koperdraad van spoorleidingen. Naast koper, lood, tin en nikkel worden er ook eindslakken geproduceerd. De koperslakken worden gecommercialiseerd onder de merknaam Metamix, met een jaarlijkse productie van ongeveer 180.000 ton. De jaarlijkse productie in een opkomend industrieland als Brazilië bedraagt ongeveer 244.000 ton dus dit is niet verwaarloosbaar.

De eigenschappen van Metamix zijn hieronder terug te vinden in 2.1.2 hierna. Het gaat om gegranuleerde, amorfe koperslak. De eigenschappen van de koperslak gebruikt in de literatuur wijken hier steeds licht van af, maar de karakteristieken van Metamix worden weergegeven aangezien met dit materiaal gewerkt werd tijdens dit onderzoek.

In het specifieke geval van Metallo-Chimique zijn de grondstoffen afvalproducten zoals afgedankte koperdraad, stof uit de tinproductie, oude televisies en computers, radiatoren van auto's en dergelijke meer. In een eerste fase wordt volgens het eerder geschetste principe het koper teruggewonnen, in een latere fase worden het lood, nikkel en tin verwijderd. Zoals kan gezien worden in de chemische samenstelling van Metamix (2.1.2), is zink nog in grote mate aanwezig. Dat komt omdat het op dit moment nog niet rendabel is om het zink te verwijderen uit de slak. Er wordt binnen Metallo-Chimique echter naarstig gezocht naar nieuwe technologieën om ook dit metaal in de toekomst winstgevend te kunnen herwinnen.

2.1.2. Eigenschappen van koperslak

Zoals hiervoor al vermeld werd, worden de eigenschappen van Metamix gegeven, de koperslak van Metallo-Chimique, omdat hiermee gewerkt werd tijdens dit onderzoek. De informatie hieromtrent komt van Metallo-Chimique zelf en wordt met hun medeweten gepubliceerd.

Aangezien de koperslak bij Metallo-Chimique vanuit de oven naar een soort kuip gaat waar ze een krachtige waterstraal ontmoet, vormt zich een gegranuleerde, amorfe koperslak. Na malen tot de gewenste korrelgrootte ziet de slak er uit als kleine, ongelijkmatige, zwarte korreltjes zoals op Figuur 1.



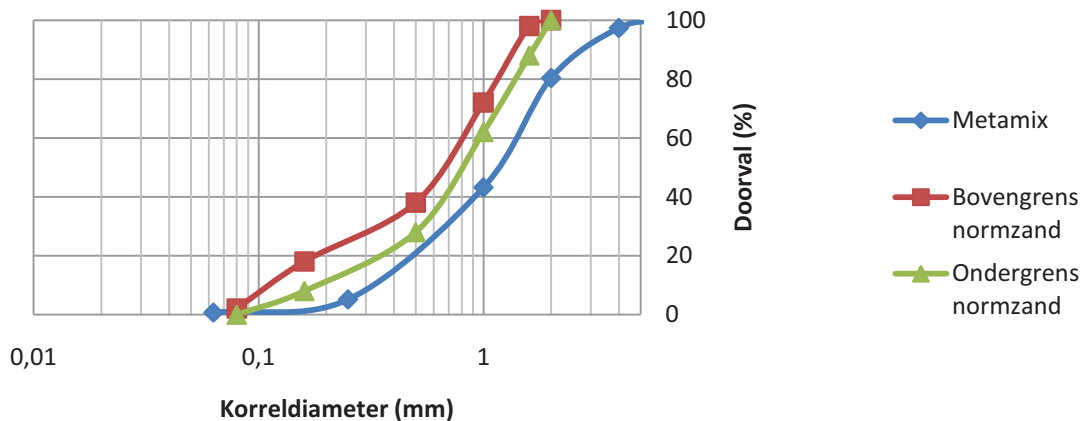
Figuur 1: Metamix: gegranuleerde, amorfe koperslak (bron: www.metallo.com)

De chemische samenstelling van de koperslak wordt weergegeven in Tabel 1. Deze samenstelling hangt volgens Shi, Meyer et al. (2008) ook af van het type oven, het metallurgisch proces en de samenstelling van de gebruikte grondstoffen.

Tabel 1: Chemische samenstelling van Metamix

Bestanddeel	Gehalte [%]
FeO	42-50
SiO ₂	25-32
CaO	1,5-5
MgO	0,2-1,5
Al ₂ O ₃	2-4
CuO	0,15-0,2
Pb	0,3-0,5
ZnO	3,5-9
SnO	< 0,1

Het korrelverdelingsdiagram van Metamix werd handmatig bepaald en wordt weergegeven in Figuur 2 samen met de boven- en ondergrens voor de korrelverdeling van het normzand gebruikt in de mortels tijdens dit onderzoek. Het normzand is overeenkomstig de norm EN 196-1.



Figuur 2: Korrelverdelingsdiagram van Metamix en het normzand

Figuur 2 leert dat Metamix niet binnen de grenzen van het normzand valt, maar lichtjes grover is. Het percentage koperslak kleiner dan 0,21mm zal nooit veel groter zijn dan 2%, aangezien het hele productieproces wordt afgezogen om op die manier de gassen en het fijn stof te verwijderen. Er dient ook opgemerkt te worden dat de korrelverdeling kan aangepast worden indien gewenst. Zo kan bijvoorbeeld ook Metamix verkregen worden met een grovere korrelverdeling, door de slak traag te laten afkoelen in grote vaten in plaats van af te schrikken met water, en nadien te breken tot de gewenste grootte.

De werkelijke dichtheid van Metamix bedraagt volgens Metallo Chimique ongeveer 3700 kg/m³ in vloeibare toestand wanneer het net uit de smelt komt. De dichtheid varieert nog met het ijzergehalte, maar is steeds groter dan die van natuurlijke granulaten en die van cement. Wanneer, zoals verder beschreven, de koperslak gebruikt wordt in de plaats van cement, fijne of grove granulaten, zal het beton of de mortel dus steeds een grotere dichtheid verkrijgen dan zonder vervanging. De schijnbare dichtheid van koperslak als korrels is ongeveer 2100 kg/m³. De absolute volumemassa van de koperslak wordt in 3.2.2.1 exact bepaald met behulp van een picnometrie.

De hardheid van Metamix is 7 Mohs, even hard als kwartszand. Het vochtgehalte bedraagt ongeveer 2%. Dit komt omdat de koperslak bij bewaring besproeid wordt met water om het stof neer te slaan. Het is dus wel belangrijk dat de koperslak gedroogd wordt alvorens het te gebruiken om geen foutieve W/C-factor te verkrijgen. De waterabsorptie is echter tamelijk laag: 0,13% voor kristallijne slak en iets hoger voor amorf slak. Het harde, kristallijne product heeft een lagere waterabsorptie dan de amorf koperslak omdat deze laatste een meer poreuze structuur heeft [Pavéz, Rojas et al. (2004) en Shi, Meyer et al. (2008)]. De waterabsorptie van zand (1,36%) is hoger dan die van koperslak, waardoor slak minder water vraagt dan zand in het betonmengsel (als slak gebruikt wordt in de plaats van zand). Zo zal het gehalte aan vrij water in de betonmatrix stijgen naarmate meer koperslak toegevoegd wordt en dus ook de verwerkbaarheid (zie 2.4.1).

Tot slot geeft Tabel 2 de mineralogie van Metamix weer. Het hoog percentage amorf fase is toe te schrijven aan het afschrikken met water. Het koper is bijna volledig uit de slak verdwenen, wat uiteraard ook de bedoeling is. Metamix is amorf koperslak, maar door de slak traag te laten afkoelen wordt kristallijne koperslak verkregen, waarbij de mineralogische samenstelling vooral bestaat uit Fe_3O_4 (magnetiet) en Fe_2SiO_4 (fayaliet) [Tixier et al. (1997) en Moura et al. (2007)].

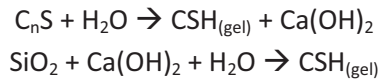
Tabel 2: Mineralogie van Metamix

Bestanddeel	Gehalte [%]
ZnO (zinkiet)	2,8
Cu (koper)	0,3
$\text{Mg}_{0,26}\text{Fe}_{1,74}(\text{SiO}_4)$	14,3
FeAl_2O_4	3,7
FeO (wustiet)	0,9
Geschatte amorf fase	78

Een laatste en belangrijke eigenschap van koperslak in het licht van dit onderzoek is dat het een puzzolaan materiaal is. De vier belangrijkste oxides in cement zijn (in dalende volgorde): CaO , SiO_2 , Al_2O_3 en Fe_2O_3 . Bij Portland cement is het gehalte aan vrije en gebonden kalk iets meer dan 60%, terwijl dit bij koperslak slechts ongeveer 6% bedraagt. Op zichzelf bekeken is koperslak dus niet reactief genoeg om het cement te vervangen, er zou een grote hoeveelheid kalk moeten toegevoegd worden om genoeg hydratatie te verkrijgen [Al-Jabri et al. (2006), Al-Jabri, Hisada et al. (2009a) en Al-Jabri, Al-Saidy et al. (2011)].

Anderzijds is de som van de gehalten aan CaO , SiO_2 en Fe_2O_3 groter dan 70%, wat Mobasher et al. (1996), Arino en Mobasher (1999), Pavéz, Rojas et al. (2004), Moura, Goncalves et al. (2007) en Al-Jabri, Hisada et al. (2009a) doet besluiten dat koperslak een puzzolaan materiaal is, volgens de respectievelijke normen ASTM 618-92a voor de eerste twee, NBR 12653 voor het derde, ASTM 618 C voor het vierde en ASTM C 618-99 voor het vijfde onderzoek. De tweede norm (NBR 12653) is een Braziliaanse, de andere zijn Amerikaanse normen (ASTM). Het zal dus voordeliger zijn om koperslak chemisch te activeren en zo zijn puzzolane reactie te vergroten [Al-Jabri, Taha et al. (2006)].

De puzzolane reactie wordt beschreven door Pavéz, Rojas et al. (2004). In een eerste fase reageren het C_2S en het C_3S in het Portland cement met water. Deze reactie produceert calciumsilicaathydraat (CSH) en calciumhydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Dit calciumhydroxide reageert in een tweede fase samen met water met het siliciumdioxide in de koperslak tot nog meer CSH. Schematisch:



Er moet wel worden opgemerkt dat de tweede reactie slechts in belangrijke mate doorgaat indien de koperslak fijn gemalen is. In grove toestand blijft de slak quasi inert. Dit is belangrijk in het licht van dit onderzoek aangezien koperslak enerzijds gebruikt werd als vervanger voor de granulaten en anderzijds als cementvervanger. Wanneer het gebruikt werd als vervanger voor de granulaten, werd er niet verwacht dat de koperslak meewerkte in de hydratatie, terwijl dit uiteraard wel verwacht werd wanneer de koperslak gebruikt werd in de plaats van cement.

Tot slot valt het op dat er voor de puzzolane reactie van koperslak steeds een hoeveelheid gewoon Portland cement dient aanwezig te zijn. Dit cement zorgt immers in de eerste fase voor de vorming van $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dat nodig is om in een tweede fase met de koperslak te reageren. Het valt dan ook te verwachten dat het volledig vervangen van het cement door gemalen koperslak, geen goede resultaten zal opleveren. Een mogelijke oplossing om dit te verhelpen is alkali-activatie; dit is het extern toevoegen van $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zodat de koperslak kan reageren, zelfs zonder de aanwezigheid van gewoon Portland cement.

2.1.3. Toepassingen van koperslak

In de laatste decennia zijn er door de enorme industriële en technologische ontwikkelingen, samen met de explosieve bevolkingsgroei, een pak meer afval en bijproducten geproduceerd. De basisstrategie in verband met afval is volgens Al-Jabri, Hisada et al. (2009a) het verminderen van de afvalproductie, het recycleren van bruikbaar materiaal of het gebruiken van afval als grondstof waar mogelijk. De steeds strengere milieuwetgevingen, de stijgende kost van afvalverwerking en een nijpend tekort aan stortplaatsen, zijn volgens Alp et al. (2008) een extra stimulans voor de ontwikkeling van nieuwe en goedkope afvalverwerking.

Ook de bouwsector produceert veel afvalstoffen. Samen met het grote verbruik aan natuurlijke grondstoffen en het immense energieverbruik veroorzaakt de sector daardoor veel schade aan het milieu. Anderzijds heeft net deze sector een veelbelovend potentieel om afvalstoffen te hergebruiken [Moura, Goncalves et al. (2007)].

De huidige toepassingen van koperslak zijn metaalherwinning, dakbedekking, snijwerktuigen, schuurwerktuigen, tegels, in de wegenbouw, als ballastlaag bij spoorwegen en in voetpaden uit asfalt [Al-Jabri, Taha et al. (2006), Shi, Meyer et al. (2008) en Khanzadi et al. (2009)]. Dit zijn allemaal laagwaardige toepassingen. Toepassingen zoals snijwerktuigen en schuurwerktuigen maken gebruik van de hoge hardheid van koperslak. Zo wordt in de zandstraalsector de koperslak verder gezeefd tot de gewenste korrelgrootte en dan aangewend.

Door zijn samenstelling en eigenschappen leent koperslak zich echter ook tot het gebruik in hoogwaardige toepassingen in de betonsector. Een eerste mogelijke toepassing is als grondstof voor de productie van cement. Koperslak bevat een hoog gehalte aan ijzer, en kan dus ijzerpoeder vervangen in het calcinatieproces. Daarnaast kan koperslak gebruikt worden ter vervanging van cement, want wanneer de koperslak fijn gemalen wordt, vertoont deze puzzolane eigenschappen zoals hiervoor werd aangetoond. Een derde toepassing is het vervangen van de fijne granulaten in mortel of beton door

koperslak. Dit kan omdat koperslak ongeveer dezelfde korrelverdeling heeft als zand zoals besproken bij de eigenschappen ervan. Wanneer de slak niet fijn gemalen is, zijn de puzzolane eigenschappen niet uitgesproken en blijft deze inert, zoals dat van granulaten verwacht wordt. Een laatste analoge toepassing is het gebruik van koperslak ter vervanging van grove granulaten zoals grind. De slak wordt dan op een andere manier geproduceerd (traag afkoelen in grote malen) zodat grover materiaal bekomen wordt. Het feit dat de granulaten meer dan 75% van het betonvolume uitmaken, maakt dat een serieuze besparing kan worden doorgevoerd door hiervoor afvalproducten zoals koperslak te gebruiken [Shi, Meyer et al. (2008)].

Bij al deze toepassingen gaat het om een win-winsituatie: de producenten van koper hebben een afzetmarkt voor de koperslak en zullen dus minder afval moeten dumpen (dure kost), terwijl de bouwsector goedkopere grondstoffen kan gebruiken dan de tot nu toe gebruikelijke natuurlijke grondstoffen [Mobasher, Devaguptapu et al. (1996), Tixier, Devaguptapu et al. (1997), Arino en Mobasher (1999), Shi en Qian (2000), Moura, Goncalves et al. (2007), Shi, Meyer et al. (2008) en Al-Jabri, Hisada et al. (2009a)]. Dit laatste is ook goed voor het milieu, want zonder degelijk alternatief voor de natuurlijke grondstoffen, zal de bouwsector na 2010 jaarlijks 8-12 miljard ton natuurlijke granulaten vragen volgens Tu, Chen et al. (2006) geciteerd in Al-Jabri, Hisada et al. (2009a) en Al-Jabri, Hisada et al. (2009b). Dit laatste betekent de vernietiging van het milieu. Het blijft echter hoe dan ook nodig om steeds een overweging te maken van alle beïnvloedende factoren. Zo kan het gebruik van koperslak toch duurder uitvallen op plaatsen waar dit niet aanwezig is en dus eerst nog moet aangevoerd worden [Shi en Qian (2000)].

Wat is nu de beste toepassing voor koperslak? In Najimi, Sobhani et al. (2011) wordt gesteld dat de sterkste groei in CO₂-uitstoot van de bouwsector komt. Binnen die sector is de cementproductie de grote slokop, met ongeveer 6360 MJ energie en 1 kubieke ton CO₂ per kubieke ton cement (geciteerd uit Pourkhorshidi, Najimi et al. (2010)). Wereldwijd wordt de cementproductie verantwoordelijk geacht voor 7% van de CO₂-uitstoot. Langs de andere kant is het van veel industrieel afval zoals vliegashuis, silica fume, hoogovenslak en koperslak geweten dat ze het cement in beton deels kunnen vervangen. Aangezien 92% van het energieverbruik voor het maken van beton gelinkt is aan cement, kent het gebruik van koperslak als cementvervanging beduidend meer prioriteit dan als granulaatvervanging. Op dezelfde manier werd het cement eerder ook al met succes (betere duurzaamheid) vervangen door koolstofvliegashuis, hoogovenslak en silica fume, drie andere bijproducten [Al-Jabri, Taha et al. (2006) en Al-Jabri, Hisada et al. (2009a)].

Ook Shi en Qian (2000) en Shi, Meyer et al. (2008) halen de zware kost van de cementproductie (veel energie nodig en grote CO₂-uitstoot) aan om te stellen dat het meest veelbelovende gebruik van koperslak het vervangen van cement is. Deze zware kost in de cementproductie is het gevolg van het malen van de grondstoffen, daarna het calcineren van de grondstoffen aan 1450°C, waarna de geproduceerde klinker opnieuw moet worden gemalen met toevoeging van gips. Tegenover deze kost staat dat de koperslak enkel nog fijn dient gemalen te worden om als puzzolaan materiaal te worden aangewend. Dit vraagt veel minder energie, in de orde van 10% van de energie nodig om Portland cement te maken [Shi en Qian (2000)]. Het in rekening brengen van de energie nodig voor het produceren van de koperslak is niet relevant want er wordt van uit gegaan dat dit een afvalproduct is bij de productie van koper en niet speciaal geproduceerd wordt om te worden gebruikt in de bouwsector. De eventuele transportkosten moeten zoals al gezegd eventueel wel in rekening worden gebracht.

Bij Metallo-Chimique wordt zo'n 70% van de geproduceerde koperslak aangewend in gestabiliseerd zand en 10% gaat naar de zandstraalindustrie. De rest wordt gelijk verdeeld tussen de constructie van Giant-Blocks (snelbouw betonblokken) en als ijzerbron voor de cementproductie. Dit zijn beiden vormgegeven toepassingen en dat is ook wat de voorkeur geniet van de Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij (kortweg OVAM). Het gebruik van koperslak als grindsuïstituut is een van de toekomstplannen bij Metallo-Chimique.

2.2. Het gebruik van koperslak in de cementproductie

De verschillende grondstoffen bij de productie van Portland klinker zijn kalk (CaO), kiezelaaide (SiO_2), aluinaaide (Al_2O_3) en ijzeroxide (Fe_2O_3). Aangezien koperslak voor bijna de helft of meer dan de helft uit ijzeroxide bestaat, kan slak dienen als alternatieve grondstof in de cementproductie, in de plaats van ijzererts. Bovendien heeft ijzererts de hoogste smelttemperatuur van alle grondstoffen voor de cementproductie. Bij het vervangen van dit ijzererts door koperslak, dat een lagere smelttemperatuur heeft, kan aldus de calcinatietemperatuur verlaagd worden waardoor de kostprijs voor de productie van het cement daalt zoals gesteld in Shi, Meyer et al. (2008).

Alp, Deveci et al. (2008) hebben het gebruik van koperslak als alternatieve grondstof in de cementproductie onderzocht. De resultaten toonden aan dat de geproduceerde klinker dezelfde chemische samenstelling vertoonde als gewone Portlandklinker. Die chemische samenstelling heeft een belangrijke invloed op de fysische en mechanische eigenschappen van het resulterend cement. Het is dan ook niet verwonderlijk dat de druksterkte van mortels gefabriceerd met cement op basis van koperslak ongeveer dezelfde waarde vertoonde als die van mortels op basis van Portland cement ($47,6 \pm 7,5$ MPa tegenover $45,5 \pm 1,7$ MPa op 28 dagen ouderdom). De mortels met cement op basis van koperslak kenden dus een sterkte die te vergelijken is met mortels gemaakt met CEM I 42,5N of 32,5N. Het gebruik van cement op basis van koperslak zorgde wel voor een verhoogde bindingstijd.

Verder was de uitloging van metalen uit de mortels gemaakt met cement op basis van koperslak beneden de vooropgestelde limiet, in dit geval USEPA SW-846 (United States Environmental Protection Agency), terwijl de koperslak op zichzelf wel zware metalen bevatte die als een bron van vervuiling van grond en water kon aanzien worden in de omgeving van stortplaatsen.

Uit deze bevindingen kan afgeleid worden dat het gebruik van koperslak als grondstof voor de cementproductie zonder meer mogelijk is. Er van uit gaande dat voor de productie van 10 ton cement ongeveer 1 ton ijzererts nodig is, en gezien de snelle leegloop van natuurlijke grondstoffen, heeft deze toepassing dus een zeer groot potentieel door de beschikbaarheid van koperslak en de lage kost.

2.3. Het gebruik van koperslak ter vervanging van cement

Naar het (gedeeltelijk) vervangen van cement door gemalen koperslak is al heel wat onderzoek uitgevoerd. Om het overzicht te behouden wordt de invloed van koperslak als cementvervanging achtereenvolgens besproken in cementpasta, mortels en beton. Er wordt eerst gestart met een paar algemene zaken.

2.3.1. Algemeen

Zowel Mobasher, Devaguptapu et al. (1996) als Shi en Qian (2000) vermelden dat de initiële en finale bindingstijd werden uitgesteld bij het gedeeltelijk vervangen van cement door gemalen koperslak (in de orde van 15% vervanging). Dit is typisch voor puzzolane materialen omdat deze materialen pas in een latere fase verder reageren met Ca(OH)_2 dat in een eerste fase van de hydratatie gevormd wordt. Het toevoegen van activatoren zoals gebluste kalk reduceerde de bindingstijd opnieuw door de hydratatie te bevorderen. Zoals al vermeld bij de eigenschappen van koperslak, stijgt de reactiviteit naarmate de slak fijner gemalen is, wat teruggevonden werd in Pavéz, Rojas et al. (2004).

Het gedeeltelijk vervangen zorgde volgens Shi en Qian (2000) verder voor een lagere initiële sterkte dan met 100% Portland cement, een resultaat dat ook door Malhotra (1987), geciteerd in dat onderzoek, gevonden werd. De uiteindelijke sterkte lag echter hoger en er was een niet nader gespecificeerde verbetering van de microstructuur en de duurzaamheid van verhard cement en beton.

Zain et al. (2004), Sanchez de Rojas et al. (2004) en Alter (2005), alle drie geciteerd in Shi, Meyer et al. (2008), onderzochten de uitloging van zware metalen uit mortel en beton gemaakt met gedeeltelijke vervanging van cement door gemalen koperslak (in de orde van 10% vervanging). Net als bij het gebruik van koperslak in de cementproductie, werd vastgesteld dat de uitloging van zware metalen in mortels en beton gemaakt met gedeeltelijke vervanging van het cement door gemalen koperslak, onder de limieten lag opgesteld door het United States Environmental Protection Agency (USEPA). Zulke rapporten hebben de Verenigde Naties ertoe aangezet om tijdens de Basel Convention on the Transboundary Movement of Hazardous Wastes and their Disposal koperslak te klasseren als niet-gevaarlijk afval.

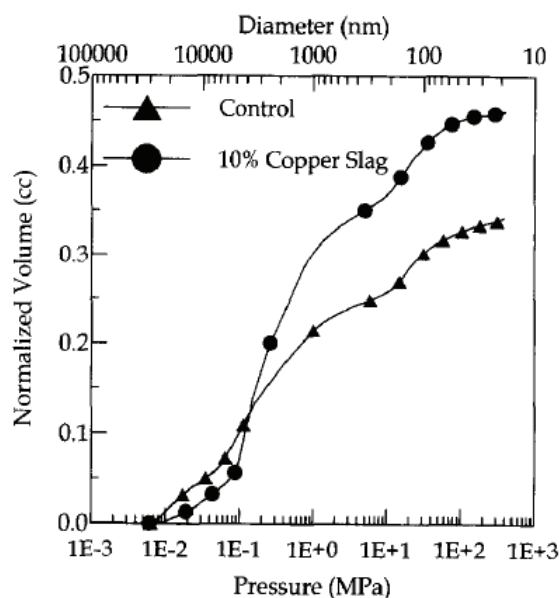
Samenvattend zorgt het gedeeltelijk vervangen van cement door gemalen koperslak in het algemeen voor het uitstellen van de initiële en de finale bindingstijd, een lagere initiële maar hogere finale sterkte en geen uitloging van zware metalen uit mortels of beton gemaakt met gemalen koperslak. Een toepassing van het uitstellen van de bindingstijd kan volgens Pavéz, Rojas et al. (2004) bijvoorbeeld in zeer warme streken zijn, waar een trage binding gevraagd wordt. In deze gebieden is de omgevingstemperatuur soms te hoog waardoor het beton te snel hard wordt. Hier kan het gebruik van koperslak een oplossing bieden.

2.3.2. Koperslak als cementvervanger in cementpasta

Zowel Mobasher, Devaguptapu et al. (1996) als Tixier, Devaguptapu et al. (1997) onderzochten specifiek de invloed van het gedeeltelijk vervangen van cement door gemalen koperslak in cementpasta. Er werden, naast een controlepasta met 100% cement, twee andere pasta's gemaakt: een eerste met 10%

gemalen koperslak om de invloed op de porositeit te bekijken en een tweede met 15% gemalen koperslak om de invloed op de hydratatie te beschouwen.

De porositeit van de pasta's werd gemeten door kwikporosimetrie. De grafiek van het ingedrongen volume versus de uitgeoefende druk is terug te vinden in Figuur 3. De uitgeoefende druk relateert met de grootte van de poriën aangezien voor het indringen in steeds kleinere poriën een steeds grotere druk nodig is.

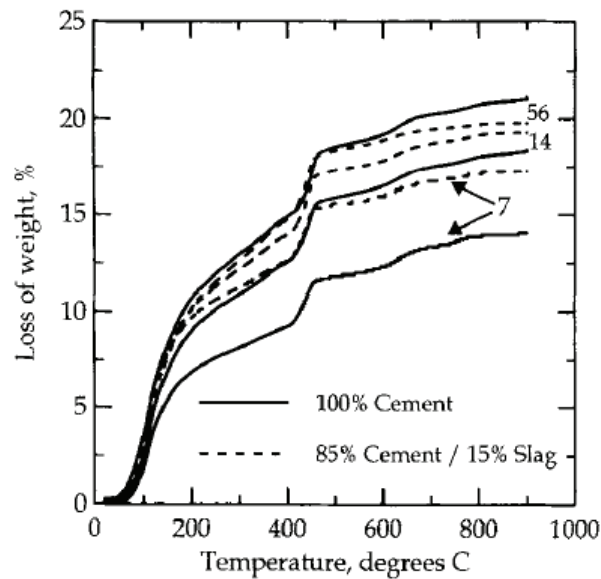


Figuur 3: Het ingedrongen volume kwik versus de uitgeoefende druk (uit Tixier, Devaguptapu et al. (1997))

Het is duidelijk uit Figuur 3 dat de totale porositeit groter was in de pasta met 10% koperslak dan in de controlepasta. Dit werd onder andere toegeschreven aan een lagere hydratatiegraad. De capillaire porositeit slaat in dit onderzoek op de holtes groter dan 10 micron (10000 nm), terwijl de gelporositeit doelt op de holtes kleiner dan 500 nm. Een vergelijking leert dat de pasta met koperslak een grotere gelporositeit en een kleinere capillaire porositeit vertoonde in vergelijking met de controlepasta. De afname in capillaire porositeit kon worden toegeschreven aan de grootte van de slakdeeltjes en hun rol in het verdichten van de microstructuur.

Voor het bestuderen van de hydratatie werd gebruik gemaakt van een pasta met 15% gemalen koperslak in plaats van cement en een controlepasta met 100% cement, waarbij op beide stalen een semikwantitatieve X-straal diffractie en een thermogravimetrische analyse werd toegepast. Met de eerste techniek werden geen significante verschillen opgemerkt in de vorming van de hydratatieproducten tussen de twee pasta's. Het gebruik van de thermogravimetrische analyse toonde echter wel een verschil. Op 14 dagen ouderdom vertoonden de pasta's met 15% gemalen koperslak meer hydratatieproducten dan de controlepasta, na 56 dagen was dit omgekeerd. Dit duidde er op dat het hydratatieproces in de pasta met koperslak kon doorgaan aan een lagere snelheid dan in de controlepasta, maar hoe dan ook leek de hydratatie niet nadelig beïnvloed te worden door de aanwezigheid van koperslak. De resultaten van de thermogravimetrische analyse worden weergegeven in Figuur 4 als het percentage gewichtsverlies versus de temperatuur. Het gewichtsverlies tussen 105°C en 900°C werd gebruikt als indicator voor de hoeveelheid gebonden water. Hoe groter het verlies, hoe

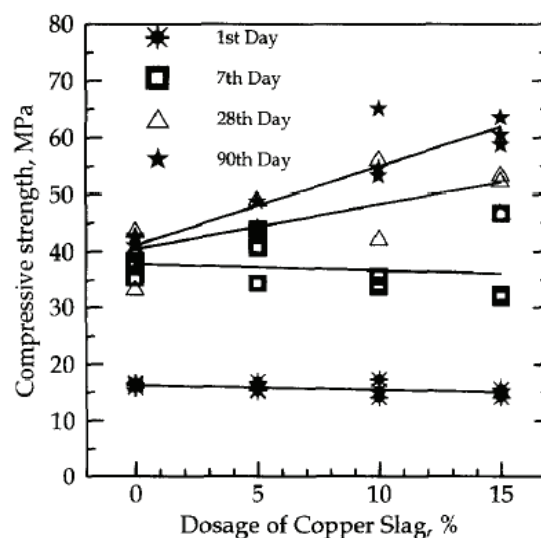
meer gebonden water en dus hoe meer hydratatieproduct. Het is duidelijk te zien dat de verhouding na 14 dagen omgekeerd was ten opzichte van die na 56 dagen.



Figuur 4: Thermogravimetrische analyse op 7, 14 en 56 dagen ouderdom (uit Tixier, Devaguptapu et al. (1997))

2.3.3. Koperslak als cementvervanger in mortel

Naast onderzoek in verband met gemalen koperslak als gedeeltelijke vervanging voor cement in pasta, voerden Mobasher, Devaguptapu et al. (1996) en Tixier, Devaguptapu et al. (1997) ook onderzoek uit naar hetzelfde gebruik maar dan in mortels met een verhouding fijne granulaten tot cement van 2/1 bij een W/C-factor van 0,29. Beide onderzoeken beproefden mortelproefstukken met 5, 10 en 15% koperslak in plaats van cement op 1, 7, 28 en 90 dagen ouderdom. De resultaten voor de druksterkte zijn weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5: Sterkteontwikkeling in mortels met koperslak als cementvervanger in functie van de leeftijd en de dosering (uit Mobasher, Devaguptapu et al. (1996) en Tixier, Devaguptapu et al. (1997))

Figuur 5 toont aan dat er met het gebruik van koperslak weinig verschil in de initiële sterkte was (1 en 7 dagen oud), maar na 28 dagen waren de proefstukken met koperslak significant sterker dan de controleproefstukken en ze bleven dit ook tot 90 dagen. Omdat in de aanwezigheid van koperslak slechts een minieme hoeveelheid hydratatieproducten extra wordt gemaakt, werd de sterkte toename toegeschreven aan de verdichting van de microstructuur in de capillaire porositeit. Het is ook mogelijk dat de puzzolane eigenschappen van de koperslak zorgden voor een betere performantie van de mortels. Deze resultaten bevestigen de conclusie uit 2.3.1, met name dat de toevoeging van koperslak zorgt voor een lagere initiële en hogere uiteindelijke sterkte.

Het onderzoek van Arino en Mobasher (1999) beschreef dezelfde resultaten wat betreft de druksterkte, maar toonde verder ook aan dat het toevoegen van koperslak zorgde voor een verhoogde brosheid. Er werd gebruik gemaakt van een W/C-factor van 0,4 en 0,5 bij een verhouding van de fijne granulaten tot het cement van 2/1.

De verhoogde brosheid werd aangetoond bij 10% vervanging, maar kan veralgemeend worden want een verhoogde brosheid is kenmerkend voor hoge sterkte materialen. Door de verdichting van de microstructuur vergroot de sterkte van de interface namelijk tot het niveau van de aggregaten en de mortel. Hierdoor zullen scheuren niet langer het bochtige parcours langsheen de interfaces volgen en het materiaal brosser maken. De controleproefstukken waren ook een pak ductieler dan deze met koperslak en konden dus meer energie absorberen.

Nog in Arino en Mobasher (1999) werd het effect onderzocht van de W/C-factor op de sterkte. Zowel bij een waarde van 0,4 als een waarde van 0,5 bleef de sterkte van de mortelproefstukken met koperslak stijgen met de leeftijd en dit op dezelfde manier als voor de controleproefstukken zonder koperslak. Uiteraard was de sterkte bij een waarde van 0,4 hoger dan bij een waarde van 0,5. Een opmerkelijk resultaat was de invloed van deze waarde op de sterkteontwikkeling op jonge leeftijd. Waar na 2 maanden bij een waarde van 0,4 een grotere sterkte gevonden werd in de proefstukken met koperslak ten opzichte van de controleproefstukken, was dit bij een waarde van 0,5 net omgekeerd. Op latere leeftijd waren ook laatstgenoemde proefstukken sterker dan de proefstukken zonder koperslak. Als de vroege druksterkte dus geen doel op zich is, vormt een iets hogere W/C-factor geen probleem.

Door het eerder aangehaalde brosse gedrag bij toevoeging van koperslak, valt het niet te verwachten dat de stijging in de druksterkte zich voortzet in de buigtreksterkte en het breukgedrag, wat ook aangetoond werd door Arino en Mobasher (1999).

2.3.4. Koperslak als cementvervanger in beton

Al-Jabri, Taha et al. (2006) onderzocht het effect van het vervangen van cement door gemalen koperslak in beton. Hiervoor werden 3 mengsels gemaakt: een controlemengsel met 100% cement, een mengsel met 5% koperslak in plaats van cement en een derde mengsel waarbij 15% van het cement vervangen werd door 13,5% koperslak en 1,5% cementstof als activator. Cementstof is een bijproduct van het calcinatieproces bij de productie van cement. Het heeft een hogere fijnheid dan cement zelf maar heeft ook een hogere W/C-factor nodig om dezelfde verwerkbaarheid te verkrijgen. Drie W/C-factors werden onderzocht: 0,5; 0,6 en 0,7.

Over het algemeen had de toevoeging van koperslak een verwaarloosbaar effect op het spannings-
vervormingsgedrag of dus op de elasticiteitsmodulus van beton, zeker bij een lage W/C-factor. Het
gedrag was ongeveer gelijk voor de drie mengsels. Voor eenzelfde mengsel had het verhogen van de
W/C-factor wel een beduidend negatief effect, wat kon worden uitgelegd door het groter aantal poriën
in de betonpasta omwille van de grotere hoeveelheid aanwezig water.

Wat betreft de druksterkte na 28 dagen gaf het vervangen van 5% cement door koperslak een
verwaarloosbaar negatief effect. Het derde mengsel met 13,5% koperslak en 1,5% cementstof kende
dan weer een aanzienlijke daling van de druksterkte in vergelijking met het referentieproefstuk. Voor
een korte uithardingstijd van 28 dagen had het cementstof als activator dus geen effect op het verhogen
van de druksterkte. De splijttreksterkte en buigtreksterkte kenden een analoog verloop; dit is logisch
want beide kunnen door empirische formules uit de druksterkte worden afgeleid.

Deze resultaten zijn tegengesteld aan wat in de literatuur beschreven staat voor de vervanging van
cement door gemalen koperslak in mortels, zoals in 2.3.3 beschreven. Al-Jabri, Taha et al. (2006)
proberen dit verschil te verklaren door de betere binding in de cementpasta bij mortels dan bij beton.
Ook het toevoegen van grove granulaten kan een invloed hebben.

Moura, Goncalves et al. (2007) onderzocht naast de invloed van koperslak op de mechanische
karakteristieken, ook de invloed op de duurzaamheid van het gefabriceerde beton. Een belangrijk
verschil met alle voorgaande onderzoeken is dat hier geen cement werd vervangen door koperslak,
maar gewoon gemalen koperslak werd toegevoegd bij de andere bestanddelen van het beton, ter
waarde van 20% van het cementgewicht.

In tegenstelling tot de resultaten gevonden in Al-Jabri, Taha et al. (2006), was de druksterkte van het
beton met koperslak na 28 dagen groter dan bij het controlebeton zonder koperslak, waarbij de
verhoging sterker was bij hogere W/C-factor. Net zoals in Mobasher, Devaguptapu et al. (1996) en
Tixier, Devaguptapu et al. (1997) bij mortels, werd de verhoogde sterkte hier toegeschreven aan de
verdichting van de microstructuur in de capillaire porositeit en de puzzolane werking van de koperslak.
Een mogelijke verklaring voor het verschil met Al-Jabri, Taha et al. (2006) is dat de koperslak in Moura,
Goncalves et al. (2007) werd toegevoegd zonder cement te vervangen. Daardoor zal er meer hydratatie
optreden en zal de puzzolane koperslak meer $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ter beschikking hebben om in een tweede fase
verder mee te reageren tot vorming van extra calciumsilicaathydraat. Koperslak kon in dit onderzoek
dus beschouwd worden als een extra bindmiddel.

Wat betreft duurzaamheid, werd in Moura, Goncalves et al. (2007) de porositeit en de carbonatatie
opgemeten van beton met koperslak in vergelijking met controlebeton. De porositeit werd gemeten
door waterabsorptie, voor de CO_2 -indringing werd gebruik gemaakt van een carbonatatiekast met 5%
 CO_2 en de proefstukken werden opgemeten na 180, 210 en 240 dagen. Net zoals bij de pasta in 2.3.2
verkleinde het aantal grote poriën en vergrootte het aantal kleine. Opmerkelijk is wel dat melding
gemaakt werd van een verlaging van de totale porositeit, terwijl dit bij de pasta net een verhoging
inhiel. Nochtans werd de invloed op de porositeit ook in dit onderzoek verklaard door het vuleffect van
de slakdeeltjes in de microstructuur en eventueel hun puzzolaan effect die zorgen voor een dichtere
betonmatrix. De carbonatatediepte verlaagde wanneer koperslak werd toegevoegd aan het beton. De
verklaring die hiervoor werd gegeven, was de lagere doorlatendheid omwille van de dichtere structuur.

Zonder er in detail op in te gaan, is tot slot een vermelding van het onderzoek door Najimi, Sobhani et al. (2011) de moeite waard. In dit onderzoek werd cement vervangen door gemalen koperslak (tot 15% vervanging) waarna het geproduceerde beton werd blootgesteld aan een sulfaatoplossing. Door de dichtere structuur van het beton met koperslak, kende dit een hogere druksterkte en een betere duurzaamheid in aanwezigheid van de sulfaatoplossing. Dit kan van groot belang zijn voor omgevingen blootgesteld aan sulfaten zoals pieren, bruggen, funderingen en ondergrondse betonnen leidingen.

2.4. Het gebruik van koperslak als granulaat

De granulaten vormen een belangrijke component in het beton, aangezien zij meer dan 75% van het volume uitmaken. In sommige landen is er schaarste aan natuurlijke granulaten terwijl in andere landen de vraag ernaar sterk stijgt. Een oplossing hiervoor is het gebruiken van artificiële granulaten of artificiële granulaten gemaakt van afvalmateriaal. Zoals al vermeld in 2.1.3 zal, zonder degelijk alternatief, de bouwsector na 2010 jaarlijks 8-12 miljard ton natuurlijke granulaten vragen volgens Tu, Chen et al. (2006) geciteerd in Al-Jabri, Hisada et al. (2009a) en Al-Jabri, Hisada et al. (2009b). Dit betekent de vernietiging van het milieu en duidt op de noodzaak om alternatieven te vinden.

Koperslak is een van die mogelijke alternatieven. Het is inert wanneer het niet fijn gemalen is, heeft een hardheid zoals kwartszand en de korrelverdeling is slechts iets grover dan die van normzand. Een toepassing als fijn granulaat ligt dan ook voor de hand. Ook als grof granulaat kan koperslak dienst doen. Zoals al gezegd in 2.1.2, dient daarvoor een licht verschillend productieproces te worden doorlopen: de slak wordt traag afgekoeld in grote mallen, en nadien tot de gewenste korrelgrootte gebroken.

Het gebruik van koperslak als granulaat heeft echter ook een paar nadelen. Zo zal de bindingstijd, net als bij het gebruik van koperslak ter vervanging voor cement, uitgesteld worden, zowel de initiële als de finale [Shi, Meyer et al. (2008)]. Een ander en belangrijker nadeel is het gevaar voor bleeding. Dit is het naar beneden zakken van de zwaardere deeltjes bij vers gegoten beton, terwijl het water zich een weg naar boven zoekt. Bij overmatige bleeding komt er vorming van waterkanaaltjes, waterzakjes onder de granulaten, een verhoogde W/C-factor bovenaan het beton en uiteindelijk de vorming van een zwakke toplaag. Dit alles leidt tot een zwakker beton. Het groter soortelijk gewicht van de koperslak in vergelijking met natuurlijke granulaten, de kleinere poreusheid, de lagere waterabsorptie en het glazig oppervlak zijn karakteristieken die bleeding in de hand werken [Shi, Meyer et al. (2008)]. De drie laatste eigenschappen zorgen er voor dat er meer vrij water overblijft in het beton na de absorptie en de hydratatie dan wanneer natuurlijke granulaten worden aangewend.

Langs de andere kant kan dit laatste ook als een voordeel uitgespeeld worden. Koperslak slurpt minder water op dan natuurlijke granulaten, waardoor bij eenzelfde W/C-factor een betere verwerkbaarheid van het beton verkregen wordt door meer vrij water, of waardoor een lagere W/C-factor kan aangewend worden bij gelijkblijvende verwerkbaarheid. Dit kan van groot belang zijn bijvoorbeeld in regio's met waterschaarste. Bij het aanwenden van koperslak als granulaat moet dus steeds gekeken worden naar de invloed ervan op het overvloedige vrije water. Meer koperslak geeft een betere verwerkbaarheid, maar teveel zorgt voor bleeding en segregatie [Shi, Meyer et al. (2008), Al-Jabri, Hisada et al. (2009a), Wu et al. (2010a), Wu et al. (2010b) en Al-Jabri, Al-Saidy et al. (2011)].

Het onderzoek naar koperslak als gedeeltelijke vervanging voor de granulaten werd tot hiertoe vooral toegespitst op de fijne granulaten.

2.4.1. Het gebruik van koperslak als fijn granulaat

Al-Jabri, Hisada et al. (2009a), Al-Jabri, Hisada et al. (2009b), Wu, Zhang et al. (2010a) en Wu, Zhang et al. (2010b) onderzochten het gebruik van koperslak als fijn granulaat in hoog performant beton, Al-Jabri, Al-Saidy et al. (2011) onderzocht de invloed in gewone mortels en beton.

Hoog performant beton kan verschillende taken hebben zoals een hogere verwerkbaarheid, betere mechanische eigenschappen en/of een grotere duurzaamheid dan normaal beton. Als alleen cement als bindmiddel gebruikt wordt, is meestal veel pasta nodig in het volume van het beton, wat vaak leidt tot grote krimp en veel hydratatiewarmte, naast de verhoogde kost. Het gedeeltelijk vervangen van cement door toevoegsels zoals vliegashuis, silica fume en hoogovenslak kan deze problemen helpen overwinnen en de duurzaamheid van het beton verhogen. Er wordt meestal microsilica toegevoegd om een hogere sterkte te verkrijgen en superplast voor een betere verwerkbaarheid aangezien hoog performant beton een lage W/C-factor heeft. Dat superplast echt nodig is, blijkt uit Al-Jabri, Hisada et al. (2009b) waar het weglaten ervan desastreuze gevolgen had voor de sterkte en duurzaamheid van het beton door droogheid en segregatie. De normen voor hoog performant beton veranderen wel continu aangezien steeds makkelijker sterker en beter verwerkbaar beton kan gemaakt worden.

Zoals al aangehaald in het begin van dit stuk over het gebruik van koperslak als granulaat, geeft het toevoegen van koperslak de keuze tussen een betere verwerkbaarheid bij dezelfde W/C-factor, of een lagere W/C-factor bij gelijkblijvende verwerkbaarheid. Al-Jabri, Hisada et al. (2009a), Wu, Zhang et al. (2010a) en Wu, Zhang et al. (2010b) kozen ervoor om vast te houden aan dezelfde W/C-factor. Alle drie de onderzoeken stelden dan ook een stijging van de verwerkbaarheid vast naarmate meer koperslak gebruikt werd als fijn granulaat.

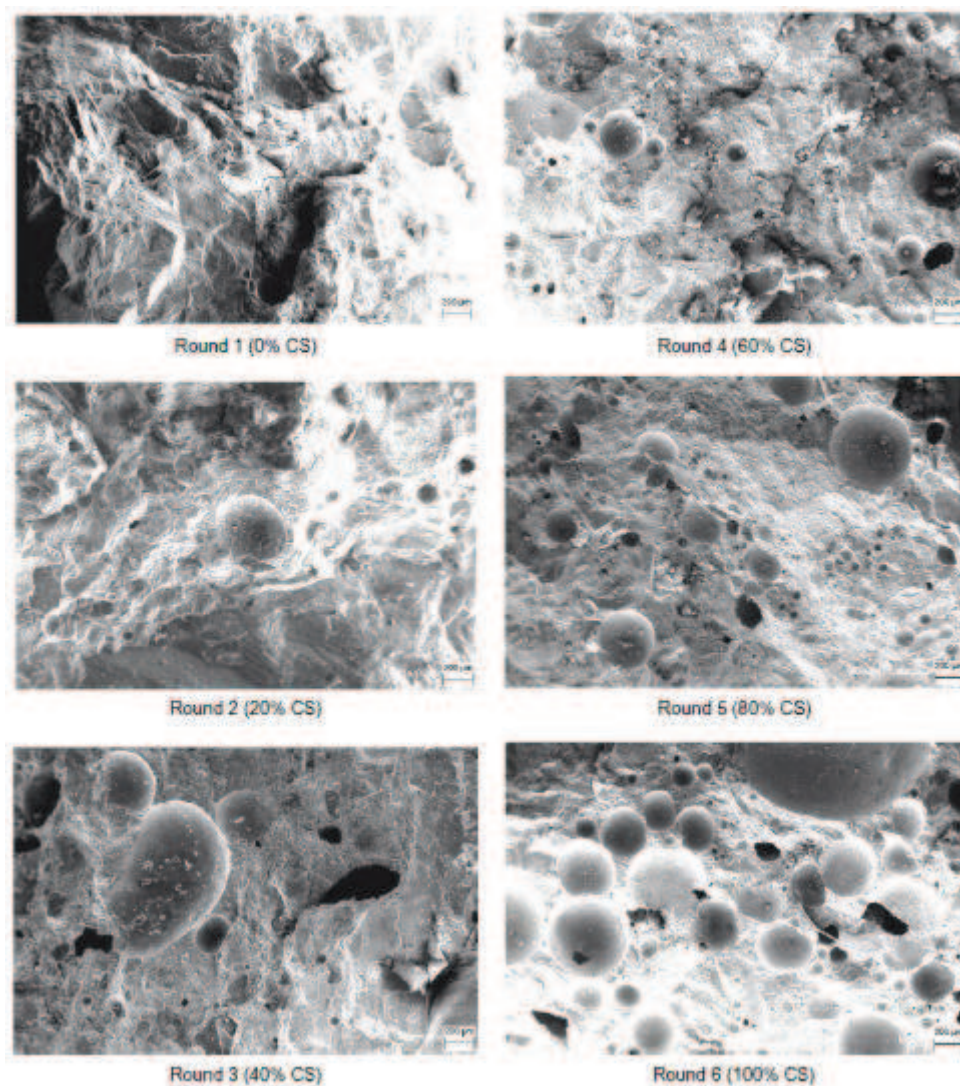
Al-Jabri, Hisada et al. (2009a) vond verder dat de druksterkte van beton met koperslak hoger was dan in het referentiebeton zonder koperslak tot en met 50% vervanging van het zand door koperslak, daarna ging de sterkte opnieuw omlaag. De afname in sterkte kwam er omdat meer en meer vrij water aanwezig was naarmate meer zand vervangen werd door koperslak. Dit vrije water zorgde voor poriën in het verhard beton wat een verlaging van de sterkte betekende. Opnieuw vertoonden de splijttreksterkte en de buigtreksterkte eenzelfde patroon aangezien zij door empirische formules uit de druksterkte kunnen berekend worden.

De duurzaamheid van het beton met koperslak werd onderzocht door het meten van de absorptie van oppervlaktewater. Tot en met 40% vervanging van zand door koperslak, daalde deze absorptie in vergelijking met referentiebeton. Dit betekende dat de microstructuur van het beton met koperslak verdichtte. Bij meer dan 40% vervanging steeg de absorptie opnieuw.

Het onderzoek door Wu, Zhang et al. (2010a) bestudeerde de invloed van koperslak als fijn granulaat op de dynamische druksterkte, aanvullend op de statische druksterkte onderzocht door Al-Jabri, Hisada et al. (2009a). De dynamische druksterkte was tot en met 40% vervanging hoger of ongeveer gelijk aan die van het beton zonder koperslak. De verklaring die hiervoor gegeven werd, is tweeledig. Enerzijds heeft koperslak een grotere samendrukbaarheid dan zand, en wanneer de belasting heel kort is zoals bij dynamische belasting, wordt de kracht opgevangen door de granulen op basis van die samendrukbaarheid. Anderzijds zorgen de scherpe randen van de koperslak voor een betere cohesie van de cementmatrix. Natuurlijk zand heeft na jaren van verwerking afgeronde hoeken en dat is zeer nadelig

voor de cohesie. Koperslak kan tot op zekere hoogte dit gebrek opvangen en de cohesie van het beton verhogen.

De laatste verklaring geldt echter alleen wanneer maximaal 40% van het zand vervangen wordt door koperslak (het zand blijft dus dominant als fijn granulaat). Bij grotere hoeveelheden slak, zorgen het glazig oppervlak en de kleinere waterabsorptie ervan voor meer vrij water in het beton en dus meer bleeding. Dit zorgt dan weer voor meer poriën en wijdere capillaire kanalen, die de cohesie en dus de kwaliteit van het beton drastisch verlagen. Dit alles werd ook expliciet aangetoond door de microstructuur van beton met koperslak als fijn granulaat te onderzoeken door middel van Scanning Electron Microscopy (SEM). Vanaf meer dan 40% vervanging waren de microscheuren en wijdere capillaire kanalen goed zichtbaar. Een indruk hiervan wordt gegeven door Figuur 6.



Figuur 6: SEM van het beton met koperslak (CS) als fijn granulaat bij verschillende vervangingspercentages (uit Wu, Zhang et al. (2010b))

Op basis van deze beschouwingen concludeerden zowel Al-Jabri, Hisada et al. (2009a) als Wu, Zhang et al. (2010a) dat 40% vervanging van de fijne granulaten door koperslak ideaal is. Hogere vervangingspercentages leveren zwakker en minder duurzaam beton op in vergelijking met het referentiebeton zonder koperslak.

Het onderzoek door Wu, Zhang et al. (2010b) sluit qua resultaten volledig aan bij Al-Jabri, Hisada et al. (2009a) en Wu, Zhang et al. (2010a) wat betreft de dynamische druksterkte en de microscopische analyse door SEM. Tot en met 40% vervanging was de dynamische druksterkte van het beton met koperslak minstens even groot als dat van het referentiebeton. Het was ook opnieuw vanaf meer dan 40% vervanging dat via SEM teveel poriën, microscheuren en capillaire kanalen gezien werden die de schade aan het beton versnelden tijdens het belasten.

Het enige afwijkende resultaat betreft de statische druksterkte. Deze was bij alle vervangingspercentages lager dan in het referentiebeton, terwijl deze bij Al-Jabri, Hisada et al. (2009a) groter was bij de lagere vervangingspercentages. De auteurs zagen twee mogelijke verklaringen voor deze discrepantie. Enerzijds had de gebruikte koperslak een verschillende chemische samenstelling, en zoals gezien in 2.1.2, is deze van doorslaggevend belang voor de fysische eigenschappen ervan. Een andere mogelijke verklaring was het hoge gehalte aan ijzeroxide (59,11%) in de gebruikte koperslak, dat hoger was dan bij de andere experimenten. Zain, Islam et al. (2004), geciteerd in Wu, Zhang et al. (2010b), meldden dat de aanwezigheid van zware metalen in koperslak de hydratatie uitstelt. Dit uitstellen werd belangrijker wanneer koperslak gebruikt werd dat meer vrij water in het beton achterliet.

Vanaf meer dan 40% vervanging van het zand door koperslak, zakte de statische druksterkte nog meer dan ervoor. De verklaring hiervoor was opnieuw het teveel aan vrij water bij hoge percentages koperslak, dat zorgt voor een zwakker beton. Net zoals in Al-Jabri, Hisada et al. (2009a) en Wu, Zhang et al. (2010a) werd dus ook in Wu, Zhang et al. (2010b) de vervanging van maximaal 40% van het zand door koperslak als ideaal aanzien.

In tegenstelling tot de voorgaande onderzoeken waar gewerkt werd met gelijkblijvende W/C-factor, onderzocht Al-Jabri, Hisada et al. (2009b) de invloed van het vervangen van zand als fijn granulaat door koperslak, bij gelijkblijvende verwerkbaarheid. Hiertoe werd het volume water afgebouwd om eenzelfde zetmaat te behouden. Dit volume kon afgebouwd worden door het glazig oppervlak van de koperslak en omdat koperslak een lagere waterabsorptie heeft dan zand (0,13% versus 1,36%), waardoor de koperslak als granulaat minder water zal opnemen dan zand. Bij het volledig vervangen van zand door koperslak, daalde de W/C-factor op die manier van 0,35 naar 0,27, wat zoals al gesteld, van groot belang kan zijn in gebieden met waterschaarste.

De druksterkte van alle proefstukken met koperslak was hoger dan die van het referentiebeton en steeg naarmate meer koperslak werd toegevoegd. Na 7 dagen was al 84% van de druksterkte op 28 dagen bereikt, wat normaal is en betekent dat de koperslak geen nadelige effecten had op de vroege sterkteontwikkeling. Ook bij langere uitharding waren er geen schadelijke effecten te melden door het gebruik van koperslak. In vergelijking met de studies waarbij vastgehouden werd aan een vaste W/C-factor, valt hier op dat er nooit een afname was van de druksterkte, hoeveel procent van het zand ook werd vervangen door koperslak. Een verklaring hiervoor kan teruggebracht worden op die gegeven in Al-Jabri, Hisada et al. (2009a), Wu, Zhang et al. (2010a) en Wu, Zhang et al. (2010b). De afname in druksterkte werd daar verklaard door het teveel aan vrij water, dat ontstond wanneer meer koperslak werd toegevoegd. Aangezien er bij Al-Jabri, Hisada et al. (2009b) voor gezorgd werd dat de verwerkbaarheid en dus het overtollige vrije water gelijk bleef, is het logisch dat de druksterkte verhoogde naarmate meer koperslak gebruikt werd. De koperslak is immers sterker dan het zand, en er zijn geen nadelige invloeden van een teveel aan vrij water meer te vrezen.

Naast al het onderzoek naar hoge sterkte beton, onderzocht Al-Jabri, Al-Saidy et al. (2011) ten slotte het gebruik van koperslak als fijn granulaat in mortels en beton van normale sterkte bij gelijkblijvende W/C-factor.

Tot en met 50% vervanging van het zand door koperslak kenden de mortels een stijgende druksterkte tegenover de referentiemortel zonder koperslak, nadien daalde deze opnieuw, maar bleef steeds hoger dan bij de referentiemortel. De grootste waarde werd gevonden bij 50% vervanging, een stijging van 74% ten opzichte van de referentiemortel werd opgetekend. Langere uithardingstijden (56 en 90 dagen) hadden geen nadelig effect op de druksterkte.

Voor het beton werd een analoog resultaat gevonden. Vervanging van het zand door koperslak tot en met 60%, leverde een vergelijkbare of licht hogere druksterkte op dan in het beton zonder koperslak. Nadien daalde de druksterkte opnieuw, en dit keer, in tegenstelling tot bij de mortels, wel tot onder de waarde voor het referentiebeton. Zowel bij de mortels als bij het beton was dit verloop te wijten aan de koperslak. Bij lagere vervangingspercentages werd het beton sterker dan zonder koperslak omdat de koperslak een hogere samendrukbaarheid heeft dan het zand, maar bij de hogere vervangingspercentages zorgden de lagere waterabsorptie en het glazig oppervlak van de koperslak voor een teveel aan vrij water dat het beton verzwakte. Ook hier vertoonden de buigtreksterkte en de splijttreksterkte een analoog verloop als de druksterkte.

Een opvallend resultaat was dat 50% vervanging van het zand door koperslak, 74% winst gaf in de druksterkte van mortels, terwijl dit voor beton slechts 4,4% was. Dit kon volgens de auteurs worden toegeschreven aan de binding tussen de deeltjes in de cementpasta die beter was in mortels dan in beton. Het gebruik van grove granulaten speelde volgens hen ook een niet nader gespecificeerde rol. De hogere porositeit van beton verzwakte de binding tussen de verschillende componenten, wat de sterkte uiteraard deed dalen.

De verwerkbaarheid en de duurzaamheid van het beton verliepen analoog als hiervoor bij het hoge sterkte beton. Meer koperslak zorgde voor meer vrij water en dus een betere verwerkbaarheid, terwijl de absorptie van oppervlaktewater daalde en dus de duurzaamheid steeg tot 40-50% vervanging, waarna de absorptie opnieuw steeg door de vele poriën gecreëerd door het teveel aan vrij water.

De algemene conclusie uit de literatuur over het gebruik van koperslak als fijn granulaat, is dus niet verschillend voor normaal of hoge sterkte beton. Bij gelijkblijvende W/C-factor geven vervangingspercentages tot 40% een vergelijkbare of hogere druksterkte dan de referentieproefstukken zonder koperslak, zowel in mortels als in beton, met een groter positief effect in de mortels. Bij hogere vervangingsgraden zakt de sterkte door een teveel aan vrij water dat zorgt voor grotere poriën en wijdere capillaire kanalen die ook duidelijk zichtbaar zijn via SEM. Bij gelijkblijvende verwerkbaarheid stijgt de sterkte van het beton hoeveel zand er ook wordt vervangen door koperslak. De microstructuur ondergaat wel dezelfde wijzigingen als bij de proefstukken met gelijkblijvende W/C-factor. De duurzaamheid van mortels en beton kan dus verbeterd worden door maximaal 40% van het zand te vervangen door koperslak.

2.4.2. Het gebruik van koperslak als grof granulaat

Het gebruik van koperslak als grof granulaat kreeg tot hiertoe nog maar weinig aandacht. De resultaten die hier vermeld worden, zijn afkomstig van Khanzadi en Behnood (2009) en handelen over het gebruik van koperslak in de plaats van kalksteen als grof granulaat in hoge sterkte beton. Er werden drie W/C-factoren gebruikt (0,4; 0,35 en 0,3), er werd al dan niet silica fume toegevoegd en alle kalksteen werd vervangen door koperslak.

De invloed van de W/C-factor was zoals verwacht dat de proefstukken met een lagere W/C-factor, een grotere sterkte verkregen. Ook het toevoegen van silica fume zorgde voor een grotere sterkte door de vorming van secundair calciumsilicaathydraat dat de poriën tussen het primair CSH opvulde na reactie van de puzzolane silica fume met het Ca(OH)_2 gevormd in de eerste fase van de hydratatie. De proefstukken met silica fume kenden wel een lagere sterkteaangroei in het begin omdat er dan nog niet voldoende Ca(OH)_2 aanwezig was om te reageren met het silica fume. In een latere fase was net door deze reactie de sterkteaangroei in de proefstukken met silica fume groter dan in de proefstukken zonder.

De eigenlijke interesse ging echter uit naar de invloed van koperslak als grof granulaat. Alle proefstukken met koperslak kenden een stijging van gemiddeld 12% tegenover de proefstukken met kalksteen wat betreft de druksterkte op 28 en 91 dagen ouderdom. Dit werd toegeschreven aan de sterktekaracteristieken van koperslak. Het lijkt er ook op dat het gebruik van koperslak een sterkere binding en overgangszone gaf tussen de cementpasta en de granulaten door de meer poreuze en ruwere oppervlaktestructuur van de koperslak in vergelijking met de kalksteen. Een scheur bij het beton met kalksteen ging langsheen de granulaten, bij het beton met koperslak niet, wat wijst op een betere binding tussen de granulaten en de cementpasta. De splijttreksterkte kende hetzelfde verloop als de druksterkte.

Het gebruik van koperslak leidde verder ook tot hogere waarden met de terugslaghamer dan bij het gebruik van kalksteen. Deze waarden correleren sterk met de hardheid, dus beton met koperslak had een hogere hardheid dan beton met kalksteen. Dit kon verwacht worden aangezien koperslak harder is dan kalksteen.

Concluderend is ook het gebruik van koperslak als grof granulaat een nuttige toepassing. Naar analogie met het gebruik als fijn granulaat is de verwachting dat de resultaten gevonden bij hoge sterkte beton ook van toepassing zullen zijn bij traditioneel beton.

3. Materialen en methoden

In dit hoofdstuk worden de gebruikte materialen en de gehanteerde methoden besproken. Er werd een onderscheid gemaakt naargelang de aard van het mengsel, met name cementpasta, mortel en beton.

3.1. Gebruikte materialen

3.1.1. Cement

Het cement dat gebruikt werd in de mortels is CEM I 52,5 N. De chemische samenstelling wordt weergegeven in Tabel 3 en werd bepaald conform de norm NBN EN 196-2 (2005).

Tabel 3: Chemische samenstelling van CEM I 52,5 N

Bestanddeel	Gehalte [%]
CaO	63,12
SiO ₂	18,73
Al ₂ O ₃	4,94
Fe ₂ O ₃	3,99
MgO	1,02
Na ₂ O	0,41
K ₂ O	0,77
SO ₃	3,07
CO ₂	0,65
Gloeiverlies	2,12
Onoplosbare rest	0,21

3.1.2. Zand

In de mortels werd CEN-normzand in overeenstemming met de norm NBN EN 196-1 (2005) gebruikt als fijn granulaat. De korrelverdeling hiervan werd gegeven in 2.1.2. In het beton werd gebruik gemaakt van riviervand 0/4 als fijn granulaat, van dit zand is de korrelverdeling opgenomen 6.1.1.

3.1.3. Koperslak

In de mortels werd gebruik gemaakt van fijn koperslak, voor het beton werd zowel fijn als grof koperslak gebruikt. De korrelverdeling van fijn koperslak is gegeven in 2.1.2, die van grof koperslak is opgenomen in 6.1.2. Al het koperslak gebruikt in dit onderzoek is afkomstig van het bedrijf Metallo Chimique uit Beerse.

3.1.4. Overige granulaten

Voor het beton werd verder gebruik gemaakt van rolgrind 2/8 en rolgrind 8/16 als grove granulaten. De korrelverdeling van beide granulaten is terug te vinden 6.1.3 en 6.1.4.

3.1.5. Superplast

In de betonmengsels met koperslak werd gebruik gemaakt van een superplastificeerder, namelijk GLENIUM 51 con.35%. Deze superplastificeerder werd gebruikt om de verwerkbaarheid te verhogen. De dosering was in elk mengsel gelijk aan 2 ml per kg cement.

3.2. Mengselsamenstellingen en uitgevoerde proeven

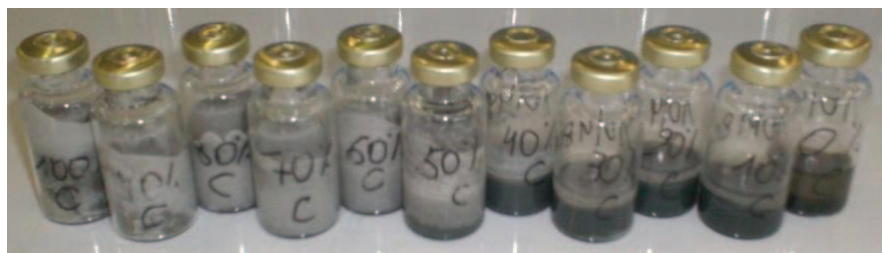
3.2.1. Cementpasta

Om de invloed van gemalen koperslak ter vervanging van cement te evalueren, werd gebruik gemaakt van de warmte die vrijkomt bij het hydratatieproces van cementpasta. Dit is immers een exotherme reactie en door het meten van de warmte die vrijkomt in functie van de tijd, werd een idee verkregen over de snelheid en de graad van hydratatie. De koperslak werd hiertoe tot poeder fijngemalen in een planetaire balmolen aan 300 toeren per minuut gedurende 4 minuten.

Deze vrijkomende warmte werd opgemeten met een isotherm warmtegeleidingsinstrument met 8 gepaarde calorimeters, namelijk de TAM-air afgebeeld in Figuur 7. Hiertoe werden de glazen ampullen afgebeeld in Figuur 8 gebruikt, die gevuld werden met cement en koperslak, samen 10 g. Er werd gewerkt met een W/C-factor van 0,4 en dus werd er 4 g water toegevoegd. De glazen ampullen werden zo snel mogelijk na toevoegen van het water afgesloten met teflongecoate rubberen zegels met aluminium dekseltjes, en in de calorimeters geplaatst.



Figuur 7: TAM-air toestel



Figuur 8: Glazen ampullen voor TAM-air

Elk ampul heeft een eigen referentie in de calorimeter, namelijk een identiek ampul gevuld met 14 g inert zand. De calorimeter houdt de ampullen op een constante temperatuur van 20°C. Doordat de reactie van de cementpasta exotherm is, moeten deze dus gekoeld worden door het toestel om een temperatuur van 20°C te behouden. Het meten van de energie die nodig is om dit te verwezenlijken, geeft een idee over de hydratatie van de cementpasta's.

Het gewicht aan cement werd stapsgewijs vervangen met doseringen van 10%. Op die manier werden 11 pasta's vervaardigd, zoals weergegeven in Tabel 4. De hydratatiewarmte werd geregistreerd over een periode van 7 dagen.

Tabel 4: Samenstelling van de ampullen in de TAM-air

Vervangings- percentage	Massa cement [g]	Massa koperslak [g]	Water [ml]	W/C- factor
0%	10	0	4	0,4
10%	9	1	4	0,4
20%	8	2	4	0,4
30%	7	3	4	0,4
40%	6	4	4	0,4
50%	5	5	4	0,4
60%	4	6	4	0,4
70%	3	7	4	0,4
80%	2	8	4	0,4
90%	1	9	4	0,4
100%	0	10	4	0,4

Na het fijnmalen van de koperslak werd hiervan de korrelverdeling bepaald met behulp van de Mastersizer 2000^E. Met hetzelfde toestel werd ter vergelijking ook de korrelverdeling van CEM I 52,5 N bepaald. Een grafiek van deze korrelverdelingen is terug te vinden in 6.1.5. In deze grafiek is ook de korrelverdeling opgenomen voor koperslak dat 2 en 3 maal 4 minuten gemalen werd aan 300 toeren per minuut. De koperslak met de hoogste maalfijnheid werd gebruikt in de mortelproefstukken zoals uiteengezet in 3.2.2.2. De grafiek toont aan dat zelfs na 3 keer malen, de maalfijnheid van koperslak die van CEM I 52,5 N nog steeds niet benadert.

3.2.2. Mortel

De invloed van koperslak als fijn granulaat werd onderzocht door het vervaardigen van mortelproefstukken met een oplopend percentage koperslak ter vervanging van normzand. De invloed van koperslak als cementvervanger werd bekeken door mortelproefstukken te vervaardigen met een oplopend percentage gemalen koperslak ter vervanging van cement. Alle mortelproefstukken werden zowel op 7 als op 28 dagen ouderdom beproefd.

3.2.2.1. Mortels met koperslak als fijn granulaat

In een eerste reeks proefstukken werd het normzand als fijn granulaat vervangen door koperslak in oplopende stappen van 10%. Het ging hierbij om massaprocenten. Op die manier werden er 11 mengsels gemaakt, weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5: Samenstelling van de mortels met koperslak als fijn granulaat (massavervanging)

Vervangings- percentage	Massa zand [g]	Massa koperslak [g]	Massa cement [g]	Water [ml]	W/C- factor
0%	1350	0	450	225	0,5
10%	1215	135	450	225	0,5
20%	1080	270	450	225	0,5
30%	945	405	450	225	0,5
40%	810	540	450	225	0,5
50%	675	675	450	225	0,5
60%	540	810	450	225	0,5
70%	405	945	450	225	0,5
80%	270	1080	450	225	0,5
90%	135	1215	450	225	0,5
100%	0	1350	450	225	0,5

Een tweede reeks proefstukken werd gemaakt door het normzand niet langer te vervangen door koperslak op basis van zijn massa, maar op basis van het volume dat het inneemt. Hiertoe werd door middel van een picnometer de absolute volumemassa van zowel het normzand als de koperslak bepaald. De werkwijze die gehanteerd werd, is overgenomen uit Taerwe et al. (2006).

De absolute volumemassa van een granulaat is de verhouding van de massa droge vaste stof M_a [kg] tot het volume V_a [m³] ervan, waarbij het granulaat gemalen wordt tot een zeer fijn poeder, zodat er geen lege ruimten meer zijn in de korrels. Voor het malen werd gebruik gemaakt van een planetaire balmolen. Er werd 4 minuten gemalen aan 300 toeren per minuut. Vervolgens werd de massa droge vaste stof en de massa van de picnometer M_{pm} [kg] bepaald door weging. Het volume van de picnometer V_{pm} [m³] is gekend en bedraagt 1000 ml of dus 10^{-3} m³.

Het droog poeder werd in de picnometer gebracht waarna deze gevuld werd met een vloeistof, in dit geval water, tot aan de markering van 1000 ml. De totale massa van picnometer, poeder en water, genoteerd als M_{tot} [kg], werd bepaald door weging.

Er geldt:

$$M_{tot} = M_{pm} + M_a + (V_{pm} - V_a) \cdot \rho_v \quad (3.1)$$

met ρ_v de volumemassa van de gebruikte vloeistof [kg/m³]. Uit deze vergelijking volgt de onbekende V_a [m³]:

$$V_a = V_{pm} - \frac{M_{tot} - M_{pm} - M_a}{\rho_v} \quad (3.2)$$

De absolute volumemassa wordt dan bepaald als $\rho_a = \frac{M_a}{V_a}$ [kg/m³] waarbij aangenomen wordt dat de absolute volumemassa van de koperslak ongeveer gelijk is aan de werkelijke volumemassa omdat de koperslak weinig poreus is.

De absolute volumemassa van het normzand en de koperslak werd op deze manier twee keer bepaald en de gemiddelde waarde werd behouden. Ze bedraagt 2413 kg/m³ voor het zand en 2986 kg/m³ voor

de koperslak. De massa zand m_z die vervangen werd door koperslak kon dan als volgt worden omgerekend naar een massa koperslak m_k :

$$m_k = m_z \cdot \frac{2986 \text{ kg/m}^3}{2413 \text{ kg/m}^3} \text{ gram koperslak} \quad (3.3)$$

Een overzicht van de vervaardigde mengsels wordt weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6: Samenstelling van de mortels met koperslak als fijn granulaat (volumevervanging)

Vervangings-percentage	Massa zand [g]	Massa koperslak [g]	Massa cement [g]	Water [ml]	W/C-factor
0%	1350	0	450	225	0,5
20%	1080	334,18	450	225	0,5
40%	810	668,36	450	225	0,5
50%	675	835,45	450	225	0,5
60%	540	1002,54	450	225	0,5
80%	270	1336,73	450	225	0,5
100%	0	1670,91	450	225	0,5

3.2.2.2. Mortels met koperslak als gedeeltelijke vervanging voor cement

Zoals al meerdere malen vermeld, heeft koperslak puzzolane eigenschappen die tot uiting komen wanneer het zeer fijn gemalen wordt. Op die manier kan koperslak helpen bij de hydratatie van beton en eventueel het cement zelfs vervangen. Om dit te testen werden mortelproefstukken gemaakt, waarbij het cement in oplopende percentages werd vervangen door gemalen koperslak. De vervanging gebeurde op basis van de massa. De koperslak werd 3 maal 4 minuten gemalen aan 300 toeren per minuut in een planetaire balmolen. De korrelverdeling van dit koperslakpoeder wordt weergegeven in 6.1.5 samen met de korrelverdeling van CEM I 52,5 N. Zelfs na 3 keer malen benadert de maalfijnheid van koperslak die van CEM I 52,5 N nog niet.

Een overzicht van de vervaardigde mengsels is terug te vinden in Tabel 7.

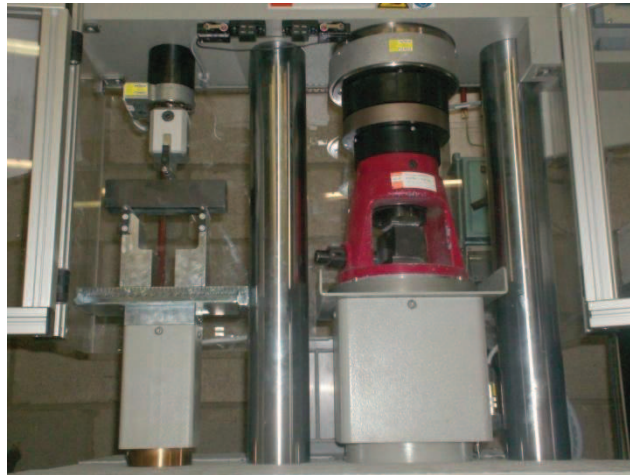
Tabel 7: Samenstelling van de mortels met koperslak als vervanging voor cement

Vervangings-percentage	Massa cement [g]	Massa koperslak [g]	Massa zand [g]	Water [ml]	W/C-factor
0%	450	0	1350	225	0,5
20%	360	90	1350	225	0,5
40%	270	180	1350	225	0,5
50%	225	225	1350	225	0,5
60%	180	270	1350	225	0,5
80%	90	360	1350	225	0,5
100%	0	450	1350	225	0,5

3.2.2.3. Proefmethode

Het fabriceren en bepalen van de druksterkte en buigtreksterkte van alle mortelproefstukken gebeurde verder volgens de norm NBN EN 196-1 (2005). Per mengsel werden er drie balkjes van 160x40x40 mm³ geproduceerd. Na het vervaardigen werden alle mortelproefstukken bewaard in een geklimatiseerde

ruimte bij een temperatuur van 20 ± 2 °C en een relatieve vochtigheid van minstens 95% tot wanneer ze de gewenste ouderdom bereikt hadden. Figuur 9 geeft een beeld van de driepuntsbuigproef en de drukproef waarmee de buigtreksterkte en de druksterkte van de mortelproefstukken bepaald werd.



Figuur 9: Proefopstelling voor het bepalen van de buigtreksterkte en de druksterkte van mortelproefstukken

3.2.3. Beton

3.2.3.1. Gerealiseerde mengsels

De invloed van koperslak als fijn en grof granulaat op de eigenschappen van beton werd onderzocht door het vervaardigen van betonmengsels waarin de granulaten gedeeltelijk vervangen werden door koperslak. Naast twee referentiemengsels zonder koperslak met een W/C-factor van 0,45 en 0,50, werden 4 andere mengsels geproduceerd.

Bij de eerste twee van die mengsels werden de granulaten voor respectievelijk 20% en 40% vervangen door fijn koperslak zoals het ook gebruikt werd in de mortels. Bij de volgende twee mengsels werden de granulaten voor respectievelijk 20% en 40% vervangen door grove koperslak. Deze werd bekomen door de vloeibare slak traag te laten afkoelen in grote mallen en het daarna te breken.

Deze vervangingspercentages werden gekozen op basis van de resultaten van de druksterkteproeven op mortelproefstukken gemaakt met koperslak als fijn granulaat. Zoals vermeld in 4.2.1 tonen deze resultaten aan dat meer dan 40% vervanging van de granulaten door koperslak, geen beduidend beter resultaat meer oplevert, of dat de kwaliteit van het beton zelfs achteruitgaat. De W/C-factor van de mengsels met koperslak bedroeg steeds 0,45 en het cementgehalte was gelijk aan 340 kg/m^3 . Deze twee waarden werden gelijk genomen aan het referentiebeton ref 0,45 omdat dit beton aan de strengste milieuklassen voldoet. Bovendien zijn alle proeven op de mengsels met koperslak ook uitgevoerd op het referentiebeton ref 0,45. Niet alle proeven werden echter uitgevoerd op het referentiebeton ref 0,50.

De verschillende mengsels werden aangeduid met de volgende afkortingen:

- ref 0,45 voor het referentiebeton met W/C-factor gelijk aan 0,45
- ref 0,50 voor het referentiebeton met W/C-factor gelijk aan 0,50
- SF 0,20 voor het beton met 20% van de granulaten vervangen door fijn koperslak
- SF 0,40 voor het beton met 40% van de granulaten vervangen door fijn koperslak

- SG 0,20 voor het beton met 20% van de granulaten vervangen door grof koperslak
- SG 0,40 voor het beton met 40% van de granulaten vervangen door grof koperslak

Alle betonmengsels werden vervaardigd volgens de norm NBN B 15-001 (2004). De samenstelling van de zes mengsels wordt weergegeven in Tabel 8 voor 1 m³ beton.

Tabel 8: Betonsamenstelling van de mengsels voor 1 m³ beton

	ref 0,45	ref 0,50	SF 0,20	SF 0,40	SG 0,20	SG 0,40
rietzand 0/4 [kg/m ³]	762,30	761,74	383,19	0	786,25	836,59
koperslak fijn [kg/m ³]	0	0	403,06	848,29	0	0
koperslak grof [kg/m ³]	0	0	0	0	403,06	857,73
rolgrind 2/8 [kg/m ³]	449,90	449,56	464,03	488,31	311,85	169,90
rolgrind 8/16 [kg/m ³]	741,71	741,15	765,01	805,03	514,12	280,10
CEM I 52,5 N [kg/m ³]	340	320	340	340	340	340
water [kg/m ³]	153	160	153	153	153	153
superplast [ml/m ³]	0	0	680	680	680	680
W/C-factor	0,45	0,50	0,45	0,45	0,45	0,45

De volgende mengprocedure werd gehanteerd:

- 1' droog mengen van het cement en de granulaten
- 2' nat mengen na toevoegen van het water
- 2' verder mengen na toevoegen van de superplast

Na vervaardiging werd het beton bewaard in een geklimatiseerde ruimte bij een temperatuur van 20 ± 2 °C en bij een relatieve vochtigheid van minstens 95% tot wanneer het de gewenste ouderdom bereikt had.

3.2.3.2. Uitgevoerde proeven

a) Algemene opmerkingen

Voor de proeven ter bepaling van de porositeit, de weerstand tegen dooizouten en de weerstand tegen de diffusie van chloriden, werd per mengsel gebruik gemaakt van drie soorten proefstukken aangeduid als A, B en C. Deze cilindrische proefstukken werden verkregen door een cilinder (100 mm diameter, 150 mm hoog) te boren uit een kubus met zijde 150 mm. Deze cilinder werd vervolgens in drie gelijke cilinders met hoogte 50 mm verzaagd. Hierdoor werd een cilinder verkregen met een bekistingsvlak en een zaagvlak (A); een cilinder met twee zaagvlakken (B) en een cilinder met een afstrijkvlak en een zaagvlak (C).

Voor het bepalen van de weerstand van het beton tegen dooizouten, de weerstand tegen de diffusie van chloriden en de vorstbestendigheid, werd in dit onderzoek gewerkt conform de norm NBN B 15-100 (2008): 'Methodologie voor de evaluatie en attestering van de gebruiksgeschiktheid van cementen en van toevoegsels van type II bestemd voor beton'. In dit onderzoek werd koperslak als granulaat in beton op de aangehaalde eigenschappen geëvalueerd om te controleren of het eventueel kan gebruikt worden als vervanging voor de natuurlijke granulaten volgens de aangehaalde norm. De norm schrijft ook een procedure voor om de weerstand van het beton tegen carbonatatie te evalueren, maar in dit onderzoek

werd hiervoor een licht verschillende methode gebruikt, die verder in dit deel uiteengezet wordt. Voor deze vier aangehaalde proeven (weerstand tegen dooizouten, weerstand tegen de diffusie van chloriden, vorstbestendigheid en weerstand tegen carbonatatie) werd ook steeds uitgegaan van de meest nadelige milieuklasse, zoals opgesteld in NBN EN 206-1 (2001). Deze milieuklassen zijn ook telkens gekoppeld aan een eis wat betreft de duurzaamheid van het beton. Zo volgen de hierna volgende milieuklassen en duurzaamheidseisen uit NBN EN 206-1 (2001):

- Voor de weerstand tegen dooizouten: XF4 en minimaal T(0,45)
- Voor de weerstand tegen de diffusie van chloriden: XS2 en minimaal T(0,45)
- Voor de vorstbestendigheid: XF3 en minimaal T(0,50)
- Voor de carbonatatie: XC4 en minimaal T(0,50)

Hierdoor werd er voor gekozen om twee referentiebetons te maken; een eerste referentiebeton T(0,45) met 340 kg cement per kubieke meter beton en een W/C-factor van 0,45, en een tweede referentiebeton T(0,55) met 320 kg cement per kubieke meter beton en een W/C-factor van 0,50.

b) Druksterkte

De druksterkte van de verschillende betonmengsels werd bepaald op kubussen met een zijde van 150 mm en een ouderdom van 2 dagen, 7 dagen, 28 dagen en 3 maand volgens de norm NBN EN 12390-1 (2001). Op elke ouderdom werden 3 proefstukken beproefd, waardoor een gemiddelde waarde alsook een standaardafwijking kon berekend worden.

c) Porositeit

De porositeit van beton is een zeer belangrijke eigenschap vanuit het oogpunt van duurzaamheid omdat schadelijke stoffen langs de poriën het beton kunnen binnendringen. De proefmethode die in dit onderzoek gebruikt werd om de porositeit te bepalen, staat beschreven in NBN B 05-201 (1976). Via deze methode wordt in feite de open porositeit bepaald, zijnde de poriën die vanaf het oppervlak bereikt kunnen worden, en er wordt dus slechts een grove schatting van de eigenlijke porositeit gemaakt.

Voor deze proef werd gebruikt gemaakt van een vacuümtank zoals afgebeeld op Figuur 10 om de proefstukken te verzadigen met water. Op deze manier werden alle toegankelijke poriën met water gevuld. De proefstukken werden na het bepalen van hun droge massa m_d [g] in de vacuümtank geplaatst. De tank werd vacuüm gezogen met behulp van een absolute druk van 2,7 kPa en dit vacuüm werd 3,5 uur aangehouden, waarna water in de tank werd gelaten tot wanneer alle proefstukken ondergedompeld waren. Vervolgens werd het vacuüm nog een uur aangehouden, waarna opnieuw lucht in de tank werd gelaten. De proefstukken zelf bleven daarna gedurende 24 uur ondergedompeld.



Figuur 10: Vacuümtank

De volgende dag, 24 uur nadat het vacuüm werd opgeheven, werd van alle proefstukken zowel de massa onder water m_l [g] als de massa boven water m_s [g] door weging bepaald. De porositeit van het beton kon nu bepaald worden door de verhouding van het volume van de holten die gevuld konden worden met water tot het volume van het droog beton:

$$\varphi = \frac{V_{water}}{V_{beton}} = \frac{\frac{m_s - m_d}{\rho_w}}{\frac{m_d}{\rho_b}} = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_l} \quad (3.4)$$

In deze formule is verder ρ_w de volumemassa van het water [kg/m³] en ρ_b de droge schijnbare dichtheid van het beton [kg/m³].

Beton bevat drie soorten poriën: de luchtholten, de capillaire holten en de gelporiën. Luchtholten hebben een diameter groter dan 10 μm en bevinden zich in het beton als afzonderlijke luchtballen. Deze luchtballen staan onderling niet in verbinding en hebben dus niet zo een belangrijke rol in de doorlatendheid van het beton. Capillaire holten hebben een diameter tussen 10 nm en 0,5 μm en ontstaan omdat de vaste hydratatieproducten een kleiner absoluut volume innemen dan de som van de absolute volumes water en cement die reeds gereageerd hebben. Deze holten zijn leeg of gevuld met vrij water dat niet chemisch, noch fysisch gebonden werd, en later eventueel uit de capillaire holten kan verdampen. Gelporiën tot slot hebben een diameter kleiner dan 10 nm en zijn gevuld met gelwater dat bestaat uit water dat fysisch geadsorbeerd is aan het oppervlak van de hydratatieproducten en uit een mono-moleculaire waterfilm die gebonden is tussen de vlakke kristallisatieproducten, het 'interlayer water'. Vooral de capillaire holten betekenen een verzwakking van het beton omdat agressieve stoffen gemakkelijk het beton binnendringen via dit poriënnetwerk. Het is dan ook deze vorm van porositeit die de grootste invloed zal hebben op de duurzaamheid van het beton [Taerwe en De Schutter (2006)].

Door de proefstukken aan verschillende temperaturen te drogen alvorens ze te verzadigen, konden de verschillende vormen van porositeit bepaald worden. Bij drogen van de proefstukken bij 40 °C, verdampt het water in de capillaire holten en kan dus de capillaire porositeit benaderend bepaald worden. Worden de proefstukken, vooraleer ze te verzadigen, echter gedroogd bij 105 °C, dan verdampt ook het gelwater en de porositeit die zo gemeten wordt, is de totale porositeit. De gelporositeit is dan het verschil tussen de totale en de capillaire porositeit. De proefstukken werden in dit onderzoek als droog beschouwd wanneer bij twee opeenvolgende wegingen, het massaverschil kleiner was dan 0,1%. De wegingen hadden een tussentijd van minstens 24 uur.

In dit onderzoek werden de proefstukken onderworpen aan een vacuümverzadiging na droging bij 40 °C, waarna ze gedroogd werden bij 105°C en opnieuw een verzadiging ondergingen. Op die manier werd dus zowel de capillaire als de totale porositeit bepaald. De gebruikte proefstukken waren cilinders van 50 mm hoogte en 100 mm diameter. Er werden per betonmengsel 6 proefstukken A, 6 proefstukken B en 6 proefstukken C gebruikt. Van elke soort proefstukken (A, B en C) onderging de helft een eerste methode, de andere helft een tweede methode.

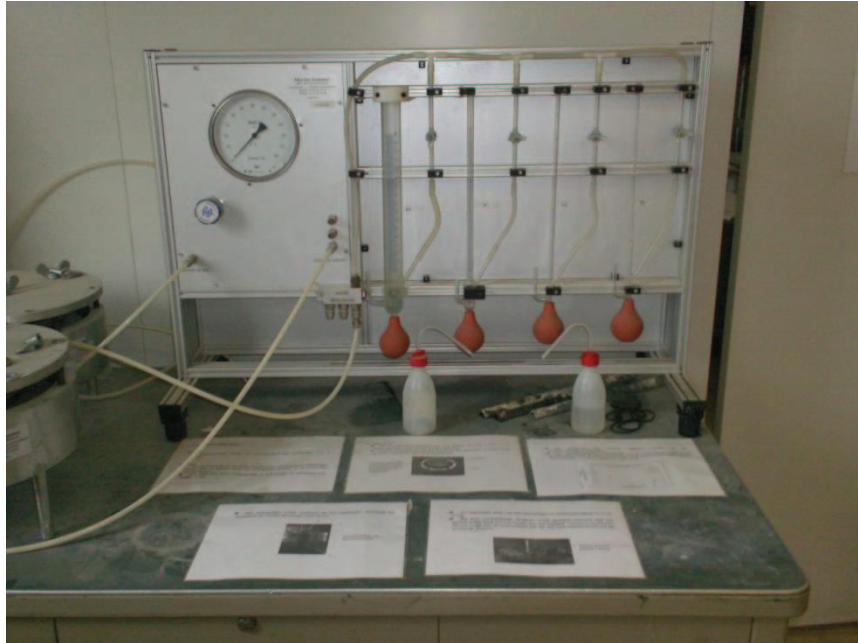
Bij de eerste methode werden de proefstukken zoals hiervoor uitgelegd eerst gedroogd alvorens ze te verzadigen. In de tweede methode werden de proefstukken eerst verzadigd in de vacuümtank en dan pas gedroogd bij respectievelijk 40 °C of 105 °C. De reden voor de tweede procedure is de twijfel of het drogen van de proefstukken de poriënstructuur van het beton zou kunnen beschadigen en dus een invloed zou kunnen hebben op de resultaten.

d) Gaspermeabiliteit

De gaspermeabiliteit van de verschillende mengsels werd bepaald volgens de procedure beschreven in RILEM TC 116-PCD (1999). De proefstukken die hiervoor gebruikt werden, waren cilinders van 50 mm hoogte en 150 mm diameter die uit een plaat van 400x400x100 mm³ gehaald werden. Per betonmengsel werden er drie van deze cilinders gebruikt.

Op een ouderdom van 28 dagen werden de cilinders in een oven bij 40 °C gedroogd tot constante massa. Onder constante massa werd hier verstaan dat het massaverschil tussen twee opeenvolgende wegingen minder dan 0,05% bedroeg. De tweede weging vond minstens 24 u na de eerste plaats. Wanneer aan deze voorwaarde werd voldaan, ondergingen de proefstukken een vacuümverzadiging. Vervolgens gingen de proefstukken terug naar een oven bij 40 °C tot ze opnieuw op constante massa waren. Daarna werden ze omwikkeld met aluminiumfolie en in een geklimatiseerde ruimte geplaatst bij een temperatuur van 20 ± 2 °C en een relatieve vochtigheid van $60 \pm 5\%$. De aluminiumfolie diende om geen vocht op te nemen uit of af te geven aan de omgeving.

De volgende dag werd de gaspermeabiliteit dan gemeten met behulp van een “cembureau” permeameter zoals afgebeeld op Figuur 11. Elk van de drie cilinders werd om beurt in een houder geplaatst die door middel van een luchtband, opgepompt aan 6 bar, luchtdicht werd afgesloten. De binnenkant van de houder staat afgebeeld in Figuur 12. Vervolgens werd zuurstofgas onder een druk van achtereenvolgens 2, 3 en 4 bar doorheen de proefstukken gestuurd. Een halfuur na het instellen van de druk werd met behulp van een zeepbelmeter het gasdebiet opgemeten dat doorheen de proefstukken stroomde. Het halfuur tussen het instellen van de druk en het opmeten ervan was nodig om de steady state situatie te bereiken.



Figuur 11: Cembureau permeameter



Figuur 12: Binnenkant van de luchtdichte houder met plaats voor het proefstuk

De drie proefstukken werden afzonderlijk beproefd zodat een gemiddelde waarde en een standaardafwijking konden worden berekend. Wanneer de drie proefstukken tegelijk zouden worden beproefd, is er enkel een gemiddelde waarde en geen standaardafwijking. Na het beëindigen van de proef werd de hele procedure herhaald met droging bij 105 °C.

Het doorstromingsdebiet Q [m³/s] wordt als volgt berekend:

$$Q = \frac{V \cdot 10^{-6}}{t} \quad (3.5)$$

Hierin is V het volume [ml] dat doorheen het proefstuk gaat in een tijd t [s]. De schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt K [m²] wordt dan becijferd door:

$$K = \frac{2 \cdot P_a \cdot Q \cdot L \cdot \mu}{A \cdot (P^2 - P_a^2)} \quad (3.6)$$

Hierin is P_a de absolute atmosferische druk [10^5 Pa], Q het doorstromingsdebiet [m^3/s], L de dikte van het proefstuk [m], μ de dynamische viscositeit van de zuurstof die door het proefstuk gestuurd wordt (bij 20°C bedraagt deze $2,02 \cdot 10^{-5}$ Pa.s), A het doorstromingsoppervlak [m^2] en P de absolute toegepaste druk [2, 3 of $4 \cdot 10^5$ Pa].

De voorwaarde om vergelijking (3.6) te mogen toepassen is dat de stroming doorheen het proefstuk laminair is. Dit kan volgens Boel (2006) gecontroleerd worden door het doorstromingsdebiet Q [m^3/s] uit te zetten in functie van $(P^2 - P_a^2)$ [bar^2]. Als het verband tussen beide lineair is, is de aanname van laminaire stroming geldig. De mate waarin het verband tussen beide grootheden aan de lineariteit voldoet, wordt uitgedrukt door middel van de correlatiecoëfficiënt R^2 [-]. Hoe dichter deze coëfficiënt de eenheid benadert, des te groter de lineariteit van het verband.

Theoretisch gesproken is de schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt K [m^2] een intrinsieke grootheid, maar in werkelijkheid is deze onder andere afhankelijk van de verzadigingsgraad S [%] van het proefstuk. Daarom werd de gaspermeabiliteit bepaald na droging bij 40°C en 105°C en dus bij twee verschillende verzadigingsgraden. Het drogen tot constante massa was nodig opdat alle mengsels een vergelijkbare verzadigingsgraad zouden verkrijgen en dus onderling vergeleken konden worden.

e) Carbonatatatie

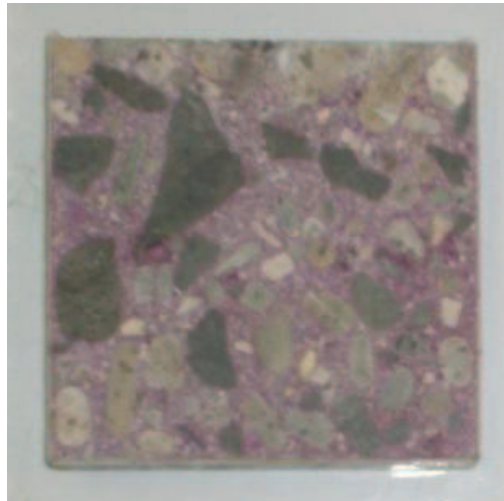
Carbonatatatie is het fenomeen waarbij CO_2 uit de lucht het beton binnendringt en reageert met het aanwezige Ca(OH)_2 met vorming van CaCO_3 . Het Ca(OH)_2 zorgt echter voor het alkalisch milieu in beton waardoor het staal gepassiveerd wordt. Wanneer het Ca(OH)_2 verdwijnt door carbonatatatie, kan de pH in het beton dalen tot een waarde lager dan 9 à 10 waardoor corrosie van de wapening mogelijk wordt. De snelheid waarmee carbonatatatie optreedt, is afhankelijk van de toegankelijkheid van het beton voor CO_2 .

De weerstand van de betonmengsels tegen de indringing van CO_2 uit de lucht werd gemeten door middel van een carbonatatiekast waarin het carbonatatatieproces werd versneld. De kast bevond zich steeds op een temperatuur van $20 \pm 2^\circ\text{C}$, had een relatieve vochtigheid van 60% en een gehalte van 10 vol% CO_2 in de aanwezige lucht.

De proefstukken die voor deze test gebruikt werden, zijn kubussen met een zijde van 100 mm. Per betonmengsel werden er vier van deze kubussen gemaakt: drie ervan werden in de carbonatatiekast geplaatst en een vierde werd bewaard in een geklimatiseerde ruimte bij een temperatuur van $20 \pm 2^\circ\text{C}$ en een relatieve vochtigheid van $60 \pm 5\%$. Er vanuit gaande dat de concentratie aan CO_2 in gewone lucht ongeveer 0,03% bedraagt, was dus enkel de concentratie aan CO_2 verschillend voor de twee bewaringsomstandigheden. Om er voor te zorgen dat de CO_2 slechts in één richting de proefstukken kon binnendringen, werden 5 van de 6 vlakken van elke kubus voorzien van een coating die het beton afsluit van zijn omgeving.

Op een ouderdom van 26 dagen werden de drie proefstukken, na aanbrengen van de coating, in de carbonatatiekast geplaatst en het vierde, eveneens gecoate, proefstuk in de geklimatiseerde ruimte. Na 28 dagen werd van alle proefstukken een schijfje met een dikte van 1 cm afgezaagd, loodrecht op het blootstellingsvlak. Deze schijfjes werden vervolgens besproeid met fenolftaleïne om het carbonatatiefrent zichtbaar te maken. Doordat de pH van de niet-gecarbonateerde zone hoger is dan 9

à 10, kleurt het fenolftaleïne paars. Waar het beton niet verkleurt, is de pH lager dan 9 à 10 en is het dus gecarbonateerd. Op die manier kan het carbonatatiefrent dus zichtbaar gemaakt worden. Per proefstuk werd het carbonatatiefrent opgemeten vertrekkende vanuit het midden en met tussenafstanden van 10 mm (-40, -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40 mm). Figuur 13 is een weergave van een afgezaagd schijfje besproeid met fenolftaleïne. De grijze zone bovenaan het schijfje is gecarbonateerd, het paarse gedeelte niet.

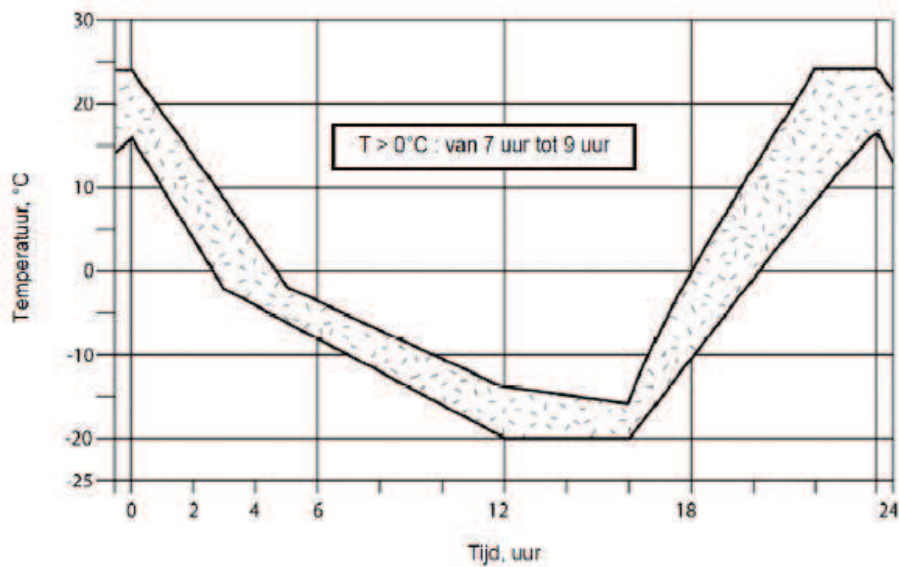


Figuur 13: Afgezaagd schijfje ter bepaling van de carbonatatie diepte

Wat overbleef van de kubussen werd opnieuw voorzien van een coating. Daarna werden de drie kubussen opnieuw in de carbonatiekast geplaatst, en de vierde kubus terug in de geklimatiseerde ruimte. Na nog eens een periode van 28 dagen werd de hele procedure herhaald.

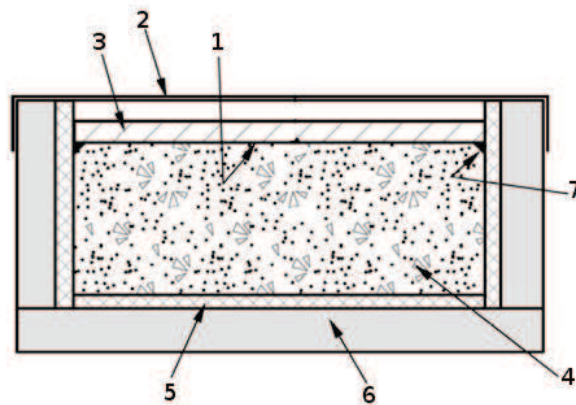
f) Weerstand tegen dooizouten

Door blootstelling van beton aan vorst en dooizouten, kan het snel degraderen. De proefmethode die in dit onderzoek gebruikt werd om de weerstand hiertegen te evalueren, kadert in de norm NBN B 15-100 (2008) en de exacte realisatie wordt beschreven in NBN EN 1339 (2003). In deze laatste norm werd, om de omstandigheden te simuleren, een methode opgesteld waarbij proefstukken vries-dooicycli ondergaan zoals weergegeven in Figuur 14. Tijdens deze cycli zijn de proefstukken bedekt met een zoutoplossing (3% NaCl). Voor deze proef werden voor elk betonmengsel 6 proefstukken van elke soort gebruikt (A, B en C). De proefstukken waren cilinders van 100 mm diameter en 50 mm hoog.



Figuur 14: Temperatuur-tijd verloop volgens NBN EN 1339 (2003)

Een impressie van de proefstukken is weergegeven in Figuur 15. Om er voor te zorgen dat de aantasting enkel langs het bovenzvlak (1) van de proefstukken (4) kon plaatsvinden, werden deze met epoxy (5) ingekleefd in een PVC-buis met een iets grotere diameter. Bij de proefstukken A en C werd respectievelijk het bekistingsvlak en het afstrijkvlak vrijgelaten. Bij de proefstukken B werd een zaagvlak blootgesteld. Een dag na het inkleven werd nagegaan of de proefstukken waterdicht waren. De ingekleefde proefstukken werden vervolgens in een isolerende huls (6) geplaatst en afgedekt door een plastic plaatje (2) om verdamping van de NaCl-oplossing (3) tegen te gaan.



Figuur 15: Proefopstelling weerstand tegen dooizouten

Na 7, 14, 21 en 28 cycli werd de NaCl-oplossing verzameld in een filter (1 filter per proefstuk) en werd het oppervlak van de proefstukken gespoeld met water, dat ook in de filter opgevangen werd, om het losgekomen beton te verwijderen. Nadien werden de proefstukken opnieuw bedekt met een laagje NaCl-oplossing en in de vorst-dooikast geplaatst. De filter werd gedurende minstens 24 uur gedroogd in een oven bij 105 °C en vervolgens gewogen. Het resultaat van deze proef wordt uitgedrukt als de losgekomen massa beton per blootstellingsoppervlak [kg/m^2]. De diameter van de proefstukken werd in dit onderzoek enkel opgemeten voor ref 0,45 dus er werd gebruik gemaakt van het theoretische blootstellingsoppervlak bij een diameter van 100 mm. Figuur 16 is een beeld van de drie soorten proefstukken na doorlopen van 28 vorst-dooicycli.



Figuur 16: Drie soorten proefstukken na doorlopen van 28 vorst-dooicycli; boven=A, links=B en rechts=C

Deze proef werd niet uitgevoerd voor het referentiebeton ref 0,50 omdat het beton volgens de norm NBN EN 206-1 (2001) minimaal de kwaliteit van ref 0,45 moet hebben. Door een defect aan de vorst-dooikast, zijn er voor de proefstukken SF 0,40 geen metingen kunnen gebeuren na 28 cycli, en voor de proefstukken SG 0,20 is er om dezelfde reden alleen een meting kunnen doorgaan na 7 cycli.

g) Chloride-indringing

Voor het bepalen van de weerstand tegen chloride-indringing, werd gewerkt in overeenstemming met de norm NBN B 15-100 (2008). Voor de uitvoering werd gebruik gemaakt van de alternatieve methode, bekend als de CTH-proef, beschreven in NT Build 492 (1999) ter bepaling van de tijdsafhankelijke migratiecoëfficiënt D [m^2/s]. De proefstukken waren cilinders met een hoogte van 50 mm en een diameter van 100 mm. Voor deze proef werden per betonmengsel 3 proefstukken A, 3 proefstukken B en 3 proefstukken C gebruikt.

De proefstukken werden steeds per 3 getest (alle proefstukken A van een mengsel samen, daarna alle proefstukken B en C). De diameter en de hoogte van de drie proefstukken werd gemeten waarna ze in een glazen kolf zoals afgebeeld in Figuur 17 werden geplaatst en deze kolf vacuüm werd gezogen. Drie uur later werd aan deze kolf, nog steeds onder vacuüm, een oplossing van 4 g $\text{Ca}(\text{OH})_2$ per liter water toegevoegd tot wanneer alle proefstukken ondergedompeld waren. Het vacuüm werd nog een uur aangehouden, waarna opnieuw lucht in de kolf werd gelaten.

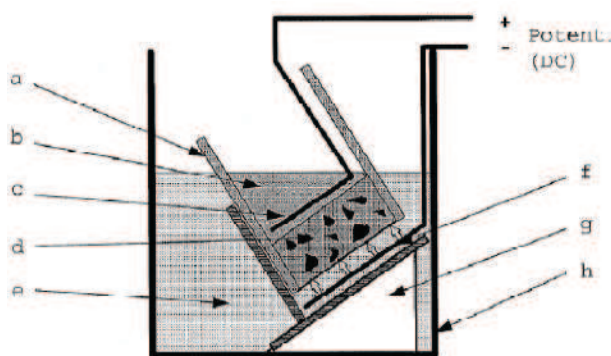


Figuur 17: Glazen kolf die vacuüm gezogen wordt

De volgende dag, 18 uur na het opheffen van het vacuüm, werden de proefstukken uit de oplossing gehaald en met behulp van klemmen stevig vastgezet in rubberen hulzen. Het vlak dat beproefd werd, was hierbij naar onder gericht. Voor de proefstukken A en C ging het respectievelijk om het bekistingsvlak en het afstrijkvlak, voor de proefstukken B om een zaagvlak. De hulzen werden nu op een metalen houder geplaatst in een plasticen bak die gevuld werd met 10 m% NaCl in water zodanig dat de ondervlakken van de proefstukken zich in het NaCl bevonden, maar de bovenkant van de hulzen er bovenuit stak.

Vervolgens werd in elk van de hulzen, bovenop de proefstukken, 300 ml van een oplossing van 12 g NaOH per liter gedistilleerd water gegoten. De NaCl-oplossing in de bak wordt de katholitische oplossing genoemd, de NaOH-oplossing in de hulzen de anolitische oplossing. In een volgende stap werd de kathode, een roestvrij stalen netje, bovenop de proefstukken geplaatst in de NaOH-oplossing; de metalen houder waarop de proefstukken steunden, fungeerde als anode. De temperatuur werd opgemeten in één van de hulzen in de anolitische NaOH-oplossing.

De anode werd verbonden met de positieve pool van een stroombron en de kathode met de negatieve pool. Vervolgens werd de stroom ingeschakeld en een spanning van 30 V over de proefstukken aangebracht. De stroomsterkte over de proefstukken bij deze waarde van de spanning werd genoteerd en de spanning werd aangepast op basis van tabel 1 uit NT BUILD 492 8 (1999). De nieuwe stroomsterkte werd genoteerd en de proefduur werd uit dezelfde tabel afgelezen. Een impressie van de proefopstelling wordt getoond in Figuur 18.



Figuur 18: Opstelling van de CTH-proef [NT BUILD 492 (1999)] [a: Rubberen omhulsel; b: anoliet; c: anode; d: proefstuk; e:katholiet; f: kathode; g: steun, h: plasticen bak]

Na de vereiste proefduur werd de temperatuur een tweede maal opgemeten in één van hulzen met de NaOH-oplossing en werd de stroom uitgeschakeld. Vervolgens werden de proefstukken uit de hulzen gehaald, oppervlakkig afgedroogd en in tweeën gespleten, waarna het splijtoppervlak besproeid werd met een 0,1 M AgNO_3 -oplossing. Aan de hand van het kleurverschil tussen de zone met en de zone zonder chloride-indringing, kon de gemiddelde indringingsdiepte per proefstuk bepaald worden. Hiervoor werd, vertrekkende vanuit het midden van het proefstuk, om de 10 mm een meting uitgevoerd. Figuur 19 geeft een beeld van een gespleten proefstuk waarop de chloride-indringing zichtbaar werd gemaakt met een AgNO_3 -oplossing.



Figuur 19: Gespleten proefstuk voor het bepalen van de chloride-indringing

De tijdsafhankelijke migratiecoëfficiënt kon dan bepaald worden op basis van formule (3.7). Hierbij wordt migratie gedefinieerd als de beweging van ionen onder invloed van een extern elektrisch veld. De theoretische achtergrond van deze formule wordt gegeven in Audenaert (2006).

$$D = \frac{0,0239 \cdot (273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right) \quad (3.7)$$

Hierin is:

- D= de tijdsafhankelijke migratiecoëfficiënt [$\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]
- T= de gemiddelde temperatuur van de anolitische oplossing [$^{\circ}\text{C}$]
- L= de dikte van het proefstuk [mm]
- U= de aangebrachte spanning na aanpassen op basis van de stroom [V]
- t= de duur van de proef [h]
- x_d = de gemiddelde indringingsdiepte [mm]

h) Vorstbestendigheid

Voor het bepalen van de vorstbestendigheid van het beton werd de invloed bepaald van 14 opeenvolgende vorst-dooicycli conform NBN B 05-203 (1977) op een reeks proefstukken. De exacte realisatie wordt beschreven in NBN B 15-231 (1987). In dit onderzoek werd deze invloed onderzocht door het bepalen van de splijttreksterkte volgens NBN EN 12390-6 (2001) voor en na de 14 cycli. Er werd ook gebruik gemaakt van visueel onderzoek, maar er was geen visuele schade waar te nemen tijdens en na de cycli.

De bewaringsomstandigheden waren als volgt. Na 6 dagen werden 10 cilinders met diameter 113 mm en hoogte 100 mm geboord uit een betonnen plaat en in een geklimatiseerde ruimte met $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ als temperatuur en een relatieve vochtigheid van minstens 95% geplaatst. Op een ouderdom van 28 dagen werden deze proefstukken dan in een andere geklimatiseerde ruimte geplaatst met een temperatuur van $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ en een relatieve vochtigheid van $60 \pm 5\%$ tot wanneer ze bij twee opeenvolgende metingen minder dan 0,05% in massa verschilden (24 uur tussen de twee metingen). Als dat zo was, werden ze in dezelfde ruimte ondergedompeld in water, tot wanneer ze opnieuw bij twee opeenvolgende metingen, minder dan 0,05% in massa verschilden (24 uur tussen de twee metingen).

Daarna werd van 5 van de 10 cilinders de splijttreksterkte bepaald, terwijl de andere vijf onderworpen werden aan de 14 vorst-dooicycli. Na deze cycli werd uiteindelijk ook van deze proefstukken de splijttreksterkte bepaald.

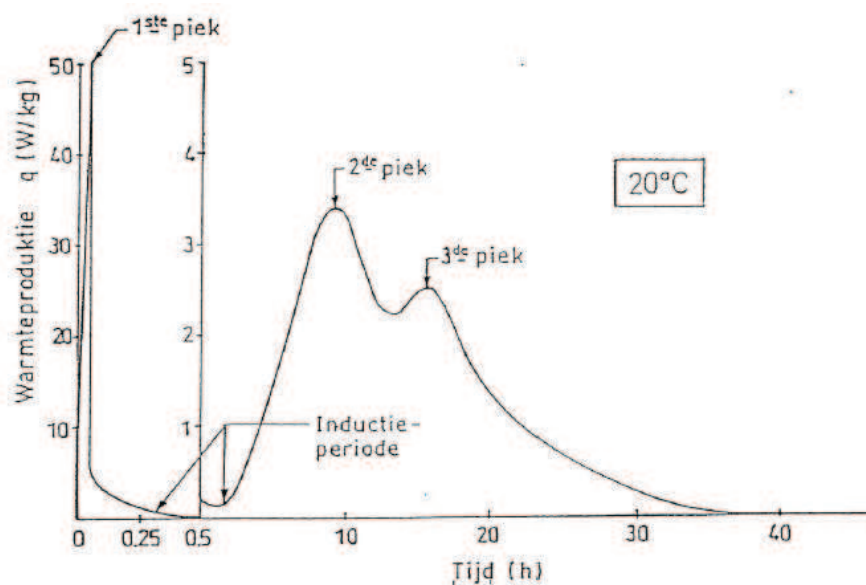
4. Resultaten en discussie

4.1. Koperslak ter vervanging van het bindmiddel

4.1.1. Cementpasta

De invloed van koperslak ter vervanging van cement werd geëvalueerd met behulp van isotherme calorimetrie. Hierbij wordt de warmteproductie van het cement opgemeten tijdens de hydratatie. In dit onderzoek werden 11 mengsels met een oplopend koperslakgehalte bestudeerd.

De warmte in het hydratatieproces van cement komt niet gelijkmatig vrij. Een typisch verloop van de warmteproductie in een hoogovencement is weergegeven in Figuur 20. Volgens Taerwe en De Schutter (2006) treedt een eerste, zeer scherpe piek op onmiddellijk na het toevoegen van het water aan pasta, mortel of beton. Deze piek wordt grotendeels toegeschreven aan de hydratatie van calciumsulfaathemihydraat tot dihydraat gips. De ogenblikkelijke warmteproductie in deze eerste piek is zeer hoog, maar van korte duur, waardoor de bijdrage tot de totale warmteproductie eerder gering is. Daarna volgt er een periode met relatief weinig chemische activiteit, die daarom ook wel de inductieperiode genoemd wordt. Deze periode duurt gemiddeld 1 tot 2 uur. Ongeveer 5 tot 15 uur na het begin van de hydratatie treedt een tweede piek op, met een kleiner maximum dan de eerste, maar deze piek duurt wel langer en draagt zo veel meer bij tot de totale warmteproductie. Het optreden van de tweede piek wordt toegeschreven aan de hydratatie van C_3S ($3CaO.SiO_2$) of aliet. Als er gewerkt wordt met Portlandcement, is meestal geen derde piek meer te onderscheiden. Bij hoogovencement treedt er wel nog een derde piek op, door de reactie van de hoogovenslak na portlandactivatie. Portlandactivatie is het gevolg van het reactieproduct $Ca(OH)_2$ van de hydratatie van C_3S (aliet) en C_2S (beliet). Dit $Ca(OH)_2$ reageert immers verder met de hoogovenslak tot vorming van secundaire calciumsilicaathydraten.



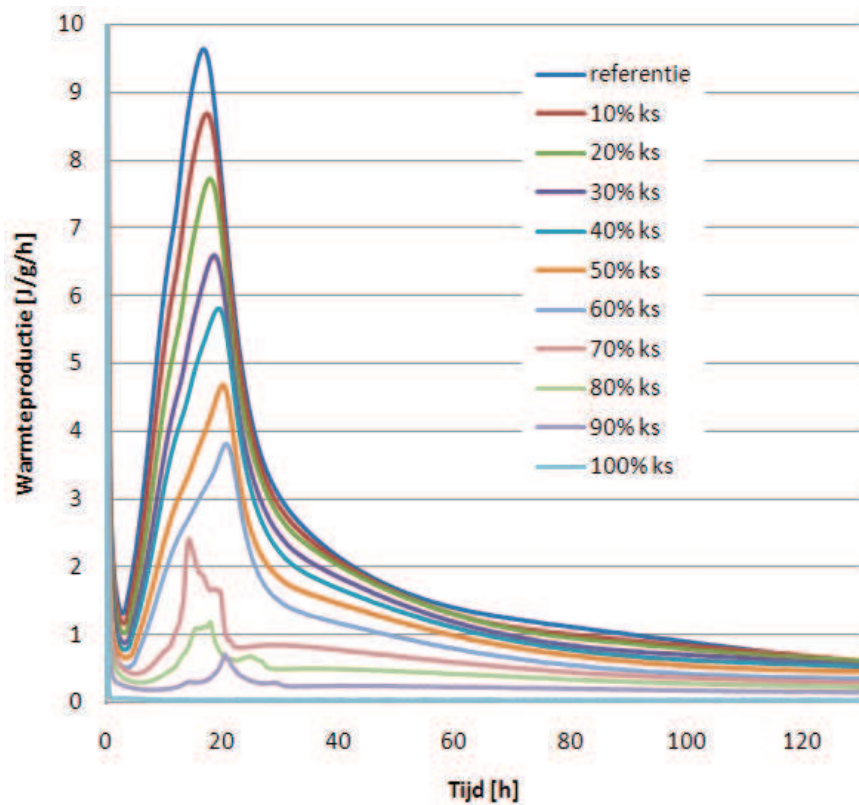
Figuur 20: Typische warmteproductie tijdens de hydratatie van een hoogovencement [Taerwe en De Schutter (2006)]

Op basis van Taerwe en De Schutter (2006) zou dus voor de warmteproductie een verloop zoals bij hoogovencement verwacht kunnen worden wanneer Portlandcement gedeeltelijk vervangen wordt

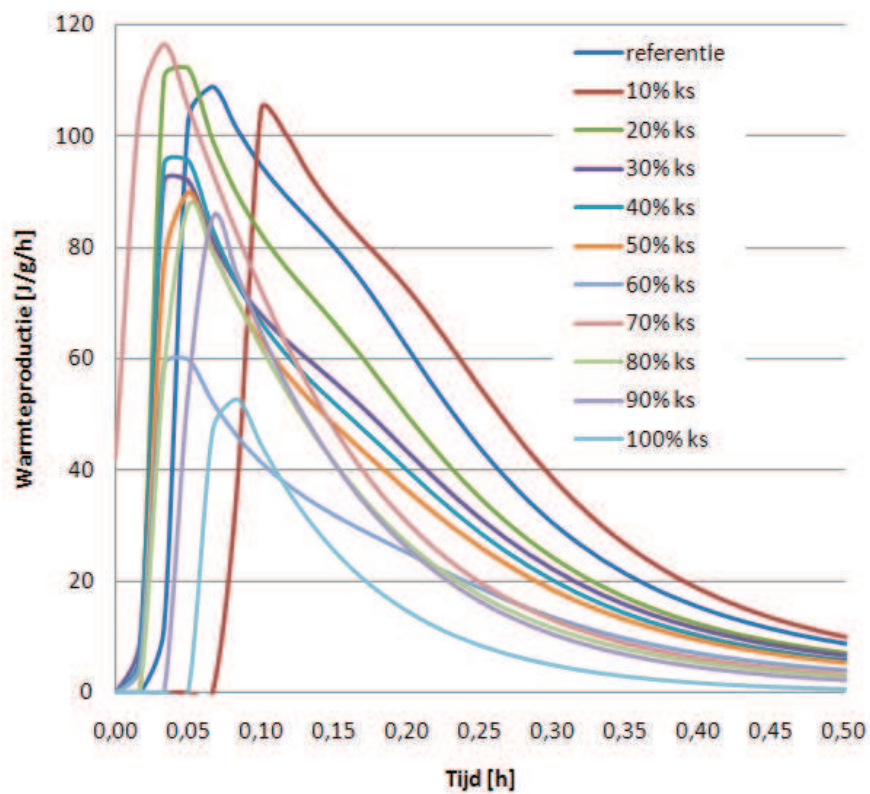
door koperslak. Koperslak heeft immers, net als hoogovenslak in hoogovencement, puzzolane eigenschappen die tot uiting komen wanneer de koperslak fijn gemalen wordt zoals al beschreven in 2.1.2. Taerwe en De Schutter (2006) merken verder terecht op dat puzzolane toevoegingen zoals koperslak niet in onbeperkte mate kunnen toegevoegd worden. Er dient immers voldoende Ca(OH)_2 te kunnen worden aangemaakt door reactie van C_3S en C_2S met water om verder te kunnen reageren met deze puzzolane toevoegingen. Een mogelijke oplossing om ook bij hoge volumes koperslak voldoende Ca(OH)_2 ter beschikking te hebben, is alkali-activatie: het toevoegen van Ca(OH)_2 aan het mengsel van buitenaf.

Al deze beschouwingen in acht nemend, verwachten we dus een grafiek met twee pieken wanneer uitsluitend Portlandcement gebruikt wordt, en een grafiek met drie pieken wanneer een deel van het cement vervangen wordt door gemalen koperslak. Er werd wel verwacht dat de pieken minder uitgesproken zouden zijn wanneer meer cement vervangen werd door koperslak. De tweede piek zou minder hoog moeten zijn omdat er minder C_3S aanwezig is, het klinkermineraal dat deze piek veroorzaakt. De derde piek zou bij de lagere vervangingspercentages eerst stijgen ten opzichte van het referentiemengsel. Bij de hogere vervangingspercentages zou de grootte van de piek dan opnieuw dalen. Dit komt omdat er bij de lagere vervangingspercentages meer dan genoeg Ca(OH)_2 wordt gevormd om te reageren met de koperslak, maar naarmate meer cement vervangen wordt, zal er steeds minder Ca(OH)_2 gevormd worden dat verder kan reageren met de koperslak waardoor de waarde van de derde piek opnieuw zal dalen.

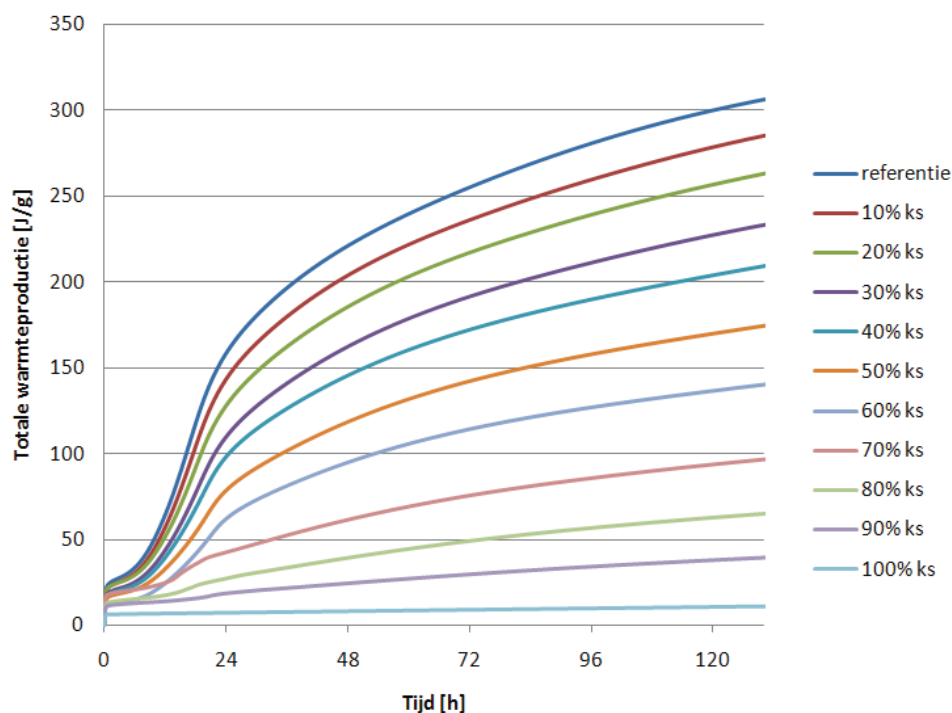
Figuur 21 geeft de warmteproductie weer, bepaald met de isotherme calorimeter voor oplopende percentages van het cement vervangen door koperslak. Figuur 22 geeft dezelfde grafiek, maar specifiek voor het eerste halfuur van de hydratatie. Op die manier kan de eerste piek waargenomen worden. Figuur 23 ten slotte geeft de cumulatieve warmteproductie van alle mengsels.



Figuur 21: Warmteproductie bepaald met behulp van isotherme calorimetrie [ks = koperslak]



Figuur 22: Warmteproductie bepaald met behulp van isotherme calorimetrie, begin van de hydratatie [0-0,5h]



Figuur 23: Totale warmteproductie bepaald met behulp van isotherme calorimetrie

Bij het bekijken van Figuur 21 valt meteen op dat er slechts twee en geen drie pieken aanwezig zijn bij de mengsels met koperslak. De eerste piek is zichtbaar op Figuur 22. Nochtans werd ook een derde piek verwacht op basis van de beschouwingen in Taerwe en De Schutter (2006) en de puzzolane eigenschappen van de koperslak. Een eerste mogelijke verklaring hiervoor kan zijn dat de koperslak niet fijn genoeg gemalen was om als puzzolaan materiaal voldoende snel te reageren met het Ca(OH)_2 dat gevormd werd door de reactie van C_3S en C_2S met water. Zoals vermeld in 6.1.5 was de maalfijnheid van de koperslak zeker nog niet op het niveau van het cement. Een tweede mogelijke verklaring kan zijn dat koperslak geen derde piek veroorzaakt, maar eerder stelselmatig warmte vrijgeeft tijdens zijn hydratatie in plaats van een grote warmtevrijgave op een bepaald ogenblik tijdens de hydratatie. De eerste verklaring wordt deels gestaafd door het onderzoek van Tixier, Devaguptapu et al. (1997) die vonden dat het gebruik van koperslak ter vervanging van cement (in hun geval 15% vervanging) geen nadelige invloed had op de hydratatie. In dat onderzoek had de koperslak evenwel een intrinsieke specifieke oppervlakte van $9450 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ in vergelijking met cement dat een waarde van $10900 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ liet optekenen. Er werd gebruik gemaakt van de intrinsieke specifieke oppervlakte [cm^2/cm^3] en niet van de specifieke oppervlakte [m^2/g] omdat laatstgenoemde afhankelijk is van de volumemassa en deze verschilt voor koperslak en cement. Deze twee waarden liggen veel dichterbij elkaar dan de korrelverdelingen van koperslak en cement in dit onderzoek.

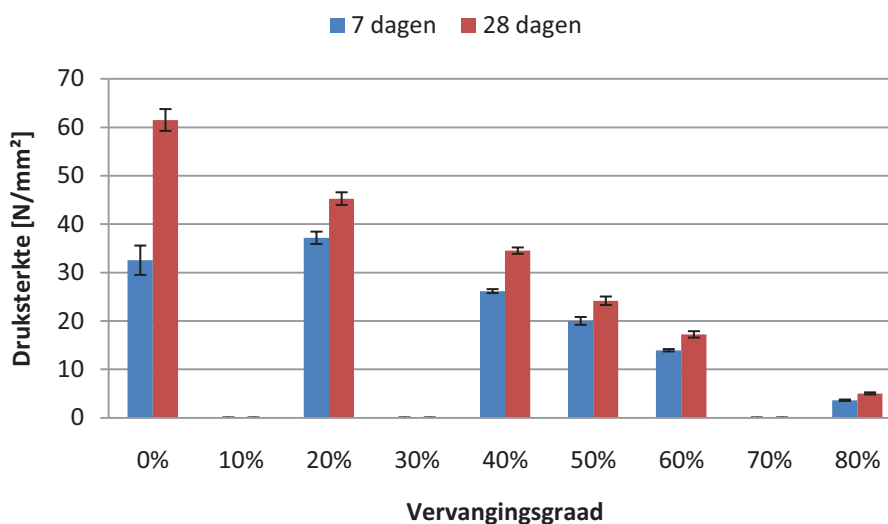
Daarnaast is ook goed te zien op Figuur 21 hoe de grootte van de tweede piek verkleint en verschuift in de tijd naarmate meer cement vervangen wordt door koperslak. Vanaf 70% vervanging kent de warmteproductie zelfs een zeer grillig verloop. Het kleiner zijn van de tweede piek is te verklaren door het feit dat er minder cement aanwezig is bij de hogere vervangingspercentages. De tweede piek valt immers toe te schrijven aan de hydratatie van C_3S en dit mineraal wordt aangeleverd door het cement. Des te minder cement in het mengsel, des te kleiner het gehalte aan C_3S dat kan hydrateren en dus des te kleiner de tweede piek.

De eerste piek was bij alle mengsels aanwezig zoals zichtbaar op Figuur 22. Omdat de calorimeter slechts om de minuut een meting uitvoert, is het moeilijk om iets te zeggen over de relatieve grootte van de eerste pieken tussen de verschillende mengsels onderling. Het kan namelijk gebeuren dat een mengsel zijn absolute piek bereikt tussen twee metingen in, terwijl een ander mengsel net een piekwaarde bereikt wanneer de calorimeter een meting uitvoert. Het is duidelijk dat deze twee gevallen dan moeilijk onderling vergelijkbaar zijn.

Het ontbreken van een tweede piek wanneer enkel gemalen koperslak gebruikt wordt, is te verklaren doordat in dit mengsel totaal geen cement aanwezig is en dus ook geen C_3S dat door hydratatie deze tweede piek veroorzaakt. De cumulatieve warmteproductie in Figuur 23 toont ten slotte dat de grootste totale warmteproductie plaatsvindt gedurende de tweede piek, tussen 10 en 20 uur na de start van de hydratatie. Het kleiner zijn van de tweede piek naarmate meer cement vervangen wordt door koperslak, vertaalt zich in het evenredig afnemen van de totale warmteproductie zoals kan gezien worden in Figuur 23: des te meer cement vervangen werd door koperslak, des te lager de totale warmteproductie.

4.1.2. Mortel

De invloed van koperslak ter vervanging van cement werd ook onderzocht door het vervaardigen van mortelproefstukken waarin een oplopend percentage van het cement vervangen werd door koperslak dat tot poeder vormalen werd. De verschillende mengsels staan beschreven in 3.2.2.2. Figuur 24 geeft de druksterkte van de proefstukken weer na 7 en 28 dagen. De resultaten werden ook onderworpen aan een statistische toets (ANOVA met behulp van SPSS) met $\alpha = 0,05$.



Figuur 24: Druksterkte na 7 en 28 dagen in functie van het percentage cement vervangen door koperslak

Zowel na 7 als na 28 dagen zijn alle waarden voor de druksterkte significant verschillend van elkaar. De hoogste druksterkte na 7 dagen wordt bereikt bij 20% vervanging, na 28 dagen wordt de hoogste waarde bereikt door de referentiemortel. De resultaten na 28 dagen (en ook deze na 7 dagen, op 20% vervanging na) tonen aan dat het gebruik van koperslak ter vervanging van cement absoluut geen meerwaarde bood in dit onderzoek. Er worden in Figuur 24 geen resultaten weergegeven voor

mortelproefstukken met 100% vervanging omdat deze proefstukken totaal geen sterkte hadden en uit elkaar brokkelden bij de minste aanraking.

De resultaten van deze proef zijn in overeenstemming met de resultaten uit 4.1.1 waar de hydratatiewarmte van cementpasta's met een oplopend percentage koperslak ter vervanging van cement bestudeerd werd. Die proef gaf aan dat er minder warmte geproduceerd wordt in de pasta's naarmate meer koperslak gebruikt wordt. Deze warmte is gerelateerd aan de vorming van reactieproducten die de sterkte van de pasta, de mortel of het beton bepalen. Dit resultaat vertaalt zich dan ook in een lagere druksterkte van de mortelproefstukken naarmate meer cement vervangen wordt door koperslak.

De verklaring voor het afnemen van de druksterkte is vermoedelijk dezelfde als in 4.1.1, met name dat de koperslak nog niet fijn genoeg gemalen is om als puzzolaan materiaal voldoende snel te reageren met het Ca(OH)_2 dat gevormd wordt door de reactie van C_3S en C_2S met water. Deze reactie zou secundair calciumsilicaathydraat (CSH) moeten vormen en zo de sterkte van het beton enigszins moeten verhogen. Zoals te zien in 6.1.5 was de maalfijnheid van de koperslak zeker nog niet op het niveau van het cement.

De resultaten van Tixier, Devaguptapu et al. (1997) doen vermoeden dat een hogere maalfijnheid de druksterkte inderdaad ten goede komt. In dat onderzoek werd gevonden dat de druksterkte van mortelproefstukken met koperslak ter vervanging van cement (5%, 10% en 15% vervanging in hun geval) steeg naarmate meer koperslak gebruikt werd. De koperslak was in dat onderzoek wel fijngemalen tot een intrinsieke specifieke oppervlakte van $9450 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ in vergelijking met een waarde van $10900 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ voor cement. Deze twee waarden liggen veel dichterbij elkaar dan de waarden voor de maalfijnheid in dit onderzoek.

Het uiteenbrokkelen van de proefstukken met 100% vervanging komt omdat deze proefstukken totaal geen cement bevatten. Dit cement is echter nodig om enige sterkte te verkrijgen door de vorming van CSH wanneer het hydrateert, en door het aanmaken van Ca(OH)_2 waarmee de koperslak verder kan reageren tot vorming van secundair CSH. Zelfs al zou de koperslak voldoende fijn gemalen zijn, dan nog zouden de proefstukken met 100% vervanging geen sterkte kennen door het ontbreken van cement voor de aanmaak van Ca(OH)_2 . Zoals vermeld in 4.1.1 kan alkali-activatie hier eventueel een oplossing bieden. Daarbij wordt Ca(OH)_2 van buitenaf aan het mengsel toegevoegd zodat de koperslak zelfs zonder cement kan reageren tot vorming van CSH.

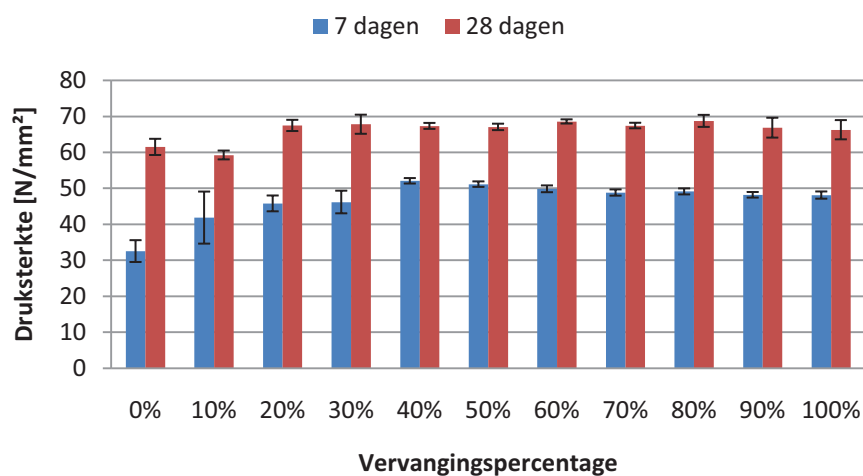
4.2. Koperslak ter vervanging van toeslagstoffen

4.2.1. Mortel (gebruik van koperslak als fijn granulaat)

Om de invloed van het gebruik van koperslak als fijn granulaat te onderzoeken, werden mortelproefstukken vervaardigd zoals beschreven in 3.2.2.1. Het normzand in de proefstukken werd met oplopende percentages vervangen door fijn koperslak waarvan de korrelverdeling gegeven werd in 2.1.2. In dit onderzoek werd enerzijds vervangen op basis van massa, en anderzijds op basis van volume. De resultaten in dit deel werden op hun significantie gecontroleerd ($\alpha = 0,05$) met behulp van het statistische programma SPSS.

4.2.1.1. Koperslak ter vervanging van zand op basis van massa

In Figuur 25 worden de resultaten weergegeven van de druksterkte op 7 en 28 dagen ouderdom. Hieruit blijkt dat op 7 dagen ouderdom, de druksterkte van de mortelproefstukken met koperslak significant stijgt in vergelijking met de referentiemortel zonder koperslak tot en met 40% vervanging. De hoogste waarde wordt ook bereikt bij dit percentage. De waarden bij 20% en 30% vervanging verschillen echter onderling niet significant. Vanaf 40% tot en met 100% vervanging, valt er geen significant verschil in de druksterkte meer te noteren. Vanaf 60% vervanging, zijn de waarden voor de druksterkte ook niet langer significant verschillend van de waarden bij 20% en 30% vervanging. Op 28 dagen ouderdom wordt de hoogste waarde voor de druksterkte teruggevonden bij 80% vervanging, al zijn de druksterktes vanaf 20% tot en met 100% vervanging niet significant verschillend van elkaar. De waarden van de druksterkte bij 0% en 10% vervanging, zijn significant lager dan bij alle andere percentages.



Figuur 25: Druksterkte van de mortelproefstukken waarbij zand vervangen werd door koperslak op basis van massa

Deze resultaten kunnen gelinkt worden aan wat gevonden werd door Al-Jabri, Al-Saidy et al. (2011), met name dat de druksterkte van mortelproefstukken met koperslak steeg ten opzichte van referentieproefstukken zonder koperslak tot en met 40% vervanging na 7 dagen. Na 28 dagen steeg de druksterkte tot en met 50% vervanging. Bij een hoger vervangingspercentage daalde de druksterkte opnieuw op beide leeftijden, maar deze bleef steeds hoger dan bij de referentiemortel zonder koperslak. Dit laatste is ook het geval in dit onderzoek, maar een significante daling van de druksterkte bij de hogere vervangingspercentages blijft achterwege. Enkel bij 10% vervanging ligt de waarde van de druksterkte na 28 dagen onder de waarde van de referentiemortel. Dit is misschien te wijten aan een onnauwkeurigheid bij het vervaardigen. Al-Jabri, Al-Saidy et al. (2011) meldden voorts nog dat langere uithardingstijden (56 en 90 dagen) geen nadelige invloed hadden op de druksterkte, dus het valt te verwachten dat ook in de periode na 28 dagen, de mortels met koperslak een grotere druksterkte zullen ontwikkelen dan de referentiemortel zonder koperslak.

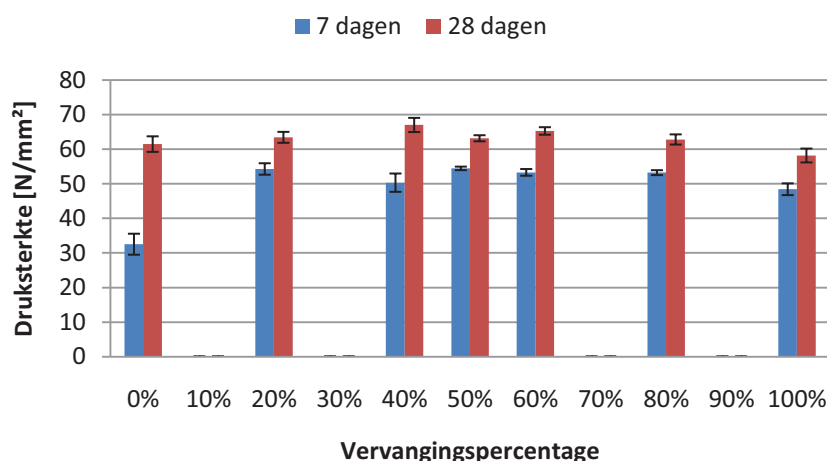
Het glazig oppervlak en de lagere waterabsorptie van de koperslak in vergelijking met het zand, zijn er de oorzaak van dat de sterkte van de mortels niet meer significant verder stijgt vanaf een bepaald vervangingspercentage (40% na 7 dagen, 20% na 28 dagen) (zie ook 2.4.1). Deze factoren zorgen immers voor meer vrij water in het beton waardoor de winst aan sterkte door toevoeging van koperslak verloren gaat. Een teveel aan vrij water bevordert immers de vorming van grotere poriën en wijdere

capillaire kanalen. Bij de laagste vervangingspercentages spelen deze factoren veel minder mee, en worden de mortels sterker dan de referentiemortel door de hogere sterkte van de koperslak in vergelijking met het zand.

Hoewel niet expliciet onderzocht in dit onderzoek, was het bij het produceren van de mortels zeer duidelijk dat de verwerkbaarheid significant steeg naarmate meer zand vervangen werd door koperslak. Dit is te verklaren door het glazig oppervlak en de lage waterabsorptie van de koperslak. Hierdoor is er meer vrij water in de mortels beschikbaar, wat uiteraard de verwerkbaarheid ten goede komt. Een teveel aan vrij water is dan weer nadelig voor de sterkte van de mortel zoals hierboven aangehaald.

4.2.1.2. Koperslak ter vervanging van zand op basis van volume

In 4.2.1.1 werd het normzand in de mortelproefstukken vervangen met behoud van de massa aan granulaten. Koperslak heeft echter een grotere volumemassa dan normzand (zie 3.2.2.1) waardoor vervanging bij gelijke massa een kleiner volume van de granulaten teweeg brengt. Daarom werd in dit onderzoek een tweede reeks proefstukken gemaakt waarbij vervangen werd met behoud van het volume van de granulaten. De samenstelling van de verschillende mengsels is opgenomen in 3.2.2.1 en de druksterkte na 7 en 28 dagen wordt weergegeven in Figuur 26.



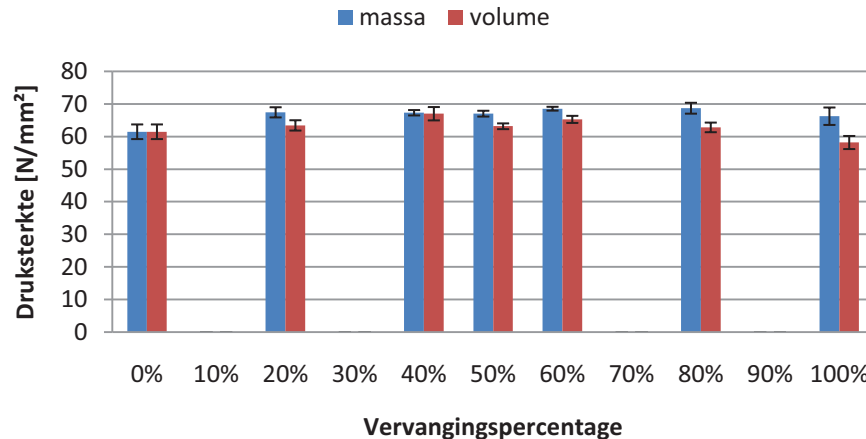
Figuur 26: Druksterkte van de mortelproefstukken waarbij zand vervangen werd door koperslak (op basis van volume)

Na 7 dagen werd de grootste druksterkte opgemeten bij 50% vervanging. Deze waarde is echter niet significant verschillend van de druksterkte bij 20%, 60% of 80% vervanging. De druksterkte van de referentiemortel is significant lager dan de waarde bij alle andere proefstukken. De waarden van de druksterkte bij 40% en 100% vervanging zijn ten slotte niet significant van elkaar verschillend, maar verschillen wel significant van de waarde bij alle andere proefstukken. De grootste waarde voor de druksterkte na 28 dagen werd teruggevonden bij 40% vervanging, de waarde bij 60% verschilt hier niet significant van. De waarden van de druksterkte bij de andere vervangingspercentages liggen dicht bij elkaar, enkel de waarde bij 100% vervanging is significant lager dan alle andere.

Net zoals bij de vervanging op basis van massa, was het ook bij de vervanging op basis van volume duidelijk dat de verwerkbaarheid significant steeg naarmate meer zand vervangen werd door koperslak. Dit kwam opnieuw door het teveel aan vrij water dat ontstond bij deze vervanging.

4.2.1.3. Vergelijking tussen beide vervangingsmethoden

Het patroon van de druksterkte in functie van het vervangingspercentage in 4.2.1.2 verschilt niet zo veel van het patroon dat vastgesteld werd in 4.2.1.1. Bij beide stijgt de druksterkte eerst met het vervangingspercentage om nadien, na een bepaald percentage, gelijk te blijven of eventueel lichtjes te dalen. Toch loont het de moeite om de waarden van de druksterkte voor beide methoden naast elkaar te plaatsen. Dit wordt weergegeven in Figuur 27 voor een ouderdom van 28 dagen.



Figuur 27: Vergelijking tussen vervanging op basis van massa en op basis van volume na 28 dagen

De grafiek toont aan dat de druksterkte van de mortelproefstukken steeds groter is bij vervanging op basis van massa dan bij vervanging op basis van volume. Dit kan verklaard worden door de verschillende relatieve volumes in beide mengsels. Wanneer vervangen wordt op basis van volume, blijft de volumeverhouding cement/granulaat van de mortelproefstukken steeds gelijk. Wanneer echter vervangen wordt op basis van massa, wordt het volume van de fijne granulaten kleiner naarmate het vervangingspercentage stijgt door de grotere volumemassa van koperslak in vergelijking met normzand. Het volume cement blijft echter gelijk. Op die manier stijgt de volumeverhouding cement/granulaat en worden de mortelproefstukken sterker in vergelijking met dezelfde vervangingspercentages bij vervanging op basis van volume. Het hoeft dan ook niet te verbazen dat de grootste winst aan sterkte tussen de twee methoden opgemeten werd bij 80% vervanging (9,38% winst) en 100% vervanging (13,88% winst).

4.2.2. Beton (gebruik van koperslak als fijn en grof granulaat)

De invloed van koperslak als granulaat in beton werd onderzocht door het maken van zes betonmengsels. De eerste twee zijn referentiemengsels zonder koperslak, het eerste met een W/C-factor gelijk aan 0,45, het tweede met een W/C-factor gelijk aan 0,50. Bij het derde en vierde mengsel werd respectievelijk 20% en 40% van de totale massa aan granulaten vervangen door fijne koperslak, bij de laatste twee mengsels werd respectievelijk 20% en 40% van de totale massa aan granulaten vervangen door grof koperslak.

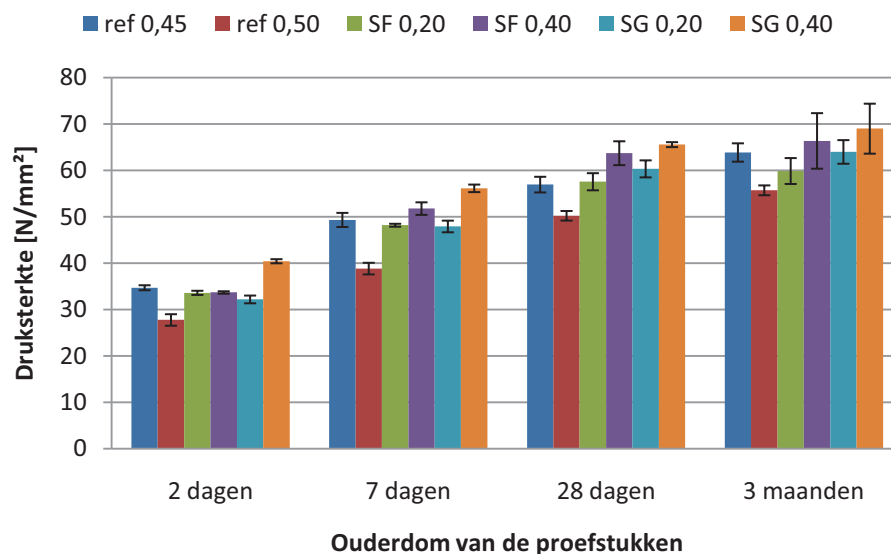
De verschillende betonmengsels werden beproefd op hun druksterkte, porositeit, gaspermeabiliteit, weerstand tegen carbonatatie, weerstand tegen dooizouten, weerstand tegen de diffusie van chloriden en vorstbestendigheid. De manier waarop dit alles gebeurde, staat beschreven in 3.2.3.2.

Granulaten vormen een zeer belangrijke component in beton, aangezien ze meer dan 75% van de betonmassa uitmaken. Zoals vermeld in 1.1 moeten er dringend alternatieven gezocht worden voor natuurlijke granulaten om een vernietiging van het milieu te voorkomen. Koperslak kan één van deze alternatieven zijn, en daarom werd de invloed van het gebruik van koperslak als granulaat op de eigenschappen van beton onderzocht.

Ook in dit onderdeel werden de resultaten van de verschillende proeven bestudeerd met behulp van het statistische programma SPSS (ANOVA met $\alpha = 0,05$).

4.2.2.1. Druksterkte

Alle betonmengsels werden beproefd op 2 dagen, 7 dagen, 28 dagen en 3 maanden ouderdom. Per mengsel werden op elke ouderdom 3 proefstukken getest om een gemiddelde waarde en een standaardafwijking te bekomen. Figuur 28 geeft de druksterkte van alle mengsels weer in functie van de tijd.



Figuur 28: Druksterkte van alle mengsels na 2, 7, 28 dagen en 3 maanden

Een eerste vaststelling die kan gemaakt worden, is dat de druksterkte van ref 0,50 steeds significant lager is dan de druksterkte van ref 0,45. Dit is logisch want een hogere W/C-factor zorgt voor een grotere porositeit in het verhard beton en dus voor een lagere sterkte. Tevens heeft ref 0,50 een lager cementgehalte per eenheid van volume dan ref 0,45 en ook minder cement betekent een lagere sterkte. Aangezien alle betonmengsels met gebruik van koperslak vervaardigd werden met een W/C-factor gelijk aan 0,45, is het interessanter om de waarden van de druksterkte van deze mengsels te vergelijken met die van ref 0,45, dan met die van ref 0,50. De koperslakmengsels hadden daarnaast ook hetzelfde cementgehalte per eenheid van volume als ref 0,45.

Op een ouderdom van 2 dagen hebben, op SG 0,40 met een significant hogere waarde na, alle betonmengsels met koperslak een lagere druksterkte dan ref 0,45 hoewel het verschil enkel voor SG 0,20 significant is. Vanaf een ouderdom van 7 dagen begint dit te wijzigen. Naast SG 0,40 heeft nu ook SF 0,40 een significant hogere druksterkte dan ref 0,45. De druksterktes van SF 0,20 en SG 0,20 blijven nog steeds lager dan de waarde bij ref 0,45, maar het verschil is nu ook voor SG 0,20 niet langer significant.

Na 28 dagen laten alle mengsels met koperslak een hogere druksterkte optekenen dan het referentiebeton ref 0,45; het verschil is echter niet significant voor SF 0,20 en SG 0,20. Deze trend van het steeds sterker worden van het beton met koperslak in vergelijking met het referentiebeton, uit zich echter niet verder op een ouderdom van 3 maanden. SF 0,20 heeft immers opnieuw een lagere druksterkte dan ref 0,45 hoewel het verschil niet significant is, en de andere mengsels hebben wel een hogere druksterkte dan het referentiebeton, maar de significante verschillen van op 28 dagen ouderdom zijn verdwenen. Hoe dan ook kan uit de vergelijking van de druksterktes opgemaakt worden dat het gebruik van koperslak als granulaat vergelijkbare of zelfs betere resultaten oplevert voor de druksterkte dan het referentiebeton, en koperslak dus geen uitgesproken negatieve invloed heeft op deze druksterkte, zeker wanneer hoge sterktes op jonge leeftijd niet het allerbelangrijkste zijn.

Een vergelijking tussen de gebruikte percentages, 20% en 40%, leert dat het gebruik van het hogere percentage ook steeds een hogere gemiddelde druksterkte oplevert. Voor het gebruik van koperslak als grof granulaat is het verschil tussen de beide percentages enkel niet significant op een ouderdom van 3 maanden, voor het gebruik als fijn granulaat is het verschil zowel na 2 dagen als na 3 maanden niet significant, maar na 7 en 28 dagen wel. Het lijkt er dus op dat een hoger vervangingspercentage, een positieve invloed heeft op de druksterkte van het beton. De verklaring hiervoor wordt verderop in dit deel gegeven.

In Al-Jabri, Hisada et al. (2009a), Wu, Zhang et al. (2010b) en Al-Jabri, Al-Saidy et al. (2011) werd het effect van koperslak als fijn granulaat op de druksterkte van beton onderzocht bij een gelijkblijvende W/C-factor, zoals ook in dit onderzoek het geval. Afhankelijk van het onderzoek, werd een hogere druksterkte teruggevonden in vergelijking met het referentiebeton bij gedeeltelijk vervangen van het zand door koperslak tot en met 40%, 50% of 60% vervanging. Bij hogere vervangingspercentages zakte de druksterkte opnieuw. In 4.2.1 werd verder aangetoond dat meer dan 40% vervanging van het zand door koperslak in mortels, geen verdere stijging van de druksterkte meer met zich meebrengt of deze zelfs opnieuw doet dalen. Ten slotte toonde het onderzoek door Khanzadi en Behnood (2009) van het gebruik van koperslak als grof granulaat aan dat ook dit gebruik resulteert in een verhoogde druksterkte van het beton. De resultaten in dit onderzoek voor de druksterkte van beton met koperslak, zijn in overeenstemming met al deze bevindingen.

De verklaring die gegeven wordt in Al-Jabri, Hisada et al. (2009a), Wu, Zhang et al. (2010b) en Al-Jabri, Al-Saidy et al. (2011) voor het stijgen van de druksterkte tot en met een bepaald percentage, kan ook in dit onderzoek gebruikt worden om de trend van de druksterkte te verklaren. Koperslak heeft een grotere samendrukbaarheid dan natuurlijke granulaten, waardoor het bijgevolg meer kracht kan opnemen bij belasting van het beton. Daarnaast helpt koperslak door zijn scherpe randen om de cohesie van de betonmatrix te verbeteren. Natuurlijke granulaten hebben na jaren van verwerking afgeronde hoeken, en dit kan nadelig zijn voor die cohesie. Een vervanging van de granulaten door koperslak lijkt dus nuttig.

Dit is inderdaad zo, maar te veel natuurlijke granulaten vervangen door koperslak doet de sterkte van het beton terug dalen. Wanneer de koperslak immers het dominant granulaat wordt in het beton, zorgen het glazige oppervlak en de lage waterabsorptie voor meer vrij water in het beton na hydratatie. Dit vrij water zorgt dan weer voor meer poriën en wijdere capillaire kanalen, die de cohesie en de sterkte van het beton nadelig beïnvloeden. In dit onderzoek werd maximaal 40% van de natuurlijke granulaten vervangen door koperslak, en daarom is enkel een stijgende trend waar te nemen in de druksterkte van het beton naarmate meer koperslak gebruikt wordt.

Opvallend is dat in 4.2.1 werd aangetoond dat de druksterkte van mortelproefstukken met koperslak als fijn granulaat stijgt tot en met een bepaald vervangingspercentage, waarna de waarde gelijk blijft of lichtjes daalt. De resultaten voor beton in Al-Jabri, Hisada et al. (2009a), Wu, Zhang et al. (2010b) en Al-Jabri, Al-Saidy et al. (2011) verschillen hiervan doordat in deze onderzoeken de waarde van de druksterkte opnieuw significant daalde bij de hogere vervangingspercentages. Een verklaring voor dit verschil kan volgens Al-Jabri, Al-Saidy et al. (2011) gezocht worden in de binding tussen de deeltjes in de cementpasta die beter is in mortels dan in beton. Het gebruik van grove granulaten speelt volgens hen ook een niet nader gespecificeerde rol. De hogere porositeit van beton in vergelijking met mortel verzwakt verder de binding tussen de verschillende componenten, wat de sterkte uiteraard doet dalen.

Tot slot kan er een vergelijking gemaakt worden tussen het gebruik van koperslak als fijn en als grof granulaat. Bij 20% vervanging groeit de waarde van SG 0,20 met de tijd boven de waarde van SF 0,20 uit, maar zelfs na 3 maanden ouderdom is het verschil nog niet significant. Bij 40% vervanging manifesteert zich een ander patroon: na 2 en 7 dagen is de druksterkte van SG 0,40 significant hoger dan die van SF 0,40, maar in de loop der tijd groeien beide waarden naar elkaar toe, zodat na 28 dagen en na 3 maanden, het verschil niet langer significant is hoewel SG 0,40 sterker blijft dan SF 0,40. De conclusie kan dus zijn dat het gebruik van koperslak als grof granulaat hogere waarden oplevert voor de druksterkte van beton dan wanneer het gebruikt wordt als fijn granulaat, maar het verschil tussen beide was in het tijdsbestek van deze proef, op de hoogste ouderdom niet significant.

4.2.2.2. Porositeit

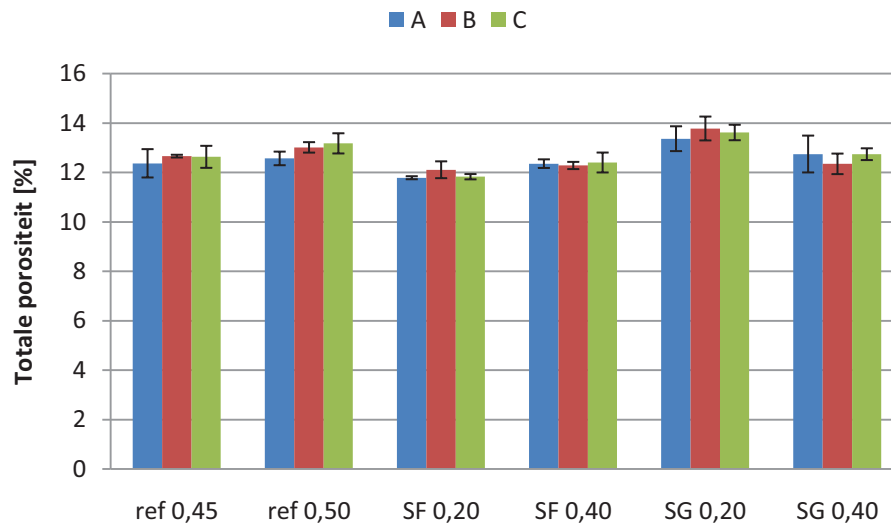
De porositeit van het beton werd opgemeten door middel van een vacuümverzadiging zoals uiteengezet in 3.2.3.2. Met de verzadiging werd een grove schatting gemaakt van de capillaire en de totale porositeit van het beton. Het verschil tussen beide is dan de gelporositeit. Het is echter vooral de capillaire porositeit die de duurzaamheid van het beton bepaalt omdat het via dit poriënnetwerk is dat agressieve stoffen het beton gemakkelijk binnendringen.

Er werden twee methoden gehanteerd. In een eerste methode werden de proefstukken eerst gedroogd en dan verzadigd, in een tweede methode werden de rollen omgedraaid en werden de proefstukken eerst verzadigd alvorens ze te drogen.

a) Invloed van het blootstellingsvlak

Figuur 29 geeft het verschil tussen de drie blootstellingsvlakken weer voor wat betreft de totale porositeit, bepaald volgens de eerste methode. Los van de verschillen tussen de zes mengsels onderling, valt op dat voor elk mengsel apart de verschillen tussen de drie blootstellingsvlakken nooit significant zijn en er geen duidelijke trend waar te nemen is. Ook voor de capillaire porositeit en de gelporositeit is

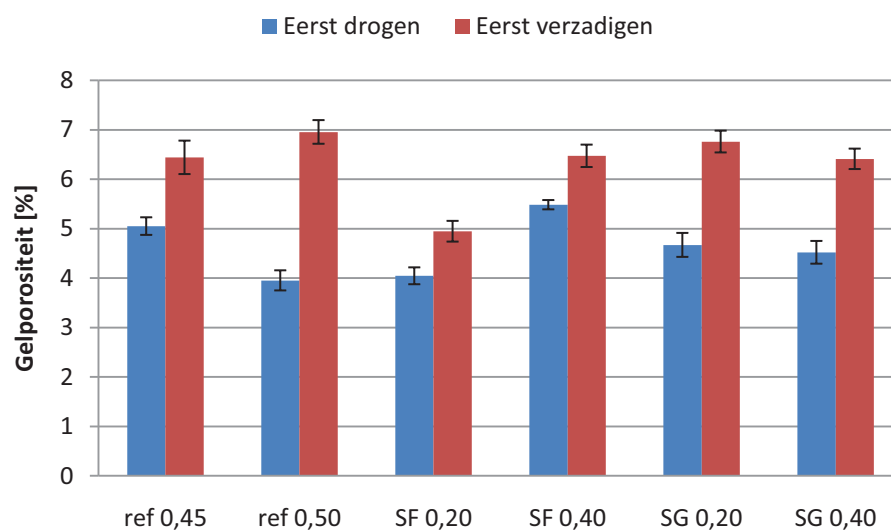
dit het geval, de grafieken hiervan zijn opgenomen in 6.2. Er kan daarom gesteld worden dat de resultaten quasi onafhankelijk zijn van de soort proefstukken. Om die reden worden hierna de resultaten van de proefstukken A, B en C samen genomen, wat de statistieken uiteraard ten goede komt door het groter aantal resultaten.



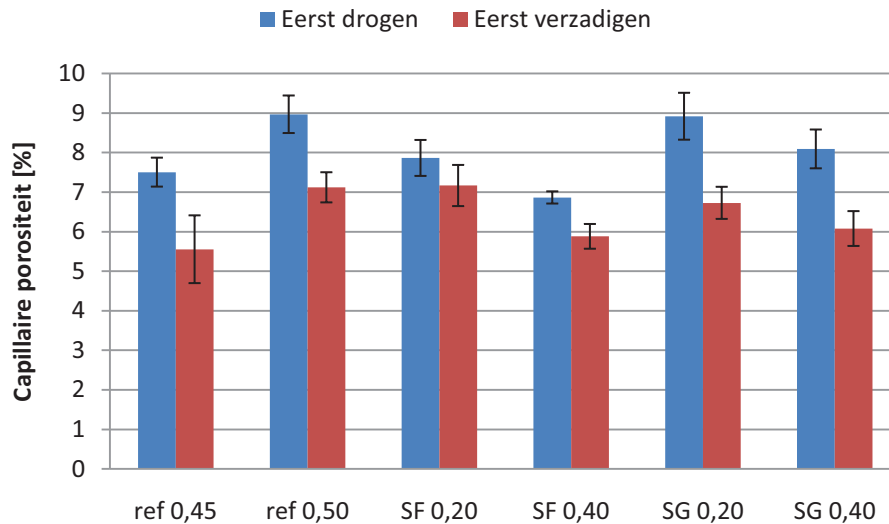
Figuur 29: Totale porositeit van alle mengsels voor de drie blootstellingsvlakken [eerst droging, daarna verzadiging]

b) Invloed van de gehanteerde methode

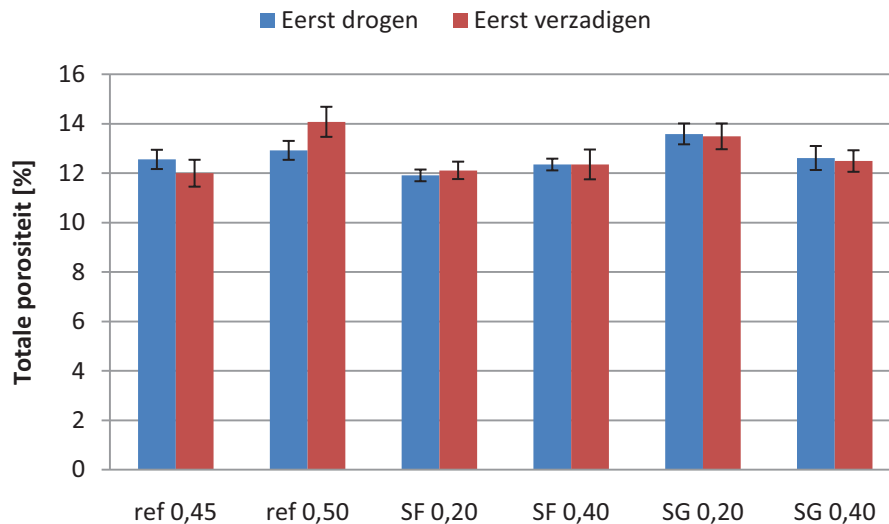
Naast de eerste methode, werd de tweede methode toegepast om na te gaan of het drogen van de proefstukken een invloed heeft op de poriënstructuur van het beton. Figuur 30, Figuur 31 en Figuur 32 geven achtereenvolgens een vergelijking tussen de twee methoden wat betreft de gelporositeit, de capillaire porositeit en de totale porositeit voor de verschillende betonmengsels.



Figuur 30: Vergelijking tussen eerste en tweede methode op basis van de gelporositeit



Figuur 31: Vergelijking tussen eerste en tweede methode op basis van de capillaire porositeit



Figuur 32: Vergelijking tussen eerste en tweede methode op basis van de totale porositeit

Figuur 30 toont dat de gelporositeit in elk mengsel hoger is wanneer de proefstukken eerst worden verzadigd dan wanneer ze eerst worden gedroogd, en het verschil is overall significant. Figuur 31 toont dan weer het tegenovergestelde voor de capillaire porositeit. Deze is steeds hoger wanneer de proefstukken eerst worden gedroogd dan wanneer ze eerst worden verzadigd. Figuur 32 tot slot geeft de totale porositeit weer, vergeleken tussen de twee methoden. De verschillen zijn eerder klein. Het feit dat de totale porositeit hoger is bij ref 0,50 dan bij ref 0,45 voor beide methoden, is logisch want een hogere W/C-factor zorgt immers voor meer poriën in het verhard beton.

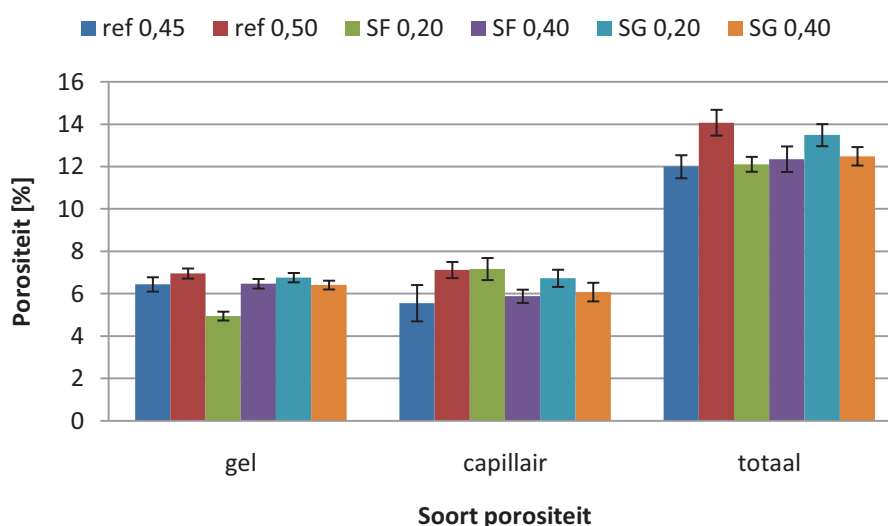
Samenvattend kan dus gesteld worden dat de proefmethode een invloed heeft op de capillaire en gelporositeit van het beton. Worden de proefstukken eerst gedroogd en dan pas verzadigd, dan hebben ze een lagere gelporositeit en een hogere capillaire porositeit dan wanneer de proefstukken eerst worden verzadigd en dan pas gedroogd. Het drogen van de proefstukken heeft dus zeker een invloed op

de poriënstructuur van het beton. De invloed van de twee methoden op de totale porositeit is te verwaarlozen.

Bij de eerste methode heeft het beton een grotere capillaire porositeit en is het dus vatbaarder voor schadelijke stoffen van buitenaf. Maar het beton ondergaat in deze methode mogelijks een wijziging van zijn poriënstructuur alvorens de porositeit ervan bepaald wordt en is dus minder representatief voor de werkelijkheid. Daarom wordt voor de verdere resultaten gebruik gemaakt van de resultaten gevonden met de tweede methode.

c) Invloed van het gebruik van koperslak

Het doel van het bepalen van de porositeit was natuurlijk in de eerste plaats de invloed van het gebruik van koperslak op die porositeit na te gaan. In het bijzonder is vooral de invloed op de capillaire porositeit van belang aangezien het langs dit poriënnetwerk is dat agressieve stoffen het beton binnendringen. Figuur 33 geeft de verschillende soorten porositeit weer voor de zes betonmengsels. De porositeit van de mengsels met koperslak wordt getoetst aan de waarden bij ref 0,45 omdat ze dezelfde W/C-factor hebben, met name 0,45.



Figuur 33: Vergelijking van de porositeit voor de verschillende mengsels

Wat de gelporositeit betreft, hebben enkel SF 0,20 en SG 0,40 een lagere waarde dan ref 0,45. Het verschil is echter alleen bij SF 0,20 significant. De andere mengsels hebben een grotere gelporositeit dan ref 0,45, hoewel het verschil nooit significant is. Er kan dus gesteld worden dat de gelporositeit voor geen enkel mengsel, op SF 0,20 na, significant verschilt van de waarde bij ref 0,45. De waarde bij SF 0,20 verschilt ook significant van die bij de andere mengsels met koperslak, die voor het overige onderling geen significante verschillen laten optekenen.

Voor de capillaire porositeit wordt de laagste waarde teruggevonden bij ref 0,45. De mengsels met koperslak hebben allemaal een hogere waarde, al is het verschil enkel significant voor SF 0,20 en SG 0,20. Toch zijn de verschillen ook hier eerder beperkt. Voor de mengsels onderling zijn de waarden bij SF 0,20 en SG 0,20 significant groter dan de waarden bij SF 0,40 en SG 0,40.

Ook voor de totale porositeit wordt de laagste waarde opgemeten bij het referentiebeton ref 0,45. Enkel de waarde bij SG 0,20 is echter significant groter. Deze waarde is ook significant groter dan de totale porositeit van de andere mengsels met koperslak.

Op basis van theoretische overwegingen kon verwacht worden dat, ten opzichte van het referentiebeton ref 0,45, de gelporositeit van het beton met koperslak zou dalen, terwijl de capillaire en de totale porositeit zouden stijgen. De verklaring voor deze verwachting is terug te brengen op de W/C-factor. Hoewel de W/C-factor in al de mengsels met koperslak gelijk genomen werd aan 0,45 zoals bij ref 0,45, heeft het gebruik van koperslak hier een effect op. Het glazig oppervlak en de lage waterabsorptie van koperslak zorgen er immers voor dat er meer vrij water overblijft in het beton en dat bijgevolg de verwerkbaarheid stijgt. De werkelijke W/C-factor wordt op die manier artificieel verhoogd.

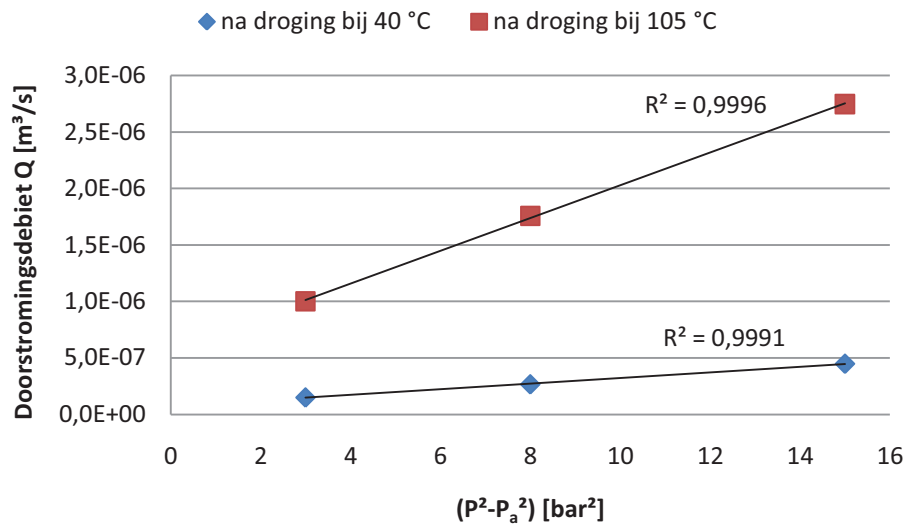
Nu leidt een hogere W/C-factor zoals geweten tot een grotere porositeit omdat er meer vrij water in het beton overblijft dat noch chemisch, nog fysisch gebonden wordt. Dit water zal zich deels in de capillaire holten vestigen en dus zal beton met een hogere W/C-factor naast een grotere totale porositeit, ook een hogere capillaire porositeit vertonen. Omdat het cement bij een hogere W/C-factor meer water tot zijn beschikking heeft om te reageren, zullen er ook meer hydratatieproducten aangemaakt worden en zal op die manier de gelporositeit dalen. Door het vele water duurt het wel langer voor er een doorlopende microstructuur van hydratatieproducten gevormd wordt, en de hogere porositeit zorgt voor een zwakker beton.

Aan deze theoretische verwachtingen wordt echter niet voldaan in dit onderzoek. De gelporositeit is slechts voor één van de mengsels met koperslak significant lager dan de waarde bij ref 0,45, en hoewel de capillaire en de totale porositeit in alle mengsels met koperslak hoger zijn dan bij ref 0,45, is ook dat verschil over het algemeen niet significant. Het algemene besluit van deze proef kan dan ook zijn dat het gebruik van koperslak ter vervanging van de granulaten, geen significante invloed heeft op de porositeit van het beton.

4.2.2.3. Gaspermeabiliteit

De gaspermeabiliteit van de verschillende betonmengsels werd bepaald zoals uiteengezet in 3.2.3.2 en dit na droging bij 40 °C en 105 °C. Dit om de permeabiliteit van de mengsels te vergelijken bij twee verschillende verzadigingsgraden S [%], aangezien S in grote mate de permeabiliteit van het beton bepaalt. De verzadigingsgraad na droging bij 105 °C werd gelijk genomen aan 0%.

In eerste instantie wordt de aanname van laminaire stroming gecontroleerd door het uitzetten van het doorstromingsdebiet Q [m^3/s] in functie van $(P^2 - P_a^2)$ [bar^2]. Figuur 34 geeft deze grafiek voor het mengsel SF 0,20 na droging bij 40 °C en 105 °C. In de grafiek is ook een lineaire trendlijn weergegeven met bijhorende correlatiecoëfficiënt R^2 . Het moge door de grote waarde van R^2 duidelijk zijn dat het lineair verband zeer sterk aanwezig is. Dit is ook het geval voor alle andere mengsels dus formule (3.6) mag gebruikt worden voor het bepalen van de gaspermeabiliteit van de betonmengsels.



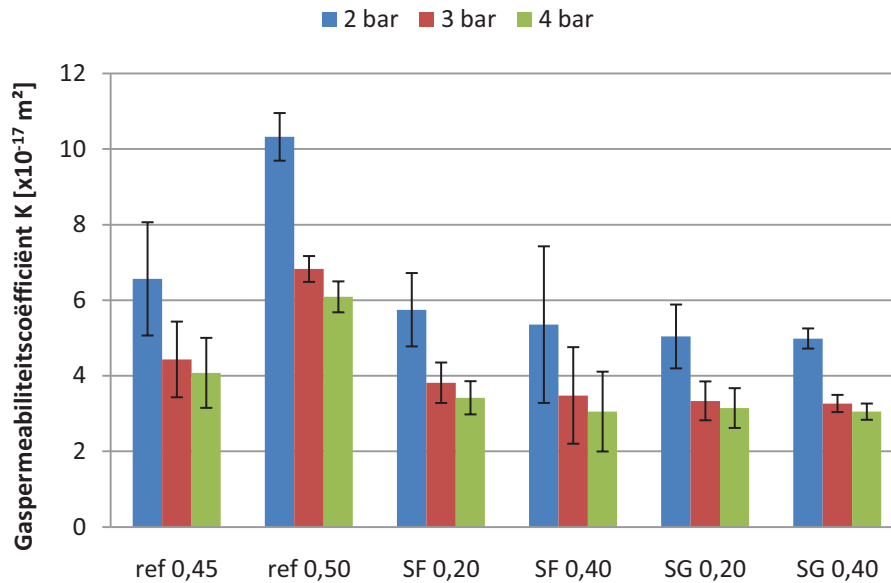
Figuur 34: Doorstromingsdebiet Q na droging bij 40 °C en bij 105 °C voor SF 0,20

In tweede instantie wordt nagegaan of de verzadigingsgraad van de verschillende mengsels in dezelfde range ligt. Dit is belangrijk want de verzadigingsgraad heeft een invloed op de gaspermeabiliteit van het beton. Tabel 9 geeft de verzadigingsgraden voor alle mengsels na droging bij 40 °C en 105 °C.

Tabel 9: Verzadigingsgraden [%] na droging bij 40 °C en 105 °C

	ref 0,45	ref 0,50	SF 0,20	SF 0,40	SG 0,20	SG 0,40
Droging bij 40 °C	42,28	37,06	40,78	44,97	40,84	41,34
Droging bij 105 °C	0	0	0	0	0	0

Statistische analyse van deze tabel leert dat de verzadigingsgraad van ref 0,45 en alle mengsels met koperslak onderling niet significant verschilt. De resultaten voor de gaspermeabiliteit kunnen dus vergeleken worden tussen deze mengsels. Er wordt voor de mengsels met koperslak vergeleken met het referentiebeton ref 0,45 omdat dit beton dezelfde W/C-factor heeft. De W/C-factor is in grote mate bepalend voor de porositeit van het beton en de porositeit heeft dan weer een grote invloed op de gaspermeabiliteit. De gaspermeabiliteit van de mengsels na droging bij 40 °C is weergegeven in Figuur 35.

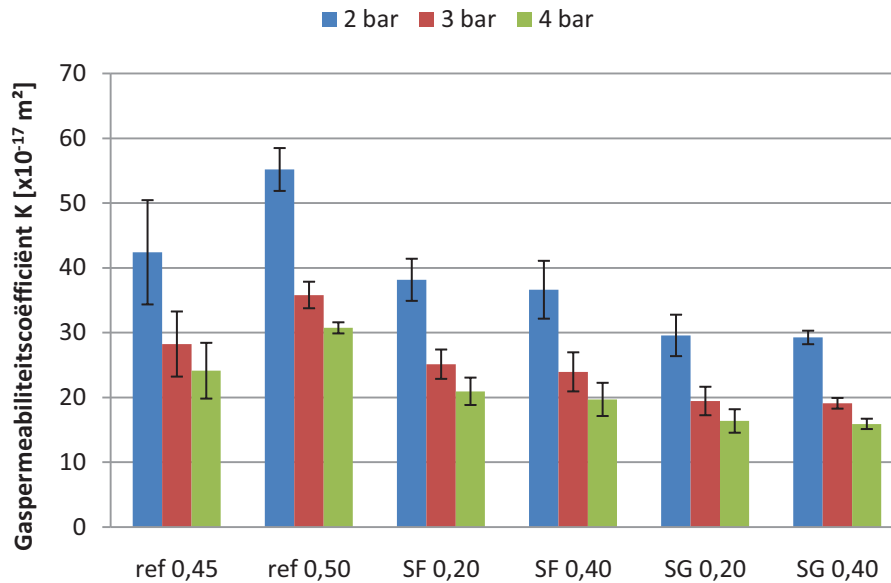


Figuur 35: Gaspermeabiliteitscoëfficiënt na droging bij 40 °C [verzadigingsgraad = $\pm 40\%$]

Bij alle betonmengsels neemt de schijnbare gaspermeabiliteitscoëfficiënt $K [m^2]$ af onder toenemende druk. Dit is in overeenstemming met RILEM TC 116-PCD (1999) en wijst op de afwezigheid van lekken. Volgens Boel (2006) is dit verder een tweede reden om aan te nemen dat de aanname van laminaire stroming correct is.

Het patroon van de permeabiliteit is ongeveer gelijk voor de drie aangelegde drukken van het zuurstofgas. De keuze wordt hier gemaakt om de mengsels onderling te vergelijken bij een aangelegde druk van 3 bar, maar de resultaten zullen analoog zijn wanneer vergeleken wordt bij een aangelegde druk van 2 of 4 bar. Statistische analyse van de resultaten toont aan dat de gaspermeabiliteit van alle mengsels met koperslak lager is dan de waarde bij ref 0,45 maar dat het verschil nooit significant is. Ook het verschil tussen de mengsels met koperslak onderling is nooit significant te noemen.

De gaspermeabiliteit van de mengsels na droging bij 105 °C is weergegeven in Figuur 36. Na drogen aan deze temperatuur wordt een verzadigingsgraad van 0% aangenomen. Het is ook in deze figuur duidelijk dat het patroon van de gaspermeabiliteit bijna niet afhankelijk is van de aangelegde druk. Daarom wordt ook hier de vrije keuze gemaakt om verder te redeneren bij een aangelegde druk van 3 bar.



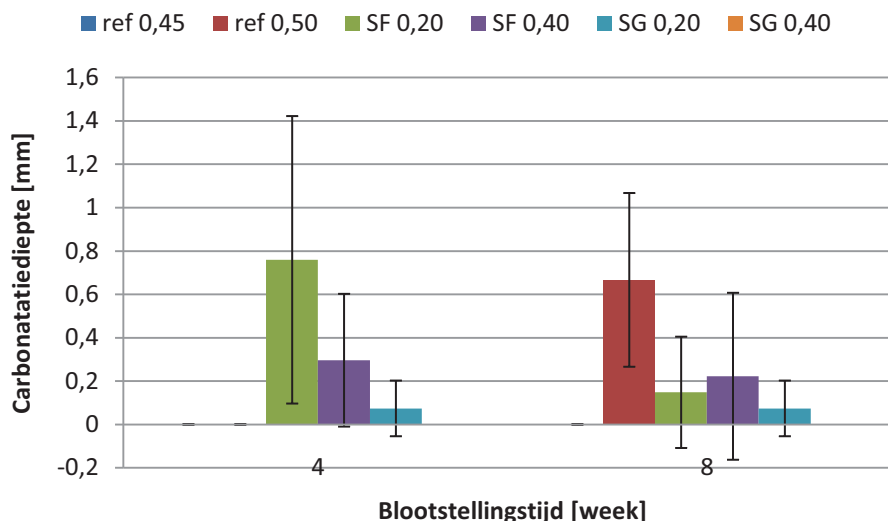
Figuur 36: Gaspermeabiliteitscoëfficiënt na droging bij 105 °C [verzadigingsgraad = 0% aangenomen]

Ook nu heeft het referentiebeton ref 0,45 een hogere waarde voor de gaspermeabiliteit dan de mengsels met koperslak. Ditmaal is het verschil tussen deze waarde en de waarde bij SG 0,20 en SG 0,40 echter significant. De mengsels met koperslak verschillen onderling niet significant van elkaar.

Als algemene conclusie van deze paragraaf kan gesteld worden dat het gebruik van koperslak als granulaat in beton, geen significante invloed heeft op de gaspermeabiliteit van dat beton. Deze vaststelling, gekoppeld aan het besluit uit 4.2.2.2 dat ook de porositeit van beton niet significant beïnvloed wordt door het gebruik van koperslak, leidt er toe om te stellen dat het vervangen van natuurlijke granulaten door koperslak, de transporteigenschappen van beton niet zal verslechteren. Het valt dan ook te verwachten dat de weerstand van het beton met koperslak tegen carbonatatie (binnendringen van CO_2) en tegen de diffusie van chloriden niet veel zal verschillen van de overeenkomstige waarde bij het referentiebeton.

4.2.2.4. Weerstand tegen carbonatatie

De weerstand van de zes betonmengsels tegen carbonatatie werd, zoals uiteengezet in 3.2.3.2, opgemeten met behulp van een carbonatatiekast, waar steeds 10 vol% CO_2 in de lucht aanwezig was. Per betonmengsel werden er drie proefstukken in de kast geplaatst. Met een tussentijd van vier weken werd van de proefstukken een plakje van 1 cm afgezaagd en door middel van fenolftaleïne werd het carbonatatiefront zichtbaar gemaakt. Wegens de beperkte tijd voor dit onderzoek, werden de betonmengsels slechts onderzocht op carbonatatie na 4 en 8 weken blootstelling. Het resultaat hiervan is weergegeven in Figuur 37.



Figuur 37: Carbonatatie diepte voor de zes betonmengsels na 4 en 8 weken

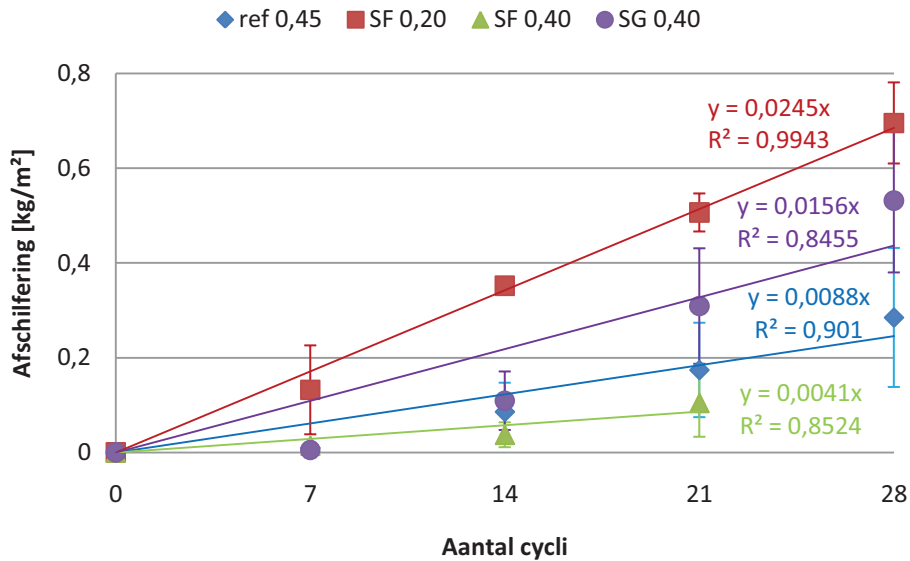
Bij ref 0,45 en SG 0,40 werd nooit carbonatatie waargenomen. De carbonatatie waargenomen in de overige proefstukken is eerder gering, maar kent een grote spreiding. Een negatieve carbonatatie diepte is natuurlijk onmogelijk; het feit dat de standaardafwijkingen op de gevonden waarden in het geval van SF 0,20, SF 0,40 en SG 0,20 groter zijn dan de waarden zelf, zorgt er echter voor dat de spreiding op de resultaten tot onder de abscis gaat.

Voor het bepalen van de weerstand tegen carbonatatie, moet volgens NBN EN 206-1 (2001) vergeleken worden met ref 0,50 (zie 3.2.3.2), maar uit de waarden en standaardafwijkingen van Figuur 37 kan weinig concrete informatie gehaald worden. Een meer uitgebreid en langdurig onderzoek is dan ook nodig om de weerstand tegen carbonatatie van het beton met koperslak te bepalen.

4.2.2.5. Weerstand tegen dooizouten

De weerstand van het beton tegen de combinatie van vorst en dooizouten werd beproefd zoals bepaald in 3.2.3.2. Door een defect aan de vorst-dooikast werden voor SG 0,20 enkel resultaten opgemeten na 7 cycli terwijl de norm NBN B 15-100 (2008) 28 cycli voorschrijft. Deze resultaten worden dan ook weggelaten wegens weinig relevant. Door hetzelfde defect konden voor SF 0,40 enkel resultaten worden opgemeten tot en met 21 cycli. Deze resultaten worden hier wel weergegeven, omdat zij toch al toelaten een bepaalde trend te onderkennen.

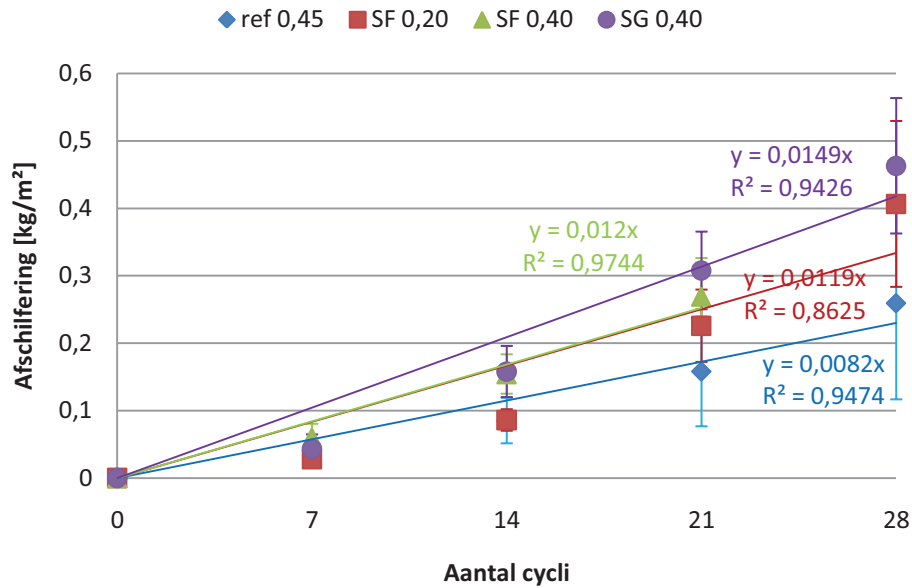
Volgens NBN EN 206-1 (2001) is ref 0,45 het referentiebeton voor deze proef en volgens NBN B 15-100 (2008) mag het gemiddelde massaverlies van de betonmengsels met koperslak, niet meer dan 1,2 maal het massaverlies van dit referentiebeton bedragen opdat koperslak zou voldoen als granulaat. Deze proef werd dan ook niet uitgevoerd voor ref 0,50. Het resultaat voor de proefstukken A wordt weergegeven in Figuur 38. Voor elk mengsel werd tevens een lineaire trendlijn toegevoegd, om een idee te verkrijgen over de tendens van de afschilfering en om de verschillende mengsels onderling te kunnen vergelijken.



Figuur 38: Afschilfering van de proefstukken A in functie van het aantal cycli

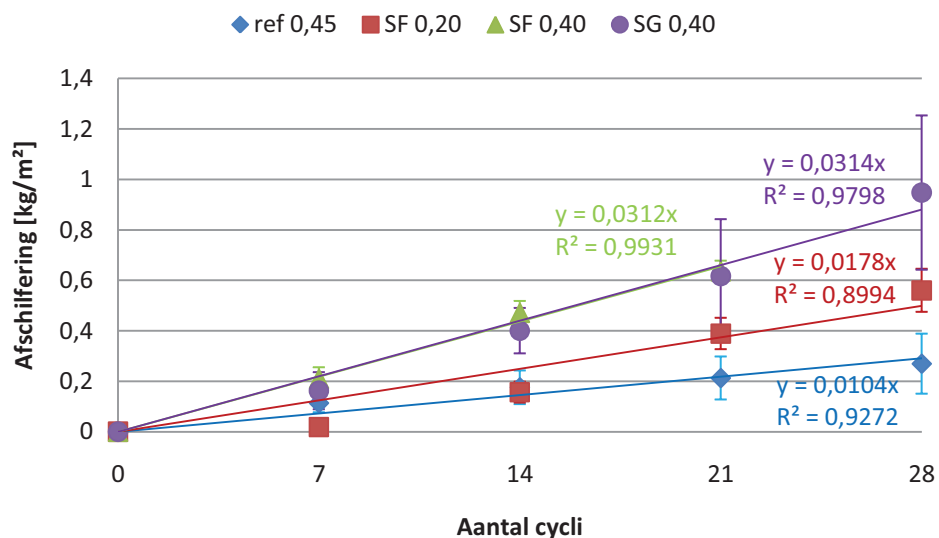
Uit de figuur volgt dat het lineair verband vrij duidelijk is, de laagste correlatiecoëfficiënt bedraagt 0,8455. Voor proefstukken A vertoont enkel SF 0,40 een lagere tendens voor de afschilfering dan ref 0,45. Die afschilfering voor ref 0,45 bedraagt 0,28 kg/m² na 28 cycli en vermenigvuldigd met 1,2 geeft dit een waarde van 0,336 kg/m². Zowel SF 0,20 als SG 0,40 kennen na 28 cycli een significant grotere afschilfering dan deze waarde (respectievelijk 0,70 kg/m² en 0,53 kg/m²) en voldoen dus niet volgens NBN B 15-100 (2008). Wel blijven alle mengsels onder de uiterste limiet van 1 kg/m² die vooropgesteld wordt in NBN EN 1338 (2003).

Figuur 39 geeft de resultaten weer voor proefstukken B. Ook bij deze proefstukken is het lineair verband duidelijk aanwezig, de laagste correlatiecoëfficiënt bedraagt 0,8625. Bij deze soort proefstukken hebben alle mengsels met koperslak een grotere tendens voor de afschilfering dan het referentiebeton ref 0,45. De afschilfering na 28 cycli bedraagt 0,26 kg/m² voor ref 0,45 en dit betekent dat de afschilfering van de proefstukken met koperslak onder 0,312 kg/m² moet blijven. Maar net als bij de proefstukken A kennen de mengsels SF 0,20 en SG 0,40 een hogere waarde (respectievelijk 0,41 kg/m² en 0,46 kg/m²), hoewel niet significant, en voldoen dus niet volgens NBN B 15-100 (2008). Wanneer we de trend voor SF 0,40 doortrekken, valt ook deze waarde hoger uit dan 0,312 al is het verschil ook hier niet significant. Voor proefstukken B voldoet dus geen enkel mengsel met koperslak aan de gestelde norm. Opnieuw wordt echter nergens de uiterste limiet bereikt.



Figuur 39: Afschilfering van de proefstukken B in functie van het aantal cycli

De resultaten voor proefstukken C tot slot worden gegeven in Figuur 40. Het lineaire verband is bij deze proefstukken nog beter aanwezig dan bij proefstukken A en B, de laagste correlatiecoëfficiënt bedraagt 0,8994. Voorts volgen proefstukken C identiek hetzelfde patroon als proefstukken B: de tendens van afschilfering is groter bij alle mengsels met koperslak dan bij het referentiemengsel ref 0,45. Na 28 cycli is de afschilfering van ref 0,45 gelijk aan 0,27 kg/m² dus moet de afschilfering van de mengsels met koperslak kleiner zijn dan 0,324 kg/m² om te voldoen aan NBN B 15-100 (2008). Deze waarden zijn echter significant hoger voor SF 0,20 en SG 0,40 (respectievelijk 0,56 kg/m² en 0,95 kg/m²) waardoor deze mengsels niet voldoen. Ook de geprojecteerde waarde van SF 0,40 valt significant hoger uit dus ook voor proefstukken C voldoet geen enkel mengsel aan de vooropgestelde norm. Ook hier wordt nergens de uiterste limietwaarde bereikt, al is de waarde voor SG 0,40 na 28 cycli niet meer significant kleiner dan 1 kg/m².



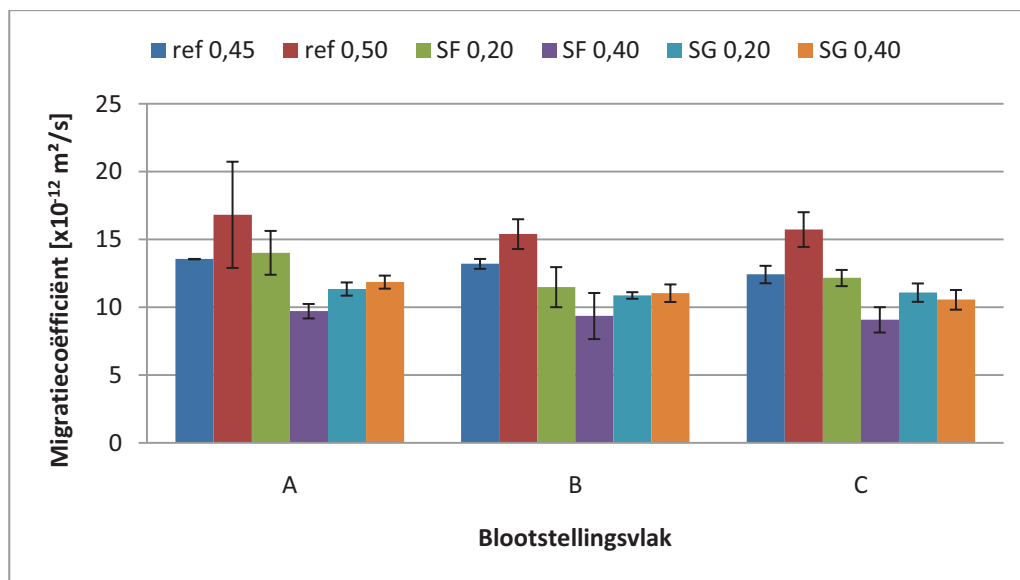
Figuur 40: Afschilfering van de proefstukken C in functie van het aantal cycli

Een vergelijking op basis van de soort proefstukken levert geen eenduidig beeld op, al wordt bij drie van de vier mengsels de laagste tendens teruggevonden voor proefstukken B en de hoogste voor proefstukken C. Vergelijking tussen de mengsels met koperslak onderling levert ook geen duidelijk resultaat op. Het besluit van deze proef is dat het beton met koperslak enkel voor het bekistingsvlak van SF 0,40 voldoet aan de norm NBN B 15-100 (2008). Voor alle andere gevallen valt de afschilfering hoger uit dan 1,2 maal de afschilfering van het referentiemengsel ref 0,45 na 28 cycli.

4.2.2.6. Weerstand tegen de diffusie van chloriden

De weerstand tegen de diffusie van chloriden werd bepaald door middel van een CTH-test zoals beschreven in 3.2.3.2. Op basis van deze test kon de tijdsafhankelijke migratiecoëfficiënt D [m^2/s] van elk betonmengsel bepaald worden. Voor elk mengsel werd opnieuw onderscheid gemaakt tussen de proefstukken A, B en C. Het gaat hier wel degelijk om een migratiecoëfficiënt en niet om een diffusiecoëfficiënt. Bij diffusie bewegen de ionen onder invloed van een chemische potentiaal, van een hoge naar een lage concentratie. Bij migratie is een uitwendig opgelegd elektrisch veld de drijvende kracht achter de beweging van de ionen. Volgens NBN EN 206-1 (2001) moeten de resultaten voor de mengsels met koperslak vergeleken worden met het referentiemengsel ref 0,45.

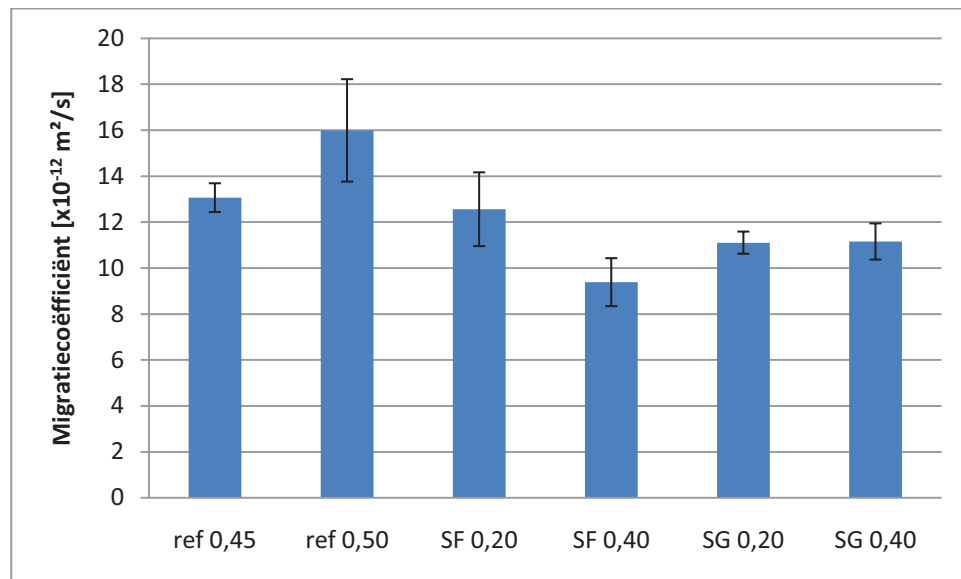
De resultaten van de CTH-test voor de verschillende betonmengsels en voor de drie blootstellingsvlakken wordt weergegeven in Figuur 41. Statistische analyse leert dat het onderling verschil tussen de drie blootstellingsvlakken voor geen enkel mengsel significant is. Daarom worden in wat volgt de resultaten voor de drie blootstellingsvlakken samen genomen, net als bij de resultaten voor de porositeit gebeurd is. Dit komt uiteraard de statistieken ten goede door het groter aantal resultaten.



Figuur 41: Tijdsafhankelijke migratiecoëfficiënt op basis van een CTH-test

Figuur 42 toont de resultaten wanneer de drie blootstellingsvlakken worden samen genomen. De hoogste waarde voor de migratiecoëfficiënt wordt teruggevonden bij ref 0,50, maar dit mengsel wordt buiten beschouwing gelaten aangezien de mortels met koperslak vergeleken dienen te worden met het referentiemengsel ref 0,45. Op die manier laat ref 0,45 de hoogste migratiecoëfficiënt optekenen. De waarde bij de mengsels met koperslak is overal lager dan deze bij ref 0,45 en statistische analyse toont

aan dat het verschil ook steeds, op SF 0,20 na, significant is. Verder is het verschil tussen de mengsels met koperslak onderling enkel significant voor SF 0,40 ten opzichte van de rest.

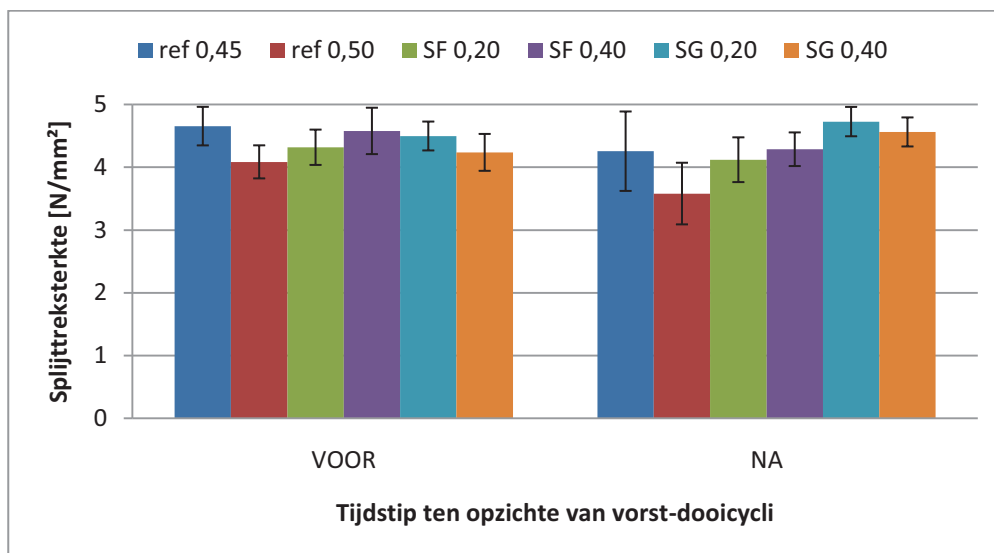


Figuur 42: Tijdsafhankelijke migratiecoëfficiënt voor de drie blootstellingsvlakken samen

Het besluit van deze proef kan dus zijn dat de weerstand tegen de diffusie van chloriden van beton met koperslak als granulaat, hoger is dan bij het referentiebeton. Het beton voldoet dus zeker aan de norm NBN B 15-100 (2008). Dit resultaat werd trouwens al voorspeld op het einde van 4.2.2.3.

4.2.2.7. Vorstbestendigheid

De vorstbestendigheid van de zes betonmengsels werd onderzocht zoals beschreven in 3.2.3.2. Per mengsel werd van 10 cilinders de splijttreksterkte bepaald, de helft ervan onderging eerst 14 vorst-dooicycli. Uit de vergelijking van de splijttreksterkte vóór en na de 14 cycli, kan dan de vorstbestendigheid van het beton bepaald worden. Figuur 43 geeft de resultaten weer. Volgens NBN EN 206-1 (2001) moeten de betonmengsels met koperslak vergeleken worden met het referentiebeton ref 0,50 (zie 3.2.3.2) en de afname van hun splijttreksterkte onder invloed van de vorst-dooicycli mag volgens NBN B 15-100 (2008) ten hoogste 1,2 maal de afname in splijttreksterkte van ref 0,50 bedragen.



Figuur 43: Splijttreksterkte voor en na 14 vorst-dooicycli

Vóór het doorlopen van de vorst-dooicycli, wordt de laagste waarde voor de splijttreksterkte opgemeten bij ref 0,50. Het verschil met de splijttreksterkte van de mengsels met koperslak is echter nooit significant. Ook na de vorst-dooicycli wordt de laagste waarde voor de splijttreksterkte opgetekend door ref 0,50. Ditmaal is deze waarde wel significant lager dan de waarde bij alle mengsels met koperslak, die trouwens onderling niet significant verschillen.

Een eigenaardig resultaat doet zich voor bij het gebruik van koperslak als grof granulaat. Deze mengsels laten immers een hogere waarde voor de splijttreksterkte optekenen na de vorst-dooicycli dan ervoor. De andere mengsels kennen een daling van deze waarde, wat gevoelsmatig ook verwacht wordt. Het verschil tussen de waarde van de druksterkte voor en na de 14 vorst-dooicycli, was echter bij geen enkel mengsel significant. Een verklaring voor het toenemen van de splijttreksterkte bij SG 0,20 en SG 0,40 kan eventueel gezocht worden in het handmatig bedienen van de machine ter bepaling van deze sterkte. De norm NBN EN 12390-6 (2001) schrijft immers voor dat de kracht op de proefstukken moet toenemen met 0,04 MPa/s tot 0,06 MPa/s. Het was quasi onmogelijk om dit tempo aan te houden aan het toestel waardoor de waarde voor de splijttreksterkte hierdoor wel wat beïnvloed kan zijn. Het is namelijk geweten dat beton, net zoals de meeste andere materialen, meer kracht kan opnemen wanneer die kracht snel groeit, dan wanneer ze langzaam wordt opgebouwd. Om een juister resultaat te verkrijgen zou het dus handig zijn om voor het bepalen van de splijttreksterkte over een volautomatisch proeftoestel te beschikken dat de toename van de kracht op het proefstuk binnen de door de norm vooropgestelde grenzen kan houden. Op die manier wordt het resultaat van de proef niet beïnvloed door de snelheid waarmee de proefstukken belast worden.

De afname in splijttreksterkte van ref 0,50 bedraagt 0,50 N/mm², vermenigvuldigd met 1,2 geeft dit een waarde van 0,60 N/mm². De afname bij alle mengsels met koperslak blijft ruimschoots onder deze waarde en dus kan gesteld worden dat het gebruik van koperslak voldoet aan de eisen in verband met de vorstbestendigheid van het beton waarin het aangewend wordt.

5. Conclusie

5.1. Algemene besluiten

5.1.1. Koperslak ter vervanging van het bindmiddel

5.1.1.1. Cementpasta

Het gebruik van gemalen koperslak ter vervanging van cement werd onderzocht door isotherme calorimetrie. Waar verwacht werd dat de grafiek van de warmteproductie in functie van de tijd drie verschillende pieken zou vertonen, zijn bij alle mengsels slechts twee duidelijke pieken zichtbaar. De eerste piek is te wijten aan de hydratatie van calciumsulfaathemihydraat tot dihydraat gips en treedt onmiddellijk na het toevoegen van het water aan pasta, mortel of beton op. Ongeveer 5 tot 15 uur na het begin van de hydratatie treedt een tweede piek op die wordt toegeschreven aan de hydratatie van C_3S ($3CaO \cdot SiO_2$) of aliet, een klinkermineraal in cement. De derde en laatste piek zou moeten aanwezig zijn door de puzzolane reactie van de koperslak met het $Ca(OH)_2$ dat gevormd wordt tijdens de hydratatie van C_3S en C_2S of beliet aanwezig in cement.

Verder neemt de grootte van de tweede piek af naarmate een groter percentage van het cement vervangen wordt door koperslak. Dit is te verklaren door het lager gehalte aan C_3S . Tot slot kent ook de totale warmteproductie een dalende trend bij hogere vervangingspercentages.

Aangezien koperslak puzzolane eigenschappen vertoont wanneer het fijn gemalen is, werd zoals gezegd een derde piek in de grafiek verwacht. Het uitblijven van deze piek kan twee oorzaken hebben. Ofwel veroorzaakt de hydratatie van de koperslak geen echte 'piek' maar wordt de warmte eerder geleidelijk aan vrijgegeven. Ofwel was de koperslak nog niet fijn genoeg gemalen waardoor de puzzolane eigenschappen niet of onvoldoende tot uiting kwamen. De laatste verklaring wordt deels ondersteund door het onderzoek van Tixier, Devaguptapu et al. (1997). In hun onderzoek benaderde de maalfijnheid van koperslak veel beter de maalfijnheid van cement dan in dit onderzoek het geval was (zie 6.1.5), en zij vonden dat het gedeeltelijk vervangen van cement door koperslak geen nadelige invloed had op de hydratatie. Dat is in dit onderzoek wel het geval, want de totale warmteproductie daalt met toenemend gehalte aan koperslak.

De conclusie van dit onderzoek is dan ook dat de koperslak zoals hier gebruikt, niet bijdraagt tot de hydratatie van cement en deze integendeel negatief beïnvloedt.

5.1.1.2. Mortel

Het gebruik van koperslak ter vervanging van cement werd ook onderzocht door het produceren van mortelproefstukken waarvan de druksterkte werd bepaald. De resultaten tonen aan dat de druksterkte van de proefstukken daalt naarmate het percentage koperslak stijgt. Dit is in overeenstemming met de resultaten van de cementpasta's waar een hoger vervangingspercentage resulteert in een lagere totale warmteproductie. Deze warmteproductie is gerelateerd aan de aanmaak van reactieproducten die de sterkte van de mortel bepalen. Hoe lager de totale warmteproductie, hoe minder reactieproducten er aangemaakt worden en dus hoe zwakker de mortelproefstukken.

Dezelfde verklaring als bij de cementpasta's is hier waarschijnlijk van kracht, namelijk dat de koperslak nog niet fijn genoeg gemalen was om als puzzolaan materiaal verder te reageren. Hoewel de koperslak bij deze proef al fijner was dan bij de proef met de cementpasta's, benaderde ze nog steeds niet de maalfijnheid van het cement (zie 6.1.5). Deze verklaring wordt deels ondersteund door het onderzoek van Tixier, Devaguptapu et al. (1997) waarin de druksterkte van mortelproefstukken met 5%, 10% en 15% van het cement vervangen door koperslak, grotere druksterktes opleverde dan in referentiemortel zonder koperslak en waarin de maalfijnheid van de gebruikte koperslak veel beter die van het cement benaderde dan in het huidige onderzoek het geval was.

5.1.2. Koperslak ter vervanging van de toeslagstoffen

5.1.2.1. Mortel (gebruik van koperslak als fijn granulaat)

Het gebruik van koperslak als fijn granulaat in mortelproefstukken toont aan dat de druksterkte van deze mortelproefstukken stijgt tot en met een bepaald vervangingspercentage in vergelijking met referentiemortel zonder koperslak, waarna ze gelijk blijft of opnieuw lichtjes daalt. Deze trend wordt veroorzaakt door de koperslak. Bij de lagere vervangingspercentages worden de proefstukken eerst sterker omdat koperslak meer kracht kan opnemen dan zand en de cohesie verbetert. Maar vanaf een bepaald percentage (verschillend naargelang de leeftijd van de proefstukken en de manier van vervangen), zorgen het glazig oppervlak en de lage waterabsorptie van koperslak voor een teveel aan vrij water in de proefstukken dat de druksterkte opnieuw doet dalen door de vorming van grotere poriën en wijdere capillaire kanalen. Het percentage waarop de trend verandert, is niet vast, maar schommelt toch steeds rond 40%.

Deze trend is niet verschillend al naargelang de vervanging gebeurt op basis van constante massa dan wel op basis van constant volume van de granulaten. Wel is de druksterkte van mortelproefstukken waarbij vervangen wordt op basis van constante massa, bij gelijke vervangingspercentages steeds groter dan wanneer vervangen wordt op basis van constant volume. De reden hiervoor is dat de grotere volumemassa van de koperslak in vergelijking met het zand zorgt voor een kleiner volume granulaten bij vervanging op basis van gelijke massa. Op die manier wordt de verhouding cement/granulaten groter en worden de mortelproefstukken sterker.

5.1.2.2. Beton (gebruik van koperslak als fijn en grof granulaat)

a) Druksterkte

Wanneer 20% of 40% van de granulaten in beton vervangen wordt door fijn of grof koperslak, heeft dit een positief effect op de druksterkte. Dit komt omdat koperslak een grotere samendrukbaarheid heeft dan natuurlijke granulaten en door zijn scherpe randen helpt om de cohesie van de betonmatrix te verbeteren. Door het glazig oppervlak en de lage waterabsorptie ontstaat er in het beton ook een teveel aan vrij water, maar zolang koperslak niet het dominante granulaat in het beton wordt, weegt de grotere samendrukbaarheid meer door dan het creëren van meer poriën en wijdere capillaire kanalen, die de cohesie en de sterkte van het beton nadelig beïnvloeden. In dit onderzoek werd maximaal 40% van de granulaten vervangen, waardoor de druksterkte hoger uitvalt dan bij beton zonder koperslak.

b) Porositeit

Het gebruik van koperslak als granulaat in beton leidt niet tot een significant verschil in de porositeit van dat beton in vergelijking met referentiebeton zonder koperslak. Het theoretisch voorspelde effect van een lagere gelporositeit en een hogere capillaire en totale porositeit wordt wel waargenomen, maar in de meeste gevallen is het verschil niet significant, en waar het dat wel is, blijft het eerder beperkt.

c) Gaspermeabiliteit

De gaspermeabiliteit van alle betonmengsels werd onderling vergeleken bij twee verzadigingsgraden. Voor allebei kennen de betonmengsels met koperslak een lagere waarde dan het referentiebeton ref 0,45. Het gebruik van koperslak heeft dus een positief effect op de gaspermeabiliteit van het beton, al is het verschil slechts in twee gevallen bij de laagste verzadigingsgraad significant te noemen.

d) Weerstand tegen carbonatatie

Wegens de beperkte tijd voor dit onderzoek, kon de weerstand tegen carbonatatie slechts opgemeten worden na 4 en 8 weken blootstelling. Uit de verkregen resultaten kan echter weinig tot geen bruikbare informatie gehaald worden. Een meer uitgebreid en langdurig onderzoek is dan ook nodig om de weerstand tegen carbonatatie van het beton met koperslak te bepalen. Aangezien echter zowel de porositeit als de gaspermeabiliteit van het beton niet significant wijzigen door het gebruik van koperslak, valt het te verwachten dat dit ook niet het geval zal zijn voor de weerstand tegen carbonatatie.

e) Weerstand tegen dooizouten

De weerstand tegen dooizouten werd voor elk mengsel bestudeerd voor proefstukken A, B en C apart. Hoewel alle mengsels voor elk soort proefstuk onder de uiterste grens van 1 kg afschilfering per vierkante meter blootstellingsvlak blijven, voldoet enkel het bekistingsvlak van SF 0,40 aan de vooropgestelde norm NBN B 15-100 (2008) die stelt dat de afschilfering van het beton met koperslak lager moet zijn dan 1,2 maal de afschilfering van het referentiebeton ref 0,45. De conclusie luidt dan ook dat beton met koperslak niet voldoet aan NBN B 15-100 (2008) wat betreft de weerstand tegen dooizouten.

f) Vorstbestendigheid

Zowel vóór als na het doorlopen van 14 vorst-dooicycli vertonen de mengsels met koperslak een hogere waarde voor de splijttreksterkte dan het referentiebeton ref 0,50 waarmee volgens NBN EN 206-1 (2001) dient vergeleken te worden. Vóór aanvang van de cycli is het verschil nooit significant, nadien wel. De afname in splijttreksterkte door het doorlopen van de vorst-dooicycli blijft ook voor alle mengsels met koperslak lager dan 1,2 maal dezelfde afname bij ref 0,50 waardoor het beton met koperslak voldoet aan NBN B 15-100 (2008) wat betreft de vorstbestendigheid.

g) Weerstand tegen de diffusie van chloriden

Alle betonmengsels met koperslak vertonen een lagere migratiecoëfficiënt dan het referentiemengsel ref 0,45. Het verschil is ook telkens significant, behalve voor SF 0,20. Het gebruik van koperslak resulteert dus in een meer weerstandbiedend beton dan ref 0,45, en voldoet dus zeker aan de norm NBN B 15-100 (2008).

5.1.3. Algemene evaluatie van het gebruik van koperslak

Dit onderzoek werd gevoerd met het oog op het toepassen van koperslak als bron van ijzeroxide in volledig recycleerbaar beton. Daartoe werd bestudeerd in hoeverre de eigenschappen van cementpasta, mortel of beton wijzigen wanneer een deel van het cement of de granulaten vervangen wordt door koperslak. Uit de resultaten blijkt dat de verwachtingen hoopvol mogen zijn. Het gebruik van koperslak ter vervanging van cement dient nog verder onderzocht te worden, maar wat betreft het gebruik van koperslak ter vervanging van de granulaten werden goede resultaten verkregen in verband met de druksterkte en de duurzaamheid van mortel en beton. Het ziet er dan ook naar uit dat koperslak in de toekomst zal kunnen aangewend worden ter vervanging van de natuurlijke grondstoffen in traditioneel en volledig recycleerbaar beton.

5.2. Voorstel tot verder onderzoek

5.2.1. Koperslak ter vervanging van het bindmiddel

In het licht van alles wat gezegd werd in 5.1.1 lijkt het logisch om de proefprocedures in de toekomst te herhalen met koperslak waarvan de maalfijnheid zo dicht mogelijk deze van cement benadert. In dat geval zou de koperslak voldoende 'gewapend' moeten zijn om zijn puzzolane eigenschappen tentoon te spreiden en kan een betere evaluatie van de aanwending ervan ter vervanging van cement gebeuren.

5.2.2. Koperslak ter vervanging van de toeslagstoffen

Zowel bij de mortelproefstukken als bij de proeven op betonmengsels werd steeds gewerkt met een constante W/C-factor. Voor de mortelproefstukken was die gelijk aan 0,50, voor de betonmengsels werd de W/C-factor in alle mengsels met koperslak gelijk genomen aan deze in het referentiebeton ref 0,45 en dus gelijk aan 0,45. Maar door het glazig oppervlak en de lage waterabsorptie van koperslak resulteert het gebruik ervan in een teveel aan vrij water in de mortel of in het beton. Zoals hiervoor al gesteld, is dit vrij water verantwoordelijk voor het vormen van meer poriën en wijdere capillaire kanalen. Deze fenomenen verlagen de sterkte en de duurzaamheid van de mortel of het beton. Wanneer koperslak niet het dominante granulaat is, spelen deze factoren nog geen grote rol en worden ze gecompenseerd door de grotere samendrukbaarheid van de koperslak en haar scherpe randen die de cohesie verbeteren zodat, zoals kan opgemaakt worden uit de resultaten van dit onderzoek, een sterker en minstens even duurzaam beton wordt verkregen (behalve voor de weerstand tegen dooizouten). Het valt echter te verwachten dat het beton en de mortel minder sterk en duurzaam zullen worden wanneer koperslak wel het dominant granulaat wordt. Dit werd ook aangetoond in 4.2.1 waar de druksterkte van de mortelproefstukken vanaf een bepaald vervangingspercentage niet meer stijgt en in Al-Jabri, Hisada et al. (2009a), Wu, Zhang et al. (2010b) en Al-Jabri, Al-Saidy et al. (2011) bij proeven op beton waar de druksterkte opnieuw daalde vanaf een bepaald vervangingspercentage en bij de hoogste vervangingspercentages zelfs onder de waarde van het referentiebeton zonder koperslak zakte. Dit komt omdat de grotere samendrukbaarheid en de scherpe randen niet langer de verzwakking door het teveel aan vrij water kunnen compenseren.

In dat opzicht kan het interessant zijn om de granulaten in een volgend onderzoek te vervangen bij gelijkblijvende verwerkbaarheid en niet langer bij gelijkblijvende W/C-factor. Het teveel aan vrij water

door het gebruik van koperslak kan er immers voor zorgen dat het benodigde water dat wordt toegevoegd voor de hydratatie kan worden verminderd. Op die manier kan getracht worden om mortel of beton te maken met een constante zetmaat en dus een constante verwerkbaarheid.

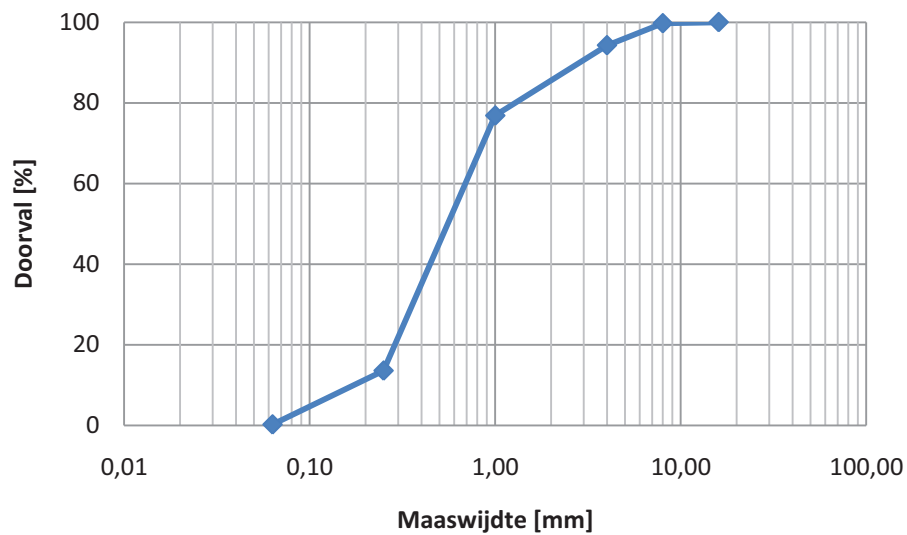
Dat is ook wat onderzocht werd in Al-Jabri, Hisada et al. (2009b) waarbij minder water aan het beton werd toegevoegd bij hogere vervangingspercentages en zo een gelijke verwerkbaarheid werd behouden. Op die manier werd het verlies aan sterkte door meer vrij water in het beton tenietgedaan. Er werd dan ook vastgesteld dat de sterkte van het beton steeds bleef stijgen, hoeveel zand ook werd vervangen door koperslak. Het zou interessant zijn om alle duurzaamheidsproeven van het huidig onderzoek te herhalen volgens deze methode. Waarschijnlijk zou op die manier de druksterkte van mortelproefstukken een blijvende stijgende trend volgen, ook bij de hoogste vervangingspercentages, en zou ook voor beton met koperslak een verbeterde sterkte en duurzaamheid verkregen worden bij vervangingspercentages hoger dan 40%, het maximum percentage dat in het huidig onderzoek werd gebruikt. Op die manier worden het glazig oppervlak en de lage waterabsorptie van koperslak voordelig aangewend terwijl ze in dit onderzoek eerder een belemmering vormden naar nog hogere druksterktes.

Verder kan er nog een kleine opmerking gemaakt worden in verband met de gaspermeabiliteit. Zo is de gaspermeabiliteit van beton met koperslak steeds kleiner dan het referentiebeton ref 0,45, waarbij het verschil voor twee mengsels significant is bij de laagste verzadigingsgraad. Eventueel kan verder microscopisch onderzoek uitmaken of koperslak op één of andere manier bijdraagt tot het verdichten van de microstructuur van het beton en zo de gaspermeabiliteit verbetert.

6. Bijlagen

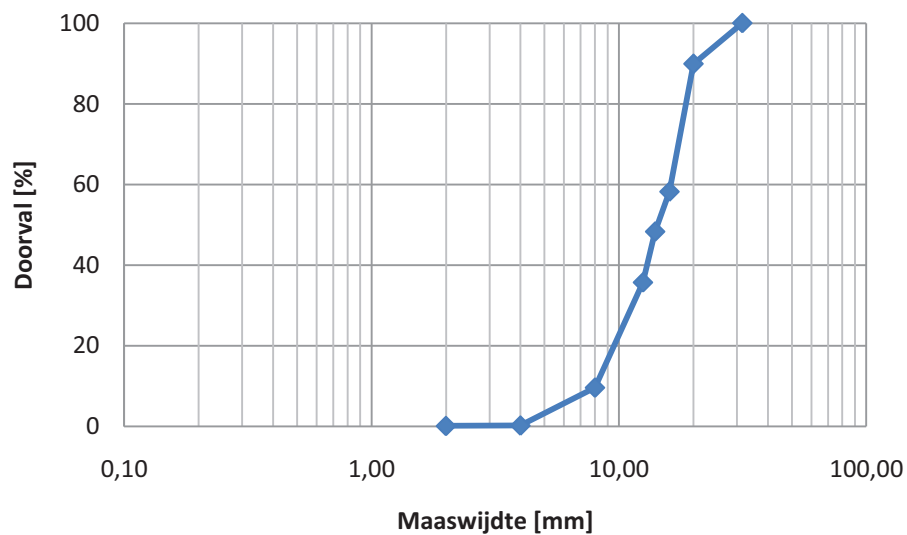
6.1. Korrelverdelingsdiagramma

6.1.1. Korrelverdelingsdiagram rivierzand 0/4



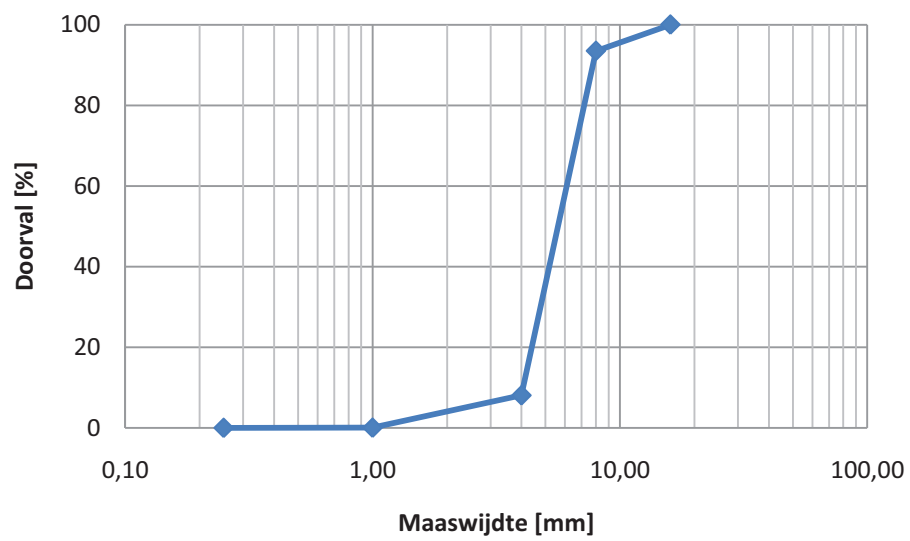
Figuur 44: Korrelverdelingsdiagram rivierzand 0/4

6.1.2. Korrelverdelingsdiagram grof koperslak



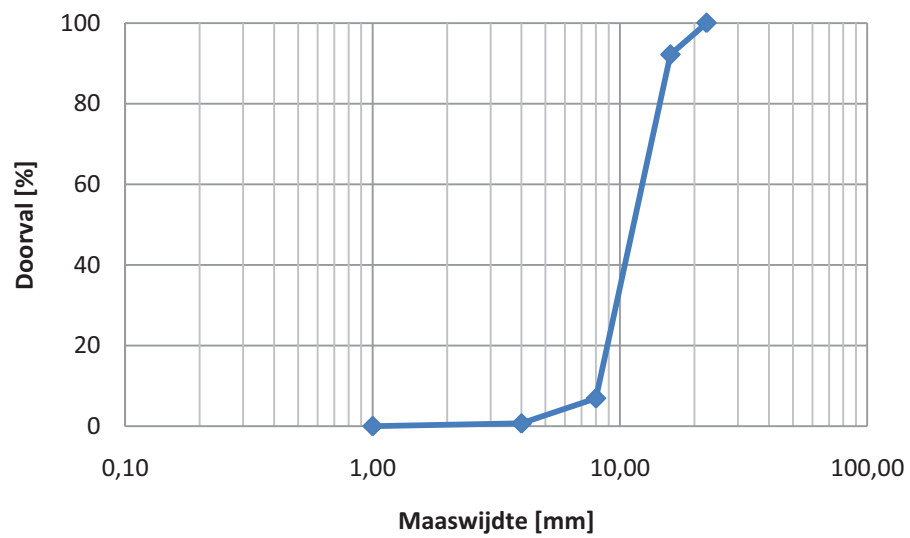
Figuur 45: Korrelverdelingsdiagram grof koperslak

6.1.3. Korrelverdelingsdiagram rolgrind 2/8



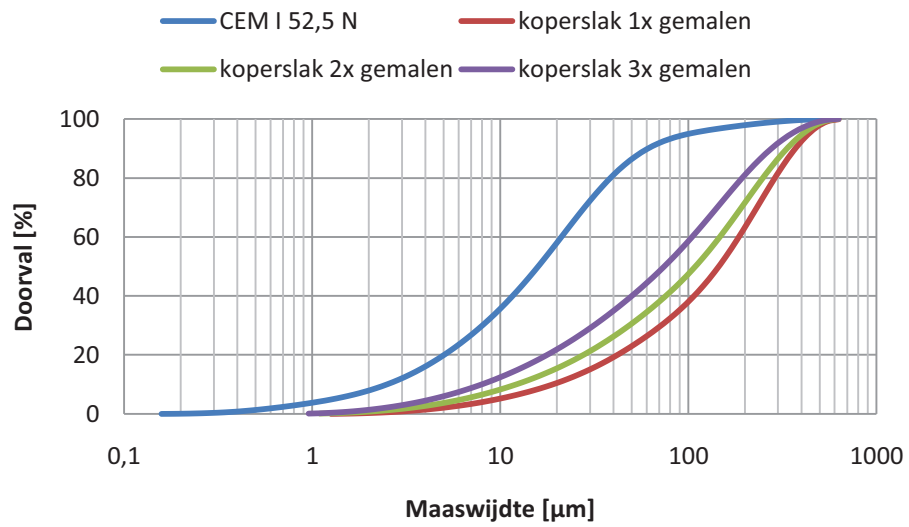
Figuur 46: Korrelverdelingsdiagram rolgrind 2/8

6.1.4. Korrelverdelingsdiagram rolgrind 8/16



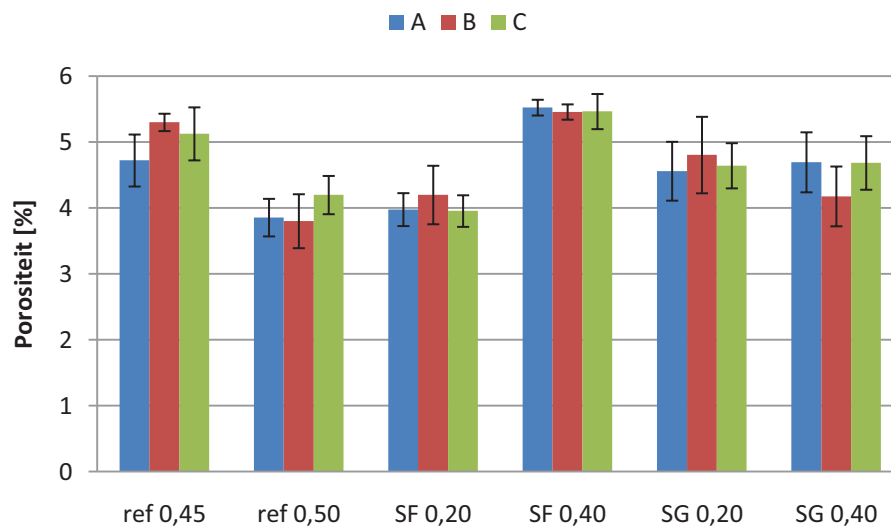
Figuur 47: Korrelverdelingsdiagram rolgrind 8/16

6.1.5. Korrelverdelingsdiagram CEM I 52,5 N en gemalen koperslak

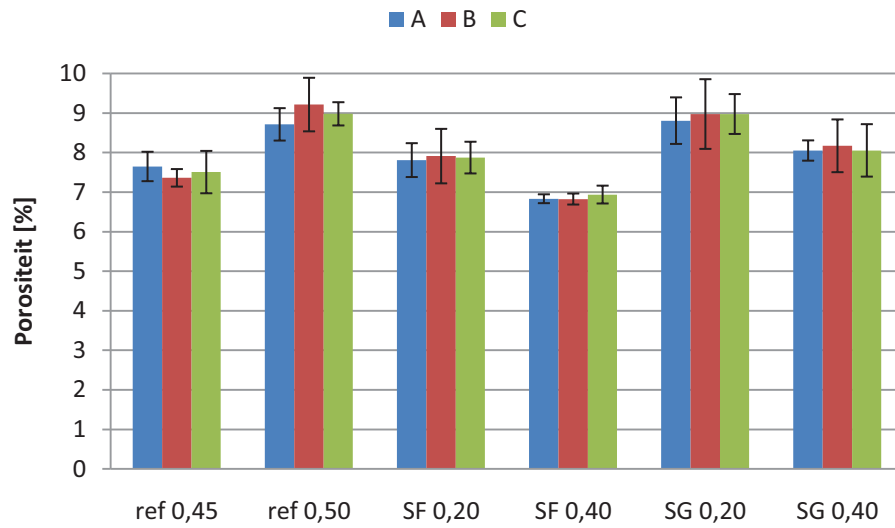


Figuur 48: Korrelverdelingsdiagram CEM I 52,5 N en gemalen koperslak

6.2. Porositeit



Figuur 49: Gelporositeit van alle mengsels voor de drie blootstellingsvlakken [eerst droging, daarna verzadiging]



Figuur 50: Capillaire porositeit van alle mengsels voor de drie blootstellingsvlakken [eerst droging, daarna verzadiging]

7. Bibliografie

- Al-Jabri, K. S., Al-Saidy, A. H. & Taha, R. (2011). *Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete*. Construction and Building Materials 25(2): 933-938.
- Al-Jabri, K. S., Hisada, M., Al-Oraimi, S. K. & Al-Saidy, A. H. (2009a). *Copper slag as sand replacement for high performance concrete*. Cement & Concrete Composites 31(7): 483-488.
- Al-Jabri, K. S., Hisada, M., Al-Saidy, A. H. & Al-Oraimi, S. K. (2009b). *Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate*. Construction and Building Materials 23(6): 2132-2140.
- Al-Jabri, K. S., Taha, R. A., Al-Hashmi, A. & Al-Harthy, A. S. (2006). *Effect of copper slag and cement bypass dust addition on mechanical properties of concrete*. Construction and Building Materials 20(5): 322-331.
- Alp, I., Deveci, H. & Sungun, H. (2008). *Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production*. Journal of Hazardous Materials 159(2-3): 390-395.
- Alter, H. (2005). *The composition and environmental hazard of copper slags in the context of the Basel Convention*. Resources Conservation and Recycling 43(4): 353-360.
- Arino, A. M. & Mobasher, B. (1999). *Effect of ground copper slag on strength and toughness of cementitious mixes*. Aci Materials Journal 96(1): 68-73.
- Audenaert, K. (2006). *Transportmechanismen in zelfverdichtend beton in relatie met carbonatatie en chloridepenetratie*. Doctoraatsthesis. Universiteit Gent.
- Boel, V. (2006). *Microstructuur van zelfverdichtend beton in relatie met gaspermeabiliteit en duurzaamheidsaspecten*. Doctoraatsthesis. Universiteit Gent: 319.
- Gorai, B., Jana, R. K. & Premchand (2003). *Characteristics and utilisation of copper slag - a review*. Resources Conservation and Recycling 39(4): 299-313.
- Khanzadi, M. & Behnood, A. (2009). *Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate*. Construction and Building Materials 23(6): 2183-2188.
- Malhotra, V. M. (1987). *Properties of fresh and hardened concrete incorporating ground, granulated, blast furnace slag*. Supplementary cementing materials for concrete, Canada.
- McDonough, W. & Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle. Remaking the way we make things.*, North Point Press.
- Meyer, C. (2009). *The greening of the concrete industry*. Cement & Concrete Composites 31: 601-605.
- Mobasher, B., Devaguptapu, R. & Arino, A. M. (1996). *Effect of copper slag on the hydration of blended cementitious mixtures*. ASCE, materials engineering conference, materials for the new millenium.

- Moura, W. A., Goncalves, J. P. & Lima, M. B. L. (2007). *Copper slag waste as a supplementary cementing material to concrete*. Journal of Materials Science 42(7): 2226-2230.
- Najimi, M., Sobhani, J. & Pourkhorshidi, A. R. (2011). *Durability of copper slag contained concrete exposed to sulfate attack*. Construction and Building Materials 25(4): 1895-1905.
- Pavéz, O., Rojas, F., Palacios, J. & Nazer, A. (2004). *Pozzolanic activity of copper slag*. VI International conference on clean technologies for the mining industry, University of Concepción, Chile.
- Pourkhorshidi, A. R., Najimi, M., Parhizkar, T., Hillemeier, B. & Herr, R. (2010). *A comparative study of the evaluation methods for pozzolans*. Advances in Cement Research 22(3): 157-164.
- Sanchez de Rojas, M. I., Rivera, J., Frias, M., Esteban, J. M. & Olaya, M. (2004). *Leaching characteristics of blended mortars containing copper slag*. Sixth CAN-MET/ACI international conference on durability of concrete, Greece.
- Shi, C., Meyer, C. & Behnood, A. (2008). *Utilization of copper slag in cement and concrete*. Resources Conservation and Recycling 52(10): 1115-1120.
- Shi, C. J. & Qian, J. S. (2000). *High performance cementing materials from industrial slags - a review*. Resources Conservation and Recycling 29(3): 195-207.
- Taerwe, L. & De Schutter, G. (2006). *Betontechnologie + Aanvullingen*. Cursustekst. Universiteit Gent.
- Tam, V. W. Y. & Tam, C. M. (2006). *A review on the viable technology for construction waste recycling*. Resources Conservation and Recycling 47(3): 209-221.
- Tixier, R., Devaguptapu, R. & Mobasher, B. (1997). *The effect of copper slag on the hydration and mechanical properties of cementitious mixtures*. Cement and Concrete Research 27(10): 1569-1580.
- Tu, T. Y., Chen, Y. Y. & Hwang, C. L. (2006). *Properties of HPC with recycled aggregates*. Cement and Concrete Research 36(5): 943-950.
- Verboven, M. (2010). *FEBEM-Werkgroep Bouw- en Sloopafval: De dynamiek van een afvalstroom*. FEBEM focus 17: 35-36.
- Wu, W., Zhang, W. D. & Ma, G. W. (2010a). *Mechanical properties of copper slag reinforced concrete under dynamic compression*. Construction and Building Materials 24(6): 910-917.
- Wu, W., Zhang, W. D. & Ma, G. W. (2010b). *Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete*. Materials & Design 31(6): 2878-2883.
- Zain, M. F. M., Islam, M. N., Radin, S. S. & Yap, S. G. (2004). *Cement-based solidification for the safe disposal of blasted*. Cement & Concrete Composites 26(7): 845-851.

Lijst van figuren

Figuur 1: Metamix: gegranuleerde, amorfe koperslak (bron: www.metallo.com).....	5
Figuur 2: Korrelverdelingsdiagram van Metamix en het normzand	6
Figuur 3: Het ingedrongen volume kwik versus de uitgeoefende druk (uit Tixier, Devaguptapu et al. (1997))	12
Figuur 4: Thermogravimetrische analyse op 7, 14 en 56 dagen ouderdom (uit Tixier, Devaguptapu et al. (1997))	13
Figuur 5: Sterkteontwikkeling in mortels met koperslak als cementvervanger in functie van de leeftijd en de dosering (uit Mobasher, Devaguptapu et al. (1996) en Tixier, Devaguptapu et al. (1997))	13
Figuur 6: SEM van het beton met koperslak (CS) als fijn granulaat bij verschillende vervangingspercentages (uit Wu, Zhang et al. (2010b))	18
Figuur 7: TAM-air toestel	23
Figuur 8: Glazen ampullen voor TAM-air	23
Figuur 9: Proefopstelling voor het bepalen van de buigtreksterkte en de druksterkte van mortelproefstukken	27
Figuur 10: Vacuümtank	30
Figuur 11: Cembureau permeameter	32
Figuur 12: Binnenkant van de luchtdichte houder met plaats voor het proefstuk	32
Figuur 13: Afgezaagd schijfje ter bepaling van de carbonatatiediepte.....	34
Figuur 14: Temperatuur-tijd verloop volgens NBN EN 1339 (2003)	35
Figuur 15: Proefopstelling weerstand tegen dooizouten	35
Figuur 16: Drie soorten proefstukken na doorlopen van 28 vorst-dooicycli; boven=A, links=B en rechts=C	36
Figuur 17: Glazen kolf die vacuüm gezogen wordt	36
Figuur 18: Opstelling van de CTH-proef [NT BUILD 492 (1999)] [a: Rubberen omhulsel; b: anoliet; c: anode; d: proefstuk; e:katholiet; f: kathode; g: steun, h: plastieken bak].....	37
Figuur 19: Gespleten proefstuk voor het bepalen van de chloride-indringing	38
Figuur 20: Typische warmteproductie tijdens de hydratatie van een hoogovencement [Taerwe en De Schutter (2006)]	40
Figuur 21: Warmteproductie bepaald met behulp van isotherme calorimetrie [ks = koperslak]	42
Figuur 22: Warmteproductie bepaald met behulp van isotherme calorimetrie, begin van de hydratatie [0-0,5h]	42
Figuur 23: Totale warmteproductie bepaald met behulp van isotherme calorimetrie	43

Figuur 24: Druksterkte na 7 en 28 dagen in functie van het percentage cement vervangen door koperslak	44
Figuur 25: Druksterkte van de mortelproefstukken waarbij zand vervangen werd door koperslak op basis van massa	46
Figuur 26: Druksterkte van de mortelproefstukken waarbij zand vervangen werd door koperslak (op basis van volume)	47
Figuur 27: Vergelijking tussen vervanging op basis van massa en op basis van volume na 28 dagen	48
Figuur 28: Druksterkte van alle mengsels na 2, 7, 28 dagen en 3 maanden	49
Figuur 29: Totale porositeit van alle mengsels voor de drie blootstellingsvlakken [eerst droging, daarna verzadiging]	52
Figuur 30: Vergelijking tussen eerste en tweede methode op basis van de gelporositeit	52
Figuur 31: Vergelijking tussen eerste en tweede methode op basis van de capillaire porositeit	53
Figuur 32: Vergelijking tussen eerste en tweede methode op basis van de totale porositeit	53
Figuur 33: Vergelijking van de porositeit voor de verschillende mengsels	54
Figuur 34: Doorstromingsdebiet Q na droging bij 40 °C en bij 105 °C voor SF 0,20	56
Figuur 35: Gaspermeabiliteitscoëfficiënt na droging bij 40 °C [verzadigingsgraad = $\pm 40\%$]	57
Figuur 36: Gaspermeabiliteitscoëfficiënt na droging bij 105 °C [verzadigingsgraad = 0% aangenomen] ..	58
Figuur 37: Carbonatatiediepte voor de zes betonmengsels na 4 en 8 weken	59
Figuur 38: Afschilfering van de proefstukken A in functie van het aantal cycli	60
Figuur 39: Afschilfering van de proefstukken B in functie van het aantal cycli	61
Figuur 40: Afschilfering van de proefstukken C in functie van het aantal cycli	61
Figuur 41: Tijdsafhankelijke migratiecoëfficiënt op basis van een CTH-test	62
Figuur 42: Tijdsafhankelijke migratiecoëfficiënt voor de drie blootstellingsvlakken samen	63
Figuur 43: Splijttreksterkte voor en na 14 vorst-dooicycli	64
Figuur 44: Korrelverdelingsdiagram rivierzand 0/4	70
Figuur 45: Korrelverdelingsdiagram grof koperslak	70
Figuur 46: Korrelverdelingsdiagram rolgrind 2/8	71
Figuur 47: Korrelverdelingsdiagram rolgrind 8/16	71
Figuur 48: Korrelverdelingsdiagram CEM I 52,5 N en gemalen koperslak	72
Figuur 49: Gelporositeit van alle mengsels voor de drie blootstellingsvlakken [eerst droging, daarna verzadiging]	72
Figuur 50: Capillaire porositeit van alle mengsels voor de drie blootstellingsvlakken [eerst droging, daarna verzadiging]	73

Lijst van tabellen

Tabel 1: Chemische samenstelling van Metamix	6
Tabel 2: Mineralogie van Metamix	7
Tabel 3: Chemische samenstelling van CEM I 52,5 N.....	22
Tabel 4: Samenstelling van de ampullen in de TAM-air.....	24
Tabel 5: Samenstelling van de mortels met koperslak als fijn granulaat (massavervanging).....	25
Tabel 6: Samenstelling van de mortels met koperslak als fijn granulaat (volumevervanging).....	26
Tabel 7: Samenstelling van de mortels met koperslak als vervanging voor cement	26
Tabel 8: Betonsamenstelling van de mengsels voor 1 m ³ beton	28
Tabel 9: Verzadigingsgraden [%] na droging bij 40 °C en 105 °C	56

