Weerstand van beton met hoogovenslak tegen sulfaten, chloriden en alkali-silica reactie

Mathias Maes

Promotor: prof. dr. ir. Nele De Belie Begeleiders: ir. Elke Gruyaert, ing. Kim Van Tittelboom

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

Vakgroep Bouwkundige constructies Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe Faculteit Ingenieurswetenschappen Academiejaar 2009-2010



# Voorwoord

Via dit voorwoord wil ik de mensen bedanken die mij tijdens mijn studies en bij de realisatie van deze masterproef rechtstreeks en onrechtstreeks geholpen en gesteund hebben.

Als eerste bedank ik mijn promotor prof. dr. ir. Nele De Belie om de mogelijkheid te bieden deze masterproef uit te voeren. Daarnaast apprecieerde ik de aanwijzingen en tips bij het opmeten en analyseren van de resultaten. Ik bedank ook prof. dr. ir. Luc Taerwe om onderzoek te mogen verrichten aan het Laboratorium Magnel voor Betononderzoek.

Een bijzonder woord van dank gaat uit naar Elke Gruyaert voor de dagelijkse begeleiding. Steeds was ze bereid om mijn vele vragen te beantwoorden en stond ze klaar om problemen op te lossen of om proeven uit te voeren tijdens de examens. Haar aanwijzingen en steun hebben in belangrijke mate bijgedragen tot het verwezenlijken van deze masterproef.

Daarnaast kon ik ook steeds terecht bij de andere mensen van het Laboratorium Magnel, met in het bijzonder Kim Van Tittelboom, Philip Van den Heede, Willem De Muynck en Mieke De Schepper. Daarnaast richt ik een speciaal woord van dank aan het personeel van het laboratorium. Zij waren er altijd om raad te geven over machines, te helpen en om proefstukken te vervaardigen.

Verder richt ik ook een woord van dank aan mijn medestudenten voor de ontspannende conversaties tussen het vele labowerk door.

En tot slot bedank ik mijn familie en mijn vriendin voor de onvoorwaardelijke steun tijdens mijn studies. Bedankt!

Belsele, 2010

### Mathias Maes

## **Toelating tot bruikleen**

De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen ervan te kopiëren voor eigen gebruik. Elk ander gebruik valt onder de strikte beperkingen van het auteursrecht; in het bijzonder wordt er gewezen op de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van de resultaten uit deze masterproef.

# Overzicht

# Weerstand van beton met hoogovenslak tegen sulfaten, chloriden en alkali-silica reactie

Mathias Maes

Promotor: prof. dr. ir. Nele De Belie Begeleiders: ir. Elke Gruyaert, ing. Kim Van Tittelboom

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

Academiejaar 2009-2010

Vakgroep Bouwkundige Constructies Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe Faculteit Ingenieurswetenschappen

*Trefwoorden:* Hoogovenslak, duurzaamheid, sulfaten, chloriden, alkali-silica reactie, vorst-dooi cycli, dooizouten

### Samenvatting

Tijdens de vervaardiging van Portlandcement lopen de CO<sub>2</sub>-emissies hoog op en wordt zeer veel energie verbruikt. Om de betonindustrie milieuvriendelijker te maken is het aangewezen op zoek te gaan naar vervangproducten van cement. Één van die vervangproducten is hoogovenslak, een bijproduct uit de staalindustrie.

Hoogovenslak bezit latent hydraulische eigenschappen, dat wil zeggen dat het een activator nodig heeft om te hydrateren. Deze activator wordt geleverd door de hydratatie van het Portlandcement in de vorm van Ca(OH)<sub>2</sub>. Door hoogovenslak toe te voegen als gedeeltelijke vervanging van Portlandcement, zullen de duurzaamheidseigenschappen van beton wijzigen. Daarom wordt in voorliggend werk de weerstand van beton met hoogovenslak tegen sulfaten, chloriden en alkali-silica reactie onderzocht. Aanvullend wordt ook gekeken naar de weerstand tegen vorst-dooi cycli in combinatie met dooizouten. De toegepaste cementvervangingspercentages zijn 50 %, 70 % en 85 % hoogovenslak. Voor alle betonmengelingen werd steeds een water-bindmiddel factor van 0,5 aangehouden.

Beton met stijgende cementvervangingsgehaltes vertonen een toenemende weerstand tegen sulfaataantasting bij volledige onderdompeling in een natriumsulfaatoplossing in vergelijking met traditioneel Portlandcementbeton. Cyclische onderdompeling resulteert in een afnemende weerstand tegen sulfaten bij toenemende cementvervanging door hoogovenslak. De oorzaak hiervan is zoutkristallisatie op de oppervlakken die niet rechtstreeks in conctact komen met de sulfaatoplossingen.

Om de invloed van hoogovenslak op de weerstand tegen alkali-silica reactie te bestuderen, werd gebruik gemaakt van grof wit glas als reactief granulaat. De hoeveelheid gevormde alkali-silica gel, die de eigenschap heeft om sterk te zwellen door water aan zich te binden, wordt gereduceerd door toevoeging van hoogovenslak. Daardoor wordt veel minder expansie waargenomen bij hoogovenslakbeton. Cementvervanging tot 70 % hoogovenslak levert de beste resultaten.

Onderzoek naar de weerstand tegen chloriden is van belang met het oog op gewapend beton. Chloride-geïnitieerde corrosie van wapeningstaal is immers een te duchten aantastingsvorm. Hoogovenslakbeton met cementvervangingsgehaltes tot 70 % vertoont een lagere migratie- en diffusiecoëfficiënt in vergelijking met traditioneel beton, wat wijst op een verbeterde weerstand. Daarnaast neemt de diepte waar het kritieke chloridegehalte voorkomt af. Voor beton met 85 % hoogovenslak wordt geen verbetering vastgesteld. Vergelijking van het totaal chloridegehalte en het vrij chloridegehalte leert dat de binding daalt bij stijgende slakpercentages.

Tot slot werd hoogovenslakbeton onderworpen aan vorst-dooi cycli in combinatie met dooizouten. Hierbij wordt vastgesteld dat zeer hoge percentages hoogovenslak (85%) een verminderde weerstand bezitten. De toename van het massa-verlies neemt wel af na een bepaald aantal cycli in vergelijking met de toename bij tradioneel Portlandcementbeton.

# Resistance of Concrete with Blast-Furnace Slag to Sulfates, Chlorides and Alkali-Silica Reaction

Mathias Maes

Supervisors: prof. dr. ir. Nele De Belie, ir. Elke Gruyaert, and ing. Kim Van Tittelboom

*Abstract* - This article describes the results of a research on the influence of partial cement replacement by blast furnace slag (BFS) on resistance to sulfates, chlorides, alkali-silica reaction (ASR) and freezing and thawing in combination with de-icing salts. Therefore accelerated degradation tests were performed on ordinary Portland cement concrete (OPC) and concrete with varying cement replacement levels (50 %, 70 % and 85 %). Finally an evaluation was made of the performance of BFS concrete.

*Keywords* - Blast-furnace slag concrete, sulfate attack, chloride attack, alkali-silica reaction, de-icing salts

#### I. INTRODUCTION

The production of cement is one of the primary sources of  $CO_2$  emissions and consumes a lot of energy. By replacing a part of the cement in concrete by blast-furnace slag, a by-product of the steel industry with latent-hydraulic properties, the environmental impact of the concrete production can be reduced [1].

However, the durability behavior of concrete containing slag can differ from that of OPC concrete. Therefore, in this research, accelerated tests were performed on OPC concrete and BFS concrete with high cement replacement levels. The tests are based on: ASTM C 1012 [2004] and cyclic immersion tests with the apparatus for accelerated degradation test (TAP) [2] to investigate sulfate attack, the Oberholster test [3] for ASR, NT Build 492 [1999] and NT Build 433 [1995] for chloride attack and EN 1339 [2003] to investigate the influence of freezing and thawing with de-icing salts.

#### **II. CONCRETE MIXTURES**

Concrete mixtures with 0 % (S0), 50 % (S50), 70 % (S70) and 85 % BFS (S85) were made to investigate the durability of BFS concrete, see Table 1. All the mixtures had the same water-binder ratio, namely 0,5. For each cement replacement content, one mixture contained coarse white glass to replace 50 % of both aggregates. This was added as a potentially reactive aggregate [4] to ASR.

Table	1:	Concrete	mixtures
-------	----	----------	----------

[kg/m <sup>3</sup> ]	<b>S0</b>	S50	S70	S85
Sand 0/4	791	788	787	785
Aggregate 2/8	425	426	426	422
Aggregate 8/16	618	616	615	614
CEM I 52,2 N	350	174	104	52
Water	175	174	174	174
BFS	0	174	244	295

#### III. TEST RESULTS

#### A. Resistance against sulfates

To investigate the influence of BFS the ASTM C 1012-4 procedure was conducted. The mortar specimens with W/B 0,485 were completely immersed in a 50 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-solution and the measured parameter was length change. According to the literature [5] OPC concrete has a low resistance against sulfate attack when fully immersed and shows great expansion, due to the formation of gypsum, ettringite and thaumasite. This expansion would decrease with increasing slag content because of the lower porosity. The results, shown in Figure 1, verify the assumptions from the literature.



Figure 1: Length change (%) of mortar completely immersed with indication of the standard error at 224 days and 288 days.

If the expansions at 224 days immersion are compared to the limit values, according to ASTM, S85 is found to be significantly lower while S0 is significantly higher. The additional measurement at 288 days shows that S0 is increasingly expanding.

Besides full immersion, cyclical immersion was also examined. Unlike the previous results, S85 shows the lowest resistance against sulfate attack when partially/cyclically submerged with the TAP [5]. Cylindrical concrete specimens were exposed to the following sulfate solutions: 3 g/l and 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-solutions, and 3 g/l and 29,8 g/l MgSO<sub>4</sub>solutions. The measured parameters were: radius change and R<sub>a</sub>-value, which gives an indication of the surface roughness. Results of both parameters showed that the resistance against sulfate attack decreases for BFS concrete with high percentages (S85) of cement replacement compared to S0. S50 showed degradation quite similar to S0. The influence of the cation was relative. Although these parameters give an indication of the deterioration at the surface which is cyclical in contact with the solution, the worst degradation was observed at the parts that never came in the solution. The reason for this is sulfate salt crystallization. XRD-analyses showed that the formation of thenardite was responsible for the severe deterioration of the specimens exposed to 29,8 g/l  $Na_2SO_4$ -solutions. The S85-concrete was also at these places considerably more attacked than S0 and S50.

#### B. Resistance against ASR

The Oberholster test was performed on concrete specimens, containing coarse white glass, at the age of one week and at the age of 19 weeks. Both results indicate an enhanced resistance of the BFS concrete against ASR compared to the  $SO_{(glass)}$ -concrete. Figure 2 shows the evolution of the expansion of the 19 weeks old concrete in function of time.



Figure 2: Evolution of the expansion of the concrete cylinders subjected to the Oberholster test for 24 or 25 days, with indication of the standard error.

Expansion was measured during 24 or 25 days, but the limit value counts for 20 days. For this research, an expansion less than 0,1 % was defined as the criterion to accept the concrete composition. This value corresponds with the limit value to consider aggregates as non-reactive, since the test was originally developed to investigate the reactivity of aggregates. Generally the concrete composition is less susceptible towards ASR when expansion decreases.  $SO_{(glass)}$  concrete even has an expansion greater than 0,2 %, what means it has no resistance against ASR.  $S5O_{(glass)}$ ,  $S7O_{(glass)}$  and  $S85_{(glass)}$  expand significantly less than  $SO_{(glass)}$ . This shows the positive influence of BFS as partial cement replacement, although only the 70 % BFS concrete differs significantly from the 0,1 % limit value. Additional research using optical microscopy confirms the measured results.

#### C. Resistance against chlorides

CTH- and diffusion tests were conducted. Potentiometric titrations were used to determine chloride profiles.

From the CTH results follow that migration coefficients decrease when BFS contents increase to 70 %. S85 deviates from this. The same trend is observed for penetration depths (measured with AgNO<sub>3</sub>). When comparing the two formulas given in NT Build 492 to calculate migration coefficients, it can stated that the one used for OPC concrete, with a predetermined value for the chloride concentration at the color change boundary (0,07 mol/l), can also be used for BFS concrete. The greatest difference is observed in the concrete with the lowest penetration depth.

Diffusion tests show increasing surface chloride concentrations for increasing BFS levels. But the decrease of

the chloride concentrations in the depth is greater. The diffusion coefficient for S50 and S70 is lower than for S0, while the one for S85 is higher or equal. Penetration depths decrease when adding BFS to concrete. Contrarily S85 shows a higher penetration depth than S0.

Both the diffusion test and the migration test show decreasing chloride binding for higher cement replacement levels. This is in contrast to what is generally assumed in the literature. Comparing free chloride concentrations at the color change boundary, no clear conclusions can be drawn.

Finally the chloride profiles were used to determine the depth of the critical chloride content. It became clear that the critical chloride content occurred at the lowest depth in S50 and S70.

# D. Resistance against freezing and thawing in combination with de-icing salts

During the salt-scaling test, the 24 weeks old concrete specimens were exposed to 28 freeze-thaw cycles while a 3 % NaCl-solution was poured on the test surface. After every 7 cycles, the mass loss was measured.

The results show the lower resistance of concrete containing high percentages of BFS after 28 freezing and thawing cycles in combination with de-icing salts. While the additional mass loss after every 7 cycles increases for S0, it decreases for S50, S70 and S85. However, there is no significant difference between the mass loss of S0, S50 and S70 after 28 cycles.

#### IV. CONCLUSIONS

From this research, following conclusions can be drawn:

- The resistance against sulfate attack on fully immersed concrete increases with increasing cement replacement levels by BFS. On the other hand when cyclically/partially immersed, the resistance decreases for increasing BFS contents.
- Concrete containing BFS is less susceptible to ASR. The resistance increases with increasing BFS content (till 70 %) Concrete with 85 % BFS expands more than concrete with 50 % and 70 % BFS.
- Generally, concrete containing 70 % BFS showed the best resistance against chlorides. Increasing BFS levels up to 70 % show lower migration and diffusion coefficients as well as lower penetration depths than OPC concrete and also 85 % BFS concrete.
- Chloride binding decreases for increasing BFS contents.
- While no significant difference can be noticed between the mass loss due to salt scaling of concrete containing 0 %, 50 % and 70 % BFS after 28 days, the mass loss of concrete containing 85 % BFS is significantly higher.

#### V. REFERENCES

- [1] **Meyer C.,** *The greening of the concrete industry*, Cement and Concrete Composites, 2009
- [2] De Belie N., Monteny J. en Taerwe L., Apparatus for accelerated degradation testing of concrete specimens, Materials and structures, 2002
- [3] Desmyter J., Potoms G., Demars Ph, Jacobs J., De alkalisilicareactie: basisbegrippen en belang voor België; WTCB-tijdschrift, 2001
- [4] Van Lerberghe K. en Raedt R. Duurzaamheid van beton met recyclageglas als partiële grindsubstitutie, Masterthesis Ugent, 2009
- [5] Liu Z., Study of the Basic Mechanisms of Sulfate Attack on Cementitious Materials, Doctoral thesis, 2010

# Inhoud

Voorwoord		I
Overzicht		.III
Extended al	bstract	V
Inhoud		VII
Lijst met af	kortingen en symbolen	. XI
Inleiding		1
Hoofdstuk 1	1 Algemeen	3
1.1. Ver	rvangproducten	3
1.2. Ho	ogovenslak	5
1.2.1.	Wat is hoogovenslak?	5
1.2.2.	Gebruik van hoogovenslak in cement/beton	6
1.3. Gel	bruikte materialen	11
1.3.1.	Algemeen	11
1.4. Bet	tonmengelingen	13
1.5. Alg	gemene methoden	13
1.5.1.	Aanmaken beton	13
1.5.2.	Druksterkte	14
1.5.3.	Statistische controles	14

Hoofdstuk 2	2 Weerstand tegen sulfaten	15
2.1. Lite	eratuurstudie	15
2.1.1.	Aantastingsmechanisme	16
2.1.2.	Testmethodes	18
2.1.3.	Gevolgen van sulfaataantasting	27
2.1.4.	Sulfaataantasting bij hoogovenslakbeton	30
2.2. Ma	terialen en methoden	32
2.2.1.	Materialen	32
2.2.2.	Methoden	34
2.3. Res	sultaten	39
2.3.1.	ASTM C 1012-4	
2.3.2.	SVA en Wittekindt	41
2.3.3.	TAP	43
2.4. Dis	scussie	52
2.4.1.	ASTM C 1012-4	52
2.4.2.	TAP	54
2.5. Con	nclusie	64
Hoofdstuk 3	3 Weerstand tegen ASR	66
3.1. Lite	eratuurstudie	66
3.1.1.	Aantastingsmechanisme	66
3.1.2.	Testmethodes	69
3.1.3.	Reactieve granulaten	71
3.1.4.	Alkali-silicareactie bij hoogovenslakbeton	73
3.2. Ma	terialen en methoden	75
3.2.1.	Materialen	75
3.2.2.	Methoden	76

3.3. Re	esultaten	79
3.3.1.	Beproefd op 1 week ouderdom	79
3.3.2.	Beproefd op 19 weken ouderdom	81
3.4. Di	scussie	83
3.5. Co	onclusie	88
Hoofdstuk	4 Weerstand tegen chloriden	90
4.1. Li	teratuurstudie	90
4.1.1.	Aantastingsmechanisme	90
4.1.2.	Capillaire opzuiging en diffusie	96
4.1.3.	Binding van chloriden	99
4.1.4.	Testmethodes	103
4.1.5.	Chloride-aantasting bij hoogovenslakbeton	107
4.2. M	aterialen en methoden	110
4.2.1.	Materialen	110
4.2.2.	Methoden	111
4.2.3.	Migratie- en diffusiecoëfficiënten	121
4.3. Re	esultaten	121
4.3.1.	CTH	121
4.3.2.	Diffusietest	131
4.4. Di	scussie	138
4.5. Co	onclusie	143
Hoofdstuk	5 Weerstand tegen dooizouten	145
5.1. Li	teratuurstudie	145
5.1.1.	Aantastingsmechanisme	145
5.1.2.	Invloed van hoogovenslak	146
5.2. M	aterialen en methoden	148

5.2	2.1. Materialen	148
5.2	2.2. Methoden	148
5.3.	Resultaten	149
5.4.	Discussie	152
5.5.	Conclusie	153
Bijlage	A	154
Bijlage	В	156
Bijlage	e C	160
Bijlage	D	171
Bijlage	e E	180
Bibliog	grafie	182
Lijst m	et figuren	196
Lijst m	et tabellen	200

# Lijst met afkortingen en symbolen

Φ	Cumulatief normale functie	-
A	Oppervlakte van het dooizoutproefstuk	m <sup>2</sup>
ASR	Alkali-silica reactie	-
В	Gehalte bindmiddel (cement + slak)	kg/m³
c	Concentratie	mol/l
c <sub>0</sub>	Concentratie van de katholytische oplossing bij CTH	Ν
Cd	Chlorideconcentratie ter hoogte van kleuromslag	mol/l
c <sub>i</sub>	Initiële chloridenconcentratie	m% beton
C <sub>s</sub>	Chlorideconcentratie aan het oppervlak	m% beton
D <sub>nssd</sub>	Niet-stationaire diffusiecoëfficiënt	m²/s
D <sub>nssm</sub>	Niet-stationaire migratiecoëfficiënt	m²/s
E	Elektrisch veld	V/m
erf	Errorfunctie	-
F	Constante van Farraday	J/(V.mol)
J	Flux	mol/m²s
L	Dikte van de proefstukken bij CTH	mm of m
L	Massaverlies	kg/m²
М	Droge massa losgekomen materiaal	kg
m%	massaprocent	-

R	Universiële gasconstante	J/(mol.K)
R <sub>a</sub>	Parameter ter bepaling van de oppervlakteruwheid	mm
S XX	Hoogovenslakmengeling met XX % hoogovenslak	-
S	Capillaire opslorpingscoefficiënt	$m/\sqrt{s}$
Т	Temperatuur	K of °C
t	Tijd	s of h
U	Spanning	Volt
W	Watergehalte	kg/m³
W/B	Water-bindmiddel factor	-
W/C	Water-cement factor	-
Wa	Gewicht boven water	g
W <sub>d</sub>	Droog gewicht	g
$W_{w}$	Gewicht onder water	g
X	Diepte/afstand	m of mm
X <sub>cap</sub>	Capillaire indringingsdiepte	mm
X <sub>d</sub>	Chloride-indringingsdiepte (kleuromslagdiepte)	mm
Z	Valentie	-
$ ho_{dr}$	Droge densiteit	kg/m³
ω	Watergehalte ten opzichte van het volume	vol% beton
$\omega_{\mathrm{m}}$	Watergehalte ten opzichte van de massa	m% beton

# Inleiding

Historisch onderzoek heeft uitgewezen dat omstreeks 700 jaar voor onze jaartelling voor het eerst sprake was van het gebruik van natuurlijk cement. Door vulkanische as te mengen met vette kalk, een luchtbindmiddel dat verhardt onder inwerking van de  $CO_2$  uit de lucht, ontstond natuurlijk cement in zijn oervorm.

In het Romeinse Rijk werden deze mengsels van puzzolaan en vette kalk meer en meer toegepast. 100 jaar voor de geboorte van Christus werd dan het beton ontdekt. Men kan nog steeds grote constructies bewonderen die met behulp van het toenmalige beton gebouwd zijn, zoals arena's, baden, amfitheaters of aquaducten, waarvan sommige zelfs twintig eeuwen later nog perfect bewaard zijn gebleven.

Het jaar 1824 kan als het geboortejaar van het kunstmatige cement gekenmerkt worden. Dan neemt de Engelsman Joseph Aspdin een octrooi op zijn vinding, die berust op de verhouding tussen siliciumoxide, aluminiumoxide en kalk en de verhitting van dat mengsel bij hoge temperatuur. De evenwaardigheid, zowel in sterkte als in duurzaamheid, van Aspdin's product met de natuursteen uit de groeven op het schiereiland Portland leidt tot de naam Portlandcement.

In de periode tussen 1825 en 1880 ontstaan de eerste fabrieken voor Portlandcement, in Engeland en op het continent. De eerste fabriek in België dateert van 1872.

Verder cementonderzoek leidde ertoe dat in 1909 voor het eerst hoogovencement vervaardigd werd in Duitsland. In België wordt in 1927 voor het eerst hoogovencement geproduceerd. In de loop van de 20ste eeuw werd de cementproductie nog talloze malen verbeterd. Er werden met name speciale cementen geproduceerd, zonder echter te raken aan de fysisch-chemische eigenschappen en de fundamentele kenmerken van het Portlandcement. Door die vooruitgang leefde het beton terug op. Beton vond zijn toepassing in allerlei grote en kleine constructies, gaande van havendammen tot vloeren en wegverhardingen. De grote doorbraak kwam er echter met het gewapend beton. Verdere ontwikkelingen leidden tot zelfverdichtend beton, voorgespannen beton, prefabbeton en dergelijke.

Vroeger lag de nadruk in de betonwereld vooral op de sterkte van het beton, maar de moderne betontechnologie heeft ook aandacht voor duurzaamheid. Het vermogen van beton om weerstand te bieden aan fysische en chemische invloeden zoals weer en wind, vorst (en dooizouten), zeewater, sulfaten, erosie en hoge temperaturen ligt meestal gunstig in vergelijking met andere bouwmaterialen. Onder dit aspect is de doorlatendheid maatgevend en deze hangt samen met de compactheid. Hogere sterkte geeft aldus een betere duurzaamheid, maar is op zichzelf niet voldoende want de chemische weerstand van de samenstellende materialen speelt ook een rol.

[Lambotte, 2006; Ladang en Xhonneux, 2006]

In voorliggend werk werd de invloed van hoogovenslak ter gedeeltelijke vervanging van Portlandcement, bij zowel mortel als beton, op enkele duurzaamheidseigenschappen onderzocht. De betreffende eigenschappen zijn: weerstand tegen sulfaten, weerstand tegen alkali-silicareactie, weerstand tegen chloriden en weerstand tegen dooizouten. Om dit te bewerkstelligen werden experimentele proeven uitgevoerd aan het Laboratorium Magnel voor Betononderzoek.

# Hoofdstuk 1 Algemeen

# 1.1. Vervangproducten

Beton is een van de meest belangrijke bouwmaterialen. Wereldwijd wordt meer dan 10 miljard ton per jaar geproduceerd. Naast de welgekende voordelen zoals de verwerkbaarheid, de mechanische eigenschappen en de duurzaamheidseigenschappen, zijn er ook een aantal nadelen aan verbonden:

- De betonindustrie is de grootste verbruiker van natuurlijke grondstoffen ter wereld. Volgens Mehta [2002] ligt het verbruik op 12,6 miljard ton per jaar.
- Naast het hoge verbruik van natuurlijke grondstoffen, heeft de betonindustrie nood aan grote hoeveelheden energie. Vooral de productie van Portlandklinker, bestanddeel van cement, verbruikt zeer veel energie. Voor 1 ton cement heeft men 4000 à 7500 MJ energie nodig. [Swamy, 2000]
- Niet alleen de grote grondstof- en energiebehoefte van de cementindustrie is een probleem. Ook de uitstoot van schadelijke stoffen, waaronder aanzienlijke hoeveelheden CO<sub>2</sub>, is niet te verwaarlozen. Het is algemeen geweten dat de productie van 1 ton Portlandcement gepaard gaat met de uitstoot van 1 ton CO<sub>2</sub>, één van de belangrijkste broeikasgassen. De jaarlijkse productie van 1,6 miljard ton cement is goed voor 7 % van de totale koolstofdioxide-emissie. [Mehta, 1999]

Daarnaast heeft de wereldpopulatie de 6 miljard reeds overschreden. De vraag naar zuiver water, zuivere lucht, betere afvalverwerking, veilig en snel transport van mensen en goederen, residentiële en industriële gebouwen en energiebronnen zal blijven toenemen. Hierdoor zal de betonindustrie blijven groeien. Beton moet dus milieuvriendelijker gemaakt worden. Om dit te verwezenlijken kan uitgegaan worden van drie pijlers [Mehta, 1999]:

- Instandhouding van de bestanddelen voor beton;
- Filosofische aanpak van betontechnologisch onderzoek en veldontwikkeling;
- Duurzamere betonconstructies.

Als men erin slaagt om de levensduur van betonconstructies op te trekken van 50 naar 100 jaar, moet er minder beton geproduceerd worden en bijgevolg wordt ook minder milieuschade aangebracht door het voortdurend vernieuwen van bestaande constructies. Op die manier zal ook de vraag naar natuurlijke grondstoffen dalen. [Mehta, 1999]

Naast de aandacht voor het milieu, spelen ook de kosten een belangrijke rol. Zo blijkt het vernieuwen en renoveren van bestaande betonconstructies duur te zijn. De prijzen zullen echter niet dalen, waardoor het nodig geacht wordt de constructies langer te laten meegaan en de levensverwachting op te trekken. [Glasser et al., 2008]

Verder is er ook het grote afvaloverschot waar men wereldwijd mee kampt. Hier kan de betonindustrie twee vliegen in één klap slaan. Door afvalstoffen te gebruiken als vervangproducten van cement is er minder cement nodig, en worden de afvalstoffen nuttig aangewend. Door het verminderde gebruik van cement zal ook de CO<sub>2</sub>-uitstoot dalen. Volgens Mehta [1999] wordt jaarlijks 650 miljoen ton assen geproduceerd, waarvan momenteel slechts 7 % verwerkt wordt in de cement- en betonindustrie. Aangezien deze assen puzzolane eigenschappen bezitten, bestaat de mogelijkheid om grotere hoeveelheden te verwerken. Daarnaast blijkt uit het werk van Meyer [2009] dat heel wat afvalstoffen in aanmerking komen om in beton verwerkt te worden, zowel als vervangproduct van cement als ter vervanging van granulaten. Om duurzamere constructies te bekomen, wordt reeds onderzoek gevoerd naar het gebruik, in beton, van beperkte hoeveelheden afvalstoffen en bijproducten zoals hoogovenslakken, vliegassen, silica fume,... Daarnaast blijkt dat ook gerecylceerd beton, glas en zelfs banden in beton verwerkt kunnen worden.

## 1.2. Hoogovenslak

### **1.2.1.** Wat is hoogovenslak?

Hoogovenslak is een bijproduct uit de staalindustrie, dat ontstaat bij de productie van ruw ijzer. In de hoogoven wordt het erts samen met de toeslag- en de brandstoffen tot smelten gebracht. Het gesmolten ganggesteente wordt gescheiden van het gesmolten ruw ijzer en afgeschrikt met water, zodat er gegranuleerde hoogovenslak ontstaat. [CBR Gent, 2009]

Scheikundig verschilt slak van Portlandklinker. Hoewel dezelfde soort verbindingen voorkomen in beide producten, zijn de verhoudingen toch aanzienlijk anders.

Verbinding	Portlandklinker [%]	Hoogovenslak [%]
CaO	65	40
SiO <sub>2</sub>	22	35
$Al_2O_3$	5	15
MgO	1	10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	<1

Tabel 1.1: Vergelijking van de samenstelling van Portlandklinker en hoogovenslak

Bron: [Ladang en Xhonneux, 2006]

Gegranuleerde hoogovenslak is een latent hydraulisch materiaal dat voor een bepaalde hoeveelheid van de massa samengesteld is uit glasachtige slak. Verder moet het voor ten minste tweederde van de massa bestaan uit de som van CaO, MgO en SiO<sub>2</sub>. De resterende hoeveelheid bevat Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> met bovendien kleine hoeveelheden andere oxiden. De massaverhouding (CaO + MgO)/(SiO<sub>2</sub>) moet 1,0 overschrijden. Pal et al. [2003] zeggen dat de chemische en mineralogische samenstelling van hoogovenslak belangrijk is aangezien het de reactiviteit van de slakken bepaalt. Andere invloedsfactoren betreffende de reactiviteit zijn: het glasgehalte, de zuiverheidsgraad en het type activator. Volgens Erdogan [2003] en Atis en Bilim [2007] vertoont slak, ondanks zijn latent-hydraulische eigenschappen, een puzzolaan karakter evenwaardig aan dat van natuurlijke puzzolanen zoals vliegas en silica fume. Dit is volgens hem te wijten aan het hoge silica- en aluminiumgehalte in amorfe staat. [Ladang en Xhonneux, 2006] De kostprijs van hoogovenslak bedraagt ongeveer even veel als deze van Portlandcement. Door de voordelige eigenschappen op allerlei gebied is de gebruiker bereidt deze te betalen en hoogovenslak als vervangproduct van cement te gebruiken. [Meyer, 2009]

### **1.2.2.** Gebruik van hoogovenslak in cement/beton

Hoogovenslak kan op verschillende manieren in het beton gebruikt worden. Het kan apart toegevoegd worden in beton ter gedeeltelijke vervanging van cement, maar ook als vervangproduct van granulaten. Daarnaast kan het eveneens gebruikt worden als hoofdbestanddeel in gemengde cementen. [Meyer, 2009]

### **1.2.2.1.** Hoofdbestanddeel van cement

Indien gegranuleerde hoogovenslak gebruikt wordt als hoofdbestanddeel van cement wordt gesproken van hoogovencement CEM III. Deze benaming komt overeen met NBN EN 197-1 [2000]. CEM III wordt onderverdeeld in CEM III/A, CEM III/B en CEM III/C, wat wijst op het slakgehalte. De toegevoegde slakgehaltes en andere cementtypes worden weergegeven in Tabel 1.2. De types beschreven in NBN EN 197-1 worden ook wel de gewone cementsoorten genoemd. Ze zijn afgeleid van de 5 hoofdcementtypes:

### • Portlandcement CEM I

Dit cement bestaat enkel uit klinker. Als portlandcement noemen we met name het wit cement, waarmee esthetische en decoratieve producten en betonsoorten kunnen worden vervaardigd.

### • Samengesteld portlandcement CEM II

Cement bestaande uit klinker vermalen met één of meerdere aanvullende hoofdbestanddelen zoals hoogovenslak, silica fume, puzzolanen, vliegas, gebrande leisteen of kalksteen.

### • Hoogovencement CEM III

Mengsel van gegranuleerde hoogovenslakken vermalen met klinker.

### • Puzzolaancement CEM IV

Cementtype met vier componenten: klinker, vliegas microsilica en puzzolanen.

### • Composietcement CEM V

Cementtype met vier componenten: klinker, vliegas, hoogovenslak en puzzolanen.

	Samenstelling (gehalten in massaprocent) *)												
	d- n (gewone cementsoorten)			Hoofdbestanddelen									
Hoofd- typen			Klinker	Hoog- oven- slak		Puzzolanen		Vliegas		Gebran Kalks de leisteen	steen	enbestand	
						Natuur- lijke	Gebrande natuurlijke	Silicium- houdend	Calcium- houdend				Nev
			к	S	D b)	Р	Q	V	W	T	L	LL	
CEMI	Portland- cement	CEM I	95-100		-	-	-			-	-	-	0-5
	Portland-	CEM II/A-S	80-94	6-20	•	•	-				-	-	0-5
	slakcement	CEM II/B-S	65-79	21-35	-	•	-	-	-		-	-	0-5
	Portlandmic ro- silicacemen t	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-		-	-	-	0-5
		CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-				-	-	0-5
	Portland- puzzolaan-	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-		-	-	0-5
	cement	CEM II/A-Q	80-94	·	-	•	6-20	-			-	-	0-5
CEMI		CEM II/B-Q	65-79	•	-		21-35			•	-	-	0-5
CEMI		CEM II/A-V	80-94	•	· -	•		6-20			•	-	0-5
	Portland- vliegas-	CEM II/B-V	65-79	•	-			21-35			-	-	0-5
	cement	CEM II/A-W	80-94	•	-		-	-	6-20	•		-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-		-	-	21-35			۰.	0-5
	Portlandlei- steenceme	CEM II/A-T	80-94	-			-			6-20		-	0-5
	nt	CEM II/B-T	65-79	-	•		-	-	-	21-35		-	0-5
		CEM II/A-L	80-94	-			-				6-20	-	0-5
	Portlandkal k-	CEM II/B-L	65-79				-	-	-		21-35	-	0-5
	steenceme nt	CEM II/A-LL	80-94	-			-	-	-	-		6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-			-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portland-	CEM II/A-M	80-94	÷				6-20				<i>&gt;</i>	0-5
	cement c)	CEM II/B-M	65-79	÷				21-35				<i>&gt;</i>	0-5
		CEM III/A	35-64	36-65			-					-	0-5
CEM III	Hoogoven- cement	CEM III/B	20-34	66-80							-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95			-						0-5
CEMIV	Puzzolaan-	CEM IV/A	65-89		÷		11-35		→		-		0-5
CLMIN	cement c)	CEM IV/B	45-64		←		36-55		<i>&gt;</i>	-	-		0-5
CENT	Composiet-	CEM V/A	40-64	18-30		÷-	18-30	<i>&gt;</i>	-				0-5
CEMV	cement c)	CEM V/B	20-38	31-50		←	31-50	<i>&gt;</i>					0-5
<ul> <li>a) De waarden in de tabel zijn uitgedrukt ten opzichte van de som van hoofd- en nevenbestanddelen.</li> <li>b) Het gehalte microsilica mag niet meer dan 10% bedragen.</li> <li>c) In het geval van Portlandcomposietcement CEM II/A-M en CEM II/B-M, Puzzolaancementen CEM IV/A en CEM IV/B en Composietcement CEM V/A en CEM V/B, moeten de hoofdbestanddelen, anders dan klinker, in de aanduiding van het cement vermeld zijn.</li> </ul>							1						

Tabel 1.2: Overzicht van de gewone cementsoorten

Bron: NBN EN 197-1 [2000]

In de ASTM normen worden andere beschrijvingen gebruikt dan in de NBN normen. Zo zijn er 4 ASTM hoofdtypes:

• *Type I:* Gewoon Portlandcement (PC)

- *Type II:* Cement met een hoge sulfaatweerstand (HSR)
- *Type III:* Cement met een hoge aanvangsterkte (HES)
- Type IV: Cement met een lage warmteafgifte of hydratatiewarmte (LH)

### Hydratatie

Zoals in Deel 1.2.1 reeds vermeld, is hoogovenslak een latent hydraulisch materiaal. Wanneer het in water gebracht wordt, treedt geen noemenswaardige hydratatiereactie op. Indien de slak in een verzadigde Ca(OH)<sub>2</sub>-oplossing of kortweg CH-oplossing gebracht wordt, hydrateert ze wel. Bij hoogovencement kan de slak hydrateren doordat de hydratatie van de Portlandklinker CH vrijstelt. De hydratatie van hoogovenslak gebeurt door Portlandactivering. Bijgevolg kan Portlandcement nooit voor 100 % vervangen worden door hoogovenslak. [Ladang en Xhonneux, 2006]

Portlandklinker is voornamelijk samengesteld uit calciumoxide CaO, siliciumdioxide SiO<sub>2</sub>, aluminiumoxide  $Al_2O_3$  en ijzeroxide  $Fe_2O_3$ . Deze oxides komen voor in de vorm van een aantal klinkermineralen, zie Tabel 1.3. [De Schutter, 2006]

Volledige formule	Verkorte formule	Verkorte formule Benaming	
3CaO.SiO <sub>2</sub>	$C_3S$	Tricalciumsilicaat	40 tot 75
$2CaO.SiO_2$	$C_2S$	Dicalciumsilicaat	10 tot 35
3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	Tricalciumaluminaat	0 tot 15
4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	Tetracalciumalumino- ferriet	1 tot 20

Tabel 1.3: Overzicht van de klinkermineralen

Bron: [De Schutter, 2006]

Door de hydratatie van de hoofdcomponenten tricalciumsilicaat  $C_3S$  en dicalciumsilicaat  $C_2S$  ontstaat calciumsilicaathydraat CSH en calciumhydroxide of Portlandiet CH, dat nodig is voor de activatie van hoogovenslak [Hewlett, 2004]:

• 
$$2C_3S + 6H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$$
 (1.1)

• 
$$2C_2S + 4H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$$
 (1.2)

De reactie van de secundaire component tricalciumaluminaat C<sub>3</sub>A met water verloopt in verschillende stappen:

• 
$$C_3A + 12H_2O + CH \rightarrow C_4AH_{13}$$
 (1.3)

• 
$$C_3A + 3CaSO_{4.2}H_2O + 26H_2O \rightarrow C_6A.(CaSO_4)_3.H_{32}$$
 (1.4)

De derde reactie ten gevolge van de hydratatie van  $C_3A$  komt later op gang. De overgebleven  $C_3A$  reageert dan met het ettringiet  $C_6A$  (CaSO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. H<sub>32</sub> tot de vorming van monosulfaat:

•  $C_6A.(CaSO_3)_4.H + 2C_3A + 4 H_2O \rightarrow 3C_4 A.(CaSO_4).H_{12}$  (1.5)

Tot slot is er nog de hydratatie van de secundaire component tetracalciumaluminoferriet  $C_4AF$ :

• 
$$C_4AF + 4CH + 22H_2O \rightarrow C_8AFH_{26}$$
 (1.6)

De hydratatiereacties van hoogovencement zijn over het algemeen veel ingewikkelder en minder goed gekend dan bij zuiver Portlandcement. Net zoals bij Portlandcement dragen de gevormde calciumhydraten bij tot de sterkte van het beton. Daarnaast zal bij hoogovenslak ook het aanwezige MgO bijdragen tot de sterkte van het beton. In tegenstelling tot Portlandcement vertoont hoogovencement een extra piek bij de warmteontwikkeling ten gevolge van hydratatie. Deze is het gevolg van de Portlandactivatie. Eenvoudig voorgesteld kunnen volgende stappen onderscheiden worden [De Schutter, 2006; Van den Heede, 2008]:

• Portlandcement: 
$$C_3S + H_2O \rightarrow CSH + Ca(OH)_2$$
 (1.7)

• Hoogovenslakken: slakken +  $Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow CSH$  (1.8)

Hoogovenslak heeft een lagere C/S-verhouding dan cement en bevat minder  $C_3S$ , maar meer  $C_2S$ . Hierdoor wordt bij de slakhydratatie minder calciumhydroxide geproduceerd en is de bekomen CSH gelachtig en minder kristallijn. Bovendien wordt calciumhydroxide verbruikt bij de hydratatie. Door de gelachtige reactieproducten en het lagere CH-gehalte wordt een dichtere structuur bekomen dan bij gewone cementhydratatie. Escalante-Garcia en Sharp [1995] stelden bij de hydratatie van zuiver Portlandcement vorming van calciumhydroxide vast tot ongeveer 28 dagen, waarna het CH-gehalte vrijwel constant bleef of slechts licht toenam. Bij vervanging met 60% hoogovenslak bleek het verbruik van calciumhydroxide vanf ongeveer 7 dagen groter te zijn dan de productie, ongeacht de temperatuur. Na 28 dagen

werd geen noemenswaardig verbruik meer vastgesteld. [Pal et al., 2003; Samet en Chaabouni, 2004]

### **1.2.2.2.** Toevoegsel in beton

### Vervangproduct van cement

Beton waarbij cement gedeeltelijk vervangen wordt door hoogovenslak wordt hoogovenslakbeton genoemd.

Slakken kunnen beton op verschillende gebieden verbeteren. De hoeveelheden die gebruikt worden ter vervanging van cement zijn doorgaans hoger dan bij vliegassen en silica fume, waardoor de CO<sub>2</sub>-uitstoot bij de productie van het Portlandcement aanzienlijk gereduceerd wordt. Het gebruik van hoogovenslak in beton staat beschreven in norm NBN B 15-001. [Ladang, 2006]

Wat de druksterkte van beton met hoogovenslak betreft wordt door Escalante-Garcia et al. [2009] geconcludeerd dat deze afneemt als het percentage hoogovenslak ter vervanging van cement stijgt, meer bepaald als het gehalte bindmiddel stijgt. Dit is het tegenoverstelde van wat waargenomen wordt bij beton op basis van 100 % Portlandcement. Hierbij neemt de sterkte toe als de hoeveelheid bindmiddel toeneemt. Wanneer echter een alkali-activator gebruikt wordt bij hoogovenslakbeton, dan stijgt de druksterkte bij toenemend percentage Na<sub>2</sub>O. Ook Berndt [2009] concludeert dat de druksterkte beton met hoogovenslak daalt als het cementvervangingspercentage stijgt. Toevoeging van hoogovenslak ter vervanging van Portlandcement heeft echter wel een positieve invloed op de buigtreksterkte van het beton. Uit de resultaten van Berndt wordt duidelijk dat deze stijgt bij stijgende hoeveelheid slak. Uit het werk van Daems [2007] blijkt dat voor beton met vervangingspercentages kleiner dan 30 % ongeveer dezelfde druksterkte bereikt wordt na 28 dagen dan vooor Portlandcementbeton. De druksterktes van beton met hogere gehaltes slak liggen allemaal lager. Bij testen op mortelproefstukken met 30, 50 en 85 % hoogovenslak blijkt dat de buigtreksterkte na 91 dagen voor alle proefstukken groter is dan deze van Portlandcementmortel.

### Vervangproduct van granulaten

Yüksel et al. [2007] onderzochten de eigenschappen van beton waarbij hoogovenslak gebruikt werd als vervangproduct van de granulaten. De granulaten die vervangen werden waren fijn, namelijk 3-7 mm. De betonnen proefstukken werden getest op duurzaamheid. Het resultaat toont aan dat hoogovenslak als fijn granulaat de duurzaamheid positief beïnvloedt. Het vervangingspercentage is afhankelijk van de eigenschappen van de gebruikte materialen. Voor normaal beton wordt 20 % aangenomen als zijnde het optimum.

## 1.3. Gebruikte materialen

### 1.3.1. Algemeen

### Cement

Voor alle mengelingen werd gebruik gemaakt van gewoon Portlandcement CEM I 52,5 N. In Tabel 1.4 wordt de chemische samenstelling van dit cementtype weergegeven conform NBN EN 196-2 [2005] en bepaald aan de hand van golflengte dispersieve XRF (WD-XRF). De Blaine fijnheid van het gebruikte cement bedraagt 353 m<sup>2</sup>/kg.

CEM I 52,2 N	Gehalte [%]
Gloeiverlies	1,51
CaO	63,37
$SiO_2$	18,90
$Al_2O_3$	5,74
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,31
$SO_3$	3,34
MgO	0,89
$K_2O$	0,73
$\mathrm{CO}_2$	0,50
Na <sub>2</sub> O	0,47
Onoplosbare rest	0,41

Tabel 1.4: Chemische samenstelling cement

### Hoogovenslak

De hoogovenslak die hier gebruikt werd is afkomstig van Holcim-Duinkerke. De chemische samenstelling, bepaald volgens NBN EN 196-2 [2005] en aan de hand van WD-XRF wordt weergegeven in Tabel 1.5. De Blaine fijnheid van de hoogovenslak bedraagt 339 m<sup>2</sup>/kg.

Hoogovenslak	Gehalte [%]
Gloeiverlies	-0,28
Gecorrigeerd gloeiverlies	1,30
CaO	41,24
$SiO_2$	36,37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,83
MgO	7,41
$SO_3$	1,62
$\mathrm{CO}_2$	0,90
Sulfidegehalte	0,79
$K_2O$	0,41
Na <sub>2</sub> O	0,28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26
CI	0,02
Onoplosbare rest	0,43

Tabel 1.5: Chemische samenstelling hoogovenslak

Het watergehalte werd bepaald volgens Bijlage A van de goedkeuringsleidraad voor gemalen hoogoovenslakken door ATG [2004]. Dit bedraagt voor het gebruikte hoogovenslak 0,42 %.

### Zand

In alle mengelingen werd gebruik gemaakt van zand met korrelmaat 0/4. Voor de korrelverdeling wordt verwezen naar Bijlage A

### Granulaten

In dit werk werd gebruik gemaakt van twee soorten granulaten, namelijk grind met korrelmaat 2/8 en rolgrind met korrelmaat 8/16. Voor de korrelverdelingen wordt verwezen naar Bijlage A.

# 1.4. Betonmengelingen

Wat de betonmengelingen betreft werd het bindmiddel voor de verschillende samenstellingen als volgt samengesteld:

- S0: 100 % Portlandcement, 0 % Hoogovenslak
- *S50:* 50 % Portlandcement, 50 % Hoogovenslak
- *S70:* 30 % Portlandcement, 70 % Hoogovenslak
- S85: 15 % Portlandcement, 85 % Hoogovenslak

Per onderzochte duurzaamheidseigenschap werden een deel van of al deze mengelingen gebruikt, met eventueel verschillende samenstellingen van de granulaten.

## 1.5. Algemene methoden

### 1.5.1. Aanmaken beton

Het aanmaken van het beton gebeurde conform NBN B 15-001 [2004]. De totale mengtijd bedroeg telkens 3 minuten. Eerst werden de vaste bestanddelen 1 minuut droog gemengd, waarna het water werd toegevoegd en nog 2 minuten nat werd gemengd. Na het vervaardigen in de mallen werden ze bewaard in een geklimatiseerde ruimte bij 20 °C en een relatieve vochtigheid (R.V.) van minimum 95 %.

Bij het aanmaken van het beton werden een drietal karakteristieken bepaald, namelijk de zetmaat (slump), het volume lucht en het volumegewicht. De zetmaat werd bepaald in overeenstemming met de norm NBN EN 12350-2 [1999]. Hierbij wordt beroep gedaan op een Abrams-kegel waarin het beton wordt aangebracht en verdicht met een verdichtingstaaf. Na het verwijderen van de kegel kan de inzakking gemeten worden. Op basis van de bekomen waarden kan aan het beton een consistentieklasse S1, S2, S3, S4 of S5 worden toegekend. Beton met een klasse S1 komt overeen met een geringe inzakking, wat wijst op een lage verwerkbaarheid. Klasse S5 daarentegen wijst op een zeer goede verwerkbaarheid. Verder werd het luchtgehalte bepaald met een luchtgehaltemeter, zoals beschreven in

NBN EN 12350-7 [2000]. De betreffende waarden worden in de hoofdstukken weergegeven waar ook de specifieke betonsamenstellingen vermeld staan.

### 1.5.2. Druksterkte

Na 28 dagen bewaring werden de proefstukken onderworpen aan een drukproef. De proeven werden uitgevoerd op kubussen met zijde 150 mm. De druksterkte werd bepaald volgens NBN EN 12390-3 [2002]. In elk hoofdstuk worden de gemiddelde druksterktes weergegeven en de standaarddeviaties die bekomen zijn door minstens drie proefstukken te beproeven.

### **1.5.3.** Statistische controles

Om de resultaten werden steeds weergegeven als het gemiddelde van een aantal metingen met indicatie van de standaardfout op het gemiddelde.

Om de resultaten op een objectieve manier met elkaar te kunnen vergelijken, werden statistische controles uitgevoerd. Wanneer een gemiddelde waarde vergeleken werd met een grenswaarde of een startwaarde, werd een t-test toegepast met vooropgestelde waarde. Afkankelijk van de situatie was deze eenzijdig of tweezijdig. Wel werd steeds een significantieniveau van 0,05 geopteerd. Om twee gemiddelden met elkaar te vergelijken werd eveneens beroep gedaan op een twijzijdige t-test met significantieniveau 0,05. Wanneer meerdere gemiddelde waarden met elkaar vergeleken werden, werd eerst de homogeniteit van de varianties nagegaan. dit gebeurde aan de hand van een Levene's test met significantieniveau 0,01. Bij homogene varianties werd vervolgens een one-way ANOVA en Student-Newman-Kuels test gebruikt om de significantie verschillen tussen de gemiddelden op te sporen. In de gevallen waarbij de varianties niet homogeen waren, werd een one-way ANOVA en Post Hoc Dunnett's T3 test uitgevoerd. Alle statistische berekeningen gebeurden aan de hand van SPSS (PASWStatistics 18).

# Hoofdstuk 2 Weerstand tegen sulfaten

# 2.1. Literatuurstudie

Skalny et al. [2002] hebben sulfaataantasting als volgt gedefinieerd: "Sulfaataantasting is een algemene naam voor een reeks van complexe en overlappende chemische en fysische processen veroorzaakt door reacties van talrijke cementcomponenten met sulfaten die ontstaan uit externe of interne bronnen." Dat wil zeggen dat er niet alleen chemische reacties optreden tijdens het proces van sulfaataantasting van beton, maar ook fysische reacties. Een aantal jaren geleden hebben Cohen en Mather [1991] de noden voor het onderzoek naar sulfaataantasting bij beton gepresenteerd:

- Herbestuderen van de literatuur omtrent sulfaataantasting
- Het effect bepalen van elke sulfaatcomponent op beton in functie van het cementtype, hoeveelheid cement en de W/C-factor.
- Bepalen van de kenmerkende eigenschappen van elk van de reacties om zo foute diagnoses en foutieve of onnodige herstellingen te voorkomen.

Het proces van sulfaataantasting bij beton is zeer ingewikkeld.

### 2.1.1. Aantastingsmechanisme

Sulfaataantasting kan opgesplitst worden in twee categorieën: interne en externe sulfaataantasting. Externe sulfaataantasting vindt plaats wanneer water, dat opgeloste sulfaten bevat, in het beton binnendringt. De factoren die de snelheid van externe aantasting bepalen zijn: de hoeveelheid aanwezige sulfaten, de mogelijkheid van de sulfaten om het beton binnen te dringen, het volume  $C_3A$  in het cement en het type cement dat gebruikt is om het beton aan te maken. Interne sulfaataantasting treedt op als een sulfatenbron in het beton vervat zit op het moment gemixt wordt. Sulfaataantasting leidt maar effectief tot schade indien er voldoende sulfaationen, gehydrateerde calciumaluminaten, Portlandiet en water aanwezig zijn. [understanding-cement.com, 2005; Apers, 2006]

Sulfaten kunnen van nature aanwezig zijn in de grond of in het grondwater. Sulfaationen komen voor in combinatie met verschillende kationen, zoals natrium, calcium, ammonium en magnesium. Via diffusie of capillaire opzuiging dringen zij het beton binnen. De meest voorkomende vorm in de natuur is natriumsulfaat. Naast aantasting door natriumsulfaat wordt ook aantasting door magnesiumsulfaat regelmatig onderzocht. Er bestaat echter een groot verschil tussen beide aantastingsmechanismen. Bij natriumsulfaat treden reacties op tussen de sulfaten  $SO_4^{2}$  en het gehydrateerde cement. Bij magnesiumsulfaat treden niet alleen reacties op tussen de sulfaten en het gehydrateerde cement, maar ook tussen de kationen en het gehydrateerde cement. [Apers, 2006; Liu et al., 2009]

### 2.1.1.1. Reactieproducten

### Gips en ettringiet

Sulfaten reageren onder andere met de kalk die vrijkomt tijdens de hydratatie van Portlandklinker. Eén van de reactieproducten is calciumsulfaat of 'secundaire gips'. Calciumsulfaat reageert alleen met gehydrateerde calciumaluminaten  $C_3A$  en vormt daarbij calciumsulfoaluminaat (ettringiet). Dit heeft de eigenschap om sterk te zwellen. De inwendige spanningen die daardoor ontstaan, kunnen tot scheurvorming en destructie van het beton leiden. Bij natriumsulfaat doet volgende reactie zich voor waarbij gips gevormd wordt [Apers, 2006; Hime en Mather, 1999]:

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O + 2NaOH$$
(2.1)

Bij magnesiumsulfaat wordt gips op volgende manier gevormd:

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O + Mg(OH)_2$$
(2.2)

Er wordt een onderscheid gemaakt tussen primaire ettringietvorming en secundaire ettringietvorming. De primaire ettringietvorming zal niet voor noemenswaardige schade zorgen. Deze treedt op als het beton zich nog in verse toestand bevindt. De secundaire ettringietvorming zorgt wel voor problemen. Deze treedt op als het beton reeds verhard is en zorgt voor aanzienlijke expansie van de structuur. [cementenbeton.nl, 2009]

De chemische vergelijking van ettringiet in vers beton is [Hime en Mather, 1999]:

$$3(\text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O}) + 3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3 + 26\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{CaSO}_4.32\text{H}_2\text{O}$$
(2.3)

Volgens Bellmann et al. [2006] wordt geen ettringiet gevormd of kan het niet tot schade leiden bij sulfaatconcentraties van 1500 mg/l tot 3000 mg/l. Bij hogere concentraties is de vorming wel mogelijk.

### Thaumasiet

Bij lage temperaturen en in de aanwezigheid van oplosbaar carbonaat en reactief silicaat leidt sulfaataantasting tot de vorming van Ca<sub>3</sub>Si(CO<sub>3</sub>)(SO<sub>4</sub>)(OH)<sub>6</sub>.12(H<sub>2</sub>O), thaumasiet genoemd. Dit zorgt niet voor expansie maar leidt tot verlies aan sterkte en afbraak van de microstructuur. Thaumasiet wordt beschouwd als een reactieproduct dat pas in latere fasen gevormd wordt. Volgens Brown et al. [2004] wordt de vorming van thaumasiet altijd voorafgegaan door de vorming van ettringiet. Ten gevolge van het ettringiet scheurt het beton wat zorgt voor de indringing van koolstofdioxide CO<sub>2</sub>. Deze CO<sub>2</sub> draagt uiteindelijk bij tot de vorming van thaumasiet, dat van buiten naar binnen evolueert. Ook Glasser [2009] beschouwt thaumasiet als een reactieproduct dat pas in latere fasen gevormd wordt. In het algemeen wordt aangenomen dat thaumasiet enkel gevormd wordt bij temperaturen lager dan 15 °C. In verschillende onderzoeken wordt dit echter tegengesproken. Sahu et al. [2002 en 2003] nemen de vorming van thaumasiet ook waar bij omgevingstemperaturen hoger dan 15 °C, zowel bij veldonderzoek als bij labo-onderzoek. Dit wordt bevestigd door Brown et al. [2003] Zij tonen aan dat thaumasiet ook gevormd wordt op kamertemperatuur. De indringinsdiepte van thaumasiet is wel opvallend minder dan deze van ettringiet. [Schnieder et al., 2002]

### Bruciet en MSH

Wanneer het beton in een magnesiumsulfaatoplossing ondergedompeld wordt, zal het magnesium reageren met CH. Door deze reactie wordt Mg(OH)<sub>2</sub> of bruciet gevormd, zie vergelijking (10). Dit zorgt voor een soort beschermlaag waardoor oppervlakteaantasting vertraagd wordt. Daarnaast kan magnesium ook het calcium in CSH vervangen en wordt magnesiumsilicaathydraat MSH gevormd. Dit resulteert in verzachting van het beton en sterkteverlies, maar ook in grotere expansie en dus meer schade. [Skalny et al., 2002; Higgins, 2003; Dehwah, 2007]

### Thenardiet en Mirabiliet

Bij proefstukken onderworpen aan nat-droogcycli en een Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing gaan de sulfaten precipiteren als zout wanneer het water verdampt aan het drogende oppervlak. Deze zouten kunnen opgebouwd worden in de poriën en resulteren in spanningen. Afhankelijk van de omgevingsfactoren kunnen twee stabiele fasen gevormd worden, namelijk thenardiet (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) en mirabiliet (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O) of één metastabiele fase heptahydraat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O). Onderzoekers zijn het niet eens over de schade die deze producten aanrichten en over de manier waarop. Enerzijds wordt gezegd dat thenardiet de grootste druk veroorzaakt en bijgevolg het meeste schade aanricht. Anderzijds wordt gezegd dat thenardiet en mirabiliet samen schade aanrichten. Uit Amerikaans onderzoek blijkt dat de meeste schade voorkomt in de verdampingszone. [Liu et al., 2009; Van Tittelboom et al., 2009]

### 2.1.2. Testmethodes

### 2.1.2.1. Algemeen

Sulfaataantasting bij beton is een proces dat lange tijd duurt. Het is zeer onpraktisch en zo goed als onmogelijk om volledige veldtesten uit te voeren. Men kan een deel van de aantasting opmeten en de resultaten extrapoleren maar dit heeft voor gevolg dat mogelijke aantastingsmechanismen, die niet waargenomen worden tijdens de meting, over het hoofd gezien worden. Bijgevolg worden de omstandigheden zo goed als mogelijk nagebootst in het labo, en wel zodanig dat de aantasting versneld optreedt, om het volledige aantastingsverloop te simuleren. Zo worden proeven uitgevoerd met verhoogde sulfaatconcentraties, cyclussen waarbij de proefstukken nat gemaakt worden en weer gedroogd worden (dikwijls gepaard gaande met sterk wisselende temperaturen), constante pH waarden van de sulfaatoplossingen,

e.d. Het onderzoek naar sulfaataantasting kent ook enkele tegenstanders, die zich dan vooral berusten op de volgens hen niet representatieve versnelde testmethodes. Zo zouden de testmethodes de invloed van sulfaataantasting versterken waardoor men een verkeerd beeld krijgt van de resultaten. [Mehta, 2000; Haynes, 2002; Neville, 2004]

In wezen zijn er drie hoofdcategorieën van blootstelling aan sulfaten namelijk: continue onderdompeling, nat maken en drogen en gedeeltelijke onderdompeling. Er bestaan echter geen uniforme standaardprocedures om aantasting te bepalen. Om zo goed mogelijk tegemoet te komen aan de veldomstandigheden worden de testen uitgevoerd op basis van externe sulfaataantasting. De meest gangbare proeven/procedures zijn: Wittekindt [1996], SVA, CEN, ASTM C 1012 [2004] en Koch-Steinegger [1996]. Anderzijds zijn er methodes zoals ASTM C452 en de Chatelier-Anstett testmethode die interne sulfaataantasting simuleren door cement te vermengen met gips. [Clifton et al., 1998; Röwer en Punkte, 2002; Van Tittelboom et al., 2009]

De Belie [1997] heeft een testmethode ontwikkeld waarbij 24 cilindervormige betonproefstukken versneld aangetast worden door ze afwisselend onder te dompelen en te drogen. Het apparaat kan gebruikt worden om verschillende aantastingsmechanismen te simuleren. De parameters die opgemeten worden zijn de straalverandering en de ruwheid van het oppervlak. Door de proefstukken op ronddraaiende assen te plaatsen komen ze gedeeltelijk in de oplossing te zitten. De proefstukken draaien rond aan een snelheid van 1,04 rotaties per uur. Het aantal op te meten cycli is niet op voorhand vastgelegd, net zo min als de concentraties van de oplossingen. Na elke cycli waarvan de duurtijd één à twee weken bedraagt, worden de paramaters opgemeten, de proefstukken geborsteld om het loszittend materiaal te verwijderen en de oplossingen ververst. Het opmeten gebeurt met lasersensoren die de gegevens rechtstreeks naar een computer doorsturen. Dit gebeurt zowel voor als na het borstelen van de proefstukken. Uit de bekomen gegevens kan dan, met behulp van software zoals Labview en Excel, de gemiddelde verandering van de straal en de oppervlakteruwheid bepaald worden. De oppervlakteruwheid wordt uitgedrukt door de R<sub>a</sub>-waarde.

De reactieproducten gevormd bij sulfaataantasting kunnen gedetecteerd worden met verschillende methodes. De meest gangbare zijn SEM/EDX (Scanning electron Microscope with Energy dispersive X-ray Detector), XRD (X-Ray Diffraction) en XRF (X-Ray Fluorescence). Om de indringingsdiepte van de sulfaten te bepalen wordt beroep gedaan op de IC-methode (Ion Chromatography). [Van Tittelboom et al., 2009]

Verder bestaat ook een methode om de sulfaataantasting te bepalen waarbij de elasticiteitsmodulus van de proefstukken opgemeten wordt. Op basis van een lichte mechanische impuls wordt de frequentie van de trillingen doorheen het proefstuk opgemeten. De frequentie van de trillingen is afhankelijk van de massa en de stijfheid. Deze stijfheid is op zijn beurt afhankelijk van de afmetingen en de elasticiteitsmodulus. De weerstand tegen sulfaataantasting verbetert als de elasticiteitsmodulus daalt, dit betekent hoe lager de elasticiteitsmodulus op een bepaald tijdstip hoe beter de weerstand tegen sulfaten op die moment. Als het beton aangetast wordt dan zal de elasticiteitsmodulus toenemen. [Röwer, 2002]

### 2.1.2.2. Invloedsfactoren

### **Oplossing en concentratie**

Om externe sulfaataantasting te simuleren kunnen verschillende oplossingen en concentraties gebruikt worden. De meest gebruikte zijn Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en MgSO<sub>4</sub> oplossingen. Tijdens de test kan geopteerd worden om dezelfde oplossingen voortdurend te gebruiken of om deze op bepaalde tijdstippen te verversen. Dit laatste is het geval bij de Wittekindt- en SVA-testmethodes waarbij de oplossing wekelijks ververst wordt. [Van Tittelboom et al., 2009]

Wat de concentraties betreft wordt getracht om de werkelijkheid zo goed mogelijk te benaderen maar ook om het aantastingmechanisme zo snel mogelijk te laten verlopen. De hoogste  $SO_4^{2-}$  concentraties die waargenomen worden in grondwater schommelen rond de 6 à 10 g/l. Testmethodes schrijven echter veel hogere waarden voor, meer bepaald 50 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ( $\approx$  34 g/l SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) bij ASTM C 1012 en 29,8 g/l bij Wittekindt en SVA. Cohen en Mather [1991] duiden erop dat hogere sulfaatconcentraties kunnen leiden tot ongewenste effecten, meer bepaald een gewijzigd aantastingsmechanisme. Zo blijkt bij hoge concentraties gips het voornaamste reactieproduct te zijn, terwijl dit bij lage concentraties ettringiet.

### pH-waarde

Volgens Mehta [1975] geeft continue onderdompeling geen representatieve waarden voor wat in het veld gebeurt. De pH van de testoplossingen verandert zeer snel van neutraal naar basisch, door het uitlogen van alkaliën uit het beton. Daarnaast stelt Mehta ook vast dat de sulfaatconcentratie afneemt na verloop van tijd. Dit zou niet het geval zijn in natuurlijke omstandigheden. Mehta stelt, net zoals Ferraris et al. [2005], voor om de pH-waarde constant te houden. Naast de meer realistische condities zal de testmethode sneller verlopen aangezien het aantastingsmechanisme sneller op gang kan komen. Mehta en Gjorv [1974] ontwikkelden als eersten een testmethode met constante pH-waarde, door middel van manuele titratie met  $H_2SO_4$ .

Daarnaast heeft Mehta [1975] aangetoond, en wordt ook in het werk van Liu [2010] aangegeven, dat de pH-waarde een belangrijke invloed heeft aangezien het de vorming van ettringiet, gips en thaumasiet al dan niet toelaat. Bij een pH-waarde van 6 is ettringiet zeer onstabiel, hoewel uit de resultaten van Mehta blijkt dat een pH van 6,2 de vorming van ettringiet wel degelijk toelaat. Bij hogere pH-waarden wordt het steeds stabieler. Mehta spreekt van stabiel ettringiet bij een pH van 11,5. Gips wordt niet gevormd indien de pH-waarde groter is dan 12,9 en thaumasiet heeft een pH-waarde nodig van meer dan 10,5. Ook onderzoek van Brown [1981] heeft aangetoond dat een pH van 7 een aanzienlijk verhoging van de sulfaataantasting teweeg brengt ten opzichte van lagere ph-waarden. Dit werd zowel opgemerkt bij sterktemetingen als bij metingen van lengteveranderingen.

### Testtemperatuur

De meeste testprocedures, aangegeven in normen, worden uitgevoerd bij 20 à 23 °C. Uit verschillende onderzoeken blijkt dat wanneer de temperatuur daalt onder 15 °C, thaumasiet gevormd wordt. Het tegendeel, namelijk vorming van thaumasiet bij kamertemperatuur, wordt echter ook bewezen door bepaalde onderzoekers (zie Deel 2.1.1). Hogere temperaturen kunnen leiden tot een vertraagd aantastingsmechanisme. Bij temperaturen boven 70 °C zal ettringiet destabiliseren. [Van Tittelboom et al., 2009]

#### Beton, mortel of cementpasta

Aangezien de proefmethodes testen op beton, mortel of cementpasta omvatten, is er onderzoek gebeurd naar de overeenkomst tussen de verschillende materialen. Cohen en Mather [1991] concluderen dat het gedrag van cementpasta en beton bij sulfaataantasting niet vergeleken kan worden. Door de aanwezigheid van granulaten ontstaat een transitiezone. Dit houdt in dat de microstructuur van de cementpasta in beton en pure cementpasta sterk verschilt.

Bentur en Cohen [1987] bestudeerden ook het gedrag van pure cementpasta en beton. Zij concluderen echter dat de resultaten van proeven op cementpasta wel representatief zijn om

het gedrag van beton in dezelfde omstandigheden te voorspellen. Uit het onderzoek blijkt dat de expansie in de transitiezone minimaal is, zeker indien toevoegsels gebruikt worden, aangezien de transitiezone daar bijna verdwijnt. [Van Tittelboom et al., 2009]

### Grootte van de proefstukken

De testmethodes schrijven allen verschillende afmetingen van de proefstukken voor. Uit onderzoek blijkt dat de verhouding van het volume van de proefstukken tot de oppervlakte die blootgesteld is aan de sulfaatoplossing invloed heeft op de snelheid van het aantastingsmechanisme. Hoe groter deze verhouding, hoe trager de aantasting plaatsvindt. Het is de bedoeling om deze verhouding zo optimaal mogelijk te maken zodanig dat de resultaten snel bekomen worden maar dat deze wel nog representatief zijn voor wat in praktijk gebeurt. [Rozière et al., 2009]

### Parameter

Naast de concentratie, pH, samenstelling van de oplossing,... verschillen de proeven ter bepaling van de sulfaatweerstand ook op basis van de op te meten parameters. Wittekindt, SVA, CEN, ASTM C1012 en C452 gebruiken lengteverandering als degradatieparameter terwijl bij de Chatelier-Anstett proef en het TAP-toestel de diametertoename bepaald wordt. Vermindering van buigtreksterkte wordt gebruikt bij Koch-Steinegger en Notched Beam methodes. De parameterkeuze bepaalt mede de duurtijd van de proef, variërende van een aantal dagen tot enkele maanden. [Van Tittelboom et al., 2009]

### 2.1.2.3. Overzicht voornaamste testmethodes

- ASTM C1012-04 [ASTM International, 2004]
  - o Proefstukken: Mortelprisma's 25,4 x 25,4 x 285 mm
  - o W/C-factor: 0,485
  - $\circ$  Voorbereiding: Bewaren bij 35 °C en ontkisten na 1 dag, bewaren in Ca(OH)<sub>2</sub> tot een sterkte van 20 MPa bereikt is, referentiemeting
  - o Externe sulfaataantasting
  - Sulfaatoplossing: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 50 g/l bij 23°C
  - Duurtijd: 6 maanden tot 1 jaar

- Parameter: Lengteverandering
- o Meetpunt: Roestvrij stalen plaatjes aan de uiteinden
- ∨oorwaarde: Sulfaataantasting aanvaardbaar bij Portlandcement indien de gemiddelde lengteverandering van 3 proefstukken ≤ 0,01 %; van 4 proefstukken ≤ 0,011 % en ≤ 0,012 % als gemiddelde van 5 of 6 proefstukken.
- CEN [Röwer en Punkte, 2002]
  - Proefstukken: Mortelprisma's 25 x 25 x 160 mm
  - W/C-factor: 0,5
  - Voorbereiding: Bewaring bij 20 °C en 95 % R.V., ontkisting na 1 dag en 27 dagen bewaren in gedestilleerd water
  - o Externe sulfaataantasting
  - Sulfaatoplossing: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 16 g/l bij 23°C
  - o Duurtijd: 140 dagen
  - Parameter: Lengteverandering
  - Meetpunt: Proefstuk zelf
  - Referentieprisma's in gedestilleerd water
- Wittekindt [VDZ, 1996; Röwer en Punkte, 2002]
  - Proefstukken: Mortelprisma's 10 x 40 x 160 mm
  - W/C-factor: 0,6
  - Voorbereiding: Bewaring bij 20 °C en 95 % R.V., ontkisting na 1 dag en vervolgens 13 dagen bewaren in gedestilleerd water bij 20 °C en normale R.V.
  - Externe sulfaataantasting
  - Sulfaatoplossing: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 29,8 of 3 g/l bij 20°C
  - Duurtijd: 56 dagen
  - Parameter: Lengteverandering
  - Meetpunt: Roestvrij stalen plaatjes aan de uiteinden
  - o Referentieprisma's in gedestilleerd water
  - Voorwaarde:  $\Delta l/l_0 ≤ 0.5 \text{ mm/m of} ≤ 0.05 \% \text{ op 56 dagen}$
$\circ$  Relatieve expansie [mm/m] = 7,143 L, met L = L<sub>t</sub> - L<sub>0</sub>

 $L_t$  = Lengte op bepaald tijdstip,  $L_0$  = Referentielengte

- SVA [Röwer en Punkte, 2002]
  - Proefstukken: Mortelprisma's 10 x 40 x 160 mm
  - W/C-factor: 0,5
  - $\circ~$  Voorbereiding: Bewaring bij 20 °C en > 90 % R.V., ontkisting na 2 dagen en vervolgens 12 dagen bewaren in Ca(OH)<sub>2</sub> bij 20 °C
  - Externe sulfaataantasting
  - Sulfaatoplossing: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 29,8 g/l bij 20°C
  - o Duurtijd: 91 dagen
  - Parameter: Lengteverandering
  - Meetpunt: Proefstuk zelf
  - o Referentieprisma's in gedestilleerd water
  - $\circ$   $\:$  Voorwaarde:  $\Delta l/l_0$   $\leq$  0,5 mm/m of  $\leq$  0,05 % op 91 dagen
- TAP [De Belie et al., 2002]
  - $\circ$  Proefstukken: Betoncylinders  $\varnothing$  270 mm x 70 mm
  - W/C-factor: vrij te kiezen
  - Externe sulfaataantasting
  - Sulfaatoplossing: vrij te kiezen
  - Duurtijd: aantal cycli zelf te bepalen alsook de duurtijd ervan (1 à 2 weken)
  - Parameters: Verandering van straal voor en na borstelen, ruwheid van het oppervlak
  - Contactloze meting: Gebruik van lasers
- Chatelier-Anstett [Van Tittelboom et al., 2009]
  - $\circ$  Proefstukken: Cementpastacilinders  $\varnothing$  80 mm x 30 mm
  - W/C-factor: 0,5
  - Interne sulfaataantasting

- o 50 g gips vermengen met 100 g cement
- Voorbereiding: Bewaring bij 23 °C en 100 % R.V., ontkisting na 1 dag en 20 dagen in water daarna gedurende 1 min. onder druk zetten (20 MPa)
- Duurtijd: voorbereiding + 90 dagen, in contact met nat papier
- Verandering van straal
- o Meetpunt: Proefstuk zelf
- ∨oorwaarde: Diametertoename ≤ 1,25 % na 28 dagen
- Koch-Steinegger [VDZ, 1996]
  - Proefstukken: Mortelprisma's 40 x 40 x 160 mm
  - Voorbereiding: Bewaren bij 35 °C, ontkisten na 1 dag en 21 dagen bewaren in gedestilleerd water
  - o Externe sulfaataantasting
  - Sulfaatoplossing: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 25 g/l
  - o Duurtijd: 56 dagen
  - Parameter: Buigtreksterkteverlies
  - Referentieprisma's in gedestilleerd water
  - Voorwaarde:  $B_s / B_w \le 0.7$  na 56 dagen

Met  $B_s$  = sterkte van proefstuk blootgesteld aan sulfaten en  $B_w$  = sterkte van het referentieproefstuk

## 2.1.2.4. Opmerkingen en aangepaste methodes

Uit het onderzoek van Ferraris et al. [2005] wordt geconcludeerd dat de expansiemeting via de ASTM C 1012 methode niet overeenstemt met hun observaties. ASTM C1012 gaat ervan uit dat het ganse proefstuk tegelijkertijd expandeert, terwijl Ferraris et al. stellen dat slechts een klein deel rond het meetpunt verantwoordelijk is voor de opgemeten expansie. Volgens hen is de werkelijke expansie rond het meetpunt tot 50 keer groter dan de waarde die bekomen wordt door de lengteverandering te beschouwen over de volledige lengte. Ze stellen enerzijds voor om de uiteinden van de proefstukken af te schermen zodat de sulfaten niet via de uiteinden kunnen binnendringen. Anderzijds stellen ze voor om de lengte van de proefstukken te reduceren om zo de tijd die nodig is om het proefstuk te verzadigen met

sulfaten te verkorten. De verbeteringen worden verwezenlijkt door proefstukken aan te maken met afmetingen 10 x 10 x 40 mm en met meetpinnen die over een bepaalde afstand in het proefstuk verankerd zitten. Aan de uiteinden wordt, over een lengte van 5 mm, epoxy aangebracht. Ter voorbereiding worden de proefstukken gedurende 1 dag met bekisting in een gesloten plastiek zak gevuld met water bewaard bij 22 °C. Daarna worden de proefstukken ontkist en in kalkwater geplaatst. Na 3 à 4 dagen worden de meetpunten alsook het epoxy aangebracht. Na droging worden ze teruggeplaatst in het kalkwater tot ze 7 dagen oud zijn. Dan worden de proefstukken opgemeten en aan de sulfaatoplossing van 50 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> blootgesteld. De metingen gebeuren met een lengtevergelijker. Uit de vergelijking van de test ontwikkeld door Ferraris et al. en ASTM C1012 [2004] blijkt dat de testperiode slechts één derde bedraagt indien 0,1 % uitzetting als referentie genomen wordt.

- Ferraris et al. [2005]
  - Proefstukken: Mortelprisma's 10 x 10 x 40 mm
  - o W/C-factor: 0,485
  - o Externe sulfaataantasting
  - Sulfaatoplossing: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 50 g/l
  - Duurtijd: Tot achteruitgang vastgesteld wordt (≈ 1/3 van de duurtijd bij ASTM C 1012)
  - Parameter: Lengteverandering
  - Meetpunt: Roestvrij stalen plaatjes verankerd in de uiteinden waarbij Epoxy waarbij over 5 mm epoxy aangebracht wordt

Volgens sommige onderzoekers, waaronder Mehta en Gjorv [1974], is het beter om de sterkteverandering op te meten in plaats van de lengteverandering. Aangezien zowel de expansie en scheurvorming ten gevolge van ettringiet- en/of gipsvorming alsook het verlies van CSH-vorming, de sterkte aantast. Door de sterkte op te meten wordt bijgevolg rekening gehouden met alle vormen van schade ten gevolge van sulfaataantasting, wat niet het geval is bij het opmeten van lengteverandering. [Van Tittelboom et al., 2009]

Naast lengteverandering en sterktemetingen, kan ook de massa van de proefstukken bepaald worden op verschillende tijdstippen. Door het ingewikkelde mechanisme van sulfaataantasting is het niet mogelijk om één enkele parameter te definiëren om sulfaataantasting te voorspellen in verschillende omstandigheden. Bijgevolg is het ook nog niet mogelijk om een standaardtest te ontwikkelen. [Van Tittelboom et al., 2009]

## 2.1.3. Gevolgen van sulfaataantasting

Zoals reeds aangehaald in Deel 2.1.1 leidt sulfaataantasting tot vorming van gips en ettringiet. Dit heeft de eigenschap om sterk te zwellen, wat scheurvorming tot gevolg heeft. Daarnaast kan ook thaumasiet gevormd worden. Dit zorgt niet voor zwelling maar wel voor sterkteverlies. Bruciet daarentegen, dat gevormd wordt bij onderdompeling in magnesiumsulfaat, zorgt voor een beschermlaagje op het beton. MSH, eveneens gevormd bij magnesiumsulfaataantasting, leidt op zijn beurt dan weer wel tot expansie. Thenardiet en mirabiliet treden enkel op bij proefstukken onderworpen aan natriumsulfaatoplossingen en zorgen voor druk in de poriën en bijgevolg voor schade.

De algemene opvatting is dat de schade ten gevolge van magnesiumsulfaataantasting bij volledige onderdompeling ernstiger is dan natriumsulfaataantasting omwille van de dubbel inwerkende acties, waarbij magnesiumsulfaat niet enkel de expansieve producten gips en ettringiet vormt maar ook bruciet en MSH. Uit een aantal studies wordt echter geconcludeerd dat dit niet het geval is op langere termijn, aangezien bij magnesiumsulfaat het bruciet zorgt voor een beschermlaagje op het betonoppervlak. Op die manier wordt verhinderd dat de ionen het beton makkelijk kunnen binnendringen. [Brown en Hooton, 2002; Higgins, 2003; Brown et al., 2004; Lee et al., 2006; Liu, 2006]

De invloed van C<sub>3</sub>A werd onder andere door Naik et al. [2006] onderzocht. Hoe hoger het gehalte aan C<sub>3</sub>A, hoe groter de expansie ten gevolge van sulfaataantasting. De testen van Naik werden uitgevoerd volgens ASTM C 1012, met mortelprisma's van ASTM Type I  $(9,9 \ C_3A)$  en ASTM Type V  $(3,3 \ C_3A)$  cement, ondergedompeld in een Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oplossing. Uit datzelfde onderzoek wordt ook geconcludeerd dat een stijging van de W/C factor een stijging van de expansie tot gevolg heeft. Dit wordt bevestigd door Rozière et al. [2009] Zij zeggen dat een W/C factor hoger dan 0,5 aanzienlijke expansies geeft voor alle cementsoorten, waaronder ook sulfaatresitente cement.

El-Hachem et al. [2005] onderzochten sulfaataantasting bij mortelprisma's op basis van CEM I 52,5 N en een W/C-factor van 0,6 bij verschillende concentraties  $Na_2SO_4$  en onderscheidden twee fasen in de evolutie van de massa en de lengte van de proefstukken. Deze fasen komen voor bij alle sulfaatconcentraties gaande van 3 g/l tot 30 g/l, maar met een verschuiving in de tijd. Hoe hoger de concentratie, hoe sneller de fasen elkaar opvolgen. Zo is er de eerste fase waarbij geen noemenswaardige verandering van lengte waar te nemen is en mogelijks een kleine massa-afname. Ze schrijven dit toe aan de uitloging van portlandiet CH.

De tweede fase omvat een sterke massa- en lengtetoename van de proefstukken ten gevolge van gips- en ettringietvorming die zorgt voor zwelling van de mortel. Deze fasen worden ook beschreven door Pommersheim en Clifton [1994] (zie Figuur 2.1) en door Schmidt et al. [2009].



Figuur 2.1: Tijdsverloop sulfaataantasting

Bron: Pommersheim en Clifton [1994]

Daarnaast wijzen El-Hachem et al. [2009] erop dat niet alleen ettringiet leidt tot expansie maar dat ook gipsvorming een expansief en destructief karakter vertoont. Uit hun onderzoek op mortelprisma's bij verschillende natriumsulfaatconcentraties blijkt dat gips zelfs de voornaamste oorzaak is van desintegratie. Schmidt et al. [2009] concluderen echter uit microstructureel onderzoek, gebruik makende van SEM/EDS, dat gips enkel gevormd wordt bij oplossingen met hoge sulfaatconcentraties. Dit komt overeen met de bevindingen van Matschei en Glasser [2008]. De vorming vindt plaats dicht tegen het oppervlak van de proefstukken. De bijdrage tot expansie is volgens hen beperkt en ze schrijven de voornaamste oorzaak van expansie toe aan ettringietvorming. Volgens Almeida [2009] neemt gips een volume in dat 2,24 keer groter is dan dat van de oorspronkelijke componenten. De vorming van ettringiet leidt tot toenames van 2,5 à 3,27 keer het oorspronkelijk volume. Bij lage sulfaatconcentraties werd weinig tot geen gipsvorming waargenomen.

Nog uit onderzoek van Schimdt et al. [2009] blijkt dat mortelproefstukken, aangemaakt volgens EN 196-1 met een W/C-factor gelijk aan 0,5 en zonder toevoegsels, na één jaar onderdompeling in een oplossing met 44 g/l natriumsulfaat allen zeer grote expansie ondergaan. Bij oplossingen met lagere sulfaatconcentraties,namelijk 4 g/l, zijn de expansies minder maar nog steeds aanzienlijk. Wat de massavariatie betreft werd enkel een toename waargenomen. De proefstukken werden bewaard bij 8 °C en bij 20 °C. Uit vergelijking van de

resultaten blijkt dat het expansiegedrag onafhankelijk is van de temperatuur. Dit wijst erop dat bij zowel 8 °C als bij 20 °C hetzelfde aantastingsmechanisme voorkomt. De conclusie luidt dus dat de vorming van thaumasiet temperatuuronafhankelijk is, in tegenstelling tot wat vele onderzoekers beweren. Dit komt wel overeen met de bevindingen van Brown et al. [2003] waar thaumasiet gevonden werd bij proefstukken bewaard op kamertemperatuur. Het thaumasiet werd wel voornamelijk aan het oppervlak gevonden. Verder stellen Schmidt et al. [2009] dat thaumasiet niet zozeer een oorzaak is van beschadiging bij sulfaataantasting dan wel een gevolg, omdat thaumasiet pas gevormd wordt nadat er reeds scheuren in de mortel aanwezig zijn. Dit neemt niet weg dat het op zijn beurt zorgt voor bijkomende expansie. Uit ditzelfde onderzoek wordt ook geconcludeerd dat de permeabiliteit van de proefstukken een voorname rol speelt in de weerstand tegen sulfaataantasting.

Liu [2010] toont in zijn onderzoek aan dat gedeeltelijk ondergedompeld beton op een andere manier aangetast wordt dan volledig ondergedompeld beton. Zo concludeert hij dat er twee manieren van aantasting zijn op basis van natriumsulfaat: enerzijds een verhoging van de sulfaatconcentraties in de niet-ondergedompelde delen ten gevolge van capillaire opzuiging en diffusie van damp waardoor meer reactieproducten gevormd worden, anderzijds expansiedruk ten gevolge van sulfaatzoutkristallisatie. Deze zoutkristallisatie komt niet voor in de cementmaterialen maar wel in de poriën en op de granulaten. Menéndez en Andrade [2009], die veldonderzoek verricht hebben op rioolbuizen van bepaalde industriële bedrijven die onderhevig zijn aan sulfaataantasting, merkten op dat de sterkte van het ondergedompelde beton niet veel afneemt. Wel wordt afname van de sterkte opgemeten in de zone die slechts tussentijds ondergedompeld is. Daarnaast blijkt dat bij een reductie van de sulfaatconcentratie tot 8 g/l het aantastingsvermogen aanzienlijk geminimaliseerd wordt. Dit laatste wordt ook door Liu [2010] bevestigd.

Uit het voorgaande blijkt dat de gevolgen van sulfaataantasting ernstig kunnen zijn. Vandaar dat het aangewezen is de weerstand van beton en mortel tegen sulfaataantasting te verbeteren door [Verbeck, 1967; Khatri et al., 1997; Liu et al., 2009]:

- Verminderen van de permeabiliteit,
- Onder controle houden van de hoeveelheid reactief aluminaat in het cement, door het tricalciumaluminaat te beperken.

Algemeen worden volgende drie middelen voorgesteld om beton te verkrijgen met voldoende weerstand tegen sulfaten [Liu, 2010]:

- Verlagen van de W/C-factor,
- Gebruik van cement dat bestand is tegen sulfaataantasting,
- Vervangen van cement door natuurlijke puzzolanen.

# 2.1.4. Sulfaataantasting bij hoogovenslakbeton

Liu et al. [2009] concluderen dat beton, volledig ondergedompeld in een sulfaatoplossing, een betere weerstand bezit indien een bepaald gehalte hoogovenslak gebruikt wordt ter vervanging van cement. Ook volgens Brown et al. [2004] is de vervanging van cement door hoogovenslak bijzonder effectief in het verminderen van de omvang van sulfaataantasting, zowel bij MgSO<sub>4</sub> als bij Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Uit de resultaten van op verschillende leeftijden wordt duidelijk dat de indringingsdiepte en de lengteverandering bij hoogovenslakbeton met 45 % of 72% hoogovenslak ter vervanging van Portlandcementcement, aanzienlijk minder is dan bij beton op basis van 100 % Portlandcement en zelfs minder dan bij beton op basis van hoogovencement, ASTM V. Dit is het gevolg van een dichtere poriënstructuur. Verder zeggen Brown et al. dat de hoeveelheid slak, binnen het interval 45 tot 72 %, relatief weinig invloed heeft op de weerstand van het beton tegen sulfaten.

Rozière et al. [2009] hebben onderzoek verricht naar sulfaataantasting bij mortelproefstukken, op basis van ASTM C 1012 waarbij cement vervangen werd door 62 % hoogovenslak. Uit hun resultaten blijkt dat de expansie aanzienlijk minder is dan bij proefstukken op basis van 100 % Portlandcement. In Deel 2.1.3 werd vermeld dat een verhoging van de waterbindmiddel factor (W/B) een verhoging van de expansie tot gevolg heeft. Maar volgens Rozière et al. heeft dit geen invloed op de expansie van proefstukken met 62 % hoogovenslak. In ASTM C 989-06 [2006] wordt gezegd dat het gebruik van hoogovenslak ter vervanging van cement in beton zorgt voor een verlaging van de C<sub>3</sub>A-hoeveelheid, een verlaging van de permeabiliteit en een verlaging van de calciumhydroxidehoeveelheid. Uit de studies op basis van ASTM C 1012 blijkt dat vervangingsgehaltes van meer dan 60 % een zeer goede invloed hebben op de sulfaatweerstand. Op elk tijdstip is deze groter dan bij 100 % Portlandcementbeton. Ook Higgins [2003] als Bakharev et al. [2002] concluderen dat hoogovenslak als vervangproduct van cement de expansie ten gevolge van sulfaataantasting in beton vermindert. Uit het onderzoek van Higgins blijkt echter dat in aanwezigheid van MgSO<sub>4</sub> de mogelijkheid van de slak om schade te beperken minder is dan in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oplossingen. Beton met 70 % cementvervanging levert de beste resultaten, behalve in MgSO<sub>4</sub>.

Uit de resultaten van Berndt [2009], die de mate van sulfaataantasting bepaalt op basis van de elasticiteitsmodulus, wordt duidelijk dat hoogovenslak zeer efficiënt is om de weerstand tegen sulfaataantasting te verhogen. De elasticiteitsmodulus van hoogovenslakbeton met vervangingsgehaltes van 50 % en 70 % en ondergedompeld in natriumsulfaat vertonen hetzelfde verloop in tijd als beton op basis van 100 % Portlandcement, maar de waarden liggen lager. Onderling verschillen de elasticiteitsmoduli van de proefstukken met hoogovenslak ook maar minder significant.

Bij lage vervangingspercentages zou de hoeveelheid aluminiumoxide Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> een invloed hebben op de sulfaatweerstand. Hoe hoger dit gehalte, hoe lager de weerstand. Dit blijkt ook uit de literatuurstudie van Liu [2010]. Naast het gehalte Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in het slak, heeft ook de manier van blootstelling een grote invloed. Wanneer het proefstuk cyclisch of gedeeltelijk ondergedompeld wordt, neemt de weerstand van beton met bepaalde gehaltes hoogovenslak af ten opzichte van traditioneel beton. Uit onderzoeken van Irassar et al. [1996], Bassuoni en Nehdi [2009] en Liu [2010] wordt geconcludeerd dat de delen die niet rechtsreeks blootgesteld waren aan de sulfaten het meest aangetast waren. De delen die wel rechtsreeks in aanraking kwamen met de sulfaten vertoonden in vergelijking nagenoeg geen schade. De toevoeging van hoogovenslak ter vervanging van cement speelt een negatieve rol bij de aantasting op deze manier, hoe hoger het slakgehalte hoe meer aantasting. Liu [2010] besluit dat deze aantasting onder andere het gevolg is van fysische aantasting of zoutkristallisatie, zoals ook al aangegeven in Deel 2.1.3. Door capillaire zuiging komen de sulfaationen opgelost in water in het gedeelte dat niet ondergedompeld is. Toevoeging van hoogovenslak geeft aanleiding tot een lagere porositeit en bijgevolg een hogere capillaire stijghoogte. Ten gevolge van de hoogovenslak kan carbonatatie optreden tijdens de sulfaataantasting. Hierdoor wordt het mogelijk dat de kristallisatie zich ook voordoet op de cementmaterialen, wat voor meer druk en meer schade zorgt. Toch bestaat er heel wat onduidelijkheid over de exacte aantastingsmechanismen bij gedeeltelijke onderdompeling. Wat wel duidelijk wordt in het onderzoek van Liu [2010] is dat de aantasting ten gevolge van MgSO<sub>4</sub> bij gedeeltelijke onderdompeling minder is den ten gevolge van Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Uit de literatuur besluit Liu ook dat er door toevoeging van hoogovenslak aan het beton ter gedeeltelijke vervanging van cement meer thaumasiet gevormd wordt dan bij beton zonder hoogovenslak. De literatuur toont duidelijk aan dat hoogovenslakbeton een negatieve invloed heeft in vergelijking met traditioneel beton bij gedeeltelijke onderdompeling in sulfaatoplossingen.

# 2.2. Materialen en methoden

## 2.2.1. Materialen

## 2.2.1.1. Betonmengelingen

Voor de proeven in het kader van dit onderdeel werden drie verschillende betonmengelingen vervaardigd. In Tabel 2.1 wordt de samenstelling van deze mengelingen weergegeven. Bij de mengelingen werd telkens een gehalte cementeerbaar materiaal van  $\pm 350$  kg/m<sup>3</sup> vooropgesteld. De water/bindmiddel-factor (W/B) bedroeg 0,5. Mengeling S50 werd in tweevoud aangemaakt, namelijk S50 [a] en S50 [b]. Deze werden tijdens de proef aan een verschillende sulfaatconcentratie onderworpen.

	<b>S0</b>	<b>S50</b>	S85
Zand 0/4 [kg/m <sup>3</sup> ]	791	788	785
Granulaat 2/8 [kg/m <sup>3</sup> ]	425	423	422
Granulaat 8/16 [kg/m³]	618	616	613
CEM I 52,5 N [kg/m <sup>3</sup> ]	350	174	52
Water [kg/m <sup>3</sup> ]	175	174	173
Hoogovenslak [kg/m <sup>3</sup> ]	0	174	295
W/B-factor	0,5	0,5	0,5

Tabel 2.1: Betonsamenstellingen voor weerstand tegen sulfaten

In Tabel 2.2 worden de parameters van het beton getoond die bepaald werden tijdens het aanmaken. Voor een beschrijving van de bepaling wordt verwezen naar Deel 1.5.1.

Tabel 2.2: Parameters bekomen bij het aanmaken van beton	
Tabel 2.2: Parameters bekomen bij het aanmaken van beton	

Mengeling	Slump [mm] (Klasse)	Luchtgehalte [ %]	Volumegewicht [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>S0</b>	25 (S1)	3,3	2338
S50	30 (S1)	1,4	2344
S85	25 (S1)	1,7	2344

De gemiddelde druksterktes met standaardfout op 28 dagen van de betonmengelingen, die gebruikt werden om de weerstand tegen sulfaten te bepalen, zijn weergegeven in Tabel 2.3.

Mengeling	Druksterkte [N/mm²]	σ [N/mm²]
<b>S0</b>	51,73	1,09
<b>S50</b>	41,63	1,25
<b>S85</b>	26,01	0,40

Tabel 2.3 Gemiddelde druksterktes op 28 dagen

### 2.2.1.2. Mortelmengelingen

Om de weerstand tegen sulfaten te bepalen volgens de proefprocedures ASTM C 1012-4 [ASTM International, 2004], SVA[VDZ, 1996; Röwer en Punkte, 2002] en Wittekindt [VDZ, 1996; Röwer en Punkte, 2002]; werd gebruik gemaakt van drie mortelmengelingen. Voor Wittekindt- en SVA-proeven werden deze samengesteld met een W/B-factor van respectievelijk 0,6 en 0,5. Voor de ASTM-procedure bezit de mengeling een W/B-factor van 0,485. De samenstellingen worden weergegeven in Tabel 2.4, Tabel 2.5 en Tabel 2.6.

[g]	<b>S0</b>	<b>S50</b>	<b>S85</b>	
CEM I 52,5 N	450	225	68	
Hoogovenslak	0	225	382	
Water	270	270	270	
<b>CEN Normzand</b>	1350	1350	1350	
W/B-factor	0,6	0,6	0,6	

Tabel 2.4: Mortelmengelingen voor Wittekindt

Tabel 2.5: Mortelmengeling voor SVA

[g]	<b>S0</b>	<b>S50</b>	<b>S85</b>
CEM I 52,5 N	450	225	68
Hoogovenslak	0	225	382
Water	225	225	225
<b>CEN Normzand</b>	1350	1350	1350
W/B-factor	0,5	0,5	0,5

[g]	<b>S0</b>	<b>S50</b>	S85
CEM I 52,5 N	450	225	68
Hoogovenslak	0	225	382
Water	218,25	218,25	218,25
Zand	1237,5	1237,5	1237,5
W/B-factor	0,485	0,485	0,485

Tabel 2.6: Mortelmengelingen voor ASTM

## 2.2.2. Methoden

## 2.2.2.1. ASTM C 1012-04

Met deze testmethode wordt de lengteverandering van mortelproefstukken ten gevolge van externe sulfaataantasting onderzocht. De proef is ontworpen om de weerstand van beton tegen  $Na_2SO_4$  te bepalen. In voorliggend werk werd deze methode gebruikt om de invloed van hoogovenslakbeton op deze weerstand te onderzoeken. [ASTM International, 2004]

De mortelmengelingen die hiervoor gebruikt werden zijn reeds besproken in Deel 2.2.1.2. De proefstukken waren rechthoekig en hadden volgende afmetingen: 25,4 x 25,4 x 285 mm. Na 1 dag bewaring in water bij 35 °C werden ze ontkist. Daarna werden de proefstukken bewaard in een Ca(OH)<sub>2</sub>-oplossing tot een sterkte van 20 MPa bereikt werd, vooraleer ze ondergedompeld werden in de sulfaatoplossing bij 20 °C. Deze sulfaatoplossing bevatte 50 g  $Na_2SO_4$  per liter gedestilleerd water. Wanneer de vooropgestelde sterkte bereikt was, werd een referentiemeting uitgevoerd. Vervolgens werden de proefstukken opgemeten na 1, 2, 3, 4, 8, 13 en 15 weken in de oplossing. Bijkomende metingen werden uitgevoerd na 4, 6, 9 en 12 maanden (de meting na 12 maanden werd nog niet uitgevoerd op het moment dat dit werk werd ingediend). Als meettoestel werd beroep gedaan op een digitale schuifmaat met een nauwkeurigheid van 0,01 mm. Als maximumcriteria voor Portlandcement om als voldoende weerstandbiedend beschouwd te worden na 1 jaar worden volgende waarden gebruikt: gemiddelde lengteverandering van 3 proefstukken ≤ 0,010 %; van 4 proefstukken ≤ 0,011 % en vanaf 5 of 6 proefstukken  $\leq 0.012$  %. Voor cementsoorten gemengd met vervangproducten, zoals hoogovenslak, worden volgende grenzen gebruikt: gemiddelde lengteverandering van 3 proefstukken  $\leq 0.034\%$ ; van 4 proefstukken  $\leq 0.037\%$ ; van 5 proefstukken  $\leq 0.039$  % en van 6 proefstukken  $\leq 0.041$  %.

## 2.2.2.2. Wittekindt

Net als bij ASTM C 1012-4 wordt bij de Wittekindtprocedure de lengteverandering van mortelproefstukken ten gevolge van externe sulfaataantasting onderzocht. [VDZ, 1996; Röwer en Punkte, 2002]



Figuur 2.2: Wittekindt - Opstelling

De mortelmengelingen zijn reeds besproken in Deel 2.2.1.2. De proefstukken hadden een lengte van 160 mm, een breedte van 40 mm en een hoogte van 10 mm, zie Figuur 2.2. Per oplossing werden minstens 6 proefstukken voorzien. Ze werden 1 dag bewaard bij 20 °C en 95 % R.V. vooraleer te ontkisten. Na het ontkisten werden roestvrij stalen plaatjes aan de uiteinden voorzien die dienst doen als meetpunt. Vervolgens werden ze 13 dagen bewaard in gedestilleerd water bij 20 °C. Pas dan werden de proefstukken in de sulfaatoplossingen, bij 20 °C, geplaatst. Deze zijn volgens de voorschriften Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossingen van 3 g/l en 29,8 g/l. In dit werk werd daarnaast ook gebruik gemaakt van MgSO4-oplossingen van 3 g/l en 29,8 g/l. De referentieprisma's werden bewaard in gedestilleerd water. De proef duurt 56 dagen. De proefstukken worden opgemeten na 7, 14, 28 en 56 dagen met behulp van een digitale schuifmaat met nauwkeurigheid 0,01 mm. Bijkomende meetwaarden werden bekomen na 70 en 91 dagen. De vooropgestelde voorwaarde om als voldoende weerstandbiedend beschouwd te worden, houdt in dat de lengteverandering ten opzichte van de oorspronkelijke lengte  $\leq 0.5$  mm/m of  $\leq 0.05$  % na 56 dagen. Naast de proefstukken om de expansie te bepalen, werden ook proefstukken aangemaakt om de sterktekarakteristieken te bepalen. Dit staat echter niet in de voorschriften beschreven. De proefstukken die hiervoor bestemd waren, hadden volgende afmetingen: 40 x 40 x 160 mm. Ze werden bewaard in een 29,8 g/l MgSO<sub>4</sub>-oplossing omdat de sterkteveranderingen hier het best merkbaar zouden moeten zijn. De referentieproefstukken werden ook hier in gedestilleerd water bewaard.

## 2.2.2.3. SVA

De SVA-proefmethode werd eveneens toegepast om de lengteverandering bij mortelproefstukken ten gevolge van externe sulfaataantasting te bepalen. Deze methode is vrij analoog aan de Wittekindtmethode. [VDZ, 1996; Röwer en Punkte, 2002]

De gebruikte mortelmengelingen zijn reeds besproken in Deel 2.2.1.2. De afmetingen van de proefstukken waren dezelfde als bij Wittekindt. De proefstukken werden 2 dagen bewaard bij 20 °C en 95 % R.V. waarna ze ontkist werden. Vervolgens werden ze 12 dagen bewaard in een Ca(OH)<sub>2</sub>-oplossing bij 20 °C. De te onderzoeken proefstukken werden ondergedompeld in een 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing en de referentieproefstukken werden bewaard in gedestilleerd water. De duurtijd bedraagde 91 dagen. In vergelijking met Wittekindt betekent dit twee bijkomende opgelegde metingen, namelijk na 70 en na 91 dagen. Naast het gebruikte meettoestel en blijft ook de voorwaarde hetzelfde, namelijk lengteverandering ten opzichte van oorspronkelijke lengte  $\leq$  0,5 mm/m of  $\leq$  0,05 %, maar dan na 91 dagen.

## 2.2.2.4. TAP

Om de weerstand van hoogovenslakbeton tegen sulfaten te onderzoeken, werd ook gebruik gemaakt van het 'Toestel voor versnelde AantastingsProeven' (TAP). Dit werd ontwikkeld door De Belie [1997] aan het Laboratorium Magnel voor Betononderzoek om de chemische aantasting van beton op een versnelde manier te testen aan de hand van cyclische onderdompeling van de betonpoefstukken. De beschrijving van het toestel en de werking kan ook teruggevonden worden in De Belie et al. [2002]. Het TAP-toestel wordt weergegeven in Figuur 2.3.

De betonnen proefstukken voor gebruik van het TAP-toestel waren cilindervormig met een diameter van 230 mm en een hoogte van 70 mm. Ze werden per 3 op ronddraaiende assen gemonteerd en kwamen zo gedeeltelijk in de oplossing te zitten die zich in bakjes onder de proefstukken bevindt. Per toestel konden 24 cilinders onderzocht worden. De proefstukken deden 1,04 rotaties per uur en werden gedurende 1/3 van de proeftijd ondergedompeld. Tijdens het opmeten kon deze snelheid opgevoerd worden naar 24,41 rotaties per uur.



Figuur 2.3: TAP-toestel

De parameters die bepaald werden zijn straalverandering en oppervlakteruwheid  $R_a$ . Deze werden opgemeten na elke cyclus. In voorliggend werk werd gekozen om cycli van 2 weken te gebruiken. Een aantastingscyclus omvat 3 periodes: een periode van cyclische onderdompeling, een periode van droging en een periode van mechanische inwerking onder de vorm van borstelen, zie Figuur 2.4.



Figuur 2.4: TAP-toestel met borstels

Door de borstels 3 rotaties te laten inwerken op de proefstukken werd het loszittend materiaal verwijderd. Het opmeten van de straalverandering en oppervlakteruwheid gebeurde aan de hand contactloze metingen gebruik makende van lasersensoren en dit zowel voor als na het borstelen. Als totale nauwkeurigheid van de metingen wordt 0,1 mm gebruikt. Het signaal van de lasersensoren werd verwerkt via Labview. Door de opstelling was het mogelijk om elke keer op dezelfde omtreklijn te meten. Referentieplaatjes met opstaande rand zorgden er via sofwarematige triggering voor dat de metingen gestart worden. De eerste 50 metingen werden uitgevoerd op het plaatje. Uit deze metingen werd de gemiddelde afstand tussen het

referentieplaatje en de lasersensor bepaald voor iedere omtreklijn. Door de opgemeten punten van de omtreklijn te verminderen met deze gemiddelde waarde, werd het profiel van de betreffende omtreklijn relatief ten opzichte van het referentieplaatje begroot. Op basis van de opmetingen voor de verschillende omtreklijnen kon de gemiddelde verandering van de straal van de betreffende cilinder bepaald worden. De verwerking van de gegevens die op deze manier bekomen werden, gebeurde via MathCad en Excel. Als resultaat werd uiteindelijk de gemiddelde cumulatieve straalvernadering voor en na borstelen voorgesteld. De betreffende waarden werden als volgt begroot:

- (Cumulatieve straalverandering voor borstelen)<sub>t</sub> (2.4)
  - = (Cumulatieve straalverandering voor borstelen)<sub>t-1</sub> + [(Opgemeten waarde voor borstelen)<sub>t</sub> (Opgemeten waarde na borstelen)<sub>t-1</sub>]
- (Cumulatieve straalverandering na borstelen)<sub>t</sub> (2.5)

= (Cumulatieve straalverandering na borstelen)<sub>t-1</sub> + [(Opgemeten waarde voor borstelen)<sub>t</sub> – (Opgemeten waarde na borstelen)<sub>t</sub>]

Waarbij t de betreffende meting voorstelt en t-1 van de voorgaande.

De R<sub>a</sub>-waarde die bepaald wordt als ruwheidsmaat werd als volgt begroot [Monteny, 2002]:

$$R_{a} = \frac{1}{l} \int_{0}^{l} |y(x)| dx$$
(2.6)

De  $R_a$ -waarde wordt bepaald door een lijn die het gemiddelde weergeeft, te trekken doorheen de waarden van de opgemeten omtreklijn en de som te maken van alle oppervlaktes begrepen tussen deze lijn en de opgemeten omtreklijn. De bemonsteringslengte bedraagde 50 mm. Voor een omtreklijn van de gebruikte cilinders van ongeveer 722 mm werden per omtreklijn 13  $R_a$ waarden bepaald. De gemiddelde ruwheid van een cilinder werd bepaald als het gemiddelde van de ruwheden van de verschillende opgemeten omtreklijnen.

De gebruikte sulfaten waren  $Na_2SO_4$  of MgSO<sub>4</sub>, deze werden gemengd met gedestilleerd water. De oplossingen hadden een concentratie van 29,8 g/l of 3 g/l.

De proefstukken op basis van betonmengelingen S0, S50 [a] en S85 werden blootgesteld aan een sulfaatoplossing met een concentratie van 29,8 g/l. En de betoncylinders van mengeling S50 [b] werden eveneens ondergedompeld in een sulfaatoplossing met concentratie 3 g/l.

# 2.3. Resultaten

## 2.3.1. ASTM C 1012-4

De ASTM-procedure ter bepaling van de weerstand tegen sulfaten verloopt zoals beschreven in Deel 2.2.2.1. De bekomen resultaten worden in Figuur 2.5 samengevat. Hierin wordt de gemiddelde procentuele lengteverandering alsook de standaardfout op het gemiddelde weergegeven van de mortelprisma's die ondergedompeld werden in een 50 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>oplossing, gedurende een periode van 280 dagen. De aangeduide grens op 224 dagen (32 weken) wordt gebruikt om de resultaten te bespreken aangezien 280 dagen geen opgelegd meetpunt is in de norm. Voor S50<sub>(ASTM)</sub> werd slechts 1 mortelproefstuk opgemeten, terwijl voor mortelmengelingen S0<sub>(ASTM)</sub> en S85<sub>(ASTM)</sub> respectievelijk 4 en 6 proefstukken ter beschikking waren. Het feit dat van bepaalde mengelingen minder proefstukken ter beschikking waren is het gevolg van breuk tijdens het ontkisten.



Figuur 2.5: ASTM - Gemiddelde lengteverandering

Uit de grafiek blijkt dat de mortelmengeling met 0% hoogovenslak ter vervanging van cement de grootste expansie ondergaat na 224 dagen, namelijk 0,103 %. Deze is meer dan 3 keer groter dan de expansie bij S50<sub>(ASTM)</sub> en S85<sub>(ASTM)</sub> en blijkt nog toe te nemen met de tijd. De

lengteveranderingen voor S50<sub>(ASTM)</sub> en S85<sub>(ASTM)</sub> nemen na 224 dagen een even grote waarde aan, meer bepaald 0,028 %. De waarde voor S85<sub>(ASTM)</sub> lijkt aanvaardbaar omdat na 280 dagen een resultaat in dezelfde grootteorde opgemeten werd, maar de lengteverandering bij S50<sub>(ASTM)</sub> na 224 dagen geeft een vertekend beeld aangezien deze afwijkt lengteveranderingen die eerder en later opgemeten werden. In het begin van de proef (tot 98 dagen) was het verschil tussen de gemiddelden minder uitgesproken en bleek de mortelmengeling met 0 % hoogovenslak de minste expansie te vertonen. Gedurende de eerste 4 weken was deze, volgens Figuur 2.5, zelfs negatief. Aan de hand van een t-test waarbij 2 gemiddelden met elkaar vergeleken worden (2-zijdig, significantieniveau = 0,05), voorafgegaan door een Levene's test om de homogeniteit van de varianties na te gaan, worden de resultaten onderling statistisch gecontroleerd. De waarden voor de expansies na 224 dagen van de proefstukken op basis van de 85%-mengeling zijn significant verschillend van deze met de 0 %-mengeling. Na 1, 2, 4, 8, 13, 15 en 16 weken is er echter geen significant verschil waar te nemen, wat wel het geval is na 3 weken en meer dan 16 weken. Verder blijken de negatieve resultaten bij  $SO_{(ASTM)}$  niet significant te verschillen van 0, waardoor aangenomen wordt dat gedurende de eerste vier weken geen noemenswaardige expansie of inkrimping optreedt. Aangezien slechts 1 proefstuk met 50 % hoogovenslak opgemeten werd, zijn hiervoor geen statistische controles doorgevoerd.

Tot slot worden de resultaten vergeleken met de grenswaarden om de weerstand tegen sulfaten te bepalen, zoals beschreven in ASTM C 1012-4. Deze worden weergegeven in Tabel 2.7.

	Uitzetting na 224 dagen [%]	Grenswaarde [%]	Verschil
SO <sub>(ASTM)</sub>	$0,103 \pm 0,020$	0,011	Significant hoger
S50 <sub>(ASTM)</sub>	0,028	0,034	Significant lager
<b>S85</b> (ASTM)	$0.028 \pm 0.004$	0,041	Significant lager

Tabel 2.7: ASTM - Expansie na 224 dagen met grenswaarden

Om de lengteveranderingen objectief met de grenswaarden ter vergelijken, wordt gebruik gemaakt van een t-test met vooropgestelde waarde (2-zijdig, significantieniveau = 0,05). Aangezien bij de reeks met 0 % hoogovenslak 4 proefstukken opgemeten werden, is het criterium voor de lengteverandering om als voldoende weerstandbiedend tegen sulfaten beschouwd te worden: lengteverandering  $\leq 0,011$ %. Uit Figuur 2.5 blijkt dat de gemiddelde lengteverandering van SO<sub>(ASTM)</sub> de grens van 0,011 % expansie reeds overschrijdt na een periode van 70 dagen in de oplossing. Uit de t-test blijkt echter dat de resultaten na 16 weken significant verschillen van deze grenswaarde. Voor de mortelmengeling met 50 % hoogovenslak (S50<sub>(ASTM)</sub>) kan geen grens opgelegd worden aangezien slechts één proefstuk ter beschikking was. Indien de laagste grenswaarde aangehouden wordt, namelijk voor 3 proefstukken, bedraagt deze 0,034 %. Uitgaande van de ene opgemeten waarde kan in dat geval gezegd worden dat deze grens overschreden wordt na ongeveer 77 dagen en dat de expansie weer onder deze grens duikt na 203 dagen. De waarde opgemeten na 224 dagen blijkt echter afwijkend indien vergeleken wordt met de extra meting na 288 dagen en zal buiten beschouwing gelaten worden. Een mogelijke verklaring ligt bij de procedures voorafgaand aan de eigenlijke proef. Conform de norm werd geen epoxy aan de uiteinden aangebracht waardoor afwijkende lengteveranderingen bekomen kunnen worden door afbrokkeling. Het criterium voor een gemiddelde van 6 proefstukken, zoals bij S85<sub>(ASTM)</sub>, houdt in dat de lengteverandering  $\leq 0.041\%$ . Uit Figuur 2.5 blijkt dat de gemiddelde lengteverandering van S85<sub>(ASTM)</sub> deze grens enkel overschrijdt na 91 dagen maar dit verschil is niet significant. Op de andere tijdstippen blijven de waarden steeds significant lager dan de vooropgestelde grens, zo ook na 224 dagen.

## 2.3.2. SVA en Wittekindt

De resultaten die bekomen zijn op basis van deze meetprocedures zijn niet bruikbaar. De meetresultaten vertonen grote schommelingen in lengteverandering tussen opeenvolgende metingen die niet binnen het aanvaardbare verwachtingspatroon liggen. Zo vertonen sommige proefstukken enkel inkrimping, andere vertonen eerst expansie dan weer inkrimping, enz. Ook aan de hand van de opgemeten druksterktes kunnen geen conclusies getrokken worden. In Bijlage B worden enkele grafieken toegevoegd die dit aantonen. Verdere opvolging toonde aan dat ook op latere leeftijd geen besluiten konden getrokken worden. Wel een eigenaardige vaststelling was dat de proefstukken op basis van 100 % portlandcement begonnen opkrullen. De eerste keer dat dit in vrij extreme vorm waargenomen werd was ongeveer een maand na afloop van de procedures, bij de proefstukken uit de 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossingen. Later werd dit ook vastgesteld bij de 100 % Portlandcementproefstukken uit de 29,8 g/l MgSO<sub>4</sub>-oplossingen. In veel mindere mate en 4 maanden na afloop van de procedure werd het ook waargenomen bij de proefstukken op basis van 100 % portlandcement uit de 3 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>- en

MgSO4-oplossingen. Foto's die dit verschijnsel weergeven worden ook in Bijlage B weergegeven.

Mogelijke oorzaken voor het falen van deze testen zijn enerzijds de manier van mortel aanmaken, aangezien dit niet volledig volgens de norm verliep en omdat onvoldoende gemengd was waardoor segregatie optrad, anderzijds de meetmethode. De metingen gebeurden op 2 methoden:

- Meting op metalen plaatjes aangebracht op het proefstuk. De oppervlakte van de plaatjes waren groter dan de meetpunten van de digitale schuifmaat, waardoor een speling kon optreden tussen twee opeenvolgende metingen omdat niet op exact dezelfde plaats gemeten werd. Daarnaast vertoonden de plaatjes een lichte kromming.
- Metingen op het proefstuk zelf. Ook hier was een exacte meting niet voor de hand liggend aangezien epoxy aan de uiteinden was aangebracht waardoor het oppervlak niet vlak was.

Rekening houdende met deze ervaringen, werden de SVA- en Wittekindtproefmethoden aangepast. Het resultaat is een variant op de oorspronkelijke procedure. De wijzigingen zijn in overeenstemming met de wijzigingen die Ferraris et al. [2005] aanbrachten aan ASTM C 1012-4 en spitsen zich vooral toe op het voorbereidend werk met het oog op een exactere meetprocedure. De afmetingen van de mortelproefstukken blijven behouden, namelijk 10 x 40 x 160 mm. Vooreerst werden de meetplaatjes vervangen door uitstekende bouten. Deze hebben een kleiner oppervlak waardoor met grotere zekerheid steeds op hetzelfde punt gemeten kan worden. Uit de literatuur blijkt dat het opmeten van de totale expansie enkel aan de uiteinden van een proefstuk een verkeerd beeld geeft van de volledige expansie van het proefstuk. Zo blijkt volgens Ferraris et al. [2005] dat werkelijke expansie rond het meetpunt tot 50 keer groter kan zijn dan de waarde die bekomen wordt door de lengteverandering te beschouwen over de volledige lengte. Om hiermee rekening te houden worden de meetpunten over een bepaalde afstand,  $\pm$  30 mm, in het proefstuk verankerd door middel van een bout. Deze bout is met een moer bevestigd aan het meetpunt, zie Figuur 2.6 (links). Om dit te kunnen verwezenlijken zijn aangepaste mallen nodig, zie Figuur 2.6 (rechts).



Figuur 2.6: SVA en Wittekindt - Aangepaste mal

De moeren en de bouten die in het proefstuk worden verankerd, worden vastgehouden door middel van bouten die doorheen de bekisting zitten. Er wordt gebruik gemaakt van M5-bouten en -moeren omdat een grotere diameter voor problemen zijn kunnen zorgen naar dekking toe. De kans bestaat dat M6-onderdelen niet volledig omgeven worden door mortel en bijgevolg afwijkende metingen teweeg brengen. Voor het ontkisten worden deze bouten verwijderd waardoor de bout en de moer in het proefstuk achterblijven. Vervolgens kan ontkist worden en kan een nieuwe bout in de moer gedraaid worden. Deze steekt dan uit het proefstuk en doet dienst als meetpunt, zie Figuur 2.7.



Figuur 2.7: SVA en Wittekindt - Proefstuk voorzien van verankerde meetpunten

# 2.3.3. TAP

De resultaten afkomstig van de TAP-metingen worden onderverdeeld in twee delen, namelijk straalverandering en ruwheidverandering. De proefstukken waren 28 dagen oud op het moment van de start van de proef.

#### 2.3.3.1. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossingen

#### Straalverandering

In dit deel worden de resultaten weergegeven betreffende de straalverandering van de betonnen cilinders die cyclisch ondergedompeld worden in een Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing, zoals beschreven in Deel 2.2.2.4. De proefstukken werden gedurende 37 weken opgemeten. De resultaten zijn voorgesteld als een gemiddelde van 3 cilinders waarbij enerzijds de cumulatieve straalverandering voor het borstelen wordt weergegeven, en anderzijds de cumulatieve straalverandering die optreedt ten gevolge van het borstelen. De cumulatieve straalverandering voor borstelen komt overeen met de straalverandering die zou opgemeten worden indien niet geborsteld werd. De cumulatieve straalverandering na borstelen geeft een indicatie van de hoeveelheid loszittend (afbrokkelend) materiaal. Wat de eigenlijke straalverandering op het einde van de proef of per cyclus betreft moet rekening gehouden worden met beide waarden. De toegepaste formules staan eveneens in Deel 2.2.2.4.

In Figuur 2.8 zijn de resultaten voor de gemiddelde cumulatieve lengteveranderingen voor borstelen samengevat van de betonnen proefstukken die ondergedompeld werden in een Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing.



Figuur 2.8: TAP - Gemiddelde cumulatieve straalverandering voor borstelen van proefstukken in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

45

In Figuur 2.8 valt op dat na 37 weken beproeving de cilinders met 85 % hoogovenslak ter vervanging van cement in een 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing de grootste expansie ondergaan, namelijk 0,510 mm. Deze is ongeveer 5 keer zo groot dan de gemiddelde expansie van de S0proefstukken uit dezelfde oplossing, die op dat moment 0,111 mm bedraagt. Dit is de kleinste gemiddelde straalverandering waargenomen op het einde van de proef. Rekening houdende met de meetfout van 0,1 mm kan hier niet echt van een noemenswaardige straalverandering gesproken worden. De proefstukken op basis van mengeling S50 [b], ondergedompeld in een 3 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing, ondergaan na 37 weken een gemiddelde expansie van 0,216 mm. Deze is groter dan de expansie bij S0 maar nog steeds veel kleiner dan bij S85. De gemiddelde straalverandering bij de betonnen proefstukken op basis van mengeling S50 [a], in tegenstelling tot S50 [b] ondergedompeld in een 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing, is na 37 weken negatief. De inkrimping bedraagt -0,295 mm en is hiermee de op één na (S85) grootste gemiddelde straalverandering van alle mengelingen na 37 weken cyclische onderdompeling in een Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing. Het is vrij onwaarschijnlijk dat een inkrimping opgemeten wordt als cumulatieve straalverandering voor borstelen, zeker gezien het feit dat dezelfde proefstukken uit de oplossing met lagere concentratie wel expansie vertonen. Door de dalende trend vanaf week 15 wordt afbrokkelend materiaal uitgesloten als oorzaak aangezien. Overvloedige afbrokkeling zou trouwens opvallen tijdens de visuele controles, wat niet het geval was. Een andere mogelijke oorzaak is een meetfout, waardoor de expansie aangeven wordt als inkrimping. Gezien de meetresultaten die later besproken zullen worden kan dit het geval zijn. De proefstukken op basis van betonmengelingen S0, S50 [a] en S50 [b] ondergaan gedurende de eerste 10 weken allen een inkrimping tot maximaal -0,152 mm. Rekening houdende met de meetfout kan dit zo goed als verwaarloosd worden.

In Figuur 2.9 wordt de gemiddelde cumulatieve straalverandering ten gevolge van het borstelen weergegeven.



**Figur 2.9: TAP - Gemiddelde cumulatieve straalverandering na borstelen van proefstukken in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>** De gemiddelde straalverandering na borstelen van de S85-cilinders is duidelijk groter dan bij de andere proefstukken. Dit duidt op een grote hoeveelheid loszittend materiaal. In totaal werd bij S85 na 37 weken -0,661 mm afgeborsteld. Dat wil zeggen dat de cumulatieve straalverandering ten gevolge van het borstelen groter is ( in absolute waarde) dan voor het borstelen. Ook voor de andere mengelingen wordt vastgesteld dat de straalveranderingen na borstelen omgekeerd evenredig zijn met deze voor borstelen. Zo bedraagt de gemiddelde straalverandering na 37 weken bij S0 -0,085 mm en deze bij S50 [b] bedraagt -0,281 mm. Voor S50 [a] wordt een expansie van 0,122 mm waargenomen. Vanaf week 15 werd een stijgende trend vastgesteld. Dit verifieert de eerder gemaakte veronderstellingen dat deze afwijkende waarden het gevolg zijn van een meetfout waarbij inkrimping gemeten wordt als expansie en omgekeerd.

In Tabel 2.8 worden de gemiddelde resultaten na 37 weken alsook de effectieve straalverandering op het einde van de proef weergegeven.

	Voor borstelen [mm]	Na borstelen [mm]	Einde van de proef [mm]
S0 (29,8 g/l)	0,111	-0,085	0,026
S50 [a] (29,8 g/l)	-0,295	0,122	-0,173
S85 (29,8 g/l)	0,510	-0,661	-0,151
S50 [b] (3 g/l)	0,216	-0,281	-0,020

Tabel 2.8: TAP - Gemiddelde straalverandering van de proefstukken in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Uit deze tabel wordt duidelijk dat de straal van de proefstukken met mengelingen S50 [a] en S85 op het einde van de proef de grootste verandering ondergaan, respectievelijk -0,173 mm en -0,151 mm. Bij S50 [b] wordt zowel voor als na het borstelen de op één na grootste verandering opgemeten, maar beiden zijn ongeveer gelijk in absolute waarde waardoor op het einde van de proef slechts een kleine afname van de straal vastgesteld wordt.

#### Ruwheid

Naast de straalverandering wordt ook de ruwheid  $R_a$  van de proefstukken opgemeten. Deze geeft een indicatie van de aantasting daar  $R_a$  stijgt bij toenemende aantasting.  $R_a$  wordt uitgedrukt in mm. De gebruikte formule staat in Deel 2.2.2.4.

In Figuur 2.10 wordt de verandering van  $R_a$ , voor de proefstukken ondergedompeld in een Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing gedurende de proeftijd van 37 weken weergegeven. Ondanks de grotere gemiddelde, initiële  $R_a$ -waarde van de S85-proefstukken ondergaat deze alsnog een toename van 143 %, namelijk van 0,070 ± 0,005 mm bij aanvang van de proef tot 0,170 ± 0,005 mm na 37 weken. De andere S0-, S50 [a]- en S50 [b]-proefstukken bezitten een initiële  $R_a$ -waarde van respectievelijk 0,058 mm; 0,060 mm en 0,060 mm. Deze stijgt 49% bij S0, 46 % S50 [a] en 64 % bij S50 [b].



Figuur 2.10: TAP - Gemiddelde ruwheidverandering van de proefstukken in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Uit statistische controles aan de hand van een t-test waarbij 2 gemiddelden met elkaar vergeleken worden (éénzijdig, significantieniveau = 0,05) blijkt dat  $R_a$  na 37 weken voor mengelingen S50 [a], S50 [b] en S85 significant gestegen is ten opzichte van de initiële  $R_a$ . Deze van de S0-proefstukken is niet significant toegenomen gedurende de proef. Om de resultaten onderling te vergelijken wordt eerst een Levene's test (significantieniveau = 0,01) uitgevoerd om de homogeniteit van de varianties na te gaan. Aangezien de varianties niet homogeen zijn, wordt een one-way ANOVA met Dunnet's T3 Post Hoc test gebruikt. Hiermee kan aangetoond worden dat  $R_a$  van S85 na 37 weken waarden aanneemt die significant hoger zijn dan  $R_a$  van S0, S50 [a] en S50 [b], die onderling echter niet significant van elkaar verschillen.

#### 2.3.3.2. MgSO<sub>4</sub>-oplossingen

#### Straalverandering

In dit deel worden de resultaten weergegeven betreffende de straalverandering van de betonnen cilinders die cyclisch ondergedompeld werden in een MgSO<sub>4</sub>-oplossing, zoals beschreven in Deel 2.2.2.4. De resultaten zijn voorgesteld op dezelfde manier als in Deel 2.3.3.1. Dat wil zeggen door de gemiddelde, cumulatieve waarden van 3 cilinders met dezelfde samenstellingen uit dezelfde oplossing uit te zetten in functie van de blootstellingstijjd, enerzijds voor borstelen en anderzijds na borstelen. De proefstukken werden gedurende 37 weken cyclisch ondergedompeld en opgemeten.

In Figuur 2.11 wordt de gemiddelde, cumulatieve straalverandering voorgesteld van de betonnen cilinders op basis van mengelingen S0, S50 [a] en S85. Allen werden cyclisch ondergedompeld in een 29,8 g/l MgSO<sub>4</sub>-oplossing. De resultaten met betrekking tot de straalverandering van de proefstukken op basis van S50 [b] zijn hier niet opgenomen. De expansie neemt elke cyclus toe met waarden die onaanvaardbaar veel groter zijn dan bij S0, S50[a] en S85. Bij deze cilinders werden de cilinders handmatig geactiveerd, wat mogelijk de oorzaak is voor de sterk afwijkende metingen aangezien de metingen op de referentieplaatjes niet altijd op dezelfde manier plaatsvond.



Figuur 2.11: TAP - Gemiddelde cumulatieve straalverandering voor borstelen van proefstukken in MgSO<sub>4</sub>

De resultaten tonen aan dat de grootste expansie na 37 weken voorkomt bij S85. Deze bedraagt op dat moment 0,325 mm. Gedurende de eerste 21 weken van de proef vertonen de proefstukken op basis van S85 een inkrimping met een maximale waarde van -0,333 mm na 6 weken. Bij de cilinders op basis van de andere betonmengelingen wordt ook een inkrimping waargenomen tijdens de eerste weken van de onderdompeling, maar minder dan bij S85. De straalverandering van de cilinders met mengelingen S50 [a] wijkt echter op geen enkel tijdstip noemenswaardig af van 0 mm. De expansie bij S50 [a] na 37 weken bedraagt 0,058 mm. Bij S0 ondergaan de proefstukken na 37 weken een inkrimping ten gevolge van de sulfaataantasting. De straal van de S0-cilinders verandert gemiddeld -0,115 mm, maar gelet op de meetnauwkeurigheid is dit te verwaarlozen.

In Figuur 2.12 wordt de gemiddelde cumulatieve straalverandering na borstelen weergegeven. Net zoals bij de resultaten voor borstelen wordt S50 [b] niet opgenomen in de grafiek.



Figuur 2.12: TAP - Gemiddlede cumulatieve straalverandering na borstelen van proefstukken in MgSO4

Uit Figuur 2.12 blijkt dat alle proefstukken een lengtevermindering ondergaan na borstelen. Bij de proefstukken aangemaakt met betonmengeling S85 wordt na 37 weken een gemiddelde afname van de straal met -0,596 mm vastgesteld. Bij S50 [a] wordt een gemiddelde afname van -0,251 mm opgemeten en bij S0 bedraagt de straalafname van de cilinders gemiddeld -0,221 mm. Gedurende de eerste 21 weken van de proef is de straalverandering na borstelen voor de proefstukken van de drie betonmengelingen gelijklopend. De weken daarop volgend neemt het loszittende materiaal bij de S85-cilinders aanzienlijk sneller toe dan bij de S0- en S50-cilinders.

In Tabel 2.9 worden de gemiddelde resultaten na 37 weken alsook de effectieve straalverandering op het einde van de proef weergegeven waarbij rekening gehouden wordt met resultaten voor en na het borstelen.

	Voor borstelen [mm]	Na borstelen [mm]	Einde van de proef [mm]
S0 (29,8 g/l)	-0,115	-0,221	-0,336
S50 [a] (29,8 g/l)	0,058	-0,251	-0,193
S85 (29,8 g/l)	0,325	-0,596	-0,271

Tabel 2.9: TAP - Gemiddelde straalverandering van de proefstukken in MgSO4

Op het einde van de proefperiode ondergaan alle proefstukken een inkrimping ten gevolge van de cyclische onderdompeling en het borstelen. De straal van de proefstukken aangemaakt met betonmengeling S0 neemt het meest af, meer bepaald -0,336 mm. Dit komt doordat voor

het borstelen ook al een straalafname opgemeten werd. Dit wijst erop dat veel materiaal ook vanzelf afbrokkelt. Bij S50 [a] wordt na 37 weken een afname van -0,193 mm vastgesteld ten opzichte van de initiële straal. Bij de S85-cilinders worden zowel voor als na het borstelen de grootste veranderingen opgemeten. Het verschil tussen beide, in absolute waarden, is echter kleiner dan bij S0. De straal ondergaat dus de grootste variaties tijdens de metingen per cyclus, waardoor de straalverandering op het einde van de proef het kleinst is voor S85.

#### Ruwheid

Naast de straalverandering wordt ook de ruwheid  $R_a$  van de proefstukken opgemeten. In Figuur 2.13 wordt de verandering van  $R_a$  in functie van de proeftijd, voor de proefstukken ondergedompeld in een MgSO<sub>4</sub>-oplossing weergegeven.



Figuur 2.13: TAP - Gemiddelde ruwheidverandering van de proefstukken in MgSO4

De gemiddelde initiële  $R_a$ -waarden van de S0-, S50 [a]- en S50[b] bedragen respectievelijk 0,064 ± 0,007 mm; 0,074 ± 0,007 mm; 0,071 ± 0,007 mm en 0,065 ± 0,008 mm. Voor de betonproefstukken aangemaakt met S0 neemt  $R_a$  toe met 70 % tot 0,108 ± 0,011 mm en voor de betonproefstukken op basis van S85 met 219% tot 0,209 ± 0,012 mm wat meteen ook de grootste gemiddelde ruwheidstoename is die vastgesteld werd. De ruwheid bij S50 [a] is na 37 weken toegenomen met 71 %, tot 0,126 ± 0,007 mm. De laagste, gemiddelde ruwheidsverandering treedt op bij de S50 [b]-cilinders. Deze neemt slechts 31 % toe in

vergelijking met de initiële ruwheid van. Bijgevolg bedraagt de ruwheid bij S50 [b] na 37 weken cyclische onderdompeling in een  $3g/1 MgSO_4$ -oplossing, slechts  $0,093 \pm 0,005$  mm.

Een t-test met vooropgestelde waarde (one-tailed, significantieniveau = 0,05) toont aan dat de ruwheden van alle proefstukken na 37 weken proeftijd significant gestegen zijn. Daarnaast geeft een one-way ANOVA met Dunett's T3 test, voorafgegaan door een Levene's test (significantieniveau = 0,01), aan dat de resultaten voor S85 na 37 weken significant hoger zijn dan deze van S0, S50 [a] en S50 [b]. S50 [a] en S50 [b] zijn onderling ook significant verschillend, maar beide zijn niet significant verschillend van S0.

# 2.4. Discussie

## 2.4.1. ASTM C 1012-4

De sulfaataantasting bij volledige onderdompeling in een 50 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing verloopt zoals algemeen verwacht. Vooral bij het verloop van het referentiebeton op basis van 100 % hoogovenslak worden de twee fasen waargenomen die beschreven worden in de literatuur door onder andere Pommersheim et al. [1994] en El-Hachem et al. [2009]. De eerste fase omvat een geringe lengteverandering in vergelijking met de lengteverandering tijdens de tweede fase. In deze tweede fase wordt een sterke expansie opgetekend. Uit de resultaten kan opgemaakt worden dat de eerste fase zich voordoet tijdens de eerste 112 dagen. Tot op dit moment lopen de expansies van de referentieproefstukken ongeveer gelijk met deze op basis van mortel met hoogovenslak ter gedeeltelijke vervanging van cement. Tijdens de tweede fase neemt de expansie van de proefstukken met 100 % Portlandcement duidelijk sneller toe ten opzichte van de eerste fase en ten opzichte van de expansie bij mortel met hoogovenslak. De expansie in de tweede fase wordt in de literatuur toegeschreven aan gips- en ettringietvorming. Mogelijks draagt ook de vorming van thaumasiet bij tot de aantasting, want in tegenstelling tot wat algemeen aangenomen wordt blijkt uit onderzoek van Schmidt et al. [2009] dat dit reactieproduct gevormd wordt onafhankelijk van de temperatuur. Wanneer echter naar de pH-metingen van de oplossingen net voor het verversen gekeken wordt, blijkt dat deze een pH-waarde van gemiddeld 10,9 met een standaardfout van 0,6 hebben. Als deze waarde vergeleken wordt met de pH-waarden om stabiele reactieproducten te bekomen, kan besloten worden dat enkel gips met zekerheid gevormd kan worden. Ettringietvorming is

volgens Mehta [1975] reeds mogelijk vanaf een pH van 6, hoewel het pas stabiel is vanaf 11,5. Thaumasiet kan gevormd worden bij een pH van 9 maar om een rol te spelen in de aantasting is een hogere pH nodig van ongeveer 12,5 nodig. [Liu, 2010]

Toevoeging van hoogovenslak ter vervanging van cement heeft een positieve invloed op de weerstand tegen sulfaten vanaf 112 dagen volledige onderdompeling. Na 224 dagen is de expansie bij S50<sub>(ASTM)</sub> en S85<sub>(ASTM)</sub> 3 keer kleiner dan bij S0<sub>(ASTM)</sub> en uit de extra meting na 288 dagen blijkt dat deze verhouding nog groter wordt in de tijd. Daar waar het referentiebeton reeds vroegtijdig de grenswaarde, opgelegd in ASTM C 1012-4 [2004], overschrijdt, is dit voor de mortelproefstukken op basis van hoogovenslakmengelingen niet het geval. Afgaande op de vergelijking van de resultaten met de grenswaarden, mag besloten worden dat mortel met 85 % hoogovenslak nog steeds voldoende weerstandbeidend is na 224 dagen onderdompeling en ook na de extra meting op 288 dagen. Het vroegtijdig overschrijden van de grenswaarde van de 85% hoogovenslakmengeling wordt buiten beschouwing gelaten omdat er niets specifiek over terug te vinden is in de norm en vooral omdat het verschil niet significant is. De verbeterde weerstand is waarschijnlijk het gevolg van een lagere porositeit waardoor de indringingsdiepte van de sulfaten beperkt wordt en bijgevolg minder schadelijke reactieproducten ontstaan. Dit is echter nog niet aangetoond omdat de proef nog niet beëindigd is. Verdere analyse van de proefstukken na het beïndigen van de meetprocedure, moet meer zekerheid brengen omtrent de aantastingsmechanismen. Op basis van de meting van mortel met 50% hoogovenslak ter vervanging van cement kunnen moeilijk aannames gedaan worden omdat slechts 1 proefstuk ter beschikking was.

#### Visueel onderzoek

Visueel onderzoek toont aan dat bij de  $SO_{(ASTM)}$ -proefstukken opvallend meer materiaal afbrokkelt dan bij de  $S5O_{(ASTM)}$  en vooral dan bij de  $S85_{(ASTM)}$ -proefstukken, zie Figuur 2.14. Verdere opvolging zal moeten uitwijzen of dit invloed heeft op de weerstand tegen sulfaten. Scheuren en afbrokkeling kunnen immers initiëren tot versnelde aantasting.



Figuur 2.14: ASTM - Aantasting bij (van boven naar onder) SO(ASTM), S50(ASTM) en S85(ASTM)

# 2.4.2. TAP

De resultaten die bekomen werden aan de hand van de TAP-metingen tonen het tegenovergestelde van de ASTM-metingen. Het belangrijkste verschil zit in de manier van blootstelling aan de sulfaatoplossing. Bij de TAP-procedure worden de cilinders cyclisch ondergedompeld en is er altijd een deel dat niet rechtstreeks in contact komt met de sulfaatoplossingen. Bij ASTM zijn de proefstukken continu volledig ondergedompeld. De resultaten betreffende straalverandering voor en na borstelen en ruwheidverandering tonen aan dat beton met 100 % Portlandcement de beste weerstand biedt, voor zowel de proefstukken in een 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing als voor de proefstukken in een 29,8 g/l MgSO<sub>4</sub>-oplossing. Beton met 85 % hoogovenslak ter vervanging van cement blijkt het minst weerstandbiedend. Hierbij treden de grootste expansies op en brokkelt het meeste materiaal af. Daarnaast neemt de ruwheid bij S85 meer en sneller toe dan bij S0 en S50. Bijgevolg kan besloten worden dat toevoeging van 85 % hoogovenslak ter vervanging van cement een negatieve invloed heeft op de weerstand tegen sulfaten bij cyclische onderdompeling. Beton met 50 % hoogovenslak ter vervanging van cement lijkt ook een mindere weerstand dan traditioneel beton te bezitten afgaande op de gemiddelde waarden maar dit kan niet met zekerheid geconcludeerd worden aangezien de bij resultaten voor de lengteverandering voor en na borstelen rekening gehouden moet worden met de meetfout van 0,1 mm en de R<sub>a</sub>-waarden niet significant van elkaar verschillen. Toch lijkt het op het volgende neer te komen voor beton dat cyclisch/gedeeltelijk ondergedompeld wordt: hoe hoger het slakgehalte, hoe meer aantasting.

#### Visueel onderzoek van de proefstukken uit Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossingen

Voor het visueel onderzoek werden de proefstukken bestudeerd op verschillende tijdstippen. Figuur 2.15, Figuur 2.16 en Figuur 2.17 geven een beeld van de oppervlakteaantasting van respectievelijk S0, S85 en S50 [a] na 9 en 37 weken cyclische onderdompeling in een 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing. De aantasting van S50[b] uit een 3 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing wordt weergegeven in Figuur 2.18. De resultaten die bekomen werden door de straalverandering en de ruwheid op te meten worden gestaafd. Zoals duidelijk wordt uit de figuren vertonen de betonproefstukken met 85 % hoogovenslak ter vervanging van cement de grootste aantasting.



Figuur 2.15: TAP - Cilinders S0 uit 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> na 9 weken (links) en 37 weken (rechts)



Figuur 2.16: TAP - Cilinders S85 uit 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> na 9 weken (links) en 37 weken (rechts)



Figuur 2.17: TAP - Cilinders S50 [a] uit 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> na 9 weken (links) en 37 weken (rechts)



#### Figuur 2.18: TAP - Cilinders S50 [b] uit 3 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> na 9 weken (links) en 37 weken (rechts)

De oppervlakteaantasting van de cilinders op basis van S50 [a] en S50 [b] verloopt quasi gelijk. Visueel is er nauwelijks verschil op te merken.

De gedeelten die niet in de oplossing komen, blijken onderhevig aan zoutafzetting. De afzetting werd reeds vanaf het begin van de proef waargenomen. De zichtbare hoeveelheid

afgezette kristallen is na 16 weken al te vergelijken met de zichtbare hoeveelheid na 37 weken. Door afschrapen van de kristallen, blijkt het beton onder de kristallisatie meer aangetast dan de gedeelten die cyclisch in de sulfaatoplossing gedompeld werden. De gevolgen zijn het hevigst bij S85 uit de 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing. De granulaten zijn goed zichtbaar en de oppervlaktelaag is volledig verdwenen en vervangen door een kristallaag, zie Figuur 2.19.





Ook bij de proefstukken op basis van de S50-mengelingen treedt deze vorm van aantasting op maar in minder mate dan bij S85. Aangezien hierbij sulfaatoplossingen met verschillende concentratie gebruikt worden, kunnen beide vergeleken worden. Zoals in Figuur 2.20 te zien, worden minder zoutkristallen gevormd op het S50 [b]-beton dat cyclisch ondergedompeld wordt in de 3 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing dan op het S50 [a]-beton dat cyclisch ondergedompeld wordt in de 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing.



Figuur 2.20: TAP - Kristallisatie na 37 weken bij S50 [a] (links) en S50 [b] (rechts) uit Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

#### Visueel onderzoek van de proefstukken uit een MgSO<sub>4</sub>-oplossing

De proefstukken werden bestudeerd op verschillende tijdstippen, net zoals deze uit de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossingen. Figuur 2.21, Figuur 2.22 en Figuur 2.23 geven een beeld van de

oppervlakteaantasting van respectievelijk S0, S85 en S50 [a] na 9 en 37 weken cyclische onderdompeling in een 29,8 g/l MgSO<sub>4</sub>-oplossing. De aantasting van S50[b] uit een 3 g/l MgSO<sub>4</sub>-oplossing wordt weergegeven in Figuur 2.24. Ook hier komen de resultaten overeen met de resultaten die bekomen werden door de straalverandering en de ruwheid op te meten. In het algemeen kan gesteld worden dat de aantasting van de cyclisch ondergedompelde delen het grootst is onder invloed van MgSO<sub>4</sub>. Deze vaststelling komt overeen met de literatuur, waar beschreven wordt dat aantasting ten gevolge van MgSO<sub>4</sub> extremer is dan aantasting ten gevolge van Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, door de vorming van extra reactieproducten. Het wordt duidelijk dat de betonproefstukken met 85 % hoogovenslak ter vervanging van cement en ondergedompeld in een 29,8 g/l MgSO<sub>4</sub>-oplossing de grootste oppervlakte-aantasting vertonen na 37 weken. De aantasting van de S0-cilinders is nihil.



Figuur 2.21: TAP - Cilinders S0 uit MgSO4 na 9 weken (links) en 37 weken (rechts)



Figuur 2.22: TAP - Cilinders S85 uit MgSO<sub>4</sub> na 9 weken (links) en 37 weken (rechts)

De aantasting van de cilinders op basis van S50 [a] en cyclisch ondergedompeld in 29,8 g/l MgSO<sub>4</sub>-oplossing is minder bij de proefstukken op basis van S85. Hetzelfde geldt voor de cilinders aangemaakt met S50 [b]-beton uit de 3g/l MgSO<sub>4</sub>-oplossing.



Figuur 2.23: TAP - Cilinders S50 [a] uit MgSO₄ na 9 weken (links) en 37 weken (rechts)



Figur 2.24: TAP - Cilinders S50 [b] uit MgSO<sub>4</sub> na 9 weken (links) en 37 weken (rechts) Net zoals bij de proefstukken die cyclisch ondergedompeld werden in de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>oplossingen, wordt ook bij de proefstukken die cyclisch ondergedompeld werden in MgSO<sub>4</sub>oplossingen kristallisatie waargenomen op de gedeelten die niet rechtstreeks in contact komen met de oplossingen. Deze afzetting is echter niet van dezelfde aard: het is het harder en heeft een grijze kleur. Ook het beton net onder deze afzetting lijkt minder aangetast. De proefstukken uit de 3 g/l oplossingen zijn minder onderhevig aan deze vorm aantasting. In Figuur 2.25 wordt de kristalafzetting bij S0 en S85, beiden uit een 29,8 g/l MgSO<sub>4</sub>-oplossingen weergegeven.



Figuur 2.25: TAP - Kristallisatie na 37 weken bij S0 en S85 MgSO4-oplossingen

#### Kristallisatie

De aantasting treedt zowel op aan het oppervlak dat rechtstreeks in contact komt met de sulfaatoplossing, wat blijkt uit de ruwheidsmetingen, als op de delen van het proefstuk die nooit rechtstreeks in contact komen met de oplossing. Bij deze laatste wordt kristallisatie vastgesteld en uit het visueel onderzoek werd duidelijk dat hier de grootste schade optreedt. Dit is in overeenstemming met wat in de literatuur beschreven wordt door Irassar et al. [1996], Bassuoni en Nehdi [2009] en Liu [2010]. Bij de proefstukken uit de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>oplossingen wordt duidelijk afzetting van "zachte", witte kristallen waargenomen terwijl de proefstukken uit de MgSO<sub>4</sub>-oplossingen eerder een grijze en hardere afzetting vertonen. Deze waarnemingen komen overeen met de waarnemingen van Liu [2010]. Ongeacht het gebruikte kation kan gesteld worden dat hoe hoger het slakgehalte, hoe extremer kristalvorming. Een mogelijke oorzaak is de verfijnde poriënstructuur van hoogovenslakbeton waardoor een grotere capillaire zuiging ontstaat en de sulfaten dus dieper in het niet-ondergedompelde gedeelte binnendringen en aldus meer zoutkristallen vormen. Om na te gaan welke reactieproducten gevormd worden, werden analyses aan de hand van XRD-scans uitgevoerd. Om praktische redenen zijn enkel de scans van de kristalafzetting van S0 en S85 uit de 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossingen uitgevoerd. In Figuur 2.26 en Figuur 2.27 worden de XRD's weergegeven voor respectievelijk de kristalafzetting en het beton er net onder bij S0 uit de 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing.


Figuur 2.26: XRD - Zoutkristalafzetting op S0 uit 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

De XRD-scan uit Figuur 2.26 toont aan dat de zoutafzetting op traditioneel Portlandcementbeton uit een 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing bestaat uit thenardiet. Deze bevindingen werden ook vastgesteld door Liu [2009, 2010]. In de literatuurstudie werd reeds aangehaald dat de zoutkristallisatie van Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> afhankelijk is van de omgevingsfactoren temperatuur en relatieve vochtigheid. Zo kunnen twee stabiele fasen gevormd worden, namelijk thenardiet (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) en mirabiliet (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O) of één metastabiele fase heptahydraat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O). In de literatuur bestaat er echter onenigheid over het feit welke fase het meeste schade berokkent. In voorliggend werk is het duidelijk dat thenardiet voor de aantasting zorgt.

In Figuur 2.27 wordt de XRD-scan getoond van S0-beton uit een 29,8 g/l  $Na_2SO_4$ -oplossing net onder de kristalafzetting.



Figuur 2.27: XRD - S0-beton van net onder zoutkristalafzetting uit 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Op basis van de literatuur waren de verwachtingen zo dat geen ettringiet en gips gevormd zou worden aan het oppervlakt net onder de kristalafzetting. Dit wordt bevestigd door de XRDscan. Wat wel waargenomen wordt is thernadiet en calciet. Thenardiet kan in het beton waargenomen worden aangezien het zich vormt op het oppervlak van de granulaten. [Liu, 2010] De aanwezigheid van calciet wijst op carbonatatie. Uit het onderzoek van Liu blijkt dat ten gevolge van de carbonatatie, thenardiet gevormd kan worden op de gehydrateerde cementmaterialen. Dit zorgt voor een versnelling van het aantastingsproces.

Volgens de literatuur kan ettringiet, gips en thaumasiet gevormd worden in de kern van het proefstuk, ook in de niet-ondergedompelde delen. Bewijs hiervan is echter niet geleverd in voorliggend werk. Verder onderzoek is nodig om dit na te gaan. Afgaande op de gemeten pH kan verondersteld worden dat deze producten niet stabiel aanwezig zullen zijn. De initiële pH-waarde van de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossingen was gemiddeld 6. Op het einde van de cycli nam de pH waarden aan van 8,5 à 9. Ondanks het licht basische karakter van de oplossing op het einde van de cyclus, is dat mogelijk niet basisch genoeg om stabiel ettringiet te vormen. Ook thaumasiet wordt pas gevormd bij een hogere pH-waarde.

In Figuur 2.28 en Figuur 2.29 worden de XRD's weergegeven voor respectievelijk de kristalafzetting en het beton eronder bij S85 uit de 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing.



Figuur 2.28: XRD - Zoutkristalafzetting op S85 uit 29,8 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Ook de kristallen die gevonden worden op het S85-beton, uit een 29,8 g/l  $Na_2SO_4$ -oplossing, zijn thenardiet.



Figuur 2.29: XRD - S85-beton van net onder zoutkristalafzetting uit 29,8 g/l Na2SO4

De verwachtingen op basis van de resultaten en de literatuur waren ongeveer dezelfde als bij het referentiebeton maar alles in meerdere mate. Op de XRD-scan wordt thernadiet en calciet. In de literatuur wordt aangetoond dat toevoeging van hoogovenslak ter gedeeltelijke vervanging van cement een negatieve in vloed heeft op de weerstand tegen kristallisatie ten gevolge van gedeeltelijke onderdompeling in  $Na_2SO_4$ . Er wordt dus aangenomen dat de gevormde producten in grotere mate aanwezig zijn. De verfijnd geachte poriënstructur zorgt voor een verhoging van de capillaire zuiging maar ook voor minder plaats voor expansie van de zoutkristallen. Bijgevolg zal het beton sneller aangetast worden. Samen met de verfijnde poriënstructuur van hoogovenslakbeton zorgt dit voor grote spanning met afbrokkelingen en scheuren tot gevolg.

#### Invloed kation

Omtrent de invloed van het kation (Na of  $Mg^{2+}$ ) kan moeilijk een uitspraak gedaan worden. Het is namelijk zo dat de straalverandering de grootste variaties ondergaat bij de proefstukken uit een Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing maar dat de ruwheid het meeste toeneemt bij de proefstukken uit een MgSO<sub>4</sub>-oplossing. Zoals reeds vermeld, blijkt uit het visuele onderzoek dat de kristallisatie in de twee verschillende oplossingen niet van dezelfde aard is. Door het gebrek aan analyse van de proefstukken uit de MgSO<sub>4</sub>-oplossingen kan niet nagegaan worden welke reactieproducten gevormd worden. In de literatuur wordt aangegeven dat de aantasting door gedeeltelijke onderdompeling in MgSO<sub>4</sub> minder erg is dan bij Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Uitgaande van de R<sub>a</sub>waarden wordt deze veronderstelling niet gevolgd in voorliggend werk. Wel wordt minder schade waargenomen van het beton net onder de kristalafzetting. Mogelijk speelt de vorming van een beschermend brucietlaagje bij MgSO<sub>4</sub> hierbij een rol, maar dit kon echter niet geverifieerd worden.

#### Invloed concentratie

De invloed van de sulfaatconcentratie werd nagegaan door concentratiemetingen uit te voeren bij aanvang van een cyclus en op het einde van een cylcus. Hierbij wordt vastgesteld dat ongeveer 1/3 van de sulfaten uit de oplossing door het beton geabsorbeerd wordt ongeacht de initiële concentratie. Ondanks deze vaststelling is de invloed van de concentratie op de aantasting niet duidelijk, daar de resultaten voor de proefstukken met 50% hoogovenslak uit enerzijds een 3 g/l sulfaatoplossing en anderzijds uit een 29,8 g/l sulfaatoplossing niet significant van elkaar verschillen. De invloed van de concentratie is wel duidelijk merkbaar aan de kristalafzetting op de proefstukken. Deze neemt toe naarmate de concentratie toeneemt. Dit wordt komt overeen met het werk van Liu [2010].

# 2.5. Conclusie

Voor beton volledig ondergedompeld in een sulfaatoplossing wordt geconcludeerd dat de weerstand tegen sulfaten stijgt als cement vervangen wordt door hoogovenslak. Na 32 weken onderdompeling volgens de ASTM C 1012-4 procedure kunnen de mortelproefstukken op basis van 50 % en 85 % hoogovenslak als voldoende weerstandbiedend beschouwd worden. De waarden onderling zijn niet significant verschillend waardoor het niet helemaal zeker is of de weerstand ook stijgt met toenemende hoogovenslakgehaltes.

Het tegenovergestelde wordt geconcludeerd bij beton dat gedeeltelijk en cyclisch ondergedompeld wordt in een sulfaatoplossing, gebruik makende van het TAP-toestel. De weerstand tegen sulfaten van beton met hoogovenslak neemt af bij gedeeltelijke en cyclische onderdompeling. Dit wordt geconcludeerd zowel op basis van de lengte- en ruwheidsverandering als op basis van de kristallisatie. Proefstukken op basis van beton met 85 % hoogovenslak ter vervanging van cement vertonen de meest uitgesproken schade. Dit is vooral te danken aan de kristallisatie van thenardiet ter hoogte van het deel dat niet ondergedompeld wordt. De vorming van thenardiet zorgt waarschijnlijke samen met de grotere capillaire zuiging en de dichtere poriënstructuur voor grote spanningen in beton met hoge slakgehaltes. Daarnaast draagt ook de vorming van calciet bij tot een versnelde aantasting van het deel dat niet rechtstreeks in contact komt met de oplossing. Hoogovenslakbeton met een cementvervangingsgehalte van 50 % vertoont een aantasting die te vergelijken is met deze van traditioneel Portlandcementbeton. De lengte- en ruwheidsverandering van het beton op basis van beiden is niet significant verschillend en de kristallisatie is evenwaardig.

Verder kan besloten worden dat hogere sulfaatconcentraties aanleiding geven tot meer zoutkristallisatie bij gedeeltelijke onderdompeling van hoogovenslakbeton. De hogere sulfaatconcentraties hebben dus een negatieve invloed op de aantasting door sulfaten van het deel dat nooit ondergedompeld wordt, maar op basis van de ruwheidsverandering van het cyclisch ondergedompelde deel kan geen uitspraak gedaan worden aangezien de R<sub>a</sub>-waarden niet significant verschillen.

Daarnaast is de invloed van het kation verschillend voor het deel dat rechtstreeks in contact komt met de sulfaatoplossingen en voor het deel dat niet rechtstreeks in contact komt met de oplossingen. Wat het eerste betreft, wordt geconcludeerd dat de aantasting van MgSO<sub>4</sub> groter is dan van  $Na_2SO_4$  daar de  $R_a$ -waarden sneller toenemen. Voor het tweede wordt geconcludeerd dat de  $MgSO_4$ -oplossingen minder invloed hebben op de kristallisatie en de aantasting die hierdoor ontstaat.

#### Verder onderzoek

- Evaluatie en verfijning van de voorgestelde SVA- en Wittekindtprocedure.
- Analyse van de reactieproducten op het einde van de nog lopende ASTM-metingen, om na te gaan welke reactieproducten gevormd worden.
- Analyse van de TAP-wielen met behulp van XRD, SEM, e.d. Zowel de kristallisatie zelf als de oppervlakken net onder de kristallen kunnen onderzocht worden. Verder kan ook de kern van het gedeelte dat cyclisch in de oplossing komt en van het gedeelte dat nooit in de oplossing komt onderworpen worden aan bepaalde testen om na te gaan welke reactieproducten gevormd zijn. Op die manier is het misschien mogelijk om het specifiek aantastingsmechanisme te achterhalen.
- Bij volgende metingen om de weerstand tegen sulfaten te bepalen aan de hand van TAP is het aangewezen om het afbrokkelend materiaal op te vangen en te wegen. Op die manier kan het massaverlies in functie van de tijd bepaald worden en kan een beter beeld gevormd worden van deze aantastingsvorm.

# Hoofdstuk 3 Weerstand tegen ASR

## 3.1. Literatuurstudie

De alkali-silicareactie is voor België de meest relevante variante van de alkaligranulaatreactie. De term alkali-silicareactie (ASR) duidt op een geheel van reacties die kunnen plaatsvinden tussen bepaalde bestanddelen van de granulaten met alkaliën die in het poriënwater aanwezig zijn. Deze bestanddelen bevatten reactieve silica (kiezelzuur). De alkaliën (natrium- en kaliumhydroxiden) kunnen afkomstig zijn van alle samenstellende elementen van het beton of aangevoerd worden van buitenuit. Enkel de vrije, oplosbare alkaliën spelen een rol in het reactieproces. De alkali-silicareactie is zeer complex. [Desmyter et al., 2002; Apers, 2006]

#### 3.1.1. Aantastingsmechanisme

Een eerste stap in het aantastingsmechanisme is de reactie van alkaliën met water met de vorming van alkalihydroxide. Voor natrium kan de omzetting als volgt geschreven worden:

$$Na_2O + H_2O \rightarrow 2NaOH$$
 (3.1)

Daarna reageert het kiezelzuur met dit alkalihydroxide tot alkali-silicaathydraat (alkali-silica gel), dat zeer veel water aan zich kan binden [cementbeton.nl, 2009]:

$$SiO_2.nH_2O + 2NaOH \rightarrow Na_2SiO_3 \cdot (n+1)H_2O$$
(3.2)

De reactiesnelheid hangt af van de reactiviteit van het  $SiO_2$  (silica) of  $SiO_2.nH_2O$  (kiezelzuur) en de mobiliteit van de alkali-ionen om de reactieve silica te bereiken. De reactiesnelheid neemt toe naarmate de silica minder goed gekristalliseerd is. Het reactieproduct, alkalisilicaathydraat, is een gel die het vermogen bezit om water aan te trekken waardoor het zal zwellen. Indien er onvoldoende ruimte is, ontstaan inwendige spanningen die kunnen leiden tot expansie en scheurvorming. [Apers, 2006]

Schadelijke ASR kan enkel en alleen optreden als ten minste aan de volgende voorwaarden gelijktijdig wordt voldaan [Desmyter et al., 2002; Apers, 2006; cementbeton.nl, 2009; Van Lerberghe en Raedt, 2009]:

- *Voldoende water:* Constant of periodiek dient voldoende vocht in het beton aanwezig te zijn (minimale relatieve vochtigheid 85 %). Als er geen aanvoer van water is, kan de ASR-gel geen water aantrekken en het beton dus niet zwellen.
- Voldoende alkaliën: In de praktijk is gebleken dat bij een gehalte van minder dan 3 kg Na<sub>2</sub>O-equivalent per m<sup>3</sup> beton geen risico voor schadelijke ASR aanwezig is. Het voorgaande geldt alleen als het beton niet in aanraking komt met een alkali-ionen houdende oplossing, zoals dooizoutoplossingen of zeewater. In dat geval kan door absorptie en diffusie het gehalte aan alkali-ionen boven de gestelde eis uitkomen. De wisselende werking van bevochtigen en drogen vormt een bijkomend gevaar op een toenemende verrijking van het beton met alkaliën. Saccani et al. [2001] stellen dat de expansiegraad reeds toeneemt vanaf 2,4 % Na<sub>2</sub>O (t.o.v. het totale gewicht).

Bij de problemen met betrekking tot alkali-granulaat reacties worden de alkaliën aangegeven in "natriumoxide equivalent":

$$\% \text{ Na}_{2}\text{O}_{\text{equivalent}} = \% \text{ Na}_{2}\text{O} + 0, 658 \times \% \text{ K}_{2}\text{O}$$
(3.3)

Waarbij 0,658 de moleculaire massaverhouding van Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O is.

• Voldoende permeabiliteit: Een lage permeabiliteit, of anders uitgedrukt een hoge diffusieweerstand voor alkali-ionen, zal ASR beperken of zelfs voorkomen. Door deze hoge diffusieweerstand verloopt het transport van ionen zo langzaam dat binnen de levensduur geen expansie optreedt. Een hoge diffusieweerstand van het beton kan bekomen worden door het gebruik van hoogovencement of vliegas en een w/c factor

die niet te hoog is. De w/c-factor mag bovendien ook niet te laag zijn. Dit om volgende twee redenen:

- Een lage w/c-factor leidt tot minder expansieruimte door de afname van de capillaire poriën, met als gevolg dat de expansie sneller schadelijk wordt.
- Een lage w/c-factor bekomen door een hoog cementgehalte verhoogt daarbij het Na<sub>2</sub>O-equivalent.

Scheurvorming op zich kan ook de ASR op gang brengen. De potentieel reactieve granulaten kunnen dan immers gemakkelijker bereikt worden door vocht en alkaliionen.

• *Gehalte aan reactief silica:* Alleen als het gehalte aan reactief silica of kiezelzuur tussen bepaalde grenswaarden ligt en aan voorgaande voorwaarden voldaan is, kan schadelijke ASR optreden.

Indien deze vier voorgaande elementen zich in ongunstige verhoudingen (pessimum hoeveelheden) voordoen, treedt ASR op met scheurvorming als gevolg. Het scheurpatroon ten gevolge van ASR ziet er meestal als volgt uit [Apers, 2006]:

- Inwendige microscheuren die in alle richtingen lopen en onderling verbonden zijn.
- Scheuren aan de oppervlakte die verbonden zijn met de inwendige. Deze lopen min of meer recht en vormen een landkaartachtig patroon. Soms zijn er witte afzettingen aan de flanken.

Daar ASR grote gevolgen met zich meebrengt, is het van belang voorzorgsmaatregelen te nemen. Deze zijn onder andere [Apers, 2006]:

- Bepreken van het totale alkali-gehalte van het betonmengsel in functie van de aard van het gebruikte cement, bijvoorbeel gebruik van LA-cement.
- Gebruik van cementtypes die slak en/of vliegas bevatten.
- Gebruik van niet-reactieve granulaten.
- Aangepaste W/C factor.

#### **3.1.2.** Testmethodes

Om de invloed van de alkali-silicareactie in beton of mortel te bestuderen wordt gebruik gemaakt van expansieproeven. Men kan een onderscheid maken tussen proeven op lange termijn en versnelde procedures. Daarnaast zijn er ook chemische proeven en pertrografische methoden om de reactiviteit van de granulaten te bepalen.

#### **3.1.2.1. Proeven op lange termijn**

Wat de proeven op lange termijn betreft zijn er ASTM C 227 en NF P 18-585. Beide zijn mortelprismamethoden. Bij NF P 18-585 worden prisma's van 2,5 x 2,5 x 28 cm vervaardigd met het te beproeven "reactieve" granulaat en verrijkt met alkaliën. Deze prisma's worden gedurende een aantal maanden bewaard in een volledig verzadigde omgeving bij 38 °C. Indien de expansie na 6 maanden kleiner is dan 0,10 % wordt het granulaat als niet-reactief beschouwd. een veel voorkomende methode om alkali-silicareactie op te meten bij betonproefstukken is de Canadese methode, volgens de norm CSA A 23.2-14A. Een variante hiervan is de Franse norm NF P 18-587. Verder zijn er ook de ASTM C 1293, RTA T 363 en de RILEM TC 106-3 procedure. Bij de RILEM procedure worden betonprisma's aangemaakt met lengte  $250 \pm 5$  mm en zijde  $75 \pm 5$  mm en met het te bestuderen grove/fijne granulaat. Er wordt uitgegaan van vaste volumepercentages voor cement, vrij water en granulaten. Het te gebruiken cement moet een alkali-gehalte hebben tussen 0,9 en 1,2 % Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> en het alkaligehalte van het beton wordt verhoogd tot  $1,25 \pm 0,5$  % Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>. De minimale slump van het te verwerken beton bedraagt 80 mm, zoniet moeten hulpstoffen gebruikt worden. Na het aanmaken worden de proefstukken enkele maanden volledig verzadigd bewaard bij een temperatuur van 38 °C. Op regelmatige tijdstippen worden de prisma's afgekoeld tot 20 °C en wordt de expansie gemeten. Een expansiecriterium is niet gegeven maar bij de Canadese en Franse methode wordt een expansie van 0,04 % als criterium gebruikt. In Canada wordt dit criterium toegepast na één jaar en in Frankrijk al na 8 maanden. [RILEM, 2000; Desmyter et al., 2002]

#### **3.1.2.2.** Versnelde methodes

Wat de versnelde procedures betreft is de meest wijdverspreide de Zuid-Afrikaanse NBRI-methode, ook wel de Oberholsterproef genoemd. Deze komt in allerlei varianten voor, waaronder RILEM TC 106 [2000]. Bij de Oberholsterproef zoals beschreven in

RILEM TC 106 worden mortelprisma's vervaardigd op basis van voorgeschreven granulaatfracties, mengverhoudingen en mengprocedures. Na 24 uur vochtige nabehandeling in de originele bekisting worden de prisma's in een bak gestopt, gevuld met water. Deze wordt opgewarmd tot 80 °C. De volgende dag wordt de eerste lengtemeting uitgevoerd waarna de prisma's in een 1N NaOH-oplossing bij 80 °C bewaard worden. De proef duurt 14 dagen en elke dag worden de proefstukken opgemeten. Voor deze proef bestaan geen voorschriften, maar op basis van ervaring kan het granulaat als niet-reactief beschouwd worden als de expansie beperkt blijft tot 0,1 %. Tussen 0,1 en 0,2 % is er meestal sprake van een grijze zone, en boven 0,2 % is er altijd sprake van reactieve granulaten. RILEM TC 106-2 wordt toegepast om mortelproefstukken te testen, RILEM TC 106-3 wordt gebruikt om de weerstand van betonnen proefstukken te bepalen. Andere varianten van de Oberholsterproef zijn: ASTM C 1260, ASTM C 441 en CSA A23.2-25A. [Desmyter et al., 2002; Rangaraju en Desai, 2009]

Higgins en McLellan [2009] concluderen op basis van hun onderzoek dat de bewaring van betonnen proefstukken aangemaakt met een verhoogde alkali-hoeveelheid bij 38 °C in een vochtige omgeving als versnelde testmethode beschouwd mag worden. Op die manier kan nagegaan worden of vervangproducten van cement de weerstand al dan niet verhogen. De bewaring bij 38 °C correleert goed met de bewaring bij 20 °C. Het enige verschil is dat de expansie bij hogere temperatuur ongeveer 3 keer sneller verloopt. Saccani et al. [2001] voerden ook onderzoek naar de ideale temperatuur om versnelde proeven uit te voeren. Er werd gebruik gemaakt van silicahoudend zand als reactief granulaat. De mortelproefstukken, ontkist na 24 uur en bewaard bij 100 % relatieve vochtigheid, werden bestudeerd met SEM-analyse. Uit de resultaten blijkt dat bij 80 °C de resultaten het snelst en het best merkbaar zijn. Ook blijkt dat de mortelproefstukken 80 à 90 % van hun expansie ondergaan gedurende de eerste 3 dagen. Daarnaast concluderen ze dat hogere mechanische sterkte niet rechtstreeks leidt tot een betere weerstand tegen ASR. Dit laatste is in tegenstelling tot wat Zu et al. [1995] formuleren.

Bouikini et al. gebruiken in hun onderzoek een methode waarbij de impulssnelheid gemeten wordt als parameter. De impulssnelheid van een proefstuk onderhevig aan ASR neemt toe indien er expansie optreedt. Op het moment dat het proefstuk scheuren vertoont, daalt de impulssnelheid. [Bouikini et al., 2009]

#### **3.1.2.3.** Petrografische en chemische methodes

Het gehalte aan potentieel reactieve materialen in de granulaten kan bepaald worden met petrografisch onderzoek meer bepaald met: PFM (polarisatie- en fluorescentiemicroscopie), XRD (X-stralendiffractie), infraroodspectroscopie, elektronenmicroscopie en beeldanalyse. Daarnaast kunnen deze materialen ook bepaald worden met chemische analysemethoden zoals beschreven in ASTM C 289 of een variante hiervan namelijk NF P 18-589. [cementenbeton.nl, 2009; Desmyter et al., 2002]

### 3.1.3. Reactieve granulaten

#### 3.1.3.1. Invloedsfactoren

Volgende factoren hebben invloed op de reactiviteit van de granulaten:

- Afmetingen: Algemeen wordt aangenomen dat de reactiviteit stijgt als de grootte van de deeltjes daalt. Uit het onderzoek van Ramyar et al. [2005] wordt geconcludeerd dat de fijnheid van de reactieve granulaten geen noemenswaardige invloed heeft op de expansie binnen de eerste 14 dagen. Op langere termijn blijkt de invloed van de fijnheid wel merkbaar. De mortelproefstukken aangemaakt met de vermalen granulaten vertonen grotere expansie dan deze met de niet-vermalen granulaten. Verder stellen ze ook dat een te grote aanwezigheid (100 %) van fijne, reactieve granulaten zorgt voor te veel reactiemogelijkheden waardoor een soort van barrière ontstaat die de reactie vertraagd. Deze algemene opvatting wordt tegengesproken door Xie et al. [2003], Multon et al. [2008, 2010] en ook door Van Lerberghe en Raedt [2009]. Ze beweren dat de grovere fracties van reactieve toeslagstoffen leiden tot grotere expansie ten gevolge van ASR. Verder blijkt dat een grotere hoeveelheid zich vertaalt in grotere expansie.
- *Hoekigheid:* Algemeen wordt aangenomen dat ronde granulaten minder reactief zijn dan hoekige. Met andere woorden dat de effecten van ASR groter worden, als de hoekigheid toeneemt. Volgens Ramyar et al. [2005] heeft de hoekigheid van de zeer fijne en de zeer grote granulaten een verwaarloosbaar effect op de expansie ten gevolge van ASR. Het effect is meer uitgesproken bij de gemiddelde fracties.

• *Kristalstructuur:* De mate van reactiviteit hangt af van de kristalstructuur van de vrije silica, SiO<sub>2</sub>, die in het toeslagmateriaal aanwezig is. Hoe beter de kristalstructuur geordend is, hoe lager de oplosbaarheid van silica en hoe geringer de reactiviteit van de silica. [cementenbeton.nl, 2009]

#### **3.1.3.2.** Soorten reactieve granulaten en gevolgen

#### Glas

Topçu en Canbaz [2004] concluderen dat het gebruik van glas de effecten van ASR vermeerdert. De uitzetting van de mortelproefstukken met 100 % gerecycleerd glas ter vervanging van zand was meer dan 0,2 % op minder dan 3 dagen. Deze uitzetting werd bij proefstukken met 0 % glas pas na 4 dagen bereikt. Uit de resultaten op relatief langere termijn, namelijk 9 dagen, blijkt dat wit glas het meest reactief is. Van Lerberghe en Raedt [2009] en Vegt [2003] besluiten eveneens dat wit glas aanleiding geeft tot grotere expansies ten gevolge van ASR dan groen glas. Net zoals Ismail en Al-Hashmi [2009] zien ze dat groen glas en geranuleerd afvalglas ter vervanging van de fijne granulaten de expansie reduceert in vergelijking met deze bij Portlandcementbeton. Verder stellen Van Lerberghe en Raedt dat de grove fractie de meest negatieve invloed heeft. Dit wordt bevestigd door Xie et al. [2003], Lam et al. [2007] en Topçu et al. [2008]. Vervangingspercentages van 50 % zorgen bij elk soort glas voor onaanvaardbare expansies. 30 % wordt door Van Lerberghe en Raedt voorop gesteld als grenswaarde voor de vervanging van zand of grind door glas. Toch blijkt uit het onderzoek van Xie et al. dat de vervanging van 10 % van de granulaten door glas in combinatie met 100 % Portlandcement reeds voor ernstige schade ten gevolge van ASR zorgt. Hieruit besluiten ze dat bij 10 % glas de invloed afhangt van de grootte van de deeltjes. Algemeen wordt aangenomen dat de weerstand tegen ASR daalt bij stijgend glasgehalte.

#### Andere

Kwarts is  $SiO_2$  met een goed geordende (volledig kristallijne) kristalstructuur en bijgevolg niet reactief. Voorbeelden van silica met een slecht geordende (amorfe of glasachtige) structuur zijn poreuze vuursteen, chalcedoon, opaal, christobaliet, tridymiet en cryptokristallijn kwarts. Deze materialen zijn reactief. Indien het gehalte aan deze materialen groter is dan 2% wordt het toeslagmateriaal beschouwd als potentieel ASR-gevoelig. Materiaal dat 2% of minder reactieve silica bevat, is veelal ongevoelig voor de alkalisilicareactie. Er kunnen echter wel nog geringe hoeveelheden ander reactief silica aanwezig zijn. [cementenbeton.nl, 2009]

Ten gevolge van scheuren en expansie vastgesteld bij betonnen landingsbanen die behandeld werden met chemische ontdooiingsproducten is er onderzoek gevoerd naar de reactiviteit van deze producten. Zo blijkt dat ontdooiingsproducten op basis van kaliumacetaat het potentieel bezitten om ASR te versnellen in aanwezigheid van reactieve granulaten. [Rangaraju en Desai, 2007]

#### 3.1.4. Alkali-silicareactie bij hoogovenslakbeton

In vergelijking met Portlandcement heeft beton met hoogovenslak ter vervanging van cement een betere weerstand tegen ASR omwille van volgende redenen: het bevat minder oplosbare alkaliën, de diffusieweerstand voor alkali-ionen is groter want de permeabiliteit daalt en meer alkaliën worden geabsorbeerd tijdens de hydratatie aangezien CH sneller wordt opgebruikt. Deze eigenschappen zorgen voor een verbeterde weerstand tegen ASR. [Zu et al., 1995; Innis en Thomas, 1999; Fernández-Jiménez en Puertas, 2002; Apers, 2006; Shetata en Thomas, 2010]

Bouikini et al. [2009] onderzochten de invloed op ASR van 50 en 65 % cementvervanging door hoogovenslak in beton. Twee soorten betonproefstukken werden aangemaakt, prisma's met afmetingen 75 x 75 x 300 mm voor expansiemetingen en prisma's met afmetingen 100 x 100 x 500 mm voor impulssnelheidsmetingen en scheurtesten. Er werd gebruik gemaakt van Portlandcement met hoog alkaligehalte (1 % Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>) en slak met 0,53 % Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>. De proefstukken werden ontkist na 1 dag, 13 dagen afgedekt bewaard in polyethyleendoeken en twee weken in de klimaatzaal ( $20 \pm 2^{\circ}$ C en 95  $\pm 5\%$  R.V.) waarna ze verplaatst werden naar een kamer met een temperatuur van 38 °C en vochtige omstandigheden (R.V. niet nader bepaald). Op het moment dat een expansie van 0,3 % voor 50 % slak en 0,2 % voor 65 % slak bekomen werd, werden de proefstukken in droge omstandigheden bewaard voor 40 à 70 dagen. Daarna werden ze terug in de kamer bij 38 °C en vochtige omstandigheden bewaard. Uit de resultaten blijkt dat beton met 65 % slak twee keer zo veel tijd nodig heeft om een bepaalde expansie te bereiken dan beton met 50 % vervangingsgehalte. Ondanks deze conclusie is de expansie na 28 dagen ongeveer gelijk. Pas vanaf het moment dat de proefstukken bij 38 °C bewaard werden, nam de expansie van het beton met 50 % slak aanzienlijk sneller toe dan bij 65 % slak, zie Tabel 3.1.

Beton	Leeftijd [dagen]	Expansie [%]
50 % slak	28	0,020
	38	0,144
	46	0,206
	81	0,310
65 % slak	28	0,023
	78	0,160
	86	0,216

Tabel 3.1: Expansie ten gevolge van ASR

Bron: Boukini et al., 2009

Ook op het gebied van weerstand tegen scheuren ten gevolge van ASR scoort 65 % slakkenbeton beter dan 50 % slakkenbeton. Verder concluderen Bouikini et al. dat 7 dagen bewaring onder water zorgt voor algemeen verbeterde duurzaamheidseigenschappen alsook een verbeterde weerstand tegen ASR. Ook Thomas en Innis [1998] concluderen dat de vervanging van cement door 25 tot 65 % slak een positieve invloed heeft op de weerstand tegen ASR. Higgins en McLellan [2009] concluderen dat een slakgehalte tot 70 % de weerstand tegen ASR doet toenemen. Rangaraju en Desai [2009] besluiten dat beton met een vervangingsgehalte van 50 % zorgt voor goede resultaten bij alle soorten reactieve granulaten die doorheen het onderzoek gebruikt zijn, alle expansies bleven onder de 0,1 %. Verder blijkt, in tegenstelling tot beton met 40 % slak als cementvervanging, 50 % slak nog meer invloed te hebben als de natriumhydroxide oplossing vervangen wordt door een kaliumacetaat oplossing. In vergelijking met het referentiebeton zonder slakken werden reducties van de expansie tot 100 % waargenomen.

Ook onderzoek van Fernández-Jiménes en Puertas [2002] en Puertas et al. [2009] wijst uit dat het gebruik van slak de gevolgen van ASR aanzienlijk reduceert. Puertas et al. tonen aan dat de expansie van proefstukken op basis van de slakken, gemeten volgens ASTM C1260-94, bijna vier keer kleiner was dan bij de proefstukken op basis van 100 % traditioneel Portlandcement. Verder wordt ook aangetoond dat indien geen Portlandiet gevormd wordt ook geen ASR-expansie optreedt.

In ASTM C 989-06 [2006] wordt gezegd dat beton aangemaakt met meer dan 40 % hoogovenslak ter vervanging van cement mag worden als zijnde voldoende weerstandbiedend. Dat wil zeggen dat er geen testen moeten plaatsvinden indien dit beton in praktijk toegepast zou worden, tenzij gebruikt in combinatie met een Portlandcement met

hoog alkaligehalte (> 0,6 % Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>) of alkaliën toegevoegd worden als activator of als een granulaat gebruikt wordt dat bekend staat als reactief. [cementenbeton.nl, 2009]

Wat de invloed van hoogovenslakbeton op de versnelde testmethodes betreft, besluiten Fernández-Jiménes en Puertas [2002] dat de expansielimieten bij de traditionele meetmethoden, bepaald op 14 of 16 dagen, niet geschikt zijn om het volledige effect van de hoogovenslak waar te nemen. Uit hun onderzoek blijkt dat de reacties trager op gang komen dan bij traditioneel Portlandcement en dat er op latere leeftijd mogelijks nog schade kan optreden.

## 3.2. Materialen en methoden

#### 3.2.1. Materialen

#### **3.2.1.1. Betonmengelingen**

Bij de betonmengelingen om de weerstand tegen alkali-silicareactie te bepalen werd gebruik gemaakt van wit glas (grove fractie) als reactief granulaat ter vervanging van 50 % van de granulaten. Voor dit onderdeel werden vier verschillende mengelingen aangemaakt, zoals weergegeven in Tabel 3.2. Ook hier werd een gehalte cementeerbaar materiaal van  $\pm$  350 kg/m<sup>3</sup> vooropgesteld, en werd overal een W/B factor van 0,5 gebruikt.

	S0 <sub>(glas)</sub>	$S50_{(glas)}$	S70 <sub>(glas)</sub>	S85 <sub>(glas)</sub>
Zand 0/4 [kg/m <sup>3</sup> ]	654	652	651	650
Granulaat 2/8 [kg/m³]	241	240	240	239
Granulaat 8/16 [kg/m³]	339	338	338	337
CEM I 52,5 N [kg/m <sup>3</sup> ]	344	172	103	51
Water [kg/m <sup>3</sup> ]	172	172	171	171
Hoogovenslak [kg/m <sup>3</sup> ]	0	172	240	291
Grof wit glas [kg/m³]	580	578	577	577
W/B-factor	0,5	0,5	0,5	0,5

Tabel 3.2: Betonsamenstellingen voor weerstand tegen ASR

In Tabel 2.2 worden de parameters van het beton getoond die bepaald werden tijdens het aanmaken. Voor een beschrijving van de bepaling van deze parameters wordt verwezen naar Deel 1.5.1.

Mengeling	Slump [mm] (Klasse)	Luchtgehalte [ %]	Volumegewicht [kg/m <sup>3</sup> ]
S0 (glas)	53 (S2)	2,8	2325
S50 (glas)	45 (S2)	1,6	2350
<b>S70</b> (glas)	45 (S2)	1,58	2338
S85 (glas)	30 (S1)	1,6	2338

Tabel 3.3: Parameters bekomen bij het aanmaken van het beton

De gemiddelde druksterktes op 28 dagen van de betonmengelingen met aanduiding van de standaardfout, die gebruikt werden om de weerstand tegen sulfaten te bepalen, zijn weergegeven in Tabel 2.3. De manier waarop deze gegevens opgemeten worden wordt beschreven in Deel 1.5.1.

Mengeling	Druksterkte [N/mm <sup>2</sup> ]	σ [N/mm²]	
S0 (glas)	46,13	1,31	
<b>S50</b> (glas)	40,77	1,07	
<b>S70</b> (glas)	31,30	1,27	
S85 (glas)	25,50	0,65	

Tabel 3.4: Gemiddelde druksterktes op 28 dagen

#### 3.2.2. Methoden

#### **3.2.2.1. Oberholsterproef**

Deze test is ontwikkeld om de reactiviteit van granulaten te testen. Door gebruik te maken van een granulaat dat zeker reactief is (in dit geval grof wit glas), kon de test gebruikt worden om de invloed van hoogovenslak te onderzoeken. De voorwaarden die opgelegd worden om granulaten als niet-reactief te beschouwen, werden aangehouden om de invloed van hoogovenslakbeton op de weerstand van tegen alkali-silica reactie te bepalen. Als de expansie beperkt blijft tot 0,1 % dan is de weerstand tegen ASR voldoende, als de expansie tussen 0,1 % en 0,2 % zit dan kan geen uitspraak gedaan worden (grijze zone) en als de expansie meer dan 0,2 % bedraagt dan is er onvoldoende weerstand tegen ASR.

Voor iedere mengeling, zie Deel 3.2.1.1, werden twee kubussen gemaakt met zijde 200 mm. Uit deze kubussen werden op het gewenste tijdstip zes kernen geboord met diameter 50 mm en hoogte 150 mm. In dit werk werd het beton beproefd op zeer jonge leeftijd, meer bepaald na 1 week, en op latere leeftijd, namelijk na 19 weken.

Bij uitvoering van deze methode werden de proefstukken op een statief in de Oberholsterbak geplaatst, zie Figuur 3.1. Naast de proefstukken werd een getuigeproefstuk in de bak geplaatst. Deze diende om expansie ten gevolge van externe factoren zoals temperatuur uit te sluiten. Op de kernen werden metalen stukjes geplaatst die doorheen de afdekplaat zaten, zie Figuur 3.1. Deze dienden om de kernen met de meetklokjes te verbinden.



Figuur 3.1: Kernen op statief in Oberholsterbak (links) + Afdekplaat (rechts)



Figuur 3.2: Oberholsterproef - Meetklokjes

Nadat de meetklokjes aangebracht waren (zie Figuur 3.2), werd de bak gevuld met water. Met behulp van een kookplaat werd het water verwarmd worden tot 80 °C. De kookplaat werd geregeld door middel van aan thermostaat. Na 24 h werd het water uit de Oberholsterbak gelaten en vervangen door een 1M NaOH-oplossing. Dit komt overeen met 1080 g NaOH opgelost in 27 liter water (het volume van de bak). Vervolgens werd de oplossing verwarmd

tot 80 °C. Één uur nadat de temperatuur van de oplossing 80 °C bereikt had, werden de waarden op de meetklokjes afgelezen. Deze waarden werden gebruikt als startwaarden om de expansie te bepalen. De meetklokjes werden dagelijks afgelezen waardoor de expansie dag per dag bepaald kon worden. De proef duurt volgens de beschrijving 14 dagen. In voorliggend werk werd de proef verlengd tot minstens 20 dagen. Na 20 dagen werden de expansies vergeleken met de 0,1 %- en 0,2 %-grenswaarden. Om het volume in de bak constant te houden werd gebruik gemaakt van een systeem met een vlotter en een pomp. Daar de pomp steeds genoeg water moest kunnen oppompen, moest de watervoorraad dagelijks aangevuld worden.



Figuur 3.3: Oberholsterproef - Opstelling

#### **3.2.2.2.** Slijpplaatjes

De proefstukken die op 19 weken ouderdom onderworpen werden aan de Oberholsterproef werden eveneens gebruikt om slijpplaatjes op basis van fluorescent epoxy te maken. Zo kan nagegaan worden hoeveel alkali-silica gel gevormd werd.

Betonplaatjes vanuit het midden van de kernen, met afmetingen 50 x 30 x 20 mm, werden op een glasplaatje gekleefd (30 x 50 mm) en afgezaagd tot op een dikte van 10 mm. Na een behandeling in alcohol en droging werden de proefstukken vacuüm getrokken. Onder vacuüm werden de proefstukken geïmpregneerd met fluorescente epoxy. Ze werden daarna op het draagglas gekleefd en verder verzaagd tot een dikte van 0,3 mm. Vervolgens werd het afgeslepen tot 0,02 mm en de nog vrije zijde werd bedekt met een dekglas. Uiteindelijk kon het proefstuk microscopisch onderzocht worden op basis van optische microscopie. Beelden werden gemaakt met een Canon S50 fototoestel en het softwarepakket ZoomBrowser.

## 3.3. Resultaten

De Oberholsterproef werd uitgevoerd met betonnen cilinders, aangemaakt zoals beschreven in Deel 3.2.2.1, op zeer jonge leeftijd en op oudere leeftijd, respectievelijk 1 week ouderdom en 19 weken ouderdom.

## 3.3.1. Beproefd op 1 week ouderdom

Het expansieverloop van de betonproefstukken, die één week oud waren bij aanvang van de proef, wordt weergegeven in Figuur 3.4. De expansies voor  $SO_{(glas)}$  en  $S5O_{(glas)}$  werden opgemeten tot 19 dagen na aanvang van de proef. Deze voor  $S7O_{(glas)}$  en  $S85_{(glas)}$  tot 20 dagen.



Figuur 3.4: Oberholsterproef - 1 week

Van elke mengeling werden 6 proefstukken opgemeten behalve bij  $S70_{(glas)}$  waar slechts 5 cilinders ter beschikking waren. Zowel bij  $S0_{(glas)}$ ,  $S50_{(glas)}$ ,  $S70_{(glas)}$  als  $S85_{(glas)}$  werd telkens 1 proefstuk met sterk afwijkende waarden vastgesteld in vergelijking met de resultaten van gelijkaardige proefstukken, zie Tabel 3.5. Deze waarden zijn na 19 of 20 dagen respectievelijk 2,7; 3,8; 34,6 en 3,1 keer groter dan de maximale expansie van de overige metingen. Bijgevolg zijn de afwijkende waarden buiten beschouwing gelaten bij de berekeningen.

	SO <sub>(glas)</sub>	$S50_{(glas)}$	$S70_{(glas)}$	$\mathbf{S85}_{(\mathbf{glas})}$
Uitzetting per	0,188	0,238*	$0,757^{*}$	0,141
	0,132	-0,013	0,016	0,114
dagen (S0 en s50)	0,217	0,003	0,019	$0,828^*$
of na 20 dagen	0,173	0,063	0,019	-0,025
(870 en 885) [%]	0,138	-0,069	0,022	0,269
	$0,594^{*}$	0,047	-	-0,147
Gemiddelde [%]	$0,\!169\pm0,\!016$	$0,006 \pm 0,023$	$0,\!019\pm0,\!001$	$\textbf{0,070} \pm \textbf{0,072}$

Tabel 3.5: Oberholsterproef - 1 week ouderdom

\* weggelaten waarden in de berekeningen

In Figuur 3.4 en Tabel 3.5 wordt naast de gemiddelden enkel de standaardfout op het gemiddelde na 19 of 20 dagen weergegeven. Daarnaast is in Figuur 3.4 ook de 0,1 %-grens aangeduid, zoals in Deel 3.1 aangehaald is dit de grens om granulaten als niet-reactief te beschouwen die hier gebruikt wordt om de invloed van hoogovenslakbeton op de weerstand tegen ASR na te gaan. Indien de waarden lager zijn mag ervan uitgegaan worden dat het proefstuk voldoende weerstandbeidend is. Uit de resultaten blijkt dat de gemiddelde waarden, op het einde van de proef, van alle mengelingen met hoogovenslak ter gedeeltelijke vervanging van cement lager zijn dan deze grens, terwijl de expansie na 19 dagen van beton op basis van 100 % traditioneel Portlandcement een waarde aanneemt die groter is dan 0,1 %. Om een duidelijker beeld te vormen van deze verschillen, werden t-testen uitgevoerd met vooropgestelde waarde (2-zijdig, significantieniveau = 0,05). Om de resultaten onderling te vergelijken werd eerst een Levene's test (significantieniveau = 0,01) uitgevoerd om de homogeniteit van de varianties te onderzoeken. Aangezien de varianties niet homogeen zijn kon een one-way ANOVA met Dunnett's T3 Post Hoc test uitgevoerd worden. Uit de statistische testen blijkt dat de expansie op het einde van de Oberholsterproef voor  $SO_{(glas)}$ significant groter is dan de grenswaarde. Dit wijst erop dat het referentiebeton op basis van 100 % Portlandcement met 50 % grof, wit glas ter vervanging van de granulaten niet voldoende weerstand biedt tegen ASR. Anderzijds blijft de expansie wel lager dan 0,2 % waardoor het in de grijze zone terecht komt. Aldus kan geen sluitende conclusie getrokken worden. Voor  $S50_{(glas)}$  en  $S70_{(glas)}$  is de expansie na 19 dagen wel significant lager dan 0,1 % en treedt ook een significant verschil op met de expansiegrootte bij de referentiemengeling. Toevoeging van 50 % en 70 % hoogovenslak ter vervanging van cement zorgt dus voor een aanzienlijke verbetering van de weerstand tegen ASR en mag als voldoende weerstandbiedend beschouwd worden, zelfs in de aanwezigheid van grof, wit glas. Wat de

 $S85_{(glas)}$ -mengeling betreft verschilt de expansie na 19 dagen niet significant van 0,1%. De expansie van  $S85_{(glas)}$  na 19 dagen is ook niet significant lager is dan deze van  $S0_{(glas)}$ . Voor beton met 85 % hoogovenslak ter vervanging van cement dat 1 week oud was bij aanvang van de test, kan geen uitspraak gedaan worden omtrent het al dan niet optimaal verbeten van de weerstand tegen alkali-silica reactie.

#### 3.3.2. Beproefd op 19 weken ouderdom

Het expansieverloop van de betonproefstukken, die negentien weken oud waren bij aanvang van de proef, wordt weergegeven in Figuur 3.5. De waarden voor  $SO_{(glas)}$  en  $SSO_{(glas)}$  werden opgemeten tot 25 dagen na aanvang van de proef. Deze voor  $S7O_{(glas)}$  en  $S85_{(glas)}$  werden opgemeten tot 24 dagen. De grenswaarden worden vergeleken met de expanies na 20 dagen, in overeenstemming met de metingen van het beton op 1 week ouderdom. De proef werd uitgevoerd met 6 cilinders per betonmengeling. Bij  $S5O_{(glas)}$  werden na 25 dagen twee afwijkende waarden waargenomen voor 2 proefstukken die 1,5 en 2,1 keer groter waren dan de maximale waarde van de overige resultaten, zie Tabel 3.6. Bij  $S7O_{(glas)}$  werd één extreme waarde opgemerkt die 3,3 keer groter was dan de maximale waarde uit de overige resultaten, zie Tabel 3.6.

In Figuur 3.5 en Tabel 3.6 wordt naast de gemiddelden enkel de standaardfout op het gemiddelde na 24 of 25 dagen weergegeven. Verder is in Figuur 3.5 zowel de 0,1 %-grenswaarde als de 0,2 %-grenswaarde aangeduid. Deze geven aan of de mengelingen al dan niet weerstandbiedend zijn tegen ASR of zich in de grijze zone bevinden.



Tabel 3.6: Oberholsterproef - 19 weken

	$S0_{(glas)}$	$\mathbf{S50}_{(glas)}$	$S70_{(glas)}$	$\mathbf{S85}_{(\mathbf{glas})}$
	0,611	0,391*	0,365*	0,167
Uitzetting per	0,636	0,019	0,003	0,193
proefstuk na 25 dagen (S0 en S50)	0,315	0,078	0,009	0,123
of na 24 dagen	0,325	0,187	0,044	0,156
(870 en 885) [%]	0,350	0,269*	0,109	0,012
	0,525	-0,012	-0,022	0,006
Gemiddelde [%]	$0,\!460 \pm 0,\!060$	$0,068 \pm 0,044$	$0,\!029\pm0,\!023$	$0,\!110\pm0,\!033$

\* weggelaten waarden in de berekeningen

De cilinders op basis van 100 % traditioneel Portlandcementbeton met 50 % grof wit glas vertonen na 25 dagen een gemiddelde expansie die de 0,2%-grens overschrijdt, meer bepaald 0,460 %. Dit is 2,7 keer groter dan de expansie op jonge leeftijd. Ook na 20 dagen wordt deze grens overschreden waardoor aangenomen wordt dat dit beton geen weerstand biedt tegen ASR. Bij beton met hoogovenslakmengelingen zijn de verhoudingen met de expansies op jonge leeftijd minder uitgesproken. Uit de resultaten blijkt dat de gemiddelde waarden, op het einde van de proef, voor S50<sub>(glas)</sub> en S70<sub>(glas)</sub> lager zijn dan 0,1 %, terwijl de expansie van S85<sub>(glas)</sub> na 24 dagen een waarde aanneemt in de grijze zone. Dit geldt ook na 20 dagen. Toevoeging van hoogovenslak ter vervanging van cement verbetert de weerstand tegen ASR aanzienlijk. Verder valt op dat na 12 à 14 dagen de gemiddelde expansie bij S0-proefstukken

nagenoeg lineair toeneemt terwijl de expansie bij S50, S70 en S85 vanaf dat moment vrijwel constant blijft. Net zoals in Deel 3.3.1 werden t-testen met vooropgestelde waarde uitgevoerd (2-zijdig, significantieniveau = 0,05) om een duidelijker beeld te kunnen vormen van de verschillen tussen de opgemeten waarden en de grenzen. Om de resultaten onderling te vergelijken werd ook hier eerst een Levene's test (significantieniveau = 0,01) uitgevoerd om de homogeniteit van de varianties te onderzoeken. Aangezien de varianties niet homogeen zijn kan een one-way ANOVA met Dunnett's T3 Post Hoc test uitgevoerd worden. Uit deze statistische testen blijkt dat de expansie van S0<sub>(glas)</sub> na 20 en 25 dagen significant groter is dan 0,2%. Daaruit wordt besloten dat traditioneel beton op basis van 100 % Portlandcement en 50% grof, wit glas onvoldoende of geen weerstand biedt tegen ASR. Dit beton kan dus perfect dienst doen als referentie om de invloed van hoogovenslak na te gaan. De expansies van S50<sub>(glas)</sub>, S70<sub>(glas)</sub> en S85<sub>(glas)</sub> zijn allen significant lager zijn dan deze van S0<sub>(glas)</sub>, wat bevestigd dat toevoeging van hoogovenslak voor betere weerstand tegen alkali-silica reactie zorgt. De resultaten voor S50<sub>(glas)</sub> zijn niet significant lager dan de 0,1 %-grenswaarde, maar

zorgt. De resultaten voor  $SSO_{(glas)}$  zijn niet significant lager dan de 0,1 %-grenswaarde, maar de expansie van  $S7O_{(glas)}$  daarentegen is dit wel. Voor  $S5O_{(glas)}$  kan voorzichtig aangenomen worden dat het voldoende weerstandbiedend is terwijl er voor  $S7O_{(glas)}$  geen twijfel over bestaat. De expansie van  $S85_{(glas)}$  na 20 en 24 dagen is op zijn beurt niet significant verschillend van de 0,1 %-grenswaarde maar wel van de 0,2 %-grenswaarde waardoor het in de grijze zone terecht komt.

## **3.4.** Discussie

Op basis van de literatuur werd gekozen om 50 % grof, wit glas te gebruiken als reactief granulaat. [Van Lerberghe en Raedt, 2009] Uit de resultaten wordt duidelijk dat traditioneel Portlandcementbeton hierdoor, zowel op jonge leeftijd als op oudere leeftijd, onvoldoende weerstand biedt tegen ASR. Toevoeging van hoogovenslak ter vervanging van cement zorgt voor een aanzienlijke verbetering van deze weerstand. Proefstukken met slakgehaltes van 50 %, 70 % en 85 % vertonen een expansie die significant lager dan de expansie van beton met 100 % Portlandcement. Daarnaast zijn lengteveranderingen van de proefstukken met 50 % en 70 % hoogovenslak op zowel 1 week ouderdom als 19 weken ouderdom, significant lager dan 0,1 %. Beton met 85 % hoogovenslak ondergaat op beide leeftijden een expansie die niet significant verschilt van 0,1 %. Algemeen kan gesteld worden dat toevoeging van

stijgende gehaltes hoogovenslak ter vervanging van cement, tot en met 70 %, de weerstand tegen ASR doen toenemen. 85% hoogovenslak zorgt voor een verbetering van de weerstand tegen ASR in vergelijking met traditioneel beton maar niet in vergelijking met beton op basis van lagere slakgehaltes (50% en 70%). Deze conclusie wordt ook teruggevonden bij Higgins en McLellan [2009]. Daarnaast zijn er tal van onderzoekers zoals Thomas en Innis [1998], Rangaraju en Desai [2009] en Boukini et al. [2009] die zeggen dat de weerstand tegen ASR stijgt door hoogovenslak te gebruiken als vervanging van cement. In deze onderzoeken worden gehaltes van 25 %, 50 % of 65 % gebruikt. In ASTM C 989-6 [2006] wordt aangegeven dat hoogovenslakgehaltes van meer dan 40 % altijd voldoende weerstand bieden tegen ASR. Op basis van voorliggend werk zou deze aanname als volgt genuanceert kunnen worden: beton met hoogovenslakgehaltes van meer dan 40 % en maximum 70 % is altijd voldoende weerstandbiedend. Een verklaring voor de verbeterde weerstand tegen ASR is de verminderde permeabiliteit en de verhoogde diffusieweerstand waardoor de alkali-ionen minder makkelijk het beton kunnen binnendringen. Shehata en Thomas [2010] zeggen dat het effect van het alkali-gehalte van Portlandcement op de aantasting ten gevolg van ASR gereduceerd wordt omdat hoogovenslak minder oplosbare alkaliën bevat.

#### Invloed van de ouderdom

Wanneer de expansies op jonge leeftijd vergeleken worden met deze op oudere leeftijd, blijkt dat deze op jonge leeftijd minder uitgesproken zijn. Dit is mogelijk te verklaren door de poriënstructuur. Op jonge leeftijd is deze nog niet volledig ontwikkeld waardoor meer poriën aanwezig zijn die de expansie van de ASR-gel kunnen opvangen. De ASR-expansies worden dus inwendig opgevangen. Op latere leeftijd is er een dichtere poriënstructuur ten gevolge van de hydratatie. Hierdoor zal de ASR-gel meer druk ontwikkelen en grotere expansies veroorzaken dan op jonge leeftijd.

#### Visueel onderzoek

Na de Oberholsterproef werden de proefstukken visueel onderzocht. Zoals te zien op Figuur 3.6 vertonen bepaalde cilinders, die 1 week oud waren bij aanvang van de proef scheuren en afbrokkeling. Ook aantasting van de granulaten werd duidelijk vastgesteld. Deze schadevormen treden voornamelijk op bij proefstukken op basis van  $SO_{(glas)}$ . Evengoed werd het waargenomen bij  $S5O_{(glas)}$ ,  $S7O_{(glas)}$  en  $S85_{(glas)}$  maar weliswaar in minder extreme mate en minder frequent.



Figuur 3.6: Oberholsterproef - Scheuren en afbrokkeling bij S0<sub>(glas)</sub> (links) en bij S85<sub>(glas)</sub> (rechts) dat 1 week oud was bij aanvang van de proef

Uit het visueel onderzoek van de proefstukken die beproefd werden op een ouderdom van 19 weken, blijkt dat wederom scheuren, afbrokkeling en aantasting van de granulaten optreedt ten gevolge van de aantasting door ASR. Bij de betonnen cilinders op basis van de referentiemengeling met 0 % hoogovenslak werd de meeste schade vastgesteld. Zowat elk proefstuk vertoonde scheuren. Daarnaast zijn het voornamelijk de proefstukken van de mengeling S85<sub>(glas)</sub> gevolgd door S50 <sub>(glas)</sub> die enige vorm van schade vertonen. Bij de betonnen cilinders die 70 % hoogovenslak bevatten trad nagenoeg geen scheurvorming of afbrokkeling op. Uit het onderzoek kwam wel naar voor dat de proefstukken met 70 % hoogovenslak ter vervanging van cement een geribbeld oppervlak vertonen zie Figuur 3.7. Dit kan wijzen op vervorming in zijdelingse richting, een aspect dat niet in rekening gebracht wordt bij de Oberholsterproef.



Figuur 3.7: Oberholsterproef - Geribbeld S70<sub>(glas)</sub>-proefstuk dat 19 weken oud was bij aanvang van de proef

#### Slijpplaatjes

Ter verduidelijking van de aantasting door ASR en de invloed van hoogovenslak werden slijpplaatjes gemaakt, zie Figuur 3.8. Hiervoor werden de cilinders die beproefd werden op 19 weken ouderdom gebruikt.



Figuur 3.8: Slijpplaatjes - overzicht

Zoals te zien is uiterst rechts op Figuur 3.8 is er tijdens het voorbereidend werk reeds een deel van het slijpplaatje van  $S85_{(glas)}$  afgebrokkeld. Op het eerste zicht valt meteen op dat bij  $S0_{(glas)}$  het meeste gele vlekken voorkomen. Dit wijst op poriën in de structuur. Het fluoresent epoxy kleurt namelijk de openingen in het beton geel. Gedetailleerde, microscopische beelden met doorvallend licht tonen het al dan niet voorkomen van ASR-gel.

Figuur 3.9 toont een scheur in het glas van het referentiebeton met 0 % hoogovenslak. De scheur is niet volledig opgevuld met fluoresent epoxy wat erop wijst dat een ander materiaal aanwezig is. Dit is de alkali-silica gel die gevormd werd tijdens de Oberholsterproef. De aanwezigheid van het epoxy is te wijten aan ASR-gel die gekrompen en gescheurd is bij het afkoelen van de proefstukken wanneer ze uit de proefopstelling gehaald werden. De scheuren in de ASR-gel zijn duidelijk zichtbaar en staan voornamelijk loodrecht op de richting van de scheur.



Figuur 3.9: Slijpplaatjes - Alkali-silica gel in SO(glas) (vergroting 10x)

Zoals beschreven door Vegt [2003] is de aantasting van het glas is waarschijnlijk een gevolg van de lichte beschadigingen die bij het breken van het glas, het wassen van het glas en het mengen van de mortel ontstaan zijn. Op de plaats van deze lichte beschadigingen ontstaat een breuk waar de alkaliën in kunnen doordringen. Het granulaat wordt hierdoor aangetast en de scheur zal gevuld worden met ASR-gel.

Ook in Figuur 3.10 (links) wordt een scheur ten gevolge van de expansie van de alkali-silica gel in S0-beton weergegeven. Ditmaal is er ook een opening tussen het glas en de cementmatrix merkbaar.



Figuur 3.10: Slijplaatjes - Alkali-silica gel in SO<sub>(glas</sub>) met opening naast glas + scheur in glas (vergroting 10x)

Rechts in Figuur 3.10 is een grotere scheur in een glasdeel waar te nemen. Hier wordt geen alkali-silica gel gevonden. Dit neemt niet weg dat de aanleiding van de scheur de expansie ten gevolge van alkali-silica reactie is. In de cementmatrix wordt de gel niet waargenomen, wel worden lichte scheuren vastgesteld. Deze scheuren zullen volgens Vegt [2003] na verloop van tijd ook opgevuld worden met ASR-gel en voor bijkomende expansie en aantasting zorgen.

Onderzoek van beton met 50 % hoogovenslak leert dat geen gel of scheuren gevormd worden in de kern van het proefstuk maar enkel in het glas langs de rand van de cilinders, zie Figuur 3.11. De hoeveelheid gel is minder dan bij het traditioneel Portlandcementbeton.



Figuur 3.11: Slijpplaatjes - Alkali-silica gel in glas aan de rand van een S50<sub>(glas)</sub>-kern (vergroting 10x) In het beton met 70 % hoogovenslak worden geen scheuren in het glas en in de cementmatrix vastgesteld in de kern van het proefstuk. Enkel langs de rand worden enkele scheuren en beperkte hoeveelheden alkali-silica gel aangetroffen. Het S85<sub>(glas)</sub>-beton vertoont wel scheuren in het beton en gelvorming naar het midden van het proefstuk toe, zie Figuur 3.12.



Figuur 3.12: Slijpplaatjes - Alkali-silica gel in glas + scheurvorming in de cementmatrix bij S85<sub>(glas)</sub>-beton (vergroting 10x)

De analyse op basis van de slijpplaatjes verifieert de resultaten die bekomen werden door de expansies op te meten. De gelvorming wordt geminimaliseerd bij beton met 50 % en 70 % hoogovenslak ter vervanging van cement. Indien gel gevormd wordt, is het in glas aan de rand van het proefstuk. Daardoor worden minder scheuren waargenomen in het glas en in het beton. Bij traditioneel Portlandcementbeton wordt alkali-silica gel verspreid in het proefstuk waargenomen. Beton op basis van 85% hoogovenslak vertoont de meeste scheuren in de cementmatrix maar niet de grootste expansie. Een verklaring hiervoor is waarschijnlijk het afbrokkelen van een deel van het beton op het slijpplaatje tijdens het voorbereidend werk, waardoor scheurtjes ontstaan zijn.

# 3.5. Conclusie

De weerstand van beton tegen alkali-silica reactie wordt aanzienlijk verbeterd door toevoeging van hoogovenslak ter gedeeltelijke vervanging van Portlandcement. Stijgende gehaltes tot en met 70 % leiden tot een toenemende weerstand. Beton met een cementvervangingsgehalte van 85 % verbetert de weerstand in vergelijking met traditioneel beton met 100 % Portlandcement, maar niet in vergelijking met beton op basis van 70 % hoogovenslak. In tegenstelling tot 50 % en 70 % hoogovenslakbeton met grof wit glas mag 85 % hoogovenslakbeton eveneens met grof wit glas niet met volle zekerheid als voldoende weerstandbeidend beschouwd worden. Deze opvattingen gelden zowel voor beton op jonge leeftijd als voor beton op oudere leeftijd.

#### Verder onderzoek

- Aangezien de resultaten uit de literatuur en dit onderzoek overeenstemmen is het niet voor de hand liggende om hier nog veel bijkomende testen op uit te voeren. Wat misschien wel een mogelijkheid biedt, is het zoeken van een optimum slakgehalte. In de literatuur werden geen waarden groter dan 70 % gevonden maar de resultaten voor beton met 85 % hoogovenslak uit dit werk tonen aan dat de weerstand tegen ASR niet blijft toenemen met stijgende slakgehaltes.
- Nagaan of er zijdelingse expansie optreedt (zie geribbeld oppervlak bij S70 proefstukken) bij de Oberholsterproef en of deze een invloed heeft.

# Hoofdstuk 4 Weerstand tegen chloriden

## 4.1. Literatuurstudie

Weerstand tegen chloriden is een belangrijke duurzaamheidseigenschap bij gewapend beton. Chloriden dringen het beton binnen wanneer het in contact is met dooizouten, zeewater, brak water of chloridehoudende oplossingen en dragen bij tot corrosie van het wapeningsstaal. De indringing gebeurt voornamelijk via diffusie en capillaire opzuiging. Naast de ingedrongen chloriden zijn er ook de ingemengde chloriden. Deze kunnen aanwezig zijn in cement, hulpstoffen, granulaten, enz. [Apers, 2006] Hiervoor zijn reeds chloridegehalteklassen gedefinieerd die bepaalde grenswaarden opleggen. De klassen die voor de Belgische context van toepassing zijn, zijn opgegeven in NBN B 15-001 [2004].

### 4.1.1. Aantastingsmechanisme

#### 4.1.1.1. Corrosiemechanisme

Als staal in een waterige oplossing wordt geplaatst ontstaat er een evenwichtsreactie aan de anode:

$$Fe \Leftrightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$$
 (4.1)

Op de plaats waar de ijzeratomen als ijzerionen in oplossing gaan, komen negatieve elektronen vrij. Het staal blijft negatief geladen achter en zal positieve ijzerionen terug aantrekken. Zo ontstaat een dynamisch evenwicht tussen het aantal ijzerionen die neerslaan en degene die in oplossing zijn. In de evenwichtstoestand heeft het ijzer ten opzichte van de oplossing een bepaalde potentiaal, die men de elektrodepotentiaal noemt. Het evenwicht wordt verbroken bij aanwezigheid van opgeloste zuurstof in het waterig milieu. Aan de kathode wordt de zuurstof omgezet tot hydroxylionen en verbruikt hiervoor de elektronen die vrijkomen bij het in oplossing gaan van ijzer.

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \Leftrightarrow 4OH^-$$
(4.2)

Ook hier kan weer een evenwicht gevonden worden, waarbij het ijzer ten opzichte van de oplossing een bepaalde potentiaal heeft.

De hydroxylionen reageren met de ijzerionen tot ijzerhydroxide dat neerslaat en oxideert tot gehydrateerd  $Fe_2O_3$  (roest).

$$Fe^{2+} + 2OH \rightarrow Fe(OH)_2 \downarrow (neerslag van ijzerhydroxide)$$
 (4.3)

$$Fe(OH)_2 + O_2 \rightarrow 2(Fe_2O_3.xH_2O) + 2H_2O$$

$$(4.4)$$

Uit deze reacties blijkt dat voor corrosie zowel water als zuurstof nodig is.

De evenwichtspotentiaal voor de anodische reactie (6.1) is verschillend van die voor de kathodische reactie (6.2). De evenwichtspotentiaal van beide reacties samen ligt tussen die van de afzonderlijke reacties en wel zo dat de anodestroom  $i_a$  en de kathodestroom  $i_c$  aan elkaar gelijk zijn. Deze evenwichtspotentiaal wordt de corrosiepotentiaal  $E_m$  genoemd, zie Figuur 4.1. [Alonso, 2002; Apers, 2006; Lammertijn, 2007]



Figuur 4.1: Corrosiepotentiaal

Bron: Lammertijn, 2007; CUR Rapport 172, 1998

Ondanks het feit dat water en zuurstof steeds aanwezig zullen zijn rond de wapening, zal betonstaal normaal gezien niet corroderen. Er is immers - naast zuurstof en water - nog een derde voorwaarde nodig om corrosie van wapeningsstaal te verkrijgen: depassivering van het staal. Het poriënwater dat het staal omgeeft, heeft een hoge pH ten gevolge van de  $OH^-$ -ionen die afkomstig zijn van Ca(OH)<sub>2</sub>, gevormd bij de hydratatie van Portlandcement. Deze Ca(OH)<sub>2</sub> is goed oplosbaar in water:

$$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{2+}(aq) + 2OH^-(aq)$$
 (4.5)

Door de aanwezigheid van de hydroxylionen zal de pH van het poriënwater stijgen. Hierdoor zal het gevormde ijzerhydroxide ( $Fe(OH)_2$ ) vast neerslaan op het staal en er een beschermende laag vormen: de passiveringslaag. Deze laag bemoeilijkt het in oplossing gaan van het ijzer. Na oxidatie zal de passiveringslaag uiteindelijk uit ijzeroxide of roest bestaan. Het staal is gepassiveerd indien de pH van het poriënwater gelegen is tussen ongeveer 9 en 14. Indien een lagere pH aanwezig is, dan is de beschermingslaag poreus en doorlatend en wordt het corrosieproces niet verhinderd. [Lammertijn, 2007]

Dat wapeningsstaal ondanks deze passiveringslaag toch kan corroderen, heeft te maken met externe invloeden die de samenstelling van het poriënwater gaan veranderen en zo de passiveringslaag gaan aantasten. Er zijn 2 mogelijke oorzaken [Apers, 2006; Lammertijn, 2007]:

- Door carbonatatie geïnitieerde corrosie
- Door chloriden geïnitieerde corrosie

De tijd nodig om de wapening te depassiveren wordt de initiatiefase genoemd. De corrosie- of propagatiefase is de tijd die daarna nodig is om het corrosieproces te laten verlopen tot een onaanvaardbare corrosiegraad, zie Figuur 4.2 (bovenste deel). De corrosiesnelheid bij chloridegeïnitieerde corrosie kan oplopen tot 5 mm/jaar. Het opdelen van het corrosieproces in een initiatiefase en een propagatiefase is belangrijk aangezien de factoren die de snelheid van de eerste fase bepalen verschillend zijn van de factoren die de snelheid van de tweede fase bepalen. [Apers, 2006; Lammertijn, 2007]



Figuur 4.2: Definities voor kritiek chloridegehalte

Bron: Angst et al. [2009]

#### 4.1.1.2. Door chloriden geïnitieerde corrosie

Zoals uit het werk van Tang [1996], Audenaert [2006] en Shi [2007] blijkt, zijn er verschillende manieren waarop chloriden het beton kunnen binnendringen: diffusie indien het

beton verzadigd is, elektrische migratie, onder invloed van een hydrostatische gradiënt, capillaire opzuiging als het betonoppervlak uitgedroogd is of thermische migratie.

Indien er bijvoorbeeld natriumchloride in het poriënwater rond de wapening aanwezig is, dan verandert de stroomkring zoals besproken in Deel 4.1.1.1. De natriumionen neutraliseren de vrijkomende hydroxylionen aan de kathode en de ijzerionen die oplossen aan de anode reageren met de chloorionen tot ijzerchloride. Ijzerchloride is goed oplosbaar en oxideert tot roest, zie Figuur 4.3. [Apers, 2006; Lammertijn, 2007]

$$\operatorname{Fe}^{++} + 2\operatorname{Cl}^{-} \rightarrow \operatorname{FeCl}_2$$
 (4.6)

$$FeCl_2 + 2H_2O \rightarrow 2HCl + Fe(OH)_2$$
(4.7)

$$Fe(OH)_2 + O_2 \rightarrow 2(Fe_2O_3.xH_2O) + 2H_2O$$

$$(4.8)$$



Figuur 4.3: Corrosieproces in aanwezigheid van chloride

Bron [Apers, 2006; Lammertijn, 2007; CUR Rapport 172, 1998]

Door de vorming van een macrocel (anode en kathode ver uit elkaar) zullen op sommige plaatsen enkel de anodereacties plaatsgrijpen. Daar zullen dan enkel de ijzerionen in oplossing gaan. Dit heeft voor gevolg dat de wapening plaatselijk gaat corroderen. Vermits de chloriden bij de reactie geregenereerd worden, neemt de chlorideconcentratie aan de anode toe. Het weggeroest ijzer laat een steeds dieper wordende put na. Dit verschijnsel is putcorrosie. Putcorrosie is uitermate gevaarlijk omdat zij lokaal optreedt met als effect een plaatselijke reductie van de wapeningssectie. [Apers, 2006]

Opdat chloride geïnitieerde corrosie zou kunnen plaatsgrijpen, moeten drie voorwaarden vervuld zijn. Ten eerste moet er voldoende zuurstof aanwezig zijn aan de kathode. Ten

tweede moet de stroomweerstand van de poriënstructuur gering zijn. Deze weerstand neemt af naarmate het vochtgehalte in de poriën hoger is en er meer doorgaande poriën zijn. En een derde voorwaarde houdt verband met de concentratie aan chloriden. Er moet namelijk een minimum hoeveelheid chloriden aanwezig zijn om de passiveringslaag aan te tasten. Deze grenswaarde noemt men het kritieke chloridegehalte, zie Figuur 4.2. Hiervoor bestaat echter nog geen eenduidige waarde. Niet het totale chloridegehalte is relevant, wel het gehalte vrije chloriden. De corrosie wordt immers enkel geïnitieerd door het vrije gedeelte en niet door de fractie die chemisch of fysisch gebonden is aan de cementhydraten of geabsorbeerd door de poriënwanden. In veel normen wordt echter nog steeds het totaal chloridegehalte beperkt. De moeilijkheid bestaat erin het gehalte vrije chloriden exact te bepalen. De verhouding van het gehalte vrije chloriden t.o.v. het totale chloridegehalte is geen constante, maar is afhankelijk van een aantal factoren, zie Deel 4.1.3.2. Bovendien raakt de bindingscapaciteit uitgeput vanaf een bepaald chloridegehalte waardoor elke toename in chloridegehalte eenzelfde toename in vrije chloriden veroorzaakt. [Castellote et al., 2001; Barberon et al., 2005; Apers, 2006; Lammertijn, 2007] Het kritiek chloridegehalte is volgens Alonso et al. [2002] afhankelijk van de ruwheid van het wapeningsstaal, de betoneigenschappen en de agressiviteit van de omgeving. Angst et al. [2009] voegen nog een aantal factoren aan dat lijstje toe zoals onder andere: type bindmiddel, interactie staal-beton, beschikbare hoeveelheid zuurstof ter hoogte van de wapening, temperatuur,... Men drukt het kritiek chloridegehalte ook dikwijls uit in drempelwaarden voor de verhouding van het vrij chloridegehalte tot de concentratie OH<sup>-</sup>-ionen (Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>). Hieruit volgt dat bij een daling van de pH, en dus een daling van de OH<sup>-</sup>-concentratie, het kritiek chloridegehalte sneller zal bereikt worden. Voor een overzicht van de reeds gepubliceerde drempelwaarden, alsook de manier waarop deze bekomen zijn, wordt verwezen naar het werk van Angst et al. [2009]. Uit dat literatuuronderzoek zijn minimum en maximum grenzen voor beton bepaald. Voor beton zijn geen kritieke gehaltes bepaald op basis van vrije chloriden, wel voor mortel maar daar wordt niet verder op ingegaan. Song et al. [2009] hebben literatuurgegevens omtrent hoogovenslakbeton gebundeld. De bevindingen van beiden worden weergegeven in Tabel 4.1 en zijn van toepassing voor externe chloridenaantasting.

	Totaal Cl <sup>-</sup> (m% bindmiddel)	Cl'/OH	
Angst et al.	0,40 - 2,50	3 - 20	
Song et al.	0,5 - 1,41	-	

Tabel 4.1: Kritieke chloridegehaltes

Bron: Angst et al. [2009] en song et al. [2009]
## 4.1.2. Capillaire opzuiging en diffusie

### 4.1.2.1. Principe en vergelijkingen

Meestal dringen de chloriden het beton binnen via capillaire opzuiging en diffusie. Verschillende proefmethodes baseren zich echter op de migratie onder invloed van een elektrisch veld om de weerstand tegen chloride-indringing te karakteriseren, omwille van de kortere testduur. Uit onderzoek is gebleken dat capillaire opzuiging zich beperkt tot de buitenste 15 à 20 mm van het beton. Van hieruit kunnen chloriden dan enkel via diffusie dieper het beton binnendringen. Capillaire opzuiging gebeurt vele malen sneller dan diffusie van chloride-ionen. [Lammertijn, 2007]

Capillaire opzuiging van chloriden ontstaat wanneer een niet verzadigd materiaal in aanraking komt met een chloridehoudende vloeistof. Wanneer capillaire opzuiging vereenvoudigd voorgesteld wordt aan de hand van een buisje, dan blijkt de stijghoogte omgekeerd evenredig te zijn met de straal van het capillair buisje. Voor beton kan men natuurlijk geen straal van de poriën definiëren, zodat eenvoudige standaardformules niet kunnen toegepast worden om de indringdiepte te bepalen. In beton is immers een grote verscheidenheid aan poriën aanwezig, waarbij elke poriëndiameter overeenstemt met een bepaalde stijghoogte die in evenwichtstoestand bereikt zal worden. Audenaert [2006] beschrijft de indringdiepte van chloriden onder invloed van capillaire opzuiging als volgt:

$$x_{cap} = S\sqrt{t} \tag{4.9}$$

Waarin x<sub>cap</sub> de indringdiepte (mm) voorstelt en S de capillaire opslorpingscoëfficiënt.

Diffusie van chloride-ionen treedt op bij verzadigd beton en wordt beschreven door de wetten van Fick. De eerste wet geldt voor een stationair regime, dat wil zeggen dat de chloridenconcentratie op elk punt in het proefstuk reeds in evenwicht is en bijgevolg niet meer wijzigt in de tijd [Lammertijn, 2007; Yuan, 2009]:

$$J = -D\frac{dc}{dx} \tag{4.10}$$

De tweede wet van Fick geldt voor niet-stationair regime, hier zal de concentratie wel nog veranderen met de tijd en wordt D constant verondersteld [Costa en Appleton, 1999; Yuan, 2009]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$
(4.11)

Hierin is J de flux (mol/m<sup>2</sup>s), D de diffusiecoëfficiënt (m<sup>2</sup>/s), x de afstand (m), t de tijd (s) en c de concentratie (mol/m<sup>3</sup>).

Deze vergelijkingen houden echter geen rekening met het feit dat Cl<sup>-</sup>ionen diffunderen doorheen de poriënkanalen van het beton en niet door een homogeen medium. Daarnaast zijn enkel de vrije chloriden van belang voor diffusie. Verder moet opgemerkt worden dat diffusie van de negatieve chloride-ionen niet kan plaatsvinden zonder diffusie van positieve ionen in de tegengestelde richting, waardoor een nieuw elektrisch veld wordt opgewekt dat de diffusie van Cl<sup>-</sup> tegenwerkt. [Lammertijn, 2007; Yuan, 2009]

Met de randvoorwaarden voor de concentratie  $c=c_0$  (x=0, t>0) en c=0 (x>0, t=0), wordt de klassieke errorfunctie-oplossing van de tweede wet van Fick bekomen [Costa en Appleton, 1999; Yuan, 2009]:

$$c(x,t) = c_0 \left[ 1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right]$$
(4.12)

Waarbij erf de errorfunctie voorstelt.

Wanneer een elektrisch veld aangelegd wordt, zullen de chloriden doorheen het beton migreren. De chloride-ionen verplaatsen zich snel naar de positieve elektrode toe. Naast migratie treedt nog steeds diffusie op, waardoor de wetten van Fick geldig zijn, weliswaar in gewijzigde vorm, ook wel de Nernst-Planck vergelijking genoemd [Andrade, 1993; Tang en Nilsson, 1992; Lammertijn, 2007; Nguyen et al., 2008; Yuan, 2009]:

$$J = -D\left(\frac{dc}{dx} - \frac{zFE}{RT}c\right)$$
(4.13)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} = D\left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{zFE}{RT}\frac{\partial c}{\partial x}\right)$$
(4.14)

$$c = \frac{c_0}{2} \left( e^{ax} \operatorname{erf} c \left( \frac{x + a.D.t}{2\sqrt{D.t}} \right) + \operatorname{erf} c \left( \frac{x - a.D.t}{2\sqrt{D.t}} \right) \right)$$
(4.15)

Hierin is R de universele gasconstante (8,314 J/(mol·K)), T de temperatuur (K), F de constante van Faraday (9,648 x 104 J/(V · mol)), z de valentie van het ion (-1 voor Cl<sup>-</sup>), E het elektrische veld (V/m), a = zFE/RT en erf c(x) = 1 - erf(x). In vergelijkingen 6.13 tot 6.15 wordt verondersteld dat D onafhankelijk is van de tijd. Om de tijdsafhankelijkheid van de diffusiecoëfficiënt te modelleren, gebruikt men in de literatuur steeds een machtsfunctie [Costa en Appleton, 1999]:

$$D(t) = D_1 \cdot t^{-m} (4.16)$$

Waarbij D(t) de diffusiecoëfficiënt op tijdstip t voorstelt,  $D_1$  de diffusiecoëfficiënt na 1 jaar, t het aantal jaar en m een empirisch bepaalde coëfficiënt.

Castellote et al. [2001] hebben formules opgesteld om de diffusiecoëfficiënt voor traditioneel Portlandcementbeton, zoals deze bekomen zou worden via natuurlijke diffusie, te bepalen via migratietesten met een elektrisch veld. Hierbij wordt rekening gehouden met chlorideconcentratie, de equivalente tijd tussen migratie- en diffusietesten en een factor die rekening houdt met de testvoorwaarden.

### 4.1.2.2. Invloedsfactoren

Uit het bovenstaande volgt dat er 2 grote factoren zijn die de weerstand tegen chloride-indringing bepalen [Costa en Appleton, 1999; Lammertijn, 2007; Nguyen et al., 2008]:

- *Porositeit:* Hoe dichter de structuur van het beton, hoe hoger de capillaire stijghoogte maar hoe trager de capillaire opzuiging verloopt en hoe moeilijker de chloriden doorheen het beton kunnen diffunderen. Een lagere porositeit resulteert dus in een tragere maar daarom niet minder diepe chloride-indringing.
- *Bindingscapaciteit:* Hoe beter het beton in staat is om chloriden aan zich te binden, hoe kleiner het gehalte aan vrije chloriden is en dus hoe langer het zal duren vooraleer het kritiek chloridegehalte bereikt wordt.

Daarnaast zijn er volgende factoren die de capillaire opzuiging en diffusie beïnvloeden [Tang, 1996; Audenaert 2006 en Lammertijn, 2007]:

 Nabehandeling: De nabehandeling bepaalt de kwaliteit van de buitenste laag van het beton, en is dus van groot belang met betrekking tot capillaire opzuiging. Bij een buitenste schil die goed gehydrateerd is, zal het volume van de hydratatieproducten toegenomen zijn. Bijgevolg bezit deze een lage porositeit en zal de capillaire opzuiging minder groot zijn. Een dichtere structuur van het beton doet bovendien ook de diffusiecoëfficiënt dalen. Costa en Appleton [1999] alsook Song et al. [2009] wijzen er in hun onderzoek op dat de chloridediffusiecoëfficiënt een duidelijke reductie ondergaat met de tijd. Ze schrijven dit fenomeen toe aan volgende factoren: hydratatie van het cement waardoor de porositeit afneemt; binding van de chloriden aan hydratatieproducten; en vorming van een beschermend  $CaCO_3$ -laagje en Mg(OH)<sub>2</sub> (bruciet) aan het oppervlak in een marine omgeving.

- *Relatieve vochtigheid:* Hoe lager de vochtigheid in het beton is, hoe groter de capillaire opzuiging zal zijn. Voor de diffusie van chloride-ionen geldt het omgekeerde: aangezien Cl<sup>-</sup> doorheen het poriënwater diffundeert, geeft een lage relatieve vochtigheid aanleiding tot een lagere diffusiecoëfficiënt. Een constructie die onderhevig is aan wisselende vochtgehaltes, zal de grootste chloride-indringing vertonen. Wanneer het beton droog is, zullen chloriden samen met water via capillaire opzuiging het beton binnendringen. Bij de volgende droge periode zal het water verdampen, maar blijven de chloriden achter, wat tot zeer hoge chlorideconcentraties leidt.
- Aanwezigheid van scheuren: Scheuren geven aanleiding tot een grotere capillaire opslorping. Bovendien vormen ze een preferentiële stroombaan voor de diffusie van Cl<sup>-</sup>. Volgens Djerbi et al. [2008] neemt de diffusiecoëfficiënt toe als de scheurwijdte toeneemt. De ruwheid van de scheurwanden heeft echter geen invloed. Daarnaast is de chloridediffusie voor zeer wijde scheuren (≥ 205 µm) loodrecht op de scheurwand gelijk is aan deze aan het oppervlak.
- *Temperatuur:* De capillaire opslorping blijkt toe te nemen met stijgende temperatuur. Ook diffusie wordt door de temperatuur beïnvloed. Diffusie is immers een thermodynamische beweging, waardoor het proces sneller verloopt bij hogere temperaturen.
- *Oppervlakteconcentratie:* Hoe groter de chlorideconcentratie aan het oppervlak, hoe groter de concentratiegradiënt, en hoe sneller de chloride-ionen zullen diffunderen.

## 4.1.3. Binding van chloriden

## 4.1.3.1. **Principe**

Een deel van de chloriden die binnendringen in het beton binden zich aan de hydratatieproducten die aanwezig zijn. De binding van chloriden is belangrijk met het oog op duurzaamheid van gewapend beton om drie redenen: vermindering van het aantal vrije chloriden dus ook minder kans op corrosie, vertragen van de chloridepenetratie, vorming van calcium-chloroaluminaat-hydraat ( $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ ) waardoor een minder poreuze structuur ontstaat. Calcium-chloroaluminaat-hydraat wordt ook wel Friedel's zout genoemd. [Glasser et al., 2008] Enerzijds wordt gesproken van chemische binding, dit is het resultaat van een reactie tussen de chloride-ionen en C<sub>3</sub>A of C<sub>4</sub>AF, anderzijds spreekt men van fysische binding, dit is het gevolg van adsorptie van de chloride-ionen aan het C-S-H oppervlak. [Yuan, 2009]

Uit onderzoek van Tang en Nilsson [1992] blijkt dat de bindingssnelheid het chlorideprofiel doet veranderen van vorm. Zo vertoont het profiel bij hoge bindingssnelheid meer een blokvorm in vergelijking met een geleidelijker verlopend profiel bij lagere bindingssnelheden. De bindingssnelheid heeft geen invloed op de penetratiediepte van de chloriden. Uit onderzoek van Stanisch [2002] blijkt dat het niet makkelijk is om de bindingssnelheid te bepalen. Proeven met verschillende chlorideconcentraties van de oplossing en verschillende cementtypes vertonen een grote variatie.

#### 4.1.3.2. Invloedsfactoren

Factoren die de binding van chloriden beïnvloeden:

- Chlorideconcentratie: Algemeen wordt aangenomen dat, bij externe chloridenaantasting, een hogere chlorideconcentratie aanleiding geeft tot een hoger totaalgehalte aan chloriden in het poriënwater en bijgevolg ook tot een hoger gehalte gebonden chloriden. Het is echter wel zo dat elke cementsoort een maximum chloridebindingscapaciteit heeft en dat bovenstaande aanname enkel geldig is indien het gehalte gebonden chloriden deze limiet niet bereikt. Eens het maximum aantal gebonden chloriden bereikt zal enkel het gehalte vrije chloriden toenemen. [Delagrave et al., 1997; Izquierdo et al., 2004; Yuan, 2009] Uit literatuuronderzoek van Castellote et al. [2002] wordt geconcludeerd dat het gebruik van sterk geconcentreerd NaCl (≥1 M) gelijkaardige resultaten geeft, betreffende binding, bij zowel migratie- als diffusietesten.
- *Cementtype:* Een cementtype met een hoger gehalte Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> zal een hogere chemische bindingscapaciteit vertonen. Cementtypes die een fijnere poriënstructuur bezitten, zullen een grotere fysische bindingscapaciteit hebben. [Delagrave et al., 1997; Alonso, 2002; Izquierdo et al., 2004; Barberon et al., 2005; Lammertijn, 2007;

Angst et al., 2009] Yuan [2009] stelt als algemene regel dat het gehalte gebonden chloriden stijgt als het gehalte  $C_3A$  en  $C_4AF$  stijgt onder andere door de vorming van Friedel's zout:

$$C_{3}A + CaCl_{2} + 10H_{2}O \rightarrow C_{3}A.CaCl_{2}.10H_{2}O$$

$$(4.17)$$

Daarnaast blijkt dat een hoger  $C_3S$ - en  $C_2S$ -gehalte aanleiding geeft tot grotere fysische binding. Tot slot stelt Zibara [2001] dat SO<sub>3</sub> een negatieve invloed heeft op chloridebinding.

• *Vervangproducten van cement:* De invloed van de cementvervanging is te zien in Figuur 4.4, waaruit blijkt dat vervanging van cement door hoogovenslak een gunstige invloed heeft op de bindingscapaciteit. Naast hoogovenslak heeft ook vliegas en silica fume een positieve invloed op de bindingscapaciteit. [Tang, 1996; Zibara, 2001; Izquierdo et al., 2004; Angst et al., 2009]



Figuur 4.4: Bindingscapaciteit i.f.v. vrij chloridegehalte

Bron: Tang, 1996

- *Invloed kation:* Het percentage gebonden chloriden is afhankelijk van het soort zout dat gebruikt wordt om het beton in onder te dompelen. Zo blijkt dat er significant meer vrije en minder gebonden chloride-ionen aanwezig zijn bij gebruik van NaCl dan bij gebruik van CaCl<sub>2</sub>, HCl of MgCl<sub>2</sub>. [Delagrave et al., 1997; Lammertijn, 2007; Angst et al., 2009; Yuan, 2009]
- Alkaliniteit van het beton: Algemeen wordt aangenomen dat hoe hoger de OH<sup>-</sup>-concentratie, hoe lager het gehalte gebonden chloriden. In Audenaert [2006]

wordt op basis van literatuur vermeld dat door de daling van de pH bij carbonatatie van het beton, een gedeelte van de gebonden chloriden opnieuw vrijgesteld zal worden, waardoor de hoeveelheid vrije chloriden uiteindelijk zal stijgen en het gebonden gehalte daalt. [Tang, 1996; Sandberg, 1993; Alonso et al., 2002; Yuan, 2009]

- *Temperatuur:* De hoeveelheid gebonden chloriden daalt als de temperatuur stijgt. Zibara [2001] heeft echter ontdekt dat deze aanname geldig is bij lage chlorideconcentraties (0,1 mol/l) maar dat bij hoge concentraties (3,0 mol/l) een temperatuursverhoging leidt tot een grotere bindingscapaciteit. [Lammertijn, 2007; Yuan, 2009]
- *Elektrisch veld:* Het is mogelijk dat de binding beïnvloed wordt door een elektrisch veld te gebruiken om de chloridenindringing te versnellen. Ollivier et al. [1997] besluiten uit hun testen dat een voltage van 2-30 V geen invloed heeft op de binding. Algemeen wordt nochtans aangenomen dat een voltage vanaf 2 V wel invloed heeft. Castellote et al. [1999] concluderen dat een elektrisch veld geen invloed heeft bij oplossingen met concentraties lager dan 0,14 %. Bij hogere concentraties werden lagere gehaltes gebonden chloriden waargenomen dan bij natuurlijke diffusietesten. Uit het werk van Castellote et al. [2002] blijkt dat wanneer chloriden gedwongen worden om in het beton binnen te dringen, door het gebruik van een elektrisch veld, de binding verschillend is dan wanneer chloriden via natuurlijke diffusie het beton binnendringen.
- *Water-bindmiddel factor:* Een lagere W/B-factor geeft aanleiding tot minder binding van de chloriden. [Delagrave et al., 1997; Angst et al., 2009]
- Andere factoren: Aanwezigheid van sulfaationen, cementhoeveelheid, ouderdom,...

## 4.1.3.3. Bindingsisothermen

In de literatuur zijn drie "eenvoudige" isothermen terug te vinden die de relatie tussen het gehalte vrije chloriden en het gehalte gebonden chloriden beschrijven: lineair, Freundlich en Langmuir. Voor een uitgebreid overzicht alsook voor de experimentele bepaling van

isothermen wordt verwezen naar Yuan [2009]. Uit het werk van Izquierdo et al. [2004] blijkt dat de verhouding totale chloriden ten opzichte van vrije chloriden een factor 1 à 1,5 is.

#### Lineaire isotherm

$$c_b = Bc \tag{4.18}$$

Waarbij  $c_b$  de concentratie gebonden chloriden voorstelt, c de concentratie vrije chloriden en B een constante.

#### Freundlich isotherm

$$c_b = \alpha c^\beta \tag{4.19}$$

Waarbij  $\alpha$  en  $\beta$  empirische constanten voorstellen, c<sub>b</sub> de concentratie gebonden chloriden, c de concentratie vrije chloriden.

#### Langmuir isotherm

$$c_b = \frac{\alpha c}{(1+\beta c)} \tag{4.20}$$

Waarbij  $\alpha$  en  $\beta$  empirische constanten zijn die afhankelijk zijn van de samenstelling van het bindmiddel, c<sub>b</sub> de concentratie gebonden chloriden, c de concentratie vrije chloriden. Bij hoge concentraties nadert de richtingscoëfficiënt van de curves (c<sub>b</sub> ten opzichte van c) op basis van de laatste isotherm naar nul. De langmuir isotherm geeft enkel goede resultaten bij lage concentraties.

## 4.1.4. Testmethodes

Voor een uitgebreid overzicht van testmethodes voor chloridetransport in beton met bijhorende modellen en vergelijkingen wordt verwezen naar Yuan [2009]. Het betreft zowel migratie- als diffusietesten.

Als diffusietest voor niet-stationaire omstandigheden wordt NT Build 443 [1995] veelvuldig toegepast. Deze methode is gebaseerd op de tweede wet van Fick. De proefstukken worden verzadigd met Ca(OH)<sub>2</sub> waarna ze gecoat worden op één vlak na. De verzadiging zorgt ervoor

dat diffusie het enige transportmechanisme is. Het vrije vlak wordt blootgesteld aan een 2,8 mol/l NaCl-oplossing. Na minimum 35 dagen kunnen laagjes met de gewenste dikte afgeslepen worden om deze verder te beproeven, en het totale chloridegehalte te bepalen. De waarden voor de oppervlakteconcentratie  $c_s$  en niet-stationaire diffusiecoëfficiënt  $D_e$  worden bekomen door formule (4.21), een errorfunctie-oplossing van de tweede wet van Fick (forumle 4.12), aan te passen aan de bekomen chlorideconcentraties door een niet-lineaire regressie analyse in overeenstemming met de methode van de kleinste kwadraten, zie Figuur 4.5.



Figuur 4.5: Regressieanalyse

Bron: NT Build 443, 1995

Het eerste meetpunt van de chloridegehalten is weggelaten uit de regressieanalyse. De andere punten wegen elk even veel door.

$$c(x,t) = c_s - (c_s - c_i) \operatorname{erf}_{x}\left(\frac{x}{\sqrt{4D_{nssd} t}}\right)$$
(4.21)

Waarbij c(x,t) de totale chlorideconcentratie is op diepte x en tijdstip t in massa% beton,  $c_i$  de initiële totale chlorideconcentratie voor een bepaald laagje in massa% beton,  $c_s$  de totale chlorideconcentratie aan het oppervlak in massa% beton,  $D_{nssd}$  de niet-stationaire diffusiecoëfficiënt, x de afstand van het oppervlak tot het midden van de beschouwde laag in meter en t de blootstellingsduur in seconden.

Als gestandaardiseerde migratietest geldt NTBuild 492 [1999]. Hier wordt een uitwendig elektrisch veld gebruikt om de chloriden uit de oplossing in het proefstuk te laten migreren. Vooraleer de proefstukken aan deze migratie onderworpen worden dienen ze vacuümverzadigd te worden met Ca(OH)<sub>2</sub>. Aan de kathode bevindt zich een 10 % NaCloplossing en aan de anode een 0,3 N NaOH-oplossing. Na een bepaalde tijd die afhankelijk is van de opgelegde stroom en spanning kan de chloride-indringing bepaald worden aan de hand van een 0,1 M zilvernitraatspray. De proefstukken worden gespleten en op beide helften wordt zilvernitraat aangebracht. Daarna wordt op basis van kleuromslag de diepte tot waar de chloriden het beton zijn binnengedrongen waargenomen. Uit onderzoek van Otsuki et al. [1992] blijkt dat een AgNO<sub>3</sub>-concentratie van 0,1 N het meest geschikt is om deze test uit te voeren. Verder blijkt dat het totale gehalte chloriden ter hoogte van de kleuromslag ongeveer 0,15 % ten opzichte van het gewicht van het cement bedraagt. Op basis van de indingringsdiepte kan de niet-stationaire migratiecoëfficiënt D<sub>nssm</sub> begroot worden, aan de hand van formule 4.22 tot en met formule 4.24.

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t}$$
(4.22)

$$E = \frac{U-2}{L} \tag{4.23}$$

$$\alpha = 2\sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot erf^{-1}\left(1 - \frac{2c_d}{c_0}\right) \tag{4.24}$$

Waarbij z de absolute valentie van het ion voorstelt (z=1 voor chloriden), F is de constante van Faraday (9,648.10<sup>4</sup>J/(V.mol)), U de spanning, R de gasconstante (8,315 J/(K.mol)), T de gemiddelde temperatuur tijdens de proef in de NaOH-oplossing (K), L de dikte van de proefstukken (m),  $x_d$  de gemiddelde indringingsdiepte (m), t de duurtijd van de proef (s),  $c_d$  de chlorideconcentratie bij de indringingsdiepte (mol/l) en  $c_0$  de chlorideconcentratie van de NaCl- oplossing (2 N). Voor traditioneel Portlandcementbeton wordt voor  $c_d$  0,07 N aangenomen. Hierdoor wordt de formule als volgt vereenvoudigd:

$$erf^{-1}\left(1 - \frac{2 \times 0.07}{2}\right) = 1,28$$
(4.25)

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)L x_d}{U-2}} \right)$$
(4.26)

Waarbij  $D_{nssm}$  de niet-stationaire migratiecoëfficiënt voorstelt in  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s, U de absolute spanning (V), T de gemiddelde temperatuur van de anolytische oplossing (°C), L de dikte van het proefstuk (mm), x<sub>d</sub> de indringingsdiepte (mm) en t de duurtijd van de proef (h).

Om de chloridenconcetraties te begroten op de verschillende dieptes kan algemeen gesteld worden dat deze werkwijze opgedeeld kan worden in twee stappen: extractie en analyse. In het werk van Angst et al. wordt gesproken van poederanalyse. Het poeder wordt bekomen door laagjes met bepaalde dikte af te zagen en te beproeven/analyseren. Een mogelijke manier om de analyse door te voeren is via titraties. Er wordt een onderscheid gemaakte tussen extractie van de totale chloriden en de wateroplosbare chloriden. De totale chloriden worden geëxtraheerd aan de hand van een zuuroplossing, mogelijke extractie- en analysemethoden voor totale chloriden zijn beschreven door Castellote en Andrade [2001], Yuan [2009] en in RILEM TC 178-TMC [2002 (a)]. De wateroplosbare chloriden, waarvan het gehalte een goede indicatie geeft van het gehalte vrije chloriden, wordt uitgeloogd uit het betonpoeder door middel van een waterige oplossing. Een veel gebruikte extractiemethode wordt beschreven in de RILEM aanbeveling, RILEM TC 178-TMC [2002 (b)]. Bij methode beschreven door Yuan [2009], wordt enkel gebruik gemaakt van gedestilleerd water. Bij de bepaling van het gehalte wateroplosbare chloriden treedt een bijkomende moeilijkheid op, namelijk de verandering van het gehalte met de tijd en temperatuur.

Castellote et al. [2000 (b)] concluderen dat elke structuur een extractielimiet bezit. Dat wil zeggen dat het onmogelijk is om volledige uitloging van de chloriden te bekomen en dat altijd een deel niet meegerekend wordt bij de bepaling van het chloridegehalte. Ook op basis van een literatuuronderzoek concluderen Angst et al. [2009] dat de extractietechnieken niet in staat zijn om alle chloriden uit het poeder van het betonnen proefstuk te halen. Zij stellen dat slechts 70 % tot 90 % uitgeloogd wordt. In een volgend werk schrijven Castellote et al. [2001], op basis van literatuurgegevens en eigen onderzoek, dat uitlogingsmethoden op basis van water voor een overschatting van het gehalte aan vrije chloriden zorgen omdat een deel van de gebonden chloriden ontbonden wordt. Zij stellen voor om een basische oplossing te gebruiken. De resultaten komen overeen met deze bekomen via de 'Pore Pressing Technique'. Verder wordt het gebruik van een 0,3 M NaOH-oplossing van vooropgesteld.

Een totale methode om een chlorideprofiel op te stellen, is de AFREM test procedure voorgesteld door Chaussadent en Arliguie [1999]. Deze maakt gebruik van titraties om het chloridegehalte te bepalen. Vooreerst wordt het beton laag per laag vermalen tot poeder. Door een gepaste extractieprocedure, afhankelijk van het te bepalen chloridengehalte (totaal of wateroplosbaar), kan een oplossing bekomen worden waarmee een titratie uitgevoerd wordt. De titratie gebeurt met een 0,01 M zilvernitraatoplossing. Het volume zilvernitraat dat getitreerd wordt geeft een indicatie voor het chloridegehalte. Met behulp van een gepaste formule, die mede afhankelijk is van de toegepaste extractieprocedure, kan een concentratie

bekomen worden waarmee een duidelijk chlorideprofiel opgesteld wordt. De basisformule voor een zuivere chlorideoplossingen is de volgende:

$$Conc. Cl^{-} (mol/L) = \frac{Conc. AgNO 3 (mol/L)* Vol. AgNO (L)}{Vol. Cl^{-}oplossing (L)}$$
(6.27)

Om deze tot een concentratie om te vormen moet rekening gehouden worden met het moleculair gewicht van chloriden (35,45 g/mol), de verdunningsfactor en het gewicht van het gebruikte betonpoeder en de prorsiteit van het beton. Yuan [2009] maakt ook gebruik van een titratiemethode, meer bepaald van een potentiometrische titratie.

Sinds 2006 is er ook een methode op de markt waarbij de zuur- en wateroplosbare chlorideconcentraties bepaald worden: de RCT(W) ofwel Rapid Chloride Test (Water-soluble). Hierbij worden de desbetreffende chloriden uit het betonpoeder geëxtraheerd met behulp van extractievloeistoffen met onbekende samenstelling. Aan de hand van de calibratiecurve, bepaald daar de potentiaal van de vier referentieoplossingen op te meten met een elektrode, en de opgemeten potentialen van de extractievloeistoffen met het poeder erin, is het mogelijk om de chlorideconcentratie te bepalen. Door dit voor poeders van verschillende laagjes toe te passen, kan een chlorideprofiel opgesteld worden. [Germann Instruments, 2006]

Naast deze methodes wordt in verschillende onderzoeken gebruik gemaakt van X-stralendiffractie fluorescentie om het chloridegehalte te begroten.

## 4.1.5. Chloride-aantasting bij hoogovenslakbeton

Zoals reeds in Deel 4.1.3.2 en Figuur 4.4 aangetoond, heeft de vervanging van cement door hoogovenslak een positieve invloed op de weerstand tegen chloriden. Hoogovenslakbeton is in staat om meer chloriden te binden en bezit een fijnere poriënstructuur waardoor de indringingsdiepte van de vrije chloriden beperkt wordt en aldus de chloridegeïnitieerde corrosie minder makkelijk aanvangt in vergelijking met traditioneel Portlandcementbeton. Luo et al. [2003] concluderen dat vooral de chemische binding aanzienlijk toeneemt in aanwezigheid van hoogovenslak. Volgens hen is de belangrijkste oorzaak van de verhoogde bindingscapaciteit, de toename van de vorming van Friedel's zout. Dit draagt ook bij tot de verbetering van de poriënstructuur. Uit de resultaten blijkt dat een cementvervanging van 70 % het meest geschikt is met het oog op chloridenbinding. Daarnaast neemt de chloridediffusiecoëfficiënt van hoogovenslakbeton lagere waarden aan dan bij traditioneel beton, ook hier blijkt de daling het grootst te zijn bij de hoogste gehaltes hoogovenslak. [Rajamane et al., 2003; Angst et al., 2009; Song et al., 2009]

Ook uit onderzoek van Bleszynski et al. [2002] blijkt dat mengelingen met hoogovenslak een verbeterde weerstand bieden tegen chloride-indringing. In het onderzoek werd beroep gedaan op versnelde chloridetesten en bulkdiffusietesten (zoals NT Build 443) om mengelingen met 0 %, 35 % en 50 % hoogovenslak ter vervanging van Portlandcement te beproeven. Uit de resultaten op jonge leeftijd blijkt dat het beton met 35 % hoogovenslak de beste weerstand bezit. Deze heeft de laagste diffusiecoëfficiënt alsook de laagste oppervlakteconcentratie. Op langere termijn, vanaf 40 dagen beproeving, geeft de 50 % mengeling de beste resultaten. Leng et al. [2000] komen ook tot de vaststelling dat beton met slakgehaltes tot 50 % een lagere diffusiecoëfficiënt bezitten. De diffusiecoëfficiënt van hoogovenslakbeton neemt sneller af in de tijd dan bij Portlandcementbeton. Daarnaast vinden Pack et al. [2010] dat de oppervlakteconcentraties trager toenemen in de tijd dan bij Portlandcementbeton, zie Figuur 4.6. Bij de concentraties van de chloriden aan het oppervlak moet echter wel gelet worden op de veel hogere intitiële chlorideconcentratie bij hoogovenslakbeton.



Figuur 4.6: Verloop van diffusiecoëfficiënt en oppervlakteconcentratie in de tijd bij hoogovenslak beton en traditioneel beton

Bron: Pack et al. [2010]

Onderzoek van Yuan [2009] toont aan dat de chloridebinding bij hoogovenslakbeton niet toeneemt in vergelijking met de binding bij traditioneel beton op basis van 100 % Portlandcement. In zijn onderzoek gebruikt hij verschillende W/B-factoren omdat deze mogelijk een invloed hebben op de chloridebinding. Ook bij hoogovenslakbeton verandert de

bindingscapaciteit in functie van de verhouding W/B, maar steeds in die mate dat er minder binding optreedt dan bij traditioneel beton.

Meck en Sirivivatnanon [2003] hebben onderzocht wat de totale chlorideconcentraties zijn ter hoogte van de indringingsdiepte (kleuromslagdiepte), en dit zowel voor traditioneel beton als voor beton met een hoog volume hoogovenslak (niet nader bepaald). De proefstukken werden op één zijde na gecoat en ondergedompeld in een 3 % NaCl-oplossing voor respectievelijk 28 dagen en 91 dagen. De indringingsdiepte werd bepaald aan de hand van een 0,1 M AgNO<sub>3</sub>-spray en de wateroplosbare chloridenconcentraties aan de hand van een ionen chromatografische techniek. Uit de resultaten blijkt dat de indringingsdiepte afneemt bij hoogovenslakbeton maar de concentratie chloriden neemt grotere waarden aan, en dit zowel na 28 dagen als na 91 dagen. Meck en Sirivivatnanon vermelden wel dat de meetresultaten grote variaties vertonen. Samen met de resultaten van andere onderzoekers, zoals samengevat in Yuan [2009], worden de gemiddelde chlorideconcentraties ter hoogte van de kleuromslag gegeven in Tabel 4.2.

	Totale chloriden				Wateroplosbare chloriden			
_	m% beton m% bindmiddel		m% beton		m% bindmiddel			
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Meck [2003]	0,02	0,23	0,28	1,41	-			-
Otsuki [1992]	0,	08	0,	5	0,02	4	0,	15
Baroghel- Bouny	0,03	0,1	0,3	0,7	0,01	0,06	0,1	0,4
Yuan [2009]	0,028	0,207	0,189	1,397	0,019	0,173	0,12	0,1096

Tabel 4.2: Gemiddelde chlorideconcentraties ter hoogte van kleuromslag op basis van diffusietesten

Bron: Meck en Sirivivatnanon [2003], Otsuki et al. [1992] en Yuan [2009]

# 4.2. Materialen en methoden

## 4.2.1. Materialen

## 4.2.1.1. Betonsamenstelingen

Om de weerstand van beton tegen chloriden te bepalen werden wederom vier verschillende betonmengelingen vervaardigd. In Tabel 4.3 wordt de samenstelling van deze mengelingen weergegeven. Net zoals bij voorgaande mengelingen werd ook hier telkens een gehalte cementeerbaar materiaal van  $\pm$  350 kg/m<sup>3</sup> vooropgesteld. De W/B-factor bedroeg 0,5.

	<b>SO</b> (Cl)	<b>S50</b> <sub>(Cl)</sub>	<b>S70</b> <sub>(CI)</sub>	<b>S85</b> (Cl)
Zand 0/4 [kg/m <sup>3</sup> ]	791	788	787	785
Granulaat 2/8 [kg/m <sup>3</sup> ]	425	423	423	422
Granulaat 8/16 [kg/m <sup>3</sup> ]	618	616	615	614
CEM I 52,5 N [kg/m <sup>3</sup> ]	350	174	104	52
Water [kg/m <sup>3</sup> ]	175	174	174	174
Hoogovenslak [kg/m <sup>3</sup> ]	0	174	244	295
W/B-factor	0,5	0,5	0,5	0,5

Tabel 4.3: Betonsamenstellingen voor weerstand tegen chloriden

In Tabel 4.4 worden de parameters van het beton getoond die bepaald werden tijdens het aanmaken. Voor een beschrijving van de bepaling van deze parameters wordt verwezen naar Deel 1.5.1. De gemiddelde druksterktes op 28 dagen waren niet beschikbaar.

Mengeling	Slump [mm] (Klasse)	Luchtgehalte [ %]	Volumegewicht [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>S0 (Cl)</b>	33 (S1)	3,8	2331
<b>S50</b> (Cl)	23 (S1)	3,0	2350
<b>S70 (Cl)</b>	15 (S1)	2,7	2344
<b>S85</b> (Cl)	20 (S1)	2,6	2350

Tabel 4.4: Parameters die bekomen werden bij het aanmaken van het beton

## 4.2.2. Methoden

Om de weerstand tegen chloride-indringing te bepalen werd gebruik gemaakt van een migratietest en een diffusietest. Bij de migratietest worden de chloriden onder invloed van een elektrisch veld in het beton gedrongen. Bij de diffusietest verloopt de indringing op een natuurlijke manier, via diffusie. Na deze testen werd de indringingsdiepte gemeten en het chlorideprofiel opgesteld.

### 4.2.2.1. CTH

De migratietest die in voorliggend werk gebruikt werd, is de CTH-test. Deze staat beschreven in de norm NT Build 492 [1999]. De proefstukken die hiervoor gebruikt werden waren cilindervormig met een diameter van 100 mm en een hoogte van 50 mm.

Vooraleer de proefstukken aan de migratieprocedure onderworpen werden, dienden ze opgemeten en vacuümverzadigd te worden met een Ca(OH)<sub>2</sub>-oplossing met een concentratie van 4 g/l. Op die manier konden de chloride-ionen zich langs de met vloeistof gevulde poriën voort bewegen. De proefstukken werden hiervoor in een glazen kolf geplaatst die gedurende 3 h vacuüm gepompt werd. Na 3 h werd de Ca(OH)<sub>2</sub>-oplossing in de kolf gelaten, terwijl deze vacuüm bleef. De pomp bleef nog 1 h vacuüm zuigen waarna weer lucht in de kolf gelaten werd. De proefstukken bleven nog minstens 18 h in de oplossing zitten vooraleer deze aan de CTH-test te onderwerpen.

Voor de uiteindelijke CTH-test werden de proefstukken in goed aansluitende hulzen geplaatst zodat de chloride-ionen enkel door het proefstuk konden bewegen. Vervolgens werden de oplossingen aangemaakt: aan de kathode, in de bak, bevindt zich een 10 % NaCl-oplossing en aan de anode, in de hulzen, een 0,3 N NaOH-oplossing. De proefstukken werden zodanig in de opstelling geplaatste dat het bekistingsvlak blootgesteld wordt aan de Cl<sup>-</sup>-oplossing. Vervolgens werd een elektrisch veld aangelegd. De startspanning bedraagde ~ 30 Volt. Op basis van stroomintervallen (NT Build 492 [1999], Tabel 6) kon deze eventueel aangepast worden. Afhankelijk van de opgelegde spanning en stroom werd de duurtijd van de proef bepaald. Deze bedraagde in de meeste gevallen 24 h. In Figuur 4.7 wordt de proefopstelling van de CTH-test weergegeven.



Figuur 4.7: Schematische proefopstelling CTH + foto

Bron: NT Build 492 [1999]

## 4.2.2.2. Diffusietest

De diffusietest gebeurde grotendeels zoals beschreven in NT Build 433. Deze methode is gebaseerd op de tweede wet van Fick. De proefstukken die hier gebruikt werden zijn op dezelfde manier vervaardigd als deze voor de CTH-test.

Vooreerst werden de proefstukken verzadigd met  $Ca(OH)_2$ -oplossing tot constante massa bereikt werd (massaverschil  $\leq 0,1$  massa% na 24 h) waarna ze gecoat werden op één vlak na. Hierbij werd het bekistingsvlak steeds vrij gehouden. De verzadiging zorgde ervoor dat diffusie het enige transportmechanisme is. Na het coaten werden de proefstukken opnieuw verzadigd. Daarna werden ze in rubberen hulzen geplaatst die aangespannen werden met ringen, zodat de chloride-ionen enkel doorheen het proefstuk konden diffunderen (zie Figuur 4.8).



Figuur 4.8: Diffusietest - Gecoat proefstuk in huls

Het vrij oppervlak werd blootgesteld aan een NaCl-oplossing, waarbij  $165 \pm 1$  g NaCl vermengd werd met 1 liter water, bij 20 °C. Alle proefstukken werden in een bak geplaatst die

goed werd afgesloten, zie Figuur 4.9. In de bak werd een laag water voorzien om uitdroging van de onderkant te vermijden.

Figuur 4.9: Proefopstelling diffusietest

## 4.2.2.3. Indringingsdiepte

Aan de hand van de indringing van de chloriden kan de weerstand tegen chloriden bepaald worden. In dit werk werd de chlorideconcentratie ter hoogte van de kleuromslagdiepte (in de literatuur indringingsdiepte genoemd, maar dit klopt niet volledig) onderzocht. Ter bepaling van de kleuomslagdiepte werden de proefstukken afkomstig uit de CTH-test en de diffusietest gespleten. Vervolgens werd met behulp van een spray 0,1 mol/l zilvernitraatoplossing (AgNO<sub>3</sub>) aangebracht op beide helften. Op basis van kleuromslag kon de diepte tot waar een bepaalde concentratie van de vrije chloriden het beton zijn binnengedrongen waargenomen worden, zie Figuur 4.10. De concentratie voor traditoneel Portlandcement is vooropgesteld, namelijk 0,07 N, maar werd in voorliggend werk onderzocht voor hoogovenslakbeton.



Figuur 4.10: Indringingsdiepte a.d.h.v. AgNO<sub>3</sub>

De indringdiepte werd, met millimeterpapier, op minstens 7 punten gemeten (-30 tot +30 mm van het midden). Zo werd een gemiddelde waarde bekomen.

### 4.2.2.4. Bepaling chloridegehalte

Om een chlorideprofiel op te stellen werden de chlorideconcentraties op verschillende dieptes bepaald. In dit werk werd gebruik gemaakt van een profile grinder en een potentiometrisch titratietoestel (Metrohm MET 702 automatische titreerder). Optimaal zou zijn dat de kleuromslagdiepte, aan de hand van AgNO<sub>3</sub>-oplossing, en de chlorideconcentraties op verschillende dieptes bepaald werden voor hetzelfde proefstuk. Aangezien dit om praktische redenen niet mogelijk was, werden beiden bepaald op een verschillend proefstuk met dezelfde samenstelling, dezelfde ouderdom en afkomstig uit dezelfde CTH- of diffusietest.

#### Profile grinder

De eerste stap omvatte het bekomen van poeder vanop verschillende dieptes in het proefstuk. De laagdikte die hiervoor gebruikt werd, is afhankelijk van de vooropgestelde nauwkeurigheid van het chlorideprofiel. Om een goed chlorideprofiel op te stellen moet de concentratie op vijf tot zes verschillende dieptes, binnen de indringingsdiepte, onderzocht worden. In voorliggend werk werd poeder verzameld tot een diepte van 35 mm. Hierbij werden laagdiktes van 1 mm gebruikt voor lagen één tot en met vijf, laagdiktes van 2 mm voor laag vijf tot en met tien en laagdiktes van 4 mm voor laag elf tot en met 15. De uitvoering hiervan gebeurde met de profile grinder, zie Figuur 4.11. Deze was voorzien van een diamanten boorkop die mits de goede afstelling laagjes van 0,5 mm kon omzetten in poeder. Het proefstuk werd in de daarvoor voorziene ring geplaatst en vastgezet met klemmen, zie Figuur 4.11 (links). De profile grinder werd zodanig afgesteld dat de top van de boorkop het oppervlak van het proefstuk net raakt. Dan werd de boorkop 1 mm dieper geplaatst. Vervolgens kon het vermalen beginnen, dit duurde ongeveer 1 min. voor een laagje van 1 mm. Het poeder werd verzameld in een zakje aan de hand van een borstel en een lepel. De resten die achterbleven werden verwijderd met een kruimeldief om vermenging van de lagen te vermijden. In Figuur 4.11 (rechts) wordt een proefstuk voorgesteld na bewerking met de profile grinder.



Figuur 4.11: Opstelling profile grinder (links) + Bewerkt proefstuk (rechts)

### Extractie

De extractie van de chloriden uit het poeder gebeurde op basis van de methode beschreven door Yuan [2009]. Het afwegen gebeurde op een weegschaal met nauwkeurigheid 0,0001 g. De eerste drie stappen waren gelijk voor zowel de bepaling van het totale chloridegehalte als voor de bepaling van het wateroplosbare chloridegehalte:

- Zeef het poeder op een 160 µm zeef;
- Weeg ± 6 g poeder af (dit is om zeker meer dan 4,5 g poeder over te houden na het drogen);
- Droog het poeder op 80 °C gedurende 24 h.

De volgende stappen waren uiteenlopend. De procedure voor het bepalen van het totale chloridegehalte verloopt als volgt:

- Weeg 2 g van het gedroogde poeder af en giet het in een maatkolf;
- Voeg 35 ml gedestilleerd water en 5 ml salpeterzuur (0,3 mol/l HNO<sub>3</sub>) toe in de maatkolf;
- Schud de oplossing manueel gedurende ongeveer 1 minuut;
- Plaats de oplossing op een warme plaat en breng het net tot koken;
- Laat de oplossing afkoelen en giet het over een filterpapier in een andere maatkolf;

- Spoel de maatkolf van de oplossing met gedestilleerd water en giet dit ook over het filterpapier;
- Vul de totale oplossing bij tot 100 ml;
- Pipetteer 10 ml van deze oplossing voor analyse.

De procedure voor het bepalen van het wateroplosbare chloridegehalte verloopt als volgt:

- Weeg 2,5 g van het gedroogde poeder af en doe het in een plastiek potje;
- Voeg 10 ml gedestilleerd water toe;
- Sluit het potje goed af en schud de oplossing manueel gedurende ongeveer 2 minuten;
- Laat de oplossing 24 h rusten bij 20 °C;
- Schud opnieuw en giet de oplossing over een filterpapier in een ander potje/maatkolf;
- Pipetteer 1 ml van deze oplossing voor analyse.

### Analyse

Voor de analyse van de chlorideconcentraties werd gebruik gemaakt van het Metrohm MET 702 automatisch titreertoestel, zie Figuur 4.12. Hiermee kon een potentiometrische titratie uitgevoerd worden.



Figuur 4.12: Metrohm MET 702

Als titratievloeistof werd een 0,01 mol/l AgNO<sub>3</sub>-oplossing gebruikt. Door middel van een nauwkeurig pompsysteem, met reservoir van 20 ml, werd het zilvernitraat in de analyseoplossing gebracht, die zich op een magnetische roerder bevindt. Voor de analyseoplossing werd steeds uitgegaan van een totaal volume van 60 ml waarvan 40 ml salpeterzuur (0,3 mol/l HNO<sub>3</sub>). De resterende 20 ml bevatte het gepipetteerde volume van de extractieoplossing (10 ml voor totaal chloridegehalte en 1 ml voor wateroplosbaar chloridegehalte) of een bepaald volume kalibratievloeistof (in dit geval 0,01 mol/l NaCl), aangevuld met gedestilleerd water. Een elektrode van het type 'Ag/0..70 °C KNO<sub>3</sub> sat.' meette de potentiaal van de oplossing. Op basis van de mV-ml curve kon de chlorideconcentratie van de oplossing bepaald worden.

De werkwijze verloopt als volgt:

• Kalibratie van het toestel met een analyseoplossing zoals hiervoor beschreven, met 5 ml 0,01 mol/l NaCl. Het buigpunt van de mV-ml curve wordt geschat met behulp van volgende formule (4.28):

Conc. AgNO<sub>3</sub> (mol/l) \* Vol. AgNO<sub>3</sub> (ml) = Conc. NaCl (mol/l) \* Vol. NaCl (ml)

- Uitvoering van een manuele titratie waarbij de potentiaal per 0,5 ml AgNO<sub>3</sub> afgelezen wordt tot 0,5 ml voor het geschatte buigpunt van de mV-ml curve, in dit geval tot 4,5 ml. Vanaf dan gebeurt de dosering per 0,1 ml tot in totaal 5,5 ml toegevoegd is. Vervolgens wordt de potentiaal nog afgelezen voor de volgende 2 ml toegevoegde AgNO<sub>3</sub>. Het exacte buigpunt van de mV-ml curve (zie Figuur 4.13) kan nu bepaald worden.
- De bekomen potentiaal wordt ingevoerd in het titratietoestel om een automatische titratie (endpoint titratie) uit te voeren. De titratie eindigt wanneer de opgemeten potentiaal stabiel wordt in de buurt van de ingegeven waarde. In voorliggend werk werd gekozen om dit via het tijdscriterium te doen, dat wil zeggen dat de potentiaal als stabiel aanzien wordt wanneer hij gedurende bepaalde tijd (6 seconden) niet veranderd. Uiteindelijk kan met het afgelezen volume AgNO<sub>3</sub> de exacte concentratie van de titreervloeistof, op het moment van analyse, bepaald worden (wederom via bovenstaande formule 4.28).



Figuur 4.13: mV-ml curve

- Afhankelijk van de analyse van het totaal chloridegehalte of het wateroplosbaar chloridegehalte, wordt de analyseoplossing aangemaakt.
- Een automatisch titratie, met dezelfde instellingen als de endpoint titratie, wordt uitgevoerd.
- Het getitreerde volume wordt afgelezen.
- Volgende formules worden gebruikt ter bepaling van het chloridegehalte per laag:
  - Totaal chloridegehalte:

Conc. Cl<sup>-</sup> (%) = 
$$\frac{10 \times 100 \times 35,45 \times 0,01 \times \text{Vol. AgN } 0_3 \text{ (ml)}}{100 \times 2}$$
 (4.29)

➢ Wateroplosbaar chloridegehalte:

Conc. Cl<sup>-</sup> (%) = 
$$\frac{10 \times 100 \times 35,45 \times 0,01 \times \text{Vol. AgN } 0_3 \text{ (ml)}}{100 \times 2,5}$$
 (4.30)

Waarbij 10 de verdunningsfactor voorstelt; 35,45 is de atoommassa van chloriden (g/mol); 0,01 is de concentratie van de tireervloeistof (mol/l); en 2 (of 2,5 bij totaal) is de massa van het betonpoeder in de extractieoplossing. De 0,01 mol/l concentratie van de titreervloesitof (AgNO<sub>3</sub>) uit bovenstaande formules kan vervangen worden door de exacte concentratie van de titratievloeistof, bekomen via de endpoint titratie.

- Vrij chloridegehalte = 0,8 x wateroplosbaar chloridegehalte
   Dit is een exprimenteel bepaalde verhouding uit Yuan [2009]
- Gebonden chloridegehalte = Totaal chloridegehalte vrij chloridegehalte

Om een indicatie te krijgen van het gehalte gebonden chloriden wordt het verschil genomen tussen het totaal gehalte chloriden en het gehalte vrije chloriden.

In Figuur 4.14 worden de benodigdheden weergegeven die noodzakelijk zijn om de chlorideconcentraties te kunnen bepalen op de beschreven manier.



Figuur 4.14: Benodigdheden bepaling chlorideconcentratie

#### 4.2.2.5. Chlorideconcentratie ter hoogte van kleuromslag

Op basis van de gegevens die bekomen werden via Deel 4.2.2.3 en Deel 4.2.2.4, kon de chlorideconcentratie ter hoogte van de kleuromslag bepaald worden voor hoogovenslakbeton. In NT Build 492 [1999] wordt reeds een waarde gegeven voor Portlandcementbeton, namelijk 0,07 N. Het principe wordt verduidelijkt in Figuur 4.15 aan de hand van een fictief voorbeeld waarbij de indringingsdiepte 15 mm bedraagt. Door de pijlen te volgen wordt de concentratie wateroplosbare chloriden ter hoogte van de kleuromslag bekomen, namelijk ~ 0,100 m% beton. Voor de omrekening van dit percentage naar mol/l werd beroep gedaan op één van volgende formules:

$$c\left(\frac{mol}{l}\right) = \frac{1000 \ x \ c\%}{35,45 \ x \ \omega_m\%} \tag{4.31}$$

$$c\left(\frac{mol}{l}\right) = \frac{\rho_{dr} \times c\%}{35,45 \times \omega\%} \tag{4.32}$$

Waarbij c% het wateroplosbare chloridegehalte ten opzichte van de massa van het beton voorstelt,  $\omega_m$ % is het watergehalte van het beton ten opzichte van de massa van het beton,  $\rho_{dr}$ 

is de droge densiteit van het beton,  $\omega$ % is het watergehalte van het beton ten opzichte van het volume van het beton en c (mol/l) is de chlorideconcentratie in de poriënoplossing.



Figuur 4.15: CTH - Chlorideconcentratie op indringingsdiepte

Het watergehalte of de porositeit van het beton  $\omega$  ( $\omega_m$ ) wordt als volgt bepaald:

- Vacuüm verzadigen van de proefstukken in een 4 g/l Ca(OH)<sub>2</sub>-oplossing, op dezelfde manier als bij de CTH-test;
- Rechtsreeks uit de oplossing, dus zonder drogen, het gewicht onder water bepalen W<sub>w</sub>;
- Het gewicht boven water bepalen W<sub>a</sub>;
- De proefstukken laten drogen tot constante massa W<sub>d</sub> bij 105 °C;
- Watergehalte bepalen via volgende formules:

$$\succ \quad \omega = \frac{W_a - W_d}{W_a - W_w} \tag{4.33}$$

$$\succ \quad \omega_m = \frac{W_a - W_d}{W_d} \tag{4.34}$$

## 4.2.3. Migratie- en diffusiecoëfficiënten

Bij de proefstukken afkomstig uit de CTH-test werd op basis van de bekomen gegevens de migratiecoëfficiënt bepaald. Dit gebeurde zowel met formule 4.22 waarbij de experimenteel bepaalde chlorideconcentraties, opgemeten volgens de hiervoor beschreven methoden, gebruikt werden als met vereenvoudigde formule 4.26 met vooropgestelde chlorideconcentratie 0,07 mol/l. Het is de bedoeling om beiden met elkaar te vergelijken en na te gaan of de vereenvoudigde formule gebruikt kan worden voor hoogovenslakbeton. De inverse errorfunctie kon omgevormd worden tot een inverse van een cumulatief normale verdeling, zo wordt  $\alpha$  (formule 4.24):

$$\alpha = 2\sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \Phi^{-1} \left( \frac{\frac{1 - \frac{2c_d}{c_0} + 1}{2}}{\sqrt{2}} \right)$$
(4.35)

Voor de proefstukken die de diffusietest ondergingen, werd de diffusiecoëfficiënt begroot met formule 4.21. Zoals aangegeven in Deel 4.2.2.2, diende hierbij een niet-lineaire regressie toegepast te worden met als variabelen de laagdiepten en de opgemeten concentraties. De parameters waren de chlorideconcetratie aan het oppervlak en de diffusiecoëfficiënt. Ook hier kon de errorfunctie vereenvoudigd worden door ze om te vormen tot een cumulatief normale verdeling. Op basis van Yuan [2009] werd aangenomen dat c<sub>i</sub> uit formule 4.21 gelijk is aan 0 m% beton. Hierdoor treedt een kleine fout op die verwaarloosd wordt. Dit alles leidde tot volgende vereenvoudiging:

$$\frac{c(x,t)}{c_s} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4D_{nssd} t}}\right)$$
(4.36)

$$\frac{c(x,t)}{c_s} = 1 - \left[\Phi\left(\frac{\sqrt{2}x}{\sqrt{4D_{nssd}t}}\right) - \frac{1}{2}\right] \times 2$$
(4.37)

De concentraties in deze formule worden uitgedrukt in m% beton.

# 4.3. Resultaten

### 4.3.1. CTH

In dit deel worden de resultaten voor kleuromslagdiepte, het chlorideprofiel en de combinatie van beide besproken voor proefstukken die aan de CTH-migratietest onderworpen werden. In voorliggend werk werden voor  $SO_{(Cl)}$  en  $S5O_{(Cl)}$  2 betonnen proefstukken met bekistingsvlak onderzocht en voor  $S7O_{(Cl)}$  en  $S85_{(Cl)}$  telkens 1 proefstuk met bekistingsvlak, dit zowel ter bepaling van de kleuromslagdiepte als voor het opstellen van een chlorideprofiel. De onderzochte cilinders waren ongeveer 26 weken oud toen ze aan de CTH-test onderworpen werden.

### 4.3.1.1. Kleuromslagdiepte

De diepte waar kleuromslag optreedt werd bepaald door middel van een spray met 0,1 N AgNO<sub>3</sub>-oplossing. Bij het opmeten werd de kleuromslag rond/op granulaten niet in rekening gebracht. In Tabel 4.5 wordt de gemiddelde kleuromslagdiepte per meting weergeven met bijhorende standaardfout op het gemiddelde alsook de maximaal en minimaal opgemeten dieptes.

#### Tabel 4.5: CTH - Kleuromslagdiepte

	<b>SO</b> <sub>(Cl)</sub> (1)	<b>SO</b> <sub>(Cl)</sub> (2)	<b>S50</b> <sub>(Cl)</sub> (1)	<b>S50</b> <sub>(Cl)</sub> (2)	<b>S70</b> (Cl)	<b>S85</b> (Cl)
Gemiddelde kleuromslagdiepte [mm]	20,21 ± 0,35	$\begin{array}{c} 17,\!86\\ \pm0,\!48\end{array}$	$\begin{array}{c} 17,00 \\ \pm \ 0,59 \end{array}$	15,97 ± 0,73	12,36 ± 0,51	23,69 ± 0,60
Maximum [mm]	22,00	21,00	20,00	19,00	15,00	27,00
Minimum [mm]	17,00	15,00	14,00	12,00	10,00	21,00

Uit de bekomen resultaten blijkt dat de afstand waarover kleuromslag optreedt zich steeds minder diep in het proefstuk bevindt bij stijgende hoeveelheid hoogovenslak tot en met 70 %, zie ook Figuur 4.16. Bij mengelingen met 85 % hoogovenslak neemt de gemiddelde kleuromslagdiepte toe ten opzichte van de andere proefstukken aangemaakt op basis van hoogovenslakmengelingen en ten opzichtte van de proefstukken met referentiemengeling.



Figuur 4.16: CTH - Kleuromslagdiepte bij S0<sub>(Cl)</sub>, S50<sub>(Cl)</sub>, S70<sub>(Cl)</sub> en S85<sub>(Cl)</sub> (van links naar rechts)

### 4.3.1.2. Chlorideprofiel

Het chlorideprofiel voor de verschillende mengelingen werd opgesteld aan de hand van titraties die verlopen volgens de procedures besproken in Deel 4.2.2.4. Voor elke meting werd het titratietoestel gekalibreerd. Op die manier werd telkens de exacte concentratie van de titreervloestof, ~ 0,01 mol/l AgNO<sub>3</sub>, achterhaald. De bekomen concentratie werd gebruikt in de formules ter bepaling van de chloridegehaltes. Ondanks het feit dat de hoogte van de cilindervormige proefstukken ~ 50 mm bedraagde, werden de chlorideprofielen opgesteld tot een diepte van 35 mm. Vanaf deze diepte is zowel de wateroplosbare als de totale chlorideconcentratie nagenoeg constant of worden geen chloriden meer aangetroffen. Per meting wordt het profiel weergegeven met aanduiding van de eerder bepaalde gemiddelde, maximale en minimale kleuromslagdiepte. De assen worden voor elk profiel gelijk gesteld om de verschillen duidelijker te maken. De concentraties worden uitgedrukt in massa% beton. Voor een gedetailleerd overzicht van de opgemeten chlorideconcentraties (totaal en wateroplosbaar) per laag en per proefstuk, alsook de concentraties van AgNO<sub>3</sub> per titratie, wordt verwezen naar Bijlage C. In die bijlage worden ook de figuren toegevoegd waarbij alle chlorideprofielen samen voorgesteld zijn, dit is misschien eenvoudiger om ze onderling te vergelijken. Uit de resultaten blijkt op het eerste zicht dat de chlorideconcentraties voor de proefstukken op basis van de mengelingen met 50 %, 70 % en 85% hoogovenslak ter vervanging van cement afnemen tot op een bepaalde diepte in vergelijking met de concentraties bij de proefstukken met 0% hoogovenslak. In Figuur 4.17 en Figuur 4.18 worden de chlorideprofielen weergegeven voor de proefstukken op basis van traditioneel beton met 100 % Portlandcement. Het is duidelijk dat het gehalte wateroplosbare chloriden lager is dan het totale gehalte.



Figuur 4.17: CTH - Chlorideprofiel S0(CI) met aanduiding kleuromslagdiepte (meting 1)



Figuur 4.18: CTH - Chlorideprofiel S0(CI) met aanduiding kleuromslagdiepte (meting 2)

De hoogste concentratie totale chloriden bij  $SO_{(Cl)}$  bedraagt 0,369 m% beton (2,488 m% bindmiddel) bij  $SO_{(Cl)}$  meting 1 en 0,529 m% beton (3,564 m% bindmiddel) bij meting 2. De hoogste concentratie wateroplosbare chloriden bedraagt respectievelijk

0,305 m% beton (2,054 m% bindmiddel) en 0,411 m% beton (2,773 m% bindmiddel). Beiden komen voor op een diepte van 1 tot 2 mm. Vanaf dan dalen de concentraties laag per laag. Bij meting 2 zijn vanaf een diepte van ~ 31 mm geen chlorideconcentraties meer waargenomen. Bij meting 1 is er wel nog een minimale, verwaarloosbare hoeveelheid aanwezig. Het verschil tussen het totale gehalte en het wateroplosbare gehalte geeft een indicatie van het gehalte gebonden chloriden. Het gehalte gebonden chloriden is voor de twee metingen van dezelfde grootteorde en bedraagt gemiddeld over alle lagen ongeveer 38 % ten opzichte van het totale chloridegehalte.

Figuur 4.19 en Figuur 4.20 geven de chlorideprofielen weer voor beton met 50 % hoogovenslak ter vervanging van cement. De chloridenconcentraties, zowel totaal als wateroplosbaar, zijn over het algemeen lager dan bij beide metingen van  $SO_{(CI)}$ .



Figuur 4.19: CTH - Chlorideprofiel S50<sub>(Cl)</sub> met aanduiding kleuromslagdiepte (meting 1)



Figuur 4.20: CTH - Chlorideprofiel S50(Cl) met aanduiding kleuromslagdiepte (meting 2)

Het maximale, totale chloridegehalte van meting 1 bedraagt 0,389 m% beton (2,622 m% bindmiddel) en komt voor op een diepte van 0 tot 1 mm. Het hoogste gehalte wateroplosbare chloriden van meting 1 komt een laag dieper voor, tussen 1 en 2 mm en bedraagt 0,324 m% beton (2,186 m% bindmiddel). Bij meting 2 bedragen de maximale waarden 0,426 m% beton (3,114 m% bindmiddel) voor het totale gehalte en 0,356 m% beton (2,401 m% bindmiddel) voor het wateroplosbare chloridegehalte. Op ~ 35 mm diepte komen nagenoeg geen chloriden meer voor bij beide metingen. Bij meting 2 bedraagt de concentratie wateroplosbare chloriden reeds 0 vanaf ~ 31 mm. Wat de verhouding gebonden chloriden ten opzichte van totale chloriden betreft, blijkt dat deze ongeveer 42 % bedraagt bij meting 1 en ongeveer 48 % bij meting 2. Wat een toename is van de binding ten opzichte van het referentiebeton.

De profielen voor de totale en wateroplosbare chlorideconcentraties bij beton met 70 % hoogovenslak ter vervanging van cement worden weergegeven in Figuur 4.21. Voor  $S70_{(Cl)}$  werd, zoals reeds vermeld, slechts 1 meting uitgevoerd.



Figuur 4.21: CTH - Chlorideprofiel S70(CI) met aanduiding kleuromslagdiepte

Hierbij valt meteen op dat vanaf ~ 4 mm het gehalte gebonden chloriden zo goed als onbestaande is. Er kan aangenomen worden dat vanaf 4 mm geen binding meer optreedt en bijgevolg bevinden zich in de volgende lagen enkel wateroplosbare chloriden. De grootste totale concentratie is 0,302 m% beton (2,032 m% bindmiddel) en komt voor in de eerste laag. De maximale concentratie wateroplosbare chloriden komt op een diepte van 3 tot 4 mm voor en bedraagt 0,278 m% beton (1,872 m% bindmiddel). De totale concentraties op de verschillende dieptes bij S70<sub>(Cl)</sub> zijn lager dan bij S0<sub>(Cl)</sub> en S50<sub>(Cl)</sub>. Wat de wateroplosbare chloriden komt op een diepte duidelijk lager te zijn dan bij S0<sub>(Cl)</sub>, maar ook lager dan bij S50<sub>(Cl)</sub>. Het gemiddeld gehalte gebonden chloriden over de verschillende lagen bedraagt 23 %. Wat logisch is, wetende dat voor de verhouding vrije/wateroplosbare chloriden 0,8 aangenomen wordt en het verschil tussen de wateroplosbare en totale chloridegehalten in bovenstaand profiel nagenoeg onbestaande is.

Figuur 4.22 toont het chlorideprofiel voor beton met 85% hoogovenslak ter vervanging van cement. Het chlorideprofiel van mengeling  $S85_{(Cl)}$  is blokvormiger dan de eerder besproken profielen.



Figuur 4.22: CTH - Chlorideprofiel S85(CI) met aanduiding kleuromslagdiepte

De specifieke vorm (afwijkend van de andere chlorideprofielen) is te danken aan de sterke afname van de chlorideconcentraties tussen 0 mm en 3 mm. Deze afname bedraagt 60 % over 3 mm terwijl een volgende afname van 60 % gespreid is over 30 mm. De concentraties op 35 mm zijn nagenoeg constant maar niet 0. De waarden vanaf 31 mm bedragen 0,058 m% beton (0,394 m% bindmiddel) en 0,050 m% beton (0,338 m% bindmiddel) voor respectievelijk het totale en het wateroplosbare chloridegehalte. De maximale concentraties bedragen 0,482 m% beton (3,248 m% bindmiddel) voor het totale gehalte en 0,427 m% beton (2,879 m% bindmiddel) voor het wateroplosbare gehalte. Tot een diepte van 14 mm liggen de concentraties lager dan bij S70<sub>(Cl)</sub>. Daarna zijn ze beduidend hoger dan bij S70<sub>(Cl)</sub>. Hetzelfde geldt in vergelijking met de chlorideprofielen van S50<sub>(Cl)</sub> en S0<sub>(Cl)</sub>, maar hierbij ligt de overgang op ongeveer 19 mm. Net zoals bij S70<sub>(Cl)</sub>, ~ 32 %.

### 4.3.1.3. Concentratie vrije chloriden ter hoogte van kleuromslag

Op basis van de resultaten uit Deel 4.3.1.1 en Deel 4.3.1.2, kan de concentratie vrije chloriden ter hoogte van de kleuromslag bepaald worden. Hierbij werd aangenomen dat het vrije chloridegehalte gelijk is aan 0,8 keer het gehalte wateroplosbare chloriden. Deze aanname gebeurde op basis van de experimenteel bepaalde verhouding uit het werk van Yuan [2009].

Het chloridegehalte wordt uitgedrukt in mol/l, aan de hand van formule 4.31 of 4.32 uit Deel 4.2.2.1, om de waarden met elkaar te kunnen vergelijken. Hiervoor werd eerst de porositeit in m% beton bepaald, dit gebeurde aan de hand van de methode beschreven in Deel 4.2.2.5 en met de formule 4.33 of 4.34. In Tabel 4.6 wordt de porositeit per betonmengeling voorgesteld als gemiddelde van 6 proefstukken met standaardfout op het gemiddelde. Hierbij valt meteen op dat de porositeit toeneemt bij stijgende slakgehaltes.

Tabel 4.6: CTH - Porositeit

	<b>SO</b> (Cl)	<b>S50</b> <sub>(Cl)</sub>	<b>S70</b> <sub>(Cl)</sub>	<b>S85</b> (Cl)
Watergehalte	5,374	6,834	7,253	8,183
[m% beton]	$\pm 0,091$	$\pm 0,094$	$\pm 0,067$	$\pm 0,080$

Tabel 4.7 toont de wateroplosbare en vrije chloridegehaltes ter plaatse van de kleuromslag, in verschillende eenheden, voor de verschillende metingen. De waarden werden bepaald aan de hand van lineaire interpolatie tussen de meetwaarden.

	Kleuromslag	Wateroplosba	Vrije Cl <sup>-</sup>		
	[mm]	[m% beton] [m%bindmiddel]		[mol/l]	[mol/l]
<b>SO</b> <sub>(Cl)</sub> (1)	20,21 ± 0,35	0,099	0,668	0,520	0,416
$S0_{(CI)}(2)$	$17,\!86 \pm 0,\!48$	0,099	0,667	0,520	0,416
<b>S50</b> <sub>(Cl)</sub> (1)	$17,\!00\pm0,\!59$	0,097	0,656	0,402	0,322
S50 <sub>(Cl)</sub> (2)	$15,\!97\pm0,\!73$	0,092	0,619	0,379	0,303
<b>S70</b> <sub>(Cl)</sub>	$12,\!36\pm0,\!51$	0,150	1,011	0,583	0,466
<b>S85</b> (Cl)	$23,\!69 \pm 0,\!60$	0,082	0,553	0,283	0,226

Tabel 4.7: CTH - Benadering van de concentratie wateroplosbare chloriden en vrije chloriden ter hoogte van gemiddelde kleuromslag

Zoals eerder reeds aangehaald, neemt de kleuromslagdiepte af met stijgende hoogovenslakgehaltes tot en met 70 %. Bij de betonmengeling met 85 % hoogovenslak ter vervanging van cement is de kleuromslagdiepte zelfs groter dan bij traditioneel Portlandcementbeton. Toch moet met deze vergelijkingen van de kleuromslagdiepte voorzichtig omgesprongen worden aangezien de instellingen bij de CTH-test niet elke keer exact hetzelfde zijn. Zo kan de het zijn dat de ene keer meer spanning aangelegd moet worden dan de andere keer waardoor een grotere stroom ontstaat, wat misschien een invloed heeft op de migratie van de chloriden en de kleuromslagdiepte. Bij SO<sub>(CI)</sub>, zowel meting 1 als meting 2, bedraagt het vrije chloridegehalte op die plaats 0,416 mol/l. Meting 1 en meting 2 van S50<sub>(CI)</sub>

geven niet exact dezelfde waarde, namelijk 0,322 mol/l en 0,303 mol/l, maar de afwijking is beperkt. De concentratie vrije chloriden bij kleuromslag bij  $S70_{(Cl)}$  geeft de grootste waarde, namelijk 0,466 mol/l. Voor  $S85_{(Cl)}$  neemt het vrije chloridegehalte de laagste waarde aan van alle onderzochte proefstukken, namelijk 0,226 mol/l.

Op basis van deze gegevens kon de migratiecoëfficiënt  $D_{nssm}$  bepaald worden. Dit gebeurde aan de hand van formule 4.22 en de omvorming (formule 4.35) uit Deel 4.2.3 waarbij c<sub>d</sub> vervangen werd door de experimenteel bekomen waarde voor het vrije chloridegehalte uit Tabel 4.7. Daarnaast werd ook  $D_{nssm}$  begroot aan de hand van de vereenvoudigde formule 4.26, waarbij verondersteld werd dat de chlorideconcentratie 0,07 mol/l bedraagt. Deze formule is algemeen geldig voor traditioneel Portlandcementbeton, maar werd hier ook gebruikt voor hoogovenslakbeton om het verschil te bekijken. Tabel 4.8 toont de nietstationaire migratiecoëfficiënten  $D_{nssm}$  voor de verschillende mengelingen.

-	D <sub>nssm</sub> [			
	Formule 4.22	Vereenvoudigde formule 4.26	Verschil [%]	
<b>SO</b> <sub>(Cl)</sub> (1)	9,665	8,981	7,09	
<b>SO</b> <sub>(Cl)</sub> (2)	10,190	9,342	8,32	
<b>S50</b> <sub>(Cl)</sub> (1)	7,917	7,405	6,47	
<b>S50</b> <sub>(Cl)</sub> (2)	5,496	4,724	5,42	
<b>S70</b> <sub>(Cl)</sub>	4,291	3,934	8,32	
<b>S85</b> (Cl)	5,382	5,231	2,81	

Tabel 4.8: CTH - Migratiecoëfficiënten

De resultaten uit Tabel 4.8 tonen aan dat de migratiecoëfficiënt van het referentiebeton  $SO_{(Cl)}$  het grootst is. Deze neemt af door toevoeging van hoogovenslak. Bij vervanging van cement door 85 % hoogovenslak is de migratiecoëfficiënt wel groter dan bij 70 % hoogovenslak maar nog steeds kleiner dan bij traditioneel Portlandcementbeton. Ondanks het feit dat bij  $S7O_{(Cl)}$  de grootste chlorideconcentratie wordt waargenomen bij kleuromslag, bezit deze mengeling de laagste migratiecoëfficiënt. Dezelfde trend treedt op bij de coëfficiënten die bepaald met de vereenvoudigde formule. Het verschil tussen beide coëfficiënten bedraagt 7,71 % (gemiddeld) voor  $SO_{(Cl)}$ ; 5,95 % (gemiddeld) voor  $S50_{(Cl)}$ ; 8,32 % voor  $S70_{(Cl)}$  en 2,81 % voor  $S85_{(Cl)}$ . De grootste afwijking met de vereenvoudigde formule waarbij de vrije chlorideconcentratie ter hoogte van kleuromslag gelijk gesteld wordt aan 0,07 mol/l; wordt dus waargenomen bij de mengeling die de migratiecoëfficiënt het meest doen afnemen,  $S70_{(Cl)}$ .

## 4.3.2. Diffusietest

In dit deel worden de resultaten voor kleuromslagdiepte, het chlorideprofiel en de combinatie van beide besproken voor proefstukken afkomstig van de diffusietest. Per mengeling werd 1 betonnen proefstuk met bekistingsvlak onderzocht, zowel ter bepaling van de kleuromslagdiepte als voor het opstellen van een chlorideprofiel. De cilinders waren ongeveer 24 weken oud toen ze aan de diffusietest onderworpen werden en werden gedurende 4 weken blootgesteld aan een 165 g/l NaCl-oplossing.

### 4.3.2.1. Kleuromslagdiepte

De kleuromslagdiepte werd bepaald zoals in Deel 4.3.1.1. In Tabel 4.9 wordt de gemiddelde kleuromslagdiepte per meting weergeven met bijhorende standaardfout op het gemiddelde. Bij het opmeten wordt de kleuromslag rond/op granulaten niet in rekening gebracht.

	SO <sub>(Cl)</sub>	<b>S50</b> <sub>(Cl)</sub>	<b>S70</b> <sub>(Cl)</sub>	<b>S85</b> (CI)
Gem. kleuromslagdiepte [mm]	10,47 ± 0,42	$8,43 \pm 0,34$	$4,40 \pm 0,39$	$12,14 \pm 0,44$
Maximum [mm]	14,00	10,00	7,00	15,00
Minimum [mm]	8,00	7,00	3,00	9,00

Tabel 4.9: Diffusie - Kleuromslagdiepte na 4 weken

Uit de bekomen resultaten blijkt dat de afstand waarover kleuromslag optreedt zich steeds minder diep in het proefstuk bevindt bij stijgende hoeveelheid hoogovenslak tot met 70 %, zie ook Figuur 4.23. Bij mengelingen met 85 % hoogovenslak neemt de gemiddelde kleuromslagdiepte toe ten opzichte van de andere proefstukken.



Figuur 4.23: Diffusie - Kleuromslagdiepte na 4 weken, met van links naar rechts S0(Cl), S50(Cl), S70(Cl) en S85(Cl)
#### 4.3.2.2. Chlorideprofiel

De procedure voor het opstellen van de chlorideprofielen verloopt zoals bij de proefstukken afkomstig uit de migratie-test. Ze werden opgesteld tot een diepte van 35mm, hoewel in de meeste gevallen reeds eerder een gehalte van 0 % bereikt werd. Per meting wordt het profiel weergegeven met aanduiding van de eerder bepaalde gemiddelde, maximale en minimale kleuromslagdiepte. De concentraties worden uitgedrukt in massa% beton. De waarden op de assen van de verschillende profielen worden constant gehouden voor de verschillende mengelingen om zo de verschillen duidelijker te kunnen weergeven. Voor een gedetailleerd overzicht van de chloridenconcentraties (totaal en wateroplosbaar) per laag en per proefstuk, alsook de concentraties van AgNO<sub>3</sub> per titratie, wordt verwezen naar Bijlage D.

Het chlorideprofiel, zowel voor de totale als de wateroplosbare chlorideconcentraties, bij traditioneel beton op basis 100 % Portlandcement  $SO_{(Cl)}$  wordt weergegeven in Figuur 4.24. Hierbij valt meteen op dat vanaf 19 mm diepte geen chloriden meer voorkomen. De grootste totale concentratie is 0,438 m% beton (2,949 m% bindmiddel) en komt voor in de eerste laag. De maximale concentratie wateroplosbare chloriden komt op eenzelfde diepte voor en bedraagt 0,339 m% beton (2,287 m% bindmiddel). Het verschil tussen het totale chloridegehalte en het vrije chloridegehalte (=0,8 x wateroplosbare chloridegehalte) geeft een indicatie van het gehalte gebonden chloriden. Het gehalte gebonden chloriden ten opzichte van het totale chloridegehalte neemt toe van 37,9 % in de eerste laag tot 81,9 % op een diepte van 13mm en bedraagt gemiddeld over de opgemeten diepte 50,8 %.



Figuur 4.24: Diffusie - Chlorideprofiel  $S0_{(CI)}$  met aanduiding kleuromslagdiepte

Het chlorideprofiel voor  $S50_{(Cl)}$ , met aanduiding van de gegevens in verband met kleuromslagdiepte, wordt weergegeven in Figuur 4.25.



Figuur 4.25: Diffusie - Chlorideprofiel S50(CI) met aanduiding kleuromslagdiepte

De grootste concentratie totale chloriden is 0,589 m% beton (3,968 m% bindmiddel) en komt voor in de eerste laag. De maximale concentratie wateroplosbare chloriden komt op eenzelfde

diepte voor en bedraagt 0,590 m% beton (3,979 m% bindmiddel). Het gehalte gebonden chloriden bedraagt gemiddeld ~ 30 % van het totale gehalte chloriden en neemt vrijwel lineair toe van 0 % tussen 0 en 1 mm en 100% op ongeveer 11 mm. Hierdoor wordt meteen duidelijk dat op ongeveer 11 mm geen wateroplosbare chloriden meer voorkomen. Vanaf ongeveer 13 mm komen ook geen gebonden chloriden meer voor. Wanneer het profiel van  $S50_{(Cl)}$  vergeleken wordt met dat van  $S0_{(Cl)}$  wordt duidelijk dat de chlorideconcentraties in de bovenste lagen groter zijn maar dat ze wel sneller afnemen, op ongeveer 4 mm wordt een gelijke totale chloridenconcentratie opgemeten. De wateroplosbare chloriden hebben dezelfde concentratie op ongeveer 5 mm diepte. De verhouding gebonden chloridegehalte ten opzichte van totale chloridegehalte neemt toe van ongeveer 19,8 % in de eerste laag tot 63,2% op een diepte van 9 à 11 mm.

Het chlorideprofiel voor S70<sub>(Cl)</sub> met aanduiding van de kleuromslagdiepte wordt getoond in Figuur 4.26.



Figuur 4.26: Diffusie - Chlorideprofiel S70(CI) met aanduiding kleuromslagdiepte

De concentratie totale chloriden tussen 0 en 1 mm bedraagt 0,741 m% beton (4,996 m% bindmiddel). De maximale concentratie wateroplosbare chloriden komt op eenzelfde diepte voor maar bedraagt iets meer: 0,786 m% beton (5,295 m% bindmiddel). Ook in de tweede laag wordt een hoger wateroplosbaar gehalte gemeten. Dit kan te wijten zijn aan het niet homogeen zijn van het beproefde poeder. Het gehalte gebonden chloriden bedraagt gemiddeld

~ 16 %. In vergelijking met SO<sub>(Cl)</sub> en S5O<sub>(Cl)</sub> neemt de binding wel af. Vanaf ongeveer 19 mm komen geen chloriden meer voor. Het verloop is te vergelijken met dat van S5O<sub>(Cl)</sub>, met dat verschil dat de concentraties op de verschillende dieptes iets hoger liggen. Het totale chlorideprofiel van S7O<sub>(Cl)</sub> kruist dat van SO<sub>(Cl)</sub> op een diepte van ongeveer 6 mm. Het profiel van de wateroplosbare chloriden kruist dat van SO<sub>(Cl)</sub> niet maar ze naderen wel naar elkaar, de concentraties bij S7O<sub>(Cl)</sub> zijn groter. Het gehalte gebonden chloriden neemt af ten opzichte van SO<sub>(Cl)</sub> en S5O<sub>(Cl)</sub>. Wel neemt het nog altijd toe naarmate dieper in het beton.

Net zoals bij het chlorideprofiel dat bekomen werd voor  $S85_{(Cl)}$  uit de CTH-test, vertoont ook het chlorideprofiel voor  $S85_{(Cl)}$  na de diffusietest een andere vorm dan deze voor  $S0_{(Cl)}$ ,  $S50_{(Cl)}$  en  $S70_{(Cl)}$ , zie Figuur 4.27.



Figuur 4.27: Diffusie - Chlorideprofiel S85(CI) met aanduiding kleuromslagdiepte

In laag 1 worden de grootste chlorideconcentraties van alle metingen opgemeten, namelijk 0,817 m% beton (5,507 m% bindmiddel). Ook in dieper gelegen lagen is zowel het totale als wateroplosbare chloridegehalte groter dan bij  $SO_{(CI)}$ ,  $S5O_{(CI)}$  en  $S7O_{(CI)}$ . Beide gehaltes naderen samen naar 0 en vanaf 27 mm diepte waren geen chloriden meer aanwezig in het beton. Wat de gebonden chloriden betreft, kan gesteld worden dat er geen binding optreedt.

#### **4.3.2.3.** Concentratie vrije chloriden ter hoogte van kleuromslag

Op basis van de resultaten uit Deel 4.3.2.1 en Deel 4.3.2.2 kon de concentratie vrije chloriden ter hoogte van de kleuromslag bepaald worden. Hierbij werd aangenomen dat het vrije chloridegehalte gelijk is aan 80% van het gehalte wateroplosbare chloriden, zoals experimenteel bepaald door yuan [2009]. Het vrije chloridegehalte wordt bepaald in mol/l. Hiervoor werd eerst de porositeit in m% beton bepaald. Deze resultaten staan in Tabel 4.6 in Deel 4.3.1.3. In Tabel 4.10 wordt de chlorideconcentratie ter hoogte van kleuromslag weergeven in verschillende eenheden. Deze zijn bepaald door lineaire interpolatie tussen de meetwaarden.

	Kleuromslag	Wateroplos	bare chloriden uit ch	Vrije chloriden	
	[mm]	Cl <sup>-</sup> -gehalte [m% beton]	Cl <sup>-</sup> -gehalte [m%bindmiddel]	Cl <sup>-</sup> -gehalte [mol/l]	Cl <sup>-</sup> -gehalte [mol/l]
<b>SO</b> (CI)	$10,\!47\pm0,\!42$	0,044	0,296	0,230	0,184
<b>S50</b> (Cl)	$8,\!43 \pm 0,\!34$	0,037	0,251	0,154	0,123
<b>S70</b> (Cl)	$4,\!40\pm0,\!39$	0,300	2,022	1,167	0,934
<b>S85</b> (Cl)	$12,14 \pm 0,44$	0,085	0,575	0,294	0,235

 Tabel 4.10: Diffusie - Benadering van de concentratie wateroplosbare chloriden en vrije chloriden ter hoogte van gemiddelde kleuromslag na een diffusietest van 4 weken.

De kleuromslagdiepte neemt af met stijgende hoogovenslakgehaltes tot en met 70 %. Bij de betonmengeling met 85 % hoogovenslak ter vervanging van cement is de kleuromslagdiepte groter dan bij traditioneel Portlandcementbeton. Voor de lagere hoogovenslakgehaltes ( $\leq 50$  %) is de concentratie vrije chloriden, bij de diffusietest na 4 weken, kleiner dan bij de proefstukken afkomstig uit de migratie-test. Bij S70<sub>(Cl)</sub> wordt de grootste waarde opgemeten, meer bepaald 0,934 mol/l. Deze is aanzienlijk groter dan bij dezelfde mengeling na de CTH-test. Voor S85<sub>(Cl)</sub> is de concentratie vrije chloriden ter hoogte van kleuromslag 0,235 mol/l wat van dezelfde grootteorde is als na de CTH-test. Bij S50<sub>(Cl)</sub> wordt de laagste waarde opgemeten, 0,123 mol/l, ondanks het feit dat de kleuromslag bij S0<sub>(Cl)</sub> en S85<sub>(Cl)</sub> dieper in het beton optreedt.

Op basis van de gegevens die hier voorgesteld worden, kon de diffusiecoëfficiënt en de oppervlakteconcentratie bepaald worden. Dit gebeurde aan de hand van formule 4.23 en de omvormingen (formules 4.35 en 4.36) uit Deel 4.2.3.

	D <sub>nssd</sub> [10	$0^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ]	C <sub>s</sub> [m%	beton]
	Totaal chlorideprofiel	Vrij chlorideprofiel	Totaal chlorideprofiel	Vrij chlorideprofiel
SO <sub>(Cl)</sub>	13,203	9,511	0,470	0,298
<b>S50</b> (Cl)	4,597	3,265	0,703	0,593
<b>S70</b> (Cl)	5,916	4,775	0,792	0,717
<b>S85</b> (Cl)	11,455	10,500	0,776	0,649

De resultaten worden weergegeven in Tabel 4.11, waar de parameters  $D_{nssd}$  en c<sub>s</sub> bepaald zijn zowel aan de hand van het totale chlorideprofiel als aan de hand van het vrije chlorideprofiel.

Tabel 4.11: Diffusie - Diffusiecoëfficiënten

De diffusiecoëfficiënten voor beton met een bepaald percentage hoogovenslak ter vervanging van cement nemen lagere waarden aan dan bij het beton zonder hoogovenslak, behalve de diffusiecoëfficiënt voor  $S85_{(Cl)}$  bepaald op basis van het vrije chloridenprofiel. De laagste waarde wordt begroot voor  $S50_{(Cl)}$ . Als naar de oppervlakteconcentraties gekeken wordt, kan gesteld worden dat deze bij slakkenbeton hoger zijn dan bij traditioneel Portlandcementbeton. Dit werd ook al duidelijk uit de chlorideprofielen, waar de concentraties in de eerste lagen van het slakkenbeton steeds hoger waren dan in dezelfde lagen bij  $S0_{(Cl)}$ -beton.

Op basis van de gegevens uit Tabel 4.11 kan opnieuw de totale en vrije chlorideconcentratie berekend worden op elke diepte en voor elke betonsoort. De curves die hiermee overeenstemmen zijn toegevoegd in Bijlage D. Uit deze resultaten blijkt dat de chlorideprofielen bepaald aan de hand van de diffusiecoëfficiënten en de concentraties aan het oppervlak, samenvallen met de experimenteel bepaalde chlorideprofielen.

### 4.4. Discussie

#### Chlorideprofielen

Bij de CTH-proefstukken wordt vastgesteld dat de totale chlorideconcentraties per laag afnemen met stijgend gehalte hoogovenslak tot en met 70 % in vergelijking met de concentraties bij traditoneel Portlandcementbeton. Wat de concentraties wateroplosbare chloriden betreft wordt een daling waargenomen tot een slakgehalte van 50 %. Het wateroplosbare chloridegehale per laag bij beton met 70 % hoogovenslak is te vergelijken met dit bij beton met 50 % hoogovenslak. De stelling van dalende chloridenconcentraties in vergelijking met traditioneel beton geldt tot op een bepaalde diepte. Bij stijgende slakgehaltes ter vervanging van cement blijft steeds een beperkte hoeveelheid chloriden constant aanwezig op grote dieptes. Het chlorideprofiel van beton met 85 % hoogovenslak is hier een extreem voorbeeld van: blokvormig met hoge concentraties in laag 1 en vervolgens een sterke daling in laag 2 om daarna kleine afnames per laag te ondergaan en nauwelijks te naderen tot 0 % chloriden. In Deel 4.1.3.2 werd vermeld dat sommige onderzoekers blokvormige profielen bekomen na een CTH-test. Dit is in voorliggend werk dus niet het geval, behalve voor de mengeling met 85 % hoogovenslak ter vervanging van cement. Vanaf een bepaalde diepte zijn de concentraties bij S85<sub>(Cl)</sub>-beton groter dan bij S0<sub>(Cl)</sub>, S50<sub>(Cl)</sub> en S70<sub>(Cl)</sub>. Een duidelijke verklaring voor dit verschijnsel werd niet gevonden. Maar uit de opgemeten resultaten voor de porositeit, die tegenstrijdig zijn aan de algemeen aanvaarde opvatting dat de porositeit aanzienlijk daalt door toevoeging van hoogovenslak, blijkt dat deze stijgt voor grotere slakgehaltes. De verklaring kan dan zijn dat de chloriden verder kunnen indringen bij stijgende slakgehaltes door de grotere porositeit.

Bij de proefstukken afkomstig uit de diffusietest worden enkel bij beton met 50 % hoogovenslak ter vervanging van cement, vanaf een diepte van 4 mm, lagere chloridenconcentraties opgemeten dan bij 100 % Portlandcementbeton. Deze bij 70 % en 85 % hoogovenslak nemen niet af ten opzichte van het refentiebeton, hoewel ze wel naderen. De hogere chlorideconcentraties in de eerste lagen worden verklaard door de hogere oppervlakteconcentraties bij stijgende percentages hoogovenslak. Dit wordt ook bevestigd door het werk van Pack et al. [2010]. De snellere daling van de chloridenconcentraties dieper in het beton bij toenemende slakgehaltes zijn het gevolg van een lagere diffusiecoëfficiënt. Net zoals het geval was bij de  $S85_{(CD)}$ -proefstukken uit de CTH-test vertoont ook het

chlorideprofiel voor S85<sub>(Cl)</sub>-beton uit de diffusietest een lichte blokvorm. Dit wijst erop dat de blokvorm niet het resultaat is van het elektrisch veld dat over de proefstukken aangelegd wordt bij de CTH-migratietest. Dit is in tegenstelling met wat beweerd wordt door Tang [1996]. Een punt van overeenkomst tussen de chlorideprofielen van proefstukken onderworpen aan de CTH-test enerzijds en de aan een diffusietest van 4 weken anderzijds, is het feit dat de chlorideconcentraties geleidelijker naderen tot 0 bij stijgende slakgehaltes, vooral bij 85 % hoogovenslakbeton is dit het geval. De verklaring in verband met de porositeit bij de CTH-proefstukken, kan ook opgaan voor de proefstukken uit de diffusietest.

#### Chloridebinding

De resultaten betreffende chloridebinding zijn geheel/gedeeltelijk tegenstrijdig met de algemene aanvaarde opvattingen uit de literatuur. Onder andere Luo et al. [2003] concluderen dat de chloridebinding stijgt met toenemende slakgehaltes en dat aldus bij de grootste slakgehaltes de meeste binding optreedt. Dit wordt verklaard door de hoge aluminiumoxidehoeveelheden in slak waardoor Friedel's zout gevormd wordt. Een cementvervangingsgehalte van 70 % wordt naar voor geschoven als het meest geschikt. Ook Tang [1996] vond dat de binding stijgt door toevoeging van hoogovenslak in plaats van cement, hoewel hij in zijn onderzoek maar hoogovenslakgehaltes tot 50 % beschouwt. In voorliggend werk is het zo dat de chloridenbinding van traditioneel Portlandcementbeton onderworpen aan de CTH-test iets lager is dan dat bij beton met 50 % hoogovenslak ter vervanging van cement. Maar vanaf cementvervangingsgehaltes van 70 % neemt de binding sterk af in vergelijking met het referentiebeton. De conclusie van Tang [1996] is niet volledig tegenstrijdig met de resultaten uit voorliggend werk, gezien de beperkte slakgehaltes die hij onderzocht. Op basis van de meetgegevens, bekomen in voorliggend werk, voor proefstukken afkomstig uit de CTH-test kan zijn stelling verfijnd worden door eraan toe te voegen dat de chloridebinding bij migratietesten stijgt voor slakgehaltes tot en met 50 % maar dat bij slakgehaltes van 70 % en 85 % de chloridebinding terug daalt en uiteindelijk zelfs bijna meer optreedt. Voor de betonproefstukken onderworpen aan een diffusietest van 4 weken is geen enkele van bovenstaande conclusies uit de literatuur geldig. De resultaten tonen aan dat de chloridebinding daalt bij stijgende gehaltes hoogovenslak ter vervanging van cement. Uit het onderzoek van Yuan [2009] komen dezelfde vaststellingen naar voor. De reden die hiervoor aangehaald kan worden, is het gebruik van de water-extractie methode om de hoeveelheid gebonden chloriden te analyseren. Bij hoogovenslakbeton zouden eventueel meer chloriden

kunnen vrijkomen dan bij andere betonsoorten, waardoor het gehalte wateroplosbare en vrije chloriden overschat wordt.

#### Kleuromslagdiepte

Bij het vergelijken van de kleuromslagdieptes voor het beton dat onderworpen werd aan migratie met een elektrisch veld, moeten de randvoorwaarden in acht genomen worden. Zo kan de opgelegde spanning en de temperatuur verschillen voor opeenvolgende testen.

Een voorzichtige vergelijking van de kleuromslagdieptes leert dat deze, zowel na de migratietest als na de diffusietest (4 weken), afnemen met toenemend slakgehalte tot en met 70 %. Bij 85 % vervanging van cement door hoogovenslak treedt de kleuromslag op grotere diepte op dan bij het referentiebeton op basis van 100 % Portlandcement. In de literatuur zijn geen waarden terug te vinden voor beton met 85% hoogovenslak, maar wordt wel gesproken van een afname van de indringingsdiepte in functie van het slakgehaltes alsook een verschil in indringingsdiepte bij diffusie- en migratietesten. De waarden bij de proefstukken uit de diffusietest na 4 weken zijn algemeen lager dan bij de proefstukken die onderworpen werden aan de migratietest. Hierbij kan de vraag gesteld worden hoe lang de diffusietest moet lopen om evenwaardig te zijn aan de CTH-test.

Wanneer de concentratie vrije chloriden ter hoogte van kleuromslag beschouwd wordt, blijkt dat deze na de CTH-test daalt in vergelijking met het referentiebeton voor S50(Cl) en S85 (Cl) maar stijgt voor S70<sub>(Cl)</sub>. Dit is langs de ene kant aanvaardbaar aangezien de kleuromslag bij beton met 70 % hoogovenslak veel minder diep optreedt, langs de andere kant moet deze waarde eventueel herzien worden aangezien de titratie en de bepaling van de kleuromslag op een verschillend proefstuk gebeurden. De experimenteel bepaalde waarde voor de vrije chloridenconcentratie bij kleuromslag van traditioneel Portlandcementbeton na de CTH-test wijkt af van de vooropgestelde waarde uit NT Build 492 [1999] die gebasseerd is op het onderzoek van Tang [1996]. De waarde bekomen in voorliggend werk bedraagt ~ 0,416 mol/l, terwijl 0,07 mol/l vooropgesteld wordt. De bevindingen uit voorliggend werk stemmen gedeeltelijk overeen met de resultaten van Yuan [2009] en Meck en Sirivivatnanon [2003], in die zin dat de vrije chlorideconcentraties ook sterk afwijken van de vooropgestelde waarde. Toch zijn de experimenteel bepaalde waarden uit voorliggend werk nog steeds groter dan de waarden uit de literatuur. De grotere porositeit kan ook hier een rol spelen. Bij de diffusietest komen de vrije chloridenconcentraties ter hoogte van kleuromslag wel beter overeen met de waarden die in de literatuur vermeld staan.

#### Migratiecoëfficiënt

Het verloop van de migratiecoëfficiënten bij toevoeging van hoogovenslak ter vervanging van cement beantwoordt aan de verwachtingen gebaseerd op de literatuurgegevens van onder andere Yuan [2009]. De migratiecoëfficiënt daalt bij toenemende slakgehaltes wat duidt op een positieve invloed van hoogovenslak. Bij 70 % hoogovenslak ter vervanging van cement wordt een optimum bereikt. Dit besluit is wel getrokken op basis van meetwaarden afkomstig van slechts één proefstuk voor  $S70_{(CI)}$  en  $S85_{(CI)}$ .

Vergelijking van de basisformule (4.22) met de vereenvoudigde formule (4.26), algemeen beschouwd wordt als standaardformule ter berekening van de migratiecoëfficiënt van traditioneel Portlandcementbeton, moet aantonen of deze laatste al dan niet geldig is voor hoogovenslakbeton. Uit het onderzoek van Tang [1996] wordt geconcludeerd dat chlorideconcentraties ter hoogte van kleuromslag die 2 tot 2,5 keer groter zijn dan 0,07 mol/l geen noemenswaardige afwijkingen (enkele procenten) geven voor de migratiecoëfficiënt. Dit is wel op voorwaarde dat de kleuromslagdiepte meer dan 5 mm bedraagt. In voorliggend werk zijn de vrije chloridenconcentraties ter hoogte van kleuromslag, zoals reeds vermeld, vrij hoog en bedragen ze meer dan 2,5 keer 0,07 mol/l. Uit de berekeningen van beide migratiecoëfficiënten blijkt dat het verschil nog steeds nihil is. De migratiecoëfficiënt bij traditioneel Portlandcementbeton en 70 % hoogovenslakbeton beiden begroot met de opgemeten chlorideconcentratie verschillen het meest van de migratiecoëfficiënt berekend met de vereenvoudigde formule. Verder blijkt dat toepassing van beide formules bij beton met 50 % en 85 % hoogovenslak kleinere verschillen geeft dan bij het referentiebeton. De "enkele procenten" uit Tang [1996] zijn dan ook voor interpretatie vatbaar. Dat de grootste afwijking wordt waargenomen bij beton met 70 % hoogovenslak ter vervanging van cement kan verklaard worden door de kleine kleuromslagdiepte. Als trend wordt vastgesteld dat het verschil met de vereenvoudigde formule steeds groter wordt naarmate de kleuromslagdiepte kleiner wordt. Dit wordt ook door Tang aangehaald. Daarnaast heeft het beton met de kleinste kleuromslagdiepte ook de laagste migratiecoëfficiënt en aldus de beste weerstand tegen chloride-indringing. Algemeen kan aangenomen worden dat de vereenvoudigde formule uit NT Build 492 [1999] en Tang [1996] ook toegepast kan worden voor hoogovenslakbeton, beseffende dat de afwijking groter wordt naarmate de kleuromslagdiepte en de bekomen coëfficiënten afnemen.

#### Diffusiecoëfficiënten

De diffusiecoëfficiënten van hoogovenslakbeton bepaald aan de hand van het totaal chlorideprofiel zijn lager of gelijk aan deze van traditioneel Portlandcementbeton. De gevonden waarde voor beton met 0 % hoogovenslak komt overeen met de waarde gevonden door Yuan [2009], die ongeveer dezelfde werkwijze toepast. De coëfficiënt van beton met 50 % slak als cementvervanging vertoont de laagste waarde. Hogere gehaltes veroorzaken een stijging van de diffusiecoëfficiënt maar deze wordt niet groter dan bij traditioneel beton. De waarden voor beton met 50 % hoogovenslak als cementvervanging bevestigen de resultaten uit het onderzoek van Leng et al. [2000]. In de literatuur wordt als verklaring voor lagere diffusiecoëfficiënten bij hoogovenslkabeton de verfijnde proiënstructuur en de verhoogde bindingscapaciteit aangehaald. Aangezien de binding uit de resultaten in voorliggend werk blijkt dat de binding bij diffusie daalt in vergelijking met traditioneel beton en bij toenemende slakgehaltes is de tweede verklaring alvast niet geldig.

Indien de diffusiecoëfficiënten vergeleken worden met de migratiecoëfficicënten van dezelfde mengelingen wordt geen eenduidige verband waargenomen. Dit is nochtans wel wat Yuan [2009] concludeert uit zijn onderzoek, namelijk dat er een lineair verband bestaat tussen beide coëfficiënten. Het niet aanwezig zijn van een dergelijk verband kan het gevolg zijn van te weinig opgemeten proefstukken, waardoor de bekomen resultaten niet gestaafd kunnen worden.

De oppervakteconcentraties van hoogovenslakbeton beantwoorden wel aan de verwachtingen. Deze zijn aanzienlijk hoger dan bij traditioneel beton en nemen toe met stijgende hoogovenslakgehaltes. Dit wordt ook aangegeven in de literatuur, onder andere door Pack et al. [2010] en Yuan [2009]. De verklaring die hiervoor gegeven wordt is wederom de verhoogde bindingscapaciteit bij stijgende slakgehaltes, hoewel dit dus niet het geval is in voorliggend werk. Een andere mogelijke verklaring is de bewaring van de proefstukken. In de literatuur werd vastgesteld dat hoogovenslakbeton dat niet goed bewaard wordt, een meer open oppervlaktestructuur bezit. Daarnaast werd vastgesteld dat de proefstukken met hoogovenslak licht afgebrokkelde randen vertoonden ten gevolge van het ontkisten. Mogelijk konden hierdoor ook meer chloriden het beton binnendringen en werd een grotere porositeit vastgesteld dan bij traditioneel beton.

#### Kritieke chloridegehaltes

Voor gewapend beton is het van belang dat het wapeningsstaal niet aangetast wordt. Dit aantastingsproces wordt versneld door chloride-indinging in het beton. Om dit te vermijden dient het chloridegehalte ter hoogte van de wapening voldoende laag te zijn. In de literatuur worden enkele waarden opgegeven voor kritieke chloridegehaltes. Op basis van de opgemeten chlorideprofielen kan nagegaan worden op welke diepte in het beton deze voorkomen, zie Tabel 4.12. In deze tabel zijn de concentraties op basis van Angst et al. [2009] onderzocht, namelijk 0,40 tot 2,50 m% bindmiddel totaal chloridegehalte. Deze zijn iets strenger dan de kritieke chlorideconcentraties van Song et al. [2009]. Uit de chlorideprofielen van de proefstukken uit de diffusietest blijkt dat de diepte tot waar kritieke chlorideconcentraties opgemeten worden, afneemt voor beton met 50 % en 70 % hoogovenslak ter vervanging van cement in vergelijking met traditoneel beton. Bij 85 % worden ze tot op grotere diepte waargenomen. Voor de proefstukken uit de elektrische migratietest worden grotere diepten vastgesteld, wat logisch is gezien de chlorideprofielen. De kleinste diepte wordt waargenomen voor beton met 70 % hoogovenslak als cementvervanging. Bij beton met 85 % hoogovenslak komen de kritieke concentraties voor op de grootste diepte, wat dus het meest nadelige is.

	Kritieke diepte op basis van migratietesten [mm]	Kritieke diepte op basis van diffusietesten [mm]
<b>SO</b> (Cl)	1 - 22	2 - 12
<b>S50</b> (Cl)	2 -22	3 - 8
<b>S70</b> (Cl)	0 - 18	4 - 10
<b>S85</b> (CI)	2 - 31	6 - 13

Tabel 4.12: Dieptes waar kritieke chlorideconcentraties voorkomen

## 4.5. Conclusie

Op basis van de migratietest wordt geconcludeerd dat de vervanging van Portlandcement door hoogovenslak tot 70 % een positieve invloed heeft op de weerstand van beton tegen chloriden. Hierbij worden voor zowel (kritieke) chlorideconcentraties op bepaalde diepten als kleuromslagdiepte en migratiecoëfficient de beste resultaten bekomen. Er moet wel rekening gehouden worden met een zeer kleine concentratie chloriden die tot vrij diep in het beton binnendringen. Een cementvervanging van 85 % zorgt voor minder gunstige eigenschappen in verband met de weerstand tegen chloriden. Wanneer enkel de migratiecoëfficiënt beschouwd wordt, scoort dit beton wel nog steeds beter dan traditioneel Portlandcementbeton, maar wanneer ook de dieptes van de kritieke chlorideconcentraties en de vorm van het chlorideprofiel erbij betrokken worden, kan besloten worden dat de weerstand tegen chloriden bij 85 % cementvervanging niet verbeterd wordt in vergelijking met Portlandcementbeton.

Ter begroting van de migratiecoëfficiënt voor hoogovenslakbeton mag beroep gedaan worden op de vereenvoudigde formule uit NT Build 492 [1999] en Tang [1996]. De toepassing van de vooropgestelde vrije chloridenconcentratie van 0,07 mol/l ter hoogte van de kleuromslag geeft geen noemenswaardige afwijkingen op de migratiecoëfficiënt in vergelijking met het gebruik van de experimenteel bepaalde concentraties. De maximale afwijking bedraagt 8,32 % (bij 70 % hoogovenslak ter vervanging van cement).

De weerstand tegen chloriden voor beton uit de diffusietest wordt het meest geoptimaliseerd door toevoeging van 50 % hoogovenslak ter vervanging van cement. Ondanks het feit dat de kleuromslagdiepte bij beton met 70 % hoogovenslak lager is. Slakgehaltes van 70 % zorgen voor een verlaging van de diffusiecoëfficiënt in vergelijking met traditioneel maar niet in vergelijking met 50 % hoogovenslakbeton. Wat beton met cementvervangingsgehaltes van 85 % betreft, kan hetzelfde geconcludeerd worden dan bij de migratietesten.

Op basis van de kritieke chloridegehaltes kan geconcludeerd worden dat beton met 50 à 70 % hoogovenslak ter vervanging van cement, de beste eigenschappen bezit om chloridegeïnitieerde corrosie van wapeningsstaal tegen te gaan. De kritieke chloridenconcentraties komen minder diep voor dan bij traditioneel Portlandcementbeton. Vervangingsgehaltes hoger dan 85 % zijn niet aangewezen.

#### Verder onderzoek

- Om verder te gaan op het gevoerde onderzoek is het aangewezen om bijkomende proefstukken te testen op dezelfde manier. De bekomen waarden kunnen zo al dan niet gestaafd worden. Er kan ook gezocht worden naar een methode om kleuromslag en chlorideprofiel voor hetzelfde proefstuk te bepalen.
- Evalueren van de extractiemethodes specifiek voor hoogovenslakbeton.
- Bepalen van een k-waarde op basis van de weerstand tegen chloriden van hoogovenslakbeton.

# Hoofdstuk 5 Weerstand tegen dooizouten

Als aanvulling op de weerstand tegen chloriden werd de weerstand van hoogovenslakbeton tegen vorst-dooi in combinatie met dooizouten onderzocht. Aangezien pas laat beslist werd om de invloed van hoogovenslak op deze duurzaamheidseigenschap te onderzoeken, is de literatuurstudie beperkt tot het minimum.

### 5.1. Literatuurstudie

Onderzoek naar de weerstand tegen dooizouten is vooral van belang voor de wegenbouw, om horizontale oppervlakken zoals wegen en terreinverhardingen ijs- en sneeuwvrij te krijgen. Enkele veel gebruikte dooizouten zijn NaCl, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, calciumacetaat en magnesiumacetaat,

#### 5.1.1. Aantastingsmechanisme

Wanneer ijs op beton ontdooit, wordt het water capillair opgezogen. Op de horizontale oppervlakken kan een dun waterlaagje blijven staan kan de kritische waterverzadigingsgraad bereikt worden in de oppervlaktezone. De warmte die nodig is om ijs te ontdooien wordt onttrokken aan de oppervlaktelaag van het beton. Daar daalt de temperatuur plots waardoor een temperatuurschok optreedt in het beton. Dit temperatuurverschil tussen de toplaag en de rest van het beton leidt tot inwendige spanningen die aanleiding geven tot scheurvorming in de oppervlaktezone. Eens het ijs ontdooid is, ontstaat water met een hoog chloridegehalte. De

chloriden worden dus mee capillair opgezogen. Het aanwezige zout zorgt voor een vriespuntverlaging, die toeneemt naarmate de concentratie toeneemt. Dieper in het beton vermindert de concentratie maar stijgt de betontemperatuur. De combinatie vriespunt/betontemperatuur kan ervoor zorgen dat twee bevroren lagen in het beton gescheiden worden door een tussenliggende niet-bevroren laag. Als bij verdere temperatuursdaling het water in deze laag eveneens bevriest vindt het geen expansieruimte en drukt het de bovenlaag weg. Dit effect wordt afschilfering genoemd. [Apers, 2006]

#### 5.1.2. Invloed van hoogovenslak

Uit onderzoek van Bleszynski et al. [2002] wordt geconcludeerd dat de weerstand van hoogovenslakbeton tegen dooizouten onvoldoende is en lager in vergelijking met de weerstand van traditioneel Portlandcementbeton. De weerstand neemt aanzienlijk af met toenemende slakgehaltes. Chidiac en Panesar [2008] concluderen hetzelfde maar nuanceren de uitspraak voor de weerstand van hoogovenslakbeton met een ouderdom van 2 jaar. Bleszynski et al. vergelijken hun resultaten met tal van andere laboratoriumonderzoeken en besluiten dat overal hetzelfde aangetoond wordt. Wel wordt een verschil waargenomen met veldonderzoeken. Daar blijft beton met hoogovenslak voldoende weerstandbeidend na inwerking van dooizouten. Hoewel de redenen voor de lagere weerstand niet duidelijk zijn, wordt verondersteld dat het te maken heeft met de tragere hydratatie, hogere capillaire stijghoogte en een onvoldoende uithardingsregime. Chidiac en Panesar [2008] onderzochten ook de invloed van de ouderdom en concluderen dat hoogovenslakbeton, met 40 % slak of meer, dat aan de dooizoutproef onderworpen werd, op 2 jaar ouderdom een kleiner massaverlies heeft dan hoogovenslakbeton dat beproefd werd op 120 dagen ouderdom. Uit een ander artikel van hen [2009] wordt het massaverlies op 28 dagen vergeleken met het massaverlies op 120 dagen, zie Figuur 5.1. Beton met een ouderdom van 28 dagen dat onderworpen wordt aan vorst/dooi-cycli met dooizouten vertoont een toenemend massaverlies bij stijgende slakgehaltes. Dit is in tegenstelling tot beton dat op 2 jaar ouderdom beproefd werd. Hierbij neemt het massaverlies af indien het percentage hoogovenslak ter vervanging van cement toeneemt tot 40 %. Hogere gehaltes dan 40 % doen het massaverlies weer toenemen, met uiteindelijk hogere waarden dan bij traditioneel beton voor slakgehaltes vanaf 60 %.



Figuur 5.1: Cumulatief massaverlies ten gevolge van dooizouten

Bron: Panesar en Chidiac [2009]

Stark en Ludwig [1997] tonen aan dat de vervanging van cement door hoogovenslak vanaf gehaltes van meer dan 55 % op een ouderdom van 28 dagen een aanzienlijke vermindering van de weerstand tegen dooizouten teweeg brengt in vergelijking met beton op basis van 100 % Portlandcement. Terwijl de verschillen bij gehaltes lager dan 55 % minder uitgesproken zijn en gelijk lopen met het cumulatief massaverlies van traditioneel beton. Voor slakgehaltes lager dan 45 % wordt een betere weerstand tegen dooizouten opgetekend. Ze kennen dit fenomeen toe aan de verdeling van de luchtholten in het beton, die ontoereikend is bij hoge slakgehaltes en aan de capillaire zuiging ter hoogte van het oppervlak die groter is bij slakkenbeton dan bij traditioneel beton, zie Figuur 5.2.



Figuur 5.2: Capillaire porositeit bij hoogovenslakbeton

Bron: Stark en Ludwig [1997]

Beton met zeer hoge slakgehaltes (85%) werden onderzocht op de weerstand tegen dooizouten door Knaack en Stark [1997], zie Figuur 5.3.



Figuur 5.3: Cumulatief massaverlies ten gevolge van dooizouten bij 85% hoogovenslakbeton (BFC in de grafiek)

Bron: Knaack en Stark [1997]

In bovenstaande figuur wordt beton op basis van 85% hoogovenslak ter vervanging van cement en met een ouderdom van 28 dagen vergeleken met beton op basis van supergesulfatiseerd cement. Hierbij valt op dat de afschilfering van het hoogovenslakbeton tijdens de eerste cycli zeer hoge toenames kent. Deze toenames nemen af naarmate het aantal cycli oploopt.

## 5.2. Materialen en methoden

#### 5.2.1. Materialen

De betonmengelingen die gebruikt werden om de weerstand tegen dooizouten te onderzoeken, zijn dezelfde als in Hoofdstuk 4 waar de weerstand tegen chloriden onderzocht werd.

#### 5.2.2. Methoden

Bepaling van de weerstand tegen dooizouten gebeurde in overeenstemming met EN 1339 Bijlage D [2003].

De proefstukken die voor deze test gebruikt werden, waren ~ 23 weken oud en zijn dezelfde als bij de diffusie- en CTH-test. Ze werden in rubberen hulzen geplaatst en vervolgens werd thermische isolatie aangebracht. Op het vrije proefoppervlak werd een 3 % NaCl-oplossing gegoten (5  $\pm$  2 mm). Om verdamping te voorkomen werd een polyethyleenfolie over het proefstuk aangebracht. Deze mocht tijdens de proef niet in contact komen met het vriesmedium. De proefstukken werden in de vorst-dooikast geplaatst, waar ze onderworpen werden aan herhaalde vorst-dooicycli. Deze tijd-temperatuurcycli moeten binnen de intervallen blijven zoals weergegeven in EN 1339 Bijlage D [2003], zie Figuur 5.4.



Figuur 5.4: Tijd-temperatuurcyclus

Gedurende minstens 7 en hoogstens 9 uur per cylcus stijgt de temperatuur boven 0 °C. Na 7, 14, 21 en 28 cylci werd het afgeschilferd materiaal van het proefoppervlak verzameld door spoeling en door borstelen tot geen materiaal meer loskwam. Dit werd op filterpapier gegoten en gedroogd bij  $105 \pm 5$  °C. Na 24 h kon het drooggewicht van het materiaal bepaald worden. Uiteindelijk is het de bedoeling om het massaverlies per oppervlakte-eenheid van het proefstuk (L) te begroten, dit kan door de droge massa van het losgekomen materiaal (M) te delen door de oppervlakte van het proefstuk (A):

$$L = \frac{M}{A} \tag{5.1}$$

De begrootte waarde L wordt uitgedrukt in kg/m<sup>2</sup>.

### 5.3. Resultaten

De resultaten betreffende de weerstand van hoogovenslakbeton tegen dooizouten worden bekomen door de werkwijze, beschreven in Deel 5.2.2, toe te passen. Per mengeling werd van 4 proefstukken het massaverlies per 7cycli (dagen) opgemeten. De gedetailleerde meetgegevens per proefstuk worden toegevoegd in Bijlage E. De cilinders waren ongeveer 24 weken oud toen ze beproefd werden. De gemiddelde cumulatieve waarden die op die manier per betonmengeling bekomen werden, zijn weergegeven in Tabel 5.1. Naast de massa van het losgekomen materiaal uitgedrukt in g, wordt ook het massaverlies per oppervlakteeenheid in  $kg/m^2$  en de standaardfout op het gemiddelde weergegeven.

	Gemiddelde			Ge	emiddeld 1	nassaver	lies		
	oppervlakte	Na 7	′ cycli	Na 14	4 cycli	Na 2	1 cycli	Na 2	8 cycli
	[mm <sup>2</sup> ]	[g]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	[kg/m <sup>2</sup> ]
SO <sub>(Cl)</sub>	7934,49	2,47 ± 0,77	0,31 ± 0,10	10,29 ± 1,15	1,30 ± 0,15	18,02 ± 1,30	2,27 ± 0,17	24,76 ± 1,64	3,12 ± 0,21
<b>S50</b> <sub>(Cl)</sub>	7934,10	5,76 ± 1,44	0,73 ± 0,18	11,25 ± 1,73	1,42 ± 0,21	15,93 ± 2,04	2,01 ± 0,25	19,60 ± 2,22	2,47 ± 0,27
<b>S70</b> <sub>(Cl)</sub>	7931,93	22,20 ± 5,16	2,80 ± 0,65	29,55 ± 7,27	3,72 ± 0,92	32,96 ± 7,92	4,15 ± 1,00	36,67 ± 8,31	4,62 ± 1,05
<b>S85</b> (Cl)	7930,15	68,04 ± 4,36	8,58 ± 0,55	89,52 ± 3,81	11,29 ± 0,48	100,30 ± 4,98	12,65 ± 0,62	106,03 ± 5,69	13,37 ± 0,71

Tabel 5.1: Dooizouten - Gemiddelde meetresultaten

De gemiddelde resultaten, uitgedrukt in kg/m<sup>2</sup> en gemeten per 7 cycli (dagen), worden grafisch weergegeven in Figuur 5.5. Hierbij wordt ook de standaardfout op het gemiddelde per meting aangeduid.



Figuur 5.5: Dooizouten - Gemiddeld massaverlies

Het gemiddeld massaverlies is duidelijk het grootst bij de cilinders op basis van S85<sub>(Cl)</sub>. Al na 7 cycli is dit verschil waarneembaar. Na 7 cycli treedt ook de sterkste stijging op, namelijk van 0 naar  $8,57 \pm 0,55$  kg/m<sup>2</sup>. Tijdens de daaropvolgende 7 cycli neemt de toename telkens af. Uiteindelijk bedraagt het gemiddelde massaverlies bij  $S85_{(Cl)}$  13,36 ± 0,72 kg/m<sup>2</sup>. Dit is 4,2 keer meer dan bij de proefstukken op basis van  $SO_{(CI)}$ ; 5,4 keer meer dan bij  $SSO_{(CI)}$  en 2,9 keer meer dan bij S70<sub>(Cl)</sub>. Dit toont meteen aan dat de proefstukken aangemaakt met hoogovenslakgehaltes van meer dan 50 % het grootste massaverlies hebben. Net zoals bij S85<sub>(Cl)</sub> verloopt de gemiddelde toename van het massaverlies bij de proefstukken op basis van S70<sub>(Cl)</sub> het snelst gedurende de eerste 7 cycli en zwakt deze daarna telkens af. Na 28 cycli wordt een waarde van  $4,62 \pm 1,05 \text{ kg/m}^2$  bekomen. Bij  $S50_{(Cl)}$  verloopt het massaverlies zo goed als lineair, maar bij de betonproefstukken aangemaakt met 100 % Portlandcement neemt het massaverlies per 7 cycli toe. De resultaten voor het gemiddelde massaverlies na 28 cycli bij SO<sub>(Cl)</sub> en S5O<sub>(Cl)</sub> zijn respectievelijk  $3,12 \pm 0,21$  kg/m<sup>2</sup> en  $2,47 \pm 0,27$  kg/m<sup>2</sup>. Aan de hand van een one-way ANOVA en Post-Hoc Dunnet's T3 test, voorafgegaan door een Levene's test (significantieniveau = 0,01) om de homogeniteit van de varianties na te gaan, wordt aangetoond dat het massaverlies bij betonproefstukken aangemaakt met mengeling S85<sub>(Cl)</sub>, na 28 cycli, significant hoger is dan het massaverlies na 28 cycli bij betonproefstukken op basis van de andere mengelingen. Verder blijkt dat het massaverlies bij  $S70_{(CI)}$ ,  $S50_{(CI)}$  en  $S0_{(CI)}$ onderling niet significant verschillend is na 28 dagen.

Het criterium dat opgelegd wordt, na 28 cycli, in NBN B 15-100 [2008] wordt op volgende wijze uitgedrukt:

$$L_{\text{te_testen_beton}} \le 1,20 \text{ x } L_{\text{referentiebeton}}$$
(5.2)

Waarbij het te testen beton hoogovenslakbeton is met oplopende gehaltes en het referentiebeton is traditioneel Portlandcementbeton.

Op basis van het criterium is enkel beton met een hoogovenslakgehalte van 50 % geschikt als vervanging van Portlandcement. Beton met 70 % en 85% cementvervanging voldoen niet.

### 5.4. Discussie

Uit de resultaten blijkt dat toevoeging van hoge slakgehaltes aan beton met een ouderdom van 24 weken een negatieve invloed heeft op de weerstand tegen dooizouten. Enkel de mengeling met 50 % hoogovenslak vertoont gemiddeld een lager massaverlies ten opzichte van het massaverlies bij Portlandcementbeton, hoewel het niet significant is. Het massaverlies na 28 cycli bij beton met 70% hoogovenslak ter vervanging van cement is niet significant hoger dan dat bij traditioneel beton maar voldoet niet aan het criterium opgelegd in NBN B 15-100 [2008], zie Deel 5.2.2. Stark en Ludwig [1997] kwamen ook tot deze vaststelling. Door Chidiac en Panesar [2008] wordt aangetoond dat beton met hoogovenslakgehaltes van 25 % tot 60 % en een ouderdom van 120 dagen ( $\approx$  17 weken) een dalende weerstand tegen dooizouten bezit bij stijgende gehaltes. Het massaverlies dat ze opmeten bij beton met 50 % en 60 % hoogovenslak is significant hoger dan het massaverlies bij beton met 0 % hoogovenslak. Dit is in voorliggend werk en bij Stark en Ludwig dus niet het geval. Pas als de proefstukken op een ouderdom van 2 jaar beproefd worden, bekomen ze resultaten die gelijk lopend zijn met de resultaten uit voorliggend werk. De reden waarom het beton met slakgehaltes van 50 % en 70 % op een ouderdom van 24 weken (168 dagen) beter scoort dan de verwachtingen (op basis van 28 dagen ouderdom), moet waarschijnlijk gezocht worden bij de hydratatie van hoogovenslakbeton. Het hoogovenslakbeton heeft namelijk meer tijd gehad om de hydratatiereacties te laten doorgaan en zo betere eigenschappen op te bouwen. Wanneer de betonmengeling met 85% beschouwd wordt, blijkt de weerstand tegen dooizouten zo goed als onbestaande. Het verloop van het massaverlies in functie van de tijd voor 85% hoogovenslakbeton, namelijk zeer sterkte toenames in het begin en geleidelijker nadien, komt overeen met de bevindingen van Knaack en Stark [1997]. In de literatuur wordt dit verklaard door de grotere capillaire zuiging aan het oppervlak.

#### Visueel onderzoek

Op basis van een visueel onderzoek werden de bekomen resultaten uit de metingen geverifieerd. In Figuur 5.6 wordt telkens 1 proefstuk per mengeling weergegeven dat onderworpen werd aan de proef.



Figuur 5.6: Dooizouten - Aangetast proefstuk per mengeling met v.I.n.r: S0(CI), S50(CI), S70(CI) en S85(CI)

Uit Figuur 5.6 blijkt duidelijk dat de proefstukken op basis van  $SO_{(Cl)}$  en  $S5O_{(Cl)}$  het minste aangetast zijn. Op sommige plaatsen is de oppervlaktelaag zelfs nog niet volledig verdwenen. Bij  $S7O_{(Cl)}$ -proefstukken is de negatieve invloed van NaCl in combinatie met vorst/dooicycli al beter merkbaar, enkele kleinere granulaten zijn uitgespoeld maar de grootste zitten nog steeds goed vast. Tot slot zijn er de betonnen cilinders op basis van  $S85_{(Cl)}$ . Het is duidelijk dat deze het meeste en het diepste aangetast zijn. De granulaten zijn goed zichtbaar en sommige zijn reeds uitgespoeld of zitten los. Dit geeft aan dat de resultaten van het visueel onderzoek overeenstemmen met de meetresultaten die reeds beschreven werden.

## 5.5. Conclusie

De weerstand van beton met een ouderdom van 24 weken tegen dooizouten wordt niet beïnvloedt door toevoeging van 50 % hoogovenslak ter vervanging van cement. Hogere gehaltes vertonen een dalende weerstand. Vooral 85 % hoogovenslakbeton ondergaat een significant groter massaverlies.

## **Bijlage** A

## Korrelverdelingsdiagrammen

In deze bijlage worden de korrelverdelingsdiagrammen van het gebruikte zand en de gebruikte granulaten toegevoegd.

#### Zand



Figuur A. 1: Korrelverdelingsdiagram zand 0/4







Figuur A. 3: Korrelverdelingsdiagram grind 8/16

## **Bijlage B**

Bijlage B bevat enkele resultaten bekomen met de SVA- en Wittekindtmeetprocedures om sulfaataantasting te bepalen. Er zijn slechts enkele voorbeelden opgenomen om aan te tonen dat de meetwaarden uiteenlopende zijn of grote schommelingen vertonen, waardoor geen conclusies getrokken kunnen worden.

In volgende figuur worden de SVA-metingen getoond als gemiddelde waarden met aanduiding van de standaardfout. De standaardeviaties zijn steeds groter dan de onderlinge verschillen waardoor deze niet weergegeven zijn. De S0-waarden vertonen de minste lengteverandering, terwijl de literatuur en de ASTM-proeven aangeven dat hierbij net de grootste uitzetting zou moeten optreden. Na 91 dagen zijn ze niet significant verschillend van 0 %. Indien de grenswaarden opgelegd door SVA beschouwd worden, blijkt dat geen enkele waarde hier significant van verschilt. Daardoor wordt het moeilijk om de invloed van de hoogovenslak op de weerstand tegen sulfaataantasting na te gaan.



Figuur B. 1: SVA - Meetresultaten

Volgende figuur geeft de grote schommelingen tussen opeenvolgende metingen weer voor de mortelproefstukken met 85 % hoogovenslak en ondergedompeld in een MgSO<sub>4</sub>- of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-oplossing. De lengteveranderingen zijn uitgezet in functie van het aantal metingen en niet in functie van de duurtijd. De metingen vonden plaats op de tijdstippen zoals aangegeven in Hoofdstuk 2. Hetzelfde werd waargenomen bij het uitzetten van de SO- en S50-meetpunten.



Figuur B. 2: Wittekindt - Meetresultaten S85

Wat de druksterktes betreft, die opgemeten werden als extra conctrole, is het moeilijk om conclusies. Bij de druksterktes van de S50- en S85-mortels is een duidelijker verloop waar te nemen. De sruksterkte neemt toe in de tijd. Dit is het gevolg van de tragere hydratatiereacties door toevoeging van hoogovenslak. Bij S50 neemt de druksterkte bij de mortel uit de 29,8 g/l MgSO<sub>4</sub>-oplossing na 70 dagen minder snel toe dan de mortel uit water, wat mogelijk wijst op sulfaataantasting. Hetzelfde wordt waargenomen bij S85 mortel na 56 dagen. Deze bevindingen zijn tegenstrijdig met wat in de literatuur beschreven staat. Maar door de grote variaties bij de referentiemortel, zie onderstaande figuur, wordt het moeilijk om conclusies te trekken uit deze metingen. Zo blijkt na 56 dagen sulfaataantasting op te treden aangezien de druksterktes voor de mortelproefstukken uit de 29,8 g/l MgSO<sub>4</sub>-oplossing afnemen ten opzichte van de proefstukken uit water. Na 70 dagen in de oplossing en 91 dagen wordt dit verschil echter niet meer waargenomen.



Figuur B. 3: Wittekindt - Druksterktes S0

Op volgende foto's wordt het opkrullen van de proefstukken op basis van 100 % traditoneel Portlandcementbeton getoond in vergelijking met een proefstuk met 85 % hoogovenslak ter vervanging van cement. Hieruit blijkt dat er dus wel degelijk bepaalde expansieve reacties optreden en dat deze groter zijn voor traditioneel beton. Aldus blijkt toevoeging van hoogovenslak een positieve invloed te hebben. Verder kan hieruit ook aangenomen worden dat de lengteverandering tegengewerkt wordt om een of andere niet nader onderzochte reden.



Figuur B. 4: Wittekindt en SVA - Scheuren aan de onderkant van opgekruld S0-proefstuk



Figuur B. 5: Opgekruld S0-proefstuk (onder) en S85-proefstuk (boven)

## Bijlage C

Bijlage C omvat extra gegevens in verband met de CTH-testen en de daaropvolgende chlorideanalyses.

## Kleuromslagdieptes

In deze bijlage worden de gedetailleerde opmetingen van de kleuromslagdiepte per proefstuk weergegeven. Enkel de gegevens van de proefstukken voorzien van een bekistingsvlak worden toegevoegd. Deze van de proefstukken met twee afgezaagde vlakken werden niet gebruikt in voorliggend werk. De waarden die grijs gemarkeerd zijn, werden niet meegerekend omdat ze ter plaatse van een granulaat opgemeten zijn.

<sup>\*</sup>duidt de waarden aan die buiten beschouwing gelaten werden bij de berekeningen

Bekistingsvlak					
Afstand van het midden [mm]	Kleuromslagdiepte a [mm]	Kleuromslagdiepte b [mm]			
40	19	26*			
30	20	21			
20	22	17			
10	25*	20			
0	19	22			
-10	21	27*			
-20	20	21			
-30	20	20			
-40	21	26*			
Gemiddelde	20,25	20,17			
Standaarddeviatie	1,04	1,72			
Standaardfout op gem.	0,37	0,70			

Tabel C. 1: Kleuromslagdiepte S0(CI) meting 1

Bekistingsvlak					
Afstand van het midden [mm]	Kleuromslagdiepte a [mm]	Kleuromslagdiepte b [mm]			
40	16	19			
30	18	15			
20	20	16			
10	20	18			
0	17	16			
-10	18	17			
-20	19	21			
-30	22*	26*			
-40	29*	29*			
Gemiddelde	18,29	17,43			
Standaarddeviatie	1,50	2,07			
Standaardfout op gem.	0,57	0,78			

Tabel C. 2: Kleuromslagdiepte S0(Cl) meting 2

Tabel C. 3: Kleuromslagdiepte S50(CI) meting 1

Bekistingsvlak				
Afstand van het midden [mm]	Kleuromslagdiepte a [mm]	Kleuromslagdiepte b [mm]		
40	22*	17		
30	20	14		
20	17	17		
10	18	18		
0	19	20*		
-10	20*	20*		
-20	15	15		
-30	24*	25*		
-40	29*	27*		
Gemiddelde	17,80	16,20		
Standaarddeviatie	1,92	1,64		
Standaardfout op gem.	2,86	0,73		

Bekistingsvlak					
Afstand van het midden [mm]	Kleuromslagdiepte a [mm]	Kleuromslagdiepte b [mm]			
40	10*	25*			
30	14	22*			
20	18	18			
10	18	19			
0	16	17			
-10	12	14			
-20	11*	11*			
-30	10*	12*			
-40	22*	18			
Gemiddelde	15,60	16,33			
Standaarddeviatie	3,38	3,21			
Standaardfout op gem.	1,19	1,21			

Tabel C. 4: Kleuromslagdiepte S50(CI) meting 2

Tabel C. 5: Kleuromslagdiepte S70(CI)

Bekistingsvlak				
Afstand van het midden [mm]	Kleuromslagdiepte a [mm]	Kleuromslagdiepte b [mm]		
40	14*	15*		
30	12*	14*		
20	17*	12		
10	15	12		
0	15	12		
-10	15	14		
-20	11	12		
-30	11	10		
-40	11	10		
Gemiddelde	13,00	11,71		
Standaarddeviatie	2,19	1,38		
Standaardfout op gem.	0,89	0,52		

Bekistingsvlak					
Afstand van het midden [mm]	Kleuromslagdiepte a [mm]	Kleuromslagdiepte b [mm]			
40	24	27*			
30	21	25			
20	21	25			
10	26*	25			
0	25	25			
-10	25	25			
-20	21	27			
-30	21	27			
-40	21	28*			
Gemiddelde	22,38	25,00			
Standaarddeviatie	1,92	2,00			
Standaardfout op gem.	0,68	0,76			

Tabel C. 6: Kleuromslagdiepte S85(CI)

## Chlorideprofielen

Hier worden de verschillende profielen voor alle mengelingen weergeven in een figuur met de totale gehaltes (in m% beton) en een figuur met de wateroplosbare (in m% beton).



Figuur C. 1: CTH - Totale chlorideprofielen



Figuur C. 2: CTH - Wateroplosbare chlorideprofielen

## Chlorideconcentraties

In Hoofdstuk 4 werden de chlorideprofielen weergegeven in een figuur. Hier worden de opgemeten chlorideconcentraties per laag weergegeven in tabelvorm, waarbij ook de concentratie van de titreervloeistof op het moment van de meting meegedeeld wordt.

	Tot	aal	Wateroj	olosbaar	
Laag [mm]	Concentrat 0,00967	Concentratie AgNO <sub>3</sub> = 0,009675 mol/l		ie AgNO3 = 99 mol/l	
	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)	
0-1	0,231	1,558	0,197	1,329	
1-2	0,361	2,434	0,305	2,054	
2-3	0,360	2,426	0,289	1,946	
3-4	0,369	2,488	0,258	1,739	
4-5	0,346	2,332	0,258	1,739	
5-7	0,345	2,324	0,237	1,598	
7-9	0,331	2,234	0,245	1,648	
9-11	0,309	2,086	0,234	1,575	
11-13	0,261	1,761	0,204	1,374	
13-15	0,235	1,587	0,170	1,144	
15-19	0,155	1,042	0,118	0,792	
19-23	0,056	0,379	0,044	0,294	
23-27	0,011	0,075	0,011	0,075	
27-31	0,011	0,072	0,009	0,060	
31-35	0,009	0,058	0,005	0,031	

Tabel C. 7: Chlorideconcentraties per laag voor S0(CI) meting 1

	Tot	aal	Wateroj	olosbaar	
Laag [mm]	Concentrat 0,00967	ie AgNO <sub>3</sub> = /5 mol/l	Concentrat 0,01000	Concentratie AgNO <sub>3</sub> = 0,010004 mol/l	
	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)	
0-1	0,395	2,663	0,287	1,931	
1-2	0,529	3,564	0,404	2,723	
2-3	0,471	3,177	0,411	2,773	
3-4	0,443	2,985	0,384	2,591	
4-5	0,405	2,727	0,338	2,276	
5-7	0,379	2,553	0,338	2,277	
7-9	0,365	2,462	0,287	1,931	
9-11	0,340	2,292	0,253	1,706	
11-13	0,303	2,041	0,223	1,503	
13-15	0,258	1,738	0,188	1,270	
15-19	0,114	0,767	0,069	0,467	
19-23	0,018	0,120	0,010	0,069	
23-27	0,007	0,050	0	0	
27-31	0	0	0	0	

Tabel C. 8: Chlorideconcentraties per laag voor  $S0_{(CI)}$  meting 2

Laag [mm]	Totaal Concentratie AgNO3 = 0,009402 mol/l		Wateroplosbaar Concentratie AgNO <sub>3</sub> = 0,009402 mol/l	
	0-1	0,389	2,622	0,319
1-2	0,349	2,350	0,324	2,186
2-3	0,301	2,029	0,249	1,681
3-4	0,287	1,932	0,230	1,549
4-5	0,302	2,038	0,248	1,670
5-7	0,282	1,899	0,222	1,497
7-9	0,252	1,701	0,197	1,328
9-11	0,215	1,447	0,173	1,168
11-13	0,198	1,335	0,158	1,064
13-15	0,163	1,101	0,114	0,771
15-19	0,119	0,800	0,080	0,541
19-23	0,057	0,384	0,043	0,288
23-27	0,029	0,193	0,019	0,128
27-31	0,016	0,110	0,011	0,077
31-35	0,007	0,047	0	0

Tabel C. 9: Chlorideconcentraties per laag voor S50 <sub>(Ch</sub> meting 1	Tabel C. 9: Chlorideconcentraties per la	ag voor S50(c) meting 1		
---	--	-------------------------		
	Tot	aal	Wateroj	olosbaar
-----------	---	----------------------	---	----------------------
Laag [mm]	Concentratie AgNO <sub>3</sub> = 0,009881 mol/l		Concentratie AgNO <sub>3</sub> = 0,009881 mol/l	
	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)
0-1	0,462	3,117	0,356	2,401
1-2	0,420	2,834	0,318	2,144
2-3	0,383	2,581	0,311	2,093
3-4	0,342	2,302	0,274	1,849
4-5	0,348	2,345	0,292	1,970
5-7	0,301	2,028	0,239	1,613
7-9	0,252	1,698	0,197	1,330
9-11	0,245	1,653	0,180	1,213
11-13	0,200	1,346	0,144	0,973
13-15	0,143	0,966	0,098	0,659
15-19	0,103	0.692	0,062	0,418
19-23	0,045	0,302	0,022	0,147
23-27	0,030	0,202	0,009	0,060
27-31	0,016	0,109	0	0
31-35	0,007	0,048	0	0

Tabel C. 10: Chlorideconcentraties per laag voor S50(CI) meting 2

	Tot	taal	Wateroj	olosbaar	
Laag [mm]	Concentratie AgNO <sub>3</sub> = 0,009430 mol/l		Concentratie AgNO <sub>3</sub> = 0,009996 mol/l		
	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)	
0-1	0,302	2,032	0,268	1,806	
1-2	0,283	1,908	0,239	1,613	
2-3	0,289	1,944	0,266	1,794	
3-4	0,277	1,868	0,278	1,872	
4-5	0,271	1,827	0,272	1,835	
5-7	0,264	1,780	0,268	1,807	
7-9	0,219	1,474	0,224	1,509	
9-11	0,197	1,327	0,187	1,257	
11-13	0,143	0,964	0,137	0,921	
13-15	0,096	0,644	0,093	0,625	
15-19	0,053	0,361	0,058	0,388	
19-23	0,037	0,248	0,033	0,220	
23-27	0,026	0,172	0,023	0,154	
27-31	0,023	0,158	0,020	0,132	
31-35	0,012	0,081	0,014	0,095	

Tabel C.	11:	Chlori	decon	centrat	ies p	er la	ag v	oor S	570 <sub>(CI)</sub>

	Tot	aal	Wateroj	olosbaar	
Laag [mm]	Concentratie AgNO <sub>3</sub> = 0,009430 mol/l		Concentratie AgNO <sub>3</sub> = 0,009430 mol/l		
	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)	
0-1	0,455	3,064	0,403	2,716	
1-2	0,230	1,550	0,222	1,494	
2-3	0,180	1,212	0,159	1,071	
3-4	0,177	1,194	0,154	1,038	
4-5	-	-	0,150	1,008	
5-7	-	-	0,161	1,083	
7-9	0,184	1,237	0,171	1,152	
9-11	0,164	1,106	0,149	1,002	
11-13	0,141	0,948	0,133	0,894	
13-15	0,119	0,800	0,122	0,824	
15-19	0,113	0,759	0,101	0,683	
19-23	0,086	0,581	0,087	0,584	
23-27	0,082	0,552	-	-	
27-31	0,059	0,394	0,050	0,339	
31-35	0,055	0,372	0,047	0,319	

Tabel C. 12:	Chlorideconcentraties	per	laag	voor	S85 <sub>(CI)</sub>

Bij de lagen 4-5 en 5-7 is het totale chlorideconcentratie niet opgemeten door een fout met de oplossingen. Hetzelfde geldt voor het wateroplosbare gehalte bij laag 23-27.

# **Bijlage D**

Bijlage D omvat extra gegevens in verband met de diffusie-testen en de daaropvolgende chlorideanalyses.

#### Kleuromslagdieptes

In deze bijlage worden de gedetailleerde opmetingen van de kleuromslagdiepte per proefstuk weergegeven. Enkel de gegevens van de proefstukken voorzien van een bekistingsvlak worden toegevoegd. Deze van de proefstukken met twee afgezaagde vlakken werden niet gebruikt in voorliggend werk. De waarden die grijs gemarkeerd zijn, werden niet meegerekend omdat ze ter plaatse van een granulaat opgemeten zijn.

<sup>\*</sup>duidt de waarden aan die buiten beschouwing gelaten werden bij de berekeningen

Bekistingsvlak					
Afstand van het midden [mm]	Kleuromslagdiepte a [mm]	Kleuromslagdiepte b [mm]			
40	$18,00^{*}$	12,00			
30	12,00	11,00			
20	8,00	9,00			
10	9,00	11,00			
0	10,00	9,00			
-10	11,00	8,00			
-20	10,00	13,00			
-30	9,00	12,00			
-40	14,00	10,00			
Gemiddelde	10,38	10,56			
Standaarddeviatie	1,92	1,67			

Tabel D. 1: Kleuromslagdiepte S0(CI)

Standaardfout op gem.	0,68	0,56				
Tabel D. 2: Kleuromslagdiepte S50(CI)						
Bekistingsvlak						
Afstand van het midden [mm]	Kleuromslagdiepte a [mm]	Kleuromslagdiepte b [mm]				
40	$11,00^{*}$	-				
30	10,00	7,00				
20	$8,00^{*}$	7,00				
10	$7,00^{*}$	8,00				
0	8,00	-				
-10	10,00	7,00				
-20	9,00	8,00				
-30	9,00	9,00				
-40	$8,00^{*}$	-				
Gemiddelde	9,20	7,67				
Standaarddeviatie	0,84	0,82				
Standaardfout op gem.	0,37	0,33				

Tabel D. 3: Kleuromslagdiepte S70(CI)

Bekistingsvlak					
Afstand van het midden [mm]	Kleuromslagdiepte a [mm]	Kleuromslagdiepte b [mm]			
40	5,00	6,00			
30	4,00	5,00			
20	4,00	4,00			
10	3,00	5,00			
0	$8,00^{*}$	$7,00^{*}$			
-10	$16,00^{*}$	$16,00^{*}$			
-20	$18,00^{*}$	$8,00^{*}$			
-30	9,00*	3,00			
-40	3,00	7,00			
Gemiddelde	3,80	5,00			
Standaarddeviatie	0,84	1,41			
Standaardfout op gem.	0,37	0,58			

Tabel D. 4: Kleuromslagdiepte S85 <sub>(CI)</sub>					
Bekistingsvlak					
Afstand van het midden [mm]	Kleuromslagdiepte a [mm]	Kleuromslagdiepte b [mm]			
40	$14,00^{*}$	11,00			
30	12,00	12,00			
20	12,00	12,00			
10	14,00	15,00			
0	13,00	12,00			
-10	11,00	15,00			
-20	11,00	$17,00^{*}$			
-30	9,00	$19,00^{*}$			
-40	5,00*	11,00			
Gemiddelde	11,71	12,57			
Standaarddeviatie	1,60	1,72			
Standaardfout op gem.	0,61	0,65			

Tabel D. 4: Kleuromslagdiepte S85(CI)	
---------------------------------------	--

### Chlorideprofielen

De totale en wateroplosbare chlorideprofielen per mengeling worden onderling met elkaar vergeleken.



Figuur D. 2: Diffusie - Wateroplosbare chlorideprofielen

De volgende figuren tonen enerzijds het chlorideprofiel opgetseld aan de hand van experimenteel bepaalde concentraties en anderzijds het chlorideprofiel bekomen aan de hand van de begrootte diffusiecoëfficiënt en oppervlakteconcetratie. Aangezien ze voor zowel het totale als vrije chlorideprofiel altijd ongeveer samenvallen, worden bij wijze van voorbleed alleen de totale profielen weergegeven.



Figuur D. 3: Diffusie - Vergelijking van de chlorideprofielen voor S0<sub>(Cl)</sub> met opgemeten concentraties en bepaald via diffusiecoëfficiënt D<sub>nssd</sub> en oppervlakteconcentratie c<sub>s</sub>



Figuur D. 4: Diffusie - Vergelijking van de chlorideprofielen voor S50<sub>(Cl)</sub> met opgemeten concentraties en bepaald via diffusiecoëfficiënt D<sub>nssd</sub> en oppervlakteconcentratie c<sub>s</sub>



Figuur D. 5: Diffusie - Vergelijking van de chlorideprofielen voor S70<sub>(CI)</sub> met opgemeten concentraties en bepaald via diffusiecoëfficiënt D<sub>nssd</sub> en oppervlakteconcentratie c<sub>s</sub>



Figuur D. 6: Diffusie - Vergelijking van de chlorideprofielen voor S85<sub>(CI)</sub> met opgemeten concentraties en bepaald via diffusiecoëfficiënt D<sub>nssd</sub> en oppervlakteconcentratie c<sub>s</sub>

#### Chlorideconcentraties

In Hoofdstuk 4 werden de chlorideprofielen weergegeven in een figuur. Hier worden de opgemeten chlorideconcentraties per laag weergegeven in tabelvorm, waarbij ook de concentratie van de titreervloeistof op het moment van de meting meegedeeld wordt.

	Tot	aal	Wateroj	olosbaar	
Laag [mm]	Concentratie AgNO <sub>3</sub> = 0,009531 mol/l		Concentratie AgNO <sub>3</sub> = 0,010469 mol/l		
	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)	
0-1	0,438	2,949	0,339	2,287	
1-2	0,375	2,526	0,273	1,843	
2-3	0,320	2,154	0,243	1,641	
3-4	0,276	1,858	0,195	1,315	
4-5	0,241	1,624	0,184	1,243	
5-7	0,197	1,328	0,128	0,862	
7-9	0,142	0,954	0,069	0,468	
9-11	0,083	0,558	0,035	0,238	
11-13	0,033	0,221	0,007	0,05	
13-15	0,016	0,109	0	0	
15-19	0	0	0	0	

Tabel D. 5: Chlorideconcentraties per laag voor SO(CI)

Tabel D. 6: Chlorideconcentraties per laag voor S50(CI)

	Totaal Concentratie AgNO <sub>3</sub> = 0,009531 mol/l		Wateroplosbaar			
Laag [mm]			Concentratie AgNO <sub>3</sub> = 0,010469 mol/l			
	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)		
0-1	0,589	3,968	0,590	3,979		
1-2	0,484	3,259	0,474	3,192		
2-3	0,355	2,396	0,322	2,174		
3-4	0,275	1,856	0,221	1,491		
4-5	0,183	1,235	0,150	1,013		
5-7	0,119	0,802	0,080	0,536		
7-9	0,050	0,339	0,023	0,156		
9-11	0,032	0,214	0	0		
11-13	0	0	0	0		

Loog[mm]	Totaal Concentratie AgNO <sub>3</sub> =		Wateroplosbaar Concentratie AgNO <sub>3</sub> =	
Laag [mm]	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)
0-1	0,741	4,996	0,786	5,295
1-2	0,486	3,275	0,574	3,870
2-3	0,458	3,090	0,457	3,082
3-4	0,334	2,250	0,362	2,439
4-5	0,275	1,856	0,263	1,771
5-7	0,174	1,173	0,148	0,995
7-9	0,093	0,624	0,075	0,508
9-11	0,053	0,360	0,035	0,238
11-13	0,025	0,166	0,019	0,128
13-15	0,017	0,116	0	0

Tabel D. 7: Chlorideconcentraties per l	aag voor S70 <sub>(Cl)</sub>
---	------------------------------

Tabel D. 8: Chlorideconcentraties per laag voor S85(CI)

	TotaalConcentratie AgNO3 =Laag [mm]0,010469 mol/l		Wateroplosbaar Concentratie AgNO <sub>3</sub> = 0,010638 mol/l	
Laag [mm]				
	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)	c (m% beton)	c (m% bindmiddel)
0-1	0,817	5,507	0,859	5,789
1-2	0,519	3,499	0,474	3,196
2-3	0,469	3,159	-	-
3-4	0,428	2,881	-	-
4-5	0,397	2,674	0,356	2,399
5-7	0,314	2,113	0,300	2,023
7-9	0,195	1,316	0,180	1,216
9-11	0,112	0,753	0,099	0,669
11-13	0,054	0,363	0,071	0,480
13-15	0,043	0,290	0,054	0,366
15-19	0,027	0,185	0,034	0,232
19-23	0,018	0,123	0,013	0,085
23-27	0	0	0	0

Bij het wateroplosbare gehalte van laag 2-3 en laag 3-4 was de titratievloeistof op waardoor het volume lucht dat opgezogen werd meegerekend werd. Daarom zijn deze metingen verwijderd.

### **Bijlage E**

In deze bijlage worden extra gegevens omtrent de metingen tegen dooizouten toegevoegd. Op de grafieken wordt het massaverlies per proefstuk en per 7 vorst/dooi-cycli uitgezet.



Figuur E. 1: Massaverlies per proefstuk op basis van SO(CI)



Figuur E. 2: Massaverlies per proefstuk op basis van S50(CI)



Figuur E. 3: Massaverlies per proefstuk op basis van S70(CI)



Figuur E. 4: Massaverlies per proefstuk op basis van S85(CI)

### **Bibliografie**

Aantastingdoorsulfaten[Online]. -08November2009. -http://www.cementenbeton.nl/vakinformatie-subcontent/aantasting-door-sulfaten.html.

**Almeida I. R.** Resistance of high strength concrete to sulfate attack: soaking and drying test, Concrete durability, American Concrete Institute SP 100. - 2009 - pp. 1073-1092.

Alonso C., Andrade C., Castellote M., Castro P. Chloride treshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar, Cement and Concrete Research. - 2000 - Vol. 30 - pp. 1047-1055

Alonso C., Castellote M. en Andrade C. Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements., Electrochemica Acta. - 2002 - Vol. 47 - pp. 3469-3481

Andrade C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measerments, Cement and Concrete Research. - 1993 - Vol. 23 (9) - pp. 724-742

Angst U., Elsener B., Larsen C.K., Vennesland θ. Critical chloride content in reinforced concrete - A review., Cement and Concrete Reasearch. - 2009 - Vol. 39 - pp. 1122-1138

**Apers J.** Duurzaamheid van beton, Betontechnologie. - Brussel : Belgische Betongroepering - 2006. - Vol. V.

**ASTM International** Designation C 989-06: Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars, X3. EFFECTIVENESS OF SLAG IN PREVENTING EXCESSIVE EXPANSION OF CONCRETE DUE TO ALKALIAGGREGATE. - August 2006. - p. 5.

**ASTM International** Designation: C 1012-04: Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution. - February 2004. - p. 6.

Atis B. D. en Bilim C. Wet and dry cured compressive strength of concrete containing ground granulated blast-furnace slag, Building and Environment. - 2007. - Vol. 42 (8) - pp. 3060-3065.

Audenaert K. Transportmechanismen in zelfverdichtend beton in relatie met carbonatatie en chloridepenetratie, Doctoraatsthesis / Universiteit Gent. - Gent, 2006 - p. 370

Bakharev T., Sanjayan J. G. en Cheng Y. B. Sulfate attack on alkali-activated slag concrete, Cement and Concrete Research. - 2002. - Vol. 36. - pp. 211-216.

Barberon F., Baroghel-Bouny V., Zanni H., Bresson B., d'Espinose de la Caillerie J.-B., Malosse L., Gan Z. Interactions between chloride and cement-paste materials, Magnetic Resonance Imaging. - 2005 - Vol. 23 - pp. 264-272

**Bassuoni M. T., Nehdi M. L.** Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading, Cement and Concrete Research - Vol. 39 - 2009 - pp. 206-226

**Bellman F., Moser B. en Stark J.** Influence of sulfate solution concentration on the formation of gypsum in sulfate resistance test specimen, Cement and Concrete Reasearch. - February 2006. - Vol. 36 - pp. 358-363

**Bentur A., Cohen M.D.** Effect of condensed silica fume on the microstructure of the interfacial zone in Portland cement mortars., Journal of the American Ceramic Society. - 1987 - Vol. 70 - pp. 738-743

**Berndt M. L.** Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate, Construction and Building Materials. - 2009. - Vol. 23. - pp. 2606-2613.

**Bleszynski R., Hooton R. D., Thomas M. D. A. en Rogers C. A.** Durability of Ternary Blend Concretes with Silica Fume and Blast-Furnace Slag: Laboratory and Outdoor Exposure Site Studies., ACI Materials Journal. - 2002 - Vol. 99 (5) - pp. 499-508

**Bleszynski R., Hooton R.D., Thomas M.D.A. en Rogers C.A.** Durability of Ternary Blend Concrete with Silica Fume and Blast-Furnace Slag: Laboratory and Outdoor Exposure Site Studies., ACI Materials Journals. - September-October 2002 - Vol. 99 (5) - pp. 499-508

**Bouikini A., Swamy R. N. en Bali A.** Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag, Construction and Building Materials. - 2009. - Vol. 23. - pp. 2839-2845.

**Brown P. en Hooton R. D.** Ettringite and thaumasite formation in laboratory concretes prepared using sulfate-resisting cements, Cement and Concrete Composites. - June/August 2002. - Vol. 24 (3-4) - pp. 361-370.

**Brown P. W.** An evaluation of sulfate resistance of cements in a controlled environment, Cement and Concrete Research. - 1981. - Vol. 11. - pp. 719-727. - Geciteerd uit Van Tittelboom et al., 2009.

**Brown P. W., Hooton R. D. en Clark B. A.** The co-existence of thaumasite and attringite in concrete exposede to magnesium sulfate at room temperature and the influence of blast-furnace slag substitution on sulfate resistance, Cement and Concrete Composites. - December 2003. - Vol. 25 (8) - pp. 939-945.

**Brown P., Hooton R. D. en Clark B.** Microstructural changes in concretes with sulfate exposure, Cement and Conrete Composites. - November 2004. - Vol. 26. - pp. 993-999.

**Castellote M. en Andrade C. (a)** Round-robin test on chloride analysis in concrete - Part I: Analysis of total chloride content., Materials and Structures. - November 2001 - Vol. 34 pp. 532-556

**Castellote M. en Andrade C. (b)** Round-robin test on chloride analysis in concrete - Part II: Analysis of water soluble chloride content., Materials and Structures. - November 2001 -Vol. 34 - pp. 589-598

**Castellote M., Alonso C., Andrade C., Castro P. en Echeverria M. (a)** Alkaline leaching method for the determination of the chloride content in the aqueous phase of hardened cementitious materials., Cement and Concrete Research. - 2001 - Vol. 31 - pp. 233-238

**Castellote M., Andrade C. en Alonso C. (a)** Phenomenological mass-balance-based model of migration tests in stationary conditions: application to non-steady-state tests., Cement and Concrete Research. - 2000 - Vol. 30 - pp. 1885-1893

**Castellote M., Andrade C. en Alonso C. (b)** Electrochemical removal of chlorides: Modeling of the extraction, resulting profiles and determination of the efficient time of treatment., Cement and Concrete Research. - 2000 - Vol. 30 - pp. 615-621

**Castellote M., Andrade C. en Alonso C. (b)** Non-steady-stat chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests. Part II: Different experimental conditions. Joint Relations., Materials and Structures. - July 2001 - Vol. 34 - pp. 323-331

**Castellote M., Andrade C. en Alonso C.** Accelerated simultanious determination of the chloride depassivation threshold and of the non-stationary diffusion coefficient values, Corrosion Science - 2002 - Vol. 44 - pp. 2409-2424

**Castellote M., Andrade C. en Alonso C.** Chloride binding isotherms in concrete submitted to non-steady-state migration experiments, Cement and Concrete Research - 1999 - Vol. 29 - pp. 1799-1806

**cementenbeton.nl** Aantasting door sulfaten [Online]. - 08 November 2009. - http://www.cementenbeton.nl/vakinformatie-subcontent/aantasting-door-sulfaten.html.

**cementenbeton.nl** Alkali-silicareactie, ASR [Online]. - 08 November 2009. - http://www.cementenbeton.nl/vakinformatie-subcontent/alkali-silicareactie-asr.html.

**Chaussadent T. en Arliguie G.** AFREM test procedures concerning chlorides in concrete: Extraction and titration methods., Materials and Structures. - 1999 - Vol. 32 - pp. 230-234

**Chidiac S. E., Panesar D. K.** Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28 days., Cement and Concrete Research. - 2008 - Vol. 30 - pp. 63-71

**Clifton J. R., Frohnsdorff G. en Ferraris C.** Standars for evaluating the susceptibility of cement-based materials to external sulfate attack, Conferentie: Sulfate Attack Mechanisms, Special Volume, Proceedings. - Quebec, Canada : American Ceramic Society, Westerville, OH. - 1998. - pp. 337-355.

Cohen M. D. en Mather B. Sulfate attack on concrete - Reasearch needs., ACI Materials Journal. - 1991. - Vol. 88 (1) - pp. 62-69.

**Costa A. en Appleton J.** Chloride penetration into concrete in marine environment-Part I: Main parameters affecting chloride penetration., Materials and Structures. - May 1999 -Vol. 32 - pp. 252-259

**Costa A. en Appleton J.** Chloride penetration into concrete in marine environment-Part II: Prediction of long term chloride penetration., Materials and Structures. - June 1999 - Vol. 32 - pp. 354-359

**Daems J.** Studie van het bindings- en verhardingsproces van beton met hoogovenslak of vliegas met behulp van ultrasoonmetingen, Scriptie / Faculteit Ingenieurswetenschappen; Universiteit Gent. - Gent, 2007. - p. 95.

**De Belie N.** Betontechnologische en chemische aspecten van vloeraantasting in varkensstallen, Doctoraatsthesis., 1997

**De Belie N., Monteny J. en Taerwe L.** Apparatus for accelerated degradation testing of concrete specimens, Materials and structures. - August 2002. - Vol. 35 - pp. 427-433

**De Schutter G.** Eigenschappen van betonspecie en van verhardend beton, Betontechnologie. - Brussel : Belgische Betongroepering - 2006

**Dehwah H. A. F.** Effect of sulfate concentration and associated cation type on concrete deterioration and morphological changes in cement hydrates, Construction and Building Materials. - 2007 - Vol. 21

**Delagrave A., Marchand J., Ollivier J.-P., Julien S., Hazrati K.** Chloride Binding Capacity of Various Hydrated Cement Paste Sysytems, Advn. Cem. Bas. Mat. - 1997 - Vol. 6 - pp. 28-35

**Desmyter J., Potoms G., Demars Ph, Jacobs J.** De alkali-silicareactie: basisbegrippen en belang voor België; WTCB, LIN en MET. - 2001 - p. 14

**Djerbi A., Bonnet S., Khelidje A., Baroghel-bouny V.** Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete., Cement and Concrete Research. - 2008 - Vol. 35 - pp. 877-883

**El-Hachem R. [et al.]** Influence of sulphate solution concentration on the performance of cementitiouos materials during external suplhate attack, Conferentie: Concrete in Aggressive Aqueous Environments, Performance, Testing and Modeling. - Toulouse, France : RILEM Publications SARL. - 2009 - pp. 28-36

EN 1339, Bijlage D: bepaling van de vorst/dooibestandheid met dooizouten. - 2003 - pp. 35-40

Erdogan T. Y. Concrete [Tijdschrift]. - Ankara : Metu Press, 2003. - In het Turks.

**Escalante-Garcia J. I. [et al.]** Coarse blast furnace slag as a cementitious material, comparative study as partial replacement of Portland cement and as an alkali activated cement, Construction and Building Materials. - 2009. - Vol. 23. - pp. 2511-2517.

**Escalante-Garcia J. I. en Sharp J. H.** Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in portland cements: part II, blended cements., Cement and Concrete Research. - 1995. - Vol. 28. - pp. 1259-1274. - Geciteerd uit Daems, 2007.

**Fernández-Jiménez A. en Puertas F.** The alkali–silica reaction in alkali-activated granulated slag mortars with reactive aggregate, Cement and Concrete Research. - 2002. - Vol. 32. - pp. 1019-1024.

**Ferraris C., Stutzman P., Peltz M. en Winpigler J.**Developing a more rapid test to assess sulfate resistance of hydraulic cements, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. - September-October 2005. - Vol. 110 (5) - pp. 529-540.

**Germann Instruments A/S** RCTW: Instruction and Maintenance Manual (RCTW-1092-2)., - January 2006

**Glasser F. P.** The thermodynamics of attack on portland cement with special reference to sulfate, Conferentie: Concrete in Aggressive Aqueous Environments, Performance, Testing and Modeling. - Toulouse, France. - 2009.

**Glasser Fredrik P., Marchand Jacques en Samson Eric** Durability of Concrete - Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions, Cement an Concrete Research. - 2008. - Vol. 38. - pp. 226-246.

**Haynes H.** Sulfate attack on concrete: laboratory versus field experience, Concrete International. - 2002. - Vol. 24 (7) - pp. 65-70.

Hewlett Peter Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Fourth Edition. - 2004. -

**Higgins D. D. en McLellan G.** Effectiveness of Slag Cement in Preventing Alkali-Silica Reaction: Ten-Year Results (SP263-03)., ACI Special Publication - October 2009 - Vol.: 263 - pp. 31-42.

**Higgins D. D.** Increased sulfate resistance of ggbs concrete in the presence of carbonate, Cement and Concrete Composites. - 2003. - Vol. 25. - pp. 913-919.

**Hime W. G. en Mather B.** "Sulfate attack", or is it?, Cement and Concrete Research. - 1999. - Vol. 29. - pp. 789-791.

**Hwang C. L en Shen D. H.** The effects of blast furnace slag and fly ash on the hydration of portland cement., Cement and Concrete Research. - 1991. - Vol. 21. - pp. 410-425. - Geciteerd uit Daems, 2007.

**Innis F. A. en Thomas M. D. A.** Use of the accelerated mortar bar test for evaluating the efficacy of mineral admixtures for conctrolling expansion due to alkali-silica reaction. - 1999.

**Irassar E. F., Di Maio A., Batic O. R.** Sulfate attack on concrete with mineral admixtures, Cement and Concrete Research - Vol. 26 (1) - January 1996 - pp. 113-123

**Ismail Z. Z. en AL-Hashmi E. A.** Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete, Waste Management. - 2009. - Vol. 29. - pp. 655-659.

**Izquierdo D., Alonso C., Castellote M. en Andrade C.** Potentiostatic dtermination of chloride threshold values for rebar depassivation: Experimental and statistical study., Electrochemica Acta. - 2004 - Vol. 49 - pp. 2731-2739

Khatri R. P., Sirivivatnanon V. en Yang J. L. Role of permeability in sulphate attack, Cement and concrete. - 1997. - Vol. 27 (8) - pp. 1179-1189.

**Knaack U. en Stark J.** Frost and frost-deicing salt resistance of supersulphated cement concrete., Proceedings 34 of the International RILEM Workshop: Frost resistance of concrete. - 1997

Ladang C Vliegas, microsilica, fillers, slakken, ...; Betontechnologie. - Brussel : Belgische Betongroepering, 2006. - Vol. II.5.1.

Ladang C. en Xhonneux C. Cement, Betontechnologie. - Brussel: Belgische Betongroepering. - 2006. - Vol. II.1.

Lam C. S., Poon C. S. en Chan D. Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass – ASR consideration, Cement & Concrete Composites. - 2007. -Vol. 29. - pp. 616-625.

Lambotte H. Beton, een veelzijdig bouwmateriaal, Betontechnologie. - Brussel : Belgische Betongroepering. - 2006. - Vol. I.

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

Lee S. T., Moon H. Y. en Swamy R. N. Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss, Cement and Concrete Composites. - November 2006. - Vol. 24 (8) - pp. 993-999.

**Leng F., Feng N., Lu X.** An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete., Cement and Concrete Research. - 2009 - Vol. 30 - pp. 989-992

**Liu Z.** Physicochemical study on the interface zone of concrete exposed to different sulfate solutions, Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science. - December 2006. - pp. 167-174.

Liu Z., Deng D. en De Schutter G. The real world of sulfate attack on concrete - UGent - Gent, 2009. - p. 28. - Nog niet gepubliceerd.

**Liu Z.** study of the Basic Mechanisms of Sulfate Attack on Cementitious Materials, Doctoral thesis, UGent - 2010 - p.198

Luo R., Cai Y., Wang C. en Huang X. Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete., Cement and Concrete Research. - 2003 - Vol. 33 - pp. 1-7

**Matschei T. en Glasser F. P.** The role of sodium sulfate in sumfate attack, Materials and Structures. - 2008. - in press.

**Meck E., Sirivivatnanon V.** Field indicator of chloride penetration depth., Cement and Concrete Research. - 2003 - Vol. 33 - pp. 1113-1117

Mehta P. K. en Gjorv O. E. A new test for sulfate resitance of cements, Journal of Testing and evaluation. - 1974. - Vol. 2 (6) - pp. 510-515. - Geciteerd uit Van Tittelboom et al., 2009.

**Mehta P. K.** Evaluation of sulfate-resisting cements by a new test method, Journal of ACI. - 1975. - pp. 573-575. - Geciteerd uit Van Tittelboom et al., 2009.

**Mehta P. K.** Sulfate attack on concrete: separating myths form reality, Concrete International. - 2000. - Vol. 22. (5) - pp. 57-61.

**Mehta P. Kumar** Concrete Technology for Sustainable Development, Concrete International, November. - 1999. - pp. 47-53.

**Mehta P. Kumar** Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development, Concrete International, July. - 2002. - pp. 23-28.

**Mehta P. Kumar** Reducing the Environmental Impact of Concrete, Concrete International, October. - 2001. - pp. 61-66.

**Menéndez E. en Andrade C.** Analysis of deterioration of the concrete of a sewer for industrial waste water with sulphates, Conferentie: Concrete in Aggressive Aqueous Environments, Performance, Testing and Modeling. - Toulouse, France, 2009.

**Meyer C.** The greening of the concrete industry, Cement and Concrete Composites. - 2009. - Vol. 31. - pp. 601-605.

**Mielich O. en Öttl C.** Practical investigation of the sulfate resistance of concrete from construction units, Otto-Graf-Journal. - 2004. - Vol. 15. - pp. 135-152.

**Monteny J.** Invloed van polymeermodificatie en cementtype op de resistentei van beton tegen chemische en biogene zwavelzuuraantasting., Doctoraatsthesis - Laboratorium Magnel voor Betononderzoek, UGent - 2002 - p. 267

Multon S., Cyr M., Sellier A., Diederich P., Petit L. Effect of aggregate size and alkali content on ASR expansion, Cement and Concrete Research. - 2010. - Vol. 40. - pp. 508-516

Multon S., Cyr M., Sellier A., Leklou N., Petit L. Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion, Cement and Concrete Research. - 2008. - Vol. 38. - pp. 350–359.

Nagataki S., Otsuki N., Wee T. H., Nakashita K. Condensation of Chloride Ion in Hardened Cement Matrix Materials and on embedded steel bars, ACI Materials Journal -1993. - Vol. 90 (4) - pp. 323-332

Naik N. N., Jupe A. C., Stock S. R., Wilkinson A. P., Lee P. L., Kurtis K. E., Sulfate attack monitored by microCT and EDXRD: influence of cement type, water-to-cement ratio, and aggregate, Cement and Concrete Research. - 2006. - Vol. 36. - pp. 144-159.

**NBN B 15-100**, Methodologie voor de evaluatie en attestering van de gebruiksgeschiktheid van cementen en toevoegsels van type II bestemd voor beton. - Januari 2008 - p.27

**NBN EN 197-1**, Cement – Deel 1: Samenstelling, specificatie en overeenkomstigheidscriteria voor gebruikelijke cementsoorten, 2000

**Neville A.** the confussed world of sulfate attack on concrete, Cement and Concrete reasearch. - August 2004. - Vol. 31 (8) - pp. 1275-1296.

Nguyen T.Q., Petkovic J., Dangla P., Baroghel-Bouny V. Modelling of coupled ion and moisture transport in porous building materials., Construction and building Materials. - 2008 - Vol. 22 - pp. 2185-2195

NT Build 443 2 Hardened concrete: Accelerated chloride penetration., Nordtest Method. - 1995 - p. 6

**NT Build 492 5** Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state experiments., Nordtest Method. - 1999 - p. 8

**Oh B.H., Jang S.Y., en Shin Y.S.** Experimental investigation of the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structures., Magazine of Concrete Reasearch. - April 2003 - Vol. 55 (2) - pp. 117-124

Ollivier J.P., Arsenault J., Truc O. en Marchand J. Determination of chloride binding isotherms from migration tests., Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Technology, Rome - 1997 - pp. 198-217

**Otsuki N., Nagataki S., Nakashita K.** Evaluation of AgNO3 Solution Spray Method for Measurment of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials., ACI Materials Journal. - November-December 1992 - Vol. 89 (6) - pp. 587-592

Pack S. W., Jung M. S., Song H. W., Kim S. H., Ann K. Y. Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment., Cement and Concrete Reasearch. - 2010 - Vol. 40 - pp. 302-312

**Pal S. C., Mukherjee A. en Pathak S. R.** Investigation of hydraulich activity of ground granulated blast furnace slag in concrete, Cement and Concrete Research. - 2003. - Vol. 33. - pp. 1481-1486.

**Panesar D. K. en Chidiac S. E.** Capillary suction model for characterizing salt scaling resistance of concrete containing GGBFS., Cement and Concrete Composites. - Vol. 31 (8) - September 2009 - pp. 570-576

**Pommersheim J. M. en Clifton J. R.** Expansion of cementitious materials exposed to sulfate solutions, Materials Research Society Symposium Proceedings. - 1994. - Vol. 33. - pp. 363-368.

**Pradhan B., en Bhattacharjee B.** Role of Steel and Cement Type on Chloride-Induced Corrosion in Concrete., ACI Materials Journal. - November 2007 - p. 12

**Puertas F. [et al.]** Alkali-aggregate behaviour of alkali-activated slag mortars: Effect of aggregate type, Cement & Concrete Composites. - 2009. - Vol. 31. - pp. 277-284.

**Rajamane N. P., Peter J. A., Dattatreya J. K., Neelamegam M. en Gopalakrishnan S.** Improvement in Properties of High Performance Concrete with Partial Replacement of Cement by Ground Granulated Blast Furnace Slag., IE (I) Journal-CV. - May 2003 - Vol. 84 pp. 38-42 **Ramyar A., Topal A. en Andiç Ö.** Effects of aggregate size and angularity on alkali–silica reaction, Cement and Concrete Research. - 2005. - Vol. 35. - pp. 2165-2169.

**Rangaraju P. E. en Desai J.** Effectiveness of fly ash and slag in mitigating alkali–silica, Journal of Materials in Civil Engineering., ASCE - January 2009. - Vol. 21 (1) - pp. 19-31.

**Rangaraju P. R. en Olek J.** Potential for acceleration of ASR in presence of pavement deicing chemicals., Research Rep. No. IPRF 01-G-002-03-9. - Innovative Pavement Research Foundation - 2007. - Geciteerd uit Rangaraju et al., 2009.

**RILEM (a)** RILEM TC 178-TMC: 'Testing and modeling chloride penetration in concrete' Analysis of total chloride content in concrete: Recommendation., Materials and Structures. - November 2002 - Vol. 35 - pp. 583-585

**RILEM (b)** RILEM TC 178-TMC: 'Testing and modeling chloride penetration in concrete' Analysis of water soluble chloride content in concrete: Recommendation., Materials and Structures. - November 2002 - Vol. 35 - pp. 586-588

**RILEM** RILEM TC 106-AAR: Alkali-aggregate reaction, Materials and Structures/Matériaux et Constructions. - June 2000. - Vol. 33. - pp. 283-293.

**Röwer H. en Puntke S.** Prüfung des Sulfatwiderstands von Zement nach dem Wittekindt-, SVA- und CEN-Verfahren; Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), Forschungsinstitut der Zementindustrie - 2002 - p. 3.

**Röwer H.** Statistischer E-Modul mit GrindosonicMessgerät., Verein Deutscher Zementwerke (VDZ). - 2002

**Rozière E., Loukili A., El-Hachem R. en Grondin F.**Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks, Cement and Concrete Reasearch. - 2009. - Vol. 39. - pp. 1188-1198.

Saccani A., Bonora V. en Monari P. Laboratory short-term evaluation of ASR: a contribution, Cement and Concrete Research. - 2001. - Vol. 31. - pp. 739-742.

Sahu S., Badger S. en thaulow N. Evidence of thaumasite formation in Southern California, Cement and Concrete Composites. - June/August 2002. - Vol. 24 (3-4) - pp. 379-384.

Sahu S., Badger S. en Thaulow N. Mechanism of thaumasiet formation in concrete slabs on grade in Southern California, Cement and Concrete composites. - December 2003. - Vol. 25 (8) - pp. 889-897.

Samet B. en Chaabouni M. Characterization of the Tunesian blast-furnace slag and its application in the formulation of a cement., Cement and Concrete Research. - 2004. - Vol. 34. - pp. 1153-1159.

**Sandberg P., Larsson J.** Chloride binding in cement pastes en equilibrium with synthetic pore solutions. Chloride penetrations into concrete structures., Nordic Miniseminar, Gotenberg. - 1993 - January - pp. 98-107

**Schmidt T. [et al.]** Investigations of external sulfate attack on limestone blended portland cements, Conferentie: Concrete in Aggressive Aqueous Environments, Performance, Testing and Modeling. - Toulouse, France, 2009.

Schmidt T. [et al.] Physiscal and microstructural aspects of sulfate attack on ordinary and limestone blended cements, Cement and Concrete Research. - 2009. - Vol. 39. - pp. 1111-1121.

Schnieder M., Puntke S., Sylla H. M., Lipus K.The influence of cement on sulfate resistance of mortar and concrete, Cement International. - 2002. - Vol. 1. - pp. 2-16.

**Shetata M. H. en Thomas M. D. A.** The role of alkali content of Portland cement on the expansion of concrete prisms containing reactive aggregates and supplementary cementing materials., Cement and Concrete Research - 2010 - Vol. 40 - pp. 569-574

**Shi C., Yuan Q., Deng D., Zheng K.** Test methods for the transport of chloride in concrete, Journal of the Chinese Ceramic Society - 2007 - Vol. 35 (4): pp. 522-530.

Skalny J., Marchand J. en Odler I. Sulfate attack on concrete. - New-York : Spon Press., 2002.

**Song H.-W., Pack S.-W., Ann K.Y.** Probabilistic assessment to predict the time to corrosion of steel in reincforced concrete tunnel box exposed to sea water., Construction and Building Materials. - 2009 - Vol. 23 - pp. 3270-3278

**Stanish K.** The Migration of Chloride Ions in Concrete., Phd. Thesis; Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada. - 2002 -

**Stark J. en Ludwig H. M.** Freeze-thaw and freeze-deicing salt resistance of concretes containing cement rich in granulated blast furnace slag., ACI Materials Journal. - Vol. 94 (1) - 1997 - pp. 47-55

Sulfate attack in concrete and mortar [Online]. - 2005. - 15 November 2009. - http://www.understanding-cement.com/sulfate.html.

**Swamy R.N.** Designing Concrete and Concrete Structures for Sustainable Development [Conferentie] // CANMET/ACI International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development. - Vancouver, BC, Canada. - April, 2000.

**Tang L.** Chloride transport in concrete: measurement and prediction, Chalmers University of Technology, Göteborg. - 1996 -

**Tang L. en Nilsson L. O.** Rapid Detremintation of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field, ACI Materials Journal. - Vol. 89 (1) - 1992 - pp. 49 -53

**Thomas M. D. A. en Innis F. A.** Effect of slag on expansion due to alkali-aggregate reaction on concrete, ACI Materials Journal. - November-December 1998. - Vol. 95 (6) - pp. 716-724. - Geen volledig artikel ter beschikking.

**Topçu I. B. en Canbaz M.** Properties of concrete containing waste glass, Cement and Concrete Research. - 2004. - Vol. 34. - pp. 267-274.

**Topçu I. B., Ahmet R. B. en Bilir T.** Alkali–silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Waste Management. - 2008. - Vol. 28. - pp. 878-884.

Van den Heede Ph. Porositeit en transporteigenschappen van 'groene' betonsoorten, Masterproef; Universiteit Gent: Faculteit Ingenieurswetenschappen - Gent, 2008. - p. 189.

Van Lerberghe K. en Raedt R. Duurzaamheid van beton met recyclageglas als partiële grindsubstitutie, Masterproef; Universiteit Gent: Faculteit Ingenieurswetenschappen. - Gent, 2009. - p. 109.

**Van Tittelboom K., De Belie N. en Hooton R. D.** Critical review on test methods for evaluating the resistance of concrete against sulfate attack, Conferentie: Concrete in agrassive aqueous environments, performance, testing and modeling. - Toulouse, France : RILEM Publications SARL. - 2009 - pp. 298-306.

**VDZ** Testing of sulfate reistance of cement with small and flat prisms and according to the original procedure of Koch/Steinegger and Wittekindt., Forschungsinstitut der Zementindustrie Düsseldorf - 1996 - p. 5.

Vegt I. Glas in beton, Thesis - Technische Universiteit Delft - 2003 - p.190

**Verbeck G. J.** Field and laboratory studies of the sulphate resistance of concrete, Performance of concrete. - University Toronto Press. - 1967. - pp. 113-124.

**Xie Z., Xiang W. en Xi Y.** ASR potentials of glass aggregates in water-glass activated fly Ash and portland cement mortars., Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, January/February 2003. - Vol. 15 (1) - pp. 67-74.

**Yuan Q.** Fundamental Studies on Test Methods for the Transport of Chloride Ions in Cementitious Materials, Phd. Thesis; Central South University and Universiteit Gent - 2009 - p. 176

**Yüksel I., Bilir T. en Özkan Ö.** Durability of concrete incoporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate, Building and Environment. - 2007. - Vol. 42. - pp. 2651-2659.

**Zibara H.** Binding of external chlorides by cement pastes., Phd. Thesis; Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada. - 2001 -

**Zu G. J. Z., Watt D. F. en Hudec P. P.** Effectiveness of mineral admixtures in reducing ASR expansion, Cement and Concrete Research. - 1995 - Vol. 25 (6) - pp. 1225-1236.

# Lijst met figuren

Enkel de figuren uit de tekst worden in deze lijst opgenomen, niet uit de bijlagen.

Figuur 2.1: Tijdsverloop sulfaataantasting
Figuur 2.2: Wittekindt - Opstelling
Figuur 2.3: TAP-toestel
Figuur 2.4: TAP-toestel met borstels
Figuur 2.5: ASTM - Gemiddelde lengteverandering
Figuur 2.6: SVA en Wittekindt - Aangepaste mal43
Figuur 2.7: SVA en Wittekindt - Proefstuk voorzien van verankerde meetpunten
Figuur 2.8: TAP - Gemiddelde cumulatieve straalverandering voor borstelen van proefstukken in Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Figuur 2.9: TAP - Gemiddelde cumulatieve straalverandering na borstelen van proefstukken in Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Figuur 2.10: TAP - Gemiddelde ruwheidverandering van de proefstukken in Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 47
Figuur 2.11: TAP - Gemiddelde cumulatieve straalverandering voor borstelen van   proefstukken in MgSO4
Figuur 2.12: TAP - Gemiddlede cumulatieve straalverandering na borstelen van proefstukken in MgSO <sub>4</sub>
Figuur 2.13: TAP - Gemiddelde ruwheidverandering van de proefstukken in MgSO <sub>4</sub>

Figuur 2.14: ASTM - Aantasting bij (van boven naar onder) S0 <sub>(ASTM)</sub> , S50 <sub>(ASTM)</sub> en S85 <sub>(ASTM)</sub> .
Figuur 2.15: TAP - Cilinders S0 uit 29,8 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> na 9 weken (links) en 37 weken (rechts)
Figuur 2.16: TAP - Cilinders S85 uit 29,8 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> na 9 weken (links) en 37 weken (rechts)
Figuur 2.17: TAP - Cilinders S50 [a] uit 29,8 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> na 9 weken (links) en 37 weken (rechts)
Figuur 2.18: TAP - Cilinders S50 [b] uit 3 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> na 9 weken (links) en 37 weken (rechts)
Figuur 2.19: TAP - Kristallisatie op S85-proefstuk uit Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> na 37 weken
Figuur 2.20: TAP - Kristallisatie na 37 weken bij S50 [a] (links) en S50 [b] (rechts) uit Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Figuur 2.21: TAP - Cilinders S0 uit MgSO <sub>4</sub> na 9 weken (links) en 37 weken (rechts)
Figuur 2.22: TAP - Cilinders S85 uit MgSO <sub>4</sub> na 9 weken (links) en 37 weken (rechts)57
Figuur 2.23: TAP - Cilinders S50 [a] uit MgSO <sub>4</sub> na 9 weken (links) en 37 weken (rechts)58
Figuur 2.24: TAP - Cilinders S50 [b] uit MgSO <sub>4</sub> na 9 weken (links) en 37 weken (rechts)58
Figuur 2.25: TAP - Kristallisatie na 37 weken bij S0 en S85 MgSO <sub>4</sub> -oplossingen
Figuur 2.26: XRD - Zoutkristalafzetting op S0 uit 29,8 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 60
Figuur 2.27: XRD - S0-beton van net onder zoutkristalafzetting uit 29,8 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 61
Figuur 2.28: XRD - Zoutkristalafzetting op S85 uit 29,8 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 62
Figuur 2.29: XRD - S85-beton van net onder zoutkristalafzetting uit 29,8 g/l Na2SO462
Figuur 3.1: Kernen op statief in Oberholsterbak (links) + Afdekplaat (rechts)77
Figuur 3.2: Oberholsterproef - Meetklokjes77
Figuur 3.3: Oberholsterproef - Opstelling
Figuur 3.4: Oberholsterproef - 1 week
Figuur 3.5: Oberholsterproef - 19 weken

Figuur 3.6: Oberholsterproef - Scheuren en afbrokkeling bij $SO_{(glas)}$ (links) en bij $S85_{(glas)}$
(rechts) dat 1 week oud was bij aanvang van de proef
Figuur 3.7: Oberholsterproef - Geribbeld S70 <sub>(glas)-</sub> proefstuk dat 19 weken oud was bij
aanvang van de proef
Figuur 3.8: Slijpplaatjes - overzicht86
Figuur 3.9: Slijpplaatjes - Alkali-silica gel in SO <sub>(glas)</sub> (vergroting 10x)
Figuur 3.10: Slijplaatjes - Alkali-silica gel in SO <sub>(glas</sub> ) met opening naast glas + scheur in glas (vergroting 10x)
Figuur 3.11: Slijpplaatjes - Alkali-silica gel in glas aan de rand van een S50 <sub>(glas)</sub> -kern (vergroting 10x)
Figuur 3.12: Slijpplaatjes - Alkali-silica gel in glas + scheurvorming in de cementmatrix bij S85 <sub>(glas)</sub> -beton (vergroting 10x)
Figuur 4.1: Corrosiepotentiaal92
Figuur 4.2: Definities voor kritiek chloridegehalte93
Figuur 4.3: Corrosieproces in aanwezigheid van chloride94
Figuur 4.4: Bindingscapaciteit i.f.v. vrij chloridegehalte101
Figuur 4.5: Regressieanalyse104
Figuur 4.6: Verloop van diffusiecoëfficiënt en oppervlakteconcentratie in de tijd bij hoogovenslak beton en traditioneel beton
Figuur 4.7: Schematische proefopstelling CTH + foto112
Figuur 4.8: Diffusietest - Gecoat proefstuk in huls112
Figuur 4.9: Proefopstelling diffusietest113
Figuur 4.10: Indringingsdiepte a.d.h.v. AgNO <sub>3</sub> 113
Figuur 4.11: Opstelling profile grinder (links) + Bewerkt proefstuk (rechts)115
Figuur 4.12: Metrohm MET 702116
Figuur 4.13: mV-ml curve118
Figuur 4.14: Benodigdheden bepaling chlorideconcentratie119

Figuur 4.15: CTH - Chlorideconcentratie op indringingsdiepte120
Figuur 4.16: CTH - Kleuromslagdiepte bij SO <sub>(Cl)</sub> , S5O <sub>(Cl)</sub> , S7O <sub>(Cl)</sub> en S85 <sub>(Cl)</sub> (van links naar rechts)
Figuur 4.17: CTH - Chlorideprofiel SO <sub>(Cl)</sub> met aanduiding kleuromslagdiepte (meting 1)124
Figuur 4.18: CTH - Chlorideprofiel SO <sub>(Cl)</sub> met aanduiding kleuromslagdiepte (meting 2)124
Figuur 4.19: CTH - Chlorideprofiel S50 <sub>(Cl)</sub> met aanduiding kleuromslagdiepte (meting 1)125
Figuur 4.20: CTH - Chlorideprofiel S50 <sub>(Cl)</sub> met aanduiding kleuromslagdiepte (meting 2)126
Figuur 4.21: CTH - Chlorideprofiel S70 <sub>(Cl)</sub> met aanduiding kleuromslagdiepte127
Figuur 4.22: CTH - Chlorideprofiel S85 <sub>(Cl)</sub> met aanduiding kleuromslagdiepte128
Figuur 4.23: Diffusie - Kleuromslagdiepte na 4 weken, met van links naar rechts S0(Cl), S50(Cl), S70(Cl) en S85(Cl)
Figuur 4.24: Diffusie - Chlorideprofiel SO <sub>(Cl)</sub> met aanduiding kleuromslagdiepte133
Figuur 4.25: Diffusie - Chlorideprofiel S50 <sub>(Cl)</sub> met aanduiding kleuromslagdiepte133
Figuur 4.26: Diffusie - Chlorideprofiel S70 <sub>(Cl)</sub> met aanduiding kleuromslagdiepte134
Figuur 4.27: Diffusie - Chlorideprofiel S85 <sub>(Cl)</sub> met aanduiding kleuromslagdiepte135
Figuur 5.1: Cumulatief massaverlies ten gevolge van dooizouten
Figuur 5.2: Capillaire porositeit bij hoogovenslakbeton147
Figuur 5.3: Cumulatief massaverlies ten gevolge van dooizouten bij 85% hoogovenslakbeton (BFC in de grafiek)
Figuur 5.4: Tijd-temperatuurcyclus149
Figuur 5.5: Dooizouten - Gemiddeld massaverlies150
Figuur 5.6: Dooizouten - Aangetast proefstuk per mengeling met v.l.n.r: S0 <sub>(Cl)</sub> , S50 <sub>(Cl)</sub> , S70 <sub>(Cl)</sub>
en S85 <sub>(Cl)</sub>

# Lijst met tabellen

Enkel de tabellen uit de tekst worden in deze lijst opgenomen, niet uit de bijlagen.

Tabel 1.1: Vergelijking van de samenstelling van Portlandklinker en hoogovenslak	5
Tabel 1.2: Overzicht van de gewone cementsoorten	7
Tabel 1.3: Overzicht van de klinkermineralen	8
Tabel 1.4: Chemische samenstelling cement	.11
Tabel 1.5: Chemische samenstelling hoogovenslak	.12
Tabel 2.1: Betonsamenstellingen voor weerstand tegen sulfaten	.32
Tabel 2.2: Parameters bekomen bij het aanmaken van beton	.32
Tabel 2.3 Gemiddelde druksterktes op 28 dagen	.33
Tabel 2.4: Mortelmengelingen voor Wittekindt	.33
Tabel 2.5: Mortelmengeling voor SVA	.33
Tabel 2.6: Mortelmengelingen voor ASTM	.34
Tabel 2.7: ASTM - Expansie na 224 dagen met grenswaarden	.40
Tabel 2.8: TAP - Gemiddelde straalverandering van de proefstukken in Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	.46
Tabel 2.9: TAP - Gemiddelde straalverandering van de proefstukken in MgSO <sub>4</sub>	.50
Tabel 3.1: Expansie ten gevolge van ASR	.74
Tabel 3.2: Betonsamenstellingen voor weerstand tegen ASR	.75
Tabel 3.3: Parameters bekomen bij het aanmaken van het beton	.76

Tabel 3.4: Gemiddelde druksterktes op 28 dagen
Tabel 3.5: Oberholsterproef - 1 week ouderdom 80
Tabel 3.6: Oberholsterproef - 19 weken 82
Tabel 4.1: Kritieke chloridegehaltes 95
Tabel 4.2: Gemiddelde chlorideconcentraties ter hoogte van kleuromslag op basis van      diffusietesten      109
Tabel 4.3: Betonsamenstellingen voor weerstand tegen chloriden
Tabel 4.4: Parameters die bekomen werden bij het aanmaken van het beton110
Tabel 4.5: CTH - Kleuromslagdiepte
Tabel 4.6: CTH - Porositeit
Tabel 4.7: CTH - Benadering van de concentratie wateroplosbare chloriden en vrije chlorider      ter hoogte van gemiddelde kleuromslag      129
Tabel 4.8: CTH - Migratiecoëfficiënten
Tabel 4.9: Diffusie - Kleuromslagdiepte na 4 weken 131
Tabel 4.10: Diffusie - Benadering van de concentratie wateroplosbare chloriden en vrijechloriden ter hoogte van gemiddelde kleuromslag na een diffusietest van 4 weken
Tabel 4.11: Diffusie - Diffusiecoëfficiënten 137
Tabel 4.12: Dieptes waar kritieke chlorideconcentraties voorkomen
Tabel 5.1: Dooizouten - Gemiddelde meetresultaten