

Optimale samenstelling en duurzaamheid van volledig recycleerbaar beton

Christophe Windels

Promotor: prof. dr. Nele De Belie

Begeleiders: mieke de schepper, Philip Van den Heede

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

Het blijft merkwaardig dat, wanneer een student in het voorlaatste jaar een oneindig lange lijst met mogelijke thesisonderwerpen voorgeschoteld krijgt, elke student er al snel zijn eigen favoriete onderwerp weet uit te kiezen. Toen ik verleden jaar voor deze keuze kwam te staan, sprong één scriptietitel mij meteen in het oog: “Optimale samenstelling en duurzaamheid van volledig recycleerbaar beton”. De mogelijkheid om immers beton, vaak afgeschilderd als hét symbool van onze industriële maatschappij, op actieve wijze te laten meewerken aan een meer duurzame samenleving, wekte ogenblikkelijk mijn interesse op. In de eerste plaats wil ik dan ook graag professor De Belie danken om mij de kans te bieden dit onderzoek te verrichten.

Daarnaast kan ik onmogelijk Mieke De Schepper en Philip Van den Heede vergeten te danken voor de enthousiaste hulpvaardigheid waarmee zij me steeds “gecoacht” hebben. Beide begeleiders zagen in hun functie niet enkel een superviserende rol weggelegd, maar stonden in de eerste plaats steeds klaar om mij te helpen bij de laboratoriumproeven, een antwoord te zoeken op mijn vragen en mij tijdig bij te sturen voor het schrijven van dit werk. Begeleiders in de échte zin van het woord.

Ook aan het personeel van Laboratorium Magnel een woord van dank. Voor het vervaardigen, boren of zagen van proefstukken of het uitvoeren van drukproeven stonden zij steeds paraat. Wanneer er bij het verrichten van een proef een occasioneel probleem zich voordeed, kon ik ook ten allen tijde voor hulp of raad bij hen terecht.

Tevens wil ik mijn vrienden van harte bedanken. Gedurende mijn studies in Gent stonden ze steeds klaar om mij een verse portie moed, verstrooiing of amusement te verschaffen. Bedankt!

Tot slot ben ik vooral mijn ouders erg veel dank verschuldigd. Zonder hun steun bij het studeren zelf en hun financiële investering waarmee ze mij de kans gaven deze studies te volgen, was dit werk niet tot stand gekomen. Hoewel ik de laatste jaren het overgrote deel van mijn tijd heb doorgebracht in deze studentenhoofdstad, was thuiskomen in ons eigen, kleine Westvleteren, voor mij nog altijd een verademing... Dankjewel...

Gent, juni 2010

Christophe Windels

Toelating tot bruikleen

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

"The author gives permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In the case of any other use, the limitations of the copyright have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation."

30-05-2010

Overzicht

Optimale samenstelling en duurzaamheid van volledig recycleerbaar beton

door

Christophe Windels

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

Academiejaar 2009-2010

Promotor: prof. dr. Nele De Belie

Begeleiders: ir.-arch. Mieke De Schepper, ir.-arch. Philip Van den Heede

Universiteit Gent

Faculteit Ingenieurswetenschappen

Vakgroep Bouwkundige constructies

Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Laboratorium Magnel voor Betononderzoek

Samenvatting

In december 2009 werd in Kopenhagen een internationale klimaatconferentie georganiseerd. Ondanks de ongunstige economische omstandigheden op dat moment, werden op deze top door vertegenwoordigers van 192 landen op 18 december 2009 belangrijke doelstellingen geformuleerd met betrekking tot een verminderde uitstoot van broeikasgassen en de beperking van de

temperatuurstijging op aarde. Om deze doelstellingen te behalen en een mentaliteitswijziging te bewerkstelligen, zullen beleidsmakers over de hele wereld niet alleen over het nodige lef moeten beschikken, maar zullen ook wetenschappers uit de meest diverse sectoren, bij de ontwikkeling van nieuwe of vernieuwde producten, de klemtoon nog sterker moeten leggen op de kwalitatieve ontwikkeling van deze producten.

Ook de bouwsector moet zich bewust worden van zijn impact op het milieu. De gemiddelde Europeaan stoot jaarlijks 10,5 ton CO₂ uit. Wereldwijd is 5% van de uitgestoten koolstofdioxide, dat geldt als het belangrijkste broeikasgas, afkomstig uit de cementindustrie. Bovendien wordt het sloopafval van betonconstructies slechts uitzonderlijk efficiënt aangewend en krijgen puingranulaten hoofdzakelijk minderwaardige toepassingen, zodat de term “recyclage” in dat opzicht een zeer relatief begrip blijkt.

De ambitie van volledig recycleerbaar beton bestaat erin te dienen als enige en volwaardige grondstof voor de productie van klinker. Op deze manier wordt het verbruik aan natuurlijke grondstoffen bij de productie van klinker sterk gereduceerd, krijgt het sloopafval integraal een volwaardige herbestemming en zal bovendien de CO₂-emissie gereduceerd worden.

Om het recycleerbaar beton zelf voldoende milieuvriendelijk te houden, wordt in de mengsels geopteerd cementvervangende producten zoals vliegas aan te wenden. Daarnaast moeten een hoog gehalte aan cementeerbaar materiaal en een lage W/CM-factor garant staan voor een hoge duurzaamheid. Deze duurzaamheid werd in dit onderzoek samen met de sterkte van het beton geëvalueerd en getoetst aan de sterkte en de duurzaamheid van referentiemengsels.

Concreet werden als mogelijke schademechanismen voor beton de aantasting door vorst en dooizouten, de gevoeligheid voor carbonatatie en de indringing van chloriden bij cyclische onderdompeling geanalyseerd. Zonder dat de recycleerbare mengsels daarvoor noodzakelijk traditionele betonsoorten in duurzaamheid overtreffen, worden - afhankelijk van mengsel tot mengsel - voor elk van de schademechanismen vrij goede tot zeer goede resultaten bekomen.

Op basis van deze resultaten werd een uitgebreide levenscyclusanalyse gevoerd. Dit deel van het onderzoek maakte duidelijk dat volledig recycleerbaar beton hoe dan ook een lagere milieu-impact teweeg zal brengen dan een equivalent referentiemengsel. De mate waarin het beton beter presteert, is echter volledig afhankelijk van de specifieke toepassing.

Trefwoorden: volledig recycleerbaar beton, duurzaamheid, levenscyclusanalyse

Optimal Composition and Durability of Completely Recyclable Concrete

Christophe Windels

Supervisor(s): prof. dr. ir. Nele De Belie ^a, ir.-arch. Philip Van den Heede ^a, ir.-arch. Mieke De Schepper ^a

^a Magnel Laboratory for Concrete Research, Ghent University, Ghent, Belgium

Abstract – This paper describes the results of a study on the durability aspects of completely recyclable concrete (CRC). CRC is designed to be used as raw material for clinker production, without any need for ingredient adjustment. This concrete can only have any importance in reducing the environmental impact of construction in general, if also its strength and durability is of a sufficient high quality. To compute this item, strength and durability tests were carried out on the different CRCs. Tests evaluating chloride ingress, carbonation behavior and freeze-thaw attack in combination with deicing salts were executed. Additionally, a Life Cycle Assessment was carried out on the CRCs and the results of this analysis were compared with the results of similar, but traditional concretes. In that part of the study, the results of the strength and durability tests were implemented to ensure an honest and critical review of the total environmental impact of CRC.

Keywords – completely recyclable concrete, durability, Life Cycle Assessment

I. INTRODUCTION

For every human being on earth, the construction industry produces approximately one ton of concrete per year [1]. Knowing that the production of one ton of Portland cement is responsible for the emission of approximately 870 kilograms of carbon dioxide, the cement industry is responsible for 5% of the global world emission of CO₂, which accounts for 82% of the total greenhouse gas emissions [2]. Logically, reducing the effects of the greenhouse gasses and stopping climate change, will only be possible by pushing the major polluters, such as the cement and concrete industry, towards lower emissions. Moreover, by making a completely recyclable concrete, two additional benefits are achieved. The amount of demolition waste of this type of concrete is reduced to zero and the use of raw materials for clinker production is diminished in an important way.

II. CONCRETE MIXTURES

An earlier study at Ghent University focused on the exact chemical composition needed to make a CRC [3]. Based on these results, four CRCs were produced which were compared with three different reference mixtures. The recyclable mixtures all contain a certain amount of fly ash as a binder, which reduces the environmental impact of concrete significantly, as discussed in [4]. The mixture proportions for all of the developed CRCs are shown in Table I. The reference

mixtures are called T(0.45), T(0.45)A and T(0.50). For each mixture the binder material consists of 100% CEM I 52.5 N, in proportions of 340, 340 and 320 kg/m³, respectively. The water-to-cement ratio is presented by the number between brackets in the name of the reference. T(0.45)A was entrained with 1.5ml air entraining agent per kilogram binder.

TABLE I – CONCRETE MIXTURE PROPORTIONS

	CRC 1	CRC 2	CRC 3a	CRC 3b
limestone sand 0/4 [kg/m ³]	614.2	790.1	610.8	850.2
limestone aggregate 2/6 [kg/m ³]	378.0	493.8	375.9	510.1
limestone aggregate 6/20 [kg/m ³]	666.5	329.2	662.8	289.1
porphyry aggregate 6/20 [kg/m ³]	-	-	-	49.5
limestone filler	-	50.0	50.0	50.0
fly ash	191.4	157.5	144.0	144.0
copper slag	-	32.9	-	-
gypsum	-	-	28.7	28.7
CEM I 52.5 N [kg/m ³]	292.5	-	-	-
CEM III 42.5 N LA [kg/m ³]	-	292.5	261.0	261.0
calcium aluminate cement	-	-	45.0	45.0
water [kg/m ³]	180.0	180.0	180.0	180.0
air entraining agent [ml/kg BM]	2.00	2.00	2.00	3.00
superplasticizer [ml/kg BM]	5.78	8.89	6.80	8.00
W/BM	0.40	0.40	0.40	0.40

III. TEST RESULTS

A. Strength

The mean compressive strength at 28 days of CRC 1, CRC 2, CRC 3a and CRC 3b were found to be 60.4, 52.8, 59.6 and 59.1 MPa, respectively. These values

are more or less comparable with the obtained mean compressive strengths at 28 days for T(0.45), T(0.45)A and T(0.50) which reached values of 69.3, 57.9 and 53.4 MPa, respectively.

B. Freeze-thaw resistance

The damage caused by freeze-thaw cycles in combination with deicing salts, seemed to depend highly on the concrete age at the moment of testing and the surface that was subjected to this mechanism. Despite this observation, all recyclable mixtures had a roughly similar resistance to salt scaling as reference T(0.45). CRC 2 even achieved better results than this reference. At every tested age, the scaled material from CRC 2 didn't exceed the normative limiting value of 1kg per square meter after 28 freeze-thaw cycles. Only T(0.45)A could show a significant better durability regarding freeze-thaw resistance than the CRCs.

C. Chloride ingress by cyclic submersion

It was noticed that chloride ingress by cyclic submersion couldn't cause any damage to concrete reinforcements by chloride-induced corrosion. For all of the CRCs and at all tested ages, the ingress of chlorides is limited. For a 3.5m% NaCl solution, the penetration doesn't exceed approximately 10mm after 20 weeks of exposure. Regardless the duration of the submersion cycle, no damage can ever be noted by this mechanism, since Eurocode 2 provides a minimum concrete cover of 45mm under these circumstances.

D. Carbonation

The carbonation behavior was investigated by subjecting the concrete samples to a cyclic regime of immersion in water and exposure to an increased level of 10v% carbon dioxide. Though no carbonation of reference mixture T(0.50) was identified, the CRCs performed quite well. When the depth of the carbonation front is expressed as a function of the exposure time, the carbonation coefficient can be calculated for increased and realistic CO₂ concentrations (10v% and 0.03v% respectively). Table II shows these coefficients for concrete at the age of 28 days after an exposure period of 20 weeks. It also gives an idea of the predicted ingress after 50 years of exposure to accelerated and realistic carbonation.

TABLE II – CARBONATION COEFFICIENT [MM/WEEK^{1/2}] AND PREDICTED CARBONATION DEPTH AFTER 50 YEARS [MM]

	10v% CO ₂	Ingress ⁵⁰ [mm]	0.03v% CO ₂	Ingress ⁵⁰ [mm]
T(0.50)	0.00	0.00	0.00	0.00
CRC 1	0.62	31.82	0.03	1.74
CRC 2	2.01	102.33	0.11	5.60
CRC 3a	2.65	135.10	0.15	7.40
CRC 3b	1.85	94.30	0.10	5.17

E. Life Cycle Assessment

The Life Cycle Assessment (LCA) was carried out with SimaPro, a generally accepted software program. The analysis was executed using two respected methods. A first method used was developed by the International Panel on the Climate Change (IPCC) and focuses on the Global Warming Potential (GWP) of a product during its total life cycle. A second method is called Eco-indicator 99 and computes effects on Human Health, the Quality of the Ecosystem and the use of natural Resources. As functional units, a road, a column supported isostatic beam and a cubic meter of concrete were used. CRC achieves consequently better environmental results than the reference mixtures. The environmental benefit strongly depends on the specific application in which the concrete is used. Table III shows the GWP of one cubic meter of the concrete mixtures, calculated with the IPCC method, with a time horizon of 100 years. Prefix "T" stands for traditional cement, while "R" indicates regenerated cement. Characteristics of this regenerated cement can be found in [5].

TABLE III – ENVIRONMENTAL IMPACT [IPCC, ECO-INDICATOR]

	T CRC 1	T CRC 2	T CRC 3a	T CRC 3b	T T(0.50)
GWP [kg CO ₂ -eq]	256	143	129	130	282
Eco-indicator [Pt]	6.35	4.70	4.47	4.54	5.95
	R CRC 1	R CRC 2	R CRC 3a	R CRC 3b	R T(0.50)
GWP [kg CO ₂ -eq]	233	134	120	121	261
Eco-indicator [Pt]	5.86	4.45	4.25	4.32	5.42

IV. CONCLUSIONS

This study confirms the presumption that it is possible to make a completely recyclable concrete that can achieve a similar durability and strength behavior as a traditional concrete mixture. Moreover, a Life Cycle Assessment showed, that a CRC will always cause a smaller environmental impact than the equivalent traditional concrete normally used in the same environment.

ACKNOWLEDGMENTS

The author wishes to thank all the staff of the Magnel Laboratory for their assistance and support during the experiments and the writing of this paper.

REFERENCES

- [1] Huntzinger D.N. & Eatmon T.D., *A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies*, Journal of Cleaner Production, 2009
- [2] Damtoft J.S., Lukasik J, Herfort D., Sorrentione D. & Gartner E.M., *Sustainable development and climate change initiatives*, Cement and Concrete Research, 2008
- [3] De Schepper M., *Volledig recycleerbaar beton voor een meer milieuvriendelijke bouwsector*, Ghent University, 2009
- [4] Van den Heede P., *Porositeit en transporteigenschappen van "groene" betonsoorten*, Ghent University, 2008
- [5] Vermimmen L., *De regeneratie van cement uit volledig recycleerbaar beton*, Ghent University, 2010

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Overzicht	iii
Extended Abstract	v
Afkortingen en symbolen	x
1. Algemene inleiding	1
2. Literatuurstudie	4
2.1. Samenstelling volledig recycleerbaar beton	4
2.1.1. Principe van volledig recycleerbaar beton.....	4
2.1.2. Betonbestanddelen.....	6
2.1.3. Chemische samenstelling van volledig recycleerbaar beton.....	15
2.2. Duurzaamheid van beton.....	18
2.2.1. Wapeningscorrosie	18
2.2.2. Vorst en dooizouten.....	23
2.2.3. Indringing van chloriden	31
2.2.4. Carbonatatie	34
3. Materialen en methoden.....	45
3.1. Materialen.....	45
3.1.1. Samenstelling grondstoffen	45
3.1.2. Recycleerbare betonmengsels.....	51
3.1.3. Referentiemengsels	52
3.1.4. Mortel met aluminaatcement.....	54
3.2. Methoden	58
3.2.1. Vervaardiging van het beton.....	58
3.2.2. Druksterkte	60

3.2.3.	Vorst en dooizouten.....	61
3.2.4.	Indringing van chloriden	66
3.2.5.	Carbonatatie	72
3.2.6.	Open porositeit	76
3.2.7.	Oppervlaktersterkte	79
3.2.8.	Mortelproeven	81
4.	Resultaten en bespreking	85
4.1.	Verwerkbaarheid en luchtgehalte	85
4.2.	Druksterkte van het beton.....	86
4.3.	Open porositeit	87
4.4.	Oppervlaktersterkte van het beton.....	90
4.4.1.	Trekproef.....	90
4.4.2.	Afslijtingsproef	91
4.5.	Weerstand tegen vorst en dooizouten	93
4.6.	Indringing van chloriden	102
4.6.1.	Cyclische onderdompeling	102
4.6.2.	CTH-proeven	108
4.7.	Carbonatatie	111
4.8.	Mortelproeven.....	121
4.8.1.	Verwerkbaarheid en luchtgehalte van de mortel.....	121
4.8.2.	Druksterkte en buigtreksterkte.....	124
4.8.3.	Ultrasone transmissie en semi-adiabatische calorimetrie.....	128
5.	Discussie	134
5.1.	Weerstand tegen vorst en dooizouten	134
5.2.	Indringing van chloriden	138
5.3.	Carbonatatie	142
5.4.	Mortelproeven.....	142
6.	Levenscyclusanalyse	144

6.1.	Inleiding.....	144
6.2.	Bepaling doel en reikwijdte	146
6.2.1.	Doel	146
6.2.2.	Bepaling van de systeemgrenzen.....	146
6.2.3.	Bepaling van de functionele eenheid.....	150
6.3.	Inventarisatie en bepaling van de milieu-impact.....	160
6.3.1.	Ecoinvent & SimaPro.....	160
6.3.2.	Verbruik van natuurlijke grondstoffen.....	164
6.3.3.	Uitstoot broeikasgassen en energieverbruik	169
6.3.4.	Gebruik van land en ruimte	173
6.3.5.	Resultaten m.b.v. SimaPro	174
6.4.	Interpretatie van de resultaten.....	189
7.	Conclusie	191
7.1.	Duurzaamheid.....	191
7.2.	Mortelproeven.....	192
7.3.	Levenscyclusanalyse	192
	Bijlage A Korrelverdeling.....	194
A.1	Zand	194
A.2	Granulaten	195
	Bijlage B Druksterkte.....	197
	Bijlage C Buigtreksterkte en druksterkte mortelprisma's.....	199
	Bijlage D Levenscyclusanalyse	205

Afkortingen en symbolen

α	Hydratatiegraad	-
α_u	Ultieme hydratatiegraad	-
Δ	Verschil	
$\Delta c_{dur,\gamma}$	Extra betondekking voor veiligheidsredenen	mm
$\Delta c_{dur,st}$	Verminderde betondekking door gebruik van roestvrij staal	mm
$\Delta c_{dur,add}$	Verminderde betondekking dor gebruik van extra bescherm laag	mm
μ	Coëfficiënt	mol
ρ_w	Massadichtheid van de vloeistof (water)	kg/m ³
ρ_{beton}	Droge schijnbare dichtheid van beton	kg/m ³
σ	Standaardafwijking op de individuele waarden	
φ	Porositeit	%
φ_{cap}	Capillaire porositeit	%
φ_{gel}	Gelporositeit	%
φ_{tot}	Totale open porositeit	%
(aq)	Deeltje in waterige oplossing	-
c	Concentratie	[mol/m ³]
c_0	Chlorideconcentratie in de katholitische oplossing	N
c_1	Concentratie CO ₂ in lucht	[mol/m ³]
c_2	Concentratie CO ₂ aan het carbonatatiefront	[mol/m ³]
c_d	Chlorideconcentratie voor kleurverandering zilvernitraat	N
c_{min}	Minimum betondekking volgens Eurocode 2	mm
$c_{min,b}$	Minimum betondekking als gevolg van staalkrachten	mm
$c_{min,d}$	Minimum betondekking als gevolg van omgevingsklasse	mm
erf^{-1}	Inverse errorfunctie	-
f_{ccub}	Gemiddelde kubusdruksterkte	[N/mm ²]
f_{ck}	Karakteristieke kubusdruksterkte	[N/mm ²]
f_{cm}	Gemiddelde druksterkte	[N/mm ²]
$(f_{cu})_{100}$	Gemiddelde kubusdruksterkte voor kubus met zijde 100mm	[N/mm ²]
$(f_{cu})_{150}$	Gemiddelde kubusdruksterkte voor kubus met zijde 150mm	[N/mm ²]
$f_{graveli}$	Massaverhouding granulaat <i>i</i> – totale massa beton	-

f_{sand}	Massaverhouding zand – totale massa beton	-
g_1	Lijnlast ten gevolge van het eigengewicht	kN/m
g_2	Lijnlast ten gevolge van vaste belastingen	kN/m
k	K - waarde concept	-
k	Carbonatatiecoëfficiënt	mm/wk ^{1/2}
$k_{0,03}$	Carbonatatiecoëfficiënt bij 0,03vol% CO ₂	mm/wk ^{1/2}
$k_{0,1}$	Carbonatatiecoëfficiënt bij 0,10vol% CO ₂	mm/wk ^{1/2}
k_{10}	Carbonatatiecoëfficiënt bij 10vol% CO ₂	mm/wk ^{1/2}
m	Exponent	-
m	Massa	g
n	Exponent	-
$m\%$	Massaprocent	%
$m\text{‰}$	Massapromille	‰
m_d	Massa van het droge proefstuk	-
m_l	Massa van het verzadigde proefstuk in een vloeistof	-
m_s	Massa van het met vloeistof verzadigde proefstuk	-
pH	Zuurtegraad	-
q	Mobiele lijnlast	kN/m
(s)	Deeltje in vaste aggregatietoestand	-
t	Tijd	s of wk
x	Carbonatatediepte	mm
x_d	Gemiddelde penetratiediepte	m of mm
x_{cap}	Indringingsdiepte chloriden door capillaire opslorping	mm
x_{dif}	Indringingsdiepte chloriden door diffusie	mm
x_{tot}	Totale indringingsdiepte chloriden	mm
$\text{vol}\%$	Volumepercent	%
w/c	Water/cement-factor	-
w/cm	Water/cementeerbaar materiaal-factor	-
z	Valentiegetal	-
A	Diffusiecoëfficiënt	mm/s ^{1/2}
A	Oppervlakte	m ²
A_{gravel}	Waterabsorptiecoëfficiënt granulaat i	%
A_{sand}	Waterabsorptiecoëfficiënt zand	%

AM	Alumina modulus	-
C	Hoeveelheid cement	kg/m ³
C	Hoeveelheid cementeerbaar materiaal	kg/m ³
C	Versnelde carbonatatiediepte	mm
C ₀	Hoeveelheid CO ₂	kg
D	Diffusiecoëfficiënt	m ² /s
D ₀	Inrinsieke diffusiecoëfficiënt	m ² /s
D(t)	Tijdsafhankelijke diffusiecoëfficiënt	m ² /s
D _{nsm}	Niet-stationaire migratiecoëfficiënt	m ² /s
D	Mengtijd van het droge mengsel	min
DALY	Disability Adjusted Life Years	jaar
Eco-indicator	Eco-Indicator 99	Pt
F	Faradayconstante = 9,648.10 ⁴	J/V.mol
F1-F6	Consistentieklassen flow	-
FA	Hoeveelheid vliegass	kg/m ³
GWP	Global Warming Potential	kg CO ₂ -eq
H	Chloride-indringingscoëfficiënt onder cyclische blootstelling	mm/s ^{1/2}
HM	Hydraulische modulus	-
J	Flux of stroomsnelheid per oppervalkte-eenheid	mol/m ² .s
K _b	Bindingsparameter	m ³ /kg _{gel}
LA	Laag alkaligehalte	-
L	Dikte proefstuk	m of mm
LSF	Kalkverzadigingsfactor of Lime Saturation Factor	-
M	Molaire massa	g/mol
N	Mentijd na toevoegen water	min
N	Vaste puntlast	kN
P	Porositeit	%
PDF	Potentially Disappeared Fraction	-
R	Gasconstante = 8,314	J/K.mol
R ²	Pearson-correlatiecoëfficiënt	-
S	Druksterkte	N/mm ²
S	Capillaire opslorpingscoëfficiënt	mm/s ^{1/2}
S1-S5	Consistentieklassen slump	-
S _{graveli}	Specifieke oppervlakte granulaat <i>i</i>	m ² /kg

S_{sand}	Specifieke oppervlakte zand	m^2/kg
SM	Silica modulus	
SP	Mentijd na toevoegen superplastificeerder	min
T	Gemiddelde temperatuur van de analytische oplossing	$^{\circ}\text{C}$ of K
U	Spanning	V
V	Volume proefstuk	m^3
W/C	Water/Cement-factor	-
W/CM	Water/Cementeerbaar Materiaal-factor	-
W_{gel}	Hoeveelheid gel	$\text{kg}_{\text{gel}}/\text{m}^3_{\text{beton}}$
X_c	Werkelijke carbonatatiediepte	mm
X_p	Carbonatatiediepte gemeten met fenolftaleïne	mm

IPCC	International Panel on Climate Change
KMI	Koninklijk Meteorologisch Instituut van België
WHO	WereldGezondheidsOrganisatie

CRC	Completely Recyclable Concrete – volledig recycleerbaar beton
CRC 1	LS98-FA2-C(I)65-FA35
CRC 2	LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35
CRC 3a	LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6
CRC 3b	LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6

CAC	Calcium Aluminate Cement - aluminaatcement
C(I)	CEM I 52,5N
C(III)	CEM III 42,4N LA
CS	Copper Slag – koperslakken
FA	Fly Ash – vliegas
LF	Limestone Filler - kalksteenfiller
LS	LimeStone – kalksteen
P	Porphy – porfier

CZ	Citroenzuur – $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ – 2-hydroxy-1,2,3-propaantricarboxylzuur
WSZ	Wijnsteenzuur – $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ - 2,3-dihydroxybutaandizuur

1. Algemene inleiding

In de loop der jaren heeft beton een prominente plaats in de bouwwereld veroverd. Hoewel de Romeinen reeds gebruik maakten van een beton dat hoofdzakelijk uit steengruis, kalk en puzzolanen bestond, kwam de ontwikkeling van beton pas halverwege de 19^e eeuw volledig op gang toen door Lambot een eerste, primitieve vorm van gewapend beton werd ontwikkeld. Sindsdien hebben zowel de kennis over, als de ontwikkeling van beton een uitgesproken evolutie doorgemaakt en dag na dag reiken de grenzen van dit product verder en verder.

Ontwikkeling brengt helaas niet zelden ook vervuiling met zich mee. Gemiddeld wordt volgens Huntzinger & Eatmon (2009) voor elke persoon op aarde ongeveer één ton beton per jaar geproduceerd. De milieu-impact die teweeg wordt gebracht door beton is bijgevolg dan ook aanzienlijk.

Wanneer betonconstructies worden gesloopt, wordt het sloopafval tegenwoordig vrijwel enkel gebruikt voor minderwaardige toepassingen. Vaak wordt dit bouwafval als fundering of onderfundering in de wegenbouw toegepast [De Winne (2007)] of worden particuliere wegen en landbouwwegen volledig aangedamd met dergelijk puinafval. Soms krijgen de puingranulaten een herbestemming in nieuwe betonconstructies, maar kunnen zich hier geen waardige vervanger van traditionele granulaten tonen. Vanwege de hoge wateropsorping die dergelijke granulaten met zich mee brengen, zal het ermee vervaardigde beton slechts weinig duurzaam zijn en bijgevolg beperkte mogelijkheden bezitten als constructiemateriaal.

Een tweede punt van aandacht, naast de grote hoeveelheden afvalmateriaal die betonconstructies met zich mee brengen, is de hoge CO₂-emissie die door de bouwsector wordt teweeggebracht en de rechtsreeks hiermee verwante bijdrage tot het broeikaseffect. Wereldwijd is volgens Damtoft et al. (2008) zo'n 5% van alle CO₂-emissies afkomstig van de productie van cement. Broeikasgassen bestaan voor 82% uit koolstofdioxide, waarmee dit gas de voornaamste oorzaak van de klimaatsverandering voor zich neemt. Indien geen politieke maatregelen worden genomen, zal de wereldwijde temperatuurstijging van 1990 tot 2100 oplopen tot 1,4 à 5,8°C en zal de gemiddelde temperatuur in Europa zelfs 2,0 tot 6,3°C stijgen. Bovendien werd berekend dat de huidige stijging van de zeespiegel van 0,8 tot 3,0mm per jaar gedurende de komende eeuw zal opklimmen tot 2,2 à 4,4 keer de actuele waarde.

De ontwikkeling van volledig recycleerbaar beton maakt van beide problemen een opportuniteit. Het ontwerp van een beton dat in staat is om enerzijds de hoeveelheid sloopafval, afkomstig van het bouwwezen, te reduceren en anderzijds de CO₂-emissie afkomstig uit deze sector doet dalen, draagt rechtstreeks bij tot een meer duurzame bouwomgeving. Als bijkomende troef, wordt daarenboven met recycleerbaar beton de ontginning van natuurlijke grondstoffen voor de productie van klinker verminderd.

Het concept van recycleerbaar beton is in principe heel eenvoudig. Gezien de chemische samenstelling van beton in sterke mate gelijkaardig is aan deze van de gebruikelijke grondstoffenmengeling voor de vervaardiging van portlandklinker, kan beton dat anders als afval bestempeld zou worden, ingezet worden als grondstof voor klinkerproductie.

Voorwaarde voor deze toepassing is uiteraard dat de scheikundige samenstelling van het beton afgestemd wordt op de chemische eisen die een traditionele grondstoffenmengeling met zich mee brengt. De idee van volledig recycleerbaar beton omschrijft immers een beton dat, zonder bijkomende industriële of natuurlijke toevoegsels, rechtstreeks bruikbaar is als grondstof voor de klinkerproductie.

Uiteraard zou het weinig zinvol blijken een beton te ontwikkelen dat volledig recycleerbaar is, indien de productie van dit beton zelf in meer of mindere mate schadelijker zou zijn voor het milieu dan een traditioneel beton. Het kan immers geenszins de bedoeling zijn een recycleerbaar beton te ontwikkelen dat gedurende zijn levensduur een grotere impact op het milieu nalaat dan een traditionele betonsoort. Daarom wordt bij de betonsamenstelling waar mogelijk gebruik gemaakt van cementvervangende producten zoals hoogovenslakken of vliegashuis, die als bijproducten uit andere industrieën op die manier een nuttige herbestemming krijgen [Van den Heede (2008)].

Daarenboven is het minstens even belangrijk dat het geregenereerde cement dezelfde kwaliteit bereikt als een traditioneel cement. Het is namelijk een absolute noodzaak een evenwaardig cement te fabriceren om een duurzame kringloop van beton en cement te bewerkstelligen.

Tot slot is het noodzakelijk dat het ontwikkelde beton beantwoordt aan de sterkte- en duurzaamheidseisen die de hedendaagse maatschappij stelt. Een beton met lage duurzaamheid zou per slot van rekening leiden tot een snellere vernieuwing van de ermee vervaardigde constructie, wat de inspanningen voor het recycleerbaar maken van het betonmengsel nutteloos zou maken.

Concreet werd in een voorgaande studie door De Schepper (2009) uitgebreid onderzoek gevoerd naar de meest gunstige samenstelling voor een dergelijk recycleerbaar beton. De chemische vereisten werden hierin uitvoerig toegelicht en het is dan ook op deze bevindingen dat in deze studie wordt verder gewerkt.

De kwaliteit van het geregenereerd cement wordt in een met deze studie parallel lopend werk onderzocht door Vernimmen (2010).

In voorliggend werk ten slotte, wordt de sterkte van een aantal gerealiseerde mengsels onderzocht en wordt de duurzaamheid van deze mengelingen begroot. De aspecten die bij deze duurzaamheidscontrole specifiek geanalyseerd worden zijn de weerstand tegen vorst en dooizouten, de weerstand tegen indringing van chloriden volgens verschillende mechanismen en de gevoeligheid van het beton voor carbonatatie. Bijkomend worden de slijtvastheid, de open porositeit en de oppervlaktetreksterkte van een aantal mengsels beproefd.

Na het bepalen van het duurzaamheidsgedrag van de recycleerbare betonmengsels, wordt van deze mengsels een uitgebreide levenscyclusanalyse uitgevoerd. Het spreekt voor zich dat dit een niet te ontbreken stap is bij elke ontwikkeling van een nieuw product. Enkel op deze manier kan de effectieve milieu-impact en vooral de verhouding van deze impact ten opzichte van alternatieve producten, adequaat becijferd worden.

2. Literatuurstudie

2.1. Samenstelling volledig recycleerbaar beton

2.1.1. Principe van volledig recycleerbaar beton

Het concept van “volledig recycleerbaar beton” heeft betrekking op een beton dat, wanneer het zijn volledige levensduur bereikt heeft, integraal gebruikt kan worden als enige grondstof bij de productie van klinker. Normaliter wordt voor de productie van portlandklinker in een eerste fase een grondstoffenmengsel gemaakt dat hoofdzakelijk kalksteen en klei bevat [De Schepper (2009)] en dat hierdoor de belangrijkste oxiden bevat die nodig zijn voor de vorming van klinker. Door dit mengsel te verhitten tot 1450°C wordt portlandklinker bekomen. Na fijnmalen van deze afgekoelde klinker en vermenging met een bindingsvertragend middel, wordt dan portlandcement verkregen.

Volledig recycleerbaar beton dat zijn maximale levensduur heeft bereikt, of om een andere reden onbruikbaar is geworden, zou als plaatsvervangende en enige grondstof ingezet kunnen worden binnen de cementproductie, waardoor het verbruik van grondstoffen in belangrijke mate gereduceerd kan worden. Hiertoe volstaat het dus niet enkel een beton te ontwikkelen dat goede resultaten vertoont met betrekking tot sterkte en duurzaamheid, maar dient evenzeer de chemische samenstelling van het geheel aan componenten van dit beton te voldoen aan de specifieke vereisten, noodzakelijk voor klinkerproductie. De ideale samenstelling van een dergelijk betonmengsel werd reeds uitgebreid besproken en onderzocht in De Schepper (2009) en Tamura et al. (2004) en wordt in wat volgt kort samengevat.

Ongeveer twee derde van een traditioneel grondstoffenmengsel voor portlandklinker is calciumoxide (CaO), wat verklaart waarom kalksteen als basisgrondstof van dit mengsel noodzakelijk is. Daarnaast is ook de aanwezigheid van siliciumoxide (SiO_2) belangrijk, wat het gebruik van klei, zand of vliegas verklaart. In kleinere hoeveelheden is tevens aluminiumoxide (Al_2O_3) en ijzer(III)oxide (Fe_2O_3) noodzakelijk, maar dit bevindt zich vaak reeds in voldoende mate in de grondstoffen die instaan voor de aanlevering van CaO en SiO_2 . Paragraaf 2.1.2.1 verschaft meer uitleg omtrent de klinkermineralen.

Bij volledig recycleerbaar beton is het noodzakelijk dat het verharde beton op zich een bron is van al deze oxiden. Bij de grondstoffenkeuze voor dit beton, moet dus al terdege rekening gehouden worden met de bekomen chemische samenstelling van de granulaten en de cementmatrix. Door een gepaste mix te maken van kalksteenslag, kalksteenzand (als bron van hoofdzakelijk CaO),

siliciumhoudende vliegas, gewoon zand, porfiersteenslag (als bronnen van hoofdzakelijk SiO_2 , porfiersteenslag eveneens als bron van Al_2O_3), koperslakken (als bron van Fe) en hoogovenslakken (als bron van CaO en SiO_2) kan een dergelijk mengsel bekomen worden. Kalkhoudende vliegas zou eveneens dienst kunnen doen als bron van CaO, maar in België wordt dit type vliegas niet gebruikt. [De Schepper (2009), Van den Heede (2008), Belgische Betongroepering (2006), Taerwe (2004), Tamura et al. (2004), Souwerbren (1998)].

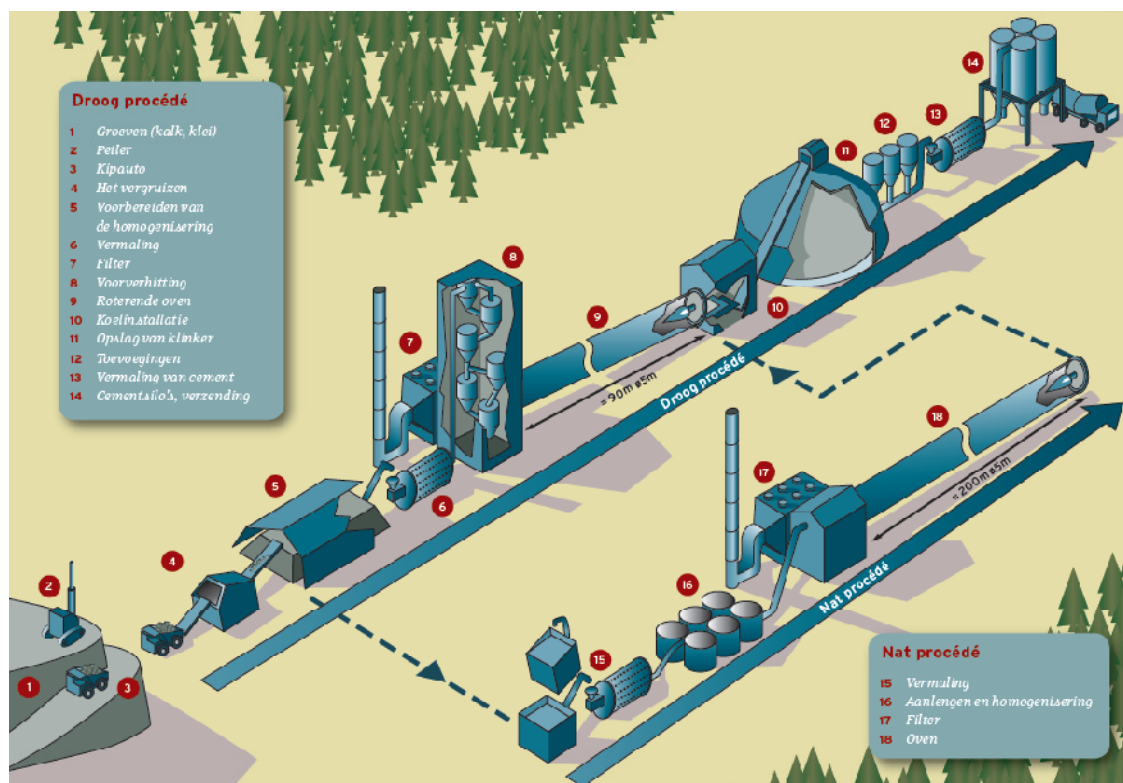
Ook de chemische samenstelling van de gebruikte cementen en eventuele hulpstoffen moet uiteraard in rekening worden gebracht. Het is vanzelfsprekend niet per definitie noodzakelijk om elk van voornoemde grondstoffen te gebruiken en net zozeer kunnen ook andere granulaten aangewend worden, maar in vele gevallen kan met enkel deze grondstoffen wel een of meerdere combinaties gevormd worden om een ideale samenstelling te bewerkstelligen. Uiteraard moet de exacte chemische samenstelling van de specifieke, concreet aangewende granulaten en bindmiddelen hiertoe wel gekend zijn.

2.1.2. Betonbestanddelen

2.1.2.1. Cement

2.1.2.1.1. Portlandcement

Door het vermalen van de portlandcementklinker (of kortweg “klinker”), wordt portlandcement verkregen. Klinker is een steenachtig materiaal, dat voornamelijk uit hydraulische verbindingen is opgebouwd: de klinkermineralen. Ze worden verkregen door een bepaald grondstoffenmengsel te verhitten tot zeer hoge temperaturen (1400 °C tot 1500 °C). [Souwerbren (1998)]. Figuur 2-1 toont het principe voor de cementproductie.



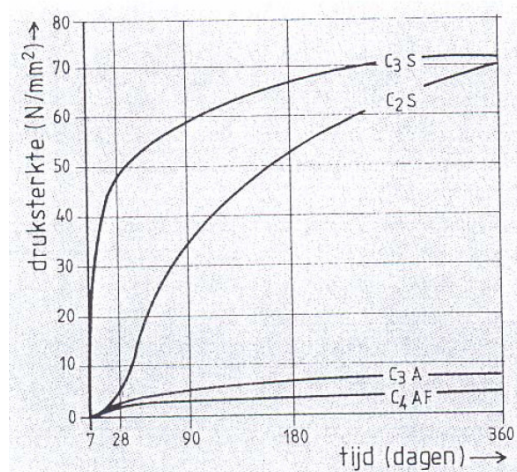
Figuur 2-1: Overzicht principe cementproductie [Febelcem (2006)]

De klinkermineralen C_3S (aliet) en C_2S (beliet) zijn de meest belangrijke hydraulische verbindingen, met water vormen ze het eigenlijke bindmiddel (C-S-H-verbindingen) in een beton of mortel. Bij de reactie komt $Ca(OH)_2$ vrij (gebluste kalk). In Tabel 2-1 wordt een overzicht van de klinkermineralen weergegeven.

Tabel 2-1: Overzicht klinkermineralen [Souwerbren (1998)]

Naam verbinding	Formule	Afgekort
Tricalciumsilicaat	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C₃S
Dicalciumsilicaat	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C₂S
Tricalciumaluminaat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C₃A
Tetracalciumaluminaatferriet	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C₄AF

Uit Figuur 2-2 blijkt dat vooral C₃S voor de beginsterkte zorgt, pas na zeer lange tijd levert C₂S een even grote of zelfs grotere bijdrage.



Figuur 2-2: Bijdrage van de verschillende cementmineralen aan de sterkteontwikkeling [Souwerbren (1998)]

In laboratoriumomstandigheden zou het mogelijk zijn om een mengsel van enkel deze mineralen te vervaardigen. Dit blijkt echter een zeer langdurig en kostbaar proces, dat kan geoptimaliseerd worden door toevoeging van Al_2O_3 en Fe_2O_3 , waardoor de te leveren temperatuur meestal kan dalen tot zo'n 1450°C [Souwerbren (1998)].

Om een mengsel met deze mineralen te bekomen, worden in de praktijk daarom als belangrijkste grondstoffen voor portlandcementklinker kalksteen en/of mergel (bron van het CaO), zand en klei (bronnen van SiO_2 en Al_2O_3) gebruikt. Daarnaast wordt een zekere hoeveelheid ijzerhoudende toeslag gedoseerd om het gewenste Fe_2O_3 -gehalte te bekomen. Ook poederkoolvliegias kan als grondstof voor de klinkerproductie worden gebruikt. Vliegassen die een zodanige hoeveelheid onverbrande koolresten bevatten dat ze niet geschikt zijn als vulstof voor beton, kunnen op deze manier toch op een zinvolle manier ingezet worden. De vliegias is in dit geval bron van SiO_2 [Souwerbren (1998), Tamura et al. (2004)].

2.1.2.1.2. Hoogovencement

Hoogovencement wordt gemaakt van gemalen gegranuleerde hoogovenslakken (zie paragraaf 2.1.2.2). Bij cement dat uitsluitend van gemalen slakken is gemaakt, verloopt de reactie met water echter veel te langzaam, zelfs wanneer de slakken wordt fijngemalen. Een dunne, maar bijzonder dichte laag van hydraten sluit het slakkenoppervlak namelijk af waardoor verdere hydratatie bemoeilijkt wordt. Door sterke alkaliën of door een hoge concentratie aan sulfaationen kan deze laag doorbroken worden en kan de hydratatie toch aan een behoorlijke snelheid verlopen [Souwerbren (1998)]. Om deze reden worden slakken latent hydraulische stoffen genoemd. De meest logische en praktische oplossing om tot de activering van deze slakken te komen, is het vermengen van fijngemalen hoogovenslakken met een hoeveelheid klinker, die, zoals hoger aangehaald, bij hydratatie calciumhydroxide produceert, wat een sterk basische verbinding is. Een voordeel van het gebruik van hoogovencement is dat er minder primaire grondstof – concreet kalksteen – verbruikt wordt en dat bovendien een zinvolle bestemming wordt gegeven aan de – anders als reststof gedumpte – hoogovenslakken. Bovendien zal bij vervanging van traditioneel portlandcement door hoogovencement ook het energieverbruik en de CO₂-emissie dalen [De Schepper (2009)]. Door de verschillende samenstelling ontstaan er wel gedeeltelijk verschillende eigenschappen tussen portlandcement en hoogovencement. Souwerbren (1998) stelt dat de poriënstructuur van de cementsteen van hoogovencement veel dichter is dan deze van portlandcement, wat waarschijnlijk te wijten is aan het verschil in chemische samenstelling en de verschillende reactiemechanismen. De snelheid waarmee chloriden en andere schadelijke stoffen kunnen binnendringen is hierdoor vele malen kleiner in beton met hoogovencement dan in beton met portlandcement, wat met betrekking tot duurzaamheid uiteraard een gunstig effect is.

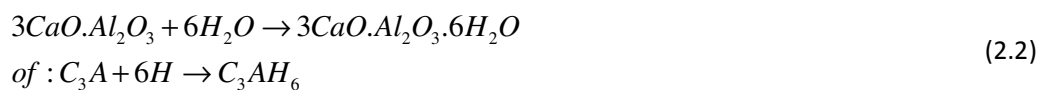
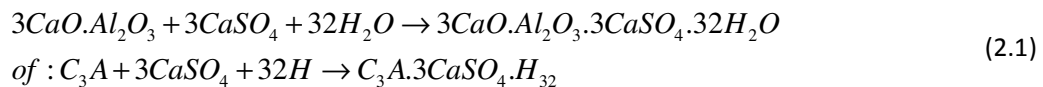
De hydratatie van slakken verloopt, in het bijzonder in het begin en bij normale temperaturen, echter trager dan bij klinker. Omdat cement of beton nogal vaak gekarakteriseerd wordt aan de hand van de sterkte na 28 dagen, zorgen de producenten ervoor dat de cementen op dat tijdstip nagenoeg gelijk presteren, waardoor de beginsterkte (dus vòòr het verstrijken van deze 28 dagen) van hoogovencement lager zal zijn dan van portlandcement. Hoogovencement zal daarentegen wel nog langer toenemen in sterkte dan portlandcement.

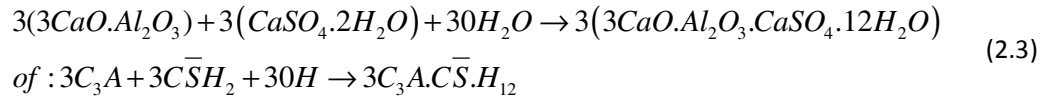
2.1.2.1.3. Aluminaatcement

Een derde cementsoort is het aluminaatcement. Dit wordt verkregen door het vermalen van een klinkersoort, die hoofdzakelijk uit monocalciumaluminaat (CA) bestaat. Monocalciumaluminaat – en in uitbreiding het ermee vervaardigde cement – bezit een zeer hoge reactiviteit met water, waardoor het cement over een zeer snelle sterkteontwikkeling beschikt. Dit cement is zeer goed

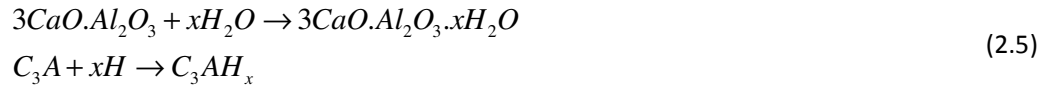
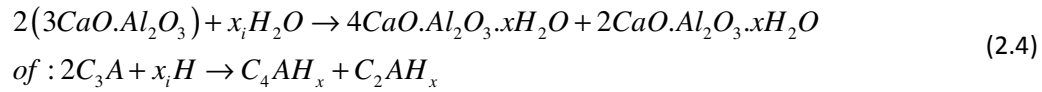
bestand tegen zeer hoge temperaturen, maar is wel bijzonder duur. Bovendien kan het beton van aluminaatcement, dat op korte termijn een hoge sterkte bezit, na verloop van tijd een niet onbelangrijk deel van deze sterkte verliezen. Het vermengen van aluminaatcement met andere cementen moet worden vermeden, omdat onder invloed van de kalk uit portlandcement, een extreem snelle binding van het aluminaatcement zal optreden [Souwerbren (1998), Belgische BetonGroepering (2006)]. Het mechanisme, verantwoordelijk voor deze plotse binding is niet volledig gekend, maar mogelijk is de vroege vorming van ettringiet ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), de versnelde reactie van het aluminaatcement of de combinatie van beide hiervan de oorzaak [Hewlett (1998)].

Om de invloed van sulfaationen op de hydratatie van celiet te kennen is het noodzakelijk eerst enkele algemene reacties te beschouwen. Volgens Taerwe (2004) vindt de hydratatie van celiet ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ of C_3A) zeer snel plaats en gaat dit gepaard met een zeer grote warmteontwikkeling. Bovendien resulteert het in een lage sterkte van de cementsteen. Om dit verschijnsel tegen te gaan wordt gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) toegevoegd, wat de binding vertraagt. Dit is ook de reden dat in portlandcement een klein percentage gips aanwezig is. Ook calciumhemihydraat ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) of anhydriet (CaSO_4) kan hiervoor gebruikt worden. In de aanwezigheid van gips wordt eerst ettringiet gevormd dat kristalliseert onder de vorm van korte, prismatische naalden, die aan de cementpasta een zekere stijfheid geven en bijdragen tot de eerste sterkteontwikkeling. Het ettringiet vormt dus een beschermende laag rond de sterk reactieve C_3A -kristallen. Wanneer het gips is opgebruikt, ontstaat er calciumaluminaathydraat als reactieproduct van celiet met water [Ghosh (2002), Taerwe (2004), De Schepper (2009)]. Beide reacties worden weergegeven in respectievelijk vergelijkingen (2.1) en (2.2). Dit calciumaluminaathydraat, C_3AH_6 , wordt ook wel genoteerd als C-A-H, aangezien de exacte chemische samenstelling niet gekend is [De Schepper (2009)]. Volgens Taerwe (2004) en Ghosh (2002) worden de reactieproducten, ettringiet en calciumaluminaathydraat (respectievelijk $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{32}$ of $(\text{CaO})_6(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{SO}_3)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ of $(\text{CaO})_3(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{CaSO}_4)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ en C_3AH_6), vervolgens vermoedelijk omgezet in monosulfaat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ of $3\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{12}$): zie vergelijking (2.3).



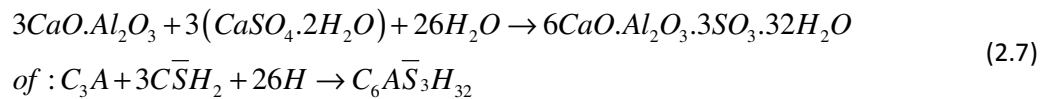
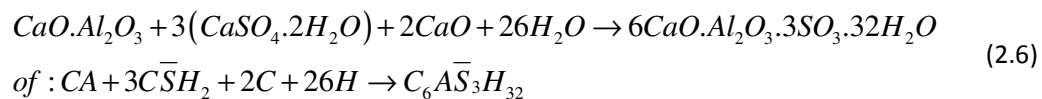


Reactie (2.2) moet volgens Ghosh (2002) algemener geschreven worden als:



Hierbij zijn de reactieproducten van vergelijking (2.4) hexagonaal en de hydraten uit vergelijking (2.5) kubisch.

Algemeen wordt gesteld dat het vermengen van portlandcement met aluminaatcement vermeden dient te worden, omdat het gepaard gaat met een zeer plotse bindingsreactie. Zodoende zou een combinatie van deze bindmiddelen enkel interessant kunnen zijn, wanneer de noodzaak van een hoge beginsterkte belangrijker is dan een grote verwerkbaarheid [Belgische BetonGroepering (2006), Souwerbren (1998)]. Volgens Fernández-Carrasco & Vázquez (2009) en Gu et al. (1997) echter, is het met combinatie van beide cementen wel mogelijk om een goed verwerkbaar beton te bekomen. Een belangrijke voorwaarde is hierbij echter dat er voldoende calciumsulfaat ($CaSO_4$) aanwezig is, om de snelle bindingsreactie afdoende te vertragen. Zo niet zal het beton zeer moeilijk verwerkbaar blijven. Wanneer portlandcement met aluminaatcement wordt gecombineerd, wordt volgens Gu et al. (1997) ettringiet gevormd (zie vergelijkingen (2.6) en (2.7)). Vergelijking (2.7) is hierbij equivalent aan vergelijking (2.1).



Fernández-Carrasco & Vázquez (2009) bepaalden dat de vervanging van (een gedeelte van) portlandcement door vliegashierbij tot gelijkaardige resultaten leidt. De hoeveelheid ettringiet die hierbij wordt gevormd, is groter bij grotere percentages aan vliegashier. De relatie tussen beide is echter niet eenduidig vast te leggen en daar het hydratatieproces niet volledig gekend is, is het niet

eenvoudig een verband aan te geven tussen de grondstoffen en de uiteindelijk bekomen reactieproducten.

Het verloop van de sterkte is volgens Gu et al. (1997) afhankelijk van de verhouding van de hoeveelheid portlandcement tot de hoeveelheid aluminaatcement. Afhankelijk daarvan worden achtereenvolgens verschillende reactieproducten gevormd. Tabel 2-2 [Gu et al. (1997)] geeft een overzicht van deze reactieproducten.

Tabel 2-2: Samenvatting van de componenten geïdentificeerd door röntgenstralendiffractie van beton op jonge leeftijd [Gu et al. (1997)]

Massaverhouding CEM I/AC	30 min	4 uur	8 uur	24 uur	48 uur
92,5/7,5	Gips	Ettringiet, gips	Ettringiet, Ca(OH)_2	Ettringiet, Ca(OH)_2	Ettringiet, Ca(OH)_2
80/20	Ettringiet, gips	Ettringiet, gips	Ettringiet, gips	Ettringiet, monosulfaat- aluminaat	Ettringiet, monosulfaat- aluminaat, Ca(OH)_2
20/80	-	-	$\text{CAH}_{10}/\text{C}_2\text{AH}_8$	$\text{CAH}_{10}/\text{C}_2\text{AH}_8$	$\text{CAH}_{10}/\text{C}_2\text{AH}_8$

2.1.2.2. Hoogovenslakken

Hoogovenslakken zijn een bijproduct van de productie van ijzer en zijn afkomstig van het stollingsgesteente dat samen met ijzererts in hoogovens wordt gesmolten. Tijdens dit smelten, zinkt het zwaardere metaal naar beneden en blijven de resterende oxides er boven op drijven. Deze worden van het vloeibaar ruwijzer gescheiden en vervolgens snel gekoeld met veel water, waardoor een fijn granulaat tot stand komt: de hoogovenslakken.

De eigenschappen en samenstelling van gegranuleerde hoogovenslakken, toegepast als bestanddeel van cement werd reeds besproken in paragraaf 2.1.2.1.2. Gedroogde en gemalen slakken kunnen ook gebruikt worden als toevoegsel in het beton, om zo het cementgehalte te reduceren. Het mag wel enkel maar gebruikt worden in combinatie met CEM I met sterkteklasse 42,5 of meer. De massaverhouding van de gemalen slakken t.o.v. het cement mag niet groter zijn dan 0,45. Voor de milieuklasse XF dient deze zelfs beperkt te worden tot 0,20. Ook aan het minimale cementgehalte, de maximale w/c-factor en het minimale gehalte van de combinatie cement en hoogovenslakken, zijn bepaalde voorwaarden verbonden [Belgische BetonGroepering (2006), NBN B 15-001 (2004)].

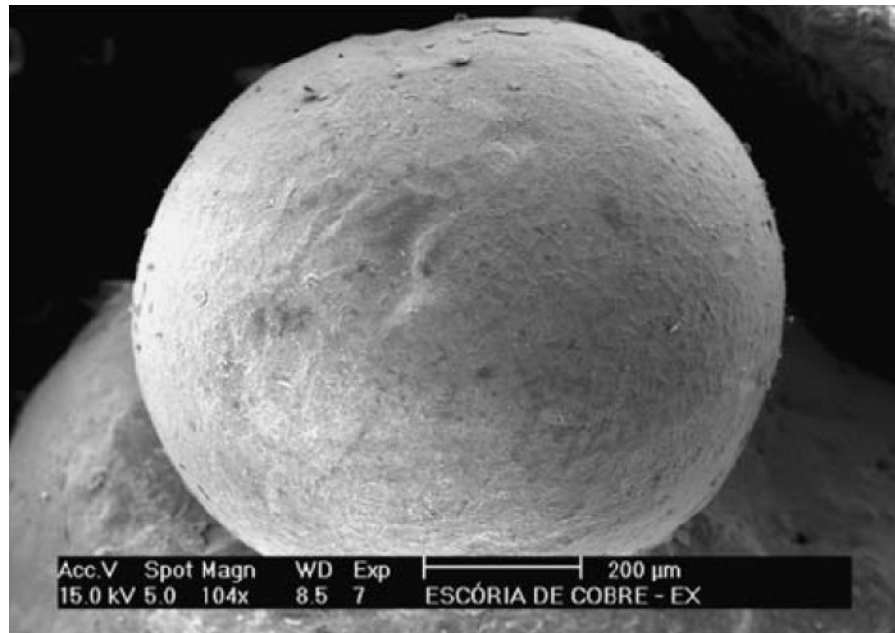
2.1.2.3. Koperslakken

Koperslakken ontstaan bij de productie van koper op een gelijkaardige manier waarop hoogovenslakken als bijproduct van de productie van ijzer tot stand komen. Het zijn puzzolane materialen en ze kunnen zodoende zowel ingezet worden ter vervanging van granulaten, als ter – gedeeltelijke – vervanging van portlandcement [Khanzadi & Behnood (2009), Al-Jabri et al. (2009), Shi et al. (2008), Moura et al. (2007)].

Volgens Al-Jabri et al. (2009) leidt het gebruik van koperslakken ter vervanging van zand in beton, tot een dichtere structuur bij een gelijkaardige druksterkte. Slechts wanneer meer dan 50% van het zand door koperslakken wordt vervangen, valt een afname van de druksterkte te merken. Deze afname van de druksterkte bij hogere vervangingspercentages is te wijten aan de beduidend grotere hoeveelheid vrij water dat in het mengsel aanwezig is en zowel overbodig is voor de hydratatie van de cementpasta als om een behoorlijke verdichting van het verse beton te bewerkstelligen. Deze overmaat aan vrij water in de mengsels met hoge hoeveelheden koperslakken zorgt ervoor dat er na verharding meer poriën in het beton ontstaan. Volgens Moura et al. (2007) is zelfs een toename in druksterkte merkbaar wanneer de koperslakken worden toegevoegd als cementvervanging. Ook wanneer koperslakken worden toegevoegd als grof granulaat, verhogen ze de druksterkte van het beton door een betere aanhechting van de cementpasta aan de koperslakken [Khanzadi & Behnood (2009)].

Bovendien is een afname van de waterabsorptie merkbaar, waarbij een minimale waterabsorptiecoëfficiënt wordt bekomen bij een zandvervanging van 40% [Al-Jabri et al. (2009), Shi et al. (2008)]. Daarnaast vergroot de verwerkbaarheid van het verse beton door gebruik van koperslakken als zandvervanging. Deze verhoogde verwerkbaarheid is te wijten aan de hogere hoeveelheid vrij water en de glasachtige oppervlaktestructuur van de slakken (zie Figuur 2-3).

Wanneer de koperslakken worden toegevoegd als cementvervanging, wordt een toename van het aantal fijne poriën en een afname van het aantal grote poriën waargenomen. Dit veroorzaakt een afname in watersabsorptie en in capillaire opzuiging van het beton. Bovendien wordt door de dichtere structuur van de verharde koperslakken, een verminderde carbonatatiediepte verwezenlijkt, waardoor een hogere duurzaamheid wordt bekomen. [Moura et al. (2007)].



Figuur 2-3: Koperslakken gezien door microscoop [Moura et al. (2007)]

2.1.2.4. Vliegas

Bij de verbranding van steenkool, wordt met behulp van elektrofilters of doekfilters de in de rookgassen meegevoerde as neergeslagen en afgevoerd. Deze as wordt vliegas genoemd en bestaat voor het grootste deel uit siliciumoxide, ijzeroxides en aluminiumoxide. Daarnaast bevat het onder andere zware metalen. Vliegas bindt in aanwezigheid van water de kalk die vrijkomt bij de hydratatie van portlandcement. De reactie ervan is dus puzzolaan. Op lange termijn zorgt vliegastoefvoeging voor een betere dichtheid en draagt het bij tot de sterkte. Het kan dus gebruikt worden als toevoegsel of als gedeeltelijke cementvervanging. De korrelopbouw van vliegas speelt een belangrijke rol in de geschiktheid als toevoegsel. Door het kogellagereffect van de kleine glasachtige bolletjes in vliegas, werkt het plastificerend, waardoor een gelijke verwerkbaarheid met minder water bekomen wordt. De korrelverdeling is dan weer van belang voor de dichtheid van de cementsteen. Vliegas kan worden onderverdeeld in twee categorieën [ASTM C618-03 (2003)]. Klasse C bezit een vrij hoog calciumgehalte (tot meer dan 10%). Hierdoor heeft de vliegas, naast puzzolane, ook hydraulische eigenschappen. Klasse F heeft een laag calciumgehalte en vertoont dus een uitsluitende puzzolane werking. Vliegas uit België behoort tot deze klasse [Van den Heede (2008)].

In Tabel 2-3 wordt een gemiddelde chemische samenstelling van vliegas gegeven [Belgische BetonGroepering (2006)].

Tabel 2-3: Voorbeeld gemiddelde chemische samenstelling vliegash [Belgische BetonGroepering (2006)]

Verbinding	Gemiddeld (%)	Standaard-afwijking (%)
SiO ₂	51,1	1,4
Al ₂ O ₃	26,1	0,9
Fe ₂ O ₃	7,8	1,3
CaO	5,2	0,6
MgO	1,6	0,2
K ₂ O	1,4	0,2
C	4,4	0,4
<30 μ m	63,1	8,3

2.1.2.5. Hulpstoffen

Superplastificeers zijn hulpstoffen die, voor een gegeven betonmengeling, toelaten het watergehalte sterk te reduceren, zonder hierbij de verwerkbaarheid te wijzigen of, bij gelijkblijvend watergehalte, tot een aanzienlijke verhoging van de verwerkbaarheid leiden. Door adsorptie hechten de moleculen van superplastificeers zich vast aan het grensvlak tussen de cementdeeltjes en het aanmaakwater. Eens vastgehecht, vormen de superplastificeers rond elk cementdeeltje een laag met negatieve lading, waardoor de deeltjes dus dezelfde oppervlaktelading bekomen en elkaar elektrostatisch afstoten, wat een toename in verwerkbaarheid teweegbrengt.

Ook luchtbelvormer behoort tot de categorie van hulpstoffen. Dit product wordt echter uitgebreid in paragraaf 2.2.2.3.6 behandeld.

2.1.2.6. Fillers

Fillers zijn inerte toevoegsels waarvan de maximale korreldiameter kleiner is dan 80 μ m. Door behandeling van gesteenten zoals kalksteen, porfier, zandsteen... worden deze poeders gevormd. De reologische eigenschappen van vers beton wijzigen door de toevoeging van fillers. De verwerkbaarheid van het beton vermindert met name door de grote specifieke oppervlakte van de fillers. Vooral in zelfverdichtend beton worden deze inerte toevoegsels vaak aangewend. In deze toepassing zorgen de fillers namelijk voor een verbeterde samenhang en een verhoging van de weerstand tegen ontmenging en waterafscheiding van de uiterst vloeibare mengsels [Belgische Betongroepering (2006)].

2.1.3. Chemische samenstelling van volledig recycleerbaar beton

2.1.3.1. Samenstellingsparameters van een grondstoffenmengsel voor cementproductie

Met behulp van vier parameters kan een ideaal grondstoffenmengsel voor cementproductie en dus ook het volledig recycleerbaar beton samengesteld worden. Door de kalkverzadigingsfactor LSF, de silica modulus SM, de alumina modulus AM en de hydraulische modulus HM te beperken tot een zeker interval, wordt de chemische samenstelling van het grondstoffenmengsel rechtstreeks bepaald. Deze vier parameters geven elk een verhouding weer tussen de verschillende basisoxiden, nodig voor klinkerproductie. Tabel 2-4 [De Schepper (2009)] geeft een overzicht van de streefwaarden uit de literatuur voor deze parameters en de waarden van enkele gerealiseerde samenstellingen. Ook de mineralogische samenstelling volgens de formules van Bogue wordt vermeld.

Tabel 2-4: Overzicht van gehanteerde waarden in de literatuur voor LSF, SM, AM, HM en de potentiële mineralogische samenstelling volgens de formules van Bogue
*streefwaarden; ** waarden van gerealiseerde samenstellingen [De Schepper (2009)]

	<i>Taylor*</i> (1997)	<i>BBC*</i> (2006)	<i>Dietmar et al.*</i> (2006)	<i>Galbenis et al.* (2006)</i>		<i>Bye*</i> (1999)	<i>Kakali et al.**</i> (2003)	<i>Puertas et al.**</i> (2008)	<i>Binici et al.**</i> (2008)
				Algemeen	Gewenst				
Parameters [-]									
LSF	0,92-0,98	-	-	0,66-1,02	0,92-0,96	0,96	0,981	0,98	0,982-0,997
SM	2,0-3,0	-	-	1,9-3,2	2,3-2,7	3,00	2,42	2,30	2,0-2,1
AM	1,0-4,0	-	-	1,3-2,5	1,3-1,7	-	1,32	1,50	1,4
HM	-	-	-	1,7-2,3	~2	-	2,22	-	2,1
Potentiële mineralogische samenstelling volgens de formules van Bogue [%]									
C ₃ S	50-70	40-75	52-85	-	-	-	71,1	-	65,7-66,5
C ₂ S	15-30	10-35	0-27	-	-	-	7,7	-	5,6-8,6
C ₃ A	5-10	0-15	7-16	-	-	-	6,9	-	8,1-8,2
C ₄ AF	5-15	1-20	4-18	-	-	-	11,6	-	11,7-11,9

Enkel de formules voor de samenstellingsparameters, met een summiere verklaring ervan worden hier weergegeven. Voor een meer uitgebreide toelichting wordt verwezen naar Taylor (1997) en De Schepper (2009).

De kalkverzadigingsfactor of lime saturation factor (LSF) is de verhouding van de aanwezige kalk tot de kalk die chemisch gezien nodig is opdat al het SiO₂, AlO₃ en Fe₂O₃ hiermee zou reageren. Formule (2.8) illustreert deze verhouding:

$$LSF = \frac{m\%(CaO)}{2,8 \cdot m\%(SiO_2) + 1,2 \cdot m\%(Al_2O_3) + 0,65 \cdot m\%(Fe_2O_3)} \quad (2.8)$$

De silica modulus SM, berust evenals de alumina modulus AM op een louter empirische basis.

$$SM = \frac{m\%(SiO_2)}{m\%(Al_2O_3) + m\%(Fe_2O_3)} \quad (2.9)$$

$$AM = \frac{m\%(Al_2O_3)}{m\%(Fe_2O_3)} \quad (2.10)$$

De hydraulische modulus is mathematisch gezien de verhouding tussen de kalk en de andere basisoxiden.

$$HM = \frac{m\%(CaO)}{m\%(SiO_2) + m\%(Al_2O_3) + m\%(Fe_2O_3)} \quad (2.11)$$

2.1.3.2. De formules van Bogue

Met behulp van de formules van Bogue is het mogelijk om de samenstelling van de klinker vooraf reeds in te schatten aan de hand van de chemische samenstelling van het grondstoffenmengsel. Deze formules bieden echter slechts een mogelijke samenstelling van de hydraulische klinker en niet de exact werkelijke. Er dient dus met de nodige omzichtigheid mee omgesprongen worden [Taylor (1997), De Schepper (2009)].

De formules:

$$m\%(C_3S) = 4,0710 \cdot m\%(CaO) - 7,6024 \cdot m\%(SiO_2) - 6,7187 \cdot m\%(Al_2O_3) - 1,4297 \cdot m\%(Fe_2O_3) \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} m\%(C_2S) &= -3,0710 \cdot m\%(CaO) + 8,6024 \cdot m\%(SiO_2) \\ &\quad + 5,0683 \cdot m\%(Al_2O_3) + 1,0785 \cdot m\%(Fe_2O_3) \\ &= 2,8675 \cdot m\%(SiO_2) - 0,7544 \cdot m\%(Fe_2O_3) \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$m\%(C_3A) = 2,6504 \cdot m\%(Al_2O_3) - 1,6920 \cdot m\%(Fe_2O_3) \quad (2.14)$$

$$m\%(C_4AF) = 3,0432 \cdot m\%(Fe_2O_3) \quad (2.15)$$

De formules zijn gebaseerd op volgende veronderstellingen [Taylor (1997)]:

- *De 4 hydraulische componenten zijn C_3S , C_2S , C_3A en C_4AF*
- *Fe_2O_3 komt voor onder de vorm van C_4AF*
- *Het overblijvende Al_2O_3 komt voor onder de vorm van C_3A*
- *Het C_3S en C_2S -gehalte wordt bepaald door het totale CaO -gehalte, verminderd met de CaO aanwezig in C_4AF en C_3AF*

Zowel de kalkverzadigingsfactor als de formules van Bogue, zijn gebaseerd op de chemische reactie van de basisoxiden en zodoende zijn beide dan ook niet onafhankelijk van elkaar.

2.2. Duurzaamheid van beton

2.2.1. Wapeningscorrosie

2.2.1.1. Corrosie

In gewapend beton is wapeningsstaal van nature vrij goed beschermd tegen corrosie: dankzij het sterk alkalische milieu in beton wordt op het wapeningsstaal een dunne oxidehuid of passiveringslaag (Fe_2O_3 en Fe_3O_4) gevormd. Deze passiveringslaag kan doorbroken worden onder invloed van chloride-indringing of carbonatatie (respectievelijk paragraaf 2.2.1.2 en paragraaf 2.2.1.3). Beide fenomenen doen immers de pH in beton, die volgens Souwerbren (1998) normaliter 13 bedraagt, dalen. 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)].

Hinderlijke corrosie van wapeningsstaal betekent in de meeste gevallen de vorming van roest. Door de vorming van deze roest ontstaat een drukopbouw in het beton, die kan leiden tot scheuren of het afdrukken van de betondekking, doordat het volume van roest veel groter is dan dat van het oorspronkelijke staal [Souwerbren (1998)]. Door de hydroxide-ionen, afkomstig van het $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dat gevormd werd bij de hydratatie van portlandcement, zal het poriënwater dat het staal omgeeft, in normale omstandigheden een hoge pH bezitten. Calciumhydroxide is namelijk goed oplosbaar in water: vergelijking (2.16).

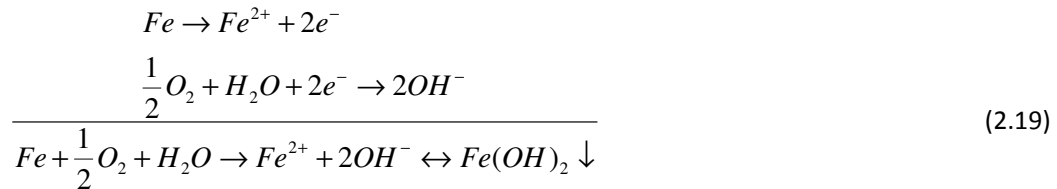


Indien de dunne, beschermende huid van ijzeroxides op het staaloppervlak vernietigd wordt, kan het elektrochemisch proces van corrosie doorgaan tot zelfs de volledige vernietiging van de betonstructuur bereikt wordt. Op het staaloppervlak gebeuren zowel de anodische als kathodische reactie. Aan de anode lost ijzer op (2.17) en aan de kathode volgt de reactie met de zuurstof in de waterige oplossing (2.18).



Elektronen worden zodoende van de anode naar de kathode verplaatst doorheen het staal en de hydroxides worden van de kathode naar de anode overgebracht doorheen het beton. De mate van corrosie wordt dus door één van beide reacties beperkt [Söylev & Richardson (2008)].

De evenwichtspotential van beide reacties samen ligt tussen die van de afzonderlijke reacties en wel zo dat de anodestroom en de kathodestroom aan elkaar gelijk zijn. Deze evenwichtspotential wordt de corrosiepotential genoemd. De kathodereactie zorgt ervoor dat de anodereactie kan plaatsvinden [Lammertijn (2007)]. De nettoreactie die bekomen wordt, wordt voorgesteld door vergelijking (2.19).



Voor de corrosie van staal is dus zowel water als zuurstof nodig. Bij de corrosiereactie wordt ijzerhydroxide ($Fe(OH)_2$) gevormd, dat door reactie met zuurstof verder wordt geoxideerd tot ijzeroxide (Fe_2O_3 en Fe_3O_4).

2.2.1.2. Chloride-geïnitieerde corrosie

Hoewel het maximale chloride-gehalte in betongrondstoffen streng gereguleerd is (zie Tabel 2-5) kan deze grens toch overschreden worden door inwerking van chloriden van buitenaf. Langdurig contact met zeewater en zeewind of de inwerking van dooizouten zijn hiervan veel voorkomende voorbeelden.

Tabel 2-5: Maximum chloridengehalte van beton [NEN EN206-1 (2000), Tabel 10]

Betongebruik	Chloride klasse	Maximum hoeveelheid Cl ⁻ ten opzichte van de cementmassa
Bevat geen metalen wapening of ander ingesloten metaal, met uitzondering van corrosiebestendige onderdelen	Cl 1,0	1,00m%
Bevat metalen wapening of ander ingesloten metaal	Cl 0,20	0,20m%
	Cl 0,40	0,40m%
Bevat voorgespannen staal	Cl 0,10	0,10m%
	Cl 0,20	0,20m%

Het gemiddelde zoutgehalte van het zeewater in de meeste zeeën (hierbij ook de Noordzee) is volgens De Rouck (2009) 34 à 36 ‰ (deeltjes per duizend in gewicht). De gemiddelde samenstelling van het zeewater is in Tabel 2-6 terug te vinden .

Tabel 2-6: Gemiddelde samenstelling zeewater [De Rouck (2009)]

Samenstelling zeewater (m‰)	
NaCl	27,21
MgCl ₂	3,81
MgSO ₄	1,66
CaSO ₄	1,26
K ₂ SO ₄	0,68
CaCO ₃	0,12
MgBr ₂	0,08
34,82	

Door de aanwezigheid van vrije chloorionen kunnen de ijzerionen uit de passiveringslaag vrij komen. De chloorionen kunnen de passiveringslaag dan binnendringen en reageren met het ijzer, om gemakkelijk oplosbaar ijzerchloride te vormen (2.20).



Door de vervolgreactie worden de chloorionen niet verbruikt, maar blijven ze voor verdere omzettingsprocessen beschikbaar (2.21).



In een parallelle reactie ontstaat zoutzuur (HCl), waardoor de pH van het poriewater wordt verlaagd (2.22). Dit heeft een versneld oplossen van de ijzerionen tot gevolg, waardoor een nog zuurder milieu ontstaat.



Hierdoor ontstaat uiteindelijk lokale aantasting van de wapening (putcorrosie). [Cement&BetonCentrum (1976-2001)]

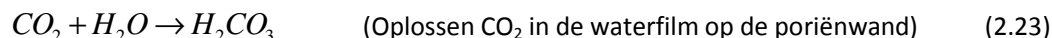
Tabel 2-7 [NEN EN 206-1 (2000)] geeft een overzicht van de verschillende milieuklassen die van toepassing zijn met betrekking tot indringing van chloriden.

Tabel 2-7: Corrosie geïnitieerd door chloriden [NEN EN 206-1 (2000), tabel 1]

Corrosie geïnitieerd door chloriden uit andere bronnen dan zeewater		
Voor beton met wapening of andere metalen onderdelen, blootgesteld aan contact met water dat chloriden, inclusief doozouten, bevat die komen uit ander bronnen dan zeewater, gelden de volgende milieuklassen:		
XD1	Matige vochtigheid	Betonoppervlakken blootgesteld aan chloriden uit de lucht
XD2	Nat, zelden droog	Zwembaden
		Beton blootgesteld aan chloridehoudend industriewater
XD3	Wisselend nat en droog	Brugdelen blootgesteld aan chloridehoudend spatwater
		Verhardingen
		Vloeren van parkeerplaatsen voor voertuigen
Corrosie geïnitieerd door chloriden uit zeewater		
Voor beton met wapening of andere ingesloten metalen onderdelen, blootgesteld aan chloriden uit zeewater of aan lucht dat zout bevat uit de zee, gelden de volgende milieuklassen:		
XS1	Blootgesteld aan zout uit de lucht, maar niet in direct contact met zeewater	Constructies bij of aan de kust
XS2	Blijvend ondergedompeld in zeewater of brak water	Delen van constructies in zee
XS3	Getijde-, spat- en nevelzone	Delen van constructies in zee

2.2.1.3. Carbonatatie-geïnitieerde corrosie

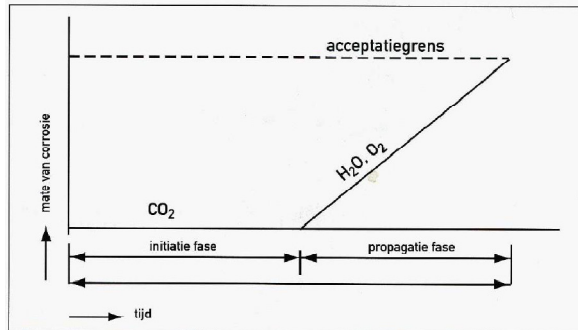
De carbonatatiereactie (cf. paragraaf 2.2.4) vindt plaats op het grensvlak van de lucht en het poriënwater. Het in het poriënwater aanwezige calciumhydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reageert met koolzuur (H_2CO_3) tot calciumcarbonaat (CaCO_3). Bij de reactie komt overigens nogal wat water vrij zoals blijkt uit onderstaande reactievergelijkingen.



Het gevolg hiervan is dat de zuurtegraad van het beton verhoogt (de pH-waarde daalt van ongeveer 13 bij niet-gecarbonateerd beton tot 8 á 9 bij gecarbonateerd beton), waardoor de passiveringslaag van het staal bij gewapend beton aangetast raakt. Indien er voldoende zuurstof en vocht voorhanden is, kan de betonwapening hierdoor beginnen corroderen.

Bij carbonatatie-geïnitieerde corrosie is sprake van algemene corrosie, wat wil zeggen dat de corrosie gelijkmatig is verdeeld over het staaloppervlak. Bij de passivering in het van oorsprong alkalische milieu kan bij corrosie van staal in beton onderscheid worden gemaakt tussen twee

fasen. Enerzijds is er de initiatiefase waarbij het beschermend milieu tot aan de wapening wordt teniet gedaan (depassivering), anderzijds is er de propagatiefase waarin de corrosie zich kan ontwikkelen (Figuur 2-4).



Figuur 2-4: Schematisch verloop van corrosie door carbonatatie van staal in beton [Souwerbren (1998)]

Gezien het slecht oplosbare calciumcarbonaat echter direct neerslaat in het poriënsysteem en dit hierdoor dichtert maakt, belemmert het daardoor het binnendringen van koolzuurgas. Eerst moeten alle overgebleven OH^- -ionen door verse aanvoer van koolzuurgas worden gebonden, voordat verdere carbonatatie kan plaatsvinden. Bovendien moet het gevormde water eerst verdampen voordat het carbonatatiefront weer verder kan trekken. Mede omdat de af te leggen weg langer wordt naarmate de carbonatatie diepte voortschrijdt, neemt de indringsnelheid steeds verder af. [Souwerbren (1998)].

2.2.2. Vorst en dooizouten

2.2.2.1. Inleiding

Gezien het gebruik van beton voor wegverhardingen erg vaak voorkomt, zijn vorst en dooizouten een belangrijk punt van aandacht met betrekking tot duurzaamheid. Kenmerkend voor dit schademechanisme is de afschilfering (=scaling) van de oppervlaktelaag. Omtrent de precieze achterliggende werkingsmechanismen bestaat nog steeds een zekere onduidelijkheid.

Volgens NEN-EN 206-1 (2000) wordt de aantasting door vorst-dooicycli met of zonder dooizouten opgedeeld in verschillende milieuklassen, weergegeven in Tabel 2-8.

Tabel 2-8: Aantasting door vorst-dooicycli [NEN-EN 206-1 (2000), tabel 1]

Aantasting door vorst-dooicycli met of zonder dooizouten		
Voor beton blootgesteld aan significante vorst-dooicycli en vocht gelden de volgende milieuklassen:		
XF1	Matige waterverzadiging zonder dooizouten	Verticale betonoppervlakken blootgesteld aan regen en vorst
XF2	Matige waterverzadiging met dooizouten	Vericale betonoppervlakken van wegconstructie blootgesteld aan vorst en met de lucht meegevoerde dooizouten
XF3	Hoge waterverzadiging zonder dooizouten	Horizontale betonoppervlakken blootgesteld aan regen en vorst
XF4	Hoge waterverzadiging met dooizouten of zeewater	Wegen en brugdekken blootgesteld aan dooizouten
		Betonoppervlakken blootgesteld aan direct gesproeide dooizouten en aan vorst
		Spatzone van constructies in zee blootgesteld aan vorst

2.2.2.2. Algemene vorstschade

Algemene vorstschade treedt op door het bevriezen van water in poriën van met water verzadigd beton (interne kristallisatie). Bij dit bevriezen neemt het volume van water met ongeveer 9% toe. Gezien het water eerst aan het betonoppervlak bevroert, wordt dit volledig van de omgeving afgesloten en komt het nog niet bevroren water onder druk te staan. Deze vriesdrukken zorgen voor een lokale herverdeling van het aanwezige vocht gedurende het vriesproces, gevolgd door de absorptie van vocht van buitenaf gedurende het dooien. Wanneer het beton verschillende cycli na elkaar doorloopt, kunnen deze drukken zo hoog worden dat het beton inwendig kapot gedrukt wordt, afbrokkelt en eventueel zelfs zo ernstig beschadigd wordt dat de constructie niet meer bruikbaar is. Vooral jong beton is nog zeer gevoelig voor dergelijke vorstschade, omdat het nog veel ongebonden water bevat en nog niet zijn volledige sterkte heeft bereikt. Beton met een zekere leeftijd laat zich niet zo snel verzadigen met water omdat er door de voortgaande hydratatie steeds meer water wordt gebonden. Hierdoor groeien de kanaaltjes van de poriënstructuur langzaam dicht, waardoor de permeabiliteit kan dalen. Bovendien worden holle ruimten gevormd

die bij vorst voor expansie benut kunnen worden. [Cho (2007), Siebel (1989) en Cement&BetonCentrum (1980-1999)]

2.2.2.3. Oppervlakteschade

2.2.2.3.1. Algemeen

Oppervlakteschade door vorst – dooicycli in combinatie met dooizouten, heeft geen gevolg voor de mechanische integriteit van het betonelement. De schade die het veroorzaakt, is wel progressief en zorgt er voor dat het betonelement gevoeliger wordt voor de indringing van vocht en agressieve stoffen die de algemene duurzaamheid kunnen aantasten. Concreet kunnen ingedrongen chloriden de wapening aantasten en kan bij verzadiging door water, door interne bevrozing, sterkteverlies optreden. Ook esthetisch blijkt dit vaak minder aantrekkelijk door de blootstelling van de grove granulaten. Er werd geconstateerd dat de meest ongunstige concentratie van zout in een oplossing ongeveer 3 m% bedraagt. Dit kritische percentage is volledig onafhankelijk van het type oplosmiddel. [Cho (2007), Valenza & Scherer (2007-1)]

Wanneer er geen zoutoplossing op het oppervlak aanwezig is, zal er geen afschilfering plaats vinden, tenzij na een groot aantal cycli (i.e. > 100) en bij een zwak oppervlak of een zeer lage betonkwaliteit. Bovendien werd geconstateerd dat de zoutoplossing op het oppervlak belangrijker is dan de samenstelling van de poriënvloeistof. Als de minimum temperatuur stijgt, daalt de schade. Bovendien treedt er geen schade op als de minimum temperatuur boven de -10°C blijft. Een langere tijd op de minimum temperatuur resulteert in een ernstiger schadeprofiel. [Valenza & Scherer (2007-2), Marchand et al. (1999)]

2.2.2.3.2. Invloed van w/c-factor

Door een lagere w/c-factor te hanteren, wat een hogere weerstand tegen afschilfering veroorzaakt, zal er minder uitzwetting (= bleeding) optreden en een hogere sterkte bekomen worden. Beton met een w/c-factor kleiner dan 0,3 hoeft geen toevoeging van luchtbelvormer om te weerstaan aan afschilfering. Bij het gebruik van hoogovenslakken of vliegashuis, kan een lagere w/c-factor gehanteerd worden, om uitzweten te vermijden. Door het gebruik van hoogovenslakken of vliegashuis is de beginsterkte van het beton wel lager, zodat in deze beginfase logischerwijze verminderde prestaties van het beton te verwachten vallen met betrekking tot vorstweerstand in combinatie met dooizouten [Neville (1996)].

2.2.2.3.3. Invloed van vliegas

Volgens Gebler & Klieger (1986) vermindert de toevoeging van vliegas de weerstand tegen afschilfering. Dit effect is te wijten aan een zwak oppervlak. Eens dit oppervlak echter verwijderd is, is het materiaal beter bestand tegen verder afschilferen. Bovendien wordt de schade door afschilfering sterk gereduceerd wanneer de sterkte op 28 dagen 40 N/mm² nadert of indien de w/c-factor kleiner of gelijk aan 0,5 is. Het grootste gedeelte van de afschilfering bij beton met vliegas treedt op tijdens de eerste 20 vries-dooicycli. Over het algemeen is het beton met het grootste massaverlies ook het beton met de laagste schuurweerstand.

2.2.2.3.4. Invloed van hoogovenslakken

Bij het gebruik van hoogovenslakken wordt een toename van de afschilfering waargenomen gedurende de eerste tien vorst-dooicycli. Dit is niet te wijten aan het verschil in sterkte, maar wel aan het zwakkere oppervlak. Bij het gebruik van slakken neemt de mate van uitzetting toe bij gelijkblijvende w/cm-factor, omdat de benodigde waterhoeveelheid afhankelijk is van de hoeveelheid cement. Indien dus meer cement vervangen wordt door slakken, stijgt de w/c-factor en bijgevolg ook de afschilferingsschade. Normaliter wordt bij gewoon portlandcementbeton een dichtere microstructuur bekomen door carbonatatie, maar bij beton met toegevoegde slakken wordt in tegendeel een grovere microstructuur gevormd. Hierdoor is de weerstand tegen afschilfering van gecarbonateerd beton met hoogovenslakken gedaald, terwijl bij gewoon beton deze weerstand zou stijgen. Bovendien is de diepte van de afschilfering evenredig met de diepte van de carbonatatie, wat er op wijst dat enkel de oppervlaktesterkte de gevoeligheid voor afschilfering bepaalt [Stark & Ludwig (1997)].

2.2.2.3.5. Hoogovencement versus portlandcement

Volgens het Cement&Betoncentrum (1980-1999) zal bij gelijke hydratatiegraad en onder dezelfde verhardingscondities beton met hoogovencement een fijnere poriënstructuur vertonen dan beton met portlandcement. Dit is opmerkelijk, gezien volgens Valenza en Scherer (2007-1) geconcludeerd werd dat de toevoeging van hoogovenslakken zou leiden tot een grovere microstructuur. Vermoedelijk is dit verschil te wijten aan de normaliter hogere maalfijnheid wanneer de slakken in cement worden toegepast. Bij een vorstaanval zou dit een nadeel zijn, omdat de poriën in het beton met hoogovencement hierdoor trager uitdrogen. Als gevolg daarvan, is de mate van verzadiging dikwijls groter dan bij beton met portlandcement. Bovendien vereisen fijnere poriën een grotere hoeveelheid lucht als expansieruimte.

2.2.2.3.6. Invloed van luchtbelvormer

Zoals hoger vermeld, is het specifieke volume van ijs negen procent hoger dan dat van water. Hierdoor ontstaat een interne drukspanning in het beton. Door op artificiële wijze luchtbellens te genereren in dit beton, ontstaan als het ware expansieruimtes, waardoor de druk afgeleid kan worden en het schadelijk effect van deze spanningen vermeden of gereduceerd kan worden. Luchtbelvormers bestaan in hoofdzaak uit synthetische harsen, alkalische zeep van natuurlijke vetzuren, natriumzeep en sulfonaten van vetalcohol. Luchtbelvormers bestaan uit moleculen die lange ketens vormen met een hydrofoob en een hydrofiel gedeelte. Hierdoor oriënteren deze zich in het grensvlak water-lucht zodanig dat het ioniseerbare, hydrofiele deel zich in het water en het andere deel zich in de luchtbel bevindt. Doordat de luchtbellens aan hun oppervlak een negatief geladen molecule vertonen, stoten ze zich onderling af, zodat het samensmelten wordt vermeden en een gelijkmatige verdeling over de massa wordt gegarandeerd. Doordat de oppervlaktespanning van het water verminderd wordt door de oriëntatie van de moleculen van deze hulpstof, zullen ook de krachten die de luchtbellens trachten te breken en samen te smelten tot grotere bellens, verminderen [Belgische BetonGroepering (2006)].

Het is nu evenwel zo dat het water in beton niet allemaal bij eenzelfde temperatuur in ijs omgezet wordt. Het vriespunt is lager naarmate de diameter van de poriën kleiner is. De gelporiën zijn zodanig klein dat er geen ijs in gevormd wordt. Naarmate de temperatuur daalt, zal het poriënwater geleidelijk bevroren en het nog aanwezige water ondervindt een steeds toenemende druk tengevolge van het expanderende ijs. Indien deze druk niet afgebouwd wordt, kunnen de inwendige trekspanningen in beton zodanig groot worden dat beton scheurt. De aanwezige luchtbellens kunnen nu fungeren als expansieruimte voor het bevrorend water zodat geen inwendige drukken worden opgebouwd [Taerwe (2004)]. Volgens Siebel (1989) en het Cement&BetonCentrum (1980-1999) bedraagt de ideale tussenafstand van luchtbellens, om destructieve dilatatie als gevolg van interne kristallisatie te voorkomen, 250 tot 300 micrometer. Volgens Taerwe (2004) echter, is de maximumafstand idealiter slechts 200 μm . De afstandsfactor kan conventioneel bepaald worden volgens ASTM C457. De diameter van de luchtbellens is meestal begrepen tussen 50 en 150 μm .

In Neville (1996) en Taerwe (2004) wordt nog een tweede voordelig effect van luchtbelvormer aangehaald, met name dat ingesloten lucht uitzwetting zal verminderen. Luchtbellens verminderen uitzwetting door vast te houden aan de cementdeeltjes, die op deze manier als het ware drijven op de luchtbellens. Taerwe (2004) vergelijkt dit effect met het effect van fijne zandkorrels, met dien verstande dat er geen extra watertoevoeging vereist is bij luchtbelvormer. Dit is met betrekking tot

de oppervlaktesterkte zeer belangrijk, omdat uitzwetting resulteert in een variatie in de w/c-factor en dus de densiteit over de dikte van het beton. De grootste densiteit is te vinden op de bodem van het proefstuk of in de kern van het beton. De densiteitsvariatie brengt een variatie in sterkte teweeg, met het zwakste beton aan het oppervlak.

2.2.2.3.7. Mogelijke schademechanismes

- *Neerslag van zout*

Wanneer een zoutoplossing bevroest, neemt het ijs geen losgekoppelde zout-ionen op in het kristalrooster. Hierdoor zal de concentratie van zout in de resterende oplossing steeds toenemen. Het oppervlak zal dus blootgesteld worden aan een oplossing waarvan de samenstelling afhankelijk is van de opgelegde minimumtemperatuur. Bij elke temperatuur bestaat er bijgevolg een evenwicht tussen de volumes van het ijs en de zoutoplossing. Het volume van de geconcentreerde oplossing neemt samen met de initiële concentratie van de oplossing af. Gedurende een gebruikelijk laboratoriumexperiment op afschilfering onder inwerking van dooizouten, zal neerslag van zouten slechts gebeuren bij een zeer lage temperatuur of een zeer hoge concentratie van zout. Dit kan dus geen mogelijke oorzaak van afschilfering zijn. Bovendien zou dit niet kunnen verklaren hoe een extremum aan schade bij 3 m% aan zout kan optreden, bij chemisch ongelijke oplossingen. In praktijkomstandigheden zal de concentratie aan zout in het betonoppervlak echter in evenwicht staan met dat van de externe oplossing. Door het drogen zal de concentratie in de poriënvloeistof toenemen en zal neerslag van zout plaats vinden. Er werd aangetoond dat deze omstandigheden leiden tot destructieve spanningen. De mate van schade hangt volledig af van de hoeveelheid zout in de oplossing en de hoeveelheid zout die via drainage afgevoerd kan worden [Thaulow & Sahu (2004), Yang et al. (1997)].

- *Osmotische drukgradiënt*

Hierboven werd reeds aangehaald dat de concentratie van zout in de overblijvende vloeistof stijgt wanneer ijs wordt gevormd van deze vloeistof. Door deze stijging zal, wanneer ijs wordt gevormd op het betonoppervlak, een verschil ontstaan in zoutconcentratie tussen de zone in de omgeving waar dit ijs zich ontwikkelt en de omringende verzadigde poreuze massa. Hierdoor zal het water willen diffunderen van de zone van lage concentratie naar de zone van hoge concentratie. Wanneer het water diffundeert in die richting, zal de vloeistofdruk daar stijgen. Uiteindelijk zal de druk equivalent worden aan het verschil in osmotische druk behorend bij de twee concentraties. Door deze osmotische druk zal een trekspanning ontstaan in de poreuze massa. Wanneer het verschil in zoutconcentratie boven 14% stijgt, kan deze spanning boven de treksterkte van de betonmatrix reiken.

In de praktijk zal deze osmotische druk echter nooit een destructief niveau kunnen bereiken. Wanneer de watermoleculen diffunderen in de richting van de zone van hoge concentratie en daar aldus de vloeistofdruk doen stijgen, zal als tegenreactie een vloeistofstroom ontstaan. Deze vloeistofstroom zal voorkomen dat de osmotische druk destructief kan worden, aangezien de hydrodynamische relaxatie snel de groeiende druk wegneemt. Osmotische druk kan ook de meest negatieve concentratie niet verklaren, want deze druk is maximaal wanneer interne kristallisatie optreedt bij zeer lage temperaturen in een zoutoplossing met lage concentratie. Bovendien biedt deze theorie ook geen verklaring voor het niet-optreden van schade indien er geen oplossing op het betonoppervlak aanwezig is [Valenza & Scherer (2007-2)].

- *Interne kristallisatie als gevolg van dampdrukverschil*

De dampdruk van een verdunde zoutoplossing is lager dan deze van zuiver water. Hierdoor zal zout dat in het water is opgelost ervoor zorgen dat de verzadigingsgraad hoger zal liggen dan bij zoutvrij beton bij een gegeven relatieve vochtigheid. Bij een zekere verzadigingsgraad kan interne bevriezing schadelijk worden. Deze correlatie leidt tot de veronderstelling dat het afschilferen een gevolg is van de toename van verzadiging van het betonoppervlak onder invloed van de aanwezige dooizouten, leidend tot schade door interne kristallisatie. Dit kan echter nog niet verklaren waarom een extremum-waarde van schade bij 3% zout in de oplossing wordt gevonden, gezien bij een hoger concentratie de dampdruk nog verder afneemt [Sellevold & Farstad (1991)].

- *Interne kristallisatie als gevolg van temperatuursgradiënt*

De werking van dooizouten berust op het verlagen van het vriespunt van water in een zoutoplossing. Bij strooien van zout op een ijslaag smelt het ijs. Om dit te laten smelten is warmte nodig, die wordt onttrokken aan het onderliggende beton, waardoor de temperatuur plots sterk kan dalen. Aan het betonoppervlak zullen de concentratie en de vriespundaling het hoogst zijn. Naar binnen toe nemen de concentratie en de vriespundaling af. Gezien de temperatuursgradiënt in het beton, heeft dit tot gevolg dat het inwendige en de oppervlaktelaag eerder kunnen bevriezen dan de tussenliggende laag. Bij nog lagere temperaturen zal dan ook die tussenlaag bevriezen en volgens het Cement&BetonCentrum (1980-1999) wordt de reeds bevroren toplaag hierdoor afgedrukt, omdat het onder druk staande water opgesloten zit tussen twee bevroren lagen.

▪ *Temperatuursschok*

Volgens Schießl (1986) veroorzaakt het gebruik van dooizouten op een met ijs bedekt betonoppervlak een aanzienlijke daling in temperatuur op het betonoppervlak, een zogeheten temperatuursschok. De verschillen in temperatuur tussen het inwendige van het beton en het betonoppervlak kunnen interne spanningen opwekken waardoor er barsten ontstaan ter hoogte van het betonoppervlak.

Deze theorie wordt volkomen tegengesproken door [Valenza & Scherer (2007-1) en (2007-2)], die becijferden dat de benodigde temperatuursschok aan het oppervlak reeds 8°C zou moeten bedragen eer dit tot schade zou kunnen leiden. Een dergelijke drastisch schok zal in de praktijk nooit optreden en biedt bovendien geen verklaring voor het bestaan van een meest negatieve concentratie. Bovendien is de schade groter wanneer een zoutoplossing op een oppervlak bevroert, dan wanneer zout wordt aangebracht op een ijslaag die zich op een betonoppervlak bevindt. Er wordt geconcludeerd dat een thermische schok geen significante oorzaak kan zijn van afschilfering.

In deze redenering door Valenza & Scherer (2007-1) en (2007-2), wordt echter geen rekening gehouden met de gevolgen van de reeds bestaande temperatuursgradiënt in het betonoppervlak in combinatie met de werking van de dooizouten zoals hierboven aangehaald, die een omgekeerde temperatuursgradiënt teweegbrengt. Op deze manier kan de temperatuursschok toch een mogelijk schademechanisme veroorzaken, zoals hoger uiteengezet.

▪ *Glue spalling*

Valenza & Scherer (2007-2) stellen dat enkel het glue-spall mechanisme een volledige verklaring kan geven voor het fenomeen van de oppervlakte-afschilfering. Het glue-spall mechanisme berust op het feit dat, wanneer een oplossing bevroert op een betonoppervlak, er een ijs-beton composiet materiaal ontstaat. Wanneer de temperatuur van dit composiet tot onder de smelttemperatuur van ijs daalt, wil de ijslaag vijf keer meer samentrekken dan het onderliggende beton. De ijslaag zal scheuren door de trek die door de stijve betonmassa wordt opgelegd. Deze scheuren dringen door tot in de onderliggende cementgebonden pasta en propageren vervolgens langs een weg, parallel aan het scheidingsvlak ijs-beton. Hierdoor zal een betonschilfer loskomen. De verklaring lijkt logisch gezien de vastgestelde schade steeds bestaat uit het progressief afschilferen van beton. Zolang de sterkte van het beton gelijk blijft, zal een gelijke afschilfering ontstaan. Er dient opgemerkt te worden dat de spanning, veroorzaakt door glue spall, echter steeds kleiner is dan de gebruikelijke treksterkte van het bindmiddel. Enkel de verminderde oppervlaktereksterkte (door uitzetting, algemene ontmenging of onregelmatige behandeling) kan dus tot afschilfering leiden. Dit zou kunnen verklaren waarom het afschilferen na enige tijd vaak een bovengrens lijkt te bezitten. Het

bestaan van een meest kritische oplossing van 3 m% zout, zou als volgt kunnen verklaard worden: Zuiver water zal niet scheuren en kan bijgevolg ook geen scheuren veroorzaken in het/de onderliggende beton/cementpasta. Water met een te hoge concentratie aan zout daarentegen, zal geen sterkte kunnen ontwikkelen die voldoende groot is, binnen het hier relevante temperatuursbereik. Indien de temperatuur bovendien niet onder de -10°C daalt, zou de oplossing (met een zoutconcentratie van 3 m%) eveneens een onvoldoende sterkte kunnen ontwikkelen. Ook het ontbreken van enige vorm van schade, wanneer er zich geen zoutoplossing op het oppervlak bevindt, is bij dit mechanisme triviaal: zonder deze oplossing is er klaarblijkelijk geen sprake van een composietmateriaal. Door gebruik te maken van luchtbelvormer vermindert uitzwetting, wat tot een verhoogde oppervlaktesterkte leidt en dus rechtstreeks de mogelijkheid tot scheurvorming in het betonoppervlak bepaalt. Interne kristallisatie staat volledig los van het glue spall – mechanisme, wat de onafhankelijkheid van beide verschijnselen volledig kan verklaren. Bovendien is bij dit verschijnsel enkel de zoutconcentratie op het oppervlak van belang en heeft de poriënvloeistof geen enkele invloed op de werking van dit mechanisme.

2.2.3. Indringing van chloriden

2.2.3.1. Invloed van vliegas

Volgens Thomas & Bamforth (1999) bezit jong beton met 30% vliegas een gelijkaardige diffusiecoëfficiënt voor chloriden als een beton met gewoon portlandcement. Na een tweetal jaar bezit het echter een weerstand die een orde hoger ligt dan traditioneel beton en na honderd jaar zelfs twee ordes hoger. Volgens Baert et al. (2008) is dit te danken aan een kleine gemiddelde poriëngrootte bij gebruik van vliegas, wat resulteert in een minder doordringbare pasta. De dichte overgangszone tussen granulaat en matrix is tevens een gevolg van deze toevoeging. Hierdoor is beton met vliegas minder gevoelig voor het indringen van schadelijke chloorionen. Fijne vliegaspartikels hebben immers sferische en gladde oppervlakken, waardoor een verbeterde samensmelting ontstaat. Dit kan een vermindering van de chloride-diffusiecoëfficiënt teweeg brengen, die volgens Oh & Jang (2007) 15 tot zelfs 50 procent lager kan zijn. Dit heeft een significante invloed op het lange termijn gedrag van beton in chloriderijke omgevingen en op de interpretatie van data uit korte termijn proeven. De toepasbaarheid van de wet van Fick wordt hierbij dus ernstig in vraag gesteld, gezien het noodzakelijk blijkt om tijdsafhankelijke transportcoëfficiënten te gebruiken. Ook de beperking van korte termijn proeven om diffusie te begroten wordt hierdoor duidelijk [Thomas & Bamforth (1999), Oh & Jang (2007) en Baert et al. (2008)]. Volgens Thomas & Bamforth (1999) bezitten betonsoorten met respectievelijk 0, 35, 50 en 67 procent vliegas op een leeftijd van drie maanden een gelijkaardige weerstand tegen chloride-indringing. In de betonkern vertonen de mengsels met vliegas zelfs een hogere weerstand in vergelijking met de referentiemengeling zonder vliegas. Na twaalf maanden vertonen alle mengsels met vliegas een lagere migratiecoëfficiënt dan de referentiemengeling, onder invloed van de trage puzzolane reactie. Een fijner vliegas zou volgens Baert et al. (2008) zelfs na één maand betere resultaten garanderen. De beste weerstand wordt gevonden voor een beton waarin 35% van het cement vervangen is door vliegas. Papadakis (2000) toonde aan dat wapeningscorrosie, veroorzaakt door chloriden, steeds later zal optreden bij beton met vliegas dan bij gelijkaardig beton zonder vliegas. Het maakt hierbij niet uit of de vliegas toegevoegd werd als fijn granulaat of ter vervanging van portlandcement. Beton met vliegas is wel kwetsbaar voor carbonatatie, wat de porositeit van de microstructuur kan doen toenemen en dus de chloride-indringing kan beïnvloeden (paragraaf 2.2.4).

2.2.3.2. Invloed van hoogovenslakken

Beton waarbij een deel van het portlandcement door hoogovenslakken vervangen is, vertoont volgens Thomas & Bamforth (1999) een hogere diffusiecoëfficiënt op korte termijn. Dit is enkel het

geval voor beton met een zeer hoog percentage aan slakken (70%). Indien een gehalte van 50 procent als maximum gehanteerd zou worden, kunnen gelijkaardige resultaten bekomen worden als bij vliegaskbeton. Ook bij beton met hoogovenslakken is het gebruik van tijdsafhankelijke diffusiecoëfficiënten aan de orde. Song & Saraswathy (2006) stellen dat de weerstand tegen chloride-indringing hoger zal zijn bij beton met hoogovenslakken, op voorwaarde dat de fijnheid van de gemalen gegraneerde hoogovenslakken voldoende groot is. De fijnheid moet met name groter zijn dan deze van het te vervangen cement.

2.2.3.3. Hoogovencement versus Portlandcement

Volgens het Cement&BetonCentrum (1976-2001) is de cementsteen op basis van hoogovencement in staat om grotere hoeveelheden chloriden te binden dan Portlandcement. De verhouding tussen vrije en gebonden chloriden is niet constant, maar een functie van de cementsoort en de water-cementfactor. In principe geldt dat in beton alleen vrije chloriden tot corrosie van het betonstaal leiden. Gebonden chloriden zijn nagenoeg ongevaarlijk. Ook Oh & Jang (2007) merken op dat het percentage van gebonden chloriden een grote invloed heeft op de verdere indringing van chloriden. Een grotere hoeveelheid gebonden chloriden beïnvloedt de mogelijkheid tot aantasting door een lager aantal capillaire poriën, wat de indringing van chloriden rechtstreeks afremt. Los van een hoger percentage gebonden chloorionen speelt bij hoogovencement nog een tweede factor mee. Door de grotere dichtheid van de cementsteen vergroot de weerstand van de cementsteen en dus het beton tegen de penetratie van chloriden.

2.2.3.4. Invloed van granulaten

Melchers & Li (2009) ontdekten via uitgebreid empirisch onderzoek dat de tijd tot het begin van corrosie bij gewapende betonconstructies, blootgesteld aan mariene omstandigheden of aan dooizouten, niet zo zeer afhangt van de concentratie aan chloriden ter hoogte van de wapening. De periode dat de wapening onaangetast blijft, is gevoelig langer bij betonstructuren die met kalksteen-, (niet-reactieve) dolomietgranulaten of met hoogovencement worden vervaardigd. Deze conclusie werd getrokken uit een groot aantal waarnemingen op bestaande betonconstructies. Een verklaring voor dit verschijnsel bij hoogovencement werd reeds hoger aangehaald, doch dit biedt geen opheldering omtrent de hogere weerstand bij gebruik van kalksteen- of dolomietgranulaten. Er wordt zelfs gesteld dat de precieze omgevingsfactoren slechts een secundaire rol vervullen bij de aantasting.

Het feit dat granulaten hier een actieve rol spelen in de betonchemie en op deze manier rechtstreeks de duurzaamheid beïnvloeden, staat in schril contrast met de algemene aanname dat

granulaten zich volledig inert gedragen in de betonmatrix. De versterkte duurzaamheid met betrekking tot corrosie zou te wijten zijn aan de verhoogde hoeveelheid kalkhoudend materiaal. Een theoretische achtergrond voor dit verschijnsel is evenwel nog niet voor handen.

2.2.3.5. Andere factoren

In de praktijk wordt de migratie van chloriden niet enkel gestuurd door diffusie, maar ook door absorptie. Bij mengelingen met vliegashoudend beton wordt een sterkere absorptie waargenomen en dan vooral in de zone dicht bij het oppervlak [Oh & Jang (2007) en Baert et al. (2008)].

Wanneer de relatieve vochtigheid toeneemt, zullen meer chloriden in het beton binnendringen. Dit is het gevolg van het feit dat opgeloste chloorionen zich dan kunnen verplaatsen in het poriënvocht. Ook een hogere temperatuur leidt tot een hogere indringing [Oh & Jang (2007)]. Het indringingsprofiel onder getijdenwerking wijkt volgens Oh & Jang (2007) sterk af van het profiel bij volledige onderdompeling.

Een uitgebreid overzicht van de meest belangrijke onderzoeken omtrent chloride-indringing wordt in Audenaert (2006) gegeven. Voor verdere informatie wordt dan ook naar dit werk verwezen.

2.2.4. Carbonatatie

2.2.4.1. Inleiding

Carbonatatie is de inwerking van koolstofdioxide (koolzuurgas of CO_2) op de alkalische bestanddelen van het beton. CO_2 is in beperkte mate aanwezig in de lucht, gemiddeld wordt een concentratie van 0,03vol% aangenomen. Vooral in sterk geciviliseerde gebieden, waar er gewoonlijk een hoge uitstoot is van koolstofdioxide door verkeer en industrie, is er sprake van schade door carbonatatie. Volgens Audenaert (2006) kan dit percentage in grote steden namelijk oplopen tot 0,3vol% en uitzonderlijk tot 1vol%. Door de normaliter lage concentratie en de grote voorraad van alkaliën in beton, verloopt het proces vrij langzaam. Bovendien kan de koolstofdioxide alleen in uitgedroogde poriën binnendringen. [Sisomphon & Franke (2007); Audenaert (2006); Khunthongkeaw et al. (2006); Atis (2002); Papadakis (2000), Cement&Betoncentrum (1984-1991)]

Het verloop van de carbonatatie in beton is dus afhankelijk van de klimatologische omstandigheden waaraan het beton is blootgesteld. Hierbij kunnen vier verschillende klassen worden onderscheiden, met name: binnenklimaat, buitenklimaat onbeschut, buitenklimaat beschut tegen regen en onder water.

In een binnenklimaat met een vochtigheid lager dan 60%, droogt beton vrij snel uit en kan het carbonatatiefront snel naar binnen dringen. Wanneer het uitdrogingsfront de wapening bereikt, zal enige roestvorming optreden, die stopt zodra dit front de wapening gepasseerd is, omdat dan onvoldoende water aanwezig is.

Als het oppervlak echter aan weer en wind wordt blootgesteld, kan het water uit de poriën bij een droge periode verdampen, en kan carbonatatie optreden. Bij regen zuigen deze poriën zich opnieuw vol met water. De carbonatatie stopt dan en kan pas weer doorgaan wanneer bij een volgende droge periode het uitdrogingsfront de tot dan toe bereikte grens passeert. Uiteindelijk zal de langste droge periode dus de carbonatatediepte bepalen. Corrosie kan hier dus enkel ernstig worden wanneer het uitdrogingsfront vele malen de wapening passeert.

Bij een buitenklimaat waarbij het beton beschut wordt tegen regen, kan het poriënsysteem uitdrogen, in het bijzonder in een periode met lage relatieve vochtigheid. Wanneer de relatieve vochtigheid echter hoger ligt dan deze in de poriën, zal waterdamp naar binnen dringen en condenseren in de poriën. Bij grote variaties in temperatuur en relatieve vochtigheid (bvb. cyclus van dag en nacht, vooral in de zomer), kan deze situatie zich herhaaldelijk voordoen. Naarmate het front naar binnen trekt, daalt de snelheid. Een gevolg hiervan is dat het uitdrogingsfront na verloop

van tijd wat gaat schommelen, waarbij bijna voortdurend de combinatie van lage pH, zuurstof en water aanwezig zal zijn. Indien dit in de zone van de wapening gebeurt, kan dit uiteraard tot zeer nefaste gevolgen leiden.

Onder water is carbonatatie uiteraard te verwaarlozen door gebrek aan CO_2 . Eveneens is er geen kans op corrosie door de hoge pH en het gebrek aan zuurstof.

In NEN-EN 206-1 (2000) worden vier milieuklassen XC gedefinieerd voor de corrosie ingeleid door carbonatatie. Tabel 2-9 geeft een overzicht van de volgens NEN-EN206-1 (2000) gedefinieerde milieuklassen.

Tabel 2-9: Milieuklassen carbonatatie [NEN-EN 206-1 (2000), tabel 1]

Klasse	Omschrijving van de omgeving	Informatieve voorbeelden waar deze blootstellingsklasse kan voorkomen
Carbonatatie- geïnitieerde corrosie		
Waar beton, dat wapening of ander metaal omvat, blootgesteld is aan lucht en vocht, zal de blootstelling als volgt geclassificeerd worden: OPMERKING: De vochtconditie heeft betrekking op het beton dat de wapening of de ingesloten metalen onderdelen bedekt. In vele gevallen kan de vochtconditie in de betondekking worden afgeleid uit die van de omringende omgeving. In die gevallen kan de indeling van de omringende omgeving in milieuklassen volstaan. Dit zal echter niet het geval zijn als het beton van de omringende omgeving is afgesloten.		
XC1	Droog of permanent nat	Beton in gebouwen met lage luchtvochtigheid Beton dat permanent ondergedompeld wordt
XC2	Nat, zelden droog	Betonoppervlakken die langdurig met water in contact staan Veel funderingen
XC3	Gemiddelde vochtigheid	Beton in gebouwen met gemiddelde of hoge luchtvochtigheid Beton dat zich buiten bevindt, maar afgeschermd van regen
XC4	Cyclisch nat en droog	Betonoppervlakken die in contact staan met water, maar zich niet in blootstellingsklasse XC2 bevinden

In dit specifieke geval van volledig recycleerbaar beton, is het erg belangrijk carbonatatie zo veel mogelijk te beperken. Het CaCO_3 dat gevormd wordt, zal immers bij de regeneratie van cement, in de draaioven omgezet worden tot CaO en CO_2 . Om de CO_2 -uitstoot te beperken bij de productie van dit cement, is het dus belangrijk dat de hoeveelheid CaCO_3 in het gesloopte beton beperkt blijft [De Schepper (2009)]. Anderzijds kan ook de bedenking gemaakt worden, dat enkel het CO_2 dat voorheen door beton werd opgenomen, nu opnieuw afgestaan zal worden en er zodoende geen “nieuwe” vervuiling plaats zal vinden door deze reactie. Hoe dan ook is het natuurlijk evident dat de carbonatatie van beton beperkt moet worden.

2.2.4.2. Voorspelling carbonatatediepte

Voor gewapende betonconstructies wordt de aanvang van corrosie van de wapening algemeen beschouwd als een van de kritieke factoren om de levensduur van een betonelement te bepalen.

Hiervoor is het noodzakelijk om het tijdstip, waarop het carbonatatiefront de locatie van de wapeningstaven zal bereiken, zo exact mogelijk te bepalen [Khunthongkeaw et al. (2006)].

Zoals hoger verklaard, neemt de carbonatatie diepte in beton toe met de blootstellingstijd aan CO₂. De snelheid van voortplanten van het carbonatatiefront neemt in verhouding met de tijd echter voortdurend af. Afgaande op de tweede wet van Fick wordt algemeen aangenomen dat de carbonatatie diepte x [mm] evenredig is met de wortel van de blootstellingstijd t [s]. Deze wet wordt ook wel de vierkantswortel-tijd-wet genoemd.

$$x = k\sqrt{t} \quad (2.25)$$

Om de carbonatatiecoëfficiënt k [mm/s^{1/2}] te bepalen, kan de wet van diffusie – benaderend – worden toegepast. Diffusie is het transport van een gas of vloeistof doorheen een poreus medium in functie van een concentratiegradiënt. In dit geval is het poreuze medium het betonlichaam en wordt de concentratiegradiënt opgebouwd door het verschil aan koolstofdioxide in het beton en in de omgeving. Volgens de eerste diffusiewet van Fick kan de hoeveelheid binnengedrongen koolstofdioxide in het beton met de volgende vergelijking begroot worden:

$$J = -D \cdot \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_t \quad (2.26)$$

Hierbij is de J de koolstofdioxideflux [g/m.s²], D de diffusiecoëfficiënt [m²/s], c de CO₂-concentratie [g/m³] en x de penetratiediepte [m].

De hoeveelheid koolstofdioxide die nu in het beton diffundeert, kan nu, in termen van massa, door volgende vergelijking beschreven worden:

$$dm = -D \cdot A \cdot \frac{c_2 - c_1}{x} \cdot dt \quad (2.27)$$

Hierbij is m de massa van de koolstofdioxide die in het beton gedrongen is, c_1 is de concentratie aan CO₂ in de omringende lucht, c_2 is de CO₂-concentratie aan het beschouwde carbonatatiefront in het lichaam, A is de oppervlakte en x is de diepte van de carbonatatie.

De massa aan CO₂ die in het beton is gedrongen kan ook in een andere vorm worden weergegeven. Zoals in volgende vergelijking aangegeven, stelt C_0 de hoeveelheid CO₂ voor, die nodig is om te reageren met hydroxides in een eenheidsvolume.

$$dm = C_0 \cdot A \cdot dx \quad (2.28)$$

$$\text{Dus geldt: } C_0 \cdot A \cdot dx = D \cdot A \cdot \frac{c_1 - c_2}{x} \cdot dt \quad (2.29)$$

Door bovenstaande vergelijking te integreren wordt vergelijking (2.30) bekomen:

$$x = \sqrt{\frac{2 \cdot D}{C_0} \cdot (c_1 - c_2) \cdot t} \quad (2.30)$$

Door de voorgaande aanname dat $x = k\sqrt{t}$, moet $k = \sqrt{\frac{2 \cdot D}{C_0} \cdot (c_1 - c_2)}$. Omdat de CO_2 -concentratie in het beton aan het carbonatatiefront veel lager ligt dan in de omringende lucht, kan de waarde c_2 verwaarloosd worden en kan de carbonatatiecoëfficiënt gedefinieerd worden als $k = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot c_1}{C_0}}$. De concentratie CO_2 in de omgeving is in natuurlijke omstandigheden vaak 0,03-0,04vol%.

Bij deze redenering, vertrekkende van de wet van Fick, is de vergelijking $x = k\sqrt{t}$ gebaseerd op steady-state randvoorwaarden, zodat de carbonatatiecoëfficiënt steeds constant blijft. In de realiteit beïnvloedt de carbonatatiereactie zelf echter de poriënstructuur. Het calciumcarbonaat, dat het hoofdproduct vormt van de carbonatatie, blokkeert namelijk de poriën in het beton en veroorzaakt een reductie in de diffusiecoëfficiënt D . Hierdoor is ook de carbonatatiecoëfficiënt k geen constante, maar een parameter die afneemt in functie van de tijd. Eenvoudiger is om k nog steeds constant – tijdsafhankelijk – te onderstellen en de wet van Fick te wijzigen tot:

$$x = k \cdot t^n \quad (2.31)$$

Hierbij is n een exponent die uiteraard kleiner is dan 0,5. Sisomphon & Franke (2007) stellen voor n een waarde van 0,4 voor.

Vaak worden versnelde carbonatatieproeven uitgevoerd waardoor de testperiode van tientallen jaren, gereduceerd kan worden tot enkele weken. Uiteraard is het belangrijk om een correcte correlatie met de werkelijke carbonatatieproeven te kunnen maken. Hiertoe worden bovenstaande beschouwingen in beide omstandigheden (versnelde proef en werkelijke omgeving) toegepast. De verhouding tussen de carbonatatiecoëfficiënten in werkelijke omstandigheden en tijdens een versnelde duurzaamheidsproef kan als volgt geschreven worden:

$$\frac{k_{acc}}{k_{env}} = \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot c_{1,acc}}{C_0}}}{\sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot c_{1,env}}{C_0}}} \quad (2.32)$$

Bij hetzelfde beton (met identieke waarde van diffusiecoëfficiënt en koolstofdioxidecapaciteit wordt dit dan:

$$\frac{k_{acc}}{k_{env}} = \frac{\sqrt{c_{1,acc}}}{\sqrt{c_{1,env}}} \quad (2.33)$$

Met de subscripts “acc” en “env” respectievelijk voor versnelde en normale omstandigheden.

In Khunthongkeaw et al. (2006) wordt geen rekening gehouden met de tijdveranderlijke eigenschap van de carbonatatiecoëfficiënt k en wordt dus een blijvende lineaire functie van de wortel van de tijd aangenomen. Er wordt wel een redenering opgezet om aan de hand van een versnelde carbonatatieproef gedurende één maand, een raming te maken van de carbonatatediepte in werkelijke omstandigheden gedurende een langere periode. Uitgaande van de vierkantswortel-tijd-wet wordt volgende vergelijking opgesteld:

$$D_{n,t} = A \cdot D_a \cdot \sqrt{t} \quad (2.34)$$

Hierin is $D_{n,t}$ de carbonatatediepte van het beton dat in normale omstandigheden blootgesteld wordt aan carbonatatie, D_a is de carbonatatediepte (mm) van hetzelfde beton dat in een versnelde proef aan carbonatatie onderhevig was gedurende één maand, t is de blootstellingsduur van het beton in de praktijksituatie (maand), A is een parameter die de relatie tussen beide situaties karakteriseert en afhankelijk is van de concentratie aan CO_2 en de relatieve vochtigheid van de omgeving. Ook de temperatuur van de omgeving is hierbij van belang, maar gezien de gemiddelde jaarlijkse temperatuur in een bepaalde regio normaliter weinig veranderlijk is, kan dit buiten beschouwing gelaten worden.

Een derde mogelijkheid om een raming van de carbonatatediepte te maken is door een verband op te stellen tussen de carbonatatediepte, de porositeit en de druksterkte van beton (Atis, 2004).

- *Relatie tussen carbonatatediepte en druksterkte*

Indien de carbonatatediepte berekend kan worden uit de druksterkte, zoals geopperd in Sulapha (2003) en Atis (2003), zou dit grote voordelen met zich meebrengen, gezien beton doorgaans

gekaracteriseerd wordt aan de hand van de druksterkte. Statistische analyses brachten aan het licht dat er een lineair verband heerst tussen de carbonatatiediepte en de druksterkte van beton. Bij toenemende druksterkte van het beton, daalt de carbonatatiediepte in het element. Een correlatiecoëfficiënt van 0,90 werd bereikt voor dit verband bij beton met 50 á 70% vliegias.

▪ *Relatie tussen carbonatatiediepte en porositeit*

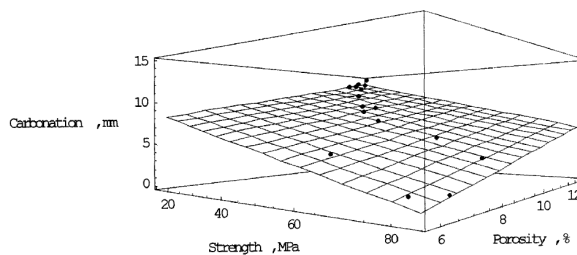
Statistische analyses op beton met vliegias werden uitgevoerd om de relatie tussen porositeit en carbonatatatie te meten. Analyse van de data toonden dat er een lineair verband bestaat tussen versnelde carbonatatatie en porositeit. Meer bepaald neemt de carbonatatiewaarde lineair toe met toenemende porositeit. De correlatiecoëfficiënt bij dit verband bedraagt 0,85.

▪ *Relatie tussen carbonatatiediepte, druksterkte en porositeit*

De druksterkte en porositeit van een willekeurige betonsoort kan onderzocht worden met proefmethodes die geen ingewikkelde procedures behoeven en in de meeste labo's bijgevolg uitgevoerd kunnen worden. Daarom is het interessant een model op te stellen dat in staat is met de resultaten van dergelijke proeven, rechtstreeks de carbonatatiediepte te begroten. Vergelijking (2.35) is de analytische beschrijving van dit model voor beton met een vervanging van cement door vliegias tussen 50 en 70% en bereikt een correlatiefactor van 0,96 [Atis (2004)].

$$C = 5,32 - 0,112 \cdot S + 0,822 \cdot P \quad (2.35)$$

Hierbij stelt S de versnelde carbonatatiediepte voor in mm, P de porositeit in procent en S de druksterkte in N/mm². In Figuur 2-5 [Atis (2004)] wordt de driedimensionale voorstelling van dit model weergegeven.



Figuur 2-5: Driedimensionale voorstelling van het carbonatatiemodel [Atis (2004)]

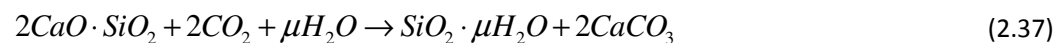
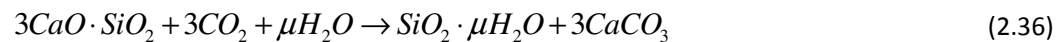
Om zonder carbonatatiemetingen toch een voorspelling van de carbonatatiediepte te maken, kan door dit sterke verband gesteld worden dat het noodzakelijk is om zowel de porositeit van het beton als de druksterkte ervan in rekening te brengen. Het model kan op deze manier een extra richtlijn vormen bij het samenstellen van een betonmengeling waaraan een zekere duurzaamheidseis met betrekking tot carbonatatatie wordt gesteld.

2.2.4.3. Invloed van vliegias

Volgens Sulapha et al. (2003) en Papadakis (2000) neemt door het vervangen van cement door vliegias, de carbonatatiegraad ernstig toe. De bevindingen van Atis (2006) daarentegen, leiden tot de conclusie dat bij beton, waarvan de cementhoeveelheid tot 50% wordt vervangen door vliegias, er sprake is van een gelijkaardige of lagere carbonatatediepte wanneer vergeleken wordt met beton zonder cementvervanging. Deze stelling wordt bevestigd door Khuntongkeaw et al. (2006), die stelt dat het effect van type vliegias uiterst miniem is wanneer wordt vergeleken met beton op gelijke sterkte. Atis (2003) voegde eraan toe dat hoe langer het beton uithardt alvorens het aan carbonatatie onderworpen wordt, hoe lager de carbonatatediepte zal zijn.

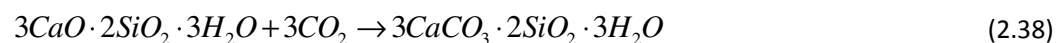
Papadakis (2000) stelt dat, wanneer vliegias aan beton wordt toegevoegd als vervangingsproduct voor fijne granulaten, de carbonatatiegraad net afneemt. Door gebruik van vliegias neemt de hoeveelheid carbonateerbaar materiaal (calciumhydroxide) af, maar dit is enkel geldig in het geval van het gebruik van vliegias als cementvervanging. De oorzaak hiervan is dat niet enkel calciumhydroxide gecarbonateerd wordt, maar ook calciumsilcaathydraat ($x\text{CaO} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ of kortweg C-S-H), het voornaamste product van de puzzolane reactie. Bij granulaatvervanging door vliegias, blijft de totale hoeveelheid carbonateerbaar materiaal bijgevolg ongeveer gelijk en bovendien zal de porositeit nog dalen.

Ook niet-gehydrateerde cementfracties zoals tricalciumsilicaat (C_3S of $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ of aliet) en dicalciumsilicaat (C_2S of $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ of beliet) zijn reactief met CO_2 [Peter et al. (2008)]. Er vinden met andere woorden verschillende parallelle reacties plaats in het beton. Enerzijds de carbonatatie van het gevormde calciumhydroxide (vergelijking (2.24)), maar daarnaast ook de carbonatatie van het nog aanwezige aliet en beliet, respectievelijk vergelijking (2.36) en (2.37).

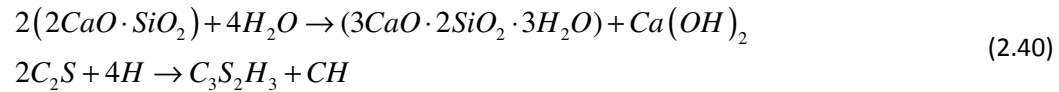
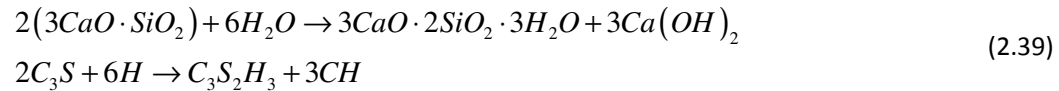


Uit Peter et al. (2008) is gekend dat deze carbonatatiereacties het alkaliëngehalte van beton echter niet rechtstreeks beïnvloeden.

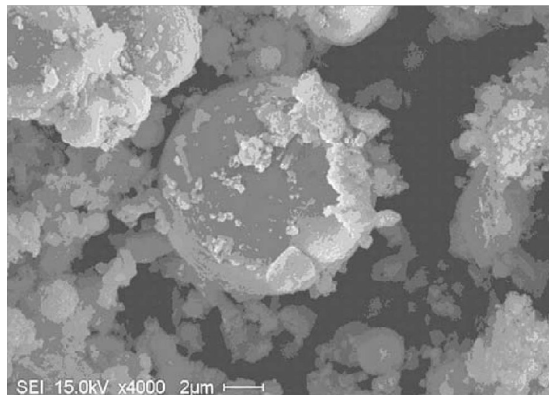
Zoals hoger aangehaald reageert ook C-S-H met het binnengedrongen CO_2 [Peter et al. (2008); Sulapha et al. (2003)]: vergelijking (2.38).



Daarnaast treden uiteraard de hydratatiereacties op in het – jonge – beton. Beliet en aliet reageren met water en vormen C-S-H-verbindingen, die verschillende ruimtelijke vormen kunnen aannemen [Taerwe (2004); Peter et al. (2008); De Schepper (2009)]. De hydratatiereacties worden door (2.39) voor aliet en (2.40) voor beliet voorgesteld.



De invloed van de reacties (2.36) en (2.37) is volgens Peter et al. (2008) verwaarloosbaar. Zelfs indien alle ongehydrateerde aliet en beliet beschikbaar zou zijn voor carbonatatie, zal dit nauwelijks het carbonatatiefront vertragen. Enkel de reactie van CO_2 met C-S-H-verbindingen is, naast de reactie van CO_2 met $Ca(OH)_2$, van belang om het carbonatatiefront op te houden. In Figuur 2-6 [Monkman & Shao (2006)] is een afbeelding te zien van gecarbonateerde vlieg-as.



Figuur 2-6: Microscopische foto van gecarbonateerde vlieg-as [Monkman & Shao (2006)]

2.2.4.4. Invloed van hoogovenslakken

Volgens het onderzoek van Bouikni et al. (2009) neemt het poriënvolume van beton met hoogovenslakken (cementvervanging van 50% en 65%) af naarmate het beton veroudert en dit bij elk mengsel dat onder water bewaard werd tijdens het harden. Bij het beton met 65% hoogovenslakken werd vastgesteld dat het verschil in poriënvolume tussen 28 dagen en 6 maand consequent veel kleiner was dan bij het beton met 50% hoogovenslakken. Wanneer het beton echter tijdens de verharding in een droge omgeving wordt bewaard, neemt het totale poriënvolume toe naarmate het beton verhardt. Bij beton met 50% hoogovenslakken, is dit effect weinig schadelijk, gezien enkel de kleinere poriën een groter volume innemen. Bij dit

vervangingspercentage werd door het drogen de poriënstructuur gewijzigd, wat resulteerde in een toename van de poriën met grootte 0,1-0,2 μm , terwijl het volume aan poriën, groter dan deze afmetingen, afnam. Bij beton met 65% hoogovenslakken daarentegen, was een verlengde drogingsperiode veel schadelijker. De poriënvolumes namen toe bij alle poriëndiameters.

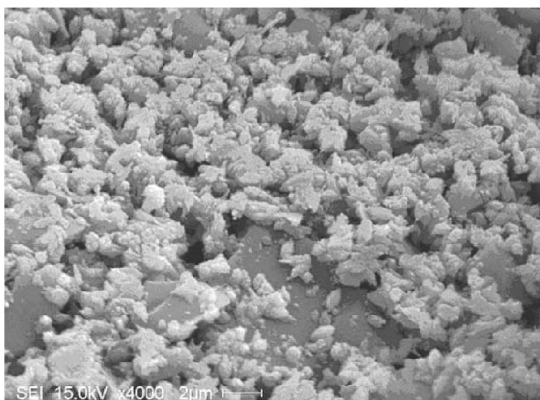
Het meest nefaste effect werd voor beide mengsels hoe dan ook bekomen wanneer er helemaal geen verharding in vochtig milieu kon plaatsvinden. Een initiële verhardingsperiode gedurende zeven dagen onder water, kan de poriëndiameters reeds ernstig doen dalen, maar in elke situatie zullen de bekomen resultaten steeds gunstiger zijn bij het beton met 50% cementvervanging dan bij het beton met 65% cementvervanging. Volgens Bouikni et al. (2009) is dit te wijten aan het feit dat bij hoge percentages van slakkentoevoeging, er onvoldoende kalk nog aanwezig is in het mengsel om de reactie met de hoogovenslakken aan te gaan, wat een rechtstreeks gevolg is van het tekort aan vocht om de ononderbroken reactie tussen portlandcement en water te garanderen. Het gevolg hiervan is een algemene toename van het poriënvolume. Bovendien neemt ook de druksterkte in belangrijke mate af, wanneer het beton in droge omgeving bewaard wordt, zelfs na een initiële verhardingsperiode van zeven dagen onder water.

Met behulp van een rasterelektronenmicroscoop werd de microstructuur van beide mengsels onderzocht. Hieruit werd geconstateerd dat beton dat voortdurend in een vochtige omgeving wordt bewaard, naarmate het ouder wordt steeds een dichtere structuur zal bereiken, onafhankelijk van het vervangingspercentage. Beton dat daarentegen in een droge omgeving werd bewaard, vertoonde microscheurtjes, onafhankelijk of ze vooraf gedurende een korte periode in een vochtige omgeving werden bewaard of niet. Bouikni et al. (2009) concludeerde dat de verhardingsomgeving de belangrijkste oorzaak is van de toenemende porositeit bij vervanging van grotere volumes van cement door hoogovenslakken.

Wanneer de carbonatatiediepte op 3 maand en op 6 maand ouderdom bepaald werd, werd logischerwijze dan ook een grotere indringing gevonden bij het beton met 65% slakkenvervanging dan bij het beton met 50% slakkenvervanging. Bovendien was de carbonatatiediepte steeds het grootst bij het beton dat in volledig droge omstandigheden werd bewaard. De snelheid waarmee carbonatatie optrad, nam zelfs toe bij beton dat in volledig droge omstandigheden bewaard werd. Uiteraard werd voor het beton dat voortdurend aan 95% relatieve vochtigheid was blootgesteld, geen carbonatatie waargenomen. Hoewel de aanwezigheid van hoogovenslakken het vermogen om koolstofdioxide te binden verlaagt, bezit dit beton een veel lagere doorlatendheid dan beton zonder hoogovenslakken zodat het de indringing van het carbonatatiefront afgeremd wordt [Bouikni et al. (2009)]. Deze bevindingen worden bevestigd in Song & Saraswathy (2006), maar

worden tegengesproken in Van den Heede (2008), die stelt dat beton met hoog volume aan hoogovenslakken een grotere gasdoorlatendheid bezit en dat hierdoor, in combinatie met de verminderde hoeveelheid carbonateerbaar materiaal, een snellere carbonatatie plaatsvindt. Van den Heede (2008) stelt wel dat deze verschillen slechts significant worden, zodra de cementvervanging een percentage van 70% bereikt. Dit kan de verschillende conclusies van voornoemde auteurs grotendeels verklaren.

In Figuur 2-7 wordt een afbeelding weergegeven van gecarbonateerde hoogovenslakken.



**Figuur 2-7: Microscopische foto van
gecarbonateerde hoogovenslakken [Monkman & Shao (2006)]**

2.2.4.5. Carbonatatie van volledig recycleerbaar beton

Tamura et al. (2004) onderzochten de carbonatatiweerstand specifiek voor volledig recycleerbaar beton en concludeerden: ondanks de veronderstelling dat industriële bijproducten, zoals vliegashoudend beton, de carbonatatiweerstand van het beton zouden verminderen, is gebleken dat de carbonatatediepte bij alle betonsoorten van CCRC (Cementitious-waste-free Completely Recyclable Concrete) ongeveer identiek is met dat van het prototype, onafhankelijk van de w/c-factor. Dit zou erop duiden dat de carbonatatiweerstand van CCRC amper wordt beïnvloed door deze industriële bijproducten, die als granulaat werden toegevoegd. Hoewel de samenstelling van de industriële bijproducten varieert afhankelijk van de beoogde cementsamenstelling, is de hoeveelheid kalksteengranulaat normaliter belangrijker dan de andere componenten. Door dit beperkte bereik is de invloed van de industriële bijproducten automatisch gelimiteerd.

2.2.4.6. Bijkomende factoren

Volgens Houst & Wittmann (1994), Wee et al. (1999), Sulapha (2003) en Khunthongkeaw et al. (2006) leidt een lagere water/bindmiddel-factor tot een afname in het totale poriënvolume en door deze dichtere poriënstructuur tot een grotere weerstand tegen de diffusie van CO_2 .

De invloed van superplastificeerder op de carbonatatie diepte is volgens Atis (2003) verwaarloosbaar. Het maakt echter wel het toepassen van een lagere w/c-factor mogelijk, waardoor het onrechtstreeks toch een gunstige werking bezit.

Voor dezelfde inhoud van vliegashoud, wordt een betere carbonatatie weerstand bekomen met een vliegashoud met een hoger gehalte aan CaO, dan vliegashoud met een lager gehalte aan CaO. In de proeven van Khunthongkeaw et al. (2006) werd dit verschijnsel onderzocht met enerzijds vliegashoud met 8% CaO en anderzijds met vliegashoud met 15% CaO. De oorzaak van de hogere carbonatatie weerstand bij een hoger gehalte aan CaO, ligt bij het feit dat een hoger gehalte aan calciumoxide een lagere porositeit met zich mee brengt. Bovendien kan deze hoeveelheid CaO een zekere dosis CH produceren: zie vergelijking (2.41).



Deze extra hoeveelheid CH kan de beweging van het carbonatatiefront vertragen.

3. Materialen en methoden

3.1. Materialen

3.1.1. Samenstelling grondstoffen

Aangezien voor het regenereren van cement uit beton de chemische samenstelling van de verschillende betonbestanddelen van groot belang is, wordt hierna een overzicht gegeven van de chemische eigenschappen van alle gebruikte granulaten en bindmiddelen.

3.1.1.1. Cement

Voor de betonmengeling CRC 1 wordt gebruik gemaakt van Portlandcement van het type CEM I 52,5 N. Voor de mortelproeven (zie paragraaf 3.1.4) wordt eveneens dit cement gebruikt.

In betonmengelingen CRC 2 en CRC 3 wordt hoogovencement van het type CEM III 42,5 N LA gebruikt. Ook voor de mortelproeven (paragraaf 3.2.8) wordt van dit cement gebruik gemaakt.

In CRC 3 wordt aluminaatcement aangewend. Voor de mortelproeven met betrekking tot aluminaatcement, beschreven in paragraaf 3.1.4, wordt eveneens van dit cement gebruik gemaakt.

De chemische samenstelling van deze types cement werd bepaald conform de norm NBN EN 196-2 (2005) en wordt weergegeven in Tabel 3-1.

Tabel 3-1: Chemische samenstelling gebruikte materialen

Componenten [m%]	Rivierzand 0/4	Kalksteenzand1 0/4	Kalksteenzand2 0/4	Kalksteenslag 2/6	Kalksteenslag 6/20	Porfiersteenslag
CaO	0,21	51,88	47,91	43,13	43,86	1,97
SiO ₂	97,04	2,68	7,44	15,48	15,42	64,42
Al ₂ O ₃	1,74	0,12	1,13	1,54	1,20	15,17
Fe ₂ O ₃	0,38	0,22	0,52	0,57	0,45	6,25
Na ₂ O	0,09	0,00	0,07	0,08	0,07	3,28
MgO	0,02	1,46	2,34	0,94	0,84	3,13
K ₂ O	/	0,01	/	0,45	0,35	/
K ₂ O ₃	0,51	/	0,42	/	/	2,35
Gloeiverlies	0,76	/	/	/	/	3,54
	CEM I 52,5 N	CEM III 42,5 N LA	Aluminaatcement	Vliegas	Koperslakken	Hoogovenslakken
CaO	63,43	52,73	39,93	2,42	3,70	41,22
SiO ₂	18,90	28,00	2,80	48,27	28,25	36,42
Al ₂ O ₃	5,77	8,92	39,39	33,42	4,48	10,41
Fe ₂ O ₃	4,31	2,67	17,53	3,66	/	0,42
Na ₂ O	0,47	0,36	0,06	0,29	/	0,26
MgO	0,89	4,06	0,42	0,73	/	7,02
K ₂ O	0,73	0,50	/	1,54	/	0,37
K ₂ O ₃	/	/	0,08	1,56	/	/
Fe	/	/	/	/	39,01	/
P ₂ O ₅	/	/	/	0,86	/	/
Cl ⁻	/	0,05	/	0,00	/	/
SO ₃	/	3,05	/	0,74	/	/
Gloeiverlies	/	/	0,00	4,89	/	/

3.1.1.2. Koperslakken

De chemische samenstelling van de koperslakken werd door de producent bepaald met behulp van een XRF-analyse en is terug te vinden in Tabel 3-2.

Tabel 3-2: Chemische samenstelling koperslakken

Component	[m%]
CaO	3,70
Ni	0,02
Cu	0,40
Sn	0,09
Zn	4,47
Pb	0,28
SiO ₂	28,25
Al ₂ O ₃	4,48
Fe	39,01

3.1.1.3. Hoogovenslakken

In geen van de vervaardigde mengsels werden hoogovenslakken aangewend. Evenwel werd de chemische samenstelling van een representatief monster van hoogovenslakken toch in dit werk en Tabel 3-1 opgenomen, omdat het voor andere recycleerbare mengsels eventueel wel zou kunnen aangewend worden. Uiteraard kan het gebruik van hoogovenslakken de vermindering van de milieu-impact van dit beton enkel ten goede komen. Hierdoor kan het aangewezen zijn om bij een soortgelijk mengsel het gebruik ervan te overwegen.

3.1.1.4. Vliegias

De chemische samenstelling van de voor dit onderzoek gebruikte vliegias, werd bepaald volgens de norm pr EN 196-2 (2005) en is terug te vinden in Tabel 3-4. De korrelverdeling van de gebruikte vliegias is terug te vinden in Bijlage A. Op het gebruikte vliegias werden de volgens NBN EN 450-1 (2005) benodigde proeven uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn terug te vinden in Tabel 3-3.

Vliegias van de categorie A dient volgens NBN EN 450-1 (2005) een gloeiverlies te bezitten dat kleiner is dan 5,0m%. Vliegias van categorie B dient volgens diezelfde norm een gloeiverlies te hebben dat zich tussen de 2,0m% en 7,0m% bevindt en voor vliegias van categorie C moet dit percentage tussen 4,0m% en 9,0m% liggen. De hier gebruikte vliegias kan aldus ingedeeld worden in categorie A.

Het doel van deze limitering is de hoeveelheid onverbrande koolstof te beperken. Het gloeiverlies wordt bepaald volgens de norm NBN EN 196-2 (2005). Volgens het Nationaal centrum voor

Wetenschappelijk en Technisch Onderzoek der Cementnijverheid wordt enkel de vliegas van categorie A en B aanvaard voor gebruik in beton [OCCN (2004)].

De fijnheid door nat zeven, bepaald volgens de norm NBN EN 451-2 (1995), mag maximaal 40m% bedragen om tot categorie N te behoren. Indien de fijnheid niet groter is dan 12m%, behoort het vliegas tot categorie S. De hier gebruikte vliegas behoort tot categorie N.

Volgens NBN EN 450-1 moet de hoeveelheid Cl^- minder bedragen dan 0,10m% en dient bepaald te worden volgens NBN EN 196-2 (2005). Het sulfaatgehalte (SO_3) dient eveneens volgens deze norm minder te bedragen dan 3,0m%. Dit gehalte wordt eveneens volgens de norm NBN EN 196-2 (2005) bepaald. De hoeveelheid vrij calciumoxide wordt bepaald volgens EN 451-1 (2004) en dient lager te zijn dan 2,5m%. De som van de hoeveelheden SiO_2 , Al_2O_3 en Fe_2O_3 moet minimaal 70m% zijn en wordt bepaald volgens NBN EN 196-2 (2005). Het totale gehalte aan alkaliën wordt bepaald volgens NBN EN 196-2 (2005) en wordt berekend als het Na_2O -equivalent. Bovendien moet de hoeveelheid MgO minder bedragen dan 4,0m% en worden bepaald volgens NBN EN 196-2 (2005). De hoeveelheid oplosbaar fosfaat (P_2O_5) dient groter te zijn dan 100mg/kg. De hoeveelheid reactief SiO_2 wordt bepaald volgens de norm NBN EN 197-1 (2000) en moet minimaal 25m% bedragen.

De gebruikte vliegas voldoet aan elk van deze voorwaarden.

Tabel 3-3 : Proeven op vliegas [NBN EN 450-1 (2005)]

Gloeiverlies [%]	4,885
Fijnheid [%]	13,200
Sulfaatgehalte (SO_3) [%]	0,800
Vrije calciumoxide (CaO) [%]	<0,100
Chloridengehalte (Cl^-) [%]	0,500
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ [%]	85,345
$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ [%]	1,360
Chloride (Cl^-) [%]	0,002
Reactief SiO_2 [%]	34,440

Tabel 3-4: Chemische samenstelling vliegias

Component [m%]	Monster 1	Monster 2	Gemiddelde
SiO ₂	48,540	47,990	48,265
Al ₂ O ₃	33,340	33,500	33,420
Fe ₂ O ₃	3,520	3,800	3,660
CaO	/	2,420	2,420
Cl ⁻	0,002	/	0,002
SO ₃	0,800	/	0,740
MgO	0,720	0,740	0,730
Na ₂ O	0,340	0,230	0,285
K ₂ O ₃	/	1,560	1,560
K ₂ O	1,540	/	1,540
P ₂ O ₅	0,860	/	0,860
Na ₂ O _{eq}	1,360	/	1,360
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	85,400	/	85,400
Gloeiverlies [%]	4,790	4,980	4,885

3.1.1.5. Granulaten

De gebruikte granulaten bestaan uit rivierzand 0/4, kalksteenzand 0/4, kalksteenslag 2/6, kalksteenslag 6/20 en porfiersteenslag 6/20. Tabel 3-1 geeft de scheikundige samenstelling van deze granulaten weer. In Bijlage A is de korrelverdeling van de betreffende materialen terug te vinden.

3.1.1.6. Calciumsulfaat

Bij de CRC 3-mengsels, wordt anhydriet (gedehydrateerde vorm van calciumsulfaat) toegevoegd als bindingsvertrager. Dit wordt toegevoegd onder de vorm van het poedervormige Platrex, dat minimaal 98% calciumsulfaat (CaSO₄) bevat.

3.1.1.7. Hulpstoffen

Luchtbelvormer

Als luchtbelvormer werd Micro-Air 103 con.4% gebruikt, dat verenigbaar is met alle genormeerde cementsoorten. De technische gegevens van deze luchtbelvormer worden in Tabel 3-5 weergegeven. Deze hulpstof werd aan het aanmaakwater voor het betonmengsel toegevoegd.

Tabel 3-5: Eigenschappen Micro-Air 103 con.4%

Aggregatietoestand	Vloeibaar
Kleur	Amber tot lichtbruin
Volumemassa bij 20°C [kg/l]	1,000
pH-waarde bij 20°C	11,5
Chloride-gehalte [m%]	0,100
Droge stof-gehalte [%]	4,000
Viscositeit bij 20°C [mPa.s]	<15
Na₂O-equivalent [%]	<1
Vriespunt [°C]	-2

Superplastificeerder

Als Superplastificeerder werd Glenium 51 con.35% gebruikt.

Tabel 3-6 geeft de door de fabrikant verschaftte eigenschappen van deze hulpstof weer. De superplastificeerder werd apart aan de betonspecie toegevoegd en dit na het mengen van alle grondstoffen en het aanmaakwater.

Tabel 3-6: Eigenschappen Glenium 51 con.35%

Aggregatietoestand	Vloeibaar
Kleur	Bruin
Volumemassa bij 20°C [kg/l]	1,100
pH-waarde bij 20°C	6-8
Chloride-gehalte [m%]	<0,100
Droge stof-gehalte [%]	35,000
Viscositeit bij 20°C [mPa.s]	110-160
Na₂O-equivalent [%]	<3
Vriespunt [°C]	-2

3.1.2. Recycleerbare betonmengsels

De samenstelling van de recycleerbare betonmengsels wordt samengevat in Tabel 3-7. De bindmiddelen van CRC 1 bestaan uit een combinatie van portlandcement en vliegas. Er werd ook een gedeelte vliegas toegevoegd als fijn granulaat. CRC 2 is een zelfverdichtend beton met hoogovencement en vliegas als bindmiddel. Bij de derde mengeling, zijnde CRC 3, werd geopteerd om als bindmiddel hoogovencement te combineren met aluminaatcement en vliegas. Gezien er hierdoor een bijzonder hevige flashreactie ontstond, waarbij het beton reeds bij het mengen in belangrijke mate verhardde, was het noodzakelijk om een bindingsvertragend middel toe te voegen, om toch nog enige verwerkbaarheid te garanderen. Hiertoe werd een hoeveelheid gips (Platrex) aan de mengeling toegevoegd. Bij deze procedure werd een geringe verbetering van de verwerkbaarheid waargenomen, al bleef het bijzonder moeilijk om het mengsel behoorlijk te verdichten. Voor de eigenschappen van het verse beton wordt ook verwezen naar Tabel 3-16. CRC 3 werd in twee verschillende reeksen vervaardigd, waarbij een verschillende granulometrische samenstelling werd nagestreefd, zodat kon nagegaan worden in welke mate de verwerkbaarheid hierdoor beïnvloed werd. Om een hoge prestatie met betrekking tot de duurzaamheid te bewerkstelligen werd voor alle samenstellingen de W/CM-factor op 0,40 gehouden en werd een hoge hoeveelheid bindmiddelen gebruikt.

Tabel 3-7: Samenstelling recycleerbare betonmengsels

Componenten	Samenstelling			
	CRC 1	CRC 2	CRC 3a	CRC 3b
Rivierzand 0/4 [kg/m ³]	/	/	/	/
Kalksteenzand 0/4 [kg/m ³]	614,20	790,11	610,77	850,22
Kalksteenslag 2/6 [kg/m ³]	377,96	493,82	375,85	510,13
Kalksteenslag 6/20 [kg/m ³]	666,51	329,21	662,79	289,07
Porfiersteenslag 6/20 [kg/m ³]	/	/	/	49,48
Kalksteenfiller	/	50,00	50,00	50,00
Vliegas	191,35	157,50	144,00	144,00
Koperslakken	/	32,92	/	/
Gips [Platrex]	/	/	28,72	28,72
CEM I 52,5 N [kg/m ³]	292,50	/	/	/
CEM III 42,5 N LA [kg/m ³]	/	292,50	261,00	261,00
Aluminaatcement	/	/	45,00	45,00
Water [kg/m ³]	180,00	180,00	180,00	180,00
Luchtbelvormer [ml/kg BM]	2,00	2,00	2,00	3,00
Superplastificeerder [ml/kg BM]	5,78	8,89	6,80	8,00
W/CM	0,40	0,40	0,40	0,40

De verschillende recycleerbare mengsels werden in dit werk zowel een verkorte naam, zoals hierboven aangegeven, als een lange codenaam gegeven. Wanneer dit voor de interpretatie nuttig kan zijn, wordt de lange codenaam vermeld.

- *CRC 1 » LS98-FA2-C(I)65-FA35*
- *CRC 2 » LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35*
- *CRC 3a » LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6*
- *CRC 3b » LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6*

In de hierboven aangegeven benamingen duiden de eerste letters op de gebruikte granulaten. LS (limestone) duidt op de kalksteengranulaten en –zand. CS staat symbool voor koperslakken (copper slag), P voor porfier (porphy) en FA voor vliegas (fly ash, toegevoegd als granulaat). De cijfers na elke afkorting geven de massaverhoudingen t.o.v. de totale hoeveelheid granulaten weer. Indien gebruik wordt gemaakt van kalksteenfiller, wordt dit aangeduid door de code LF (limestone filler). Na de granulaten worden de bindmiddelen afgekort weergegeven. C(I) staat symbool voor CEM I 52,5 N en C(III) voor CEM III 42,5 N LA. C(A) geeft de aanwezigheid van aluminaatcement (aluminate cement) weer en FA de aanwezigheid van vliegas (fly ash). De getallen, volgend op elke code, weerspiegelen de massaverhoudingen van de bindmiddelen.

Deze codenamen zijn identiek aan deze gebruikt in het parallelle werk van Vernimmen (2010).

3.1.3. Referentiemengsels

Conform de norm NBN B 15-001 (2004) werd voor de verschillende milieuklassen een specifiek referentiemengsel vooropgesteld. Tabel 3-8 geeft een overzicht van de volgens de normatieve Bijlage F uit NBN B 15-001 (2004) gespecificeerde betontypes. Zoals vermeld in paragraaf 3.2.3, paragraaf 3.2.4 en paragraaf 3.2.5, gelden voor de in dit onderzoek gesimuleerde omgevingsklassen respectievelijk de milieuklassen XF4, XD3 of XS3 en XC4, zodat ze telkens de minst gunstige klasse in hun onderscheidenlijke categorieën vertegenwoordigen. Hiermee komen achtereenvolgens betontypes T(0,45) of T(0,50)A, T(0,45) en T(0,50) overeen. Conform de informatieve Bijlage F van NBN EN 206-1 (2000) komt ook betontype T(0,45)A in aanmerking als referentiemengeling voor milieuklasse XF4.

Tabel 3-8: Duurzaamheidseisen volgens NBN B 15-001 (2004), normatieve Bijlage F: Tabel F.2

Milieuklasse	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1
Betontype	T(1,00)	T(0,65)	T(0,60)	T(0,55)	T(0,50)	T(0,50)	T(0,50)	T(0,45)	T(0,50)
Milieuklasse	XS2	XS3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Betontype	T(0,45)	T(0,45)	T(0,55)	T(0,50) of T(0,55)A	T(0,50) of T(0,55)A	T(0,45), of T(0,50)A	T(0,55)	T(0,50)	T(0,45)

Tabel 3-9 toont de grenswaarden voor de betonsamenstelling van de voor dit onderzoek benodigde referentiemengsels.

Tabel 3-9: Betontypen volgens NBN B 15-001 (2004), normatieve Bijlage F: Tabel F.1

Aanduiding		T(0,50)	T(0,45)	T(0,45)A
Maximale water-cementfactor [/]		0,50	0,45	0,45
Minimaal cementgehalte [kg/m ³]		320	340	340
Minimale druksterkteklasse		C30/37	C35/45	C30/37
Minimum luchtgehalte van vers beton voor nominale grootste korrelafmeting van het granulaat [%]	20 mm ≤ D _{max} ≤ 31,5 mm	/	/	4
	11,2 mm ≤ D _{max} ≤ 16 mm	/	/	5
	5,6 mm ≤ D _{max} ≤ 10 mm	/	/	6

Tabel 3-10 geeft een overzicht van de in dit onderzoek vervaardigde referentiemengsels.

Tabel 3-10: Samenstelling referentiemengsels

Samenstelling					
Componenten	Chloride - indringing		Carbonatatie	Vorst - Dooizouten	
	T(0,45)	T(0,45)-2	T(0,50)	T(0,45)A	T(0,45)A-2
Zand 0/4 [kg/m ³]	715,00	715,00	714,00	715,00	715,00
Granulaten 2/8 [kg/m ³]	515,00	515,00	515,00	515,00	515,00
Granulaten 8/16 [kg/m ³]	671,00	671,00	671,00	671,00	671,00
CEM I 52,5 N [kg/m ³]	340,00	340,00	320,00	340,00	340,00
Water [kg/m ³]	153,00	153,00	160,00	153,00	153,00
Luchtbelvormer [ml/kg BM]	0,00	0,00	0,00	1,50	2,24
Superplastificeerder [ml/kg BM]	4,90	4,90	0,00	4,41	4,90
W/CM	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45

3.1.4. Mortel met aluminaatcement

3.1.4.1. Algemeen

Verschillende mortelproeven om het effect van bindingsvertragers op de snelle bindingsreactie tussen aluminaatcement, hoogovencement en vliegashoofde te onderzoeken werden uitgevoerd. De gemaakte mengsels zijn gebaseerd op de het beton CRC 3b. Om echter rekening te houden met het verschillend gedrag van beton en mortel, werd de samenstelling van de mortel bepaald volgens de MBE-methode (Mortier de Béton Équivalent) zoals beschreven in Robeyst (2010). Volgens deze methode werden de massaverhoudingen (t.o.v. de totale massa van het beton) aan granulaten ($f_{\text{gravel},1}$, $f_{\text{gravel},2}$, $f_{\text{gravel},3}$ [-]) vervangen door een hoeveelheid zand (Δf_{sand} [-]) die dezelfde totale specifieke oppervlakte heeft (zie formule (3.1)).

$$\Delta f_{\text{sand}} = \frac{f_{\text{gravel},1} \cdot S_{\text{gravel},1} + f_{\text{gravel},2} \cdot S_{\text{gravel},2} + f_{\text{gravel},3} \cdot S_{\text{gravel},3}}{S_{\text{sand}}} \quad (3.1)$$

Hierbij stellen $S_{\text{gravel},1}$, $S_{\text{gravel},2}$, $S_{\text{gravel},3}$ en S_{sand} [m^2/kg] de respectievelijke specifieke oppervlaktes voor van de granulaten en het zand.

Op dezelfde wijze werd de totale waterhoeveelheid aangepast naar het verschil in absorptie tussen de granulaten en het zand. $A_{\text{gravel},1}$, $A_{\text{gravel},2}$, $A_{\text{gravel},3}$ en A_{sand} [%] staan hierbij achtereenvolgens voor de waterabsorptiecoëfficiënten van de granulaten en het zand.

$$\Delta f_{\text{water}} = -f_{\text{gravel},1} \cdot A_{\text{gravel},1} - f_{\text{gravel},2} \cdot A_{\text{gravel},2} - f_{\text{gravel},3} \cdot A_{\text{gravel},3} + \Delta f_{\text{sand}} \cdot A_{\text{sand}} \quad (3.2)$$

De benodigde waterabsorptiecoëfficiënten en de specifieke oppervlaktes worden in Tabel 3-11 weergegeven.

Tabel 3-11: Waterabsorptiecoëfficiënt en specifieke oppervlakte gebruikte materialen

Materiaal	Waterabsorptie-coëfficiënt [%]	Specifieke oppervlakte [m^2/kg]
Kalksteenzand 0/4	0,8556	4,1267
Kalksteenslag 2/6	1,6403	0,6581
Kalksteenslag 6/20	0,9274	0,1927
Porfiersteenslag 6/20	0,7668	0,2102

De hoeveelheid gips werd weggelaten en eenzelfde verhouding van de gebruikte luchtbelvormer en superplastificeerder t.o.v. het totale gehalte aan bindmiddelen werd behouden.

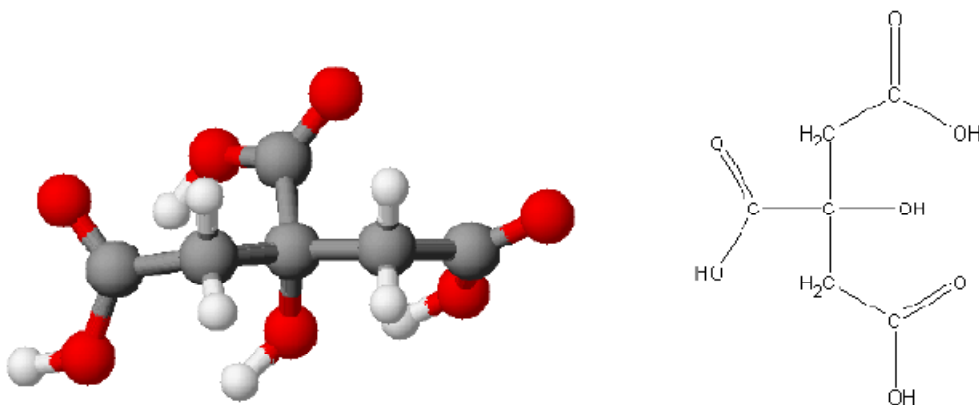
Op die manier wordt beton CRC 3b omgevormd tot een mortel, zoals te zien is in Tabel 3-12.

Tabel 3-12: Samenstelling MBE

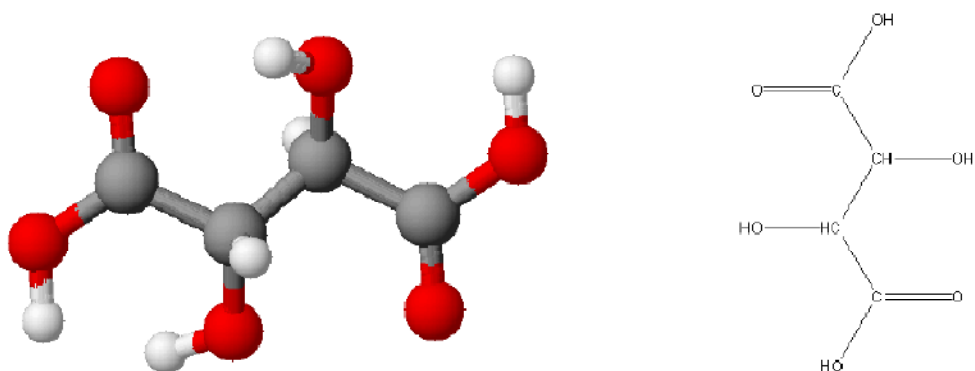
Componenten	CRC 3b	MBE
Kalksteenzand 0/4 [kg/m ³]	850,22	1318,04
Kalksteenslag 2/6 [kg/m ³]	510,13	0,00
Kalksteenslag 6/20 [kg/m ³]	289,07	0,00
Porfiersteenslag 6/20 [kg/m ³]	49,48	0,00
Kalksteenfiller [kg/m ³]	50,00	69,55
Vliegas [kg/m ³]	144,00	200,29
Gips [Platrex] [kg/m ³]	28,72	0,00
CEM III 42,5 N LA [kg/m ³]	261,00	363,03
Aluminaatcement [kg/m ³]	45,00	62,59
Water [kg/m ³]	180,00	235,63
Luchtbelvormer [ml/kg BM]	3,00	3,00
Superplastificeerder [ml/kg BM]	8,00	8,00
W/CM	0,40	0,38
Totale massa [kg]	2407,63	2249,13

3.1.4.2. Citroenzuur, wijnsteenzuur en gips

Zoals reeds hoger aangehaald, vertraagt gips de hydratatie van portlandcement. Citroenzuur of 2-hydroxy-1,2,3-propaantricarboxylzuur (C₆H₈O₇ - Figuur 3-1) en wijnsteenzuur of 2,3-dihydroxybutaandizuur (C₄H₆O₆ - Figuur 3-2) kunnen echter ook bindingvertragend werken [Unsin (2003)].

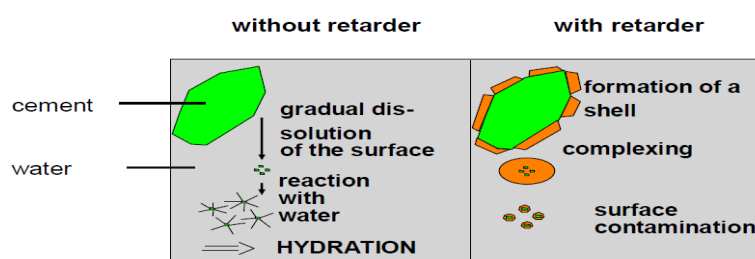


Figuur 3-1: Citroenzuur



Figuur 3-2: Wijnsteenzuur

De werking van bindingsvertragers berust op het feit dat ze zich vasthechten aan het oppervlak van de cementdeeltjes. Hierbij vormen ze moeilijk oplosbare, complexe verbindingen, die zo een beschermende gel-laag rond de cementdeeltjes aanbrengen en de aangroei van de kristallen hinderen. Deze werking wordt schematisch weergegeven in Figuur 3-3.



Figuur 3-3: Werking van een bindingsvertrager [Unsin (2003)]

Er werd mortel gemaakt met zowel drie verschillende doseringen aan wijnsteenzuur als drie verschillende concentraties aan citroenzuur. Tabel 3-13 toont een overzicht van de mengsels.

Tabel 3-13: Overzicht mengsels met bindingsvertragers

Bindingsvertrager	Citraenzuur [C ₆ H ₈ O ₇]			Wijnsteenzuur [C ₄ H ₆ O ₆]		
Benaming	CZ 0,04	CZ 0,06	CZ 0,08	WSZ 0,06	WSZ 0,08	WSZ 0,10
Concentratie [m% BM]	0,04	0,06	0,08	0,06	0,08	0,10

Als referentiemengelingen werden vier verschillende mengsels gemaakt. Het eerste mengsel (REF) bezit dezelfde componenten als deze voor de mengsels met citroen- of wijnsteenzuur, maar hier werd geen bindingsvertrager gebruikt. In een tweede mengsel werd de totale massa aan bindmiddelen vervangen door portlandcement CEM I 52,5N, in een derde mengsel werd hoogovencement CEM III 42,5 N LA als enige bindmiddel gebruikt en in een laatste mengsel bestond het bindmiddel uit aluminaatcement. Tabel 3-14 geeft hiervan een overzicht.

Tabel 3-14: Overzicht referentiemengsels

Benaming	CEM I	CEM III	AC	REF
Kalksteen zand 0/4 [kg/m ³]	1318,04	1318,04	1318,04	1318,04
Kalksteen filler [kg/m ³]	69,55	69,55	69,55	69,55
Vliegas [kg/m ³]	0,00	0,00	0,00	200,29
CEM I 52,5 N [kg/m ³]	625,92	0,00	0,00	0,00
CEM III 42,5 N LA [kg/m ³]	0,00	625,92	0,00	363,03
Aluminaatcement [kg/m ³]	0,00	0,00	625,92	62,59
Water [kg/m ³]	235,63	235,63	235,63	235,63
Luchtbelvormer [ml/kg BM]	3,00	3,00	3,00	3,00
Superplastificeerder[ml/kg BM]	8,00	8,00	8,00	8,00
W/CM	0,38	0,38	0,38	0,38
Totale massa [kg]	2249,13	2249,13	2249,13	2249,13

3.2. Methoden

3.2.1. Vervaardiging van het beton

Alle mengelingen werden vervaardigd conform de norm NBN B 15-001 (2004).

Op basis van de gevonden resultaten voor de zetmaat (slump), kan het beton ingedeeld worden in een consistentieklasse. De S-klassen zijn volgens de norm NBN B15-001 (2004) bepaalde klassen, waarbij klasse S1 overeenstemt met een zeer geringe inzakking van de betonspecie en klasse S5 duidt op een grote inzakking van het beproefde mengsel. De verwerkbaarheid neemt met andere woorden toe van klasse S1 naar klasse S5. Deze consistentieproef werd voor de mengsels CRC 1 en CRC 3 uitgevoerd conform NBN EN 12350-2 (1999).

Bij de bepaling van de schudmaat (flow), werd de gemiddelde diameter bepaald van het uitgespreide betonmengsel op de schoktafel. Zes verschillende klassen, gaande van F1 voor de moeilijkst verwerkbare tot F6 voor de best verwerkbare betonspecie worden hierbij onderscheiden. De proef werd uitgevoerd op het mengsel CRC 2 volgens de norm NBN EN 12350-5.

Tabel 3-15 toont de begrenzingen voor zetmaat en schudmaat volgens NBN B15-001 (2004).

Tabel 3-15: Zetmaat en schudmaat volgens NBN B 15-001 (2004)

Zetmaat (Slump) [mm]		Schudmaat (Flow) [mm]	
S1	10 - 40	F1	≤ 340
S2	50 - 90	F2	350 - 410
S3	100 - 150	F3	420 - 480
S4	160 - 210	F4	490 - 550
S5	>220	F5	560 - 620
		F6	≥ 630

Naast de twee besproken proeven met betrekking tot verwerkbaarheid van het beton, werd ook het luchtgehalte van de betonspecie bepaald, conform de norm NBN EN 12350-7 (2000). Tijdens deze proef werd ook het volumegewicht opgemeten.

De mengsels werden, met uitzondering van het zelfverdichtende CRC 2, verdicht met behulp van een trilnaald. Na vervaardiging werden de proefstukken bewaard in een geklimatiseerde ruimte bij een temperatuur van $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ een relatieve vochtigheid van minimaal 95%. De proefstukken bleven in deze ruimte tot ze de leeftijd voor beproeving hadden bereikt.

Tabel 3-16 geeft de resultaten weer van de proeven op het verse beton, evenals de totale mengtijd en de gehanteerde mengprocedure. Ook de hoeveelheid toegevoegde luchtbelvormer en superplastificeerder en de W/CM-factor zijn hierin opgenomen om de invloed ervan op het luchtgehalte en de verwerkbaarheid na te gaan.

Tabel 3-16: Eigenschappen van de verse betonspecie bij de verschillende mengsels

Eigenschap	Mengsel								
	CRC 1	CRC 2	CRC 3a	CRC 3b	T(0,45)	T(0,45)-2	T(0,50)	T(0,45)A	(T0,45)A-2
W/CM	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45
Superplastificeerder [ml/kg BM]	5,78	8,89	6,80	8,00	4,90	4,90	0,00	4,41	4,90
Zetmaat (slump) [mm]	68	/	25	5	60	90	70	75	130
Zetmaat (slump) [klasse]	S2	/	S1	S1	S2	S2	S2	S2	S3
Schokmaat (flow) [mm]	/	620	/	/	152,5	146,25	165	143,75	126,25
Schokmaat (flow) [klasse]	/	F5	/	/	F1	F1	F1	F1	F1
Luchtbelvormer [ml/kg BM]	2,00	2,00	2,00	3,00	0,00	0,00	0,00	1,50	2,24
Volume lucht [%]	4,0	6,6	3,9	4,4	2,8	2,8	2,6	6,0	6,6
Volumegewicht [kg/m³]	2318,75	2737,50	2312,50	2312,50	2400,00	2387,50	2368,75	2281,25	2256,25
Totale mengtijd [min]	9,0	9,0	10,0	10,0	7,0	5,0	6,5	5,0	7,5
Mengprocedure [min]	1D2N6SP	1D2N6SP	1D2N7SP	1D2N7SP	1D2N4SP	1D2N2SP	1D2N3,5SP	1D2N2SP	1D2N4,5SP

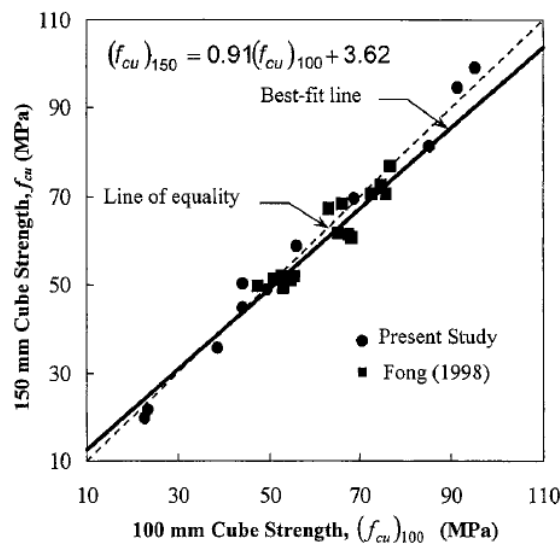
NOTA: D = Droog mengen van vaste bestanddelen, N= Mengen na toevoeging water, SP = Mengen na toevoeging superplastificeerder. De getallen geven de mengtijd in minuten van de betreffend fase weer en hebben telkens betrekking tot de code die zich na het betreffende getal bevindt.

3.2.2. Druksterkte

De drukproeven op de verschillende betonmengsels werden uitgevoerd op kubussen met zijde 150mm volgens de norm NBN B 15-220 (1970). Voor CRC 3b werden eveneens drukproeven uitgevoerd op kubussen met zijde 100mm. Volgens Mansur et al. (2002), kan de gemiddelde druksterkte van dergelijke kubussen met zijde van 100mm omgevormd worden naar de gemiddelde druksterkte voor kubussen met zijde van 150mm via vergelijking (3.3). Hierbij wordt de gemiddelde druksterkte f_{cu} telkens uitgedrukt in N/mm^2 en slaan de indices 100 en 150 op de grootte van de zijde van het proefstuk in mm. De formules gelden voor beton waarvan de karakteristieke druksterkte zich tussen 20 N/mm^2 en 100 N/mm^2 bevindt.

$$(f_{cu})_{150} = 0,91 \cdot (f_{cu})_{100} + 3,62 \frac{N}{mm^2} \quad (3.3)$$

Figuur 3-4 toont de door Mansur et al. (2002) bekomen correlatie tussen de beproefde kubussen.



Figuur 3-4: Correlatie tussen de gemiddelde druksterkte van kubussen met zijde 150mm en kubussen met zijde 100 mm [Mansur et al. (2002)]

De drukproeven werden uitgevoerd op een betonleeftijd van 28 dagen en 91 dagen. Telkenmale werden drie proefstukken beschouwd. Op basis van de druksterkte op 28 dagen werd de betonklasse toegekend. Door ook de sterkte op 91 dagen te bepalen, kan worden nagegaan in welke mate de sterkte nog evolueert in functie van de tijd.

3.2.3. Vorst en dooizouten

Het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI) meet elke dag om het uur de luchttemperatuur op in verschillende vaste meetstations over het hele land verspreid. Analyse van deze data voor vijf verschillende meetstations – met name de stations in Koksijde, Kleine Brogel, Zaventem, Florennes en Luxembourg – over de periode van januari 1999 tot december 2008, resulteerde in Tabel 3-17.

De minimale luchttemperatuur die gedurende deze tien jaar werd waargenomen door deze stations, bedroeg -14°C en werd opgemeten in het meetstation van Luxembourg. Volgens het KMI verandert de temperatuur echter snel nabij de grond. De temperaturen die waargenomen worden in de thermometerhut op anderhalve meter boven de grond, zijn gemiddeld 3°C tot 5°C hoger dan deze op grondniveau. Het verschil tussen deze temperaturen kan maximaal 10°C bereiken. De grondtemperatuur in België zal in deze periode bijgevolg minimaal -24°C bereikt hebben. Over de beschouwde periode bedraagt het gemiddeld aantal vorstdagen per jaar voor deze meetpunten maximaal 64,2 dagen. De langst onafgebroken periode van vorstdagen bedraagt 23 dagen.

Indien de temperatuur echter niet daalt tot -10°C , zal vorstschade aan beton zeer beperkt blijven [Valenza & Scherer (2007-2)]. Bijgevolg is het meest relevant de cycli te tellen waarbij de temperatuur aan de grond maximaal -10°C bedraagt. Indien ervan uitgegaan wordt dat de temperatuur aan de grond 10 graden lager ligt dan deze in de thermometerhut, wordt voor deze meetstations over de beschouwde periode een jaarlijks gemiddelde van maximaal 16,9 cycli waargenomen. Het is belangrijk om de grondtemperatuur te beschouwen – en niet de temperatuur in de thermometerhut – omdat de combinatie van vorst met dooizouten hoofdzakelijk voorkomt bij wegebeton en dus op grondniveau. De temperatuur in de thermometerhut wordt met het maximale verschil tussen het grondniveau en de thermometerhut (10°C) verminderd omdat het verschil in temperatuur tussen thermometerhut en grondniveau het grootst zal zijn wanneer de temperatuur zeer laag ligt. Het zijn net deze lage temperaturen die in dit onderzoek worden geanalyseerd. In het onderzoek wordt elke dag, waarbij minimaal één meting een temperatuur weergeeft van maximum -10°C , beschouwd als behorend tot een vorstcyclus.

Om echter te kunnen spreken van een vorst-dooicyclus, is het niet voldoende de temperatuur boven de -10°C te laten stijgen, maar moet de temperatuur boven het vriespunt komen te liggen. Als uitgegaan wordt van deze redenering, kunnen enkel de periodes waarin de temperatuur minstens één maal lager komt te liggen dan -10°C en die gescheiden worden door een temperatuur die hoger ligt dan 0°C , als een vorstcyclus worden beschouwd. Een maximaal gemiddelde van 3

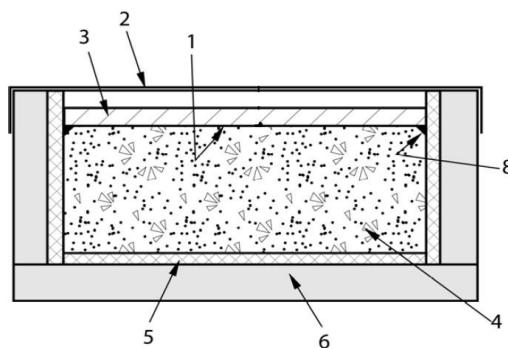
cycli per jaar wordt dan waargenomen over deze periode en dit voor het meestation te Zaventem. Enkel voor dit station wordt er over een periode van tien jaar een groter aantal cycli bereikt dan het volgens normatieve bijlage D uit de norm NBN EN 1338 (2003) bepaalde proefaantal, zijnde 28 cycli (zie verder). Meer in het zuiden van het land zijn er dus wel lagere temperaturen opgemeten, maar toch een kleiner aantal cycli. De oorzaak hiervan is dat de temperatuur aan de grond in deze gebieden vaak een langere periode niet boven het vriespunt komt te liggen, zodat er hier sprake is van één cyclus, terwijl een even lange vriesperiode in het centrum van het land wel gescheiden wordt door een minimumtemperatuur boven 0°C en dus opgedeeld wordt in meerdere cycli. Meer in het noorden van het land zorgt de lagere hoogteligging en de invloed van de Noordzee er dan weer voor dat de temperatuur minder vaak onder het vriespunt komt te liggen zodat ook hier minder vorst-dooicycli worden waargenomen.

Tabel 3-17: Temperatuurskarakteristieken België over periode 1999-2008 [KMI]

[Criterium]	<i>Periode januari 1999 - december 2008</i>				
[A]	Minimale luchttemperatuur [°C]				
[B]	Minimale temperatuur aan de grond [°C]				
[C]	Maximale periode met minimumluchttemperatuur < 0°C [dagen]				
[D]	Gemiddeld aantal cycli luchttemperatuur < 0°C [cycli / jaar]				
[E]	Gemiddeld aantal cycli grondtemperatuur ≤ -10°C [cycli / jaar]				
[F]	Gemiddeld aantal dagen luchttemperatuur < 0°C [cycli / jaar]				
[G]	Gemiddeld aantal dagen grondtemperatuur ≤ -10°C [cycli / jaar]				
[H]	Gemiddeld aantal vorstcycli [cycli / jaar]				
[Criterium]	Meetstation				
	Koksijde	Kleine Brogel	Zaventem	Florennes	Luxembourg
[A]	-7,4	-13,5	-9,1	-12,0	-14,0
[B]	-17,4	-23,5	-19,1	-22,0	-24,0
[C]	13	16	14	20	23
[D]	11,1	16,5	11,6	14,1	14,7
[E]	11,1	16,9	11,7	14,5	14,8
[F]	29,4	55,8	36,8	52,3	64,2
[G]	30,6	57,4	38,1	53,8	65,6
[H]	2,7	2,6	3,0	2,2	1,6

Volgens de normatieve bijlage D uit NBN EN 1338 (2003) moet ter bepaling van de vorst/dooibestandheid het proefstuk onderworpen worden aan 28 vries-dooicycli waarbij het oppervlak van het proefstuk wordt bedekt met een laagje oplossing van 3% NaCl in drinkwater. De dikte van het laagje van de oplossing bedraagt $5\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$. Het afgeschilferde materiaal wordt vervolgens verzameld en gewogen, waarbij het resultaat dient uitgedrukt te worden in kilogram per vierkante meter. Volgens diezelfde norm dient het bovenzvlak van het proefstuk groter te zijn dan 7500 mm^2 , maar mag deze oppervlakte 25000 mm^2 niet overschrijden. De dikte mag hoogstens 103 mm bedragen en het proefstuk moet, indien het uit een steen wordt gezaagd, een minimumleeftijd van 20 dagen hebben. Voor deze proeven werd concreet een nagenoeg cilindrisch proefstuk gebruikt waarvan de mantel volledig werd geïsoleerd en het bovenzvlak aan de vries-dooicycli werd onderworpen. De diameter van dit bovenzvlak week weinig af van 100mm en de dikte van het proefstuk bedroeg ongeveer 50 mm, zodat in alle omstandigheden aan de normatieve eisen werd voldaan. Het proefstuk werd met epoxyhars in een PVC-buis ingekleefd zodat enkel het bovenzvlak van de cilinder vrij bleef. Vervolgens werd het proefstuk in een isolerend omhulsel geplaatst. Nadat de oplossing op het proefstuk werd aangebracht, werd het bovenoppervlak van het proefstuk afgesloten om verdamping te voorkomen. Na 28 cycli werd de totale hoeveelheid afgeschilferd materiaal gedroogd gedurende minimum 24 uur bij een temperatuur van $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.

Figuur 3-5 toont de principe-opstelling voor de vorst/dooiproef [NBN EN 1338 (2003)] en Figuur 3-6 geeft een afbeelding van de beproefde cilinders, waarbij de zoutoplossing en het afschermmateriaal tegen verdamping reeds zijn verwijderd.



Figuur 3-5: Principe van opstelling voor de vorst/dooiproef [NBN EN 1338 (2003)] [1: Proefoppervlak; 2: Afscherming proefoppervlak; 3: Vriesmedium (zoutoplossing); 4: Proefstuk; 5: PVC-buis; 6: Thermische isolatie; 8: Strook dichtingsmiddel]



Figuur 3-6: Proefstukken vorst/dooicycli

Op Figuur 3-7 is een beeld te zien van het uitzicht van een proefstuk voor vorst/dooicycli, voor en na beproeving.



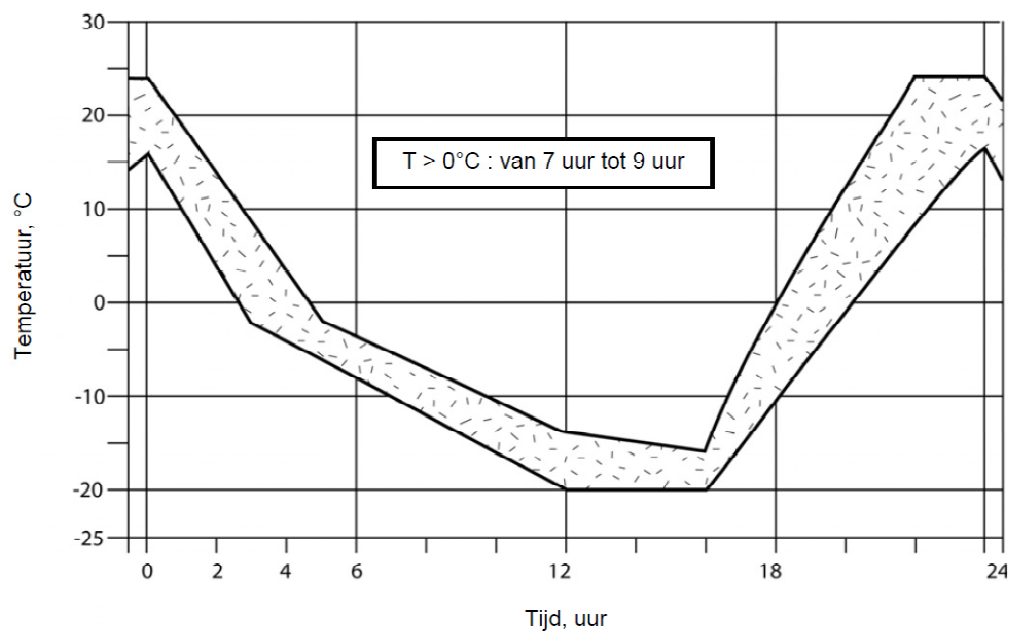
Figuur 3-7: Proefstuk voor en na vorst-dooicycli

Figuur 3-8 toont het afgeschilferde materiaal dat bekomen werd na een aantal vorst/dooicycli.



Figuur 3-8: Afgeschilferd materiaal

Het temperatuursverloop dat de proefstukken vervolgens dienen te ondergaan, dient te verlopen volgens een in NBN EN 1338 (2000) gedefinieerde cyclus (Figuur 3-9). De coördinaten die de knikpunten van deze cyclus bepalen worden in Tabel 3-18 weergegeven.



Figuur 3-9: Tijd-temperatuurcyclus [NBN EN 1338 (2000)]

Tabel 3-18: Coördinaten van de knikpunten tijd-temperatuurcyclus [NBN EN 1338 (2000)]

Bovengrens		Ondergrens	
Tijd [uur]	Temperatuur [°C]	Tijd [uur]	Temperatuur [°C]
0	24	0	16
5	-2	3	-4
12	-14	12	-20
16	-16	16	-20
18	0	20	0
22	24	24	16

Op deze manier wordt omgevingsklasse XC4 gesimuleerd, volgens NBN EN 206-1 (2000) de meest strenge omgevingsklasse.

3.2.4. Indringing van chloriden

3.2.4.1. TAP-wielen

Om een getijde te simuleren werd een cilindervormig proefstuk (met diameter 230mm en hoogte 70mm) met zijn as horizontaal op een draaiende stang gemonteerd. Het proefstuk draaide in één uur precies één maal rond zijn as, waarbij de onderkant van het proefstuk zich telkens in een NaCl-oplossing bevond. Op deze manier werd een getijde gesimuleerd. Het manteloppervlak van deze TAP-wielen (Toestel voor versnelde AantastingsProeven) bevond zich gedurende één derde van de cyclustijd onder water. Gezien het zoutgehalte van het meeste zeewater volgens De Rouck (2009) 34‰ tot 36 ‰ (deeltjes per duizend in gewicht) bedraagt en volgens Audenaert (2006) 35‰, werd geopteerd voor een zoutoplossing van 35‰ NaCl. De meetopstelling werd aan het Laboratorium Magnel voor Betononderzoek ontwikkeld [De Belie et al. (2002)] en wordt getoond in Figuur 3-10.



Figuur 3-10: Opstelling TAP-wielen

Na drie, zes en tien weken werd de chloride-indringing bepaald door het proefstuk in drie stukken te breken (Figuur 3-11). Vervolgens werd op de 6 radiale dwarsdoorsneden de indringing van de chloriden bepaald door deze dwarsdoorsneden te besprenkelen met een 0,1 M zilvernitraat-oplossing (Figuur 3-12).

De indringingsdiepte wordt gekarakteriseerd door een lichtere kleurweergave (lichtgrijs), in tegenstelling tot het onaangetaste beton dat na besprenkeling met zilvernitraat de oorspronkelijke, donkerdere tint blijft behouden. Loodrecht op de indringingsvlakken werd vervolgens om de 10mm de indringingsdiepte opgemeten. Deze metingen werden voor de zijvlakken uitgevoerd tot 50mm

ver indien vanaf de mantel van het proefstuk wordt gemeten. Omdat de indringing op kruising van het manteloppervlak met de zijvlakken elkaar kunnen beïnvloeden, werd de meting op de rand niet meegerekend bij de verwerking van de resultaten. Op deze manier werden langs beide zijvlakken van het proefstuk vier van belang zijnde metingen bekomen en langs het manteloppervlak telkens vijf meetresultaten en dit voor elk van de zes meetvlakken.

Met deze opstelling werden de volgens NBN EN 206-1 (2000) gedefinieerde blootstellingsklassen XS3 of XD3 gesimuleerd.



Figuur 3-11: Gebroken TAP-wiel



Figuur 3-12: Bepaling chloride-indringing

3.2.4.2. Getijdenwerking op kubussen

Een tweede opstelling ter bepaling van de chloride-indringing in beton, bestaat uit een bassin dat cyclisch en aan een constante snelheid gevuld wordt met een NaCl-oplossing (35m‰ NaCl) en vervolgens opnieuw leeggepompt. Het vol- en leegpompen geschiedde in een tijdsspanne van vijftien minuten. In het bassin bevonden zich per mengsel drie kubusvormige proefstukken waarvan vijf vlakken beschermd werden door een dubbele laag coating zodat de indringing enkel kon geschieden langsheen één niet-gecoat verticaal indringingsvlak (zie Figuur 3-13). Er werden twee verschillende regimes gehanteerd. In een eerste opstelling werd een getijde van één uur gesimuleerd. De tweede opstelling beschreef een getijde van twaalf uur. Deze laatste opstelling zou meer representatief moeten zijn voor de getijdenwerking aan de Belgische kust.

Na vier, acht en twaalf weken wordt de indringing loodrecht op het indringingsvlak bepaald door een één centimeter dik schijfje van het proefstuk af te zagen. Het was hierbij belangrijk om een droge zaagmethode te hanteren zodat de chloriden niet uit het beton zouden kunnen wegspoelen. Vervolgens wordt dit schijfje besprenkeld met 0,1 M zilvernitraat-oplossing waardoor de indringingsdiepte opgemeten kon worden (zie ook paragraaf 3.2.4.1). De metingen werden om de 10mm uitgevoerd, waarbij de metingen aan de rand werden verwaarloosd, om te vermijden dat eventuele chloride-indringing doorheen de gecoate zijvlakken de metingen negatief zou beïnvloeden.



Figuur 3-13: Opstelling chloride-indringing kubussen

Met deze opstelling worden de in EN 206-1 (2000) gedefinieerde blootstellingsklassen XD3 of XS3 gesimuleerd, die de meest strenge blootstellingsklassen betreffende indringing van chloriden omvatten.

3.2.4.3. CTH-proeven

Via een CTH-proef - ontwikkeld door Tang (1996) - kan de tijdsafhankelijke migratiecoëfficiënt berekend worden. Deze migratiecoëfficiënt is verschillend van de diffusiecoëfficiënt en kan er volgens NT BUILD 492 (1999) ook niet rechtstreeks aan gecorreleerd worden. Evenwel staat in Audenaert (2006) een methode beschreven om de diffusiecoëfficiënt uit de migratiecoëfficiënt te berekenen.

Migratie wordt namelijk gedefinieerd als de beweging van ionen onder invloed van een extern elektrisch veld. Diffusie daarentegen is de beweging van moleculen of ionen door een concentratieverschil of chemische potentiaal en dit van de zone van hoge concentratie naar de zone van lage concentratie. Voor deze methode werden cilindrische proefstukken met diameter 100mm en hoogte 50mm in een container geplaatst die vervolgens vacuüm werd gezogen (zie Figuur 3-14). Na drie uur werd een verzadigde calciumdihydroxide-oplossing ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) in de container gelaten tot de proefstukken volledig in deze oplossing ondergedompeld waren. Gedurende een uur werd het vacuüm nog behouden, waarna opnieuw lucht in de container werd gelaten. Na $18\text{h} \pm 2\text{h}$ werd elk proefstuk met behulp van metalen klemmen stevig in een rubberen huls gespannen. Het vlak dat beproefd diende te worden, bevond zich dan aan de onderzijde van de huls. Vervolgens werd de huls op een roestvrije stalen plaat op een houder geplaatst (zie Figuur 3-15).



Figuur 3-14: Opstelling vacuümverzadiging

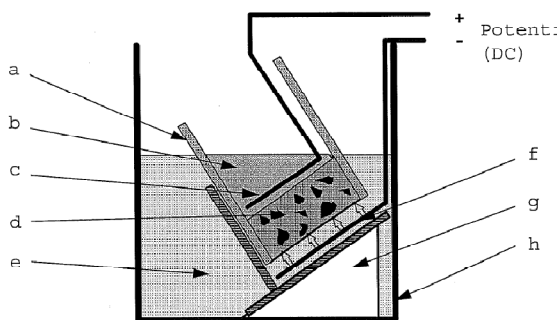


Figuur 3-15: Opstelling van de CTH-proef

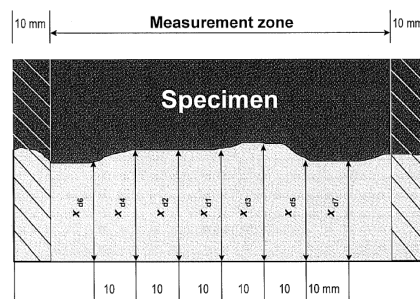
Rondom het proefstuk bevond zich 12 liter natriumchloride-oplossing (10m% NaCl in water) en in de hulzen zelf werd telkens 300ml natriumhydroxide-oplossing (12g NaOH per liter gedeïoniseerd water) gegoten. De NaCl-oplossing wordt de katholische oplossing genoemd, de NaOH-oplossing de anodische oplossing. Vervolgens werd de kathode, een roestvrije stalen netje, in de katholische oplossing geplaatst en de metalen plaat waarop de proefstukken stonden, fungeerde als anode (Figuur 3-16).

De anode werd verbonden met de positieve pool van een stroombron en de kathode met de negatieve pool. Over de proefstukken werd vervolgens een spanning van 30V ingeschakeld en de stroomsterkte over de proefstukken werd gemeten. Afhankelijk van deze stroomsterkte werd de spanning over het proefstuk eventueel aangepast en werd de proeftijd bepaald. Voor verdere uitleg hieromtrent wordt verwezen naar Tabel 1 uit NT BUILD 492 (1999). De temperatuur van de NaCl-oplossing werd voor de start en na afloop van de proef opgemeten.

Om de chloride-indringing te bepalen werd het proefstuk na afloop van de proef in tweeën gespleten. Daarna werden de breukvlakken besprenkeld met een 0,1 M zilvernitraat-oplossing. Met deze kleurindicator konden op eenvoudige wijze per proefstuk 2 maal 7 metingen uitgevoerd worden. Aan de randen werd de indringing niet opgemeten opdat eventuele indringing langsheen de rand de resultaten niet verkeerdelijk zou beïnvloeden. Figuur 3-17 illustreert duidelijk op welke wijze deze indringing dient opgemeten te worden.



Figuur 3-16: Opstelling van de CTH-proef [NT BUILD 492 (1999)] [a: Rubberen omhulsel; b: anoliet; c: anode; d: proefstuk; e:katholiet; f: kathode; g: steun, h: bassin]



Figuur 3-17: Opmeting chloride-indringing [NT BUILD 492 (1999)]

Met behulp van deze metingen kan de tijdsafhankelijke migratiecoëfficiënt worden berekend (formules (3.4) tot (3.6)). Een theoretische achtergrond, waarbij onderstaande formules worden afgeleid vertrekkende van de vergelijking van Nernst-Planck, wordt gegeven door Audenaert (2006).

$$D_{nsm} = \frac{R \cdot T}{z \cdot F \cdot E} \cdot \frac{x_d - \alpha \cdot \sqrt{x_d}}{t} \quad (3.4)$$

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad (3.5)$$

$$\alpha = 2 \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T}{z \cdot F \cdot E}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot c_d}{c_0} \right) \quad (3.6)$$

Hierbij is D_{nsm} de niet-stationaire migratiecoëfficiënt [m^2/s], z het valentiegetal van het ion (voor chloriden = 1), F [$=9,648 \cdot 10^4 \text{ J}/(\text{V} \cdot \text{mol})$] de Faraday constante, U de aangebracht spanning [V], R [$=8,314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$] de gasconstante, T de gemiddelde temperatuur van de NaCl-oplossing [K], L de dikte van het proefstuk [m], x_d de gemiddelde penetratiediepte [m], t de duur van de proef [s], erf^{-1} de inverse errorfunctie, c_d ($\approx 0,07 \text{ N}$) de chlorideconcentratie waarbij de kleurverandering onder invloed van zilvernitraat optreedt, c_0 ($\approx 2 \text{ N}$) de chlorideconcentratie in de kathodische oplossing.

De factor $c_d = 0,07$ is normaliter enkel geldig voor beton waarvan het bindmiddel enkel bestaat uit portlandcement, doch uit Tang (1996) blijkt dat de wijziging van de parameter voor andere cementsoorten slechts een zeer beperkte en te verwaarlozen invloed uitoefent op het bekomen resultaat.

Vergelijking (3.4) kan aldus vereenvoudigd worden tot vergelijking (3.7):

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

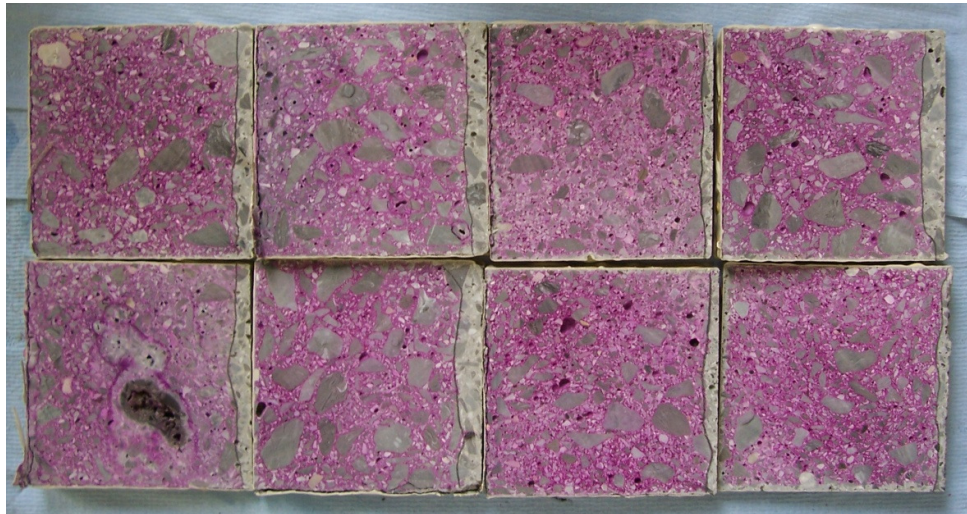
Hierbij is D_{nsm} de tijdsafhankelijke migratiecoëfficiënt [$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$], U de aangebrachte spanning in volt, L de dikte van het proefstuk in mm, T de gemiddelde temperatuur van de anodische oplossing in $^{\circ}\text{C}$, x_d de gemiddelde indringingsdiepte in mm en t de duur van de proef in uur.

3.2.5. Carbonatatie

- *Algemeen*

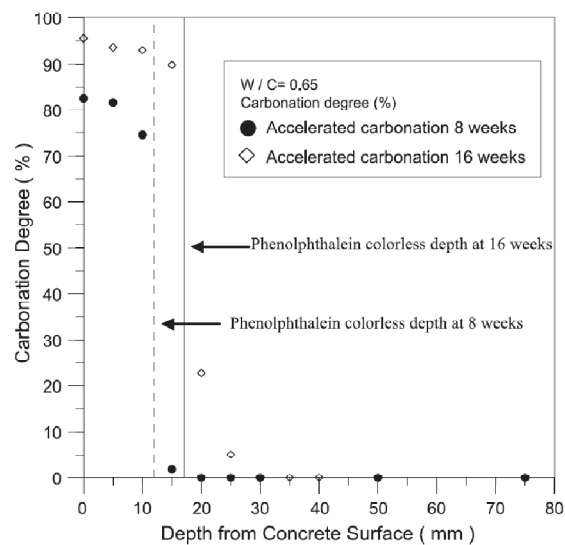
Van de verschillende betonsoorten werd eveneens de carbonatatiecoëfficiënt bepaald. Hiertoe werden per mengsel drie proefstukken onderworpen aan versnelde carbonatatie. Tegelijkertijd werden er drie proefstukken van hetzelfde mengsel onderworpen aan een carbonatatie-regime dat te vergelijken valt met “normale” omstandigheden. Er werd naar gestreefd om de meest strenge blootstellingsklasse volgens NBN EN 206-1 (2000) te simuleren, zijnde XC4 (cyclisch nat en droog). Hiertoe werden de proefstukken voor versnelde carbonatatie achtereenvolgens gedurende een week onder water bewaard en vervolgens een week in een carbonatatiekast. De temperatuur in de carbonatatiekast werd op $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ gehouden, met een relatieve luchtvochtigheid van 60% en een gehalte van 10 vol.% CO_2 in de aanwezige lucht. De referentieproefstukken (onder normale omstandigheden voor blootstellingsklasse XC4) werden eveneens afwisselend onder water en in een geklimatiseerde ruimte van $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ geplaatst, met een relatieve vochtigheid van $60\% \pm 5\%$. Het gehalte aan CO_2 in deze ruimte mag op 0,03 vol% geraamd worden, wat de gemiddelde waarde is op zeeniveau [Audenaert (2006), Atis (2002)].

De betreffende proefstukken bestonden uit kubussen waarvan vijf van de zes vlakken met een dubbele laag coating behandeld werden, zodat er slechts één vlak – het indringingsvlak – overbleef waarlangs carbonatatie kon optreden. Na twee cycli (i.e.: twee maal een week onder water en een week in de carbonatatiekast, respectievelijk de geklimatiseerde ruimte) werd de indringing van het carbonatatiefront bepaald door van de te beproefde kubussen, loodrecht op het indringingsvlak een één centimeter dik schijfje af te zagen, dat vervolgens met fenolftaleïne als kleurindicator werd besprenkeld (zie Figuur 3-18). Niet-gecarbonateerde zones, waarvan de pH-waarde hoger ligt dan 9, kleuren bij besprenkeling dan paars, terwijl de gecarbonateerde zones (met een lagere pH) geen verkleuring vertonen [Chang & Chen (2006)]. Vervolgens werd, loodrecht op het indringingsoppervlak, de carbonatatediepte om de 10mm opgemeten. De metingen aan de randen werden hier telkens verwaarloosd, gezien er eventueel in beperkte mate ook CO_2 -moleculen via de gecoate oppervlakken het beton zouden kunnen binnendringen. Na deze procedure werd het volledige proefproces herhaald.



Figuur 3-18: Indringingsdiepte bepaald met fenolftaleïne als kleurindicator

Volgens Chang & Chen (2006) bestaat er echter een gedeeltelijk gecarbonateerde zone waar de pH-waarde moeilijk te detecteren valt met behulp van fenolftaleïne als kleurindicator (zie Figuur 3-19). Hierdoor is de werkelijke carbonatatie diepte verschillend van deze, bekomen door meting van de kleurverandering na besprenkeling met fenolftaleïne.



Figuur 3-19: Relatie tussen de kleurloze fenolftaleïne diepte en de carbonatatiegraad van beton na 8 en 16 weken versnelde carbonatatie [Chang & Chen (2006)]

Door de resultaten van thermogravimetrische analyse (TGA), Fourier transformatie infraroodspectroscopie (FTIR) en röntgenstralen-analyse (XRDA) te vergelijken met deze bekomen met behulp van de metingen na gebruik van de kleurindicator, kon een verband tussen beide worden opgesteld. Hierbij wordt de carbonatatiegraad gedefinieerd door vergelijking (3.8).

$$D_c [\%] = \frac{(C - C_0)}{(C_{\max} - C_0)} \cdot 100 \quad (3.8)$$

$C_{\max}$ is hierbij de theoretische maximale hoeveelheid koolstofdioxide (CO_2) die nodig is om al het aanwezige calciumhydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) in het beton om te zetten in calciumcarbonaat (CaCO_3), C is de hoeveelheid koolstofdioxide in het proefstuk en C_0 is de hoeveelheid koolstofdioxide in het niet-gecarbonateerde proefstuk. Wanneer de pH van de poriënvloeistof minder dan 7,5 bedraagt, is de carbonatatiegraad van het proefstuk 100%. Wanneer de pH tussen 7,5 en 9,0 ligt, bedraagt de carbonatatiegraad 50 tot 100%. Indien de carbonatatiegraad tussen 9,0 en 11,5 ligt, is een carbonatatiegraad van 0 tot 50% van toepassing. Vergelijking (3.9) tot (3.12) [Chang & Chen (2006)] vatten voorgaande stellingen samen.

$$pH < 7,5 \rightarrow D_c = 100 \quad (3.9)$$

$$7,5 < pH < 9,0 \rightarrow D_c = -33,33 \cdot pH + 349,98 \quad (3.10)$$

$$9,0 < pH < 11,5 \rightarrow D_c = -20 \cdot pH + 230 \quad (3.11)$$

$$pH > 11,5 \rightarrow D_c = 0 \quad (3.12)$$

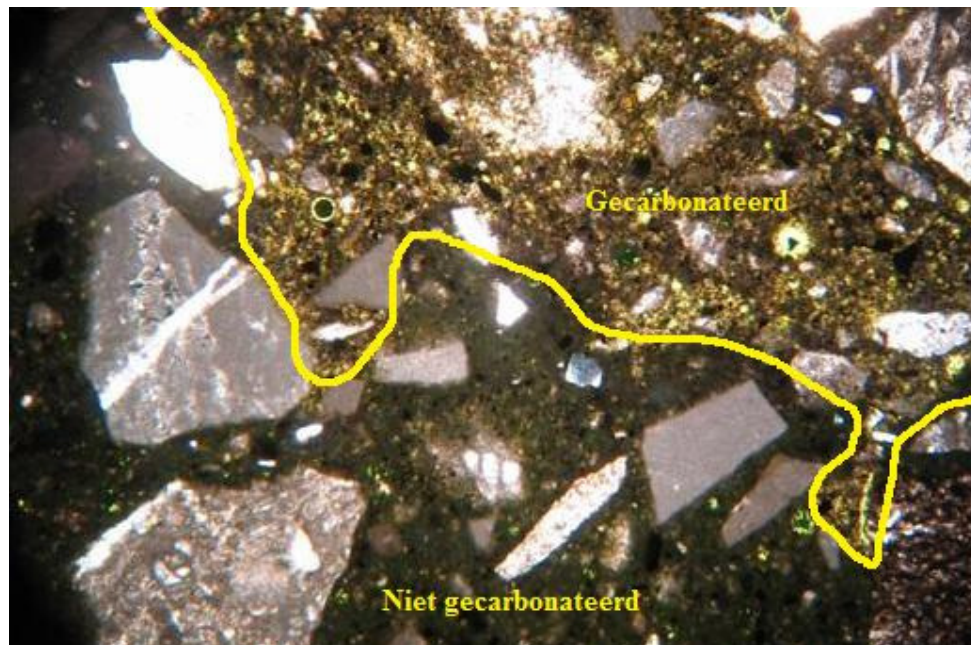
De carbonatatiezones kunnen dus opgedeeld worden in volledig gecarbonateerd, gedeeltelijk gecarbonateerd en niet-gecarbonateerd, afhankelijk van de graad van carbonatatie van het beton en dus de pH van de poriënvloeistof. Een zone wordt volledig gecarbonateerd genoemd wanneer de graad van carbonatatie hoger is dan 50% en de pH dus lager dan 9,0. Dit gebied wordt bijgevolg gekenmerkt door het volledig kleurloze uitzicht van de fenolftaleïne als kleurindicator. Wanneer de graad van carbonatatie tussen de 0% en de 50% ligt, wordt de zone gedeeltelijk gecarbonateerd genoemd. Een gebied waar de pH van de poriënvloeistof hoger ligt dan 11,5 is onaangetast en wordt dus de niet-gecarbonateerde zone genoemd.

Door het opstellen van voorgaande vergelijkingen was het mogelijk de werkelijke carbonatatediepte te vergelijken met deze bekomen door gebruik van fenolftaleïne als kleurindicator. Chang & Chen (2006) vonden dat de werkelijke carbonatatediepte X_c ongeveer het dubbele bedraagt van de diepte X_p bekomen met gebruik van fenolftaleïne. De meetmethode met fenolftaleïne is echter wel een goede indicator om het begin van corrosie, met betrekking tot gewapend of voorgespannen beton, te kunnen voorspellen, omdat de pH hier reeds voldoende gedaald is om de corrosie op gang te kunnen brengen ($pH < 9,0$).

▪ Slijpplaatjes

Om de nauwkeurigheid van de resultaten die bekomen werden uit de “ruwere” metingen met fenolftaleïne als kleurindicator na te gaan, werden van de recycleerbare mengsels slijpplaatjes gemaakt. Een slijpplaatje bestaat uit een zeer dun betonschijfje, dat onder een microscoop kan worden bekeken. De slijpplaatjes werden gemaakt uit de proefstukken waarvan de carbonatatie diepte vooraf met fenolftaleïne werd bepaald. Uit deze proefstukken werd vervolgens een dun schijfje gezaagd dat daarna op een glasplaatje werd gekleefd en geïmpregneerd met een kunsthars. Vervolgens werd dit bijgeslepen tot de gewenste dikte, in dit geval $25\mu\text{m}$. Door de plaatjes te bekijken onder een microscoop met doorvallend gepolariseerd licht, kon de carbonatatie van het beton worden herkend door de bruinere kleur van de cementpasta t.o.v. de niet-gecarbonateerde pasta.

Dit gebeurde voor de mengsels op 1 maand ouderdom en nadat het beton gedurende zestien weken de proef had doorlopen. Figuur 3-20 toont een gedeeltelijk door carbonatatie aangetast proefstuk, zoals het door een microscoop wordt gezien. Het gecarbonateerd beton brengt een duidelijk zichtbare kleurverandering met zich mee.



Figuur 3-20: Bepalen van het carbonatatiefront m.b.v. microscopieanalyse [Boven: gecarbonateerd beton, Onder: niet-gecarbonateerd; Vergroting = 5x]

3.2.6. Open porositeit

Volgens Lammertijn (2007) kan een ruwe schatting van de porositeit worden gemaakt via de methode van de wateropsorping onder vacuüm. De porositeit, die vanaf de buitenzijde van het proefstuk toegankelijk is, kan hiermee worden bepaald. Gezien schadelijke stoffen via deze open poriën het beton kunnen binnendringen, geeft dit een belangrijke indicatie voor het aantastingsgedrag. Er bestaan drie soorten holten in beton. In volgorde van grootte zijn dit luchtholten (diameter $> 10\mu\text{m}$), capillaire poriën (diameter $10\text{nm} - 0,5\mu\text{m}$) en gelporiën (diameter $< 10\text{nm}$). Luchtporiën zijn vaak individuele luchtbelletjes en staan zodoende nauwelijks in verbinding met elkaar. De open porositeit zal dus vooral afhankelijk zijn van de overige twee types poriën.

De methode van wateropsorping onder vacuüm laat een vloeistof (in dit geval water) indringen in het open poriënsysteem van beton. Dit beton wordt zowel in droge als in verzadigde toestand gewogen. De porositeit (φ [-]) wordt hierbij bepaald als de verhouding van het volume dat gevuld kan worden met een vloeistof tot het volume van het droge beton [Audenaert (2006)]:

$$\varphi = \frac{\frac{m_s - m_d}{\rho_w}}{\frac{m_d}{\rho_{\text{beton}}}} = \frac{\frac{m_s - m_d}{\rho_w}}{V} = \frac{m_s - m_d}{V \cdot \rho_w} \quad (3.13)$$

Hierbij is m_s de massa van het verzadigde proefstuk [kg], m_d de massa van het droge proefstuk [kg], V het volume van het proefstuk [m^3], ρ_w de dichtheid van de vloeistof [kg/m^3] en ρ_{beton} de droge schijnbare dichtheid van het beton [kg/m^3].

Volgens Audenaert (2006) zijn er verschillende types water aanwezig in beton. Vooreerst is er vrij water (capillair water). De hoeveelheid van dit water is volledig afhankelijk van de temperatuur en de relatieve vochtigheid van de omgeving. Daarnaast is er ook fysisch gebonden water. Ook deze hoeveelheid water is afhankelijk van de relatieve vochtigheid. Bij relatieve vochtigheden die normaal voorkomen, zal dit water echter nooit volledig kunnen verdampen. Tot slot vormt chemisch gebonden water het laatste type in beton aanwezig water.

Het vrije water zal tijdens voldoende lange droging bij 105°C volledig verdampen. Het fysisch gebonden water zal in dezelfde omstandigheden gedeeltelijk verdwijnen. Chemisch gebonden water daarentegen, zal slechts volledig verdampen bij 1000°C . Omwille van het slechts gedeeltelijk verdampen van het fysisch gebonden water bij 105°C , is het noodzakelijk de proefmethode consequent te volgen, gezien dit de resultaten kan beïnvloeden.

In de uitgevoerde proeven werden de proefstukken volgens twee verschillende methoden gedroogd. Een eerste methode is gebaseerd op het werk van Audenaert (2006), waarbij de proefstukken eerst werden gedroogd bij $40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ en vervolgens vacuüm verzadigd. Daarna werden de proefstukken opnieuw gedroogd bij 105°C en werd de vacuümverzadiging een tweede maal uitgevoerd.

Een tweede werkwijze is gebaseerd op de procedure beschreven in Lizarazo-Marriaga & Claisse (2009). Hierbij werd het proefstuk eerst vacuüm verzadigd en pas daarna gedroogd bij 105°C . Reden voor deze procedure is de twijfel of het verwarmen van het proefstuk tot 105°C de poriënstructuur zou kunnen wijzigen en zodoende de bekomen resultaten beïnvloeden.

Onder “drogen” wordt verstaan “drogen tot constante massa”. Als criterium voor het bereiken van deze constante massa, wordt een massaverschil van minder dan 0,1% in een tijdspanne van 24h gehanteerd. Volgens Audenaert (2006) is dit zeker het geval indien de proefstukken gedurende 14 dagen worden gedroogd. Audenaert (2006) baseert deze stelling op de bevindingen van Boel (2001), die bij dezelfde proeven reeds na 7 dagen een massaverschil van minder dan 0,1% vond.

De open porositeit bij 40°C stemt overeen met de holten die gevuld kunnen worden met vrij water. Dit wordt de capillaire porositeit genoemd. Na 14 dagen drogen is echter nog een kleine hoeveelheid vrij water, dat aan een trager tempo verdampt dan 0,1% van de massa per 24h, in het beton aanwezig. Hierdoor wordt de een onderschatting van de massa vrij water van 1,7% gemaakt.

De open porositeit bij 105°C stemt overeen met de capillaire porositeit vermeerderd met de ruimte die vrij komt door het verdampen van gelwater. Dit wordt de totale porositeit genoemd [Van den Heede (2007), Audenaert (2006)]. De gelporositeit φ_{gel} wordt bekomen door van de totale porositeit φ_{tot} de capillaire porositeit φ_{cap} af te trekken:

$$\varphi_{gel} = \varphi_{tot} - \varphi_{cap} \quad (3.14)$$

Wanneer de proefstukken werden gewogen, geschiedde dit zowel boven als onder water. De wet van Archimedes geeft het verband tussen het volume van een verzadigd proefstuk en zijn gewicht in (m_s) en uit (m_l) een vloeistof: formule (3.15).

$$V = \frac{m_s - m_l}{\rho_i} \quad (3.15)$$

Hierbij stelt ρ_i de dichtheid van de gebruikte vloeistof voor [kg/m^3], in dit geval water. Indien vergelijking (3.15) gecombineerd wordt met vergelijking (3.13), kan de open porositeit berekend worden met volgende formule:

$$\phi = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_l} \quad (3.16)$$

De vacuümverzadiging werd bereikt door het proefstuk in een tank te plaatsen die vacuüm werd gezogen (Figuur 3-21). Wanneer dit vacuüm werd bereikt, werd het nog gedurende 2,5 uur aangehouden. Daarna werd water in de tank gelaten en wanneer de proefstukken volledig ondergedompeld waren, werd het vacuüm opgegeven. De proefstukken bleven dan nog gedurende 24h onder water.



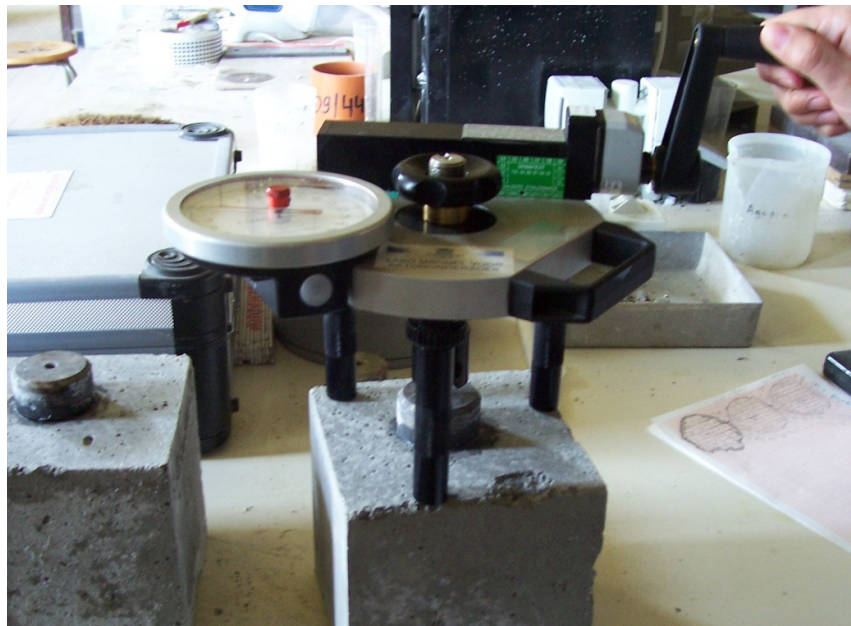
Figuur 3-21: Vacuümtank voor wateropsorping

De cilindervormige proefstukken die voor dit experiment werden aangewend, hadden een diameter van 100mm en werden uit een 100mm dikke plaat geboord. De proefstukken werden vervolgens evenwijdig met het afstrijkvlak in twee gezaagd. Op die manier werden twee cilinders met een hoogte van 50mm bekomen, waarvan het ene begrensd wordt door een afstrijkvlak, een zaagvlak en een geboorde (gezaagde) mantel en het andere door een bekistingsvlak, een zaagvlak en een geboorde (gezaagde) mantel. De proef werd uitgevoerd op proefstukken van zes maand ouderdom en dit op betonsoorten CRC 1, CRC 2 en als referentiebeton T(0,45). Tot die leeftijd werd het beton bewaard in een geklimatiseerde ruimte bij $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ en een relatieve vochtigheid van minimaal 95%. Voor elke methode werden van elk beton zowel drie proefstukken van het afstrijkvlak als drie proefstukken van het bekistingsvlak getest.

3.2.7. Oppervlakterkte

3.2.7.1. Trekproef

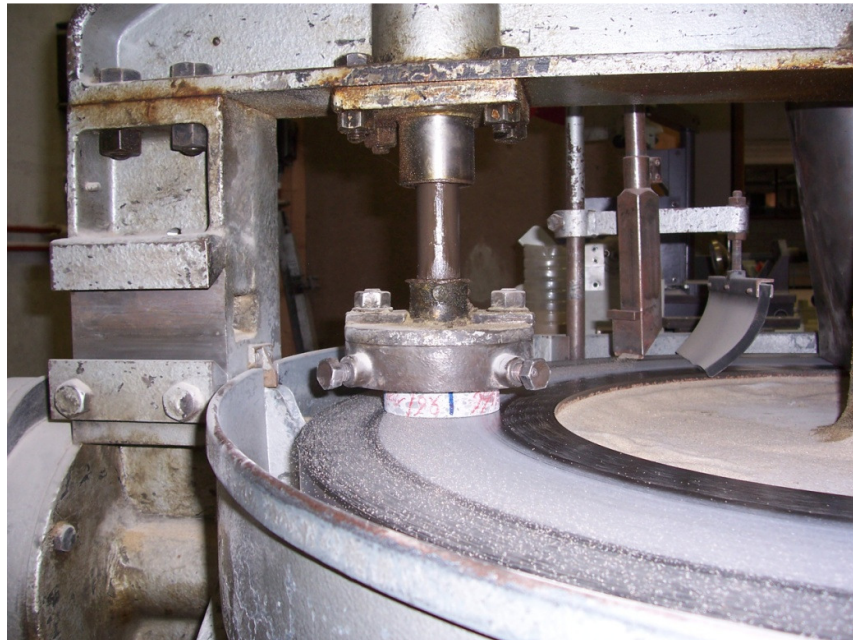
Om het verschil in oppervlakterkte van het beton te bepalen werd een metalen schijf met diameter 50mm met een epoxylijm vastgekleefd op het te beproeven oppervlak. Na het harden van de lijm werd de schijf van het beton losgerukt. Gezien de lijm sterker is dan het beton zelf, zal de bovenste laag van het beton hierdoor lokaal afscheuren. Door de proef zowel toe te passen op bekistingsvlak als op afstrijkvlak, kan het verschil in sterkte tussen deze vlakken bepaald worden. De sterkte van het beton wordt uitgedrukt als de verhouding van de kracht, benodigd voor het afrukken van de schijf, tot het losgerukte oppervlak. De proef werd uitgevoerd op het beton CRC 2 met een leeftijd van ongeveer 6 maand. Figuur 3-22 toont de proefopstelling.



Figuur 3-22: Trekproef met behulp van vastgekleefde cilinder
[links: voorbereid proefstuk met vastgekleefde cilinder; rechts: proef in uitvoering]

3.2.7.2. Afslijtingsproef

De weerstand tegen afslijting van het betonoppervlak werd bepaald volgens NBN B 15-223. Hierbij werd de afslijting gemeten van een cilindervormig proefstuk op 6 maand ouderdom. Het proefstuk werd uit een plaat geboord en werd vervolgens in twee helften gezaagd. Op deze manier ontstond een proefstuk waarvan het bekistingsvlak kon beproefd worden en een proefstuk waarbij de proef op het afstrijkvlak kon uitgevoerd worden. De slijtweg werd beperkt tot 500m zodat vooral de buitenste betonlaag aan afslijting werd onderworpen. De ruwheid van de slijttafel werd gegarandeerd door aan een vast debiet slijtzand op de slijtweg aan te brengen. Deze proef werd uitgevoerd op het beton CRC 2 en dit zowel drie maal op het afstrijkvlak als drie maal op het bekistingsvlak. Op Figuur 3-23 is de slijttafel in detail te zien.



Figuur 3-23: Slijttafel [centraal: ingeklemd proefstuk]

3.2.8. Mortelproeven

3.2.8.1. Bereiden mortel

Het bereiden van de mortel is gebaseerd op de norm NBN EN 196-1 (2005). Eerst werd het water in de mengkom gedaan. Indien er citroenzuur of wijnsteenzuur werd gebruikt als bindingsvertrager, werd deze aan het aanmaakwater toegevoegd. De te gebruiken hoeveelheid luchtbelvormer werd eveneens in dit aanmaakwater gemengd. Daarna werden de te gebruiken hoeveelheden bindmiddelen, samen met de kalksteenfiller gedurende 30 seconden gemengd aan een draaisnelheid van 140 toeren/minuut. Hierna werd het kalksteenzand geleidelijk aan de cementpasta toegevoegd en dit over een tijdspanne van 30 seconden. Vervolgens werd de mortel gedurende 30 seconden gemengd aan een snelheid van 285 toeren/minuut. Na dit mengen werd de rand van de mixer en de mengschoep gedurende 30 seconden afgeschrapt. Aansluitend kreeg de mortel één minuut de tijd om te “rusten”, zonder mengen. Tot slot werd nogmaals één minuut gemengd aan 285 toeren/minuut, waarbij de te gebruiken hoeveelheid superplastificeerder toegevoegd werd.

3.2.8.2. Bepaling schud- en zetmaat

Onmiddellijk na het mengen werd van de verse mortel de schudmaat (flow) en zetmaat (slump) bepaald. De schudmaat werd bepaald als het gemiddelde van twee loodrecht op elkaar gemeten diameters na 15 schokken op de schoktafel (Figuur 3-24). De procedure werd uitgevoerd zoals beschreven in NBN EN 413-2 (2005). De schokmaat werd telkens bepaald 15 minuten na het begin van de menging. De zetmaat werd bepaald met behulp van een kleinere versie van de Abramskegel. Van deze afgeknotte kegel zijn alle afmetingen exact de helft van deze zoals bepaald in NBN EN 12350-2 (1999). De zetmaat werd voor alle mengsels bepaald op 6 minuten na het begin van de menging.



Figuur 3-24: Bepaling flow



Figuur 3-25: Bepaling slump

3.2.8.3. Ultrasonische transmissie en semi-adiabatische calorimetrie

Aan de hand van ultrasonische transmissie en semi-adiabatische calorimetrie, een methode die in Robeyst (2010) uitgebreid wordt besproken, kan de snelheid van de hydratatie van cement begroot worden. Voor alle theoretische beschouwingen omtrent deze techniek wordt dan ook verwezen naar dit werk.

Praktisch gezien berust de werking van de ultrasonische transmissie op het versturen van een ultrasonische golf doorheen een proefstuk. De golflengte van het verzonden signaal bedraagt $2,5\mu s$ (en de frequentie dus ongeveer 400kHz) en wordt met behulp van een zender elke vijf minuten doorheen de mortel gestuurd. Aan de andere kant van het proefstuk vangt de ontvanger het uitgestuurde signaal op. De theorie berust op het feit dat de golf zich sneller zal kunnen verplaatsen, naarmate de mortel harder wordt. Door de golfsnelheid te berekenen, wordt zo een beeld verkregen van de snelheid waarmee de mortel verhardt.

Om het krimpen van de mortel tegen te gaan en aldus een goed contact met de zend- en ontvangstsensoren te garanderen, werd het proefstuk afgedekt met een plastic vlies. De temperatuur waarbij de proeven werden uitgevoerd bedroeg $20 \pm 2^\circ C$ en de relatieve vochtigheid $60 \pm 5\%$.

Tegelijkertijd werd een proefstuk in een semi-adiabatische calorimeter (Langavant calorimeter) geplaatst zodat de ultrasone en calorimetrische metingen tegelijk werden uitgevoerd op een even oude mortel. Naarmate de hydratatie van het cement vordert, zal een grotere hoeveelheid warmte vrijkomen. Op hetzelfde ogenblik blijft het proefstuk in de container voor de ultrasone transmissie, onder isotherme omstandigheden hydrateren. Volgens Robeyst (2008) is de temperatuursstijging in het proefstuk dat wordt onderworpen aan ultrasone transmissie minder dan 2°C , terwijl de temperatuur tijdens semi-adiabatische metingen oplopen tot 35°C . Om de resultaten uit de calorimeter te vergelijken met de ultrasone metingen, wordt de warmteproductie getoond in functie van de equivalente ouderdom bij 20°C .

Alle metingen werden geregistreerd door het FreshCon systeem, dat ontwikkeld werd aan de Universiteit van Stuttgart. Figuur 3-26 geeft een beeld van de volledige opstelling.



Figuur 3-26: Freshcon-opstelling voor ultrasone transmissie en semi-adiabatische calorimetrie [vooraan: monster in container voor ultrasoonmeting; links: geïsoleerd vat met monster voor temperatuursmeting; midden (van boven naar onder): temperatuurskaart, pulsgenerator, voorversterker; rechts: monitor]

3.2.8.4. Luchtgehalte

Het luchtgehalte van de verse mortel werd bepaald met de drukmethode zoals beschreven in NBN EN 413-2 (2005). Hiertoe werd de mortel in twee lagen in het drukvat van het toestel (zie Figuur 3-27) aangebracht waarbij elke laag met 10 prikken van een genormaliseerde staaf werd verdicht. Nadat de rand van dit vat werd schoongeveegd, werd de drukmeter op het vat geplaatst en werd het luchtgehalte gemeten. Dit gebeurde tussen de 5 en 10 minuten na het mengen.



Figuur 3-27: Bepaling luchtgehalte [links: drukmeter; rechts: met mortel gevuld vat]

3.2.8.5. Driepuntsbuigproef en drukproef

De buigsterkte van een mortel werd bepaald door het belasten op drie punten van prismatische proefstukken (afmetingen $\pm 160\text{mm} \times 40\text{mm} \times 40\text{mm}$) tot breuk (Figuur 3-28). De proef werd telkens uitgevoerd op 2, 7 en 28 dagen ouderdom en dit steeds op 3 proefstukken. De druksterkte van de mortel werd bepaald op de twee delen die overbleven na het uitvoeren van deze driepuntsbuigproef (Figuur 3-29). NBN EN 196-1 (2005) beschrijft de technische specificaties bij het uitvoeren van de proef. Figuur 3-28 en Figuur 3-29 geven een beeld van de toestellen voor de uitvoering van respectievelijk de driepuntsbuigproef en de drukproef.



Figuur 3-28: Driepuntsbuigproef



Figuur 3-29: Drukproef

4. Resultaten en bespreking

NOTA: De foutbalken die in grafieken van dit en volgende hoofdstukken desgevallend voorkomen, geven telkens de standaardafwijking op de individuele waarden weer.

4.1. Verwerkbaarheid en luchtgehalte

De verschillende parameters die de verwerkbaarheid van het beton karakteriseren werden reeds weergegeven in Tabel 3-16. De slump en/of flow werden hierbij bepaald en de betreffende klasse werd aan deze mengsels toegekend. Opvallend hierbij is de moeilijke verwerkbaarheid van mengsels CRC 3a [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] en CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6], die beide tot slumpklasse S1 behoren en dit ondanks de vrij hoge hoeveelheid superplastificeerder. Dit wordt verklaard door de combinatie van hoogovencement met aluminaatcement, wat een zeer snelle binding teweegbrengt.

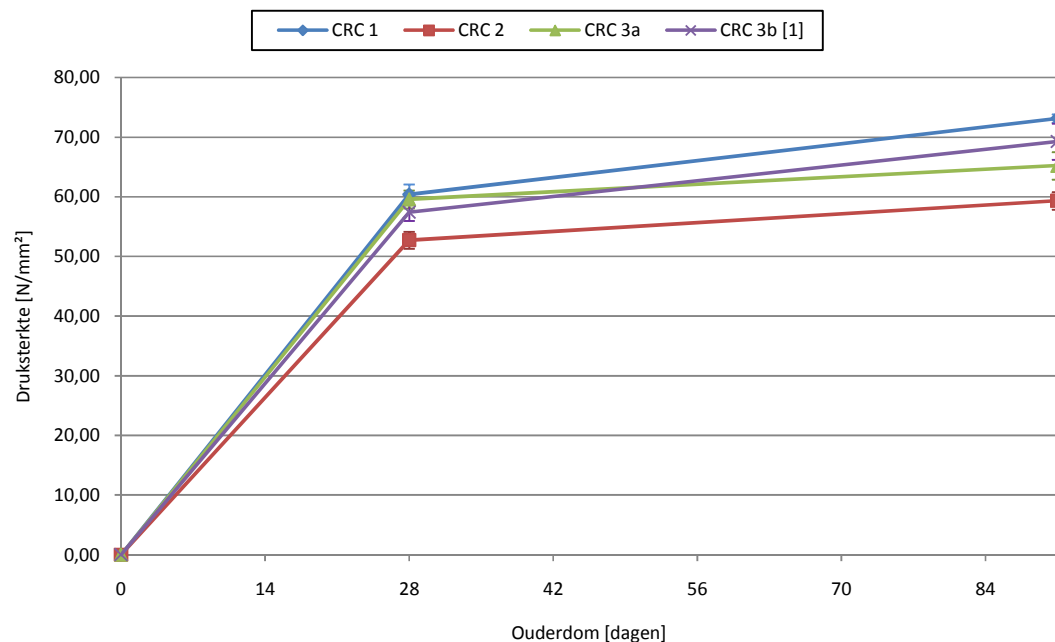
De aanwezigheid van gips in de vorm van calciumsulfaat (CaSO_4) (ter grootte van 6m% van de totale hoeveelheid aan bindmiddelen) kon deze binding niet voldoende afremmen om het een in de praktijk bruikbaar mengsel te maken. Toch werd reeds een verbetering waargenomen ten opzichte van dezelfde mengeling zonder gebruik van calciumsulfaat. Zonder dit gips was de flashreactie met name zelfs zo hevig, dat het mengen van het beton reeds na enkele minuten onmogelijk was geworden.

Hoewel bij CRC 3b een zelfde hoeveelheid gips en een grotere hoeveelheid superplastificeerder werd gebruikt dan bij CRC 3a, werd voor CRC 3b toch een ietwat kleinere slump opgemeten. Gezien de bijzonder snelle binding van beide mengsels, mag niet geconcludeerd worden dat CRC 3a per se beter verwerkbaar is dan CRC 3b. Dit verschil kan immers reeds veroorzaakt worden door een eventueel kleine afwijking in het ogenblik waarop de zetmaat werd bepaald.

Ook het luchtgehalte werd voor alle mengsels bepaald, de resultaten ervan zijn eveneens in Tabel 3-16 terug te vinden. De volumemassa van de verse betonmengsels wordt eveneens in deze tabel vermeld.

4.2. Druksterkte van het beton

De druksterkte van het beton wordt voor de verschillende mengsels weergegeven in Bijlage B. De druksterkte werd zowel bepaald op 28 dagen als op 91 dagen ouderdom, zodat het verloop van de sterkte in functie van de tijd onderzocht kan worden. Opvallend is dat CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35] een grotere toename in druksterkte kent dan CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35], hoewel voor laatstgenoemd mengsel hoogovencement werd gebruikt, terwijl in CRC 1 gebruik werd gemaakt van een even grote hoeveelheid portlandcement. Figuur 4-1 verduidelijkt dit. Ook ligt de gemiddelde druksterkte bij CRC 3a[LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] hoger dan bij CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] op 1 maand ouderdom en lager op 3 maand ouderdom. De verschillen zijn echter op beide leeftijden niet significant.

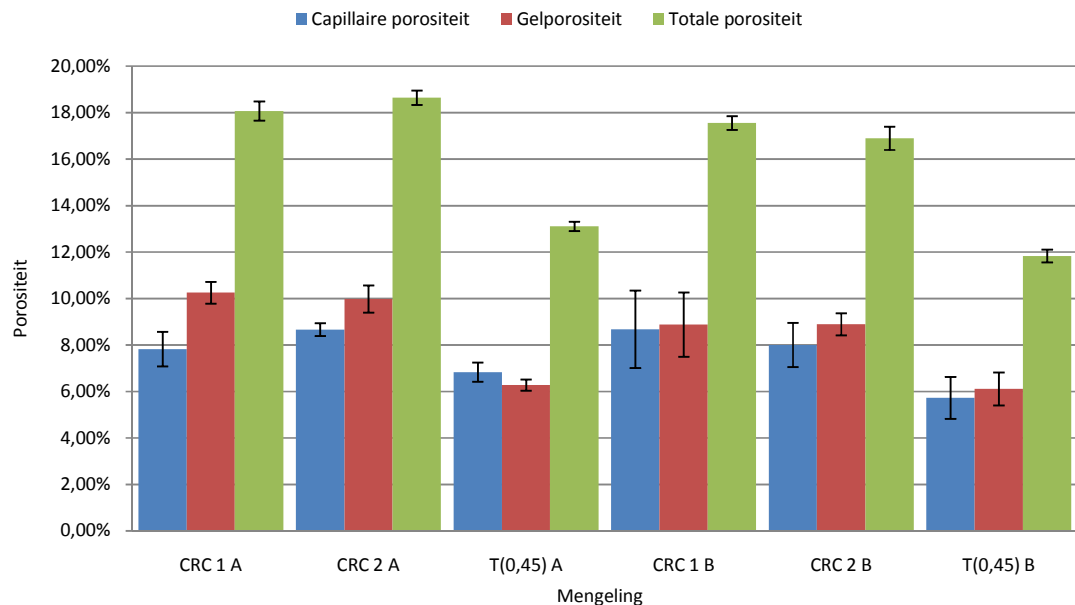


Figuur 4-1: Gemiddelde druksterkte [N/mm²] van de recycleerbare mengelingen in functie van de ouderdom
 CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35]; CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]; CRC 3a [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]; CRC 3b
 [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]

Van de referentiemengsels valt vooral op dat de samenstellingen met luchtbelvormer (T0,45)A en T(0,45)A-2 een significant lagere druksterkte bezitten dan deze zonder luchtbelvormer T(0,45) en T(0,45)-2, hoewel beide mengsels een even grote W/C-factor en een even hoog cementgehalte (340 kg/m^3) bezitten. Deze vermindering in druksterkte zou te wijten kunnen zijn aan het hogere luchtgehalte (zie ook Tabel 3-16), een effect dat ook door Van den Heede (2008) werd vastgesteld. T(0,50) bezit dan weer een lagere druksterkte dan T(0,45) en T(0,45)-2 door een lager cementgehalte (320 kg/m^3) en een hogere W/C-factor.

4.3. Open porositeit

De open porositeit van de mengsels werd bepaald volgens twee verschillende methoden. Bij de eerste methode werden de proefstukken eerst gedroogd en vervolgens verzadigd, bij de tweede methode gebeurde dit net andersom. Voor de proefstukken die eerst werden verzadigd, werd enkel de totale porositeit bepaald, van de overige proefstukken werd ook de capillaire porositeit gemeten en de gelporositeit berekend. Figuur 4-2 toont een overzicht van de resultaten wanneer de proefstukken eerst werden gedroogd.



Figuur 4-2: Capillaire porositeit, gelporositeit en totale open porositeit van de beproefde mengsels op 6 maand ouderdom, wanneer het proefstuk eerst gedroogd en vervolgens verzadigd werd. [A = Afstrijkvlak, B = Bekistingsvlak]

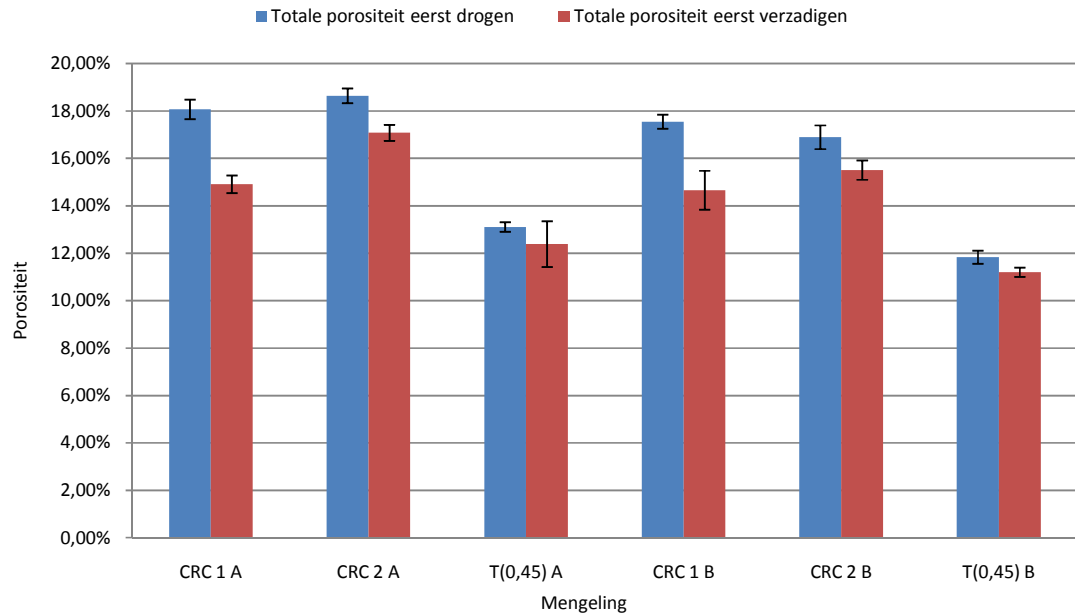
De totale porositeit is het grootst bij de recycleerbare mengsels. Dit kan verklaard worden door het gebruik van vliegashoudend cement in deze mengsels. Volgens Van den Heede (2008) neemt de totale porositeit immers toe in functie van het gehalte aan vliegashoudend cement. In hetzelfde werk werd eveneens vastgesteld dat het gebruik van luchtbelvormer (aanwezig in de recycleerbare mengsels, maar niet in T(0,45)), leidt tot een iets hogere porositeit. Op zes maand ouderdom zou deze invloed echter beperkt blijven tot 0,7%. Een lagere W/CM-factor zou wel een positief effect hebben op de porositeit van het beton. Hoewel de W/CM-factor lager is bij de recycleerbare mengsels (0,40), dan bij de referentiemengeling (0,45), weegt dit klaarblijkelijk niet op tegenover het gebruik van luchtbelvormer en vooral de toevoeging van vliegashoudend cement.

De verschillen in capillaire, totale en gelporositeit voor de mengsels worden eveneens ten opzichte van elkaar bekeken. De verschillen tussen CRC 1 en CRC 2 zijn slechts klein en niet significant wanneer bekistingsvlak en afstrijkvlak afzonderlijk worden vergeleken. Zowel de capillaire als de gelporositeit (en dus ook de totale porositeit) zijn wel lager bij T (0,45).

Opvallend is dat, zowel voor capillaire, totale als gelporositeit, de proefstukken met een afstrijkvlak steeds een hogere porositeit bezitten dan de proefstukken met een bekistingsvlak. Enkel de capillaire porositeit bij CRC 1 wijkt hiervan af, in dat geval is de gemiddelde capillaire porositeit hoger in het geval er een bekistingsvlak wordt beproefd. De verschillen zijn, zowel voor gelporositeit als capillaire en totale porositeit nergens significant. Indien de proefstukken eerst vacuüm worden verzadigd en vervolgens gedroogd, ligt de gemiddelde totale porositeit eveneens telkens hoger bij het afstrijkvlak dan bij het bekistingsvlak. Het verschil tussen beide is niet significant voor CRC 1 en T(0,45), maar wel significant voor CRC 2.

In Van den Heede (2008) werd nochtans vastgesteld dat proefstukken uit de massa van het beton een lagere porositeit bezitten dan proefstukken uit de massa van het beton. Dit werd verklaard door het wandeffect. Normaliter bevinden er zich tegen het bekistingsvlak namelijk minder granulaten en meer cementpasta dan in de massa van het beton, wat de toenemende porositeit zou verklaren. Gevoelsmatig zou er verondersteld worden dat het verschil nog groter zal worden wanneer een proefstuk met afstrijkvlak i.p.v. een proefstuk uit de massa wordt onderzocht. Bij het afstrijken, zullen de granulaten aan het oppervlak immers “in het beton worden geduwd”, waardoor de concentratie aan granulaten aan het afstrijkvlak misschien zelfs nog groter zal zijn dan in de massa. In elk geval zal het wandeffect zeker minder duidelijk aanwezig zijn dan ter hoogte van het bekistingsvlak, zodat dit geen oorzaak kan zijn van de verhoogde porositeit voor deze proefstukken. Om de verschillen echter beter te kunnen onderzoeken, zou een dunnere schijf beproefd kunnen worden. Op die manier zou de invloed van het betonoppervlak dat zich net onder het afstrijkvlak of bekistingsvlak bevindt, een grotere invloed hebben op de porositeit van het totale proefstuk.

Figuur 4-3 toont de totale open porositeit, volgens de twee verschillende technieken berekend. De berekende totale open porositeit is steeds het grootst wanneer het proefstuk eerst wordt gedroogd. De verschillen tussen de beide methodes zijn voor elk mengsel, met uitzondering van “afstrijkvlak T(0,45)”, ook significant. Dit betekent dat de poriënstructuur van het beton, bij het drogen bij 105°C, wijzigingen ondergaat.



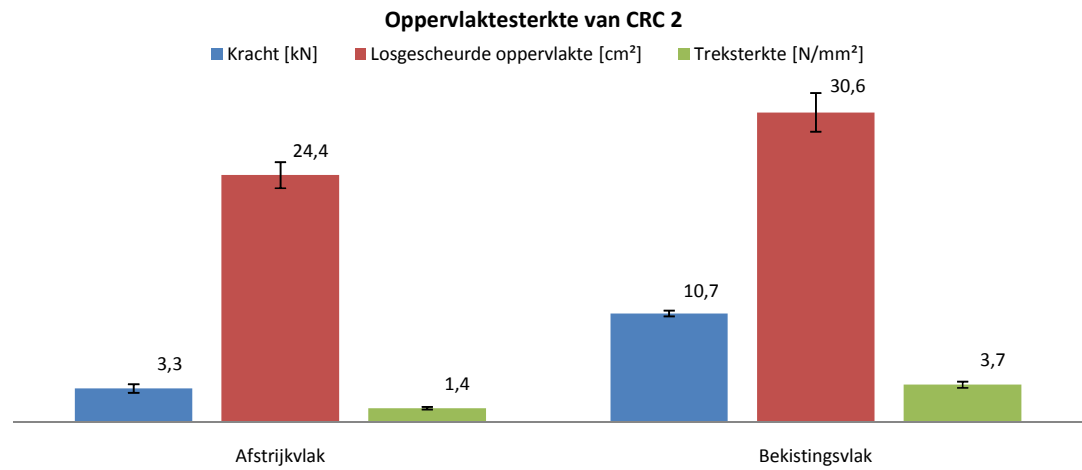
Figuur 4-3: Totale open porositeit van de beproefde mengsels op 6 maand ouderdom. [A = Afstrijkvlak, B = Bekistingsvlak]

De gemiddelde daling in porositeit bedraagt achtereenvolgens voor afstrijkvlak en bekistingsvlak 17,5% en 16,5% bij CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35], 8,4% en 8,2% bij CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35] en 5,5% en 5,4% bij T(0,45). Hieruit kan afgeleid worden dat de mate waarin de poriënstructuur verandert, sterk afwijkt van beton tot beton en dus waarschijnlijk ook van poriënstructuur tot poriënstructuur. Of het beton met bekistingsvlak, dan wel met afstrijkvlak wordt beproefd, lijkt weinig invloed te hebben op de mate waarin de totale open porositeit stijgt, wanneer het proefstuk wordt gedroogd bij 105°C.

4.4. Oppervlaktersterkte van het beton

4.4.1. Trekproef

Door een vastgekleefde schijf met diameter 50mm van zowel bekistingvlak en afstrijkvlak van CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35] los te rukken en de hierbij benodigde kracht te registreren, wordt een maat voor de oppervlaktersterkte van het beton bekomen. Het beton had op het ogenblik van de proef een leeftijd van - ongeveer - 6 maand.



Figuur 4-4: Bepaling van de oppervlaktersterkte van CRC 2 a.d.h.v. een trekproef op een vastgekleefde cilinder

De sterkte van het bekistingsvlak ligt beduidend hoger dan deze van het afstrijkvlak. Bovendien werd meer materiaal losgescheurd wanneer het bekistingsvlak werd beproefd: Bij het afstrijkvlak toonde het scheurvlak een volledig evenwijdig verloop met het afstrijkvlak zelf, wat er op wijst dat de zwakste doorsnede dit oppervlak zelf is. Figuur 4-5 kan het een ander verduidelijken.



Figuur 4-5: Losgescheurde metalen cilinders op het beproefde afstrijkvlak

Wanneer het scheurvlak van het bekistingsvlak daarentegen wordt aanschouwd, verlopen de scheuren meer in de diepte van de betonmassa. De meest zwakke plaats die door de scheur wordt gezocht, bevindt zich dus niet onmiddellijk onder het gelijmde oppervlak, wat er op duidt dat er geen reden is om aan te nemen dat het beton aan het bekistingsvlak minder sterk is dan het beton in de massa. Figuur 3-7 geeft een beeld van de afgescheurde cilinders en de beproefde betonkubussen. Op deze figuur is ook duidelijk zichtbaar dat het beton niet enkel breekt ter hoogte van de cementpasta, maar ook dwars doorheen de kalksteengranulaten, wat aantoont dat de granulaten niet sterker zijn dan deze pasta op 6 maand ouderdom.

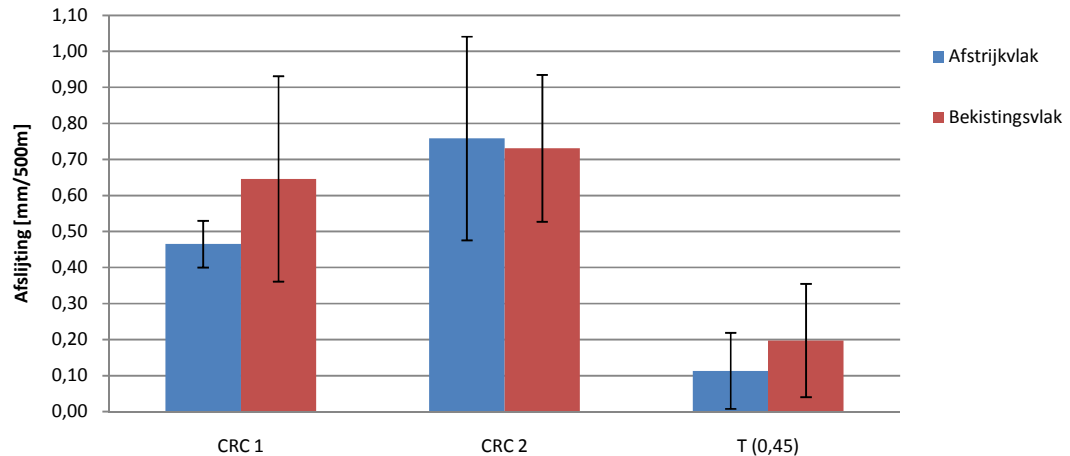


Figuur 4-6: Losgescheurde metalen cilinders op het beproefde bekistingsvlak

4.4.2. Afslijtingsproef

Een tweede maat om de oppervlaktesterkte van een beton te karakteriseren bestaat erin de schuurweerstand van het beton te meten, door het beton te laten slepen over een continu met zand bestrooide slijtweg. De recycleerbare mengsels CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35] en CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35] werden aan een dergelijke proef onderworpen op ongeveer 6 maand ouderdom, evenals referentiemengeling T(0,45). De resultaten van deze proef, zowel voor bekistingsvlak als afstrijkvlak, zijn te zien in Figuur 4-7.

Voor geen van de mengsels zijn de verschillen tussen afstrijkvlak en bekistingsvlak significant. De verschillen tussen de afstrijkvlakken en de bekistingsvlakken van CRC 1 en CRC 2 onderling zijn eveneens niet significant. Het verschil tussen afstrijkvlak van CRC 1 met T(0,45) is wel significant en voor CRC 2 is het verschil met T(0,45) zowel voor het bekistingsvlak als het afstrijkvlak significant.



Figuur 4-7: Afslijting van het betonoppervlak na 500 meter slijtweg

Betonvloeren worden volgens het WTCB (1997), naargelang de intensiteit van het gebruik, onderverdeeld in klassen, waarvoor vervolgens aan een zekere eis betreffende de toegestane afslijting dient voldaan te worden. Tabel 4-1 toont deze eisen in functie van de belasting. De afgelegde slijtweg bedraagt voor deze proeven wel 3000m i.p.v. 500m.

Tabel 4-1: Beoordeling van de toegestane slijtage en de onderverdeling in klasse bij een slijtweg van 3000m [WTCB (1997)]

Beoordeling van de slijtage	Lichte slijtbelasting	Zware slijtbelasting
Slijtage is geen dominante factor	Geen specifieke eisen	Klasse 1 (2mm < afslijting $\geq$ 3,5mm)
Slijtage is een dominante factor	Klasse 1 (2mm < afslijting $\geq$ 3,5mm)	Klasse 2 (afsluiting $\leq$ 2mm)

Voor de voorwaarden waaronder een bepaald type belasting tot een bepaald categorie zal behoren, wordt verwezen naar WTCB (1997). Globaal komt het er op neer dat slijtage een dominante factor zal zijn wanneer er sprake is van voetgangersverkeer, voertuigen op rubberbanden of wanneer goederen worden gesleept. Bij gebruik van harde banden is slijtage geen dominante factor. De basis waarop een belasting vervolgens gecatalogeerd wordt als lichte of zware slijtbelasting, heeft vooral betrekking op de wielbelasting (aslasten) die voor de gebruikte voertuigen gelden.

Indien aangenomen zou worden dat de afslijting recht evenredig verloopt met de lengte van de slijtweg, zou enkel T(0,45) in Klasse 2 terecht komen. Het afstrijkvlak van CRC 1 zou dan tot Klasse 1 behoren. De overige vlakken zouden enkel gebruikt kunnen worden voor lichte slijtbelasting wanneer slijtage geen dominante factor is.

4.5. Weerstand tegen vorst en dooizouten

▪ Algemeen

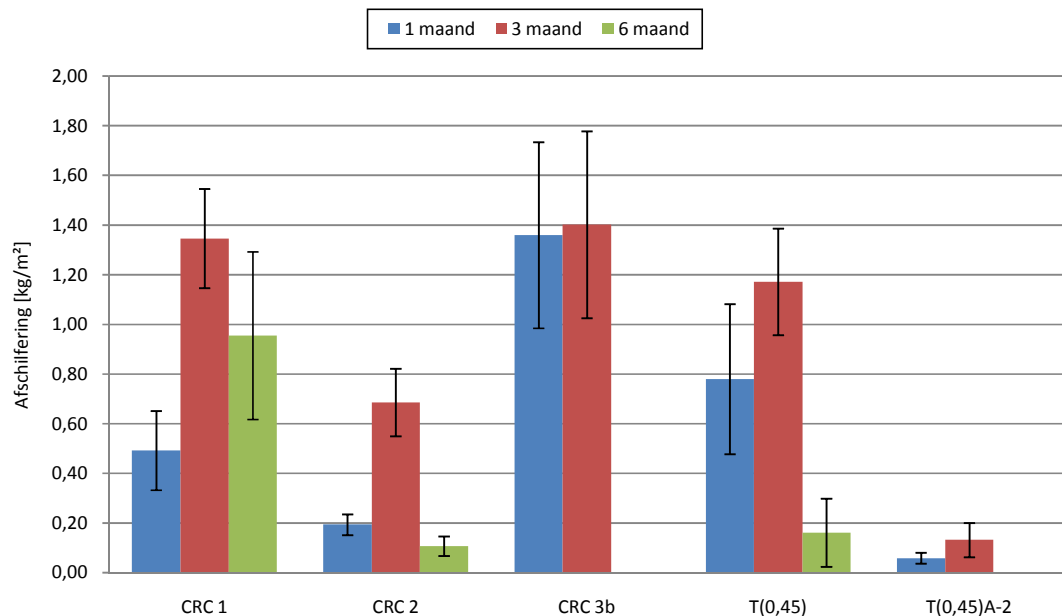
De weerstand van het recycleerbaar beton werd bepaald op 1, 3 en 6 maand ouderdom. Er werd een onderscheid gemaakt tussen het beproeven van het afstrijkvlak en het bekistingsvlak. Om het geheel overzichtelijk te houden, geeft Tabel 4-2 een overzicht van de uitgevoerde proeven op elk mengsel.

Tabel 4-2: Overzicht uitgevoerde proeven m.b.t. bestandheid tegen vorst en dooizouten
[A = afstrijkvlak, B = Bekistingsvlak, x = onderzocht, 0 = niet onderzocht]

	Leeftijd [dagen]	CRC 1	CRC 2	CRC 3b	T(0,45)	T(0,45)A-2
B	28	x	x	x	x	x
	91	x	x	x	x	x
	168	x	x	0	x	0
A	28	0	0	x	0	0
	91	x	x	x	0	0
	168	x	x	0	x	0

▪ Invloed van de betonleeftijd voor alle mengsels

De afschilfering van het bekistingsvlak van het beton onder invloed van vorst en dooizouten op verschillende leeftijden wordt grafisch geïllustreerd aan de hand van Figuur 4-8.

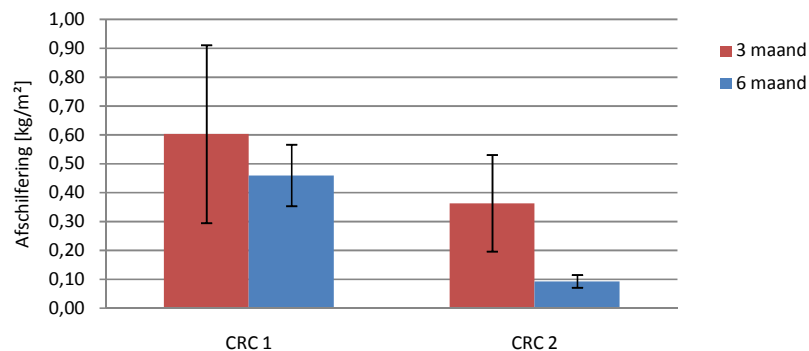


Figuur 4-8: Afschilfering van het betonoppervlak in functie van de ouderdom van het mengsel

De gemiddelde afschilfering is voor alle mengsels het hoogst op een betonleeftijd van 3 maand. Bij CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35] is het verschil in afschilfering significant tussen 1 en 3 maand en tussen 1 en 6 maand onderling. De verschillen op 3 en 6 maand zijn niet significant t.o.v. elkaar. Voor CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35] en T(0,45) zijn de verschillen op elke individuele leeftijd significant t.o.v. elkaar. Voor CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] en T(0,45)A-2 is het verschil op 1 en 3 maand ouderdom niet significant.

Het bekistingsvlak van CRC 2 presteert op alle leeftijden significant beter dan CRC 1, CRC 3b en op 1 maand en 3 maand ouderdom zijn de resultaten bij CRC 2 ook significant beter dan bij referentie T(0,45). Het verschil op 6 maand is niet significant. De referentiemengeling met luchtbelvormer, T(0,45)A-2, presteert op elke leeftijd significant beter dan alle mengsels. De norm van maximaal 1kg afschilfering per m² betonoppervlak wordt niet gehaald voor CRC 1 en T(0,45) op 3 maand ouderdom en voor CRC 3b op elke beproefde leeftijd.

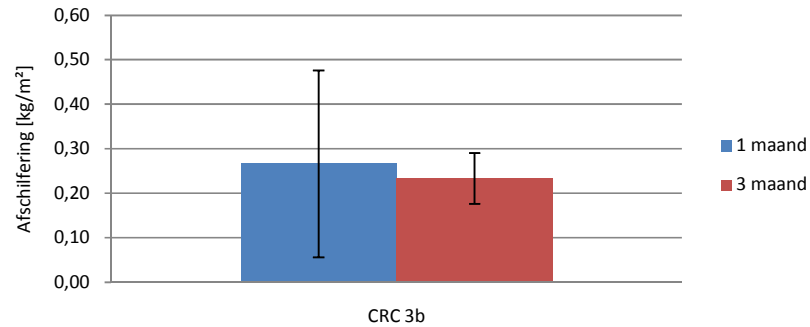
Dezelfde analyse werd gemaakt voor de mengsels, waarbij het afstrijkvlak werd beproefd en de resultaten daarvan op 3 en 6 maand ouderdom worden weergegeven in Figuur 4-9.



Figuur 4-9: Afschilfering afstrijkvlak na 28 vorst-dooicycli op 3 en 6 maand ouderdom

Dezelfde conclusies die gemaakt werden voor het bekistingsvlak kunnen hier worden doorgetrokken. De afschilfering op 6 maand ligt steeds lager dan de afschilfering op 3 maand ouderdom. Voor CRC 2 is het verschil ook significant. Voor alle mengsels blijft de afschilfering onder de norm van 1kg afschilfering per vierkante meter betonoppervlak.

In Figuur 4-10 wordt een grafische voorstelling van de afschilfering van CRC 3b op 1 en 3 maand ouderdom weergegeven. De afschilfering op 3 maand ouderdom ligt iets lager dan deze op 1 maand ouderdom, maar het verschil is niet significant. De norm van maximaal 1kg afschilfering per vierkante meter betonoppervlak wordt makkelijk gehaald.

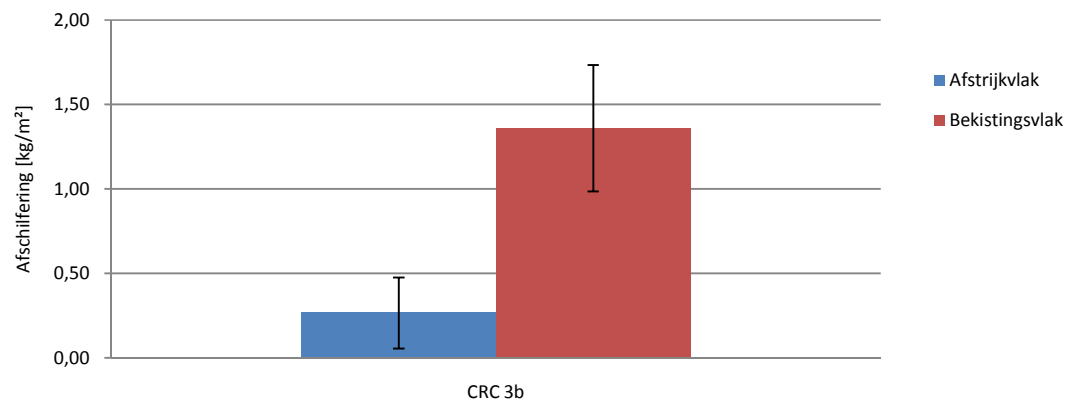


Figuur 4-10: Afschilfering afstrijkvak na 28 vorst-dooicycli op 1 en 3 maand ouderdom

Er heerst een duidelijke invloed van de betonleeftijd op de mate waarin het beton weerstand kan bieden aan de aantasting door vorst en dooizouten. Algemeen lijkt de tendens te bestaan dat de betonmengsels een vrij goede weerstand bieden tegen de aantasting door vorst en dooizouten op 1 maand ouderdom, maar op 3 maand ouderdom een groot deel van dit weerstandbiedend vermogen hebben verloren. Wanneer het beton wordt beproefd op 6 maand ouderdom lijkt het opnieuw beter te weerstaan aan de afschilfering door vorst en dooizouten. Eenduidige conclusies trekken is hierbij echter niet eenvoudig, gezien de grote spreiding op de individuele resultaten.

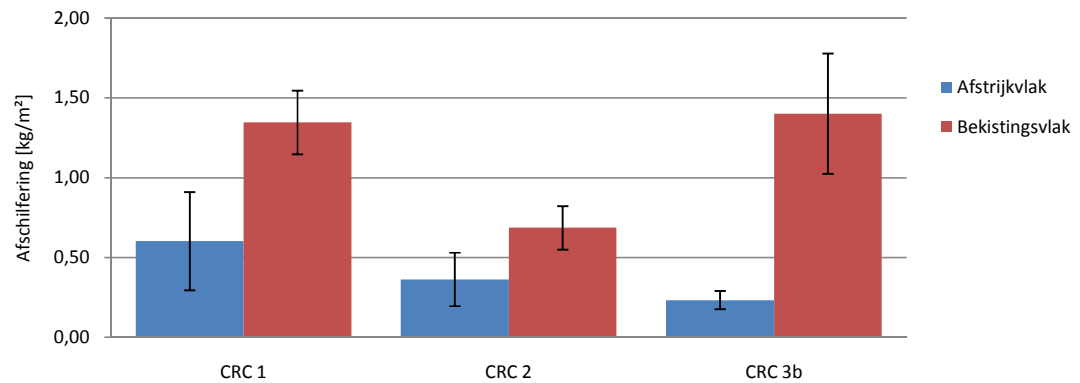
▪ *Invloed bekistingsvlak-afstrijkvak*

Om na te gaan of er een verschil bestaat tussen de afschilfering van het afstrijkvak van een mengsel en het bekistingsvlak ervan, worden beide uitgezet in Figuur 4-11 voor CRC 3b op 1 maand ouderdom. De afschilfering van het bekistingsvlak ligt gevoelig hoger dan deze van het afstrijkvak.



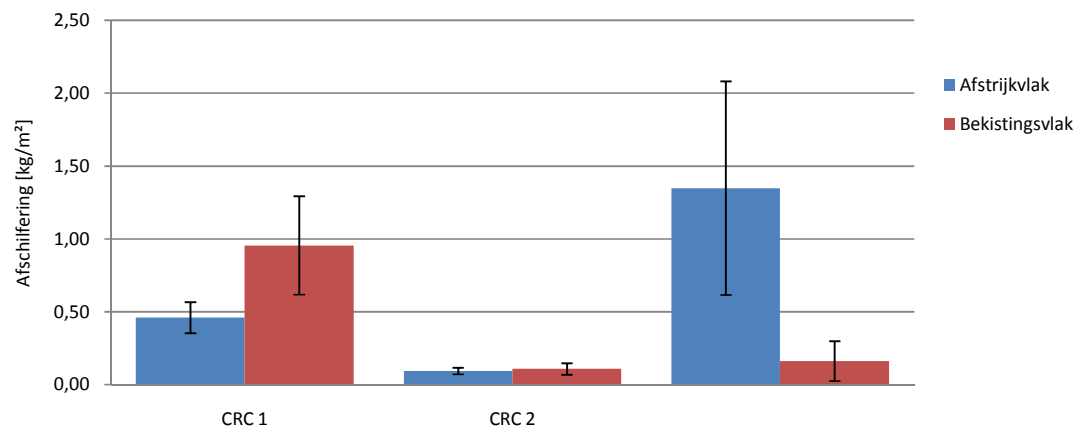
Figuur 4-11: Vergelijking afschilfering bekistingsvlak - afstrijkvak op 1 maand ouderdom

In Figuur 4-12 wordt dezelfde analyse uitgevoerd voor CRC 1, CRC 2 en CRC 3b op 3 maand ouderdom. Opnieuw wordt overal een hogere afschilfering waargenomen voor het bekistingsvlak dan voor het afstrijkvak. Voor CRC 1 en CRC 3b is dit verschil ook significant.



Figuur 4-12: Vergelijking afschilfering bekistingsvlak - afstrijkvlak op 3 maand ouderdom

Figuur 4-13 toont de afschilfering van afstrijkvlak en bekistingsvlak na 28 vorst-dooicycli op 6 maand ouderdom voor CRC 1, CRC 2 en T(0,45). Voor de recycleerbare mengsels wordt opnieuw een hogere afschilfering bekomen voor het afstrijkvlak dan voor het bekistingsvlak. Referentiemengeling T(0,45) toont dan weer het tegenovergestelde effect: Hier ligt de afschilfering hoger bij het bekistingsvlak. De verschillen zijn echter voor geen van alle waarnemingen op 6 maand ouderdom significant.

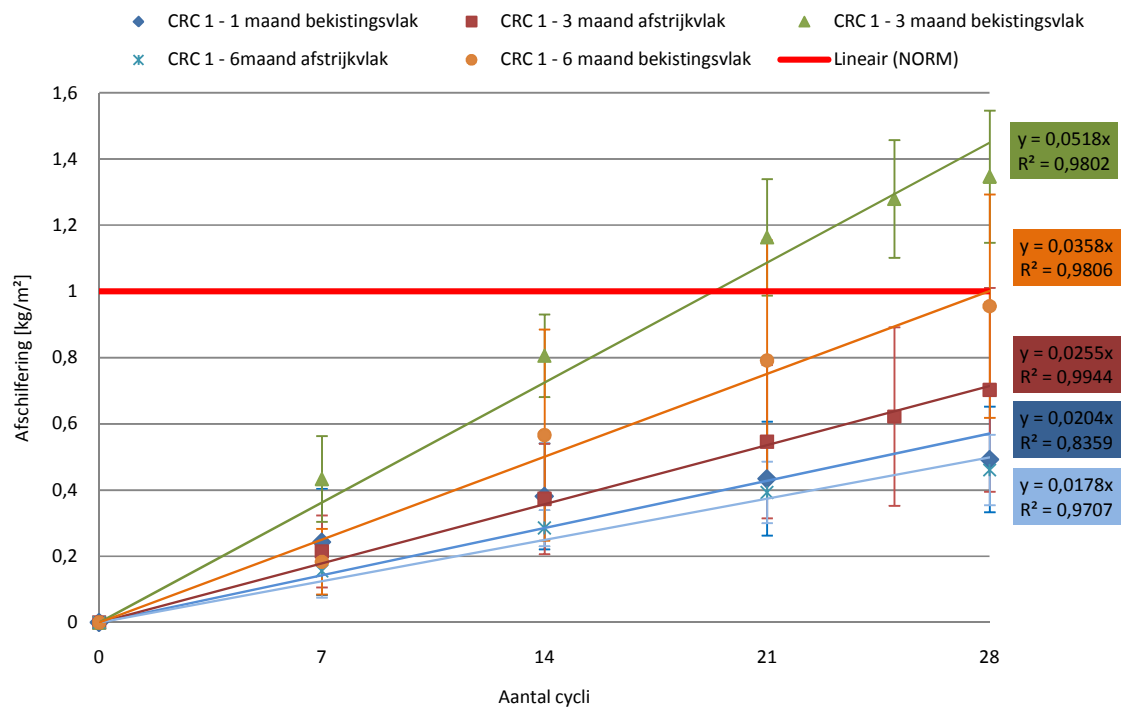


Figuur 4-13: Vergelijking afschilfering bekistingsvlak - afstrijkvlak op 6 maand ouderdom

Opmerkelijk bij al de proeven op aantasting door de combinatie van vorst en dooizouten is de grote spreiding op de resultaten. Hierdoor zijn de verschillen tussen afstrijkvlak en bekistingsvlak vaak niet significant, hoewel de gemiddelden vrij ver uiteen kunnen liggen. Voor alle recycleerbare mengsels vertoont het bekistingsvlak een minder goede weerstand tegen afschilfering dan het afstrijkvlak. Referentiemengeling T(0,45) gaat tegen deze tendens in: Voor deze mengeling wordt op zes maand ouderdom een kleinere afschilfering waargenomen bij het bekistingsvlak.

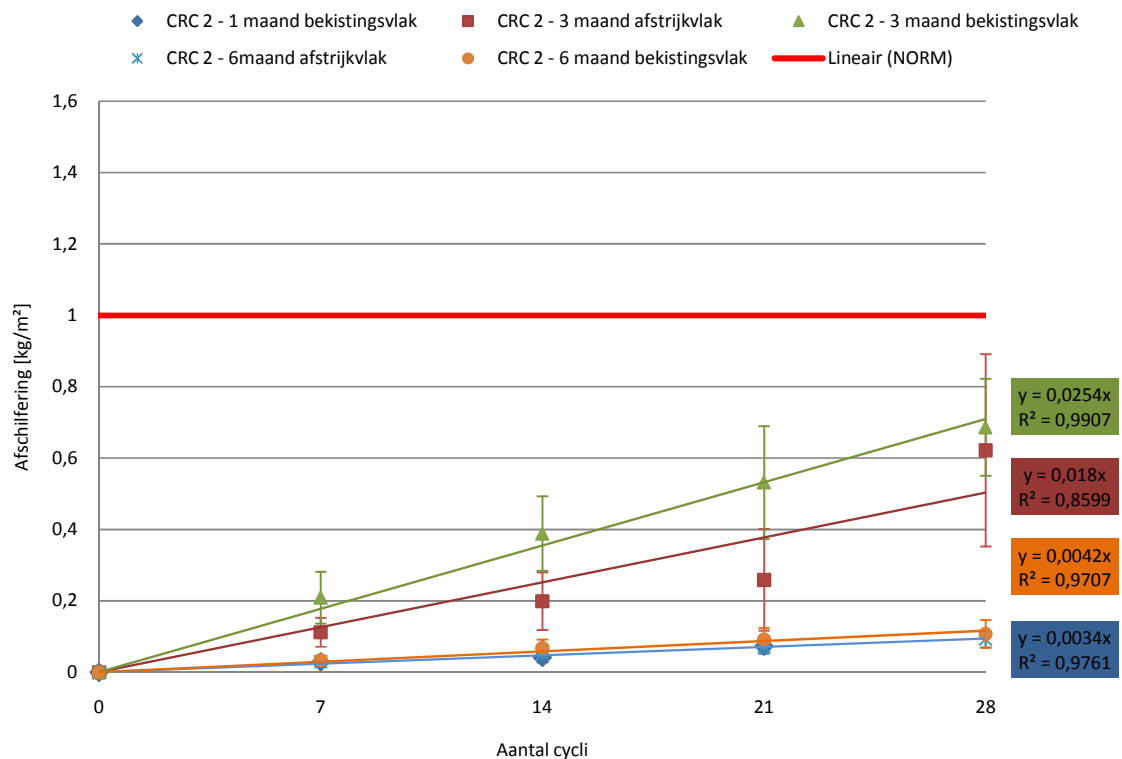
▪ *Evolutie in functie van de ouderdom per mengsel*

Figuur 4-14 toont de afgeschilferde massa van CRC 1 in functie van de ouderdom van het mengsel. Een lineair verband is hierbij duidelijk waar te nemen, enkel voor het bekistingsvlak op 1 maand ouderdom wordt een minder goede correlatiecoëfficiënt bekomen ($R^2=0,8359$). Er wordt hierbij opgemerkt dat de proefstukken op 3 maand ouderdom (zowel bekistingsvlak als afstrijkvlak) aan een strengere vriescyclus werden blootgesteld. Deze vriesperiode duurde 4 dagen waarbij het onafgebroken vroom en de temperatuur van de proefstukken daalde tot minimaal -37°C . Voor de proefstukken betrof dit de 25^e cyclus en de afschilfering werd na deze strengere vriesperiode afzonderlijk opgemeten, zoals te zien in Figuur 4-14. De langere vriesperiode en de lagere minimumtemperatuur hebben duidelijk geen enkele invloed op de massa afgeschilferd materiaal. Deze vaststelling gaat in tegen de bevindingen van Valenza & Sherer (2007-2), die stelden dat een lagere minimumtemperatuur en een langere tijd op deze minimumtemperatuur leiden tot meer schade. De dikke rode lijn in de grafiek toont de grens waarboven de massa aan afgeschilferd materiaal conform NBN EN 1338 (2003) niet mag komen te liggen. Op het ogenblik dat de trendlijn voor een zeker mengsel deze rode lijn snijdt, dient het beton herstellingswerken te ondergaan of in het voorkomend geval vervangen te worden. Voor CRC 1 wordt deze norm vòòr het bereiken van 28 cycli enkel overschreden wanneer het bekistingsvlak wordt beproefd op 3 maand ouderdom.



Figuur 4-14: Evolutie van de afgeschilferde massa in functie van de ouderdom van het proefstuk en het aantal cycli waaraan het proefstuk wordt onderworpen [CRC 1 = LS98-FA2-C(I)65-FA35]

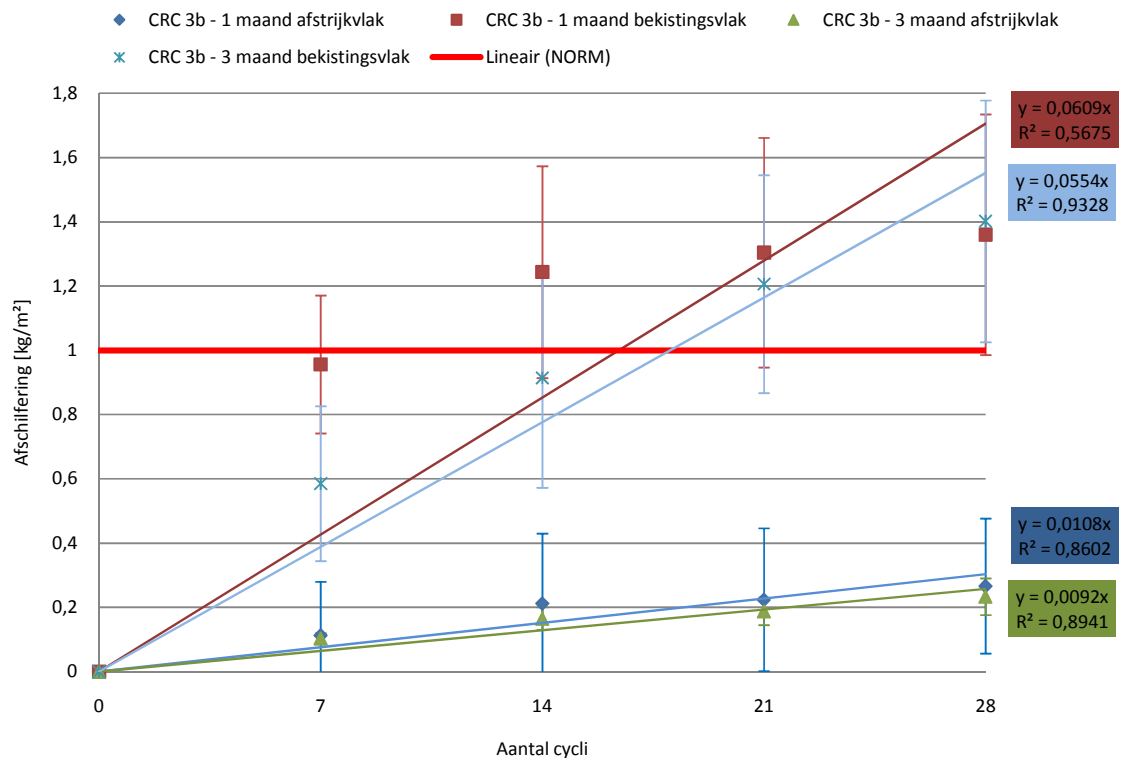
Voor CRC 2 wordt op identieke wijze de hoeveelheid afgeschilferd materiaal uitgezet in functie van het aantal vorst-dooicycli en de ouderdom van het proefstuk op het ogenblik van het onderzoek. Het resultaat hiervan wordt getoond in Figuur 4-15. Opnieuw werden de proefstukken zowel met bekistingsvlak als met afstrijkvlak aan dezelfde, strengere vorstcyclus onderworpen als het geval was voor CRC 1. Bij dit mengsel deed de strengere cyclus zich echter voor ter hoogte van de 10^e cycli. De afgeschilferde massa werd na deze cyclus niet individueel opgemeten, maar de metingen na 14 cycli tonen duidelijk aan dat de strengere cyclus geen grotere massa afgeschilferd materiaal met zich mee brengt. Verder kan geconstateerd worden dat op elke leeftijd de afschilfering na 28 vorst-dooicycli de in NBN EN 1338 (2003) vastgelegde grens niet overschrijdt. Het lineaire karakter van de massa afgeschilferd materiaal in functie van het aantal cycli waaraan het beton wordt onderworpen is opnieuw zeer duidelijk. De laagst waargenomen correlatiecoëfficiënt wordt bekomen voor het afstrijkvlak op 3 maand ouderdom en bedraagt 0,8599.



Figuur 4-15: Evolutie van de afgeschilferde massa in functie van de ouderdom van het proefstuk en het aantal cycli waaraan het proefstuk wordt onderworpen [CRC 2 = LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]

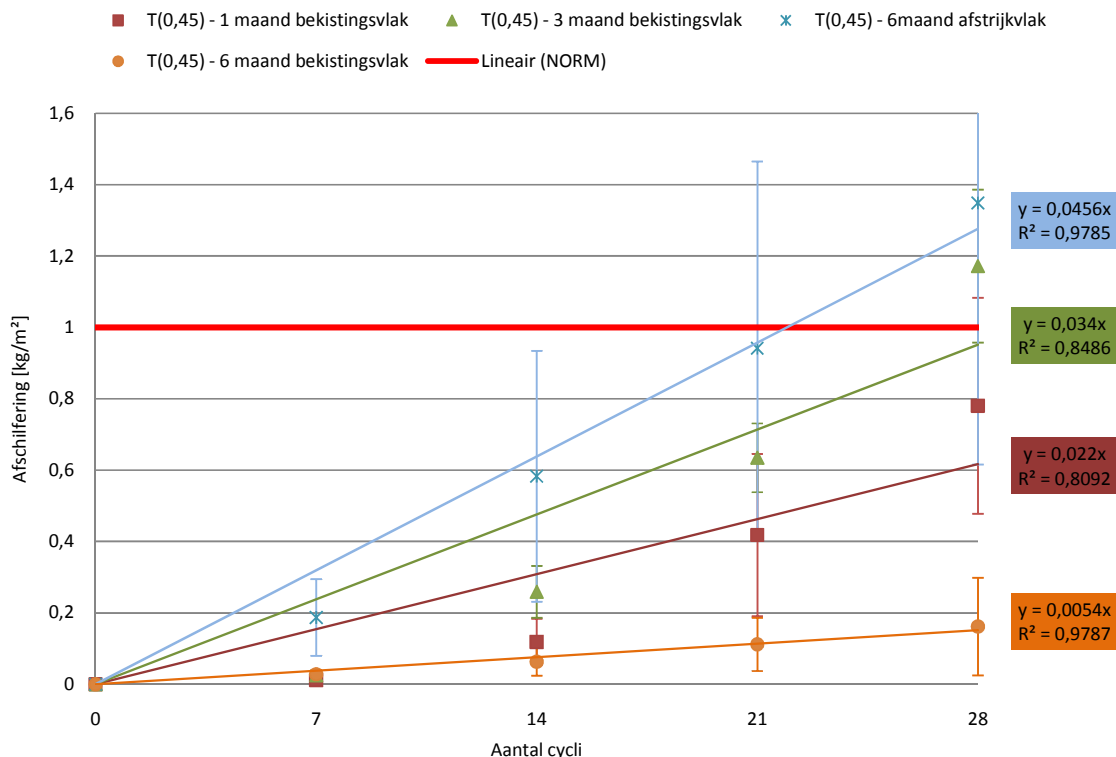
De procedure wordt herhaald voor CRC 3b op 1 en 3 maand ouderdom. Figuur 4-16 toont dat de invloed van de ouderdom van het mengsel bij het beproeven, voor dit beton veel minder van belang is. Wanneer het bekistingsvlak wordt beproefd, haalt dit zowel op 1 als 3 maand ouderdom

de norm na 28 cycli niet. Het afstrijkvlak haalt daarentegen deze norm na 28 cycli vrij makkelijk. De correlatiecoëfficiënt voor het bekistingsvlak op 1 maand ouderdom ligt vrij laag (0,5675). Op deze ouderdom bezit dit mengsel namelijk reeds na 7 en 14 vorst-dooicycli een zeer hoge afschilfering, maar daarna lijkt het mengsel een soort bovengrens bereikt te hebben en neemt de hoeveelheid afgeschilferd materiaal nauwelijks nog toe. De massa aan afgeschilferd materiaal heeft op dat ogenblik al een hogere waarde dan de vooropgestelde kilogram per vierkante meter betonoppervlak overschreden, zodat deze bovengrens enkel een theoretisch belang heeft.



Figuur 4-16: Evolutie van de afgeschilferde massa in functie van de ouderdom van het proefstuk en het aantal cycli waaraan het proefstuk wordt onderworpen [CRC 3b = LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]

Tot slot wordt dezelfde vergelijking gemaakt voor referentiemengsel T(0,45). De afschilfering wordt geïllustreerd in Figuur 4-17, waarbij het afstrijkvlak op 6 maand ouderdom de vooropgestelde norm niet haalt. De individuele meting van het bekistingsvlak op 3 maand ouderdom bereikt na 28 cycli eveneens een hogere waarde dan 1kg/m², maar de trendlijn ligt nog net onder de norm. Op 1 en op 6 maand ouderdom wordt de norm wel gehandhaafd. De massa afgeschilferd materiaal vertoont opnieuw een quasi lineair verband met het aantal opgelegde vorst-dooicycli, de minimale correlatiecoëfficiënt bedraagt hier 0,8092. Wel wordt opgemerkt dat, ondanks dit vrij sterke lineaire verband, de spreiding op de individuele waarden vrij hoog ligt.



Figuur 4-17: Evolutie van de afgeschilferde massa in functie van de ouderdom van het proefstuk en het aantal cycli waaraan het proefstuk wordt onderworpen

▪ Afgeschilferd materiaal

Het afgeschilferd materiaal van de recycleerbare mengsels vertoonde een volledig ander uitzicht dan dat van het referentiemengsel. Waar de afschilfering bij de recycleerbare mengsels vooral bestond uit grotere, platte schilfers, werd voor het referentiemengsel in hoofdzaak een kleinere, korrelige fractie van het betonoppervlak losgewerkt. Figuur 4-18 en Figuur 4-19 (zelfde schaal) kunnen wellicht het een en ander verduidelijken. Het verschil in de vorm waarmee het materiaal afschilfert, is waarschijnlijk te wijten aan de verschillende zandsoorten en granulaten die worden gebruikt. Voor het referentiemengsel T(0,45) werd gebruikt gemaakt van rivierzand, dat een meer korrelige structuur vertoont dan het hoekige kalksteenzand, dat werd toegepast bij het vervaardigen van de recycleerbare mengsels. Gezien de breuklijnen bij afschilfering normaliter rond de korrels verlopen, weerspiegelt dit patroon zich vermoedelijk in de vorm van de afgeschilferde massa.

In bepaalde gevallen snijden de breukvlakken bij recycleerbare mengsels echter ook de granulaten, wat bij het referentiemengsel nooit het geval is. Dit zou een bijkomende verklaring voor het verschil in uitzicht van de afschilfering kunnen bieden. Bij het referentiemengsel dienen de breukvlakken immers rond de granulaten heen te lopen, terwijl de kracht die ontwikkeld wordt bij

het vorst-dooi-mechanisme blijktbaar wel groot genoeg is om de kalksteengranulaten te breken. De gelaagde opbouw van dergelijke granulaten speelt hierbij een grote rol: Wanneer deze lagen evenwijdig liggen aan het beproefde afstrijk- of bekistingsvlak, zal een breuk zich makkelijker manifesteren tussen de lagen van een dergelijk granulaat.



Figuur 4-18: Afgeschilderd materiaal bij referentiemengeling T(0,45)



Figuur 4-19: Afgeschilderd materiaal bij recycleerbaar mengsel

▪ *Besluit*

Zowel wat betreft de weerstand tegen afschilfering in functie van de ouderdom van de mengsels, als wat betreft het onderscheid tussen afstrijkvlak en bekistingsvlak, is het niet eenvoudig een duidelijke trend vast te stellen. Met uitzondering van het referentiemengsel T(0,45) ligt de massa afgeschilderd materiaal lager voor het afstrijkvlak dan voor het bekistingsvlak. Gezien voor de meest voorkomende praktische toepassing waar beton in aanraking komt met vorst en dooizouten, met name bij het gebruik als wegenbeton, het afstrijkvlak beproefd zal worden, is dit een positieve tendens. Bovendien worden betonwegen volgens De Winne (2008) tegenwoordig na storting zorgvuldig afgedekt met een plastic film, zodat een goede nabehandeling hiermee verzekerd wordt. Voor quasi alle onderzochte proefstukken is de weerstand tegen vorst en dooizouten echter het kleinst op een leeftijd van 3 maand. Afhankelijk van soort tot soort vertonen de proeven op 1, dan wel op 6 maand ouderdom de beste resultaten. Gezien de ouderdom van het mengsel een dergelijk grote invloed uitoefent op de weerstand tegen vorst en dooizouten, zouden overheden rekening moeten houden met dit verschijnsel en dient de aanleg van betonwegen in het najaar worden vermeden, zodat nieuwe betonwegen tijdens de winterperiode, wanneer de kans op schadelijke vorstcycli het grootst is, niet de meest kritische leeftijd (volgens dit onderzoek 3 maand) bezitten. Er wordt hierbij impliciet ondersteld dat de fysische eigenschappen van het beton niet drastisch meer veranderen na 6 maand, wat een te verantwoorden aanname is.

4.6. Indringing van chloriden

4.6.1. Cyclische onderdompeling

- *TAP-wielen*

Bij de opstelling met TAP-wielen wordt een realistische situatie gesimuleerd en zodoende kunnen chloriden het beton zowel binnendringen door capillaire absorptie als door diffusie. Gezien een cyclus 1 uur duurt en de proefstukken zich gedurende een derde van deze periode onder water bevinding, kan de capillaire opslorping gedurende twintig minuten plaats vinden. Volgens Audenaert (2006) kan deze absorptie beschreven worden door:

$$x_{cap} = S \cdot \sqrt{t} \quad (4.1)$$

Hierbij stelt x_{cap} [mm] de indringingsdiepte van de chloriden voor onder invloed van de capillaire opslorping, t [weken] de looptijd van de proef en S de capillaire opslorplingscoëfficiënt [mm/tijd^{1/2}]. De diffusie van chloriden kan beschreven worden aan de hand van de tweede wet van Fick (zie ook Audenaert (2006)) waardoor ook de chloride-indringing door diffusie functie is van tijd^{1/2}:

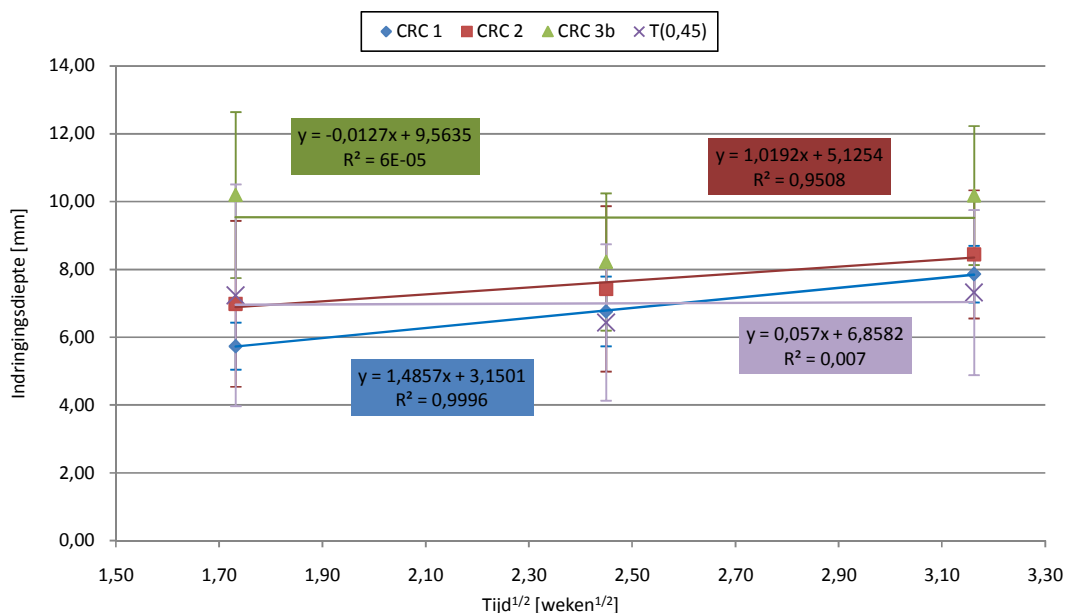
$$x_{dif} = A \cdot \sqrt{t} \quad (4.2)$$

Hierbij stelt x_{dif} [mm] de indringingsdiepte van chloriden voor ten gevolge van diffusie en A [mm/tijd^{1/2}] de diffusiecoëfficiënt. Formule (4.1) en formule (4.2) kunnen dan samen worden geschreven als:

$$x_{tot} = H \cdot \sqrt{t} \quad (4.3)$$

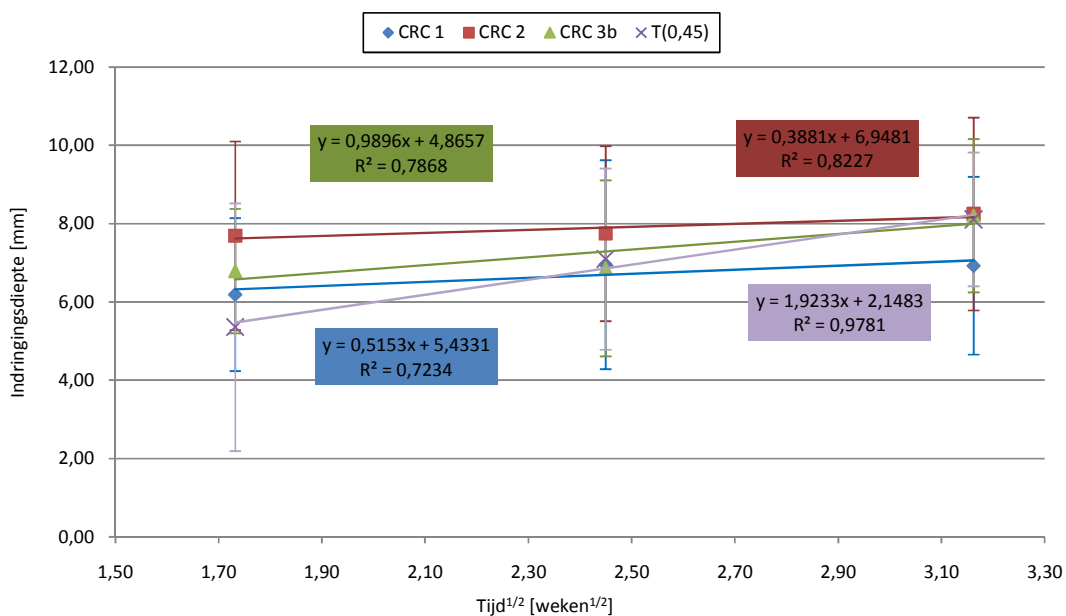
De totale indringingsdiepte wordt hierbij voorgesteld door x_{tot} [mm] en H stelt chloride-indringingscoëfficiënt onder cyclische blootstelling voor [mm/tijd^{1/2}].

Indien volgens de hierboven beschreven theorie de totale indringing als een recht evenredige functie van de blootstellingstijd^{1/2} wordt uitgezet, wordt een zeer zwak verband bekomen. De hierboven beschreven wetten zijn duidelijk niet meer geldig in een cyclisch regime. Figuur 4-20 toont dit aan voor de geregistreerde chloride-indringing voor beton dat werd beproefd op 28 dagen ouderdom. Een licht stijgend of zelfs licht dalende rechte wordt bekomen indien een lineair verband tussen de opgemeten indringing wordt gezocht. De correlatiecoëfficiënten voor deze lijnen lopen eveneens zeer uiteen van zeer hoog (CRC 1: 0,9996) tot zeer laag (CRC 3b: 6.10⁻⁵).



Figuur 4-20: Chloride-indringing TAP-wielen op 28 dagen ouderdom

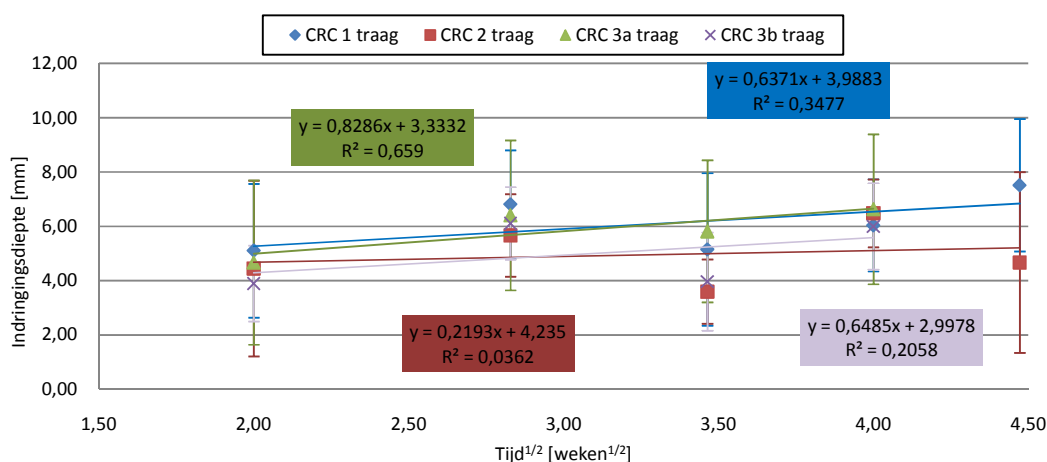
Voor de chloride-indringing op 3 maand ouderdom (Figuur 4-21) kunnen quasi identieke conclusies worden getrokken. Het lineair verband is hier voor alle mengsels licht stijgend. Wanneer de resultaten van dichterbij worden bekeken, wordt duidelijk dat het zinloos is om significante verschillen tussen de resultaten te zoeken. De indringing van de chloriden in de mengsels vertoont immers, zowel onderling ten opzichte van een ander mengsel, als ten opzichte van de resultaten van hetzelfde mengsel op 1 maand ouderdom, nooit een eenduidig verband.



Figuur 4-21: Chloride-indringing TAP-wielen op 91 dagen ouderdom

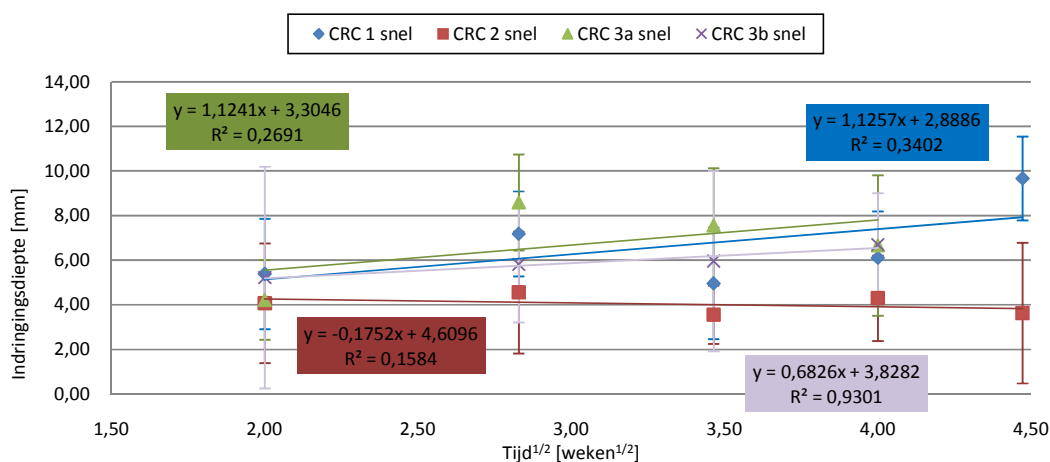
▪ Getijdenwerking op kubussen

Principieel onderscheidt deze opstelling weinig van de hierboven besproken opstelling met TAP-wielen. Beide methodes gaan uit van getijdenwerking waarbij de indringing bijgevolg berust op zowel diffusie als capillaire opzuiging. De hierboven besproken theorie is dus eveneens van toepassing voor deze opstelling. Figuur 4-22 toont de resultaten voor het beton op 1 maand ouderdom dat onderworpen wordt aan cyclische chloride-indringing waarbij elke cyclus 12 uur duurt. Meteen wordt duidelijk dat ook hier een recht evenredig verband met $\text{tijd}^{1/2}$ een zeer slechte correlatie zou opleveren. De mengsels vertonen wederom een indringing waarop een vrij grote spreiding zit, maar die op elke leeftijd schommelt rond een zeker gemiddelde.



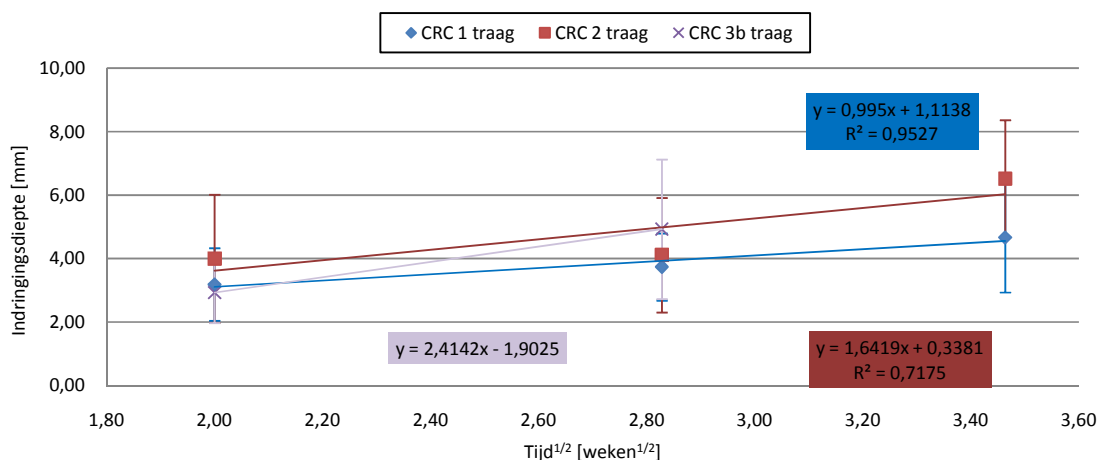
Figuur 4-22: Chloride-indringing in beton op 1 maand ouderdom bij nat-droog-cycli van twaalf uur

Dezelfde grafische voorstelling kan gemaakt worden voor de indringing wanneer de cycli slechts één uur duren, Figuur 4-23 toont het resultaat.

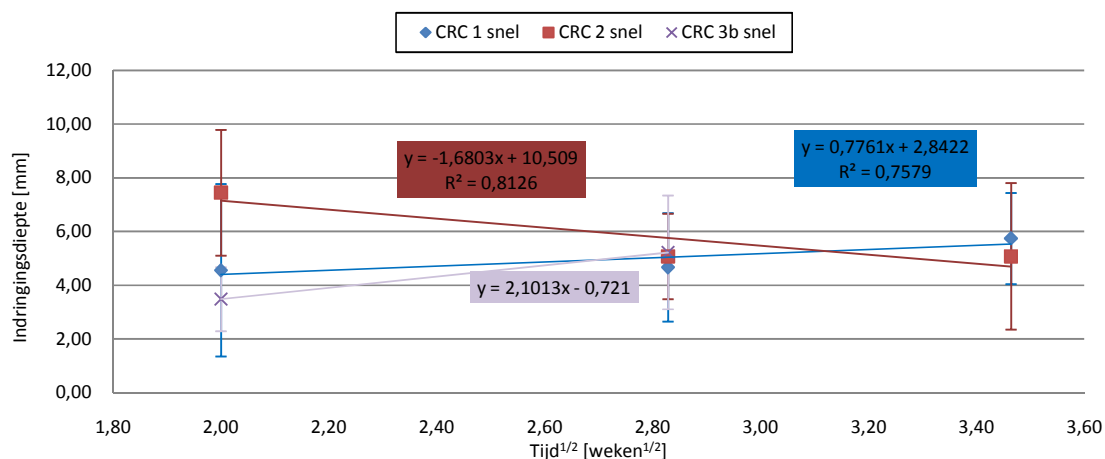


Figuur 4-23: Chloride-indringing in beton op 1 maand ouderdom bij nat-droog-cycli van één uur

De - over het algemeen - lage correlatiecoëfficiënten en de lage richtingscoëfficiënt van de rechten in combinatie met de grote spreiding op de individuele waarden, toont aan dat voor cyclische onderdompeling, ongeacht de duur van de cyclus, de indringing niet recht evenredig met de tijd of de tijd^{1/2} zal evolueren. Ter illustratie wordt eveneens de indringing nog getoond voor zowel de trage (12 uur) als de snelle (één uur) cyclus op 3 maand ouderdom: Figuur 4-24 en Figuur 4-25.



Figuur 4-24: Chloride-indringing in beton op 3 maand ouderdom bij nat-droog-cycli van twaalf uur



Figuur 4-25: Chloride-indringing in beton op 3 maand ouderdom bij nat-droog-cycli van één uur

De resultaten op 3 maand ouderdom leveren geen nieuwe conclusies op. Noch tussen de mengsels onderling ten opzichte van elkaar, noch tussen dezelfde mengsels op verschillende leeftijden, noch tussen dezelfde mengsels bij een verschillende duurtijd van de proef, kan een eenduidig verband worden ontdekt. De indringing blijft voor de onderzocht mengelingen wel ten allen tijde beperkt tot maximaal een tiental millimeter.

▪ *Besluit*

Cyclische onderdompeling van proefstukken in een chloorhoudende oplossing kan niet theoretisch benaderd worden door een sommatie te maken van de indringing door capillaire opslorping en de indringing door diffusie. De capillaire opslorplingswet (in Audenaert (2006) afgeleid van de wet van Darcy) en de diffusiewet (tweede wet van Fick) houden namelijk geen rekening met de droogperiode die steeds aanwezig is bij cyclische onderdompeling. De wet zou waarschijnlijk wel gelden indien de proefstukken permanent zouden worden ondergedompeld. Door de opeenvolging van vochtige en droge periodes echter, ontstaat er een soort algemeen gemiddelde waarrond de indringingsdiepte van chloriden fluctueert.

De verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat de vrije chloriden gedurende de droge periodes, wanneer het water uit de poriën wegtrekt, uit het beton migreren. Op deze manier dienen de chloriden telkens opnieuw dezelfde afstand te overbruggen waardoor de chloride-indringing na verloop van tijd, niet meer zal toenemen.

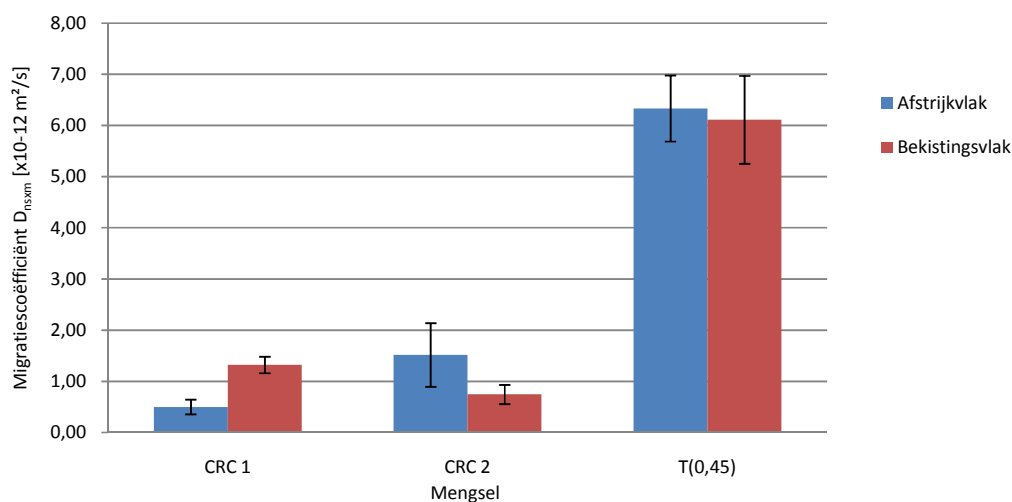
Afgaande op deze theorie zou verwacht kunnen worden dat de indringing groter zal zijn bij tragere cycli (chloriden krijgen meer tijd om dieper binnen te dringen) dan bij snellere cycli. Waarschijnlijk duren de hier gehanteerde cycli echter niet lang genoeg om een merkbaar verschil teweeg te brengen. Door de korte duur van de cycli (maximaal twaalf uur) zullen de poriën nooit volledig uitdrogen. Na enige tijd zal bijgevolg voor de verschillende cycli zich dezelfde bovengrens instellen. Verwacht wordt dat de gemiddelde indringing wel hoger zou zijn indien de cycli veel langer zouden duren (dagen). Ook hier zou zich echter volgens deze theorie na verloop van tijd een gemiddelde indringingsdiepte moeten instellen, waarrond de indringing op elk ogenblik blijft schommelen.

Gezien de indringing voor alle proefstukken beperkt blijft tot maximaal een tiental millimeter en de betondekking tegenwoordig meestal niet minder dan 25mm bedraagt, is voor cyclische onderdompeling het gevaar op corrosie door chloriden waarschijnlijk dan ook beperkt. Conform Eurocode 2 (2002), zal bij mariene constructies, waar het gevaar voor chloride-indringing vaak het grootst is, de betondekking nog een stuk hoger liggen. Zo dienen betonconstructies met een ontwerplevensduur van 50 jaar die onderworpen worden aan milieuklasse XS3 (beton, blootgesteld aan getijde-, spat- en nevelzone van zeewater), een minimale betondekking van 45mm bezitten. Diezelfde minimale dekking van 45mm geldt overigens ook voor betonconstructies die zich in een wisselend natte en droge omgeving bevinden en aan chloriden, uit andere bronnen dan zeewater, worden blootgesteld (milieuklasse XC4). Wanneer een ontwerplevensduur van 100 jaar wordt vooropgesteld, bedraagt de minimale betondekking in deze omgevingen zelfs 55mm.

Een rechtstreeks gevolg van dit mechanisme is dat het grootste gevaar voor corrosie door chloride-indringing ontstaat bij betonconstructies die met een zekere chloridehoudende oplossing verzadigd zijn en die sporadisch aan een droge periode worden blootgesteld. Wanneer tijdens deze droge periode het beton uitdroogt tot aan de wapeningsdiepte, zal zuurstof in combinatie met het aanwezige water de corrosie van de wapening veroorzaken. Concreet kan deze situatie zich voordoen bij mariene betonconstructies die zich permanent onder water bevinden en slechts door een uitzonderlijke (accidentele) laagwaterstand boven water bevinden. De duurtijd van deze droge periode en de snelheid waarmee het water uit de poriën verdampt, zal dan bepalen of het “droogfront” de wapening zal bereiken en corrosie zal veroorzaken.

4.6.2. CTH-proeven

De tijdsafhankelijke migratiecoëfficiënt D_{nsm} wordt voor CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35], CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35] en referentiemengsel T(0,45) weergegeven in Figuur 4-26. Deze migratiecoëfficiënt werd bepaald aan de hand van een niet-stationaire toestand met een elektrisch veld als drijvende kracht. Er bestaat tijdens deze proef dus zowel een chemisch als een elektrisch potentiaal. De diffusiecomponent kan volgens Audenaert (2006) verwaarloosd worden ten opzichte van de migratiecomponent.



Figuur 4-26: Tijdsafhankelijke migratiecoëfficiënt D_{nsm} op 6 maand ouderdom

Uit de tijdsafhankelijke migratiecoëfficiënt D_{nsm} kan de diffusiecoëfficiënt worden berekend. De theoretische afleiding hiervoor wordt in Audenaert (2006) uitgebreid toegelicht en berust op de bevindingen van Tang (1996).

De intrinsieke diffusiecoëfficiënt D_0 [m^2/s], de diffusiecoëfficiënt waarbij de binding van chloriden niet wordt meegerekend, te verantwoorden gezien de korte duur van de proef, wordt dan:

$$D_0 = D_{nsm} \cdot \left(1 + K_b \cdot \frac{W_{gel}}{\varphi_{cap}} \right) \quad (4.4)$$

Hierbij stelt D_{nsm} de niet-stationaire migratiecoëfficiënt [m^2/s] voor, K_b een bindingsparameter [$\text{m}^3/\text{kg}_{gel}$], φ_{cap} de capillaire porositeit [%] en W_{gel} de hoeveelheid gel [$\text{kg}_{gel}/\text{m}^3_{beton}$].

De bindingsparameter K_b werd in Audenaert (2006) bepaald voor een beperkt aantal samenstellingen:

- 100% portlandcement: $K_b = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}_{gel}$
- 30% hoogovenslakken en 70% portlandcement: $K_b = 0,29 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}_{gel}$
- 30% vliegas en 70% portlandcement: $K_b = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}_{gel}$

De bindingsparameter wordt niet gegeven in het geval van de combinatie van hoogovencement met vliegas. Daarom wordt in dit werk de waarde voor 30% vliegas en 70% portlandcement gehanteerd bij de recycleerbare mengsels.

Tang (1996) stelt voor W_{gel} volgende formule voor:

$$W_{gel} = 1,25 \cdot \alpha \cdot C \quad (4.5)$$

Met α de hydratatiegraad en C de hoeveelheid cementeerbaar materiaal in kg/m^3 . Op 6 maand ouderdom wordt voor alle mengsels benaderend de maximale (ultieme) hydratatiegraad aangenomen en wordt hiermee dus impliciet ondersteld dat de microstructuur reeds volledig tot ontwikkeling is gekomen. Volledige hydratatie van het cement treedt in de praktijk nooit op. Afhankelijk van de W/C-factor (W/CM) zal het hydratatieproces eindigen op verschillende ultieme hydratatiegraden [Taerwe (2004)]. Deze ultieme hydratatiegraad α_u [-] kan volgens Taerwe (2004) berekend worden aan de hand van formule (4.6).

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot W/C}{0,194 + W/C} \quad (4.6)$$

De factor W/C stelt hierbij de water/cement-factor voor. Bij deze berekening dient echter rekening te worden gehouden met het k-waarde concept, conform NBN EN 206-1 (2000). De W/C-factor moet dus vervangen worden door $W/(C+k.FA)$ (water/(cement+fractie vliegas)). Voor CEM I 52,5 N bedraagt deze k-waarde 0,4. Wanneer de gewichtsverhouding van de vliegas t.o.v. het cement meer bedraagt dan 33%, mag slechts een hoeveelheid vliegas in rekening worden gebracht ter grootte van $1/3^e$ van de massa aan cement. De waarde van $W/(C+k.FA)$ bedraagt dan 0,46 voor CRC 1. Voor CRC 2 met CEM III/A 42,5 N LA bedraagt de k-waarde 0,2 en mag slechts $1/4^e$ van de hoeveelheid vliegas in rekening worden gebracht, waarmee de $W/(C+k.FA)$ -factor op 0,49 komt te liggen.

Tabel 4-3 geeft de resultaten van de berekening voor CRC 1, CRC 2 en T (0,45).

Tabel 4-3: Berekening intrinsieke diffusiecoëfficiënt D_0

Mengsel	CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35]		CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]		T(0,45)	
K_b [m ³ /kg _{gel}]	0,00032		0,00032		0,00028	
C [kg/m ³]	450,00		450,00		340,00	
α_u	0,80		0,85		0,72	
W_{gel} [kg _{gel} /m ³ _{beton}]	449,11		478,40		306,18	
Vlak	Afstrijkvlak	Bekistingsvlak	Afstrijkvlak	Bekistingsvlak	Afstrijkvlak	Bekistingsvlak
φ_{cap}	7,82%	8,68%	8,66%	8,01%	6,83%	5,72%
D_{nsm} [x10 ⁻¹²]	0,50	1,32	1,52	0,74	6,33	6,11
D_0 [x10 ⁻¹²]	1,42	3,51	4,20	2,17	14,28	15,27

In de praktijk daalt de diffusiecoëfficiënt in de loop van de tijd. Om hiermee rekening te houden wordt de tweede wet van Fick vervangen door:

$$D(t) = D_1 \cdot t^{-m} \quad (4.7)$$

Hierbij stelt $D(t)$ [m²/s] de tijdsafhankelijke diffusiecoëfficiënt voor, D_1 de diffusiecoëfficiënt op 1 jaar ouderdom, t de tijd [jaar] en m een tijdscoëfficiënt die volgens Audenaert (2006) gemiddeld 0,27 bedraagt en volgens Seghers (2007) gelijk is aan:

$$m = 2,5 \cdot \frac{W}{C} - 0,6 \quad (4.8)$$

De W/C -factor wordt hier eveneens vervangen door de $W/(C+k \cdot FA)$. Op deze manier wordt voor CRC 1, CRC 2 en T(0,45) een tijdscoëfficiënt van respectievelijk 0,55, 0,63 en 0,53 bekomen. Tabel 4-4 toont de berekende diffusiecoëfficiënt voor de mengsels op 1 jaar ouderdom.

Tabel 4-4: Bepaling van de diffusiecoëfficiënt op 1 jaar ouderdom

Mengsel	CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35]		CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]		T(0,45)	
Vlak	Afstrijkvlak	Bekistingsvlak	Afstrijkvlak	Bekistingsvlak	Afstrijkvlak	Bekistingsvlak
D_0 [x10 ⁻¹²]	1,42	3,51	4,20	2,17	14,28	15,27
m [-]	0,55	0,55	0,63	0,63	0,53	0,53
D_1 [x10 ⁻¹²]	0,97	2,40	2,72	1,41	9,92	10,61

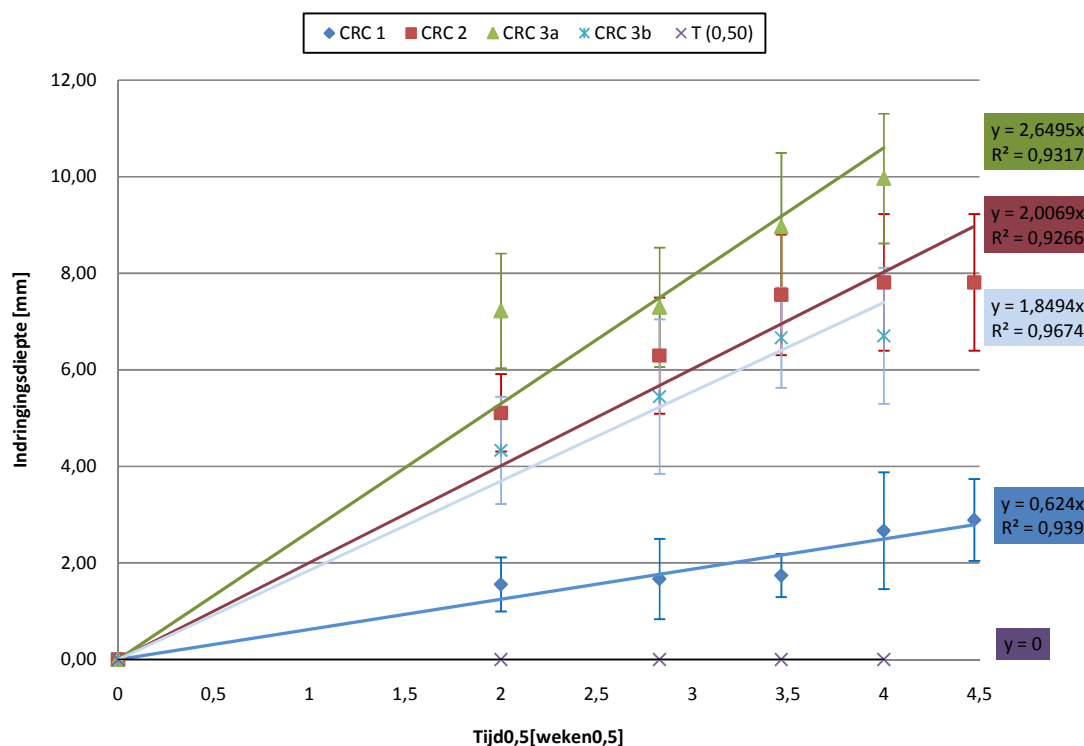
Bij de recycleerbare mengsels ligt deze diffusiecoëfficiënt een stuk lager dan bij het referentiemengsel. Voor CRC 1 bedraagt de diffusiecoëfficiënt voor het afstrijkvlak slechts 33% van deze van het bekistingsvlak. Voor CRC 2 ligt de diffusiecoëfficiënt dan weer lager bij het bekistingsvlak: Deze bedraagt 52% van de coëfficiënt bij het bekistingsvlak. Voor T(0,45) is het verschil tussen afstrijkvlak en bekistingsvlak veel kleiner (6%). Uitgaande van de diffusiecoëfficiënt op 1 jaar ouderdom kan via vergelijking (4.7) de diffusiecoëfficiënt op elke willekeurige betonleeftijd worden berekend.

4.7. Carbonatatie

De carbonatatie diepte, bepaald met fenolftaleïne als kleurindicator, werd om de vier weken opgemeten. De proefstukken werden gedurende deze periode afwisselend een week onder water bewaard en een week blootgesteld aan 10vol% CO₂. Door de gemiddelde indringingsdieptes uit te zetten in functie van de blootstellingstijd [weken] en de richtingscoëfficiënten van de best passende rechte te berekenen, wordt de carbonatatiecoëfficiënt bepaald, analoog aan de tweede wet van Fick:

$$x = k \cdot \sqrt{t} \quad (4.9)$$

In Figuur 4-27 worden deze resultaten weergegeven voor de betonmengsels op 28 dagen ouderdom.



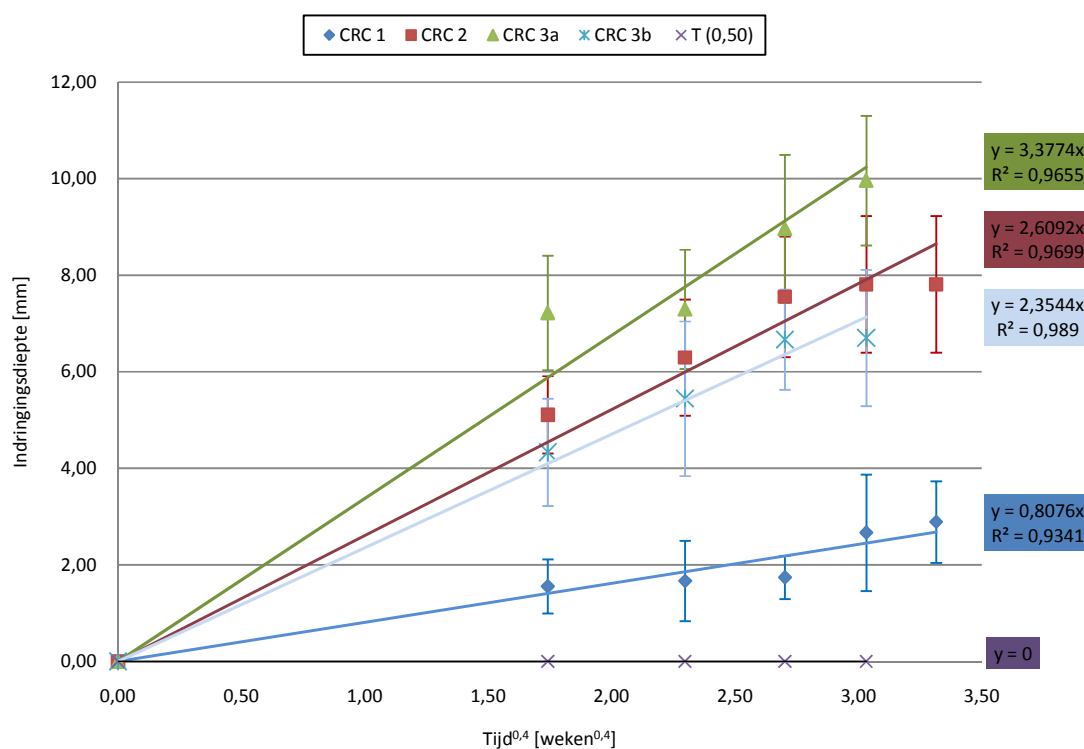
Figuur 4-27: Trendlijnen ter bepaling van de carbonatatiecoëfficiënt op 1 maand ouderdom ($x = k \cdot t^{0,5}$)
 CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35]; CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]; CRC 3a [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]; CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]

Mengsel CRC 3a vertoont hierbij de hoogste indringingscoëfficiënt. Deze is significant verschillend van de carbonatatiecoëfficiënt bij CRC 3b. CRC 1 vertoont dan weer een zeer lage indringing, maar geen enkel mengsel biedt een even hoge weerstand tegen carbonatatie als het referentiemengsel T(0,50), waarbij geen carbonatatie werd opgemeten.

De wet van Fick is echter ontwikkeld, uitgaande van steady-state randvoorwaarden. In de realiteit wordt de carbonatatiesnelheid beïnvloed door de carbonatatie zelf, die de poriënstructuur wijzigt en de poriën in het beton blokkeert. Hierdoor daalt de diffusiecoëfficiënt en bijgevolg ook de carbonatatiecoëfficiënt in functie van de tijd. Omdat het voor praktische toepassingen een stuk eenvoudiger is om de carbonatatiecoëfficiënt toch tijdsonafhankelijk te beschouwen, wordt de wet van Fick volgens Sisomphon & Franke als volgt aangepast:

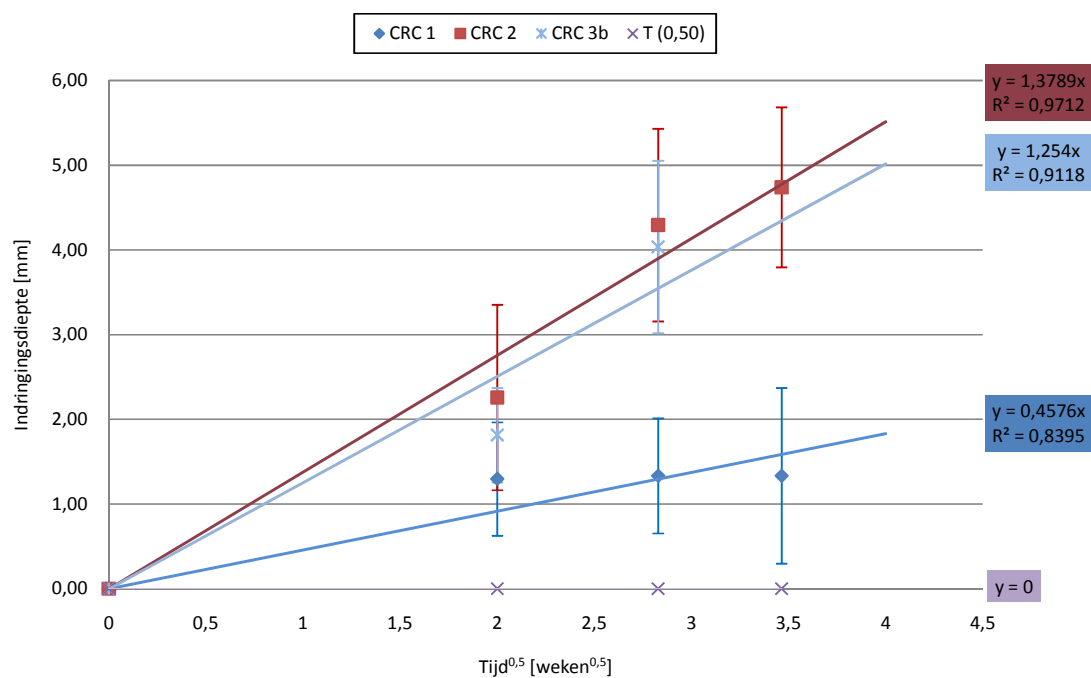
$$x = k \cdot t^{0,4} \quad (4.10)$$

Deze relatie wordt voor het beton op 1 maand ouderdom weergegeven in Figuur 4-28.

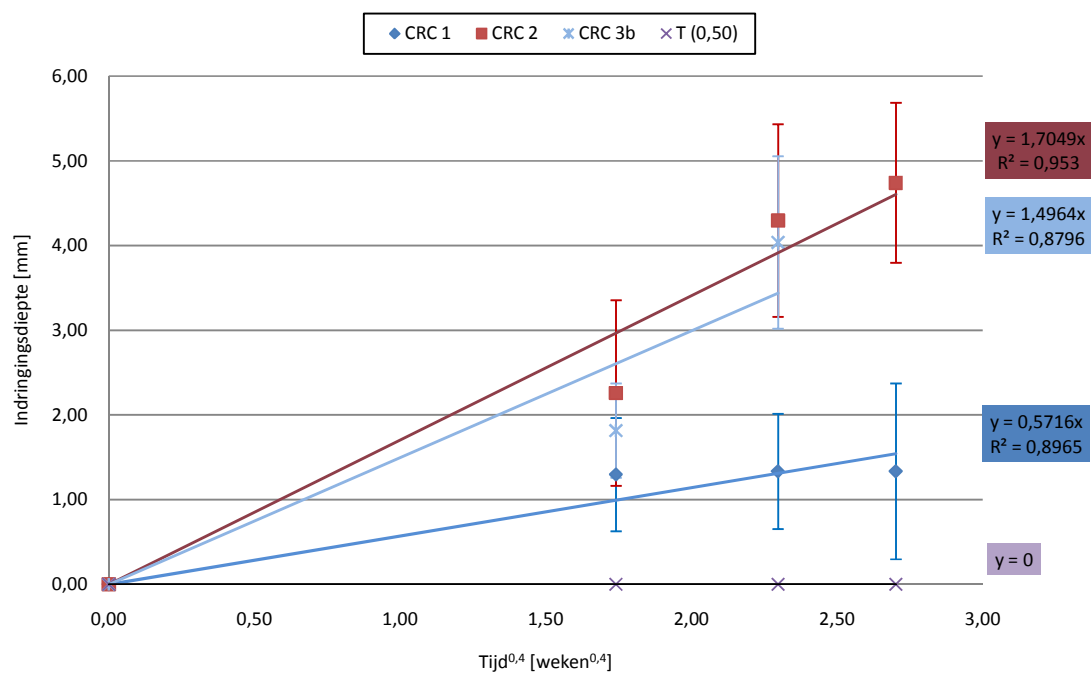


Figuur 4-28: Trendlijnen ter bepaling van de carbonatatiecoëfficiënt op 1 maand ouderdom ($x=k \cdot t^{0,4}$)
 CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35]; CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]; CRC 3a [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]; CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]

Dezelfde proeven werden uitgevoerd op de betonmengsels op 3 maand ouderdom. Figuur 4-29 toont de resultaten wanneer de indringing wordt uitgezet volgens de tweede wet van Fick. Figuur 4-30 toont dezelfde resultaten, maar uitgaande van de aanpassing door Sisomphon & Franke (2007).



Figuur 4-29: Trendlijnen ter bepaling van de carbonatatiecoëfficiënt op 3 maanden ouderdom ($x=k.t^{0.5}$)
 CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35]; CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]; CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]



Figuur 4-30: Trendlijnen ter bepaling van de carbonatatiecoëfficiënt op 3 maanden ouderdom ($x=k.t^{0.4}$)
 CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35]; CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]; CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]

Om het geheel te verduidelijken werd in Tabel 4-5 de carbonatatiediepte “x”, samen met de standaarddeviatie op de individuele waarden “ σ ”, uitgezet in functie van de tijd.

Tabel 4-5: Carbonatatiediepte in functie van de tijd

Ouderdom	1 maand									
Blootstellingstijd	4 weken		8 weken		12 weken		16 weken		20 weken	
Indringingsdiepte	x [mm]	σ	x [mm]	σ	x [mm]	σ	x [mm]	σ	x [mm]	σ
T(0,50)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
CRC 1	1,56	0,56	1,67	0,83	1,74	0,45	2,67	1,21	2,89	0,85
CRC 2	5,11	0,80	6,30	1,20	7,56	1,25	7,81	1,42	7,81	1,42
CRC 3a	7,22	1,19	7,30	1,23	8,96	1,53	9,96	1,34	-	-
CRC 3b	4,33	1,11	5,44	1,60	6,67	1,04	6,70	1,41	-	-
Ouderdom	3 maand									
Blootstellingstijd	4 weken		8 weken		12 weken		16 weken		20 weken	
Indringingsdiepte	x [mm]	σ	x [mm]	σ	x [mm]	σ	x [mm]	σ	x [mm]	σ
T(0,50)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
CRC 1	1,30	0,67	1,33	0,68	1,33	1,04	-	-	-	-
CRC 2	2,26	1,10	4,30	1,14	4,74	0,94	-	-	-	-
CRC 3b	1,81	0,56	4,04	1,02	-	-	-	-	-	-

Om na te gaan in welke mate de carbonatatiecoëfficiënt beter voldoet aan de vierkantswortel-tijd-wet, dan wel volgens de bevindingen van Sisomphon & Franke (2007) de tijd eerder tot de macht 0,4 moet verheven worden, worden in Tabel 4-6 de bekomen waarden met elkaar vergeleken. Een “gemiddelde correlatiecoëfficiënt” wordt hierbij bepaald. Gezien voor het referentiemengsel T(0,50) geen carbonatatie werd vastgesteld, wordt met dit mengsel geen rekening gehouden bij de bepaling van dit gemiddelde. Deze gemiddelde correlatiecoëfficiënt ligt hoger op één maand ouderdom wanneer de tijd tot de macht 0,4 i.p.v. 0,5 wordt verheven.

Op drie maand ouderdom is er geen verschil tussen beide wetten op te merken. Dit kan een gevolg zijn van het feit dat de proefresultaten op 3 maand ouderdom slechts maximaal 8 tot 12 weken opgevolgd werden, zodat het tijdsafhankelijk karakter van de diffusiecoëfficiënt nog niet ten volle tot uiting kon komen. Indien op één maand ouderdom eveneens enkel de resultaten van de eerste 8 weken beschouwd worden, ligt de gemiddelde correlatiecoëfficiënt toch nog steeds hoger bij toepassing van de “tijd^{0,4}-wet” (0,97 tegenover 0,96 voor tijd^{0,5}). Dit kan echter verklaard worden door de hogere carbonatatiesnelheid van het beton op jonge leeftijd, waardoor de tijd^{0,4}-wet sneller van toepassing zal zijn.

Tabel 4-6: Carbonatatiecoëfficiënt in functie van mengsel, ouderdom en toegepaste wet [* Het referentiemengsel T(0,50) werd niet meegerekend ter bepaling van de gemiddelde correlatiecoëfficiënt]; CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35]; CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]; CRC 3a [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]; CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]

Mengsel	Carbonatatiecoëfficiënt [x in mm, t in wk]							
	1 maand				3 maand			
	$x=k.t^{0,5}$	R^2	$x=k.t^{0,4}$	R^2	$x=k.t^{0,5}$	R^2	$x=k.t^{0,4}$	R^2
T(0,50)	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
CRC 1	0,62	0,94	0,81	0,94	0,46	0,84	0,57	0,90
CRC 2	2,01	0,93	2,61	0,97	1,39	0,97	1,70	0,95
CRC 3a	2,65	0,93	3,38	0,97	-	-	-	-
CRC 3b	1,85	0,97	2,35	0,99	1,25	0,91	1,50	0,88
$R^2_{gem}*$	-	0,94	-	0,97	-	0,91	-	0,91

De carbonatatiecoëfficiënt is bij alle mengsels steeds hoger op 1 maand ouderdom dan op 3 maanden ouderdom. Sulapha en Atis (2003) toonden aan dat er een lineair verband heerst tussen de carbonatatiecoëfficiënt en de porositeit van een beton. Naar analogie van de bevindingen van Van den Heede (2008), die vaststelde dat de totale porositeit bij mengelingen met 35% vliegasvervanging, daalt tussen 1 en 3 maanden ouderdom, kan de daling van de carbonatatiecoëfficiënt toegeschreven worden aan de dalende porositeit van het mengsel. De relatieve daling van de carbonatatiecoëfficiënt ($tijd^{0,5}$) ligt voor de drie mengsels in dezelfde grootteorde en bedraagt 26 % voor CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35], 31% voor CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35] en 32% voor CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6].

Volgens Sulapha (2003) en Atis (2003) zou er een lineair verband bestaan tussen de druksterkte van een mengsel en de weerstand tegen carbonatatie. Deze stelling is echter duidelijk niet geldig voor deze verschillende betonsoorten onderling. Bij alle recycleerbare mengsels wordt wel een lagere carbonatatiecoëfficiënt bekomen op 3 maand ouderdom ten opzicht van deze op 1 maand ouderdom. Om na te gaan of de stelling geldig is voor elke individuele betonsoort, zou op een derde betonleeftijd de druksterkte en de carbonatatiecoëfficiënt opgemeten moeten worden.

Op basis van de versnelde carbonatatiecoëfficiënten, kan de carbonatatiecoëfficiënt in gewone lucht worden berekend. Gezien de diffusiecoëfficiënt als tijdsonafhankelijk werd beschouwd in beide wetten en de CO_2 -concentratie in de carbonatatiekast 10vol% bedraagt, terwijl deze in normale omstandigheden slechts een waarde van 0,03vol% bezit, kan de versnelde carbonatatiecoëfficiënt worden omgevormd tot een coëfficiënt onder normale omstandigheden: formule (4.11).

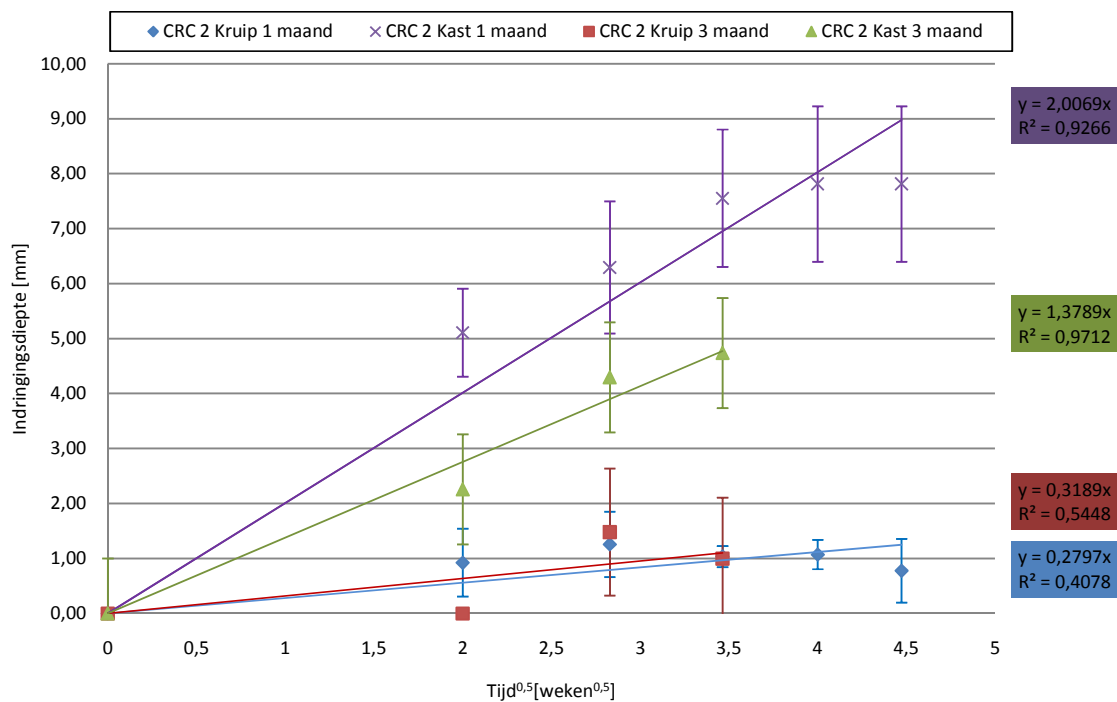
$$\frac{k_{10}}{k_{0,03}} = \frac{\sqrt{10}}{\sqrt{0,03}} \Rightarrow k_{0,03} = 0,05477 \cdot k_{10} \quad (4.11)$$

Door de versnelde coëfficiënten dus te vermenigvuldigen met 0,05477, wordt de carbonatatiecoëfficiënt in een normale omgeving bekomen: zie Tabel 4-7. In deze tabel wordt tevens de verwachte indringingsdiepte na 50 jaar - de ontwerplevensduur volgens Eurocode 2 (2002) - berekend volgens de twee besproken wetten en dit zowel voor versnelde als voor realistische omstandigheden. De berekende indringingsdiepte ligt na 50 jaar voor elk mengsel hoger wanneer de vierkantswortel-tijd-wet wordt gehanteerd.

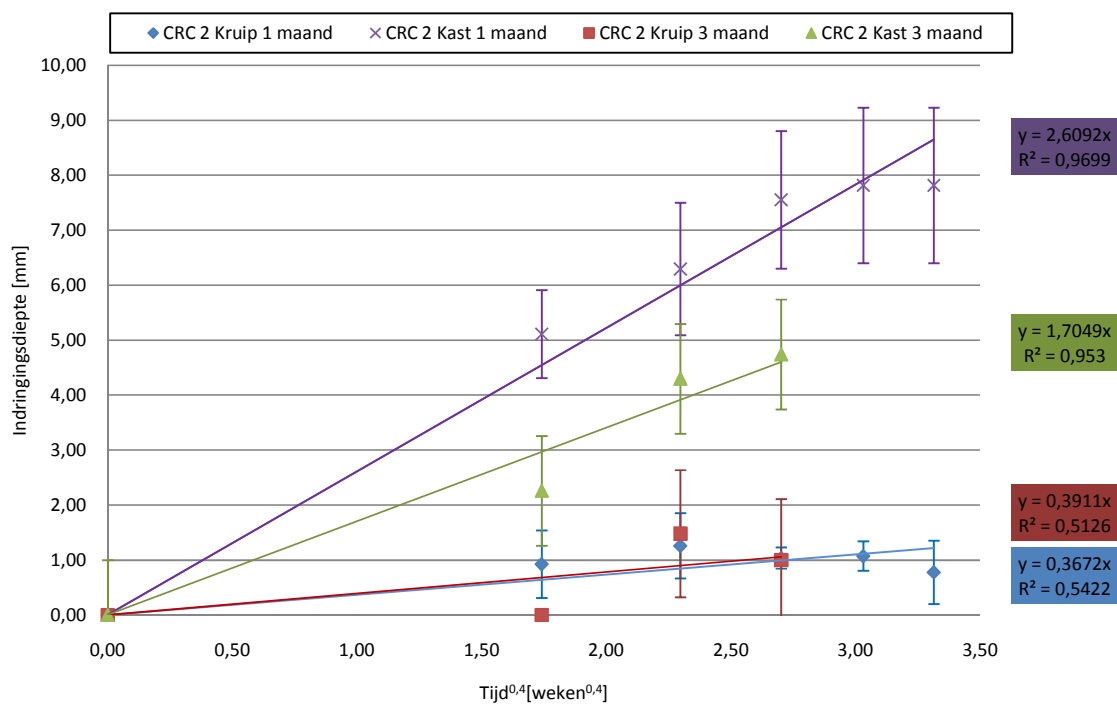
Tabel 4-7: Carbonatatiecoëfficiënt in functie van de ouderdom, de omgeving en de toegepaste wet
Verwachte indringingsdiepte in functie van ouderdom, omgeving en toegepaste wet na 50 jaar blootstelling

Mengsel	Carbonatatiecoëfficiënt [x in mm, t in weken]							
	1 maand				3 maand			
	$x=k \cdot t^{0,5}$		$x=k \cdot t^{0,4}$		$x=k \cdot t^{0,5}$		$x=k \cdot t^{0,4}$	
Omgeving	k_{10}	$k_{0,03}$	k_{10}	$k_{0,03}$	k_{10}	$k_{0,03}$	k_{10}	$k_{0,03}$
T(0,50)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CRC 1	0,62	0,03	0,81	0,04	0,46	0,03	0,57	0,03
CRC 2	2,01	0,11	2,61	0,14	1,39	0,08	1,70	0,09
CRC 3a	2,65	0,15	3,38	0,18	-	-	-	-
CRC 3b	1,85	0,10	2,35	0,13	1,25	0,12	1,50	0,08
Mengsel	Verwachte indringingsdiepte na 50 jaar [mm]							
	1 maand				3 maand			
	$x=k \cdot t^{0,5}$		$x=k \cdot t^{0,4}$		$x=k \cdot t^{0,5}$		$x=k \cdot t^{0,4}$	
Omgeving	k_{10}	$k_{0,03}$	k_{10}	$k_{0,03}$	k_{10}	$k_{0,03}$	k_{10}	$k_{0,03}$
T(0,50)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CRC 1	31,82	1,74	18,76	1,03	23,33	1,28	13,28	0,73
CRC 2	102,33	5,60	60,60	3,32	70,83	3,88	39,60	2,17
CRC 3a	135,10	7,40	78,45	4,30	-	-	-	-
CRC 3b	94,30	5,17	54,69	3,00	63,94	6,30	34,76	1,90

Ter vergelijking werden voor elk mengsel evenveel proefstukken blootgesteld aan carbonatatie in een gewone omgeving (0,03vol% CO₂) en werden eveneens cyclisch onder water bewaard. Enkel voor het mengsel CRC 2 kon, met fenolftaleïne als kleurindicator, een zichtbare carbonatatie opgemeten worden. Op analoge wijze als voorheen, wordt de indringingsdiepte uitgezet in functie van het tijdsverloop. Figuur 4-31 en Figuur 4-32 tonen deze gegevens met bijhorende trendlijnen en richtingscoëfficiënten.



Figuur 4-31: Trendlijnen ter bepaling van de carbonatatiecoëfficiënt ($x=k \cdot t^{0,5}$); CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]



Figuur 4-32: Trendlijnen ter bepaling van de carbonatatiecoëfficiënt ($x=k \cdot t^{0,4}$); CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]

De indringingscoëfficiënt die theoretisch werd bepaald door het verband met de versnelde carbonatatiecoëfficiënt uit te schrijven, wordt nu vergeleken met de experimenteel bepaalde. Tabel 4-8 toont deze coëfficiënten.

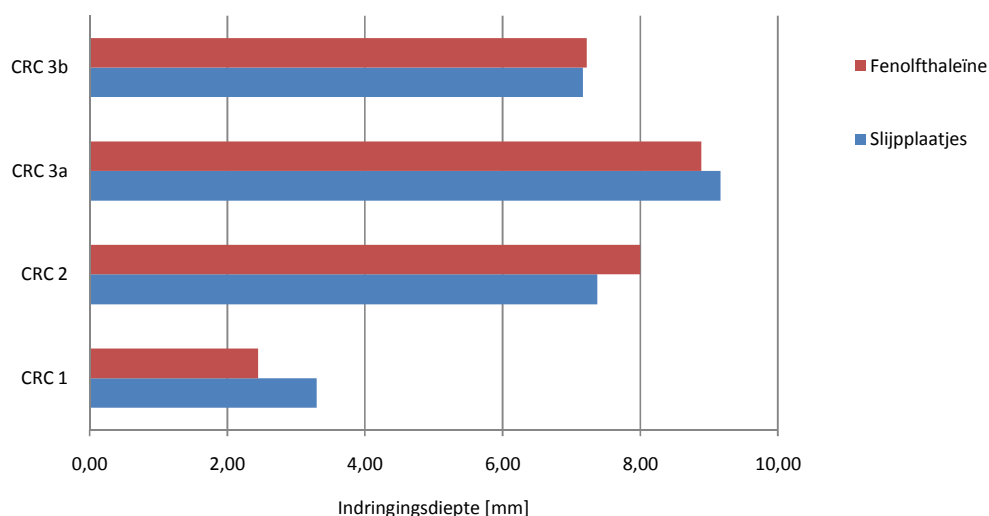
Tabel 4-8: Theoretisch en experimenteel bepaalde carbonatatiecoëfficiënt [* : R² heeft betrekking op de correlatie van de experimenteel bepaalde carbonatatiecoëfficiënt onder normale omstandigheden]

Carbonatatiecoëfficiënt [x in mm, t in wk]							
x=k.t ^{0,5}				x=k.t ^{0,4}			
1 maand							
experimenteel			theoretisch	experimenteel			theoretisch
k ₁₀	R ² *	k _{0,03}	k _{0,03}	k ₁₀	R ² *	k _{0,03}	k _{0,03}
2,01	0,41	0,28	0,11	2,61	0,54	0,32	0,14
3 maand							
1,39	0,54	0,37	0,08	1,70	0,51	0,39	0,09

De metingen geven een veel hogere carbonatatiecoëfficiënt dan deze die aan de hand van de versnelde carbonatatieproef werden berekend. Deze afwijking dient echter niet zo zeer gezocht te worden in een tekortkoming in de theoretische achtergrond bij deze berekening, maar veeleer in de moeilijkheid die ligt in het opmeten van de indringing wanneer deze een dergelijke kleine waarde aanneemt. Metingen over een langere periode, waarbij meer carbonatatie is opgetreden en de meting bijgevolg eenvoudiger zou verlopen, zouden naar alle waarschijnlijkheid een betere overeenkomst met de vertonen met de theoretische bepaalde carbonatatiecoëfficiënt. De zeer lage correlatiecoëfficiënt (zie Tabel 4-8) wijst overigens ook op een zwak verband en een lage betrouwbaarheid van de experimenteel bepaalde waarden.

▪ Slijpplaatjes

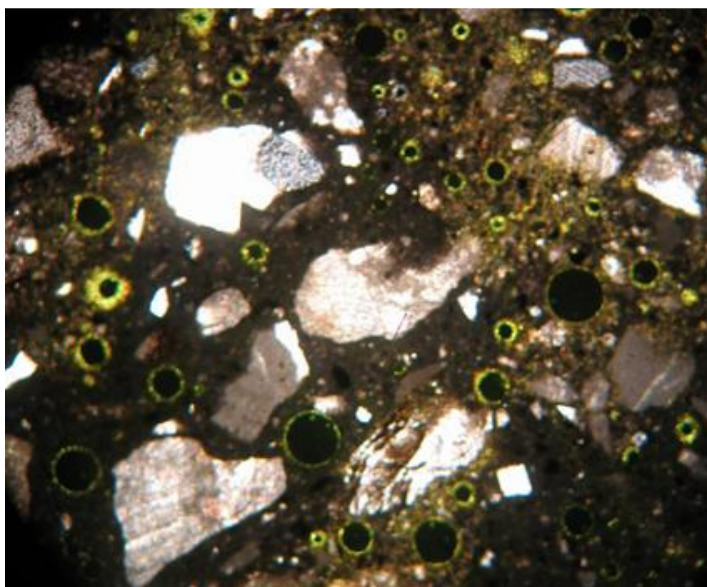
De resultaten van de microscoopanalyse op slijpplaatjes werd vergeleken met de indringing die werd opgemeten met fenolftaleïne als kleurindicator. Afhankelijk van de mate waarin het carbonatatiefront rechtlijnig verliep werden per slijpplaatje 5 tot 8 metingen uitgevoerd. Wanneer er ter hoogte van het carbonatatiefront zich een granulaat bevond, werd op dat punt geen meting verricht. Uit Figuur 3-12 blijkt dat het moeilijk is om een verband te vinden tussen beide meetwaarden. Met CRC 1 en CRC 3a wordt, wanneer rekening gehouden wordt met de theorie van Chang & Chen (2006) (zie paragraaf 3.2.5) de meest logische oplossing bekomen: In deze gevallen is de indringing, bepaald met fenolftaleïne, namelijk kleiner dan de met de microscoop opgemeten indringing. Dit zou veroorzaakt worden doordat fenolftaleïne ook bij een gedeeltelijk gecarbonateerde zone verkleurt. De carbonatatie van deze gebieden wordt met andere woorden verwaarloosd. CRC 3b en CRC2 tonen echter tegenstrijdige resultaten. De verschillen zijn echter niet significant voor deze mengsels, enkel voor CRC 1 werd een significant verschil geregistreerd.



Figuur 4-33: Ligging van het carbonatatiefront volgens de metingen met fenolftaleïne als kleurindicator en volgens de microscoopanalyse

De resultaten moeten hoe dan ook met de nodige voorzichtigheid benaderd worden en verregaande conclusies mogen hier niet uit worden getrokken. Om praktische redenen werd namelijk van elk mengsel slechts één slijpplaatje gemaakt, wat het resultaat uiterst gevoelig maakt voor toevallige schommelingen. Bovendien was het niet altijd eenvoudig om met de microscoop een duidelijk carbonatatiefront vast te stellen. Figuur 4-34 illustreert duidelijk waarom: Hoewel deze microscoopfoto slechts een uitvergroting van 5 maal de werkelijke grootte teweegbrengt, is al

duidelijk dat het carbonatatiefront helemaal niet rechtlijnig verloopt. Middenin de foto wordt een niet-gecarbonateerde zone geregistreerd, terwijl zowel links als rechts van deze zone het beton wel al is gecarbonateerd. Een dergelijk grillig carbonatatiefront dwingt de onderzoeker tot het inschatten van de meest voor de hand liggende grens en iedere schatting brengt vanzelfsprekend een zekere fout met zich mee. Vooral voor CRC 2 kwam deze moeilijkheid verschillende malen voor. Het feit dat dit beton net het meest afwijkt van het verwachte resultaat, kan hier een gevolg van zijn. Merk vooral het grote verschil op met Figuur 3-20 (paragraaf 3.2.5), waar een zeer duidelijke grens kan getrokken worden tussen het gecarbonateerd en het niet-gecarbonateerd materiaal.

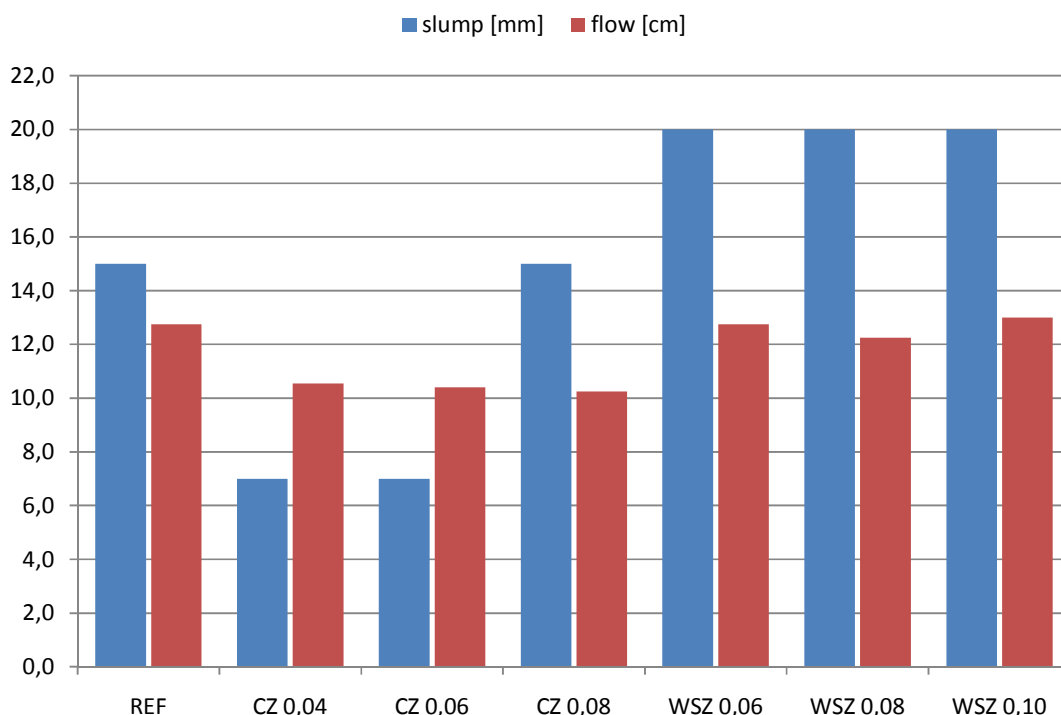


Figuur 4-34: Gedeeltelijk gecarbonateerd CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35] [vergroting = 5x]

4.8. Mortelproeven

4.8.1. Verwerkbaarheid en luchtgehalte van de mortel

Van betonmengeling CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] werden volgens het principe van “mortier du béton équivalent” [Robeyst (2010)], verschillende mortels gemaakt. Deze werden elk met een verschillende hoeveelheid bindingsvertrager behandeld. Het effect van deze bindingsvertragers op de verwerkbaarheid van het mengsel wordt weergegeven in Figuur 4-35. De gebruikte doseringen van de bindingsvertragers werden gebaseerd op bevindingen van Unsin (2003).



Figuur 4-35: Verwerkbaarheid van de mortel met en zonder toevoeging van een bindingsvertrager
[CZ = citroenzuur, WSZ = wijnsteenzuur, REF = referentiemengsel zonder bindingsvertrager]

Het is hierbij duidelijk dat de toevoeging van deze bindingsvertragers een slechts zeer gering effect heeft op de verwerkbaarheid. In het geval citroenzuur werd gebruikt als bindingsvertrager, werd zelfs een minder goede verwerkbaarheid opgemeten dan wanneer geen bindingsvertrager werd gebruikt. Gezien deze verschillen echter vrij klein zijn en er geen reden is om aan te nemen dat de toevoeging van citroenzuur de binding van het cement zou versnellen, is dit hoogstwaarschijnlijk eerder te wijten aan toevalligheden. In elk geval kan geconcludeerd worden dat de toevoeging van zowel citroenzuur als wijnsteenzuur geen voldoende bindingsvertragend effect heeft.

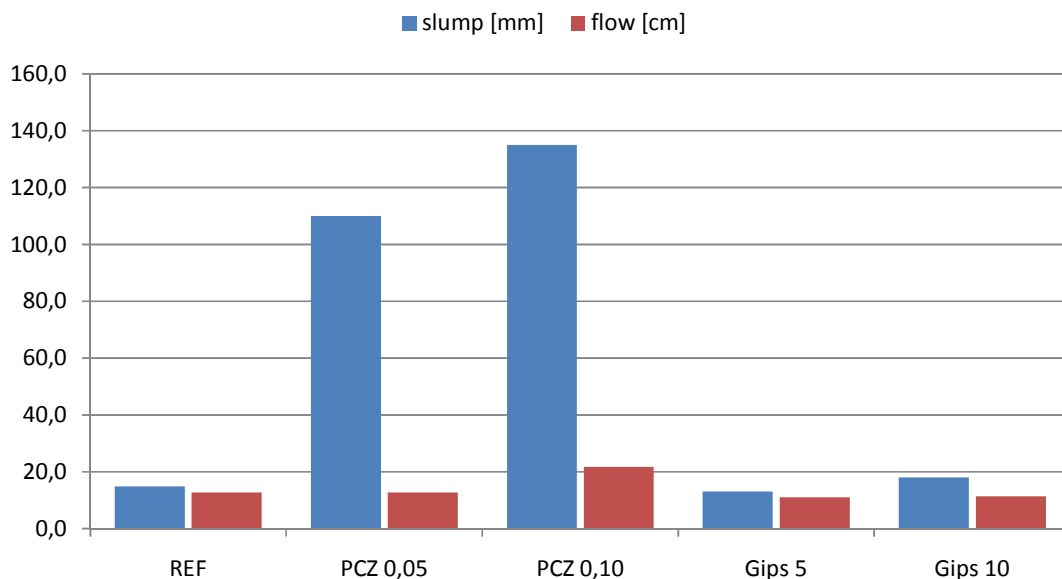
Om dit probleem op te lossen, werden er grotere hoeveelheden wijnsteenzuur, gaande van 0,20m% tot 1,00m% van het geheel aan bindmiddelen, toegevoegd. Het effect hiervan was echter niet bevredigend. De binding werd wel vertraagd (de mortel verhardde slechts langzaam), maar de verwerkbaarheid nam hiermee niet evenredig toe. De mortelstructuur werd zeer korrelig en er werd geen enkele meetbare inzakking bij de uitvoering van de proef ter bepaling van de slump (zetmaat) geregistreerd. Figuur 4-36 verduidelijkt deze beschrijving.



Figuur 4-36: Slump bij toevoeging van wijnsteenzuur ter grootte van 1,00m% van het geheel aan bindmiddelen

De proeven met citroenzuur als bindingsvertrager werden een tweede maal uitgevoerd, maar het citroenzuur werd ditmaal in poedervorm aan het aanmaakwater toegevoegd i.p.v. in korrelvorm. De werking daarvan bleek veel efficiënter, zoals door Figuur 4-37 wordt aangetoond (PCZ 0,05 en PCZ 0,10). Een verklaring hiervoor kan gevonden worden in het feit dat de bindingsvertrager in poedervorm heel wat makkelijker zal oplossen in het aanmaakwater en zich bijgevolg beter zal kunnen verdelen over de cementpartikels, wanneer de cement bij het aanmaakwater wordt gevoegd. Het effect van de bindingsvertrager kan namelijk pas ten volle worden benut als deze gelijkmatig over de cementpasta is verdeeld.

Ook werden de proeven uitgevoerd met 5m% (Gips 5) en 10 m% gips (Gips 10) onder de vorm van calciumsulfaat hemihydraat ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$), maar dit bleek heel wat minder efficiënt te zijn.



Figuur 4-37: Verwerkbaarheid van de mortel met toevoeging van gips of citroenzuur in poedervorm

Tot slot werden drie referentiemengsels gemaakt, waarbij de totale hoeveelheid aan bindmiddelen werd vervangen door één enkele cementsoort. De toegepaste cementsoorten betroffen CEM I 52,5 N (CEM I), CEM III 42,5 N LA (CEM III) en aluminaatcement (AC). Van de samenstellingen werd eveneens het luchtgehalte bepaald. Tabel 4-9 geeft een overzicht.

Tabel 4-9: Slump, flow en luchtgehalte van de verse mortelspecie

Mengsel	Slump [mm]	Flow [cm]	Luchtgehalte [%]
REF	15	12,8	7,0
CZ0,04	7	10,6	4,8
CZ 0,06	7	10,4	4,1
CZ 0,08	15	10,3	4,0
PCZ 0,05	110	12,8	-
PCZ 0,10	135	21,8	-
WSZ 0,06	20	12,8	7,8
WSZ 0,08	20	12,3	5,0
WSZ 0,10	20	13,0	5,0
Gips 5	13	12,8	-
Gips 10	18	11,5	-
AC	90	16,3	8,0
CEM I	120	19,8	7,9
CEM III	130	28,0	8,0

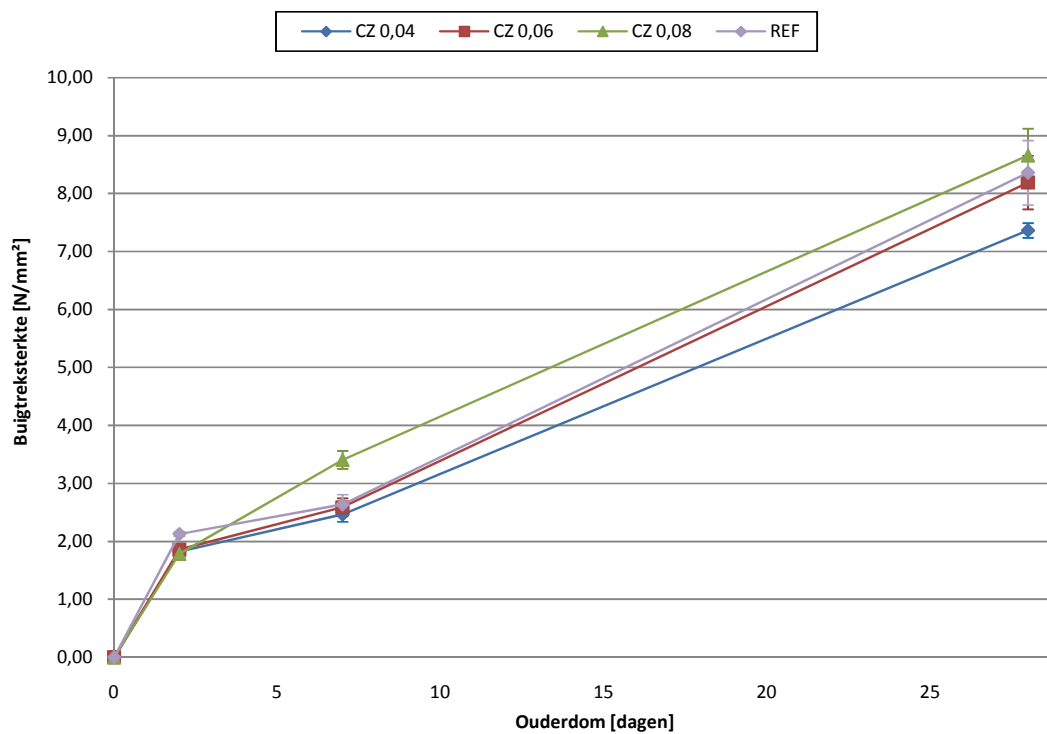
4.8.2. Druksterkte en buigtreksterkte

Van de verschillende mengelingen werd de buigtreksterkte bepaald op 2, 7 en 28 dagen ouderdom. Tevens werd van dezelfde proefstukken de druksterkte gemeten. Een overzicht van deze resultaten is terug te vinden in Bijlage C.

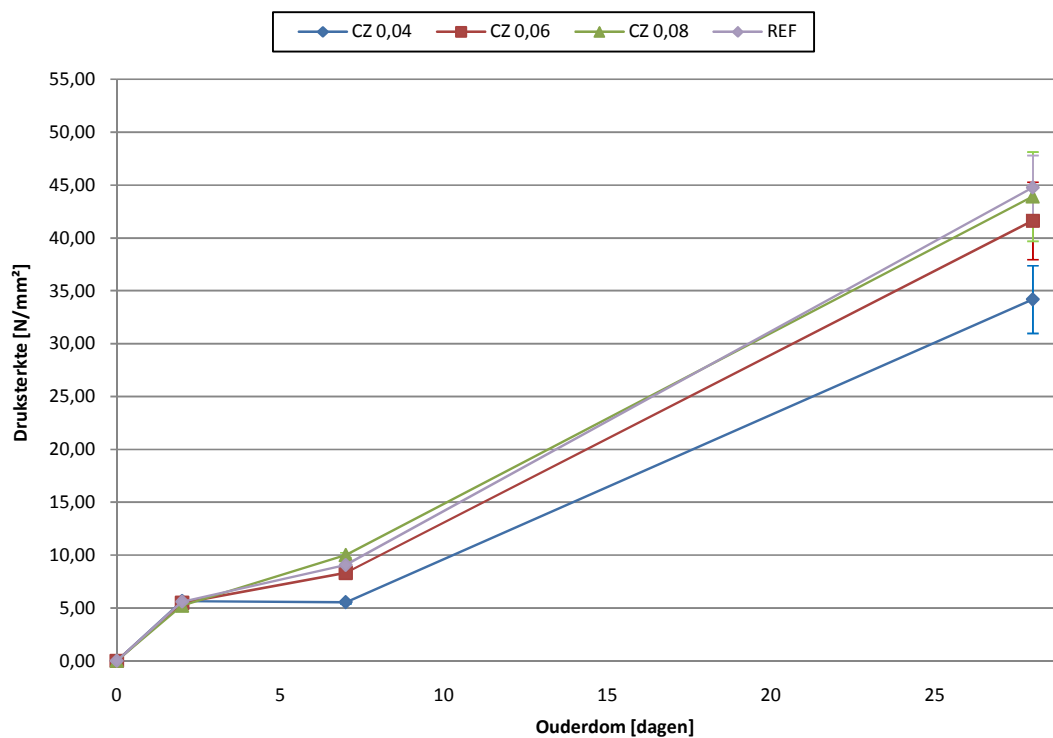
Het verloop van de sterkte-ontwikkeling wordt voor de mengelingen met citroenzuur en wijnsteen zuur afzonderlijk besproken. Figuur 4-38 en Figuur 4-39 geven respectievelijk het verloop van de buigtrekspanning en de drukspanning bij breuk in functie van de ouderdom van de mengeling. Opvallend is dat bij het mengsel waaraan 0,08m% citroenzuur werd toegevoegd, de buigtreksterkte lager is dan voor het referentiemengsel op 2 dagen ouderdom, terwijl op 7 en 28 dagen ouderdom, de buigtrekspanning bij breuk hoger ligt dan voor de referentie het geval is. Door het bindingsvertragend effect van citroenzuur – dat analoog aan de bevindingen die bij het onderzoek van de verwerkbaarheid werden gevonden (zie Tabel 4-9), slechts merkbaar is vanaf een toegevoegd citroenzuurhoeveelheid van 0,08m% – verloopt de hydratatie van de cement bij het begin van de binding namelijk trager en wordt op 2 dagen ouderdom bijgevolg een lagere sterkte bekomen. Door de betere verwerkbaarheid kan de mortel echter beter worden verdicht, waardoor op langere termijn, toch een hogere sterkte wordt bekomen. Het verschil in sterkte tussen dit mengsel en het referentiemengsel op 2 en 7 dagen ouderdom is significant, op 28 dagen ouderdom is dit niet het geval.

Voor de druksterkte wordt op 7 dagen ouderdom opnieuw een significant hogere waarde bekomen voor het mengsel met 0,08m% citroenzuur, terwijl op 2 dagen ouderdom de sterkte het hoogst is bij het referentiemengsel. Op 28 dagen ouderdom is de gemiddelde druksterkte het hoogst bij het referentiemengsel, maar dit verschilt niet significant van de mengsels met 0,06m% en 0,08m% citroenzuur.

Opvallend bij het sterkteverloop (zowel bij buigtreksterkte als bij druksterkte) is de sterke stijging en sterkte gedurende de eerste 2 dagen, waarna de toename in sterkte tussen de 2^e en de 7^e dag aan een gemiddeld trager tempo verloopt. De gemiddelde sterktestijging tussen dag 7 en dag 28 ligt opnieuw hoger, wellicht te danken aan de reactie van het puzzolane vlieg as en activering van de latent hydraulische hoogovenslakken in het hoogovencement. Enkel bij de buigtreksterkte van het mengsel met 0,06m% citroenzuur wordt van dit patroon afgeweken.



Figuur 4-38: Verloop van de buigtreksterkte in functie van de ouderdom voor mengsels met citroenzuur als bindingsvertrager



Figuur 4-39: Verloop van de druksterkte in functie van de ouderdom voor mengsels met citroenzuur als bindingsvertrager

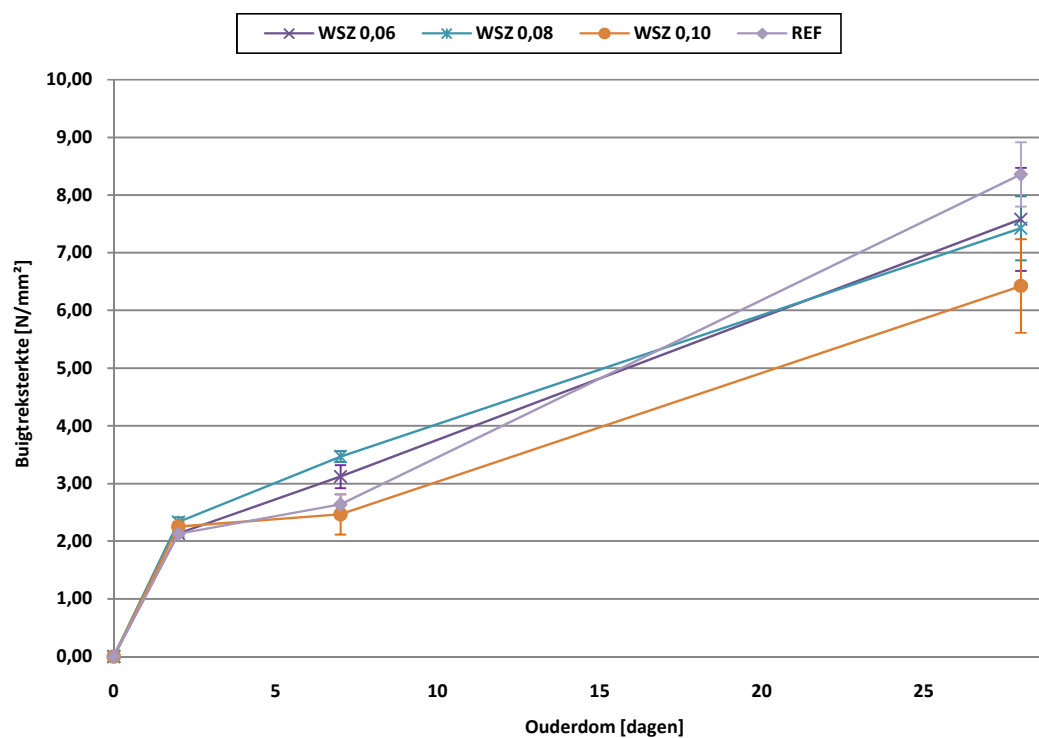
Voor de mengelingen met gebruik van wijnsteenzuur als bindingsvertrager liggen de sterkterelaties enigszins anders. Figuur 4-40 en Figuur 4-41 tonen het verloop van de buigtreksterkte en de druksterkte van de mortelprisma's met wijnsteenzuur in functie van de ouderdom.

Geen enkel mengsel met wijnsteenzuur bereikt op 28 dagen ouderdom een even hoge buigtreksterkte als de referentiemengeling zonder bindingsvertrager. Voor de buigtreksterkte is dit verschil enkel significant wanneer 0,10m% wijnsteenzuur wordt toegevoegd, voor de druksterkte is dit verschil evenwel bij alle toevoegingspercentages significant. Bovendien ligt de gemiddelde buigtreksterkte en de gemiddelde druksterkte op 2 dagen ouderdom hoger bij de mengelingen met toegevoegde wijnsteenzuur dan bij het referentiemengsel. Dit verschil is bij de opgemeten buigtreksterkte significant voor 0,08m% citroenzuur en voor de druksterkte is dit zelfs het geval voor alle mengsels. Dit wijst erop dat wijnsteenzuur als bindingsvertrager zijn effect volkomen mist.

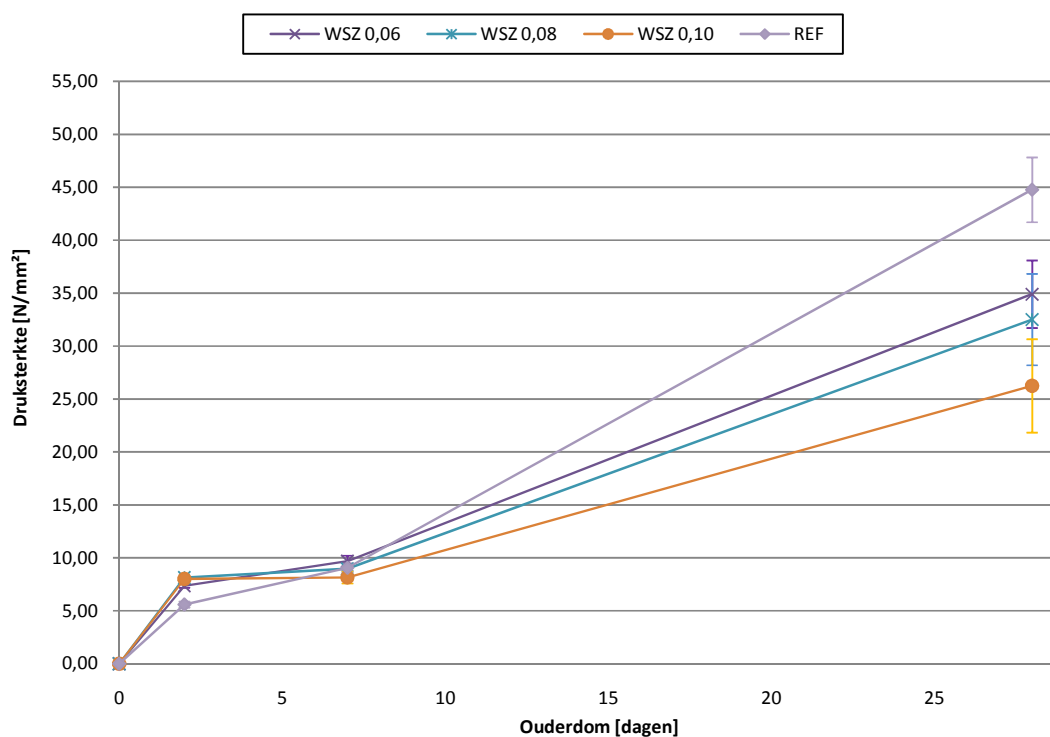
De algemene sterkteontwikkeling verloopt op een gelijkaardige manier als voor citroenzuur werd geconstateerd. Een snelle stijging gedurende de eerste twee dagen wordt gevolgd door een tragere toename gedurende de volgende 5 dagen. Daarna wordt opnieuw een snellere sterkteontwikkeling waargenomen tussen de 7^e en de 28^e dag.

De gemiddelde buigtreksterkte en de gemiddelde druksterkte van de mengsels op de verschillende leeftijden wordt samengevat in Bijlage C. De gemiddelde waarden worden samen met de standaardafwijkingen op de individuele waarden weergegeven. De sterktes op de drie leeftijden van de referentiemengsels (REF, CEM I, CEM III en AC) werden eveneens in deze tabel opgenomen.

Tot slot werd, uitgaande van de resultaten op deze mortels, beton met dezelfde samenstelling als CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] gefabriceerd, waaraan 0,10m% (van het geheel aan bindmiddelen) poedervormig citroenzuur als bindingsvertrager werd toegevoegd. De resultaten van de druksterkte op dit beton kunnen teruggevonden worden in Bijlage C. Het beton met bindingsvertrager bezit na 28 dagen een druksterkte die 11% lager ligt dan hetzelfde mengsel zonder bindingsvertrager. Volgens Unsin (2003) zou de toevoeging van citroenzuur tot 0,06m% van het bindmiddelgehalte geen invloed hebben op de druksterkte van het mengsel. Voor beton met 0,10m% citroenzuur is het verschil in elk geval wel significant. In Bijlage C wordt eveneens een tabel weergegeven waarin een aantal eigenschappen van de verse betonspecie worden vergeleken met deze van het oorspronkelijke mengsel (CRC 3b). Daaruit blijkt dat het beton met citroenzuur een zeer goede verwerkbaarheid heeft (slumpklasse S5 en flowklasse F6) in vergelijking met CRC 3b (slumpklasse S1). Dit wijst erop dat de MBE-methode blijkbaar niet alle schaaleffecten van mortel ten opzichte van beton teniet kan doen, gezien de verwerkbaarheid bij mortels veel minder toenam dan voor beton het geval is.



Figuur 4-40: Verloop van de buigtreksterkte in functie van de ouderdom voor mengsels met wijnsteenzuur als bindingsvertrager

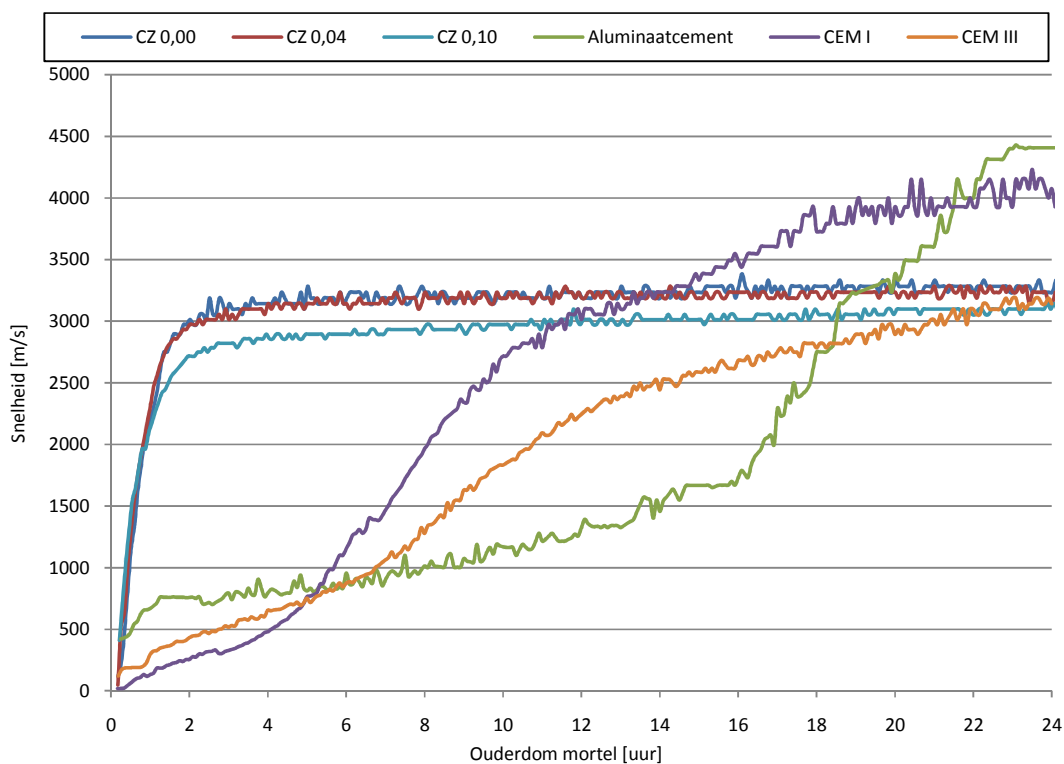


Figuur 4-41: Verloop van de druksterkte in functie van de ouderdom voor mengsels met wijnsteenzuur als bindingsvertrager

4.8.3. Ultrasonische transmissie en semi-adiabatische calorimetrie

De binding en verharding van de mortel werd met behulp van het FreshCon – toestel opgemeten. Hierbij werd de meting beperkt tot de eerste 24 uur na het mengen van de betonbestanddelen, omdat het onderzoek vooral het begin van binding trachtte te begroten. Bindingsvertragers die als doel het verbeteren van de verwerkbaarheid voor ogen hebben, dienen zich immers logischerwijs vooral laten gevoelen gedurende de eerste uren na het mengen. Op lange termijn zouden de bindingsvertragers zelfs geen of nauwelijks invloed mogen hebben. Dit onderzoek heeft niet tot doel zich te concentreren op de werking van de ultrasoonmeting. Diepgaande informatie over dit onderwerp kan gevonden worden in Robeyst (2010) en Robeyst (2008).

Figuur 4-42 toont de opgemeten snelheden, waarbij CZ 0,00, CZ 0,04 en CZ 0,10 gemaakt werden volgens de MBE-techniek en dienen als equivalente mortel voor het recycleerbare betonmengsel CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]. Aan CZ 0,00 werd geen bindingsvertrager toegevoegd, aan CZ 0,04 en CZ 0,10 respectievelijk 0,04m% en 0,10m% van het geheel aan bindmiddelen. Volgens dezelfde techniek werden mengsels, achtereenvolgens met enkel aluminaatcement, CEM I of CEM III als bindmiddel vervaardigd.



Figuur 4-42: Verloop van de snelheid van de ultrasone golf in functie van de ouderdom van de mengsels

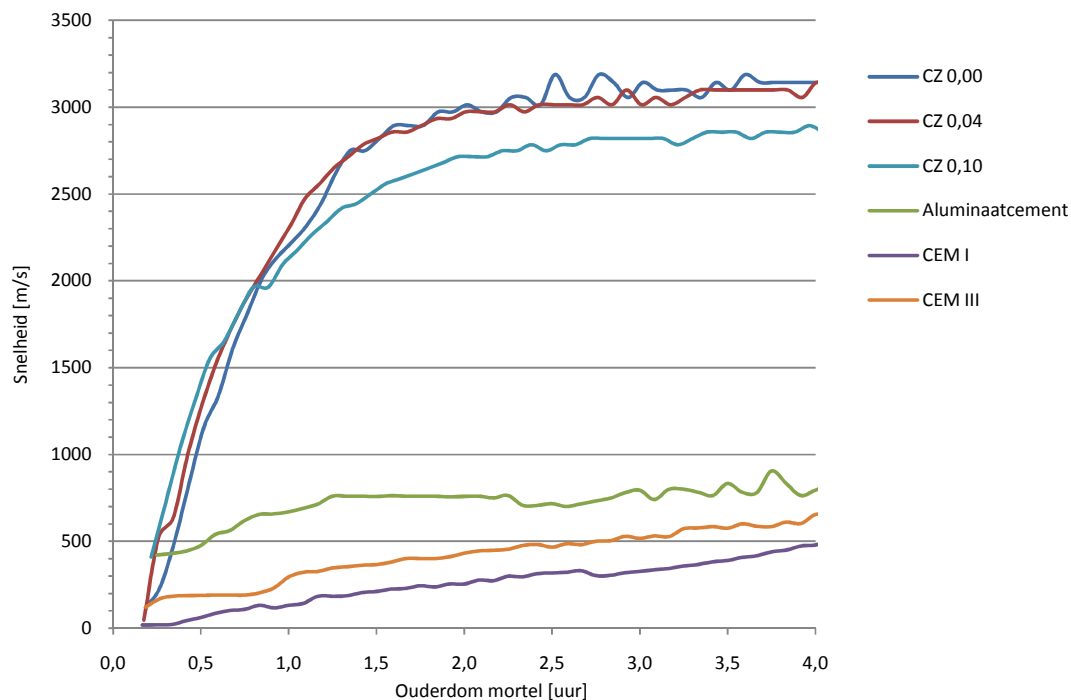
De curve van de snelheidsmeting neemt in Figuur 4-42 vaak een ietwat hobbelig patroon aan. Dit patroon is echter te wijten aan de onvolmaaktheden tijdens het opmeten van de ultrasoongolven. De metingen geschieden immers op een discontinue manier (de signalen werden om de 5 minuten uitgezonden) en gezien de grootte van de golfsnelheid, leidt de meest geringe afwijking op de meting tot een zichtbare onregelmatigheid in de grafische weergave. Deze imperfectie belemmert echter een goede interpretatie van de resultaten niet. In de grafiek mogen alle curven m.a.w. als “gladde curven” ondersteld worden.

Een eerste vaststelling is het feit dat de mortels, gebaseerd op CRC 3b, een volledig ander verloop in sterkte-ontwikkeling kennen dan voor CEM I, CEM III en aluminaatcement het geval is. Voor CEM I neemt de snelheid gedurende de eerste 8 tot 12 uur zeer snel toe, waarna in de curve een buigpunt ligt en de stijging in snelheid trager verloopt. CEM III vertoont een gelijkaardig verloop, maar de snelheidscurve is iets meer “afgeplat” t.o.v. deze voor CEM I. Dit wijst erop dat de hydratatie van het hoogovencement trager verloopt dan voor het portlandcement het geval is. Wanneer de snelheidscurve voor aluminaatcement nader wordt bekeken, kan ongeveer 16 uur na het mengen van de mortel, een buigpunt in de grafiek vastgesteld worden. Na dit buigpunt evolueert de curve met een grotere steilheid en na 24 uur wordt voor de mortel met aluminaatcement de hoogste golfsnelheid opgemeten.

De golfsnelheid bij de mortels waarbij aluminaatcement wordt gecombineerd met hoogovencement stijgt gedurende de eerste twee uur bijzonder snel, wat tot uiting komt in een grote steilheid van de curve gedurende deze eerste twee uur. Daarna kent de curve een buigpunt en neemt de golfsnelheid niet of nauwelijks nog toe. Dit gedrag wordt vastgesteld voor alle mortels met hoogovencement in combinatie met aluminaatcement, ongeacht of er gebruik wordt gemaakt van citroenzuur als bindingsvertrager of niet. Wel wordt er vastgesteld dat het quasi constante deel van de curve bij 0,04m% citroenzuur, zich lichtjes onder de curve zonder bindingsvertrager bevindt, al is dit verschil niet erg uitgesproken. Bij gebruik van 0,10m% citroenzuur is het verschil veel duidelijker: Het bijna horizontale deel van de curve bevindt zich afgetekend onder de andere twee curven. Naarmate de curve verder verloopt in de tijd, vermindert de afstand tussen de curven wel lichtjes, wat erop wijst dat de bindingsvertrager minder werkzaam wordt. Normaliter zouden de drie curven op langere termijn gelijklopend moeten zijn.

Het doel van het gebruik van een bindingsvertrager echter, is een verbetering in de verwerkbaarheid van het mengsel te bekomen (zonder de uiteindelijke sterkte negatief te beïnvloeden). Eenvoudig verwoord, dient de aanwending van citroenzuur in de mengsels om de gemiddelde richtingscoëfficiënt van het eerste deel van de curve (vòòr het buigpunt) te verlagen en

de hydratatie van het cement gedurende de eerste uren zo veel mogelijk te verhinderen. Een duidelijker beeld van het verloop van de golfsnelheid door de mortel in de eerste uren na het mengen wordt bekomen in Figuur 4-43.

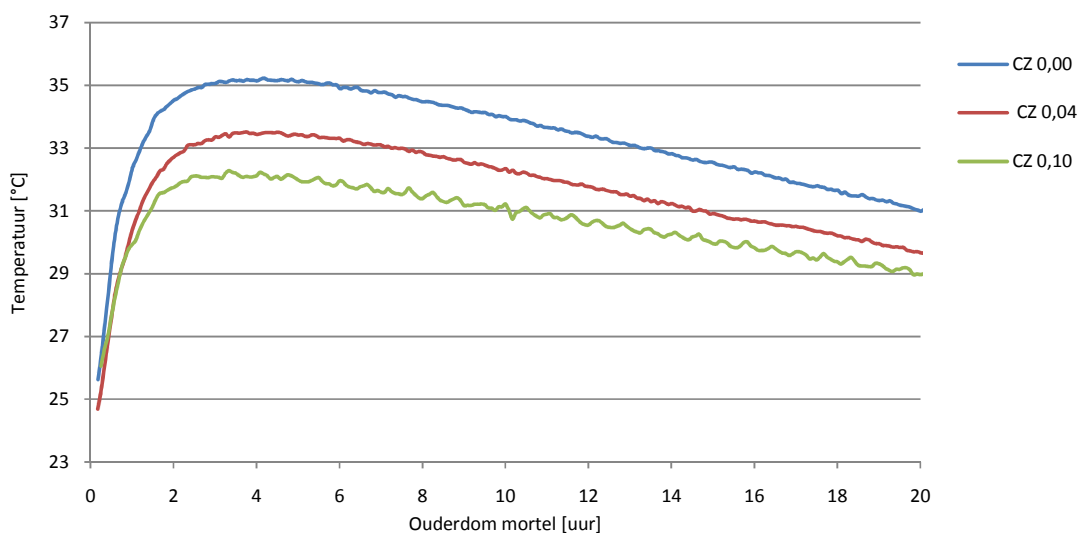


Figuur 4-43: Detail van de bindingssnelheid in functie van de ouderdom van het mengsel

Meteen is duidelijk dat de bindingsvertrager er helemaal niet in slaagt de helling van de curve te doen dalen. Tussen CZ 0,00, CZ 0,04 en CZ 0,10 is tot op 1 uur ouderdom geen enkel belangrijk verschil op te merken. Het verschil met de referentiemengsels met aluminaatcement, CEM I of CEM III als bindmiddel spreekt ook voor zich. In absolute waarden heeft de snelheid bij alle mengsels waarbij hoogovencement wordt gecombineerd met aluminaatcement, na één uur al een waarde bereikt van meer dan 2200m/s. Daartegenover staat dat de ultrasoongolf in de mengsels met enkel aluminaatcement, CEM I of CEM III respectievelijk een snelheid haalt van 689 m/s, 132 m/s en 233 m/s. Een meer diepgaande analyse van deze resultaten vereist een uitgebreide kennis van ultrasoongolven. Gezien dit buiten het bestek van deze studie valt, wordt de geïnteresseerde lezer voor een dergelijke analyse dan ook doorverwezen naar Robeyst (2010).

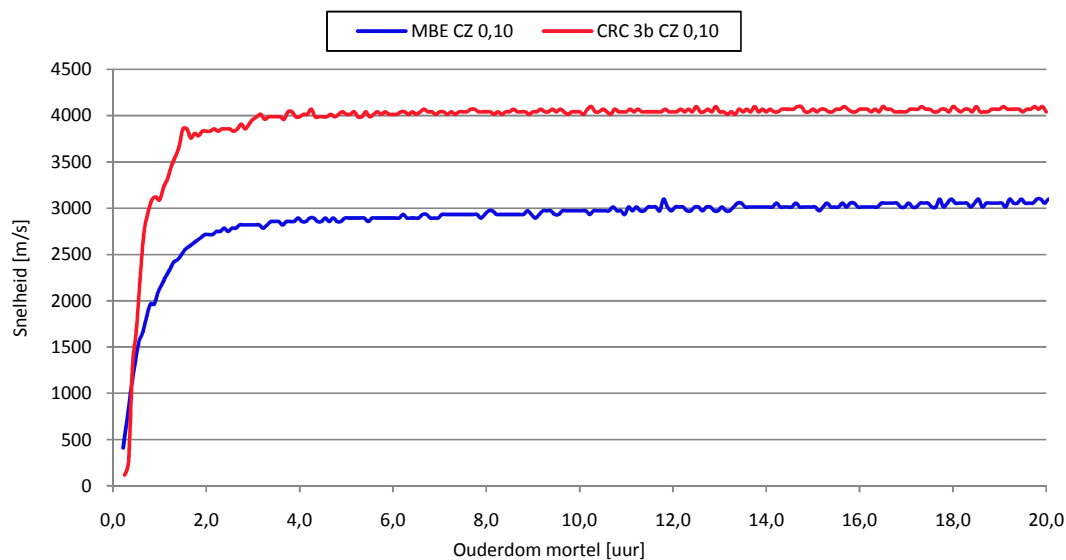
Van CZ 0,00, CZ 0,04 en CZ 0,10 werd eveneens de temperatuursstijging ten gevolge van de hydratatie van het cement opgemeten. De temperaturen die werden geregistreerd in de semi-adiabatische calorimeter worden getoond in Figuur 4-44. De werking van de bindingsvertragers wordt duidelijk door een vermindering van de maximale temperatuursstijging in de mortel. De verschillen in deze stijging zijn echter zeer klein en de maximale temperatuur wordt voor elk

mengsel reeds na een viertal uur bereikt. In Robeyst (2010) werd deze piek voor een standaardmortel met CEM I als bindmiddel en een w/c-factor van 0,50 waargenomen op ongeveer 15 uur na het begin van binding. Het feit dat deze piek voor elk mengsel ongeveer op hetzelfde ogenblik optreedt, toont aan dat de hydratatie in principe amper wordt uitgesteld.



Figuur 4-44: Semi-adiabatische temperatuursmeting

Om het schaaleffect met beton te onderzoeken werd eveneens een betonmengsel vervaardigd waaraan 0,10m% citroenzuur werd toegevoegd: CRC 3b CZ 0,10. De resultaten bij dit beton worden in Figuur 4-45 vergeleken met de mortel met 0,10m% citroenzuur: Figuur 4-45.



Figuur 4-45: Vergelijking tussen de voortplantingssnelheid van de ultrasone golf in functie van de betonleeftijd voor CRC 3b met 0,10m% citroenzuur en de equivalente mortel

De hydratatie van het cement in het beton wordt eveneens niet adequaat afgeremd. Het beton verhardt gedurende de eerste uren zeer snel, waarna een plotse omslag wordt bereikt en de snelheid amper nog toeneemt. De snelheid van de golf ligt ongeveer 1000m/s hoger in het beton dan in de equivalente mortel. Dit is echter een schaaleffect dat ook door Robeyst (2010) werd waargenomen.

▪ *Besluit*

Citroenzuur slaagt er duidelijk niet in de flashreactie tussen het aluminaatcement en het hoogovencement op afdoende wijze af te stoppen en de toevoeging van citroenzuur manifesteert zich pas na verloop van tijd, wanneer de hydratatie van het cement reeds (te) ver gevorderd is.

Het vermoeden rijst dat de bindingsvertrager zich enkel aan een beperkt deel van het cement hecht en ervoor zorgt dat dit cement niet kan hydrateren (althans niet binnen de 24 uur die hier worden beschouwd). Dit zou dan verklaren waarom de warmtepiek, ongeacht het toevoegingspercentage citroenzuur, telkens op hetzelfde ogenblik optreedt en de richtingscoëfficiënt van de golfsnelheid in functie van de tijd niet verandert. Doordat een deel van het cement echter niet kan hydrateren, zal de warmtepiek wel iets lager komen te liggen en zal de uiteindelijke golfsnelheid eveneens minder hoog liggen bij een hoger toevoegingspercentage aan bindingsvertrager. Het is uiteraard niet met dit opzet dat citroenzuur wordt toegevoegd. Het doel is wel de helling waarmee de golfsnelheid stijgt in functie van de tijd te verminderen i.p.v. het buigpunt van de curve te verlagen.

Indien er bijzonder veel citroenzuur zou toegevoegd worden, kan verondersteld worden dat dit buigpunt zodanig laag zal komen te liggen dat het mengsel wel verwerkbaar blijft. Indien de resultaten van deze metingen geëxtrapoleerd worden, kan echter verondersteld worden dat de hoeveelheid bindingsvertrager in dat geval zodanig groot zal worden dat deze hoe dan ook een invloed zal hebben op de uiteindelijke sterkte van het mengsel. Bovendien is in de grafieken te zien dat de snelheidstoename na dit buigpunt, slechts zeer geleidelijk evolueert. Waarschijnlijk zal in dat geval de binding dan ook veel te langzaam gebeuren om het tot een in de praktijk bruikbaar mengsel te maken.

Eigenaardig is wel dat bij de bepaling van de zetmaat (zie paragraaf 3.2.8.2) wél een merkbaar effect van het poedervormige citroenzuur werd waargenomen (hetzelfde type als gebruikt werd voor deze proeven). Deze meting werd uitgevoerd 6 minuten na het begin van de hydratatie (van zodra water en cement met elkaar in aanraking worden gebracht). Het effect op de schokmaat, die werd bepaald 15 minuten na het begin van de hydratatie, is echter al veel geringer. Blijkbaar is het

effect van citroenzuur tweeledig: Enerzijds vermindert het de hydratatie van cement gedurende de eerste minuten na het mengen, anderzijds zorgt het ervoor dat een deel van het cement niet kan hydrateren (althans niet gedurende de eerste uren). Hiermee wordt echter niet voldaan aan de verwachtingen die worden gesteld aan de bindingsvertrager. Een continue verbetering van de verwerkbaarheid gedurende de eerste uren na het mengen van de mortel of het beton werd immers met deze toevoeging beoogd.

5. Discussie

5.1. Weerstand tegen vorst en dooizouten

Twee merkwaardige vaststellingen werden gemaakt bij de analyse van de resultaten van vorst-dooi-proeven:

- *Voor alle recycleerbare mengsels en op alle leeftijden presteert het afstrijkvlak beter dan het bekistingsvlak*
- *Op 3 maand ouderdom wordt voor elk beproefd mengsel méér afschilfering waargenomen dan op 1 of 6 maand ouderdom*

Valenza & Sherer (2007-2) stellen dat het glue-spall mechanisme de oorzaak zou zijn van oppervlakte-afschilfering van het beton. Hierbij zal beton een composietmateriaal vormen met ijs. Wanneer de temperatuur tot ver beneden het vriespunt daalt, zal ijs tot 5 keer meer willen krimpen dan beton, waardoor het ijs scheurt. Deze scheuren propageren vervolgens in de cementpasta en veroorzaken de afschilfering van het betonoppervlak.

Hieronder wordt, vertrekkend van de bevindingen van Valenza & Sherer (2007-2), een mogelijke verklaring gegeven voor de vastgestelde verschijnselen met betrekking tot de afschilfering van het betonoppervlak. De auteur wil benadrukken dat deze hypothese enkel berust op de resultaten van de in deze studie uitgevoerde proeven en hier nog geen enkel theoretisch bewijs van voor handen is. Verdere proeven zouden hoe dan ook nog nodig zijn om deze mogelijke verklaring aan zijn juistheid te toetsen.

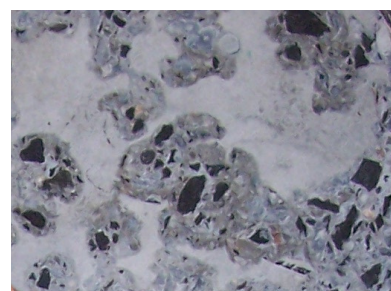
Op één maand ouderdom heeft de cementpasta van volledig recyclebaar beton, rekening houdend met het gebruik van vliegashoudend beton, nog niet zijn volledige sterkte bereikt. Hierdoor zou het kunnen dat, wanneer scheuren van het ijs ontstaan, de cementpasta niet sterk genoeg is om de voortzetting van deze scheuren te belemmeren. Als gevolg hiervan zal dan een hoeveelheid cementpasta afschilferen. Indien de pasta op dat moment echter nog vrij zwak is, zal de hoeveelheid afgeschilferd materiaal beperkt blijven. De scheur zal immers net onder het oppervlak van het beton lopen, gezien een scheur steeds de “meest zwakke weg zoekt”, in dit geval dus de kortste afstand.

Op drie maand ouderdom - onder meer door de puzzolane reactie van de in het recycleerbare beton aanwezige vliegashoudend beton - zal de cementpasta normaliter reeds een grotere sterkte hebben bereikt.

Het zou kunnen dat deze pasta echter nog niet sterk genoeg is om de scheuren in de ijslaag te weerstaan. Doordat het beton echter reeds sterker is, zal het een grotere massa materiaal afschilferen wanneer een dergelijke scheur zich in het beton voortzet. Bovendien werd vastgesteld, dat de afschilfering van de recycleerbare mengelingen, ook hoeveelheden kalksteengranulaat bevatte. Dit duidt erop dat de cementpasta in deze gevallen sterker of even sterk als de granulaten is, waardoor de scheur zich doorheen het granulaat kan voortzetten. De gelaagde opbouw van kalksteengranulaten kan dergelijke breukvlakken in de hand werken. Bij T(0,45), waar geen gebruik werd gemaakt van kalksteenslag, werden geen afgeschilferde granulaten waargenomen. Dit kan er op wijzen dat deze granulaten nog steeds een grotere sterkte bezitten dan de cementpasta. Op zes maand ouderdom tenslotte, neemt de hoeveelheid afgeschilferd materiaal opnieuw af, maar bevinden zich wel nog steeds stukjes kalksteengranulaat tussen de afgeschilferde massa. Het is mogelijk dat de cementpasta nog verder in sterkte is toegenomen en de scheuren in het ijs zich niet meer zo makkelijk kunnen doorzetten in het beton. Wanneer zich toch een scheur in het beton voordoet, zal deze scheur zich eveneens kunnen doorzetten doorheen de kalksteengranulaten. Figuur 5-1 en Figuur 5-2 geven een beeld van de afgeschilferde proefstukken.



Figuur 5-1: Afstrijkvlak T(0,45) op 6 maand ouderdom na 28 vorst-dooicycli



Figuur 5-2: Bekistingsvlak CRC 1 op 6 maand ouderdom na 28 vorst-dooicycli

Het feit dat een bekistingsvlak voor elk recyclebaar mengsel een grotere afschilfering vertoont dan het afstrijkvlak, kan als oorzaak hebben dat het wandeffect ervoor zorgt dat er steeds een grotere hoeveelheid cementpasta aanwezig is bij het bekistingsvlak dan in de massa van het beton. Dit is veel minder het geval voor het afstrijkvlak, waar granulaten bij het afstrijken gedeeltelijk in het beton worden geduwd, en het vooral de cementpasta is die wordt afgeschraapt. Gezien de scheuren steeds zullen ontstaan in deze pasta, is de kans op scheuren voor dit vlak, ongeacht de beproefde leeftijd, steeds groter dan voor het bekistingsvlak. Enkel bij T(0,45) ligt de afschilfering aan het afstrijkvlak hoger dan aan het bekistingsvlak op 6 maand ouderdom. Dit verschijnsel zou te

wijten kunnen zijn aan een zwakke kwaliteit van dit afstrijkvlak en hoeft dus niet noodzakelijk de hierboven vermelde theorie tegen te spreken. De bijzonder grote spreiding op de individuele resultaten voor dit mengsel, vergroot dit vermoeden. Bovendien werden voor dit beton geen proeven op 1 en 3 maand ouderdom uitgevoerd op het afstrijkvlak, zodat de vergelijkingsbasis beperkt is.

Telkens werd een min of meer lineair in de tijd toenemend verband waargenomen. Dit valt te verklaren doordat het beton steeds verder zal blijven afschilferen, tot er een betonlaag wordt bereikt die sterk genoeg is om te zorgen dat geen enkele scheur in het ijs zich nog kan doorzetten in het beton. Enkel voor het bekistingsvlak van CRC 3b werd op één maand ouderdom een soort vage bovengrens waargenomen, waarbij de afschilfering niet meer recht evenredig met het aantal vorst-dooi-cycli toenam. Zoals te zien in Figuur 5-3 was op dat ogenblik quasi het volledige bovenste oppervlak van de proefstukken al afgeschilferd, waardoor het mogelijk is dat de betonlaag die daar aan het oppervlak kwam, reeds een grotere sterkte bezat en het niet-lineair verband teweeg bracht.



Figuur 5-3: Bekistingsvlak CRC 3b op 1 maand ouderdom na 28 vorst-dooicycli

Tot slot werd op de meeste proefresultaten een vrij grote spreiding op de individuele waarden waargenomen. Dit zou te wijten kunnen zijn aan het feit dat de mate waarin een proefstuk zal afschilferen, zeer sterk afhankelijk is van de sterkte van het oppervlak zelf. Zo zou een plaatselijke zwakke plek in het beton een potentiële scheuraanzet kunnen vormen. Daarenboven neemt, in het geval van referentiemengsel T(0,45), de grootte van de spreiding toe bij toenemende afschilfering. Dit kan te verklaren zijn doordat, wanneer de afschilfering toeneemt, de granulatenmatrix meer en meer wordt blootgesteld. Deze zone zou een zeer variabel gedrag kunnen bezitten, doordat bijvoorbeeld een klein granulaat desgevallend in één keer los kan komen meteen een belangrijk aandeel in de massa aan afgeschilferd materiaal kan vertegenwoordigen. Deze groter wordende spreiding bij toenemende afschilfering is veel minder uitgesproken aanwezig bij de recycleerbare mengsels met kalksteengranulaten (zie ook paragraaf 4.5). Zoals hoger aangehaald zullen

kalksteengranulaten niet noodzakelijk sterker zijn dan de cementpasta, zodat deze granulaten mee kunnen breken met deze pasta (zeker wanneer de gelaagde granulaten met hun “lagen” evenwijdig liggen aan het beproefde oppervlak). Dit kan verklaren waarom de spreiding voor de mengsels met kalksteengranulaten niet significant stijgt bij toenemende afschilfering: Het effect van het “loskomen” van granulaten speelt hier een veel kleinere rol.

Om de plaatselijke oppervlaktesterkte van een betonmengsel te kunnen bepalen, werden op ongeveer zes maand ouderdom afslijtproeven uitgevoerd op zowel afstrijkvlak als bekistingsvlak van CRC 1, CRC 2 en T(0,45). De resultaten van deze proef konden echter geen significant verschil tussen afstrijkvlak en bekistingsvlak identificeren. Het is echter onzeker dat de weerstand tegen afslijten enig verband houdt met de weerstand tegen scheuren van het betonoppervlak. Anders gezegd, het is onzeker dat een beton met een hoge schuurweerstand eveneens een hoge scheurweerstand bezit. Bovendien zal het bij een afslijtproef moeilijk zijn om een plaatselijke, zwakke zone te ontdekken. Het proefstuk wordt bij deze test namelijk gedwongen om gelijkmatig af te slijten, waardoor een eventueel plaatselijk sterker oppervlak (bijvoorbeeld veroorzaakt door een uitstekend hard granulaat) het grootste deel van de slijtkracht zal opnemen en de zwakkere delen van het oppervlak slechts evenveel zullen afslijten als de minder sterke delen. De proef werd enkel uitgevoerd op 6 maand ouderdom, zodat tevens geen vergelijking mogelijk is met de globale afslijtweerstand op verschillende leeftijden.

Een tweede techniek om de oppervlaktesterkte van het beton te begroten, bestond erin het beton te onderwerpen aan een trekproef, waarbij een vastgekleefde cilinder van het betonoppervlak werd afgescheurd. Deze proef werd uitgevoerd op het afstrijkvlak en bekistingsvlak van CRC 2. De hoeveelheid afgescheurd materiaal bij het bekistingsvlak was significant groter dan deze van het afstrijkvlak. Deze proef werd echter enkel op betonmengeling CRC 2 uitgevoerd, zodat geen verregaande conclusies hieraan verbonden mogen worden. Toch kan het waardevol zijn om deze proef voor verschillende betonoppervlakken uit te voeren om de oppervlaktesterkte te begroten. Er dient dan wel rekening mee te worden gehouden, dat een grotere, afgescheurde massa, niet per se hoeft te betekenen dat meer materiaal zal afschilferen. Wanneer de kracht, nodig om de cilinder van het betonoppervlak los te scheuren, vrij groot wordt, is het zeer twijfelachtig of een scheur in het ijs wel diezelfde kracht zal kunnen ontwikkelen om te kunnen propageren in het beton.

Bij deze trekproef werd overigens vastgesteld dat de cementpasta, zoals hoger werd verondersteld, inderdaad een hogere sterkte kan bereiken dan de kalksteengranulaten. In de afgescheurde massa bij het bekistingsvlak van CRC 2 bevonden zich namelijk afgebroken stukjes kalksteengranulaat. De scheur had hier dus zowel de cementpasta als kalksteengranulaten doorsneden.

- *Voorstel tot verder onderzoek*

Om deze theorie te bevestigen, zouden echter meer proefresultaten voorhanden moeten zijn voor verschillende mengsels en op verschillende betonleeftijden. Bovendien zou het interessant zijn om ook grote betonoppervlakken te onderzoeken, zodat duidelijk wordt in welke mate de plaatselijke karakteristieken, eerder dan de globale eigenschappen van het mengsel, bijdragen tot de weerstand tegen vorst en dooizouten. Daarnaast zou de grootte van de verwijderde schilfers op verschillende leeftijden op een of andere manier gemeten moeten worden. Indien op een latere betonleeftijd steeds grotere schilfers van het betonoppervlak loskomen, zou dit erop kunnen wijzen dat de mate van afschilfering afhankelijk is van de sterkte van de cementpasta op het ogenblik van het beproeven. Tot slot zou het scheurpatroon in het ijs kunnen vergeleken worden met het scheurpatroon in het betonoppervlak. Op die manier kan nagegaan worden of het inderdaad de scheuren in het ijs zijn, die zich voortzetten in het betonoppervlak en de theorie van glue spalling hiermee bevestigd wordt.

5.2. Indringing van chloriden

- *Cyclische onderdompeling*

Aan de hand van cyclische onderdompeling van proefstukken in een oplossing van 3,5m% NaCl, werd een getijde gesimuleerd. Twee verschillende opstellingen werden gehanteerd om deze cyclus te bewerkstelligen. De opstelling met het TAP-wiel beschreef een cyclus van één uur waarvan de proefstukken zich gedurende 20 minuten onder water bevonden. Bij de opstelling met betonkubussen werden twee verschillende regimes gehanteerd: Een aantal proefstukken doorliepen een cyclus van één uur waarbij ze zich gedurende ongeveer 15 minuten onder water bevonden, bij een andere reeks waren de periodes onder en boven water telkens 12 uur. De idee achter deze opstellingen was het simuleren van blootstellingsklasse XS3, volgens Eurocode 2 (2002) de meest schadelijke blootstellingsklasse voor gevaar op corrosie door indringing van chloriden uit zeewater. Deze blootstellingsklasse is van kracht voor alle gewapende of voorgespannen betonconstructies die zich in getijde-, spat- of nevelzones van zeewater bevinden.

De belangrijkste vaststelling hierbij was, dat de indringing van chloriden op geen enkele leeftijd en voor geen enkel mengsel een significante stijging in functie van het aantal doorlopen cycli kende. Ook werd geen verschil waargenomen in de indringingsdiepte in functie van de duur van één cyclus. In het vorige hoofdstuk (zie paragraaf 4.6.1) werd reeds een mogelijke verklaring gegeven voor het feit dat de indringing niet lineair toeneemt met de vierkantswortel uit de tijd, zoals zou kunnen verondersteld worden wanneer het indringingsmechanisme wordt gezien als een

combinatie van diffusie en absorptie. Een soort evenwicht zou namelijk kunnen bekomen worden tussen de binnendringende chloriden (onderdompeling) en de uit het beton migrerende chloriden (droge periode).

De conclusie die in dat geval gemaakt zou kunnen worden, is dat cyclische onderdompeling niet per se de meest schadelijke categorie hoeft te zijn voor depassivering van de wapening door chloriden. Eens er depassivering is opgetreden is XS3 hoe dan ook de meest kritische omgevingsklasse voor chloride-geïnitieerde corrosie want dan spelen de 3 noodzakelijke factoren met betrekking tot corrosie: depassivering, aanwezigheid van water en aanwezigheid van lucht. Deze redenering zou echter enkel geldig zijn indien de cycli een regelmatig verloop kennen en de tijdsduur van de cycli voldoende laag blijft. De hierboven aangenomen hypothese wil dus zeker niet ontkennen dat blootstellingsklasse XS3 de meest ongunstige blootstellingsklasse voor chloride-geïnitieerde corrosie is. Het is immers niet ondenkbaar dat bepaalde delen van mariene constructies die zich normaliter permanent onder water bevinden en bijgevolg verzadigd zijn met zeewater, occasioneel gedurende een langere tijd boven water komen. Indien het droogfront in dat geval de wapening bereikt, zal corrosie kunnen optreden. De overige twee blootstellingsklassen met betrekking tot chloriden uit zeewater, XS1 en XS2 die in Eurocode 2 worden aangegeven, hebben immers respectievelijk betrekking tot gewapende betonconstructies die niet in direct contact staan met zeewater en permanent ondergedompelde constructies en zullen dus per definitie een kleiner risico op corrosie met zich meebrengen.

- *Voorstel voor verder onderzoek*

Gezien de uitgevoerde proeven voor cyclische onderdompeling slechts een korte tijdspanne (maximaal 20 weken) omvatten, zouden de proeven in de eerste plaats verder opgevolgd kunnen worden om een beter beeld te krijgen van de indringing op langere termijn.

Om de invloed van de duurtijd van cycli na te gaan, zouden proefstukken aan cyclische onderdompeling kunnen onderworpen worden, waarbij ze bijvoorbeeld gedurende één of meerdere weken onder water blijven en vervolgens ook gedurende eenzelfde periode in droog regime verblijven. Volgens de hierboven opgezette redenering, zou de indringing voor deze proefstukken eveneens een constant verloop in functie van de tijd moeten kennen, maar zou de grens waarrond deze indringing schommelt, hoger liggen dan het geval is voor kortere cycli.

Ook zou het interessant kunnen zijn om een aantal proefstukken te onderwerpen aan volledige onderdompeling. Volgens Oh & Jang (2007) wijkt het chloride-indringingsprofiel onder getijdenwerking sterk af van dit bij volledige onderdompeling. In voornoemde studie werd een

grotere hoeveelheid chloriden waargenomen onder getijdenwerking ter hoogte van het betonoppervlak dan het geval was onder volledige onderdompeling. De hoeveelheid chloriden in het beton nam in het eerste geval echter parabolisch af naarmate de diepte groter werd, terwijl de afname in het tweede geval lineair verliep. Hierdoor was de hoeveelheid chloriden in het beton op ongeveer 10mm diepte al groter onder volledige onderdompeling dan bij getijdenwerking. Door beide proeven tegelijk uit te voeren, zou een beter beeld kunnen verkregen worden van de mate waarin er een wezenlijk verschil zou bestaan. Ook zou het in dat opzicht interessant kunnen zijn het chloridgehalte in het beton in functie van de diepte onder het oppervlak op te meten, zodat een beter beeld wordt verkregen van de hoeveelheid chloriden in het beton. Zilvernitraat als kleurindicator kan namelijk enkel een grens aanduiden waarboven – voor beton op basis van portlandcement – de chlorideconcentratie 0,07 N bedraagt, maar met deze meetmethode is bijgevolg ook enkel de concentratie aan chloriden gekend ter plaatse van deze kleuromslag.

Tot slot zou de invloed van de concentratie chloriden in de oplossing onderzocht kunnen worden. Hiermee kan dan vervolgens geschat worden hoe groot de invloed is van diffusie in het beton ten opzichte van absorptie door het beton.

▪ CTH-proeven

Door middel van CTH-proeven werd de migratiecoëfficiënt van de verschillende betonsoorten op 6 maand ouderdom bepaald, waaruit vervolgens de diffusiecoëfficiënt berekend werd. Deze diffusiecoëfficiënt bleek heel wat hoger te liggen voor referentiemengsel T(0,45) dan voor CRC 1 en CRC 2. Volgens Thomas & Bamforth (1999) bezit beton met 30% vliegas (70% CEM I) op jonge leeftijd een gelijkaardige en na 6 maand reeds een lagere diffusiecoëfficiënt dan beton met 100% CEM I, te danken aan de gemiddeld kleinere poriëngroottes bij gebruik van vliegas. Op 6 maand ouderdom bezitten de beproefde recycleerbare mengsels (CRC 1 met 35% vliegas en 65% CEM I, CRC 2 met 35% vliegas en 65% CEM III) een hogere capillaire, totale en gelporositeit dan T(0,45), zodat deze aanname waarschijnlijk niet geldig is voor de hier beproefde mengelingen.

Volgens het Cement&BetonCentrum (1976-2001) zou de cementsteen op basis van hoogovencement meer chloriden kunnen binden dan deze op basis van portlandcement, waardoor het aantal capillaire poriën zal dalen, wat de indringing van chloriden afremt. Voor het afstrijkvlak vertoont CRC 2 echter een grotere diffusiecoëfficiënt dan CRC 1, maar gezien de korte duurtijd van de proef, was het ook weinig waarschijnlijk dat de mate waarin chloriden kunnen gebonden worden, een grote rol zal spelen.

Tot slot wordt nog opgemerkt dat voor de waarde van " c_d ", nodig ter bepaling van de migratiecoëfficiënt, de waarde 0,07N werd aangenomen. Deze waarde is geldig voor beton met enkel portlandcement als bindmiddel, maar Tang (1996) stelt dat het gebruik van een ander cement weinig invloed heeft op het resultaat en dus dezelfde waarde voor c_d mag aangenomen worden, zolang de gemiddelde indringing meer dan 5mm bedraagt. Voor CRC 1 en CRC 2 bedroeg deze gemiddelde indringing echter niet steeds meer dan 5mm. Gezien in de literatuur echter geen alternatieve waarden werden teruggevonden, werd toch de waarde voor portlandcement aangenomen. Hoe dan ook is de opgemeten indringing kleiner bij de recycleerbare mengsels dan bij T(0,45), zodat deze opmerking niets afdoet van de algemene conclusies die getrokken werden m.b.t. de weerstand van het beton tegen indringing van chloriden.

- *Voorstel tot verder onderzoek*

Met inachtneming van de hierboven geformuleerde opmerking m.b.t. parameter c_d , zou het interessant kunnen zijn om via een andere proefmethode de diffusiecoëfficiënt voor deze proefstukken te herberekenen en het resultaat ervan te toetsen aan het resultaat dat via deze methode werd bekomen. Eventueel kan de diffusie bijvoorbeeld opgemeten worden door een met water verzadigd proefstuk bloot te stellen aan een chloridenoplossing. Een andere mogelijkheid is om de chloride-indringing via een andere techniek dan met zilvernitraat als kleurindicator, op te meten. Met behulp van titraties op betonpoeder, dat uit verschillende zones van het aangetaste beton losgewerkt kan worden, zou het chlorideprofiel meer exact kunnen opgemeten worden.

5.3. Carbonatatie

In het vorige hoofdstuk werd reeds aangegeven dat, bij het voorspellen van de carbonatatediepte, de wet van Fick ($x=k.t^{0.5}$) zou aangepast kunnen worden tot $x=k.t^{0.4}$, om zo rekening te houden met de verminderende carbonatatiesnelheid in functie van de tijd.

Volgens Sulapha (2003) en Atis (2003), zou de carbonatatediepte kunnen voorspeld worden aan de hand van de druksterkte van het beton. Beton met een hogere druksterkte, zou een lagere carbonatatiecoëfficiënt bezitten. Voor de mengsels die in deze studie werden geanalyseerd, kan echter geen logisch verband tussen de druksterkte en de carbonatatiecoëfficiënt van een mengsel, worden gevonden.

- *Voorstellen voor verder onderzoek*

Volgens Atis (2004) daalt de carbonatatediepte wanneer de porositeit daalt. Omdat in deze studie geen resultaten voor porositeit en carbonatatie beschikbaar zijn op dezelfde leeftijd, kan deze bevinding niet gestaafd worden. Verder onderzoek hieromtrent zou meer duidelijkheid kunnen brengen.

Ook proeven op langere termijn zouden nuttig kunnen zijn om te zien of de carbonatatediepte het best kan benaderd worden door een lineair verband met $t^{0.4}$ of door een lineair verband met $t^{0.5}$.

5.4. Mortelproeven

De bevindingen met betrekking tot het gebruik van bindingsvertragers werden uitgebreid besproken in het vorige hoofdstuk. De belangrijkste resultaten worden hier samengevat. Voor duiding bij deze conclusies wordt verwezen naar paragraaf 4.8.

Wijnsteen zuur, noch citroenzuur, slagen erin de zeer snelle hydratatie van hoogovencement in combinatie met aluminaatcement voldoende af te remmen. Bij gebruik van poedervormig citroenzuur was de eerste minuten na het mengen een licht verbeterde verwerkbaarheid waar te nemen, maar deze verbetering duurde slechts zeer kortstondig.

Het gebruik van 0,10m% citroenzuur tast de druksterkte van het mengsel op 28 dagen ouderdom aan. Een daling van de gemiddelde druksterkte van 11% werd waargenomen. Dit zou het gevolg kunnen zijn van het feit dat citroenzuur zich vasthecht op een beperkte hoeveelheid cementeerbaar materiaal en er een moeilijk verbreekbare verbinding vormt.

Ondanks de toepassing van de MBE-methode bij het maken van de mortels, werd een schaaleffect vastgesteld wanneer de verwerkbaarheid van het mengsel onderzocht werd. Dit effect was niet aanwezig wanneer de bindingssnelheid met ultrasone transmissie werd opgemeten: Een gelijkaardig verloop van de golfsnelheid voor de mortel en het beton werd geregistreerd. Dit kan nogmaals aantonen dat citroenzuur als bindingsvertrager enkel gedurende de eerste minuten actief de hydratatie kan vertragen (wanneer de ultrasone transmissie om praktische redenen nog niet kan opgestart worden).

- *Voorstel tot verder onderzoek*

In de eerste plaats zou onderzocht kunnen worden of er tevens een significant verschil in druksterkte aanwezig is op hogere betonleeftijden bij gebruik van citroenzuur. Zo niet, zou dit kunnen betekenen dat de eventuele vasthechting van het citroenzuur op de cementpartikels op langere termijn toch verbroken kan worden.

Daarnaast zouden meerdere proeven op de consistentie-eigenschappen van de verse betonspecie uitgevoerd kunnen worden, zodat het schaaleffect door gebruik van mortels, omzeild kan worden. Deze consistentieproeven zouden zich bij voorkeur dan niet enkel beperken tot de eerste minuten na het mengen, maar veeleer tot op enkele uren ouderdom van het mengsel. Om een in de praktijk algemeen bruikbaar mengsel te bekomen, is een goede verwerkbaarheid van meer dan enkele minuten namelijk zeker een vereiste.

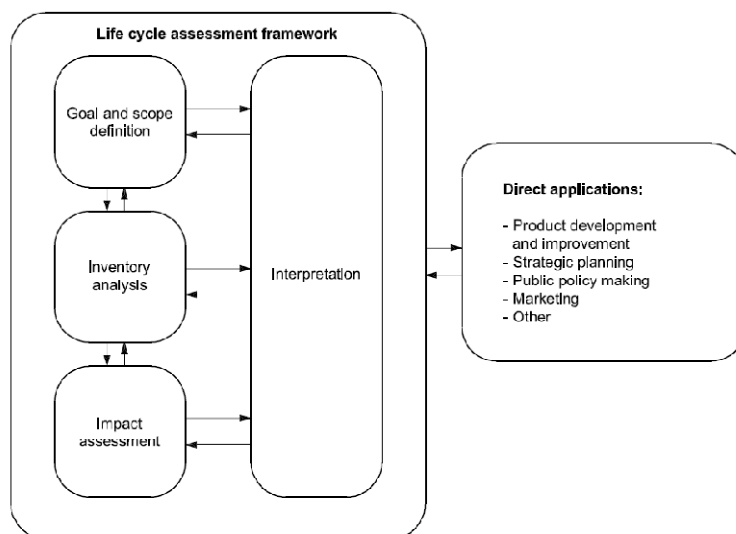
Tot slot, zou het effect van eventuele andere bindingsvertragers nader bekeken kunnen worden.

6. Levenscyclusanalyse

6.1. Inleiding

Levenscyclusanalyse (Life Cycle Assessment of LCA) is een vorm van onderzoek die het mogelijk maakt om de milieu-impact van een product – met de term “product” worden zowel de letterlijke, stoffelijke betekenis van het woord, alsook elke vorm van dienst bedoeld – te bepalen aan de hand van een internationaal gestandaardiseerde aanpak. De term LCA werd omstreeks 1990 gelanceerd voor een specifiek type van vergelijkende productstudie. Volgens ISO 14040 (2006) is LCA het opstellen en de evaluatie van de inputs, outputs en de potentiële milieueffecten van een productsysteem doorheen zijn levenscyclus. De methode bestaat er in het product op milieutechnisch vlak te bekijken over zijn gehele levenscyclus, met andere woorden vanaf het ogenblik van grondstoffenwinning tot en met recyclage of vernietiging. Levenscyclusanalyse wordt steeds belangrijker, zelfs noodzakelijk, als instrument voor productontwikkelaars en als argument voor beleidsmakers. Door rekening te houden met de resultaten van een levenscyclusanalyse krijgt het begrip “duurzaam bouwen”, naast de oorspronkelijke, letterlijke betekenis van het garanderen van een lange levensduur, een nieuwe connotatie: het beperken van de milieu-impact doorheen de gehele levenscyclus van een bouwproduct. Vanuit een nog breder perspectief kan duurzaamheid omschreven worden als het overkoepelend concept van het behoud of de verbetering van de economische, sociale en milieuaspecten in de maatschappij.

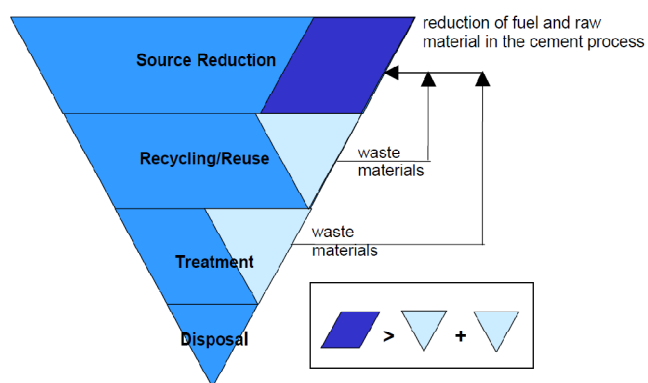
De standaardmethode voor uitvoering van een levenscyclusanalyse is vastgelegd door de Internationale Organisatie voor Standaardisatie (ISO) en dit in de ISO 14040 serie. Deze standaardisering is noodzakelijk om de vergelijking tussen verschillende studies slechts mogelijk is in een identieke context en bij equivalente randvoorwaarden. De LCA wordt volgens deze theorie opgedeeld in vier verschillende fasen (zie Figuur 6-1). Vooreerst worden het doel en de reikwijdte van de levenscyclusanalyse bepaald. De grenzen van het te onderzoeken systeem worden hierbij dus afgebakend, zowel in ruimte als in tijd (“the goal and scope definition phase”). In een tweede fase worden de verschillende deelgebieden met betrekking tot de milieu-impact bepaald: hierbij worden de gebruikte materialen, het productieproces, het gebruik van het product en de afdanking ervan onderscheiden (“the Life Cycle Inventory analysis phase” of “LCI phase”). De impact van de gehele levenscyclus wordt vervolgens berekend (“the Life Cycle Impact Assessment phase” of “LCIA phase”), waarna de bekomen resultaten van deze analyse op een voldoende kritische wijze geïnterpreteerd moeten worden (the interpretation phase) [ISO 14040 (2006), ISO 14044 (2006), Bras-Klapwijk et al. (2003), Desmyter et al. (2001)].



Figuur 6-1: Stadia van een LCA [ISO 14040 (2006)]

Om een levenscyclusanalyse te kunnen uitvoeren, is het definiëren van een functionele eenheid noodzakelijk. Het is immers onmogelijk producten met elkaar te vergelijken die in omvang, kwaliteit of levensduur grondig van elkaar verschillen. De functionele eenheid maakt het met andere woorden mogelijk om producten objectief te beoordelen en dit ten opzichte van een referentieproduct.

Door volledig recycleerbaar beton als rechtstreekse grondstof in te zetten bij cementproductie, helpt het zo rechtstreeks mee aan het verminderen van de ontginning van natuurlijke grondstoffen en bijgevolg aan een meer duurzame cementindustrie, zoals door Vigon (2002) wordt geïllustreerd: Figuur 6-2.



Figuur 6-2: Kwalitatieve relaties en stromen in een duurzaam industrieel proces [Vigon (2002)]

6.2. Bepaling doel en reikwijdte

6.2.1. Doel

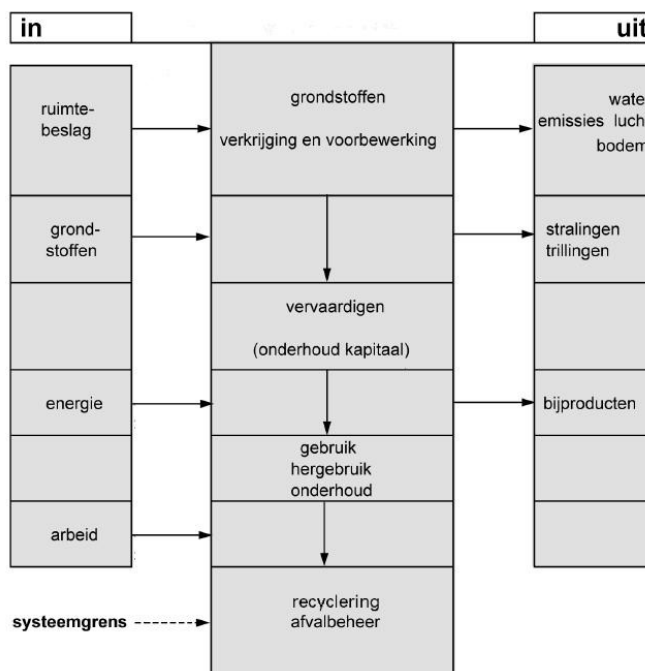
Het doel van de studie is de impact te bepalen van de verschillende ontwikkelde recycleerbare betonmengsels en deze te vergelijken met de impact van reeds bestaande, traditionele betonsoorten. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen enerzijds beton, vervaardigd als recycleerbaar mengsel, maar zonder gerecycleerd cement en anderzijds beton, eveneens samengesteld als recycleerbaar mengsel, maar met gebruik van cement dat gemaakt is van klinker, afkomstig is van een gerecycleerd betonmengsel. Deze betonsoorten worden vergeleken met de traditionele betonsoorten, eveneens met en zonder gebruik van gerecycleerd cement. Om deze betonsoorten eenduidig te definiëren wordt in dit werk de letter “T” (Traditional) vòòr de productnaam geplaatst wanneer dit betrekking heeft op traditioneel cement. Wanneer gebruik wordt gemaakt van gerecycleerd cement, zal de naam van het mengsel vooraf worden gegaan door de letter “R” (Recycled). In Tabel 6-1 worden de verschillende in dit hoofdstuk gebruikte betonsoorten overzichtelijk weergegeven. Wanneer de letter “T”, dan wel “R”, wordt weggelaten, heeft de verklaring betrekking op beide betonsoorten.

Tabel 6-1: Overzicht betonsoorten

	Mengsels met traditioneel cement	Mengsels met gerecycleerd cement
Volledig recycleerbare mengsels	T CRC 1	R CRC 1
	T CRC 2	R CRC 2
	T CRC 3a	R CRC 3a
	T CRC 3b	R CRC 3b
Referentiemengsels	T T(0,45)A	R T(0,45)A
	T T(0,50)	R T(0,50)

6.2.2. Bepaling van de systeemgrenzen

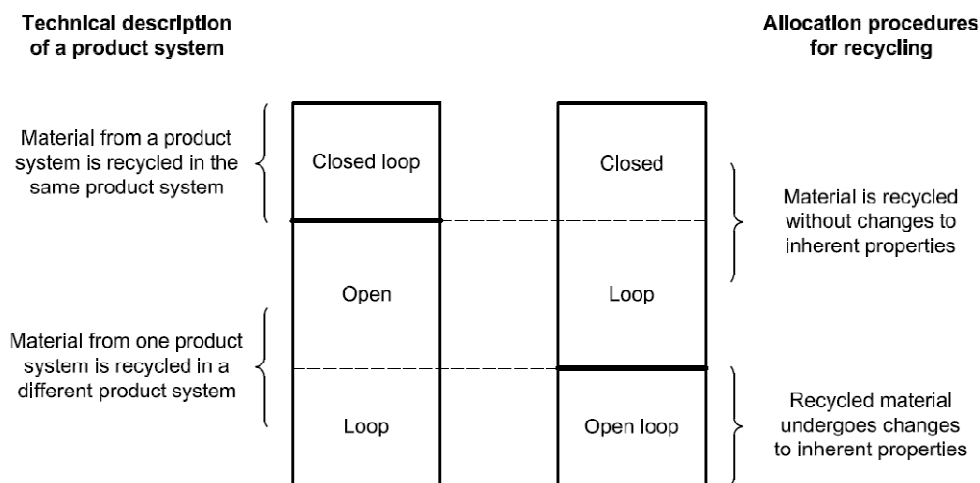
Om een adequate studie met betrekking tot milieu-effecten te kunnen uitvoeren, is het noodzakelijk om de systeemgrenzen van het product eenduidig te definiëren. De grens van een productsysteem is in de praktijk vaak moeilijk te bepalen. Een productsysteem is volgens Bras-Klapwijk et al. (2003) het gedeelte van de maatschappij dat zich bezighoudt met de productie/consumptie en afvalverwerking van een bepaald product. Elk systeem heeft op deze manier een in-kant en een uit-kant. Figuur 6-3 toont de systeemgrens van een productsysteem met een in- en uit-kant.



Figuur 6-3: Systeemgrenzen van een productsysteem met een in- en uit-kant
[Bras-Klapwijk et al. (2003)]

Milieu-ingrepen zijn alle fysische onttrekkingen en toevoegingen aan het milieu die het gevolg zijn van de instandhouding van een productsysteem [Bras-Klapwijk et al. (2003)]. Milieu-ingrepen kunnen zowel aan de in-kant als aan de uit-kant van het productsysteem liggen, bijvoorbeeld door onttrekking van grondstoffen en door emissies naar water, bodem en lucht. Milieu-effecten zijn principieel de gevolgen van milieu-ingrepen. De uitstoot van zwaveldioxide als milieu-ingreep is bijvoorbeeld verantwoordelijk voor het milieueffect “zure regen”.

Volgens ISO 14044 (2006) kunnen voor hergebruik en recyclage verschillende toewijzingsprocedures gevolgd worden. Afhankelijk van het feit of de afvalstoffen al dan niet belangrijke wijzigingen dienen ondergaan om ingezet te kunnen worden als grondstof voor het productieproces, worden “open loop” en “closed loop” recyclageprocessen beschreven. Hoewel een afvalproduct producttechnisch gezien dus tot een “open loop” systeem kan behoren, omdat het afvalproduct ingezet wordt als grondstof voor een van het oorspronkelijk proces verschillend product, kan het volgens bovenvermelde norm toch tot een “closed loop” recyclagesysteem behoren, omdat de afvalstoffen geen ingrijpende wijzigingen dienen te ondergaan om te voldoen als grondstof voor het secundaire proces. Figuur 6-4 geeft bovenstaande uitleg schematisch weer.



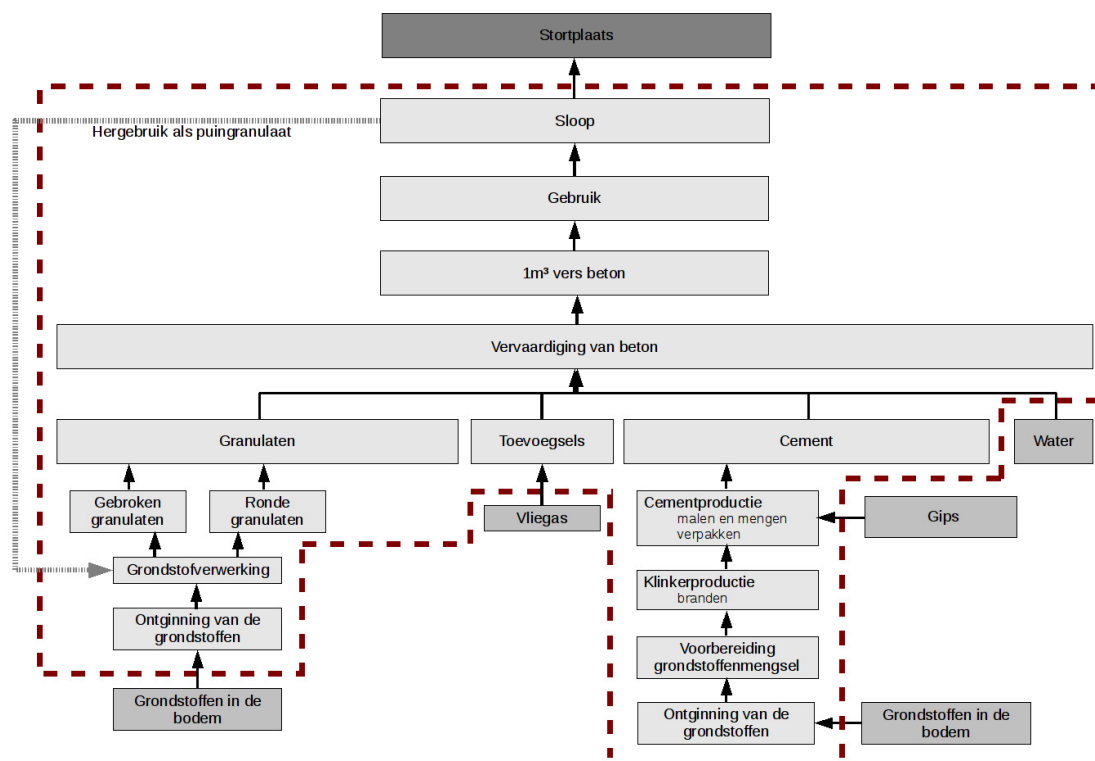
Figuur 6-4: Onderscheid tussen de technische beschrijving van een productsysteem en de toewijzingsprocedure voor recycling [ISO 14044 (2006)]

Volgens deze redenering zou het hergebruik van betonproducten als puingranulaten voor onderfundering of fundering voor wegen of soortgelijke “minderwaardige” toepassingen, geclassificeerd kunnen worden als een technisch open loop systeem, waarbij de toewijzingsprocedure eveneens als open loop kan beschouwd worden, wanneer het breken van het puin en het eventueel verwijderen van wapeningsstaal verwaarloosd wordt.

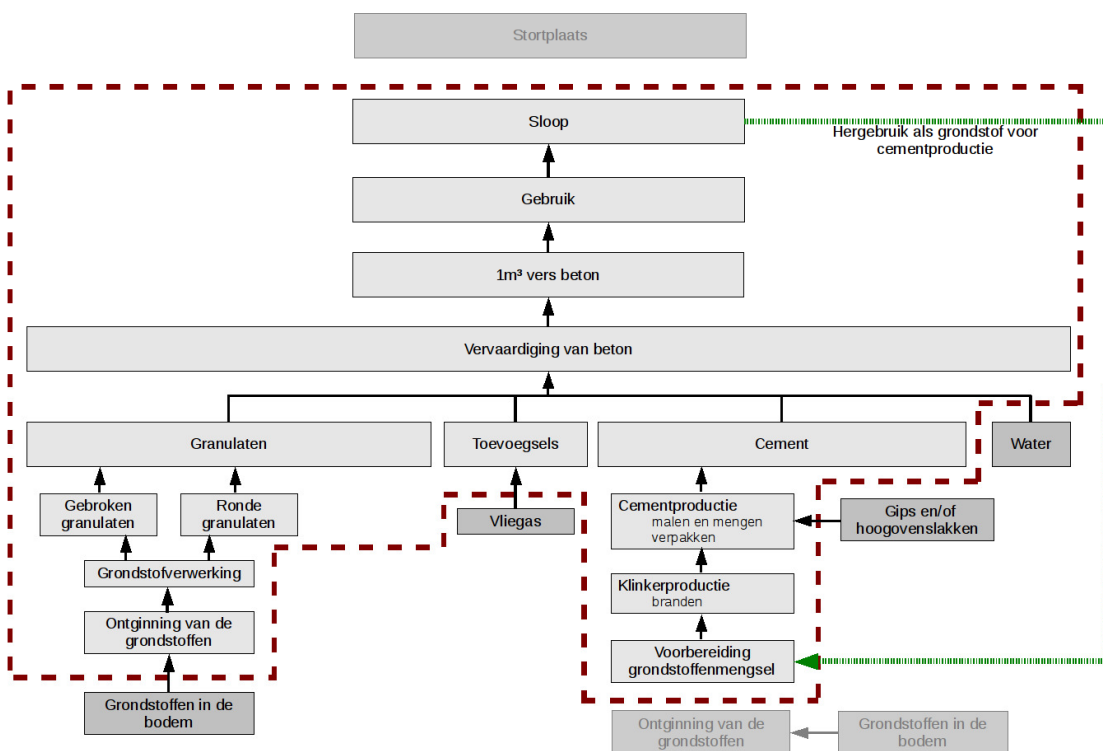
Indien daarentegen volledig recycleerbaar beton dat zijn levensduur bereikt heeft, integraal en zonder ingrijpende bewerkingen, hergebruikt kan worden als grondstof voor de klinkerproductie, beschrijft deze cyclus dus zowel vanuit product- als vanuit recyclagetechnisch standpunt een closed loop proces, indien de cement- en betonproductie als één geheel worden beschouwd. Indien de cementproductie als een individueel proces wordt benaderd, beschrijft het producttechnisch een open loop proces, maar blijft het vanuit het recycling-oogpunt closed loop.

Omdat de afbraak van de constructies hoe dan ook plaats moet vinden, ongeacht of het afbraakmateriaal al dan niet als grondstoffenmengsel voor de cementproductie ingezet zal worden, wordt in dit werk de impact die de afbraak teweegbrengt, toegewezen aan het oorspronkelijke beton.

Analoog aan het voorafgaand werk van De Schepper (2009) wordt de levenscyclus van het beton beschouwd vanaf de ontginning van grondstoffen, tot de afbraak van het product. Figuur 6-5 en Figuur 6-6 tonen de systeemgrenzen voor respectievelijk traditioneel en volledig recycleerbaar beton. De systeemgrens wordt afgebakend door de dikke streepjeslijn. Uiteraard is ook de combinatie van beide systemen mogelijk (zie ook Tabel 6-1), waarbij recycleerbaar beton wordt gemaakt met traditioneel cement of traditioneel beton met gerecycleerd cement.



Figuur 6-5: Levenscyclus met aanduiding van de systeemgrens voor traditioneel beton [De Schepper (2009)]



Figuur 6-6: Levenscyclus met aanduiding van de systeemgrens voor volledig recycleerbaar beton [De Schepper (2009)]

6.2.3. Bepaling van de functionele eenheid

6.2.3.1. Inleiding

Om elke betonsoort zo efficiënt mogelijk te gebruiken, wordt naargelang de toepassing, gekozen voor een ander type recycleerbaar beton. Zo is het niet noodzakelijk dat elk beton zowel een goede weerstand tegen carbonatatie en indringing van chloriden als een hoge vorst-dooi-bestandheid bezit. In de praktijk zullen deze aantastingsmechanismen namelijk niet noodzakelijk samen voorkomen of van even groot belang zijn. Bij ongewapend beton is bijvoorbeeld de carbonatatiesnelheid of de chloride-indringing van weinig belang, gezien het ontbreken van wapening die hierdoor aangetast zou kunnen worden. Evenzeer is de weerstand tegen vorst en dooizouten weinig relevant bij elke constructievorm die niet in aanraking komt met zouten, of waarop geen water kan stagneren. Om dus tot een optimaal materiaalgebruik te komen, is het belangrijk om het juiste mengsel voor de juiste toepassing te ontwikkelen, net zoals bij niet-recycleerbare mengelingen gebeurt.

6.2.3.2. Eén ton cement

Om de impact van de cement, met gebruik van gerecycleerd beton als grondstoffenmengsel enerzijds en een traditioneel grondstoffenmengsel anderzijds, te kunnen inschatten, wordt één ton cement als functionele eenheid gekozen. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de geregenereerde cement dezelfde kwaliteit bezit als de traditionele cement. Verder informatie over het al dan niet bereiken van deze kwaliteit voor de in dit werk gedefinieerde mengsels, kan teruggevonden worden in het parallelle werk van Vernimmen (2010).

Om de geregenereerde cement correct te kunnen gebruiken, wordt een nieuwe soort klinker gedefinieerd, vervaardigd uit volledig recycleerbaar beton. Elk energie- en grondstoffenverbruik dat gevolg is van ontginning en elke uitstoot van schadelijke stoffen die hiermee gepaard gaat, vervalt bij deze nieuwe klinkersoort. In de respectievelijke cementsoorten (R CEM I of R CEM III) wordt vervolgens de oude klinker vervangen door deze nieuw gedefinieerde.

De functionele eenheid “één ton cement” is in principe enkel van toepassing voor het vergelijken van de “gerecycleerde” en de “traditionele” cementsoorten onderling. De vergelijking tussen CEM I 52,5 N en CEM III 42,5 N LA, moet wel met enige voorzichtigheid worden gemaakt, gezien beide tot een verschillende sterkteklasse behoren. De Schepper (2009) merkt echter op dat, voordat een bovengrens werd vastgesteld voor de cementklassen, CEM I 52,5 N verkocht werd als een cement van sterkteklasse 42,5. Op die manier hoeft CEM I 52,5 N niet noodzakelijk veel sterker te zijn dan CEM III 42,5 N LA. De proeven op de sterkte van cementmortels in dit werk, waarbij op 28 dagen

ouderdom een hogere sterkte wordt bekomen met CEM III 42,5 N LA dan met CEM I 52,5 N, bevestigen deze opmerking.

6.2.3.3. Eén kubieke meter beton

In een eerste luik worden alle onderzochte betonsoorten, zonder rekening te houden met de resultaten van de aantastingsproeven en de druksterkte van ieder mengsel, met elkaar vergeleken. Op die manier wordt een globaal beeld bekomen van de eigenschappen van elk mengsel. Uiteraard dienen deze resultaten met de nodige omzichtigheid geïnterpreteerd worden, gezien de mengsels niet alleen verschillende weerstanden tegen elk mogelijk schademechanisme, maar ook een ongelijke sterkte bezitten.

6.2.3.4. CRC 2 – Een toekomst als wegebeton?

Gezien CRC 2 een hoge weerstand tegen vorst en dooizouten bezit, ligt een toepassing in de wegebouw hier erg voor de hand. Volgens Rens (2009) bestaan er twee soorten betonwegen. Platenbeton is ongewapend en bijgevolg wordt carbonatatie niet als schadelijk aanzien. Bij doorgaand gewapend beton bevindt de wapening zich op een diepte van minimaal 60mm. Dit is ruim voldoende opdat het carbonatatiefront de wapeningszone nooit zal bereiken gedurende de levensduur van de weg (gemiddeld 30 jaar). Zodoende is van de beschouwde schademechanismen enkel vorst- en dooischade relevant voor wegebeton. Schade door vorst en dooizouten is anno 2010 in België meer actueel dan ooit. Het extreme winterweer en het gebruik van dooizouten zorgden tijdens de winter van 2009-2010 voor 88,4 miljoen euro aan kosten voor herstellingswerken aan Vlaamse wegen [Crevits (2010)]. Een meer duurzaam wegebeton zou dergelijke schade kunnen voorkomen.

Als referentiemengeling wordt T(0,45)A voorgesteld. Zowel CRC 2 als T(0,45)A voldoen op 28 en 91 dagen ouderdom aan het in NBN EN 1338 (2003) gedefinieerde maximale massaverlies van 1kg/m^2 na 28 vorst-dooicycli en dit zowel voor afstrijk- als voor bekistingsvlak. Voor wegebeton lijkt hoe dan ook vooral het afstrijkvlak van belang te zijn. Gezien na analyse van de resultaten van het KMI gebleken is dat de norm van 28 cycli gemiddeld zeker een adequaat criterium is voor het vriesgedrag in België over een periode van tien jaar, kan gesteld worden dat er gedurende tien jaar geen vernieuwing, noch herstelling, van de weg nodig zal zijn door schade, veroorzaakt door dit mechanisme. Betonwegen worden volgens Rens (2009) vaak ontworpen met een voorziene levensduur van 30 tot 40 jaar. Dit ligt in de lijn van de bevindingen van Rovers & van den Beld, die een ontwerplevensduur van meestal 30 jaar naar voor schuiven, hoewel de uiteindelijke levensduur wel hoger kan uitvallen.

De dikte van een betonplaat is volgens De Winne (2008) in België gemiddeld 23cm voor autosnelwegen, en 20cm tot 30cm voor hoofd- en buurtwegen. Volgens het standaardbestek 250 (2006) moet wegenbeton voldoen aan de eisen vermeld in Tabel 6-2. De gebruikte cement dient minimaal van sterkteklasse 42,5 te zijn. Hierbij staan bouwklassen B1 en B2 voor hoofdwegen, B3 en B4 voor primaire wegen van categorie I, B5 en B6 voor primaire wegen van categorie II, B7 voor secundaire wegen en tot slot B8 voor lokale wegen.

Tabel 6-2: Eisen gesteld aan betonwegen [Standaardbestek 250 voor wegen (2006)]

Bouwklasse	Laag	Maximum nominale afmeting $D_{\max}$ van de granulaten in mm	Hoeveelheid cement C in kg/m^3	W/C - factor
B1 - B5	Bovenlaag (één- of tweelaags)	>20	≥ 400	$\leq 0,45$
		$6,3 < D_{\max} < 20$	≥ 400	$\leq 0,45$
		$< 6,3$ (alleen deklaag)	≥ 425	$\leq 0,45$
	Onderlaag in tweelaagsysteem	>20	≥ 375	$\leq 0,45$
B6 - B8	Bovenlaag (één- of tweelaags)	>20	≥ 350	$\leq 0,50$
		$6,3 < D_{\max} < 20$	≥ 375	$\leq 0,50$
		$< 6,3$ (alleen deklaag)	≥ 400	$\leq 0,50$
	Onderlaag in tweelaagsysteem	>20	≥ 350	$\leq 0,50$
Landbouwwegen		>20	≥ 325	$\leq 0,50$
		$6,3 < D_{\max} < 20$	≥ 350	$\leq 0,50$

Gezien het referentiemengsel T(0,45)A slechts een cementgehalte van 340kg/m^3 bezit en de maximale korrelmaat van de granulaten in dit beton 16mm bedraagt, kan dit beton in principe niet gebruikt worden als wegenbeton. Daarom wordt hetzelfde type beton theoretisch vervangen door een gelijkaardig mengsel, dat een cementhoeveelheid bezit van 400kg/m^3 , zodat het voor elk type weg ingezet kan worden. Er wordt aangenomen dat een hoger cementgehalte de betonkwaliteit enkel ten goede kan komen en de aantasting door vorst en dooizouten bijgevolg niet hoger zal liggen dan bij het oorspronkelijke mengsel.

De samenstelling van dit nieuwe mengsel, T(0,45)A-400, wordt weergegeven in Tabel 6-3.

Analoog aan wat hoger werd vermeld (zie paragraaf 6.2.1), zal dit mengsel dan gedefinieerd worden als T T(0,45)A-400 of R T(0,45)A-400, afhankelijk of het beton met traditioneel, dan wel gerecycleerd cement wordt gefabriceerd.

Tabel 6-3: Betonsamenstelling T(0,45)A-400

Componenten	Samenstelling	
	T(0,45)A	T(0,45)A-400
Zand 0/4 [kg/m ³]	715,00	668,76
Granulaten 2/8 [kg/m ³]	515,00	481,70
Granulaten 8/16 [kg/m ³]	671,00	627,61
CEM I 52,5 N [kg/m ³]	340,00	400,00
Water [kg/m ³]	153,00	180,00
Luchtbelvormer [ml/kg BM]	1,50	1,50
Superplastificeerder [ml/kg BM]	4,41	4,41
W/CM	0,45	0,45
Totale massa [kg]	2396	2360

Meestal worden betonwegen in twee lagen aangelegd, waarbij de top laag, wanneer deze door overmatige slijtage niet langer aan de eisen van de maatschappij voldoet, vernieuwd kan worden. Gemiddeld bedraagt de dikte van deze top laag 5cm tot 7cm [standaardbestek 250 van de wegenbouw (2006)]. De door het BIVV (Belgisch Instituut voor de VerkeersVeiligheid) aanbevolen ontwerpbreedtes voor rechte rijstroken worden weergegeven in Tabel 6-4.

Tabel 6-4: Aanbevolen ontwerpbreedtes per snelheidsregime [BIVV (2005)]
 [* 3,15 m bij hoogfrequent aanbod openbaar vervoer of belangrijk aandeel zwaar vrachtverkeer]

Snelheidsregime	Effectieve rijstrookbreedte [m]
50 km/u	2,75 m *
70 km/u	3,15 m
90 km/u	3,50 m

Voor de levenscyclusanalyse van CRC 2 en T(0,45)A-400 wordt geopteerd voor een rechte weg van bouwklasse B1 met totale dikte van 23cm, waarvan de dikte van de onderlaag 16cm en de dikte van de top laag 7cm bedraagt. Het wegdek bestaat uit één rijstrook met een breedte van 3,50m en een lengte van 1km. De vooropgestelde levensduur wordt vastgelegd op 30 jaar, waarbij om de 10 jaar de 7cm dikke top laag wordt vernieuwd. Door de levensduur van de top laag te beperken tot 10 jaar, overschrijdt de afschilfering door vorst-dooizouten het toegelaten maximum van 1kg/m² niet.

6.2.3.5. Een door kolommen isostatisch ondersteunde balk

Voor de recycleerbare mengsels CRC 1, CRC 3a en CRC 3b wordt een gewapende betonconstructie als concrete toepassing uitgewerkt. De toepassing is gebaseerd op de constructie die in Van den Heede et al. (2010) wordt geanalyseerd. Afhankelijk van de betonsoort en de concentratie aan koolstofdioxide (CO₂) in de lucht, zal het carbonatatiefrent sneller of minder snel evolueren in het beton. Op het ogenblik dat het carbonatatiefrent de wapening bereikt, zal onder invloed van water en lucht depassivering van de wapening en vervolgens ook roestvorming optreden. In dit werk wordt dit ogenblik gelijk gesteld aan het einde van de levensduur van de constructie. De ontwerplevensduur van de constructie bedraagt 100 jaar. Volgens de informatieve Annex F uit EN 206-1 (2000) bedraagt de ontwerplevensduur van een betonconstructie standaard 50 jaar. Omdat bij deze analyse vooral onderzoek wordt gedaan naar de duurzaamheid van beton, wordt de vooropgestelde levensduur hier echter op 100 jaar vastgelegd.

De omgeving waaraan het beton wordt blootgesteld is een afwisselend vochtige en droge omgeving en komt hierdoor volgens NBN EN 206-1 (2000) overeen met blootstellingsklasse XC4. In een dergelijke omgeving dient volgens de informatieve bijlage F van diezelfde norm het beton een minimum cementhoeveelheid van 300kg/m³, een maximum w/c-factor van 0,50 en een minimum sterkteklasse C30/37 te bezitten. NBN B15-001 (2004) stelt dezelfde voorwaarden, maar houdt rekening met een minimaal cementgehalte van 320kg per kubieke meter beton. De te onderzoeken betonsoorten voldoen aan deze eisen. Tabel 6-5 toont deze waarden voor de beschouwde mengsels. CRC 3b wordt in Tabel 6-5 twee maal weergegeven, gekenmerkt door [1] en [2]. Dit omdat voor hetzelfde beton aan de hand van de kubusdruksterkte op kubussen met zijde 150mm en 100mm een licht verschillende waarde werd bekomen, waardoor de proefstukken in een andere sterkteklasse terechtkwamen, respectievelijk C45/55 en C40/50.

Tabel 6-5: Eigenschappen mengsels

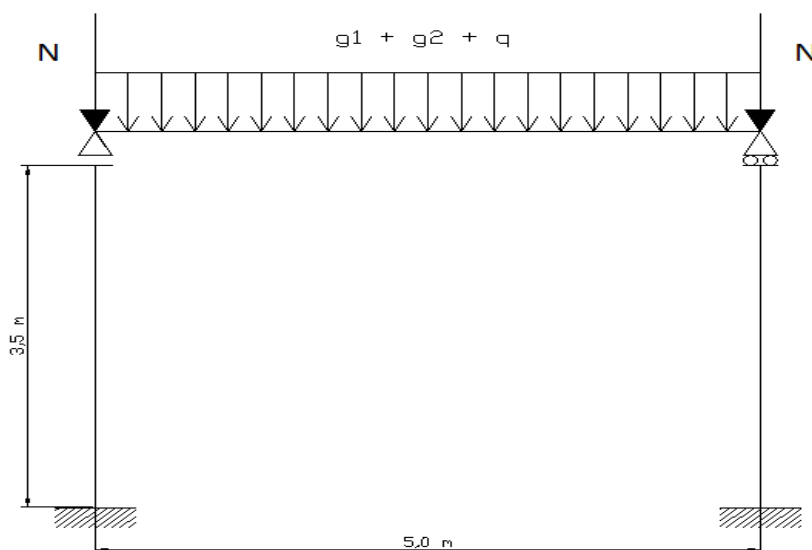
Mengsel	CRC 1	CRC 3a	CRC 3b [1]	CRC 3b [2]	T(0,50)	T C30/37
Sterkteklasse	C45/55	C45/55	C45/55	C40/50	C45/55	C30/37
Hoeveelheid BM [kg/m ³]	450	450	450	450	320	300
W/CM	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5

Er wordt eveneens een mengsel toegevoegd dat dezelfde eigenschappen bezit als T(0,50), maar met de minimum sterkteklasse en de minimale cementhoeveelheid benodigd voor deze omgeving volgens NBN EN 206-1 (2000). Dit mengsel wordt in dit werk T C30/37 genaamd en de samenstelling is terug te vinden in Tabel 6-6.

Tabel 6-6: Referentiemengsels T(0,50) en T C30/37

Mengsel	T(0,50)	T C30/37
Zand 0/4 [kg/m ³]	714,00	724,18
Granulaten 2/8 [kg/m ³]	515,00	522,34
Granulaten 8/16 [kg/m ³]	671,00	680,57
CEM I 52,5 N [kg/m ³]	320,00	300,00
Water [kg/m ³]	160,00	150,00
W/CM	0,50	0,50
Totale massa [kg]	2380,00	2377,10

De beschouwde structuur is volledig analoog aan de constructie die wordt beschreven in Van den Heede et al. (2010) bestaat uit een isostatische ligger, steunend op twee kolommen. De overspanning waarover de balk zich uitstrekt, bedraagt 5m en de kolommen bezitten een hoogte van 3,5m. Het wapeningsstaal is van kwaliteit B 500S. Op de ligger grijpt de belasting van het eigengewicht (g_1), een permanente belasting (g_2) van 13,5kN/m en een variabele belasting (q) van 11,25kN/m aan. Bovendien worden de kolommen elk nog belast door een permanente centrische belasting “N” van 868 kN. Deze toegevoegde centrische last is noodzakelijk om ervoor te zorgen dat de dimensies van de kolom enkel afhankelijk zijn van de sterkte van het gebruikte beton en van de belasting op de kolom. Zonder deze centrische last zouden andere factoren - zoals de minimumafmetingen om de uitvoering mogelijk te maken - een rol spelen bij de dimensionering van de kolom, zodat het effect van de sterkte van het mengsel slecht een secundair belang zou krijgen. De breedte van de kolommen en de ligger is constant en bedraagt 300mm. De opstelling wordt weergegeven in Figuur 6-7.



Figuur 6-7: Schematisch overzicht van de door kolommen isostatisch ondersteunde balk

Volgens Eurocode 4 (2002), 1992-1-1 bedraagt de minimale betdekking $c_{\min}$:

$$c_{\min} = \max \{c_{\min,b}; c_{\min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10mm\} \quad (6.1)$$

Hierbij is $c_{\min,b}$ gelijk aan de minimum betondekking, benodigd om de staalkrachten adequaat te kunnen overbrengen, in dit geval de staafdiameter, zijnde 16mm. Om de minimum betondekking volgens de blootstellingsklassen " $c_{\min,dur}$ " te bepalen, moet vooreerst bepaald worden tot welke structuurklasse de constructie behoort. Volgens Eurocode 2 (2002) behoort een standaard betonconstructie tot structuurklasse 4. Afhankelijk van bepaalde criteria, samengevat in Tabel 6-7, dient deze klasse vervolgens aangepast te worden. In dit geval dient de structuurklasse met 2 te worden verhoogd, omdat een ontwerpleeftijd van 100 jaar wordt nagestreefd. Omdat de sterkteklasse voor de beschouwde mengsels echter telkens groter dan of gelijk aan C40/50 is, mag de structuurklasse opnieuw met 1 worden verlaagd zodat structuurklasse 5 wordt bekomen. Enkel voor T C30/37 is dit niet het geval, voor dit beton wordt een structuurklasse 6 bekomen.

Tabel 6-7: Aanbevolen structurele classificatie [Eurocode 2 (2002)]

Criterion	Structural Class						
	Exposure Class (from Table 4.1 of EN 1992-1-1)						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1	XD2/XS1	XD3/XS2/XS3
Service life of 100 years	Increase class by 2	Increase class by 2	Increase class by 2	Increase class by 2	Increase class by 2	Increase class by 2	Increase class by 2
Strength Class (see notes 1 and 2)	$\geq C30/37$ Reduce class by 1	$\geq C30/37$ Reduce class by 1	$\geq C35/45$ Reduce class by 1	$\geq C40/50$ Reduce class by 1	$\geq C40/50$ Reduce class by 1	$\geq C40/50$ Reduce class by 1	$\geq C45/55$ Reduce class by 1
Member with slab geometry (position of reinforcement not affected by construction process)	Reduce class by 1	Reduce class by 1	Reduce class by 1	Reduce class by 1	Reduce class by 1	Reduce class by 1	Reduce class by 1
Special Quality Control of the concrete ensured	Reduce class by 1	Reduce class by 1	Reduce class by 1	Reduce class by 1	Reduce class by 1	Reduce class by 1	Reduce class by 1

Note 1: The strength class and water/cement ratio are considered to be related values. The relationship is subject to a national code. A special composition (type of cement, w/c value, fine fillers) with the intent to produce low permeability may be considered.

Note 2: The limit may be reduced by one strength class if air entrainment of more than 4% is applied.

Afhankelijk van deze structuurklasse wordt nu $c_{\min,dur}$ bepaald: Tabel 6-8. De minimale betondekking vanuit het oogpunt van duurzaamheid bedraagt op deze manier 35mm voor de recycleerbare mengsels en voor T(0,50). Voor T C30/37 bedraagt de betondekking 40 mm.

Tabel 6-8: Waarden van de minimaal benodigde dekking $c_{min,dur}$ met betrekking tot de duurzaamheid voor betonstaal

1.1.1 Omgevingseisen voor $c_{min,dur}$ (mm)							
Constructie-klasse	Milieuklasse volgens Tabel 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

De overige drie parameters $\Delta c_{dur,\gamma}$, $\Delta c_{dur,sl}$, $\Delta c_{dur,add}$ zijn achtereenvolgens van belang wanneer een extra veiligheid moet ingebouwd worden, er gebruik wordt gemaakt van roestvrij staal of het beton voorzien wordt van een extra beschermingslaag. Geen van deze drie voorwaarden is hier van toepassing, zodat deze parameters gelijk aan nul worden gesteld.

De carbonatatiecoëfficiënt toont de snelheid waarmee het carbonatatiefront zich doorheen het beton verplaatst en is hier gebaseerd op de resultaten voor het beton op 28 dagen ouderdom.

Formules (6.2) en (6.3) kunnen gebruikt worden om de carbonatatiecoëfficiënten te berekenen voor verschillende concentraties aan koolstofdioxide (CO_2), uitgaande van de coëfficiënt bij één bepaalde waarde. Hierbij stelt “ x ” de indringingsdiepte voor, “ k ” de carbonatatiecoëfficiënt en “ c ” de concentratie aan CO_2 . Analoog aan de bevindingen van Sisomphon & Franke (2007) wordt de “tijd” in vergelijking (6.2) tot de macht 0,4 i.p.v. de gebruikelijke 0,5 verheven, omdat op deze manier een betere correlatie met de indringingsdiepte wordt bekomen. Volgens Audenaert (2006) bedraagt de CO_2 -concentratie in een normale omgeving 0,03%, in een stadsomgeving 0,3% en in een industriegebied 1%. De verwachte levensduur voor de berekende betondekking wordt voor deze concentraties samengevat in Tabel 6-9.

$$x = k \cdot t^{0,4} \quad (6.2)$$

$$\frac{k_{acc}}{k_{env}} = \frac{\sqrt{c_{1,acc}}}{\sqrt{c_{1,env}}} \quad (6.3)$$

Tabel 6-9: Verwachte levensduur in functie van de CO_2 -concentratie bij een betondekking van 35mm

Mengsel	Carbonatatiecoëfficiënt [mm/week ^{0,4}]				Verwachte levensduur [jaar]			
	Concentratie CO ₂ [%]							
	10,00	1,00	0,30	0,03	10,00	1,00	0,30	0,03
CRC 1	0.8076	0.2554	0.1399	0.0442	>100	>100	>100	>100
CRC 3a	3.3774	1.0680	0.5850	0.1850	6.65	>100	>100	>100
CRC 3b	2.3544	0.7445	0.4078	0.1290	16.39	>100	>100	>100
T(0,50)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	>100	>100	>100	>100

Uit de waarden in Tabel 6-9 blijkt dat in geen enkele in de praktijk voorkomende omgeving de carbonatatiesnelheid te hoog zal worden om de vooropgestelde levensduur niet te bereiken. Indien niet met formule (6.2) was gewerkt, maar de tijd tot de macht 0,5 zou worden verheven zoals normaliter het geval is, zouden dezelfde besluiten m.b.t. de verwachte levensduur getrokken kunnen worden. Elk mengsel bereikt namelijk opnieuw een levensduur van meer dan 100 jaar voor elke beschouwde concentratie. Bij 10% CO₂ zou de verwachte levensduur van CRC 3a en CRC 3b respectievelijk 12,20 en 29,96 jaar zijn.

De carbonatatiecoëfficiënt voor T(0,50) wordt gelijk aan nul genomen omdat er bij de metingen die werden uitgevoerd bij de versnelde carbonatatie, nog geen indringing werd vastgesteld. Voor T C30/37 wordt dezelfde coëfficiënt aangenomen (bij een grotere betondekking). Indien over een langere periode zou worden opgemeten, zou wel een zekere carbonatatie geregistreerd worden, zodat de carbonatatiecoëfficiënt wel groter dan nul zal zijn, maar deze zal dan hoe dan ook voldoende laag liggen zodat het carbonatatiefront wapening niet te bereiken binnen de vooropgestelde levensduur van 100 jaar.

Er dient nog vermeld dat, indien er zou gerekend worden met de carbonatatiecoëfficiënt van het beton op 3 maand ouderdom, deze eveneens zowel voor CRC 1 als CRC 3 voldoende laag zou liggen opdat er in geen enkele omgeving schadelijke carbonatatie zou optreden.

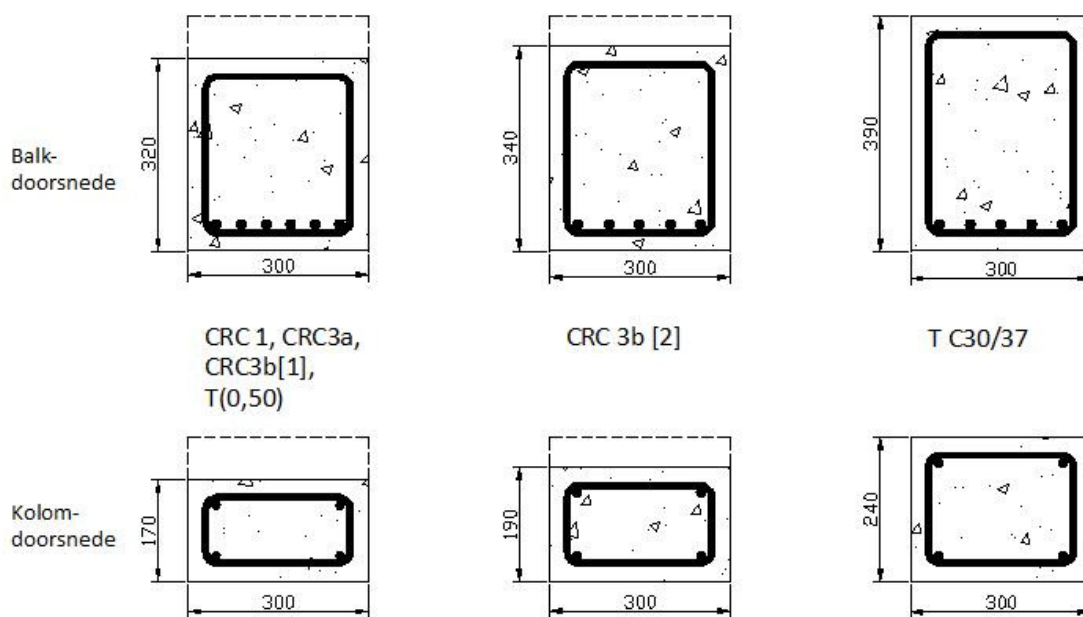
De berekeningen voor de sterkte van het beton en de benodigde wapening worden uitgevoerd conform NBN B15-002 Eurocode 2 (2005). Hierbij wordt de economische hoogte voor de ligger bepaald (i.e. de hoogte waarbij het staal de maximale rek (10‰) bereikt op het ogenblik dat het beton bezwijkt bij een stuik van 3,5‰). Tabel 6-10 toont de benodigde betonhoeveelheden en de te voorziene wapening voor deze constructie. Gezien CRC 1, CRC 3a, CRC 3b [1] en T(0,50) tot dezelfde sterkteklasse behoren en dezelfde betondekking vereisen, zal de benodigde betonhoeveelheid voor deze mengsels identiek zijn. Daarentegen zal de hoogte van de balk bij CRC 3b [2] 20mm hoger en bij T C30/37 70mm hoger liggen, terwijl ook de dikte van de kolommen voor deze mengsels respectievelijk 20mm en 70mm meer dient te bedragen dan voor de andere mengsels. Samen resulteert dit voor deze constructie in 0,072m³ meer betonverbruik voor CRC 3b [2] en een 0,252m³ groter verbruik voor T C30/37.

Als wapeningsdiameter wordt voor de balk geopteerd voor 16mm en voor de kolommen voor 14mm. CRC 3b [2] en T C30/37 kunnen hierdoor wel 1 wapeningsstaaf minder bezitten dan de overige mengsels. Figuur 6-8 toont de afmetingen en benodigde wapening van de balk en de kolommen voor de verschillende mengsels. Het benodigde staal voor beugels wordt niet in

rekening gebracht. De wapeningsstaven bezitten een theoretische lengte die precies gelijk is aan de overspanning van de balk.

Tabel 6-10: Overzicht benodigde hoeveelheden beton

Mengsel		CRC 1	CRC 3a	CRC 3b [1]	CRC 3b [2]	T(0,50)	T C30/37
Balk	Lengte [m]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
	Breedte [m]	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	Hoogte [m]	0,33	0,33	0,33	0,35	0,33	0,40
Staal	Diameter [mm]	16	16	16	16	16	16
	Aantal staven	6	6	6	5	6	5
Kolom	Lengte [m]	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
	Breedte [m]	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	Dikte [m]	0,17	0,17	0,17	0,19	0,17	0,24
Benodigd volume beton [m³]		0,8565	0,8565	0,8565	0,9285	0,8565	1,1085



Figuur 6-8: Afmetingen van de balk en de kolommen met gebruik van de verschillende mengsels

6.3. Inventarisatie en bepaling van de milieu-impact

6.3.1. Ecoinvent & SimaPro

De inventarisatie wordt voornamelijk gebaseerd op de Ecoinvent database [Kellenberger et al. (2007)], die is opgemaakt door het Zwitserse Centrum voor Levenscyclusinventarisatie (Swiss Centre for Life Cycle Inventories), dat marktleider is op het gebied van gegevensbanken voor levenscyclusinventarisatie.

De impactanalyse wordt berekend met behulp van het softwarepakket SimaPro, ontwikkeld door PRé Consultants (Productecology Consultants) in Nederland en dat de volledige Ecoinvent database bevat.

Alle analyses worden uitgevoerd aan de hand van twee algemeen aanvaarde methoden. De eerste methode betreft de Eco-indicator 99 (zie: Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (2000)), de tweede methode werd ontwikkeld door het IPCC en wordt de IPCC 2007 GWP – methode genoemd.

Om de consequentie in dit werk te verzekeren en om de vergelijking met andere producten relevant te houden, worden de berekeningen met betrekking tot het gebruik aan grondstoffen, de energiebehoefte en de uitstoot van broeikasgassen en andere emissies – tenzij anders vermeld – steeds gevoerd aan de hand van de algemeen aanvaarde gegevens uit de Ecoinvent-database.

Om het recycleerbaar beton als grondstof voor cementproductie te kunnen gebruiken, is het noodzakelijk een nieuw type klinker te definiëren. Dit type klinker wordt volledig gebaseerd op de bestaande klinker in de Ecoinvent-database, waarbij elke grondstof, energiebehoefte of emissie, die niet rechtstreeks van toepassing is bij gebruik van volledig recycleerbaar beton als grondstof, overeenkomstig aangepast wordt. Waar nodig, wordt hierbij toelichting verschaft in paragrafen 6.3.2, 6.3.3 en 6.3.4.

6.3.1.1. Eco-indicator 99

De eco-indicator 99 - methode definieert “standaard eco-indicatoren”, getallen die het totale milieueffect van een product of proces proberen te kwantificeren. Bij het uitvoeren van een levenscyclusanalyse is het resultaat vaak moeilijk te interpreteren. Binnen een levenscyclusanalyse kunnen dan wel verschillende categorieën onderscheiden worden, zoals de bijdrage van het product tot het broeikaseffect, de verzuring, etc. , doch de totale impact op het milieu wordt hiermee niet eenduidig begroot. Reden hiervoor is dat het niet duidelijk is welk gewicht de

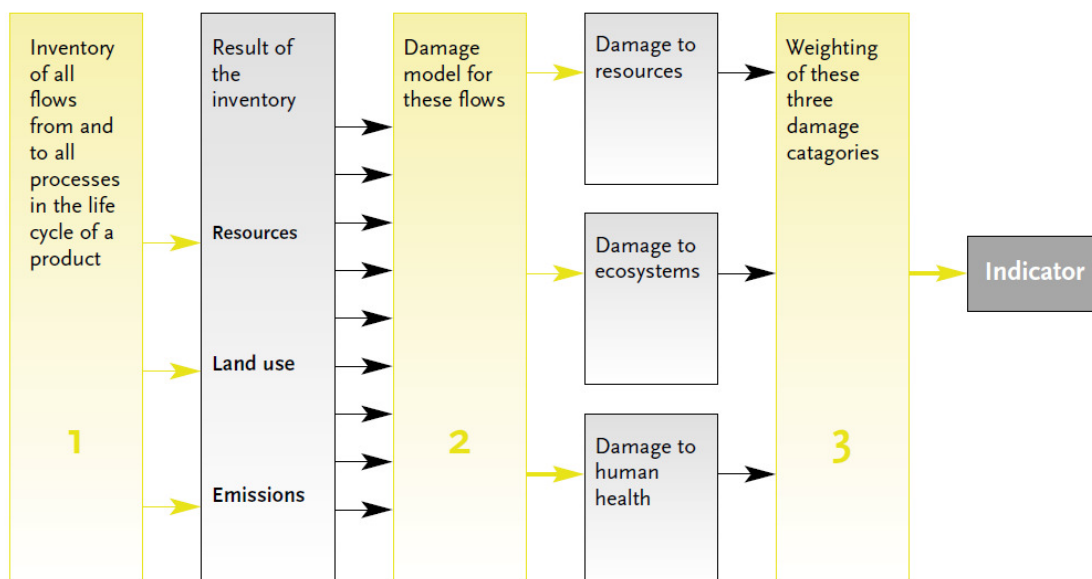
verschillende “onderdelen” toegekend moet worden. De Eco-indicator 99 biedt hiervoor een oplossing door een gewichtsverdeling toe te kennen aan de verschillende onderdelen. Door elke individuele impactcategorie te vermenigvuldigen met zijn specifieke gewichtswaarde, wordt de totale milieu-impact bepaald in de vorm van een eenduidige “score”. Omdat “milieu” een vaag begrip is, wordt deze term in Eco-indicator 99 gedefinieerd aan de hand van drie criteria waaraan schade kan worden veroorzaakt:

- *Volksgezondheid: Hieronder wordt het aantal en de duur van alle mogelijke ziektes en de vroegtijdige sterfte door milieuoorzaken verstaan. De effecten die hiertoe kunnen leiden worden opgesplitst in: Klimaatsverandering, aantasting van de ozonlaag, kankerverwekkende effecten, effecten op de ademhaling en ioniserende (nucleaire) straling.*
- *Kwaliteit van het ecosysteem: Onder deze categorie valt het effect op de diversiteit aan fauna en flora, met de klemtoon op de zogenaamde lagere organismen. De effecten die hierbij worden beschouwd zijn: Ecotoxiciteit, verzuring, eutrofiëring en het gebruik van land.*
- *Grondstoffen: Deze rubriek vertegenwoordigt de extra energie die in de toekomst nodig zal zijn om mineralen en fossiele brandstoffen aan de aarde te onttrekken. De uitputting van grondstoffen zoals zand en granulaten worden beschouwd in de categorie “Gebruik van land” en zitten dus niet in deze categorie vervat.*

Aan eco-indicatoren wordt als dimensie “punt” (Pt) toegekend. Uiteraard heeft deze eenheid geen enkel rechtstreeks verband met welke SI-eenheid dan ook. Een afgeleide eenheid hiervan is de millipunt (mPt), waarbij 1000mPt gelijk is aan 1Pt. De absolute waarde van de eco-indicatoren is weinig belangrijk, gezien het enige doel van deze eenheid het scheppen van een vergelijkingsbasis is. De schaal werd echter zodanig gekozen dat de waarde van 1Pt overeenstemt met één duizendste van de schade die jaarlijks teweeg wordt gebracht door de gemiddelde Europese inwoner. Waarden voor de eco-indicatoren werden toegekend aan zowel materialen (gebaseerd op 1 kilogram materiaal), productieprocessen (gebaseerd op de meest voor de hand liggende eenheid, bijvoorbeeld 1m², 1kg...), transportprocessen (meestal per ton.kilometer), energiegenererende processen (per eenheid van warmte of van elektriciteit) en recyclage, afbraak- en stortprocessen (gebaseerd op 1 kilogram materiaal). Aan deze laatste categorie kan een negatieve score worden toegekend, wanneer bijvoorbeeld door recyclage een nieuwe (schaarse) grondstof ontstaat.

Om de drie beschouwde schadecriteria in één getal te kunnen weergeven, dienen deze categorieën nog ten opzichte van elkaar afgewogen worden. Deze afweging berust, in tegenstelling tot de

eerdere toekenning van standaard eco-indicatoren, wel op een louter subjectieve beoordeling. De schade aan de ozonlaag kan bijvoorbeeld wel op vrij objectieve basis begroot worden, maar welke vorm van milieu-impact nu precies het belangrijkste is, valt minder eenvoudig vast te leggen. Om deze vraag uit de weg te gaan, werden niet de impactcategorieën, maar wel de drie schadecriteria ten opzichte van elkaar afgewogen. “Volksgezondheid” wordt hierbij uitgedrukt in het aantal “levensjaren gecorrigeerd door beperkingen” (Disability Adjusted Life Years of DALY’s), een maat die door de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) werd ontwikkeld. “Schade aan het ecosysteem” wordt uitgedrukt in het aantal “soorten” dat verdwijnt over een bepaald gebied, gedurende een bepaalde tijdspanne, met als eenheid “PDF.m².yr”, (Potentially Disappeared Fraction of species per m² per year). “Schade aan grondstoffen” wordt bepaald als de hoeveelheid extra energie die in de toekomst zal nodig zijn voor ontginning van mineralen of fossiele brandstoffen en wordt uitgedrukt in megajoule (MJ surplus energy). Een panel van 365 experts uit een Zwitsers bedrijf, gespecialiseerd in LCA beoordeelde de drie schadecriteria ten opzichte van elkaar. Afgaande op de resultaten van deze beoordeling, wordt schade aan de volksgezondheid ongeveer even belangrijk gerekend als schade aan het ecosysteem, terwijl schade aan grondstoffen slechts half zo belangrijk wordt geacht. Bijgevolg werd een verdeling van 40%, 40% en 20% voor de respectievelijke categorieën aangenomen. Tot slot kan dus één enkele indicator worden bepaald, die de totale impact van een product of proces weergeeft. Figuur 6-9 toont samenvattend de te volgen stappen bij de bepaling van de eco-indicator.



Figuur 6-9: Algemene procedure voor de berekening van de eco-indicatoren [Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (2000)]

6.3.1.2. IPCC 2007 GWP

Deze methode is gebaseerd op de resultaten uit het vierde beoordelingsrapport van het IPCC (zie IPCC (2007)) en benadert de problematiek vanuit het oogpunt van de klimaatsverandering. Ter begroting van het broeikaseffect wordt daarom van elke emissie, afkomstig van een zeker product of proces, het opwarmend vermogen (GWP of global warming potential) bepaald en dit aan de hand van een zekere massa CO₂-equivalent. Het opwarmend vermogen van een bepaald gas is echter slechts betekenisvol indien het wordt gerelateerd aan een zekere periode waarbinnen het wordt gemeten.

Zo werd bij het Kyoto-protocol rekening gehouden met de gevolgen van de gemiddelde emissies van broeikasgassen over een periode van 100 jaar. De samengevoegde gegevens binnen de tijdspanne van één eeuw geven dus een gemiddelde impact over deze periode, zonder rekening te houden met het verschil van effecten op korte, middellange of langere termijn [IPCC (2001)]. De landen die het Kyoto-protocol ondertekenden en zodoende de uitstoot aan broeikasgassen pogen te beperken, maken de analyse op basis van de gegevens binnen een periode van 100 jaar. Dit laat politici toe om de maatregelen op langere termijn te beschouwen, waardoor de korte termijn effecten (bijvoorbeeld binnen een tijdspanne van 20 jaar) onderschat worden en het Kyoto-protocol zijn effect gedeeltelijk mist. Zo zal methaangas bijvoorbeeld 72 maal “krachtiger” zijn dan koolstofdioxide, beschouwd over een periode van 20 jaar, maar “slechts” 21 maal krachtiger dan koolstofdioxide indien een tijdsvenster van 100 jaar wordt gehanteerd. Op deze manier worden, over een grotere tijdspanne, de korte termijn effecten gebagatelliseerd en ligt de nadruk vooral op de effecten van de meer “langlevende” verontreinigingen zoals koolstofdioxide. Verminderde uitstoot van sneller afbrekende gassen zoals methaan en stikstofoxide kunnen dan ook op veel kortere termijn positieve resultaten voor het milieu opleveren.

Volgens een rapport van SCS (Scientific Certification Systems) bestaat bovendien nog een bepaalde onzekerheid met betrekking tot de klimaatseffecten binnen een periode van 100 jaar [SCS (2009)]. Uit verschillende onderzoeken zou immers blijken dat de randvoorwaarden, waarop de klimaatseffecten gebaseerd worden, te snel veranderen om binnen de horizon van 100 jaar deze klimaatwijziging effectief te kunnen begroten. De effecten op een kortere termijn, in dit geval 20 jaar, vallen volgens SCS (2009) met een grotere zekerheid vast te leggen.

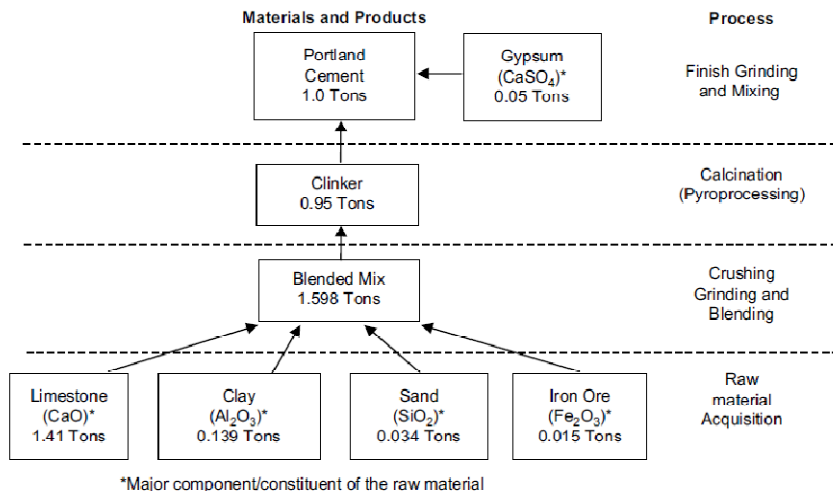
Het IPCC bepaalde de GWP-index als een hulpmiddel voor wetenschappers en liet daarin de keuze vrij om over een tijdshorizon van 20 tot 500 jaar te werken. Conform hiermee, onderscheidt de IPCC-methodologie drie verschillende vertrekpunten. De impact van emissies kan berekend worden met de effecten binnen een tijdsvenster van 20, 100 of 500 jaar als basis. De periode van 100 jaar

geldt als een algemene standaard en in bijna alle programma's wordt deze periode dan ook gehanteerd als uitgangsbasis. Door het onderzoek met de drie verschillende tijdspannes gecombineerd toe te passen, kunnen, zoals hoger aangehaald, echter meer nuttige conclusies uit het onderzoek volgen. Ze worden respectievelijk aangeduid als IPCC 2007 GWP 20, IPCC 2007 GWP 100 en IPCC 2007 GWP 500.

6.3.2. Verbruik van natuurlijke grondstoffen

6.3.2.1. Eén ton cement

Om één ton traditioneel portlandcement te produceren wordt volgens Huntzinger & Eatmon (2009) wereldwijd gemiddeld 1,58 ton natuurlijke grondstoffen gebruikt. Het materiaalstroomdiagram om tot deze waarde te komen wordt afgebeeld in Figuur 6-10.



Figuur 6-10: Materiaalstroomdiagram voor de productie van één ton traditioneel portlandcement [Huntzinger & Eatmon (2009)]

De Belgische cementindustrie ligt met 1,70 ton per geproduceerde ton cement [Febelcem (2006)] boven dit gemiddelde. Huntzinger & Eatmon negeren echter het gebruik van 0,05 ton gips bij dit grondstoffenmengsel. Deze verwaarlozing kan gerechtvaardigd worden gezien ongeveer 75% van het gebruikte gips via synthetische weg wordt verkregen [De Schepper (2009)]. Volgens de Ecoinvent-database is er voor de productie van 1 ton klinker echter 1,65 ton grondstoffen nodig. Deze klinkerhoeveelheid wordt volgens Ecoinvent aanzien als de enige verbruiker van natuurlijke grondstoffen voor zowel traditioneel portlandcement als voor hoogovencement. Tabel 6-11 toont deze grondstoffen volgens Ecoinvent.

Tabel 6-11: Verbruik aan natuurlijke grondstoffen voor de productie van één ton klinker volgens Ecoinvent

Bauxiet	0,00012
Gehydrateerde kalk	0,00392
Kalksteen	0,84100
Kalkhoudende mergel	0,46600
Zand	0,00926
Klei	0,33100
Totaal	1,65130

Volgens Huntzinger & Eatmon (2009) kan een evenwaardig cementmengsel bekomen worden bij vervanging van klinker voor cementproductie tot maximaal 25 m%. Hierdoor daalt de hoeveelheid benodigde klinker van 0,95 ton tot 0,71 ton. Gezien de puzzolane vervangproducten bestaan uit industriële afval- of bijproducten zoals vliegas en hoogovenslakken, die hoe dan ook geproduceerd zouden worden, dient geen enkele gunstige of ongunstige invloed van deze producten in rekening worden gebracht bij de bepaling van de milieu-impact.

Door Josa et al. (2004) werd een overzicht gemaakt van bestaande levenscyclusanalyses, uitgevoerd op verschillende cementsoorten. De resultaten van deze analyse zijn terug te vinden in Tabel 6-13. Tabel 6-12 geeft een overzicht van de geanalyseerde cementsoorten.

Tabel 6-12: Overzicht codes onderzochte cementsoorten [Josa et al. (2004)]

Original Nomenclature and Reference	Classification		Clinker (%)	Origin
Cement Portland I	Type I	Portland cement	95–100	Holland
Cement Portland	Type II /A-S	Portland slag cement	80–94	Holland
Blastfurnace slag cement	Type III/B	Blastfurnace cement	20–34	Holland
Cement Hoogoven I	Type III/B	Blastfurnace cement	20–34	Holland
Portland ash cement	Type IV/B	Pozzolanic cement	45–64	Holland
Cement CH	Type I	Portland cement	95–100	Switzerland
Cement N	Type I	Portland cement	95–100	Sweden
Portland cement NL1	Type I	Portland cement	95–100	Holland
Cement S	Type I	Portland cement	95–100	Sweden
Cement SF1	Type I	Portland cement	95–100	Finland
Cement SF2	Type I	Portland cement	95–100	Nordic Countries
Portland cement A	Type II/A-S	Portland slag cement	80–94	Austria
Portland cement NL2	Type II/A-S	Portland slag cement	80–94	Holland
Portland cement NL3	Type II/B-S	Portland slag cement	65–79	Holland
Blastfurnace slag cement NL1	Type III/B	Blastfurnace cement	20–34	Holland
Blastfurnace slag cement NL2	Type III/B	Blastfurnace cement	20–34	Holland
'Yleis' cement	Type II/A-M	Portland mix cement	82.2	Finland
'Rapid' cement	Type II/A-LL	Portland limestone cement	90.6	Finland
'Pika' cement	Type I	Portland cement	86.3	Finland
'Mega' cement	Type I	Portland cement	90.7	Finland
'SR' cement	Type I	Portland cement	83.4	Finland

Tabel 6-13: Grondstoffenverbruik voor 1 kilogram cement [Josa et al. (2004)]

Original nomenclature	Raw material consumption (kg)										
	Clinker production							Cement production			
	Water	Limestone	Loam/marl	Clay	Chalk	Iron oxides	Other	Clinker	Slag	Fly ashes	Gypsum
Cement Portland I	—	—	1.600	—	—	—	0.270	0.940	—	—	0.060
Cement Portland	—	—	1.610	0.057	0.047	0.019	—	0.950	0.109	0.09	0.050
Cement Hoogoven I	—	—	0.510	—	—	—	0.066	0.300	0.640	—	0.060
Blastfurnace slag cement	—	—	0.425	0.015	0.012	0.005	—	0.250	0.729	0.024	0.050
Portland ash cement	—	—	1.190	0.042	0.035	0.014	—	0.700	0.081	0.317	0.050
Cement CH	—	1.150	0.346	—	—	—	—	—	—	—	0.030
Cement N	—	1.640	—	—	—	—	—	—	—	—	0.050
Portland cement NL1	1.410	1.600	—	—	—	—	—	—	—	—	0.060
Cement S	—	1.360	—	—	0.046	0.009	—	—	—	—	0.046
Cement SF1	—	1.200	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cement SF2	—	1.550	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Portland cement A	0.190	1.200	—	—	—	—	0.017	—	0.122	0.027	0.064
Portland cement NL2	1.071	—	1.045	0.028	0.066	0.019	0.047	—	0.095	0.076	0.050
Portland cement NL3	1.325	—	1.316	0.056	0.047	0.014	—	—	0.108	0.089	0.060
Blastfurnace slag cement NL1	0.532	—	0.287	0.007	0.017	0.005	0.025	—	0.700	0.020	0.050
Blastfurnace slag cement NL2	0.423	—	0.420	0.018	0.015	0.004	—	—	0.675	0.285	0.060
'Yleis' cement	—	0.066	—	—	—	0.004	—	0.822	0.067	—	0.053
'Rapid' cement	—	0.042	—	—	—	0.005	—	0.906	0.020	—	0.067
'Pika' cement	—	0.026	—	—	—	0.004	—	0.863	—	—	0.061
'Mega' cement	—	0.030	—	—	—	0.005	—	0.907	—	—	0.058
'SR' cement	—	0.020	—	—	—	0.005	—	0.834	—	—	0.043

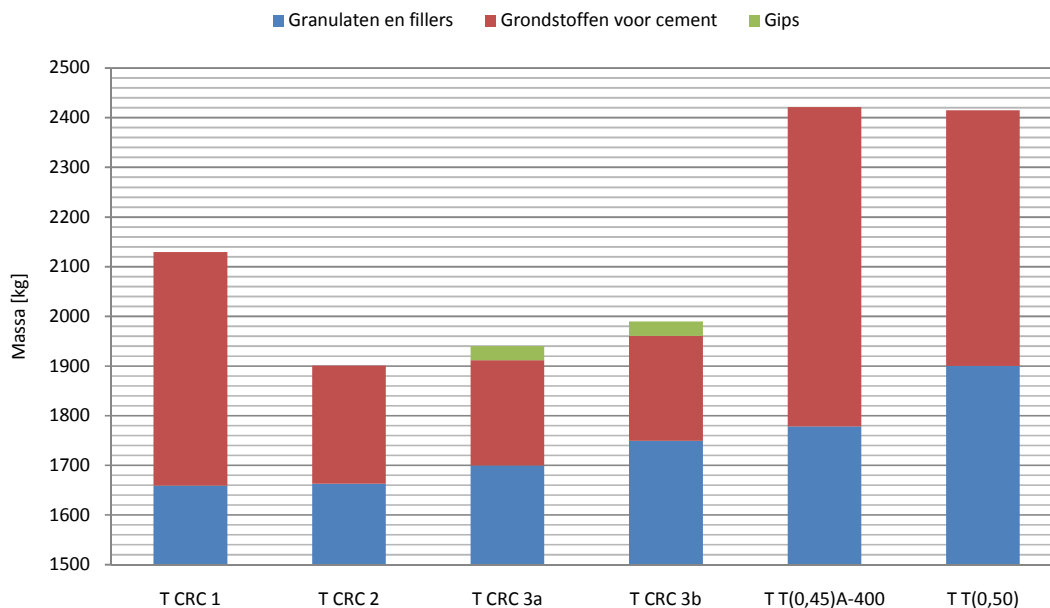
De berekening van de grondstoffenbehoefte voor cementproductie wordt in De Schepper (2009) gebaseerd op de gegevens van Febelcem (2006). Hierbij wordt uitgegaan van een behoefte aan 1,7 ton bestanddelen, waarvan 1,5 ton natuurlijke grondstoffen, per ton klinker. Voor CEM I wordt in De Schepper (2009) een samenstelling van 95% klinker en 5% gips aangenomen. Voor CEM III wordt gerekend met 50% hoogovenslakken, 46% klinker en 4% gips. Het gips is volgens Febelcem (2006) voor 75% van synthetische oorsprong is, waardoor drie kwart van deze hoeveelheid geen invloed heeft op het gebruik aan natuurlijke grondstoffen.

Volgens de Ecoinvent-database [Kellenberger et al. (2007)] echter, bedraagt de hoeveelheid benodigde klinker in CEM I slechts 91,2% en de hoeveelheid gips 6,3%. Er wordt bovendien nog rekening gehouden met 2,5% aan reststoffen uit andere industrieën die mee met de klinker worden gemalen. De hoeveelheid klinker in CEM III bedraagt volgens diezelfde database 46,0%, het gehalte aan gips 4,0% en het hoogovenslakkengehalte 50,0%.

De gipshoeveelheid wordt volgens Ecoinvent bovendien integraal als synthetisch gips beschouwd. Bijgevolg wordt dit gips niet in rekening gebracht bij de raming van het gebruik aan natuurlijke grondstoffen. Dit geldt eveneens voor de hoeveelheid reststoffen uit andere industrieën die in CEM I 52,5N samen met de klinker wordt vermalen en de hoogovenslakken die in CEM III gebruikt worden.

6.3.2.2. Eén kubieke meter beton

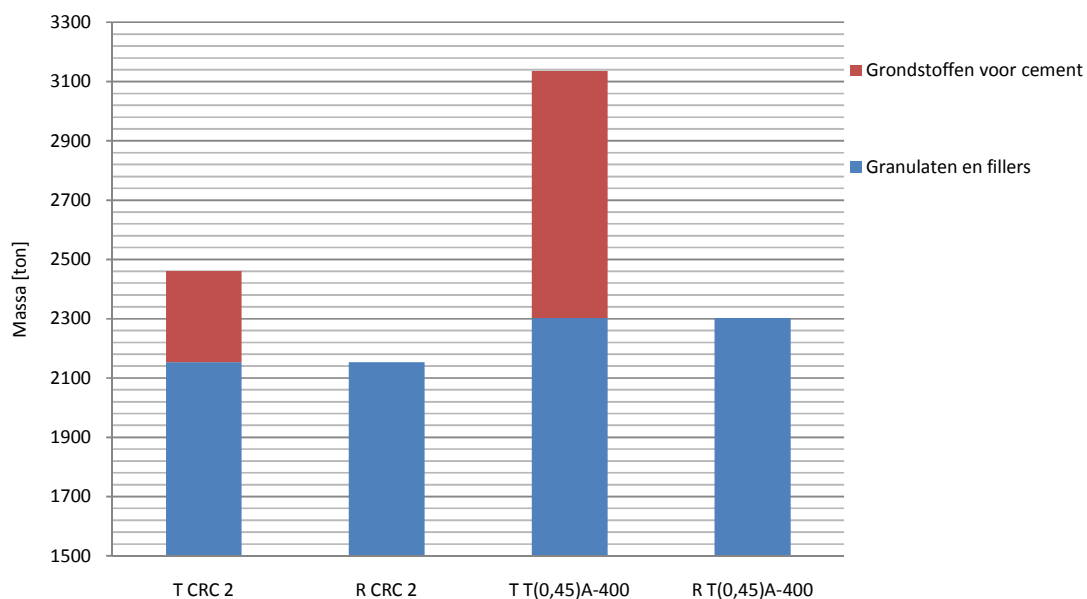
Wanneer in het beton gebruik wordt gemaakt van vliegashoudend cement, wordt dit niet in rekening gebracht. Als afvalproduct uit de energiesector of als bijproduct uit de koperindustrie, hebben deze toevoegsels namelijk geen rechtstreekse oorzaak tot de ontginning van natuurlijke grondstoffen. De gipshoeveelheden in CRC 3 worden integraal in rekening gebracht, gezien deze afkomstig zijn uit een groeve in Vaujours (FR). Figuur 6-11 toont het gebruik aan natuurlijke grondstoffen in 1m³ beton in geval van traditioneel cement. Indien gebruik wordt gemaakt van gerecycleerd cement, valt de rubriek “Grondstoffen voor cement” integraal weg, gezien van deze grondstoffen, volgens Ecoinvent, enkel de klinkerhoeveelheid in rekening wordt gebracht. Het is net deze klinkerhoeveelheid die door het recycleerbaar beton wordt vervangen.



Figuur 6-11: Gebruik natuurlijke grondstoffen voor 1m³ beton

6.3.2.3. Een één kilometer lange weg

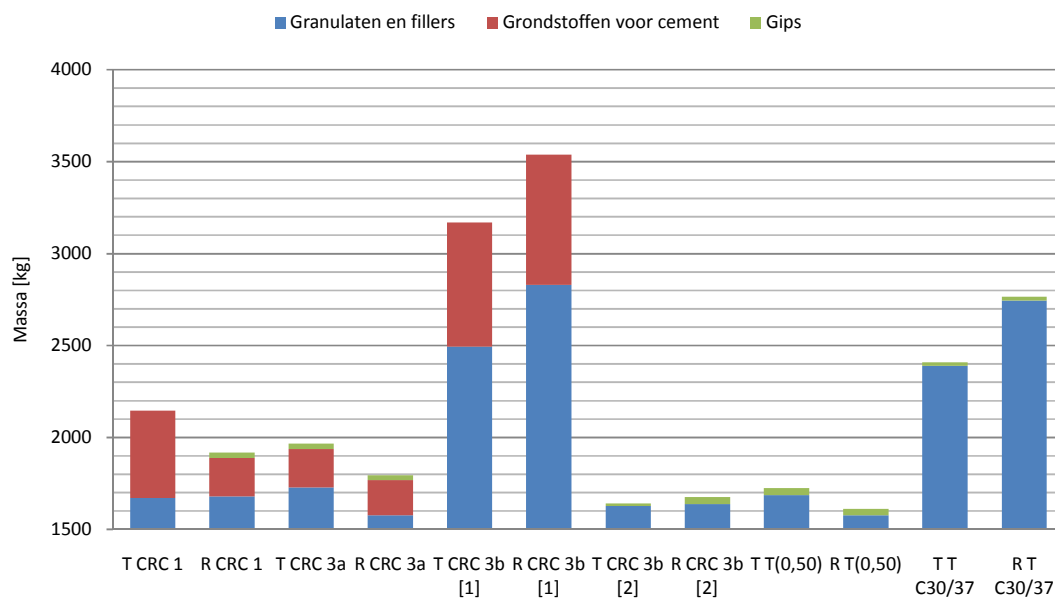
Voor het recycleerbaar mengsel CRC 2 en het referentiemengsel T(0,45)A-400 wordt als functionele eenheid een rechte weg met lengte 1000m, breedte 3,50m en dikte 0,23m aangenomen. De levensduur van deze weg bedraagt 30 jaar en de 0,07m dikke toplaag moet binnen deze periode 2 maal vernieuwd worden. Figuur 6-12 geeft een beeld van het grondstofverbruik bij beide mengsels, zowel met als zonder gebruik van gerecycleerd cement.



Figuur 6-12: Gebruik natuurlijke grondstoffen voor een 1 kilometer lange weg

6.3.2.4. Een door kolommen isostatisch ondersteunde balk

Het verbruik aan natuurlijke grondstoffen bij de constructie van een isostatisch opgelegde balk wordt afgebeeld in Figuur 6-13. Van alle onderzochte mengsels wordt zowel het verbruik weergegeven bij gebruik van traditioneel, als van gerecycleerd cement.

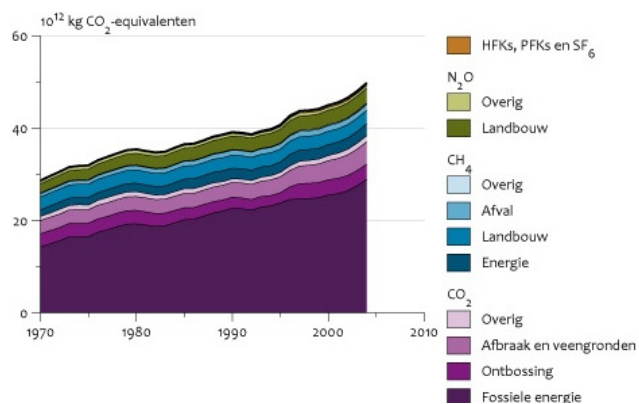


Figuur 6-13: Verbruik grondstoffen voor een door twee kolommen isostatisch ondersteunde balk met een levensduur van 100 jaar

6.3.3. Uitstoot broeikasgassen en energieverbruik

Debatten, conferenties en verdragen over de steeds duidelijker wordende impact van de klimaatsverandering op aarde, vallen niet meer uit de hedendaagse maatschappij weg te denken. Sinds in 1992 in Rio de Janeiro door de Verenigde Naties, geïnspireerd door het Brundtland-rapport, een eerste internationaal klimaatverdrag werd opgesteld, waarvan in december 1997 het Kyoto-protocol ondertekend werd, groeit het besef van de ernst tot de noodzaak van een ingrijpende mentaliteitswijziging bij politiek-economische beslissingen van alle geïndustrialiseerde landen. Door de toenemende uitstoot van broeikasgassen in de atmosfeer, wordt de “isolerende” gaslaag rondom de aarde steeds dikker en neemt de temperatuur op deze planeet langzaam maar zeker toe. In zijn eerste rapport in 1990 stelt het Intergouvernementele Panel voor Klimaatverandering (IPCC) dat de wereld sinds het begin van de twintigste eeuw een halve graad warmer geworden was. In zijn laatste rapport in 2007, stelt het IPCC dat een zeespiegelstijging van meer dan zes meter mogelijk is en dient er rekening worden gehouden met een temperatuursstijging van wel 3 tot 6 graden in de komende honderd jaar. Gezien dit alarmerende rapport en de bewustwording van de ontoereikendheid van de inspanningen van het Kyoto-protocol, werd in december 2009 in Kopenhagen een nieuwe klimaatop georganiseerd. Ondanks de ongunstige economische omstandigheden op dat moment, werden op deze top door vertegenwoordigers van 192 landen op 18 december 2009 belangrijke doelstellingen geformuleerd met betrekking tot een verminderde uitstoot van broeikasgassen en de beperking van de temperatuursstijging.

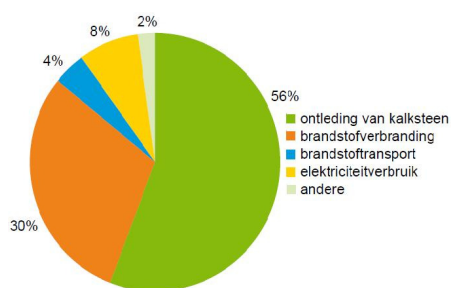
Omdat bij eenzelfde massa gas het opwarmend vermogen van het ene broeikasgas verschillend is van een ander, wordt dit vermogen uitgedrukt ten opzicht van CO₂ als referentiegas. De eenheid voor het opwarmend vermogen van een broeikasgas wordt daarom “CO₂-equivalent” genoemd. De mondiale uitstoot van broeikasgassen wordt grafisch weergegeven in Figuur 6-14.



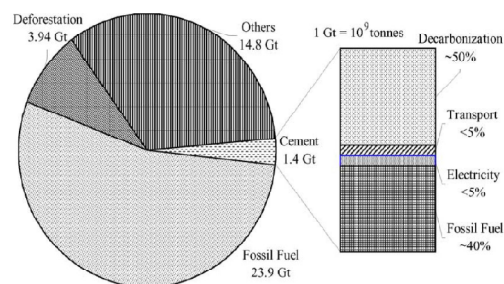
Figuur 6-14: Mondiale uitstoot van broeikasgassen [Betoniek (2009)]

Wetenschappelijk onderzoek bracht aan het licht dat de broeikasgassen voor 82% bestaan uit koolstofdioxide (CO_2), dat daarmee de belangrijkste oorzaak is van de temperatuursstijging [Damtoft et al. (2008)]. In de Verenigde Staten ligt de gemiddelde CO_2 -uitstoot met een kleine 20 ton CO_2 per persoon per jaar het hoogst, terwijl de gemiddelde uitstoot in de Europese Unie 10,5 ton per jaar per inwoner bedraagt. De Nederlandse emissies per hoofd liggen op een niveau van 11 ton CO_2 per jaar en die in België op 13,8 ton. In de (opkomende) wereldmacht China bedraagt deze 4,6 ton per inwoner per jaar en in een ontwikkelingslanden zoals Ethiopië slechts 0,1 ton. Wereldwijd wordt hierdoor een uitstoot van 30 gigaton per jaar bereikt. Door de eeuwen heen is de concentratie CO_2 in de lucht niet constant. Een soort golfbeweging in CO_2 -concentratie is merkbaar, maar de laatste honderd jaar vertoont deze concentratie een duidelijk afwijkende stijging. Algemeen wordt aanvaard dat deze stijging louter werd veroorzaakt door menselijke activiteiten [Betoniek (2009)].

Van alle CO_2 -emissies is zowat 5% afkomstig uit de cementindustrie. Los van emissies die verband houden met de energie, gebruikt voor het branden van klinker, komt er bij de decarbonatie van kalksteen ongeveer 0,53 kilogram CO_2 vrij per kilogram klinker [Damtoft et al. (2008), Huntzinger & Eatmon (2009)]. De totale CO_2 -uitstoot daarentegen, met inbegrip van de CO_2 afkomstig van brandstoffen, bedraagt volgens Humphreys & Mahasenan (2002) gemiddeld 0,87 kilogram per kilogram klinker, volgens Huntzinger & Eatmon (2009) 0,81 kilogram per kilogram geproduceerd cement en volgens Betoniek (2009) 0,90 kilogram per kilogram cement, waarvan 56% afkomstig is van decarbonatie van kalksteen. Dit komt nagenoeg overeen met de stelling van Febelcem (2006), waarin van de totale CO_2 -uitstoot in Belgische cementindustrie, 57% wordt toegeschreven aan chemische processen. Voor de Verenigde Staten stellen Huntzinger & Eatmon (2009) een percentage van ongeveer 50% voorop als gevolg van chemische processen. Figuur 6-15 en Figuur 6-16 geven een schematisch beeld van deze verhouding, respectievelijk volgens Betoniek (2009) en Humphreys & Mahasenan (2002).



Figuur 6-15: Bronnen van CO_2 in een gemiddeld Europees portlandcement in procenten [Betoniek (2009)]



Figuur 6-16: Globale uitstoot broeikasgassen [CO_2 -equivalent] en de bijdrage van de cementindustrie [Humphreys & Mahasenan (2002)]

Wereldwijd werd in 2000 1,57 miljard ton cement geproduceerd, in 2004 was dit cijfer al gestegen tot meer dan 2 miljard ton [Damtoft et al. (2008)]. Volgens Russell (2008) werd in 2006 2,54 miljard ton cement geproduceerd en in 2007 naar schatting 2,69 miljard ton. Verwacht wordt dat dit cijfer de komende jaren verder zal blijven stijgen en voor 2012 wordt een productiehoeveelheid van 3,37 miljard ton voorspeld. De productie van grijs cement in België bedraagt volgens Febelcem (2006) sinds begin 2000 jaarlijks ongeveer 6,9 miljoen ton, waarvan de Belgische bouwmarkt jaarlijks zowat 5,7 miljoen ton afneemt. Het jaarlijks nationaal cementverbruik per inwoner bedraagt hiermee 558 kilogram, waarmee België samen met Groothertogdom Luxemburg de grootste verbruikers zijn (per jaar gemiddeld 43 kilogram meer dan de gemiddelde Europeaan).

Bij de productie van cement is volgens Josa et al. (2007) hoofdzakelijk de uitstoot van CO₂ relevant als broeikasgas. Hoewel methaangas (CH₄) en distikstofmonoxide of lachgas (N₂O) ook worden uitgestoten, en deze gassen een veel hoger CO₂-equivalent bezitten (respectievelijk 11 en 72 ten opzichte van 1 voor CO₂), is hun invloed op het broeikas effect zeer gering in vergelijking met dit van CO₂, dat in totaal voor 98,8 tot 100% van het effect door cementproductie verantwoordelijk is. Tabel 6-14 toont deze stelling aan. De codes uit Tabel 6-12 zijn ook hier geldig en de hoeveelheid klinker die in elk cement werd gebruikt kan in diezelfde tabel teruggevonden worden.

Tabel 6-14: Samenvatting van de belangrijkste broeikasgassen uitgestoten in de lucht [in gram] bij de productie van 1 kilogram cement [Josa et al. (2004)]

Type	Original	Emissions to air (g)			
	Nomenclature	CO ₂	NO _x	SO ₂	Dust
I	Cement Portland I	355.00	0.96	0.43	10.00
	Cement CH	810.00	2.00	0.60	0.30
	Cement N	813.00	2.09	0.67	0.18
	Portland cement NL1	853.00	2.58	0.09	7.50
	Cement S	805.00	1.94	0.45	0.16
	Cement SF1	780.00	3.70	0.63	0.39
	Cement SF2	812.70	2.95	1.33	0.32
II	Portland Cement	918.30	3.11	1.16	0.24
	Portland cement A	586.00	1.57	0.12	0.17
	Portland cement NL2	807.00	2.95	0.09	0.19
	Portland cement NL3	289.00	0.71	0.98	79.60
III	Blastfurnace slag cement	221.70	0.51	0.51	10.00
	Cement Hoogoven I	334.00	1.11	0.58	0.08
	Blastfurnace slag cement NL1	212.00	0.85	0.03	0.14
	Blastfurnace slag cement NL2	134.00	0.40	0.43	88.60
IV	Portland ash cement	692.90	2.33	0.90	0.18
I and II	Finnish average	738.00	2.17	0.17	0.14
Varies	UK plant	850.00	3.55	2.06	0.27
Varies	Danish average	973.0	3.70	0.60	0.10

Er wordt uitgegaan van dezelfde energiebehoefte voor het sinteren van het volledig recycleerbaar beton als voor het traditioneel grondstoffenmengsel. Het verschil in uitstoot van CO₂ bij het gebruik van volledig recycleerbaar beton i.p.v. het traditionele grondstoffenmengsel valt niet nauwkeurig in te schatten en is afhankelijk van de exacte chemische opbouw van het recycleerbaar beton zelf. Volgens Febelcem (2006) is 57% van de uitstoot van CO₂ afkomstig van de calcinatie van de kalk. Bij dit chemisch proces wordt CaCO₃, aanwezig in het grondstoffenmengsel, omgezet in CaO en CO₂. Deze CO₂-uitstoot kan bepaald worden aan de hand van het CaO-gehalte van de klinker volgens formule (6.4):

$$m\%(CO_2) = \frac{M(CO_2)}{M(CaO)} \cdot m\%(CaO) = \frac{44,01}{56,08} \cdot m\%(CaO) = 0,7848 \cdot m\%(CaO) \quad (6.4)$$

Indien portlandklinker voor 65% bestaat uit CaO, zoals in Taerwe (2004) wordt aangenomen, komt dit overeen met een chemische CO₂-uitstoot van 0,510kg per kilogram klinker. Dit komt overeen met de bevindingen van De Schepper (2009) en is enkel geldig indien de hoeveelheid CaO integraal afkomstig is van CaCO₃(calciumcarbonaat), wat in dit geval aannemelijk is. Indien het grondstoffenmengsel voor klinkerproductie echter bestaat uit volledig recycleerbaar beton, is de CaO niet enkel afkomstig van CaCO₃. In concreto betekent dit voor de in dit werk vervaardigde mengsels dat slechts 80,3% tot 83,3% afkomstig is van calciumcarbonaat, wat een reductie in de chemische CO₂-uitstoot van 16,7% tot 19,7% teweegbrengt. Gezien deze emissies verantwoordelijk zijn voor 57% van de totale CO₂-uitstoot, leidt dit tot een totale reductie van 9,5% tot 11,2% per kilogram klinker. Hierbij wordt geen rekening gehouden met het eventueel voorkomen van een hoeveelheid gecarbonateerd beton. Bij carbonatatie wordt immers opnieuw calciumcarbonaat gevormd, zodat in dit geval bij het branden van de klinker een extra hoeveelheid CO₂ zou vrijkomen. Deze verwaarlozing valt te verantwoorden omdat de hoeveelheid CO₂ die bij het branden van de klinker vrij komt, even groot is als de hoeveelheid die door het beton wordt opgenomen bij het carbonatatieproces. Gezien het opgenomen CO₂ niet rechtstreeks gerelateerd is aan de betonproductie, is de invloed hiervan op de totale hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer nihil.

Volgens Ecoinvent is 0,543kg van de uitstoot aan CO₂ bij de productie van klinker afkomstig van het chemisch proces. Indien bovenstaande berekening geëxtrapoleerd wordt naar de waarden uit deze database, dient deze uitstoot, indien gebruik wordt gemaakt van volledig recycleerbaar beton als grondstof voor portlandklinker, gemiddeld met 10,35% verminderd te worden, wat de totale uitstoot afkomstig van calcinatie op 0,487kg brengt.

6.3.4. Gebruik van land en ruimte

Omdat er door het gebruik van volledig recycleerbaar beton als grondstof voor de cementproductie, geen ontginning meer nodig is van materialen voor de fabricatie van klinker, zal ook het gebruik van land en ruimte dalen voor deze mengsels. De Schepper (2009) concludeerde al dat het gebruik van land en ruimte vooral wordt bepaald door de ontginning van granulaten. Zodoende is de te verwachten reductie in gebruik van land en ruimte vrij groot wanneer de cementproductie afzonderlijk wordt beschouwd. Enkel de cementfabriek en de installaties, aangewend voor de productie van klinker, hebben immers nog een invloed op deze ruimtebezetting, terwijl er geen groeves (zand, kalksteen, klei) voor het grondstoffenmengsel meer nodig zijn. Gezien de cementhoeveelheid in beton beperkt is, is de te verwachten invloed op een betonmengsel echter vrij gering. De berekeningen werden integraal met SimaPro uitgevoerd.

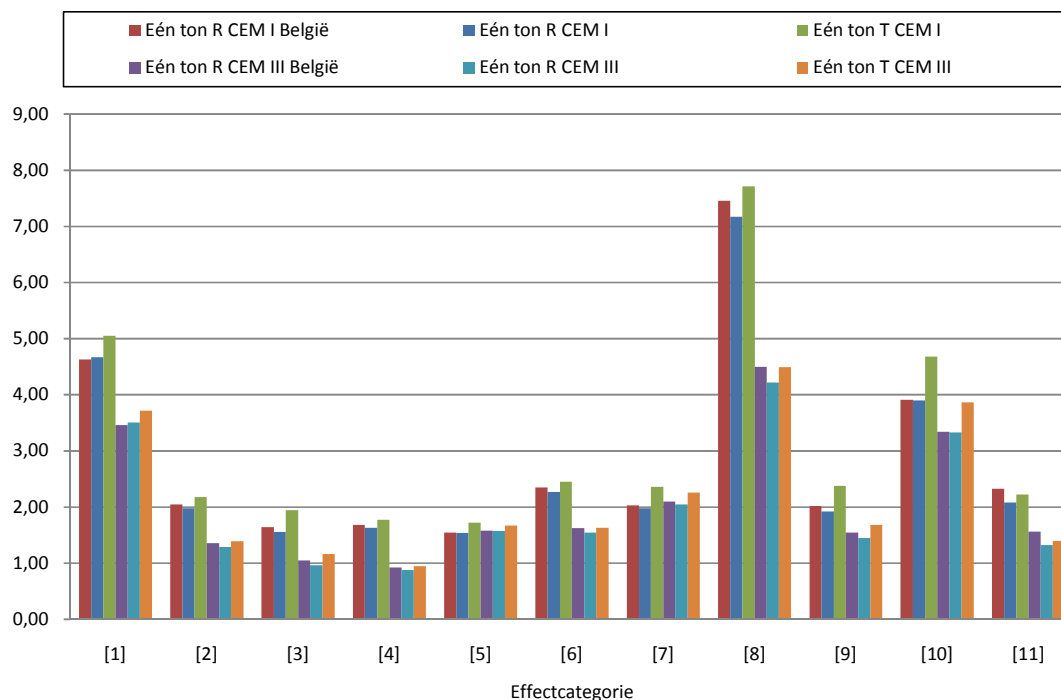
6.3.5. Resultaten m.b.v. SimaPro

6.3.5.1. Eén ton cement

Bij het beoordelen van de materialen wordt steeds uitgegaan van de waarden die standaard in de Ecoinvent-database worden aangenomen en in SimaPro worden gebruikt. Over het algemeen zijn dit waarden die geldig zijn in Zwitserland - alwaar de database werd ontwikkeld - en dus kunnen afwijken van de waarden die gelden in België. Deze verschillen situeren zich vooral in de energiesector, waar in België nog steeds een grote hoeveelheid fossiele brandstoffen worden verbruikt, die bijgevolg een grotere impact hebben op het milieu. Om de invloed van dit nationaal verschil te kunnen begroten, werd de klinker en de cement, afkomstig van volledig recycleerbaar beton, eveneens berekend met de voor België geldende emissies en verbruiken. Wanneer een specifieke waarde voor België zich niet in de database bevond, werd de gemiddelde Europese waarde aangenomen.

Tenzij expliciet anders vermeld, geschiedt de berekening in dit werk met de voor Zwitserland begrote waardes. De reden hiervoor is dat Europese levenscyclusanalyses met SimaPro vooral gebaseerd zijn op deze data. De omzetting naar Belgische waarden zou de vergelijking met andere onderzoeken dan ook bemoeilijken.

Met de berekeningen volgens Eco-indicator 99 wordt de grafiek uit Figuur 6-17 bekomen. Op elk gebied scoort de gerecycleerde cementsoort beter dan de traditionele. Ook het verschil tussen CEM I en CEM III is, door het hoge gehalte aan hoogovenslakken in deze laatste, erg opvallend. De gerecycleerde Belgische cementsoort vertoont voor bijna alle categorieën een schadelijker effect dan de Zwitserse variant. De oorzaak dient hier vooral gezocht te worden in het nog hoge verbruik aan fossiele brandstoffen, die rechtstreeks of onrechtstreeks op verschillende categorieën invloed heeft.



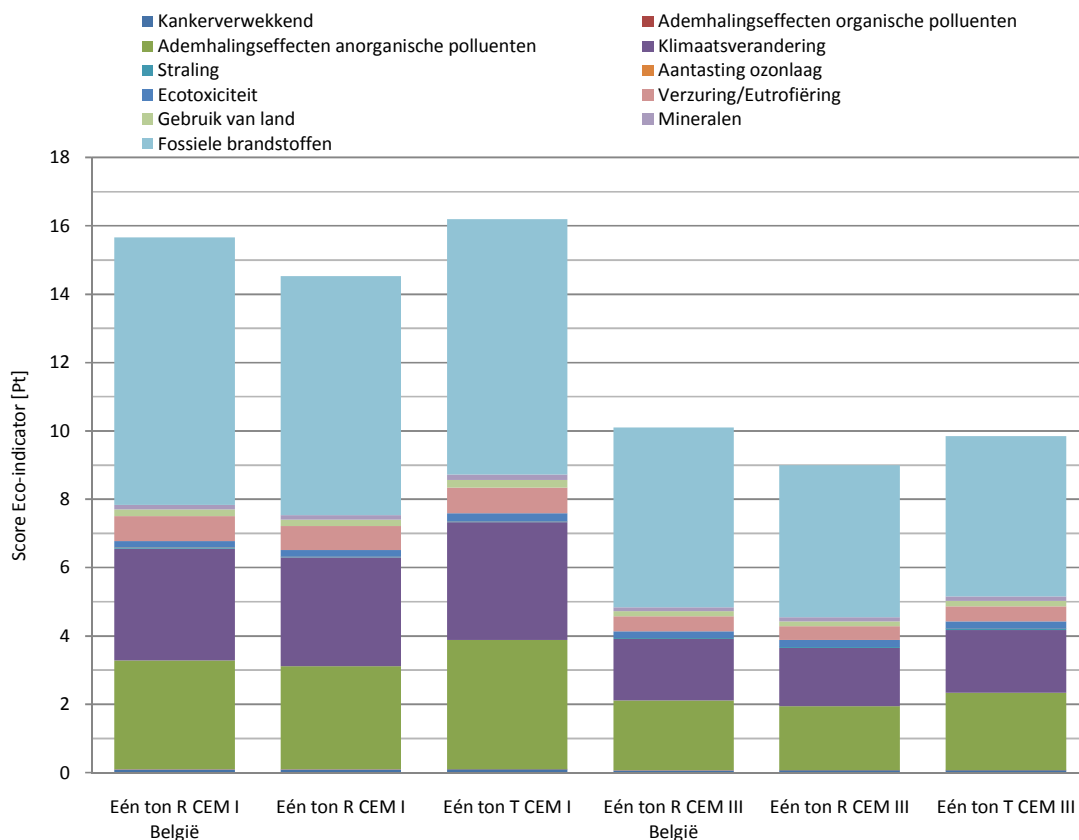
Figuur 6-17: Effectcategorieën voor de verschillende cementsoorten. [1] Kankerverwekkend [$\text{DALY} \cdot 10^{-6}$]; [2] Ademhalingseffecten organische polluenten [$\text{DALY} \cdot 10^{-7}$]; [3] Ademhalingseffecten anorganische polluenten [$\text{DALY} \cdot 10^{-4}$]; [4] Klimaatsverandering [$\text{DALY} \cdot 10^{-4}$]; [5] Straling [$\text{DALY} \cdot 10^{-5}$]; [6] Aantasting ozonlaag [$\text{DALY} \cdot 10^{-8}$]; [7] Ecotoxiciteit [$\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{jr}$]; [8] Verzuuring/Eutrofiëring [$\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{jr}$]; [9] Gebruik van land [$\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{jr}$]; [10] Mineralen [MJ extra]; [11] Fossiele brandstoffen [$\text{MJ} \cdot 102 \text{ extra}$]

Volgens de regels opgesteld in Eco-indicator 99, wordt elk product vervolgens omgerekend tot een aantal “punten”, de zogenaamde Eco-indicator. Elke effectcategorie wordt daartoe omgezet naar een schadecategorie met een zeker gekend gewicht (zie paragraaf 6.3.1.1). Uit Tabel 6-15 blijkt dat het verschil in totale impact bij het gebruik van gerecycleerd cement i.p.v. traditioneel cement 10,2% bedraagt bij het gebruik van CEM I en 8,7% bij gebruik van CEM III. Opmerkelijk is het grote verschil wanneer CEM I en CEM III met elkaar worden vergeleken. Voor traditioneel cement is de verminderde impact van CEM III maar liefst 39,2%, en voor gerecycleerd cement bedraagt deze reductie 38,2%. Voor Belgisch gerecycleerd cement bedraagt de reductie 35,5%.

Tabel 6-15: Eco-indicator [Pt] voor de verschillende cementsoorten

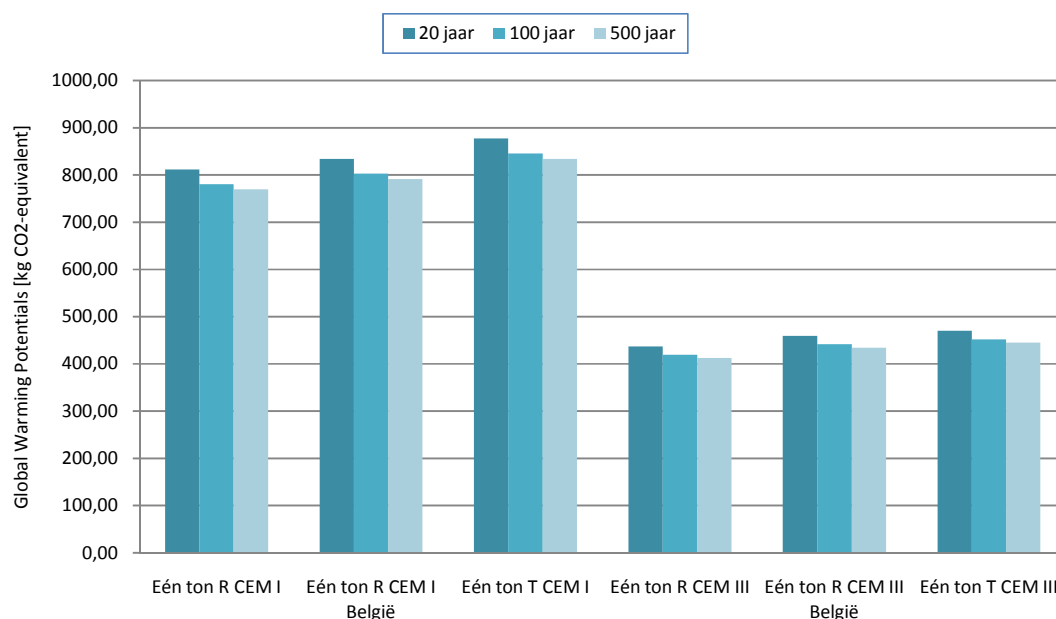
Schadecategorieën [Pt]	Eén ton R CEM I België	Eén ton R CEM I	Eén ton T CEM I	Eén ton R CEM III België	Eén ton R CEM III	Eén ton T CEM III
Totaal (Eco-indicator)	15,66	14,54	16,20	10,10	8,99	9,85
Volksgezondheid	6,58	6,32	7,35	3,94	3,68	4,21
Kwaliteit van het ecosysteem	1,12	1,08	1,21	0,79	0,75	0,82
Gebruik van natuurlijke grondstoffen	7,95	7,13	7,63	5,37	4,56	4,82

Een overzicht van de individuele bijdrages van elke effectcategorie tot deze Eco-indicator, wordt getoond in Figuur 6-18. De fossiele brandstoffen nemen voor elke samenstelling het grootste deel van de impact voor hun rekening, gevolgd door de effecten op de ademhaling door anorganische polluenten en het effect op het klimaat. De overige 7 effectcategorieën veroorzaken samen gemiddeld slechts 9,8% van de totale Eco-indicator.



Figuur 6-18: Individuele bijdrage van elke schadecategorie tot de totale Eco-indicator voor één ton cement

Om de invloed op het broeikas effect van een bepaald product apart te begroten, is de onderzoeksmethode van het IPCC het meest aangewezen. De emissies die door het product worden teweeggebracht, worden bovendien uitgedrukt in de algemeen aanvaarde eenheid “kg CO₂-equivalent”, wat de vergelijking met andere producten zeer eenvoudig maakt. Het onderzoek volgens de IPCC-methode wordt uitgevoerd met een tijdsvenster van 20, 100 en 500 jaar, zodat inzicht wordt verkregen in het tijdsafhankelijk effect van de emissies. Figuur 6-19 toont de resultaten.



Figuur 6-19: Global warming potential voor de verschillende cementsoorten in functie van de tijdshorizon

Analoog aan de bevindingen die bekomen werden met de Eco-indicator 99, wordt een lagere impactscore voor klimaatverandering bekomen voor de cementen, afkomstig van een recycleerbaar beton, dan voor de traditionele cementen. De verschillen bedragen minimaal 7,1%, gemiddeld 7,4% en maximaal 7,8%. Tabel 6-16 toont de individuele waarden.

De CO₂-uitstoot bij de productie van cement werd door De Schepper (2009) begroot op 858,1 kg/ton cement voor CEM I bij het natte productieproces en op 676,2 kg/ton voor het droge productieproces. Voor CEM III werden respectievelijk 447,3kg/ton en 359,2kg/ton bekomen. Deze emissies liggen in dezelfde orde van grootte als de massa CO₂-equivalent wanneer de tijdshorizon van 20 jaar wordt beschouwd. De vergelijking mag uiteraard niet volledig worden doorgetrokken, gezien de berekeningen in De Schepper (2009) verband houden met de uitstoot op het moment van productie (tijdshorizon 0 jaar) en zonder de – weliswaar kleine – bijdrage van andere broeikasgassen. De belangrijkste verklaring voor de verschillen is dat de aangenomen cementsamenstelling waarschijnlijk enigszins afweek van deze die hier werd verondersteld.

Tabel 6-16: kg CO₂-equivalent van de cementsoorten op verschillende leeftijden

Tijdshorizon	Eén ton R CEM I	Eén ton R CEM I België	Eén ton T CEM I	Eén ton R CEM III	Eén ton R CEM III België	Eén ton T CEM III
20 jaar	811,75	834,62	877,55	437,05	459,60	470,40
100 jaar	780,89	803,36	846,07	419,37	441,53	451,37
500 jaar	769,34	791,65	834,22	412,70	434,69	445,56

Zoals verwacht scoort de Belgische cementsoort opnieuw slechter dan de Zwitserse variant. Verder valt op dat het Global Warming Potential slechts zeer weinig vermindert naarmate een ruimere tijdshorizon wordt gehanteerd. Dit verschijnsel kan als volgt verklaard worden. Volgens Josa et al. (2007) is 98,8% tot 100% van het broeikaseffect bij cementproductie afkomstig is van de uitstoot van CO₂. De afbraak van koolstofdioxide gebeurt echter uiterst langzaam [SCS (2009)], waardoor het verschil in kg CO₂-equivalent tussen 20, 100 en 500 jaar zeer beperkt blijft.

6.3.5.2. Eén kubieke meter beton

- *Invloed van het transport*

Een eerste afweging die bij deze inventarisatie dient te gebeuren, is het al dan niet mee in rekening brengen van het verbruik en de emissies die gepaard gaan met het transport van alle betonbestanddelen. De transport gerelateerde milieu-impact is immers integraal afhankelijk van de vervoerswijze en de plaats waar het beton wordt geproduceerd en is bijgevolg de minst relevante parameter bij een levenscyclusanalyse. De berekening waarbij de transportimpact in rekening wordt gebracht, is in hoofdzaak een interessante oefening wanneer bijvoorbeeld de meest interessante plaats voor de inplanting van een betoncentrale binnen een zekere regio wordt gelokaliseerd, maar doet minder ter zake om de algemene impact van een betonsoort te karakteriseren. Om evenwel de verhouding van de impact van het transport van de betonbestanddelen ten opzichte van de totale milieu-impact van een beton te kunnen inschatten, wordt de vergelijking met en zonder transport tussen alle in dit werk beschouwde mengsels met traditioneel cement, gemaakt. De plaats waar de productie van het beton plaatsvindt, is in dit geval het Laboratorium Magnel voor Betononderzoek te Zwijnaarde, België. Bij “zonder transport” wordt enkel het transport van de afgewerkte betonbestanddelen (i.e. cement, granulaten, etc.) niet meegerekend. Het interne transport om tot deze bestanddelen te komen, zit wel in de berekening vervat.

Met de Eco-indicator worden opnieuw de verschillende effectcategorieën voor de respectievelijke betonsoorten bepaald. Een specifiek overzicht van de verschillende categorieën is terug te vinden in Bijlage D.

De effectcategorieën worden omgerekend naar schadecategorieën en naar de Eco-indicator door er het bijhorende gewicht aan toe te kennen: Figuur 6-20.

Het meest opvallend is het grote verschil tussen de mengsels met en zonder transport. De impact van het transport is voor de recycleerbare mengsels verantwoordelijk voor maar liefst 81% tot 86% van de totale score van de eco-indicator. Bij de referentiemengsels bedraagt het gedeelte, toegeschreven aan transport nog steeds 44% tot 55%.

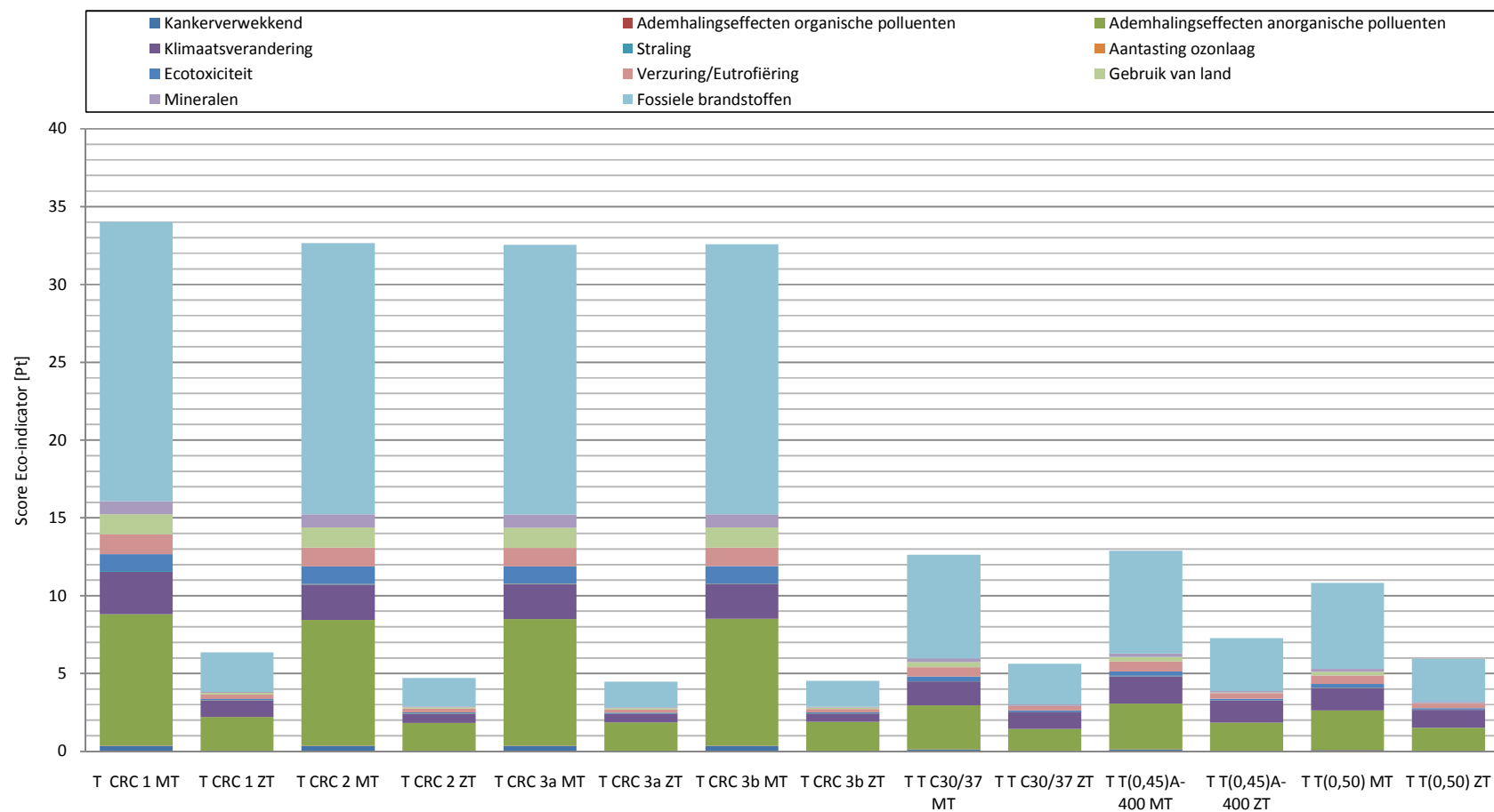
Deze analyse toont duidelijk de zeer grote invloed van het transport aan. Alle inspanningen ter beperking van de milieu-impact van betonsoorten zijn tevergeefs indien geen strategische keuze voor de inplanting van een betoncentrale wordt gemaakt.

Een tweede opvallend aspect is de schijnbaar veel hogere impact bij de recycleerbare mengsels, in verhouding tot deze van de referentiemengsels. Dit aspect dient echter sterk gerelativeerd te worden. Voor de levering aan het Laboratorium Magnel van granulaten en zand, die samen drie kwart van de totale massa aan vaste bestanddelen in het beton vertegenwoordigen, dient een veel grotere afstand over de weg afgelegd te worden in het geval van kalksteengranulaten en –zand, dan voor de overige granulaten en voor rivierzand. Volledig recycleerbaar beton maakt enkel gebruik van kalksteengranulaten en –zand, met uitzondering van CRC 3b, waar ook een beperkte fractie porfiersteenslag aanwezig is. Doordat het vervoer over de weg verhoudingsgewijs een veel grotere milieu-impact teweeg brengt dan wanneer bijvoorbeeld over water wordt getransporteerd, liggen de waarden voor de volledig recycleerbare mengsels veel hoger dan bij de referenties. De grootte van dit verschil wordt veroorzaakt door het belangrijk gewicht dat door de Eco-indicator 99 wordt toegekend aan de schaars geworden fossiele brandstoffen. Het zijn net deze fossiele brandstoffen, die in de huidige maatschappij nog steeds de energie voor transport leveren.

Omdat transport een dergelijke grote invloed heeft op de resultaten van de levenscyclusanalyse, wordt verduidelijkt welke vervoersmiddelen werden gebruikt bij de berekening en welke afstand deze dienden te overbruggen. De granulaten en het zand oefenen vanwege het hoge gewicht de grootste invloed uit op de totale transportimpact. Voor alle transport over de weg wordt het gebruikte voertuig in de Ecoinvent database gedefinieerd als “Transport, van < 3,5 ton CH”. De kalksteengranulaten en het kalksteenzand dienden 95km over de weg af te leggen. De overige granulaten en het rivierzand werden over het water via “Transport, barge RER” getransporteerd over een afstand van 195km en vervolgens nog 14 kilometer over de weg.

Deze vaststelling toont nogmaals het uiterst relatieve karakter aan bij het in rekening brengen van transport. Een andere locatie voor de productie van beton, zou immers een volledig andere indruk kunnen geven. Om een soortgelijk vertekend beeld in het vervolg van deze studie te vermijden, wordt transport van betonbestanddelen niet langer als parameter in rekening gebracht. De klemtoon van deze studie ligt immers nog steeds op de impact van de betonsamenstelling zelf, zonder dergelijke randverschijnselen.

NOTA: Het blijft belangrijk bij de interpretatie van deze resultaten steeds voor ogen te houden dat de besproken betonsoorten niet alle tot dezelfde sterkteklasse behoren en niet alle dezelfde duurzaamheidskenmerken vertonen en de resultaten dus steeds gerelativeerd moeten worden.



Figuur 6-20: Eco-indicator voor een kubieke meter beton, met en zonder transport van de afgewerkte betonbestanddelen [MT = met transport, ZT = zonder transport]

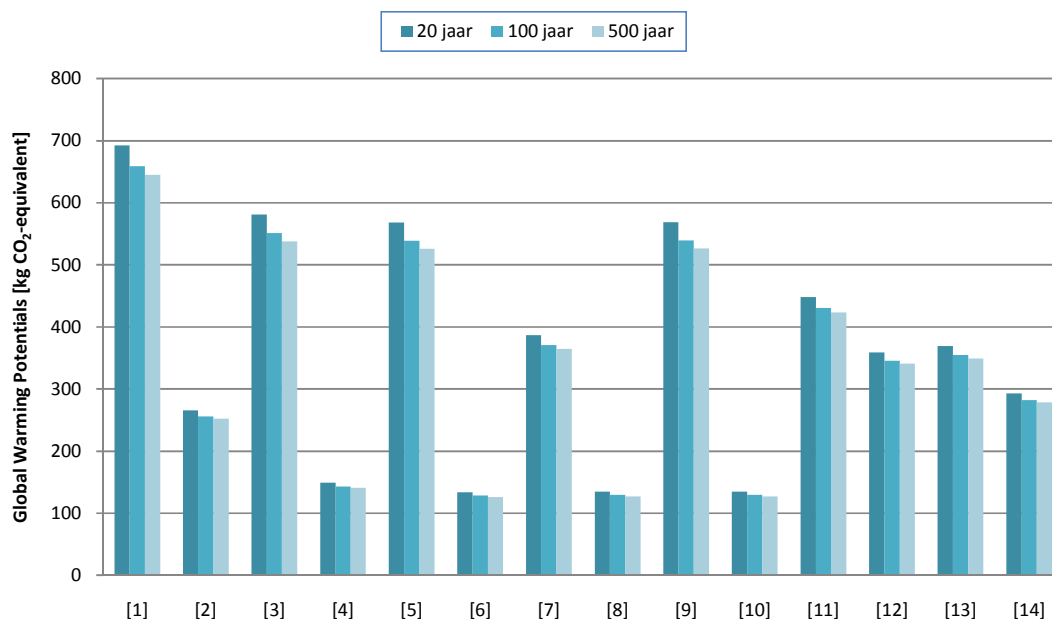
In Tabel 6-17 wordt de samenstelling van de Eco-indicator aan de hand van de drie schadecategorieën weergegeven. De recycleerbare mengsels zonder transport scoren goed ten opzichte van de referentiemengsels. CRC 2, CRC 3a en CRC 3b doen zelfs beter dan elke referentie. CRC 1 moet T(0,50) en T C30/37 laten voorafgaan, al blijft het verschil beperkt. De algemeen betere prestaties van de recycleerbare betonsoorten (CRC 1 » LS98-FA2-C(I)65-FA35; CRC 2 » LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35; CRC 3a » LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6; CRC 3b » LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6) is vooral te wijten aan de vervanging van cement door vliegashoudend cement. Bij CRC 2 en CRC 3 wordt bovendien hoogovencement gebruikt i.p.v. portlandcement.

Tabel 6-17: Opbouw van de Eco-indicator uit de verschillende schadecategorieën

Schadecategorieën [Pt]	T CRC 1 MT	T CRC 1 ZT	T CRC 2 MT	T CRC 2 ZT	T CRC 3a MT	T CRC 3a ZT	T CRC 3b MT
Totaal (Eco-indicator)	34.03	6.35	32.66	4.70	32.55	4.47	32.59
Volksgezondheid	11.58	3.28	10.76	2.42	10.77	2.40	10.78
Kwaliteit van het ecosysteem	3.65	0.48	3.62	0.42	3.60	0.38	3.60
Natuurlijke grondstoffen	18.80	2.59	18.28	1.86	18.19	1.68	18.20
Schadecategorieën [Pt]	T CRC 3b ZT	T T C30/37 MT	T T C30/37 ZT	T T(0,45)A-400 MT	T T(0,45)A-400 ZT	T T(0,50) MT	T T(0,50) ZT
Totaal (Eco-indicator)	4.54	12.63	5.63	12.89	7.26	10.82	5.95
Volksgezondheid	2.43	4.50	2.53	4.85	3.26	4.10	2.68
Kwaliteit van het ecosysteem	0.39	1.24	0.39	1.22	0.53	1.02	0.42
Natuurlijke grondstoffen	1.72	6.89	2.70	6.82	3.48	5.70	2.85

De bijdrage van de mengsels tot de klimaatsverandering, wordt eveneens met de methode van het IPCC geanalyseerd met een beschouwde tijdshorizon van 20, 100 en 500 jaar. De resultaten hiervan worden grafisch weergegeven in Figuur 6-21.

De voordelen van het volledig recyclebaar beton worden met deze methode nog duidelijker. Binnen elke tijdspanne en voor elke recycleerbare betonsoort, is de massa CO₂-equivalent heel wat lager dan voor de referentiemengsels (met uitzondering van T C30/37), wanneer de berekening zonder transport wordt gemaakt. Dit verschil bedraagt maximaal zelfs 62% in alle drie de tijdspannes (T CRC 3a ZT – T T(0,45)A-400 ZT). Wanneer het opwarmend vermogen van de mengsels met inbegrip van transport wordt vergeleken met het opwarmend vermogen zonder transport, is de invloed van de fossiele brandstoffen op het broeikaseffect opnieuw erg duidelijk.



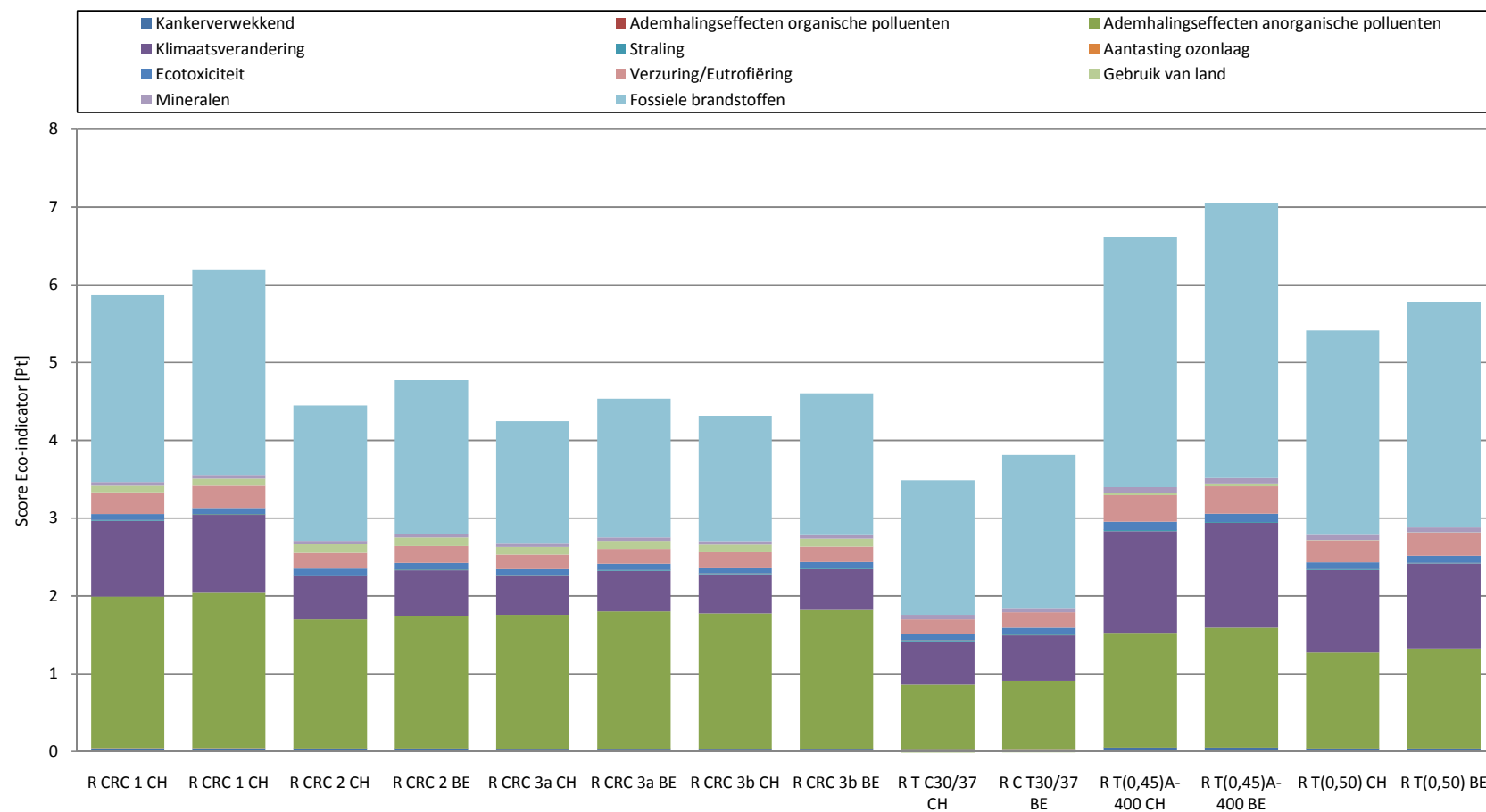
Figuur 6-21: Global warming potential voor 1m³ van de verschillende betonsoorten in functie van de tijdshorizon [1] = [T CRC 1 MT]; [2] = [T CRC 1 ZT]; [3] = [T CRC 2 MT]; [4] = [T CRC 2 ZT]; [5] = [T CRC 3a MT]; [6] = [T CRC 3a ZT]; [7] = [T CRC 3b MT]; [8] = [T CRC 3b ZT]; [9] = [T T C30/37 MT]; [10] = [T T C30/37 ZT]. [11] = [T T(0,45)A-400 MT]; [12] = [T T(0,45)A-400 ZT]; [13] = [T T(0,50) MT]; [14] = [T T(0,50) ZT]

▪ *Nationaal verschil*

Om het verschil in impact als gevolg van louter nationale specificaties voor energievoorzieningen te kunnen inschatten, wordt van elke betonsoort met gerecycleerd cement de schadekarakterisatie opgemaakt met zowel Belgische als Zwitserse waarden voor energievoorzieningen en dit zowel bij de productie van het beton zelf als bij de productie van de erin verwerkte cementen. De invloed op elke schadecategorie is terug te vinden in Bijlage D.

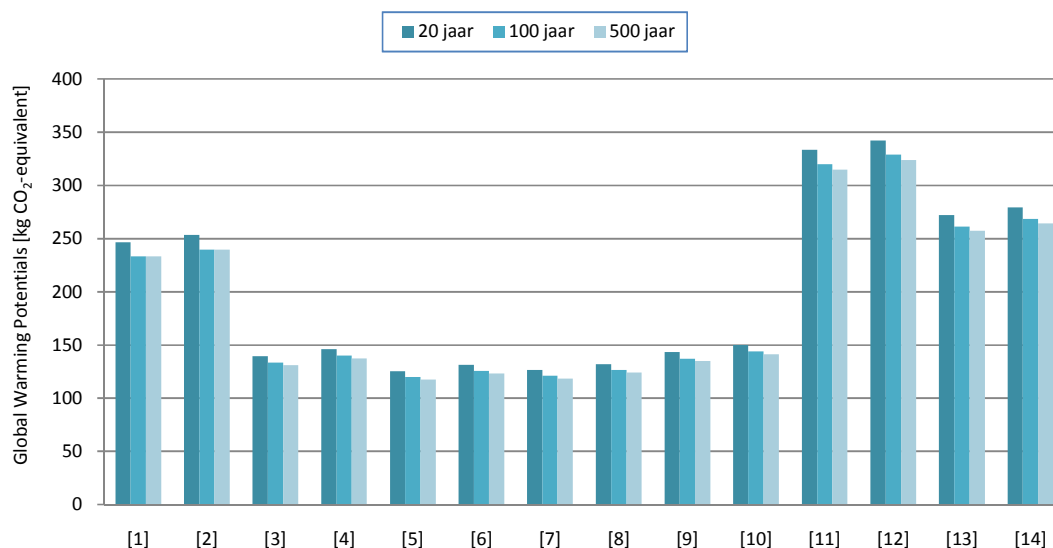
Uit deze schadecategorieën wordt de Eco-indicator berekend voor de Belgische en Zwitserse betonsoorten: Figuur 6-22.

Uit de grafiek blijkt duidelijk dat elke Belgische betonsoort opnieuw slechter scoort dan zijn respectievelijke Zwitserse tegenhanger. Ook valt op dat, net zoals hoger werd opgemerkt voor het beton met traditioneel cement, ook de recycleerbare betonsoorten met gerecycleerd cement gemiddeld een veel lagere Eco-indicator bezitten dan de referentiemengsels. Voor het best presterende recycleerbare mengsel (R CRC 3a) bedraagt de Eco-indicator 4,25Pt, terwijl het minst goed presterende referentiemengsel (T T(0,45)A-400) - uiteraard beide met Zwitsers cement en exclusief transport gerekend - een Eco-indicator van 7,26Pt bezit, wat toch al een verschil van 41,5% teweegbrengt.



Figuur 6-22: Eco-indicator voor 1m³ van de gerecycleerde betonsoorten zonder transport van de afgewerkte betonbestanddelen [BE = Belgisch beton, CH = Zwitsers beton]

Wanneer de analyse wordt gevoerd volgens de methode van het IPCC, zijn de verschillen nog duidelijker. Figuur 6-23 illustreert dit grafisch. De kloof tussen de recycleerbare betonsoort die het laagste GWP (Global Warming Potential) bezit en het referentiebeton dat het hoogste GWP bezit, - beide met de Zwitserse energiewaarden en zonder transportinvloeden - wordt zelfs groter wanneer de berekeningen volgens het IPCC worden uitgevoerd. De reductie in massa CO₂-equivalent van CRC 3b op 20, 100 en 500 jaar bedraagt t.o.v. T(0,45)A-400 maar liefst 65,1%, 65,3% en 65,5%.



Figuur 6-23: Global warming potential voor 1m³ van de verschillende betonsoorten in functie van de tijdshorizon [1] = R CRC 1 CH; [2] = R CRC 1 BE; [3] = [R CRC 2 CH]; [4] = [R CRC 2 BE]; [5] = [R CRC 3a CH]; [6] = [R CRC 3a BE]; [7] = [R CRC 3b CH]; [8] = [R CRC 3b BE]; [9] = [R T C30/37 CH]; [10] = [R T C30/37 BE]. [11] = [R T(0,45)A-400 CH]; [12] = [R T(0,45)A-400 BE]; [13] = R T(0,50) CH; [14] = [R T(0,50) BE] [BE = Belgisch beton, CH = Zwitsers beton]

Opvallend voor het beton is nogmaals de slechts zeer langzame afbouw van het GWP wanneer een grotere tijdshorizon wordt beschouwd. De gemiddelde afbouw, beschouwd voor alle besproken betonsoorten, bedraagt slechts 4% wanneer de vergelijking gemaakt wordt op 20 jaar en 100 jaar. De tijdshorizon van 20 jaar naar 500 jaar verlengen, brengt slecht een reductie van 6% teweeg. Dit wijst er nogmaals op, dat beton, net als cement, vooral een grote uitstoot aan CO₂ veroorzaakt, een broeikasgas dat slechts zeer langzaam afbreekt.

6.3.5.3. Een één kilometer lange weg

Een meer praktische functionele eenheid bestaat uit een één kilometer lange betonweg. De analyse wordt gemaakt voor CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35] en T(0,45)A-400, beide zowel met als zonder gebruik van gerecycleerd cement. Om dit werk overzichtelijk te houden, worden alle grafieken in Bijlage D weergegeven.

Tabel 6-18 toont de Eco-indicator van deze mengsels. Indien T CRC 2 wordt gebruikt i.p.v. T T(0,45)A-400, wordt een reductie in schade van 35,3% bekomen. Indien hetzelfde mengsel wordt gemaakt met gerecycleerd cement (R CRC 2), loopt de beperking van de impact zelfs op tot 38,8%. Voor CRC 2 daalt de Eco-indicator met 5,3% als het gerecycleerde mengsel met het traditioneel cement wordt vergeleken. Voor T(0,45)A-400 bedraagt de daling 9,0%. De grootste verschillen zijn dus te danken aan de gedeeltelijke vervanging van het cement in CRC 2 door vliegashoudend cement en het gebruik van hoogovencement i.p.v. portlandcement.

**Tabel 6-18: Eco-indicator van het wegenbeton en onderverdeling in de drie subcategorieën
CRC 2 = [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]**

Schadecategorieën [Pt]	T CRC 2	T T(0,45)A-400	R CRC 2	R T(0,45)A-400
Totaal (Eco-indicator)	6086,98	9409,32	5762,99	8560,25
Volksgezondheid	3134,07	4217,04	2934,84	3689,82
Kwaliteit van het ecosysteem	541,73	685,81	515,05	617,21
Gebruik van natuurlijke grondstoffen	2411,18	4506,48	2313,10	4253,22

De resultaten uit de berekening volgens de methoden van het IPCC worden getoond in Tabel 6-19. De verschillen in GWP liggen nog hoger dan de verschillen die werden opgemeten met behulp van de Eco-indicator. Een daling in de massa CO₂-equivalent van circa 61% op zowel 20, 100 als 500 jaar wordt bekomen wanneer R CRC 2 wordt gebruikt i.p.v. T T(0,45)A-400. De daling in GWP van de CRC 2-mengsels onderling bedraagt binnen deze tijdspannes achtereenvolgens 6,5%, 6,7% en 6,8%. Voor T(0,45)A-400 ligt de reductie met 7,2%, 7,4% en 7,5% nog iets hoger.

Tabel 6-19: Global Warming Potential [ton CO₂-equivalent] van wegenbeton in een één kilometer lange weg

Tijdshorizon	T CRC 2	T T(0,45)A-400	R CRC 2	R T(0,45)A-400
20 jaar	193,31	465,17	180,71	431,59
100 jaar	185,47	447,91	172,99	414,65
500 jaar	181,97	441,21	169,55	408,11

Voor de berekening werd de analyse uitgevoerd met de onderstelling dat de topklaarheid van de weg na 10 jaar hoe dan ook vervangen zou worden, zoals aanbevolen wordt in De Winne (2008). Volgens een andere benadering zou de weg bijvoorbeeld pas hersteld kunnen worden zodra de afschilfering van het wegoppervlak 1kg afschilfering per vierkante meter wegoppervlak bedraagt, waarmee de duurzaamheid van het beton in rekening wordt gebracht. Uitgaande van analyse van data van het KMI, kan gesteld worden dat er over een periode van 10 jaar in België maximaal 30 vorst-dooi-cycli voorkomen. In dat geval zal de betonweg over dertig jaar blootgesteld worden aan 90 vorst-dooi-cycli. Vertrekkend van resultaten van de vorst-dooiproef op 28 cycli, bij beton met een leeftijd

van 6 maanden en waarvan de proef werd uitgevoerd op het afstrijkvlak (het vlak dat bij een betonweg belast zal worden) kan Tabel 6-20 opgesteld worden. Hierbij worden de resultaten van het beton zonder luchtbelvormer (T(0,45)) gebruikt, omdat de resultaten op het afstrijkvlak van T(0,45)A niet voorhanden zijn. Het spreekt voor zich, dat met T(0,45)A een gunstiger resultaat bekomen zou worden. Gezien volgens NBN B15-001 (2004) ook T(0,45) als referentie voor de milieuklasse XF4 (strengste klasse m.b.t. vorst en dooizouten) wordt aangehaald, zijn deze resultaten hoe dan ook niet onbelangrijk.

Tabel 6-20: Aantal noodzakelijke vernieuwingen van de betonweg over een beschouwde periode van 30 jaar, rekening houdend met de duurzaamheid van het beton

Mengsel	Afschilfering na 28 cycli [kg/m ³]	Tijdsduur tot herstelling [jaar]	Aantal nodige vernieuwingen	Volume beton nodig [m ³]
CRC 2	0,09	114,9	0	805
T(0,45)	1,35	7,9	3	1540

Hiermee kan de impact opnieuw volgens de methode met de Eco-indicator en de techniek van het IPCC worden berekend. De resultaten worden getoond in respectievelijk Tabel 6-21 en Tabel 6-22..

Tabel 6-21: Eco-indicator van het wegenbeton en onderverdeling in de drie subcategorieën, rekening houdend met de duurzaamheid van het beton

Schadecategorieën [Pt]	T CRC 2	T T(0,45)	R CRC 2	R T(0,45)
Totaal (Eco-indicator)	3783,80	11189,46	3582,40	10179,75
Volksgezondheid	1948,20	5014,85	1824,36	4387,89
Kwaliteit van het ecosysteem	336,75	815,56	320,16	733,98
Gebruik van natuurlijke grondstoffen	1498,84	5359,05	1437,87	5057,88

Tabel 6-22: Global Warming Potential [ton CO₂-equivalent] van een één kilometer lange betonweg, rekening houdend met de duurzaamheid van het beton

Tijdshorizon	T CRC 2	T T(0,45)	R CRC 2	R T(0,45)
20 jaar	120,17	553,17	112,33	513,24
100 jaar	115,29	532,65	107,53	493,10
500 jaar	113,12	524,69	105,40	485,32

Meteen is duidelijk dat de gevolgen van een beperkte duurzaamheid zeer zwaar doorwegen op de impact van het beton. Volgens Eco-indicator 99 bedraagt de impact van R CRC 2 slechts 35% van deze van R T(0,45) en zelfs slechts 32% van deze van T T(0,45). Met de methode van het IPCC zijn der verschillen nog groter. Het GWP van R CRC 2 bedraagt hier slechts 22% van R T(0,45) en 20% van T T(0,45). De milieu-impact van een betonsoort wordt dus zeker niet enkel bepaald door de mechanische eigenschappen en de samenstelling van het beton. Ook een hoge duurzaamheid vervult een cruciale rol bij de beperking van deze milieu-impact.

6.3.5.4. Een door kolommen isostatisch ondersteunde balk

De levenscyclusanalyse van CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35], CRC 3a [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] en CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] wordt eveneens uitgevoerd aan de hand van een praktisch voorbeeld, zijnde een belaste balk, rustend op twee kolommen. De grafische voorstellingen kunnen in Bijlage D teruggevonden worden.

Het verschil tussen het beton met recycleerbaar cement en dat met traditioneel cement, wordt kleiner, zoals blijkt uit Tabel 6-23. De reden hiervoor is dat het wapeningsstaal in de betonconstructie verantwoordelijk is voor een gedeelte van de Eco-indicator en het gebruik van geregenereerd cement hier bijgevolg geen invloed op heeft. De recycleerbare betonmengsels scoren nog steeds beter dan de referentiemengsels, ongeacht of ze worden gefabriceerd met traditioneel of met gerecycleerd cement. Het maximale verschil wordt waargenomen tussen T T(0,50) en R CRC 3b [2] en bedraagt 25%.

Tabel 6-23: Eco-indicator van een op twee kolommen isostatisch opgelegde balk en onderverdeling in de drie subcategorieën CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35], CRC 3a [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] en CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]

Schadecategorieën [Pt]	T CRC 3a	T CRC 3b [1]	T CRC 3b [2]	T CRC1	T T C30/37	T T(0,50)
Totaal (Eco-indicator)	13,75	13,82	12,61	15,66	16,53	16,92
Volksgezondheid	6,28	6,30	5,76	7,17	7,17	7,32
Kwaliteit van het ecosysteem	1,29	1,30	1,18	1,39	1,39	1,45
Natuurlijke grondstoffen	6,18	6,22	5,67	7,10	7,97	8,15
Schadecategorieën [Pt]	R CRC 3a	R CRC 3b [1]	R CRC 3b [2]	R CRC1	R T C30/37	R T(0,50)
Totaal (Eco-indicator)	13,53	13,60	12,67	15,19	13,46	16,25
Volksgezondheid	6,14	6,,16	5,70	6,88	5,61	6,91
Kwaliteit van het ecosysteem	1,27	1,28	1,18	1,35	1,20	1,39
Natuurlijke grondstoffen	6,12	6,16	5,80	6,96	6,66	7,95

Het effect op het klimaat wordt met de IPCC-methode nog eens specifiek onder de loep genomen in Tabel 6-24. Ook hier bedragen de verschillen tussen beton met gerecycleerd en beton met traditioneel cement nog slechts enkele procenten. Het verschil met de referentiemengsels is echter nog steeds bijzonder groot, zowel voor geregenereerd als voor traditioneel cement.

Tabel 6-24: Global Warming Potential [kg CO₂-equivalent] voor een op twee kolommen isostatisch opgelegde balk

Tijdshorizon	T CRC 3a	T CRC 3b [1]	T CRC 3b [2]	T CRC1	T T C30/37	T T(0,50)
20 jaar	262,83	263,83	242,36	394,30	512,53	501,95
100 jaar	241,22	242,16	222,64	368,32	483,23	471,97
500 jaar	232,71	233,63	214,86	358,22	472,15	460,63
	R CRC 3a	R CRC 3b [1]	R CRC 3b [2]	R CRC1	R T C30/37	R T(0,50)
20 jaar	254,45	255,45	239,83	375,45	324,64	475,48
100 jaar	232,92	233,87	220,09	349,66	301,23	445,75
500 jaar	224,46	225,38	212,31	339,64	292,36	434,53

6.4. Interpretatie van de resultaten

Een belangrijke conclusie uit de levenscyclusanalyse is dat beton met geregenereerd cement hoe dan ook een lagere milieu-impact zal hebben dan hetzelfde beton met traditioneel cement. De grootte van deze impactsreductie is volledig afhankelijk van de specifieke toepassing.

Minstens even belangrijk als de impact van beton met geregenereerd cement, t.o.v. beton met traditioneel cement, is de mate waarin volledig recycleerbaar beton zich zelf milieuvriendelijk gedraagt. Ook hier is de balans zeer positief. Niet alleen volgens Eco-indicator 99, maar ook volgens de methodes van het IPCC ligt de impact van volledig recycleerbaar beton op het milieu steeds lager dan voor de respectievelijke referentiemengsels. De verschillen zijn ook hier opnieuw afhankelijk van de specifieke toepassing, maar de impactsreductie kan al snel 25% tot zelfs meer dan 60% bedragen.

De impact van een beton is bovendien niet enkel afhankelijk van de samenstelling ervan. Een beton met een hoge duurzaamheid kan namelijk onder dezelfde omstandigheden een veel langere (herstellingsvrije) levensduur kennen dan een gelijkaardig, maar minder duurzaam beton. Daarenboven kan, wanneer gebruik wordt gemaakt van beton dat tot een hogere sterkteklasse behoort, het materiaalgebruik vaak gereduceerd worden. Bij het maken van een levenscyclusanalyse moet dan ook ten allen tijde op afdoende wijze rekening worden gehouden met deze duurzaamheid, teneinde tot een correcte interpretatie van de resultaten te kunnen komen. De recycleerbare betonmengsels uit deze studie vertonen allen een goede duurzaamheid m.b.t. de beschouwde aspecten. Mede hierdoor presteren deze betonsoorten telkens goed wanneer ze aan een levenscyclusanalyse worden onderworpen.

Opmerkelijk is de gevoeligheid van de studies wanneer transport in de software wordt geïmplementeerd. Door het hoge verbruik van fossiele brandstoffen, kan de impact op het milieu bij een slecht gekozen ligging van een betoncentrale, al snel een veelvoud worden van de impact die het beton zelf veroorzaakt. De plaats van inplanting van een betoncentrale is dan ook een beslissing die door ondernemers weloverwogen moet genomen worden en waarin beleidsmakers zeker ook een sturende rol dienen op te nemen.

Een vierde waarneming betreft de zeker niet te onderschatten nationale verschillen wanneer het op de bepaling van de milieu-impact van een product aankomt. Bij de energieproductie heerst op internationaal niveau een groot verschil in het aandeel groene energie t.o.v. van kernenergie en energie geleverd door fossiele brandstoffen. Eco-indicator 99 kent net aan het gebruik van fossiele

brandstoffen een zeer hoog gewicht toe, waardoor hetzelfde product in landen met een groter aandeel energie door fossiele brandstoffen, verantwoordelijk zal zijn voor een hogere impact.

De invloed van het tijdsvenster op het GWP van beton blijkt zeer gering. Bij de productie van beton neemt CO₂ namelijk een groot gedeelte van het geheel aan emissies voor zijn rekening. Koolstofdioxide breekt echter slecht zeer langzaam af, zodat de tijdshorizon weinig invloed op de berekening van de bijdrage tot het broeikaseffect heeft.

Tot slot worden de verschillen in de diverse berekeningsmethodes geanalyseerd. Het volledig recycleerbaar beton en de geregenereerde cement scoren verhoudingsgewijs beter wanneer ze worden geanalyseerd met de methode van het IPCC, dan met Eco-indicator 99. De verklaring is eenvoudig: Volledig recycleerbaar beton veroorzaakt in de eerste plaats een reductie in CO₂-uitstoot en emissies zijn net de enige aspecten die door het IPCC in rekening worden gebracht. Wanneer gewerkt wordt met Eco-indicator 99, worden nog andere parameters betrokken in het onderzoek, waardoor het gewicht van de CO₂-reductie zich minder laat gevoelen. Uiteraard is er ook nog het verminderde grondstoffenverbruik, maar de grondstoffen, nodig voor de productie van klinker, vertegenwoordigen in Eco-indicator 99 slechts een geringe bijdrage tot de totale impact.

Als eindconclusie kan gesteld worden dat zowel volledig recycleerbaar beton, als geregenereerd cement, ongeacht regionale verschillen, steeds een positieve invloed zullen hebben op zowel grondstoffen- en landgebruik, energieverbruik als op de vermindering van schadelijke emissies.

7. Conclusie

7.1. Duurzaamheid

In deze scriptie werden vooreerst verschillende duurzaamheidsaspecten van volledig recycleerbaar beton onderzocht. Concreet werden de weerstand tegen vorst en dooizouten, het carbonatatiegedrag en de weerstand tegen de indringing van chloriden geanalyseerd. Bijkomend werd eveneens de druksterkte van alle mengelingen op verschillende leeftijden bepaald.

De resultaten van de drukproeven waren zeer bevredigend. Het recycleerbaar beton met de laagste druksterkte op 28 dagen ouderdom, behoorde nog steeds tot betonklasse C40/50.

Om een idee te krijgen van het aantal vorst-dooicycli waaraan een beton in België gemiddeld wordt onderworpen, werden de door het KMI geregistreerde temperaturen van de periode 1999-2008 geanalyseerd. Daaruit bleek dat de normatief vastgelegde methode van 28 vorst-dooi-cycli een goede referentie is voor de Belgische blootstelling over een periode van tien jaar. Slechts bij één van de vijf geanalyseerde meetstations werd over de periode van 10 jaar een hoger aantal cycli opgemeten, maar ook dan nog bleef het verschil beperkt: In dit geval werden 30 cycli waargenomen.

De resultaten na 28 vorst-dooi-cycli in combinatie met dooizouten, toonden aan dat de ouderdom van het mengsel een zeer grote rol speelt in de schade die veroorzaakt wordt. Alle recycleerbare mengsels vertoonden met name een grotere hoeveelheid afgeschilferd materiaal op drie maand ouderdom, dan op één en zes maand ouderdom. Bovendien was de afschilfering bij deze mengsels steeds groter op het bekistingsvlak dan op het afstrijkvlak.

De chloride-indringing in de betonmengsels werd onderzocht door cyclische onderdompeling in een oplossing van 3,5m% NaCl, waarmee een getijde werd gesimuleerd. Ongeacht de duur van deze cyclus, werd na 20 weken bij geen enkel mengsel een significante toename in indringing in functie van de tijd vastgesteld. Het is dus mogelijk dat, wanneer het beton cyclisch wordt onderworpen aan getijdenwerking, er een evenwicht ontstaat tussen instromende chloriden (bij onderdompeling) en uit het beton migrerende chloriden. Dit zou betekenen dat, voor de onderzochte mengsels onder de in dit onderzoek opgelegde randvoorwaarden, de kans op chloride-geïnitieerde wapeningscorrosie beperkt is. De indringingsdiepte overschreed namelijk amper 10mm, terwijl volgens Eurocode 2 de minimale betondekking onder de hier gesimuleerde omstandigheden 45mm bedraagt.

De weerstand tegen carbonatatie werd bepaald aan de hand van een versnelde carbonatatieproef, waarbij de proefstukken cyclisch een week onder water werden bewaard en een week aan een hogere concentratie CO_2 (10vol%) werden onderworpen. Voor elk recycleerbaar mengsel was deze weerstand minder groot dan voor referentiemengsel T(0,45). Toch bleef de indringing van de carbonatatie na 20 weken voor elk mengsel beperkt tot maximaal 10mm. Zo werd berekend dat onder normale omstandigheden (0,03vol% CO_2) de indringing na 100 jaar voor het slechtst presterende beton nog minder dan een centimeter zal bedragen. Wapeningscorrosie door carbonatatie valt in dat geval niet te vrezen.

7.2. Mortelproeven

Voor één mengsel, waarbij gebruik werd gemaakt van een combinatie van hoogovencement met aluminaatcement, werd een zeer moeilijke verwerkbaarheid van de verse betonspecie vastgesteld. Om hieraan oplossing te bieden, werd aan de hand van mortelproeven gezocht naar het effect van bindingsvertragers. Wijnsteenzuur, citroenzuur en gips werden afzonderlijk en in verschillende verhoudingen aan de mortels toegevoegd, maar bij geen enkel toevoegingspercentage werd voor een van de bindingsvertragers een bevredigend resultaat bekomen. Metingen met ultrasoongolven bevestigden de resultaten van de klassieke consistentieproeven: De toevoeging van bindingsvertragers kon nauwelijks het hydratatieproces van het cement vertragen. Bovendien werd vastgesteld dat beton, waaraan 0,10m% (van het geheel aan bindmiddelen) citroenzuur werd toegevoegd, een significant lagere druksterkte bezit op 28 dagen, dan hetzelfde beton zonder bindingsvertrager.

7.3. Levenscyclusanalyse

Vertrekkend van de resultaten van de duurzaamheidsproeven, werd voor de verschillende betonsoorten een uitgebreide levenscyclusanalyse uitgevoerd. De milieu-impact van de mengsels werd hierbij aan de hand van het softwareprogramma SimaPro onderzocht. Aan de hand van een aantal functionele eenheden werd hiermee de impact van dit beton op het milieu vergeleken met de impact van het equivalent referentiemengsel voor dezelfde blootstellingsklasse. Zowel de uitgevoerde duurzaamheidsproeven als de gekozen functionele eenheden werden zorgvuldig bepaald volgens in de praktijk voorkomende situaties, zodat dit onderzoek meer dan enkel een theoretisch belang zou hebben.

Twee methoden werden hierbij gehanteerd. Een eerste methode, Eco-indicator 99, gaf een beeld van de totale milieu-impact van de verschillende betonmengelingen, terwijl de tweede techniek, IPCC 2007 GWP, zich vooral toespitst op de uitgestoten broeikasgassen.

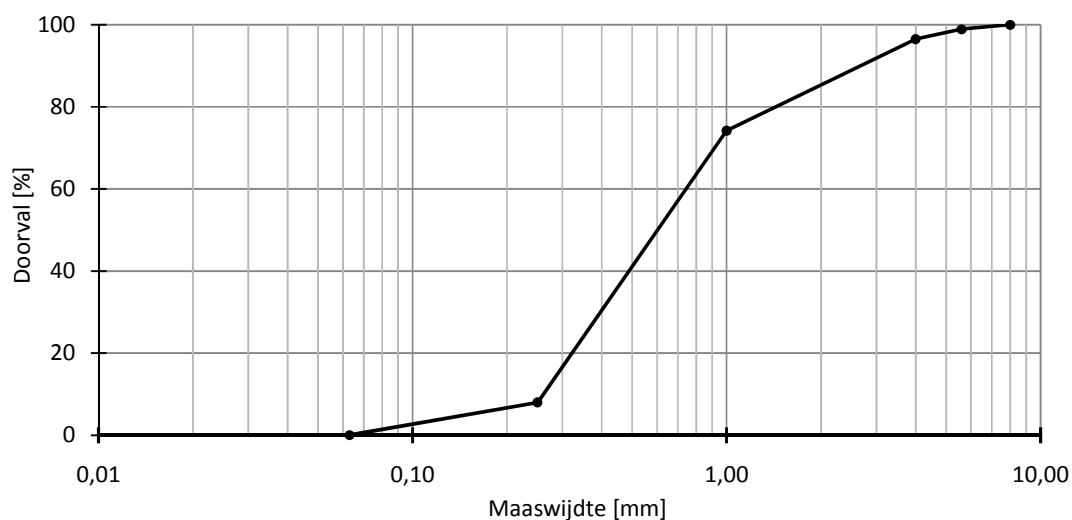
Als functionele eenheden werden één kubieke meter beton, een één kilometer lange weg en een door kolommen isostatisch ondersteunde balk in rekening gebracht. Alle berekeningen werden zowel uitgevoerd voor beton met traditioneel cement als voor beton met geregenereerd cement. Bijkomend werd eveneens afzonderlijk de impact van één ton cement (zowel CEM I als CEM III) berekend, met en zonder gebruik van geregenereerde klinker.

Volgens beide technieken en voor elke functionele eenheid waarbij het transport van de grondstoffen niet in rekening werd gebracht, scoorde het recycleerbare beton beter dan het referentiebeton. Bovendien scoorde het beton ook telkens beter wanneer er gebruik werd gemaakt van gerecycleerd cement, dan wanneer traditioneel cement werd gehanteerd. De mate waarin de verminderde impact voelbaar was, liep op van 25 tot zelfs meer dan 60%.

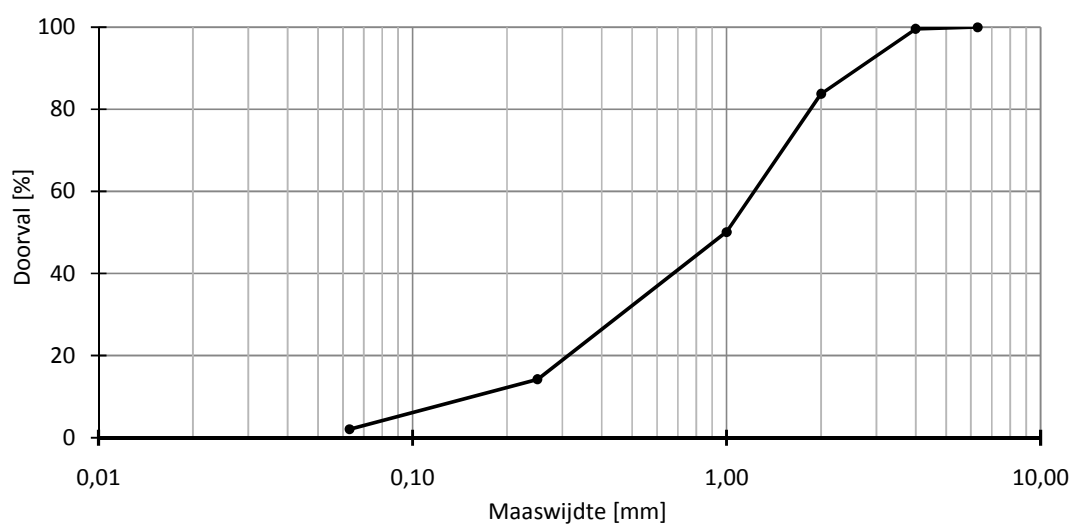
Bijlage A

Korrelverdeling

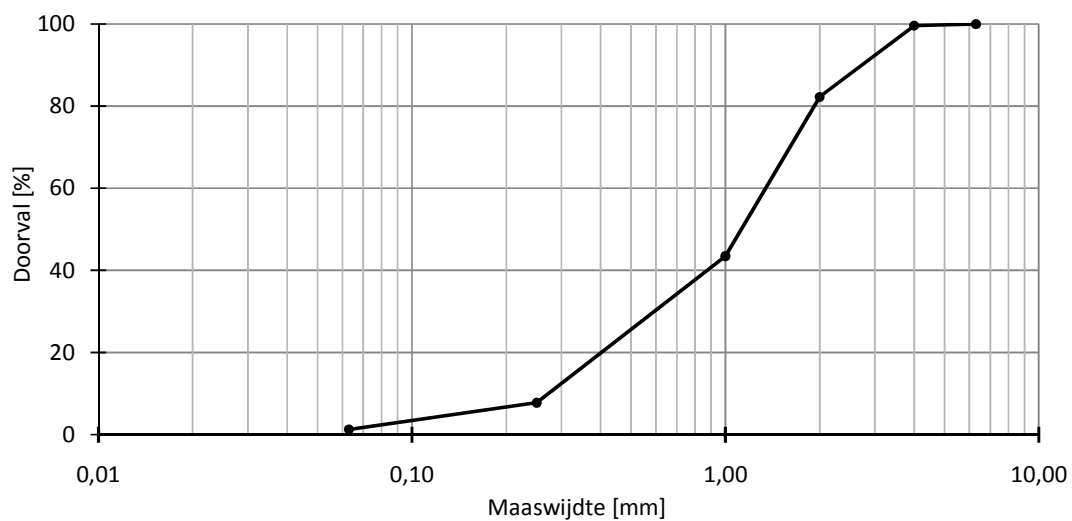
A.1 Zand



Figuur A. 1: Korrelverdelingsdiagram rivierzand 0/4

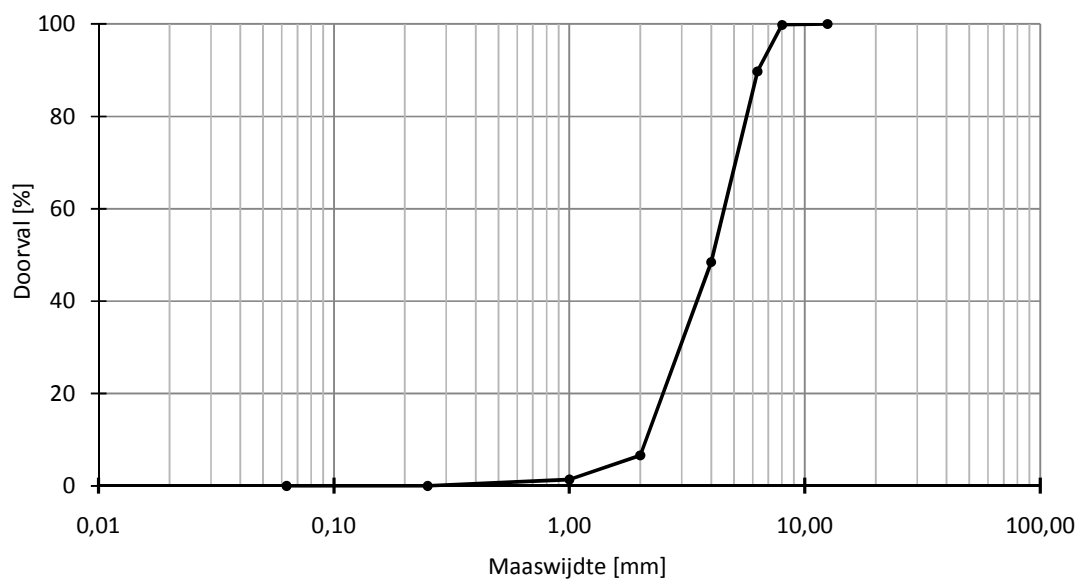


Figuur A. 2: Korrelverdelingsdiagram kalksteenzand 0/4

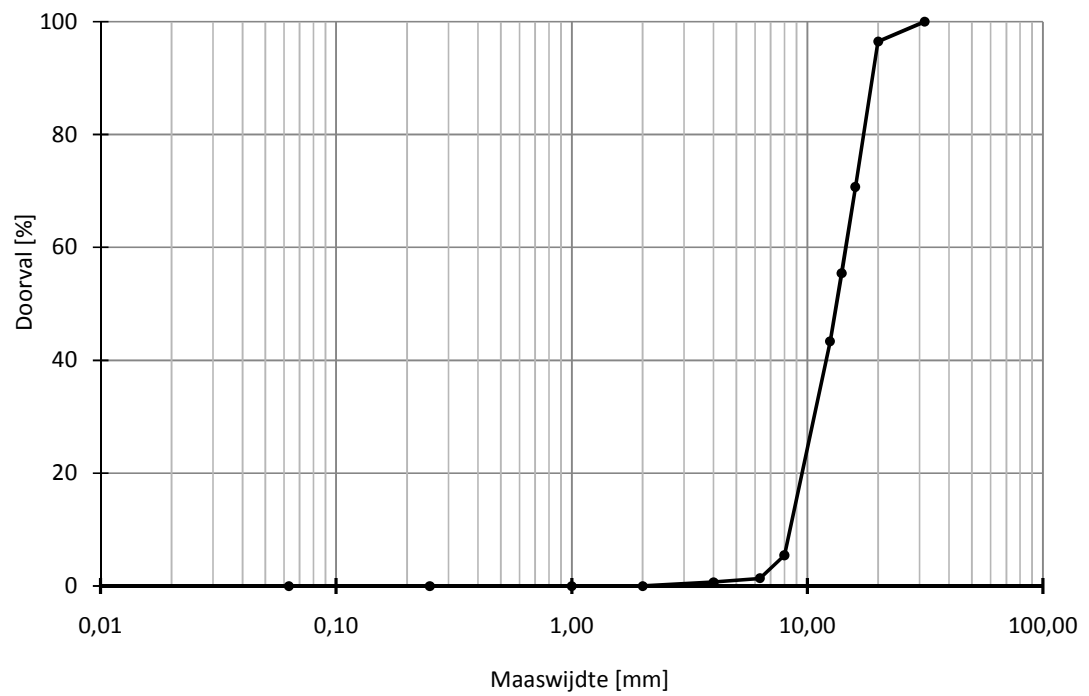


Figuur A. 3: Korrelverdelingsdiagram kalksteenzand 0/4

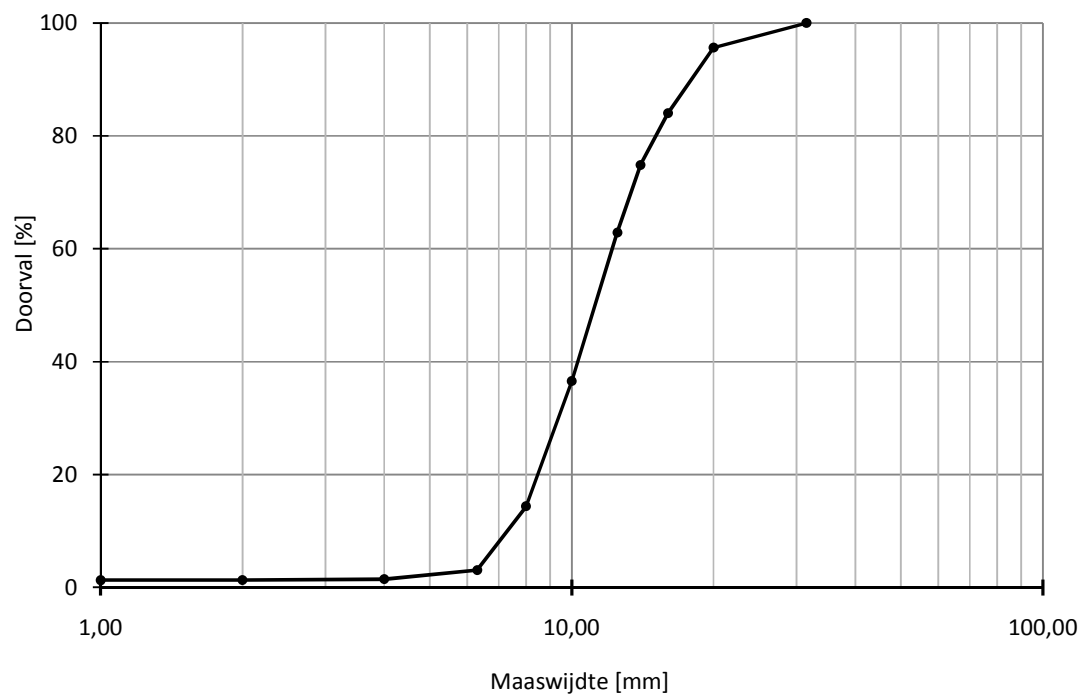
A.2 Granulaten



Figuur A. 4: Korrelverdelingsdiagram kalksteenslag 2/6



Figuur A. 5: Korrelverdelingsdiagram kalksteenslag 6/20



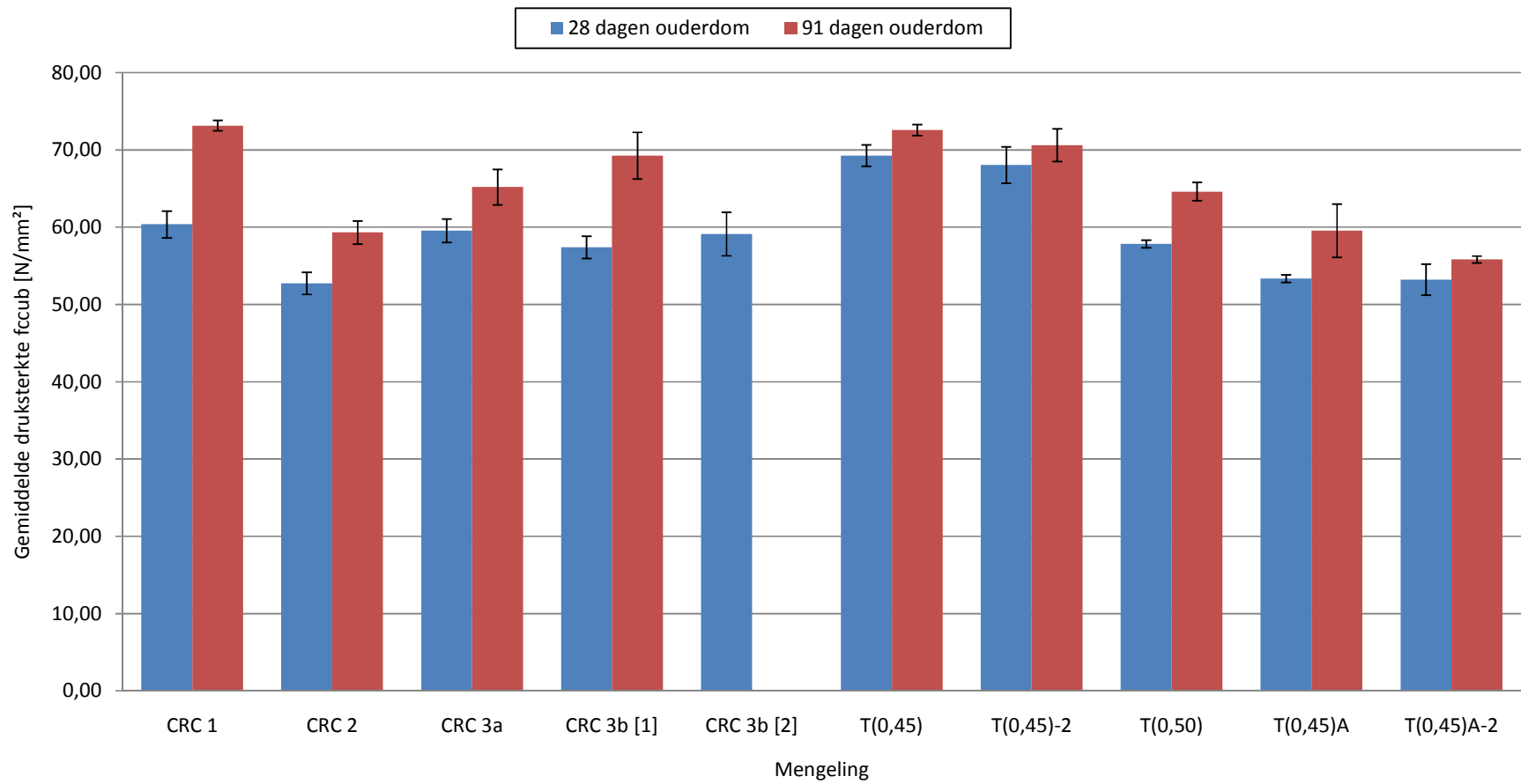
Figuur A. 6: Korrelverdelingsdiagram porfiersteenslag 6/20

Bijlage B

Druksterkte

Tabel B. 1: Druksterkte van de beproefde mengsels op 28 dagen en 91 dagen ouderdom

Mengsel	Druksterkte 28 dagen				Druksterkte 91 dagen		
	Gemiddelde druksterkte $f_{c,cub}$ [N/mm ²]	Standaard-afwijking σ [N/mm ²]	Karakteristieke druksterkte $f_{c,k}$	Betonklasse	Gemiddelde [N/mm ²]	Standaard-afwijking σ [N/mm ²]	Karakteristieke druksterkte $f_{c,k}$
CRC 1	60,38	1,74	57,53	C45/55	73,17	0,68	72,04
CRC 2	52,75	1,43	50,40	C40/50	59,32	1,49	56,88
CRC 3a	59,57	1,52	57,08	C45/55	65,21	2,30	61,45
CRC 3b [1]	57,42	1,45	55,05	C45/55	69,27	3,02	64,32
CRC 3b [2]	59,13	2,81	54,52	C40/50	-	-	-
T(0,45)	69,28	1,38	67,02	C55/67	72,58	0,72	71,41
T(0,45)-2	68,07	2,36	64,21	C50/60	70,63	2,12	67,15
T(0,50)	57,85	0,49	57,05	C45/55	64,62	1,19	62,68
T(0,45)A	53,37	0,68	52,25	C40/50	59,57	3,44	53,93
T(0,45)A-2	53,23	2,00	49,94	C35/45	55,84	0,45	55,11



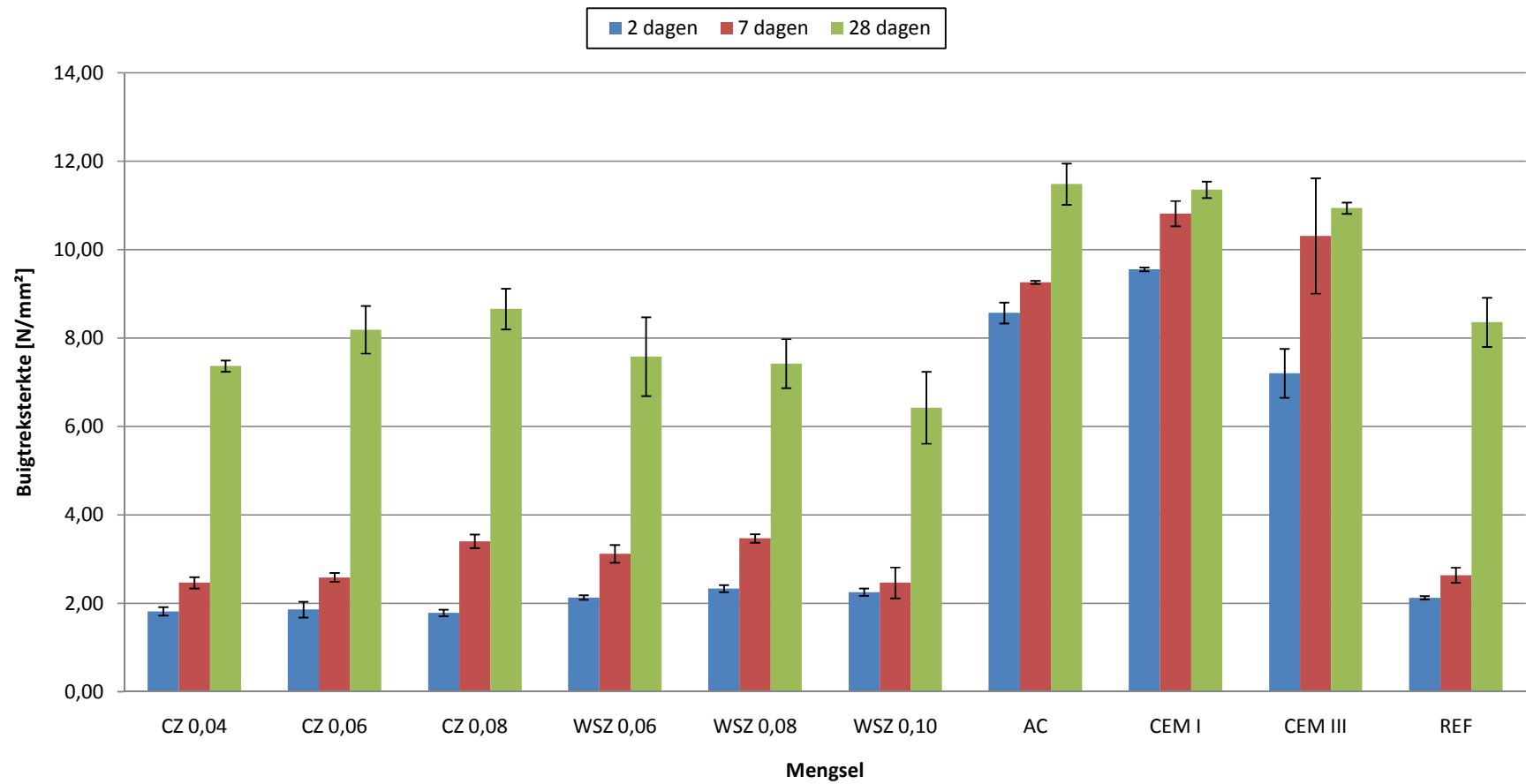
Figuur B. 1: Gemiddelde druksterkte van de mengelingen[N/mm²]

Bijlage C

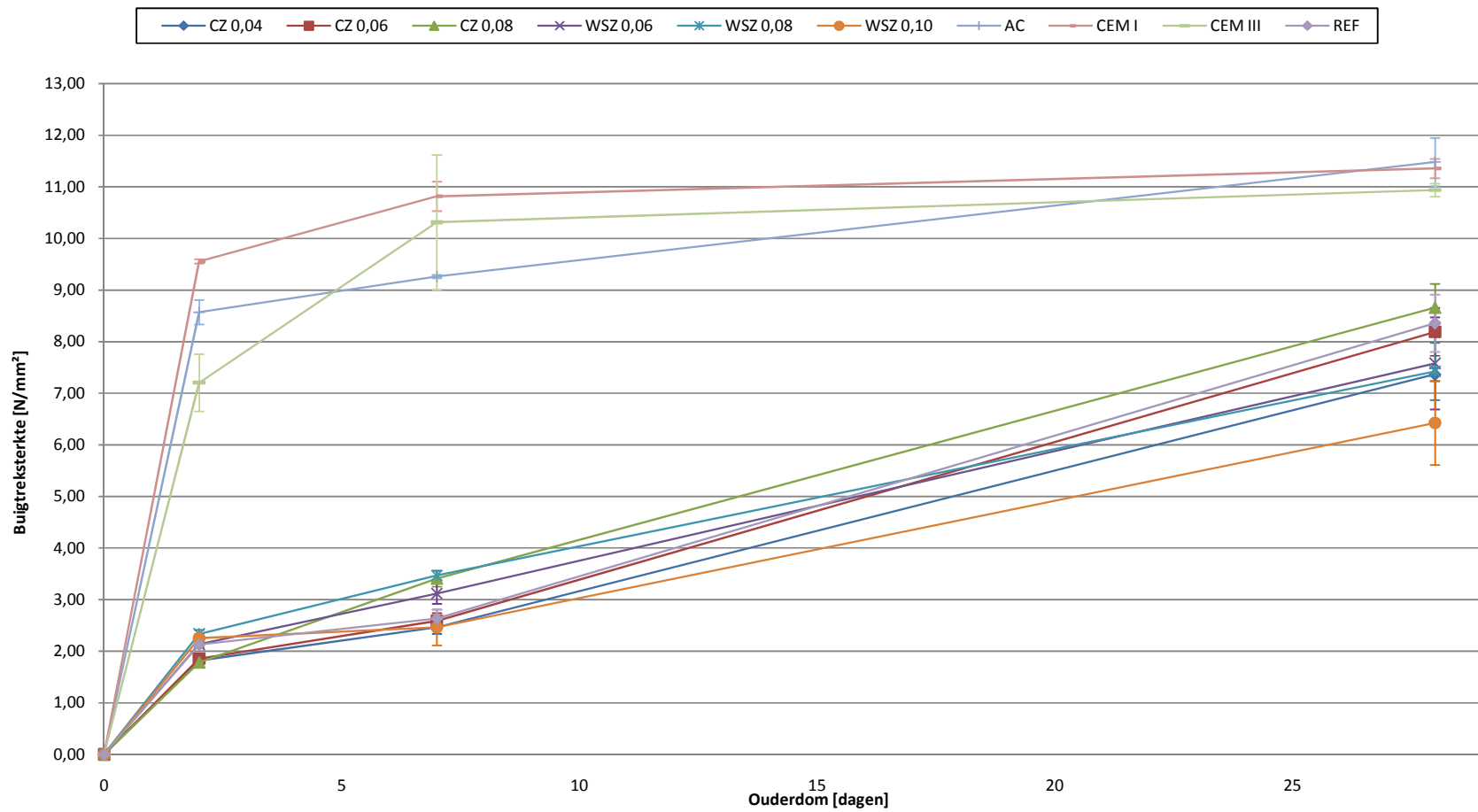
Buigtreksterkte en druksterkte mortelprisma's

Tabel C. 1: Gemiddelde buigtrekspanning, drukspanning en volumemassa bij breuk, samen met de standaardafwijkingen op de individuele waarden

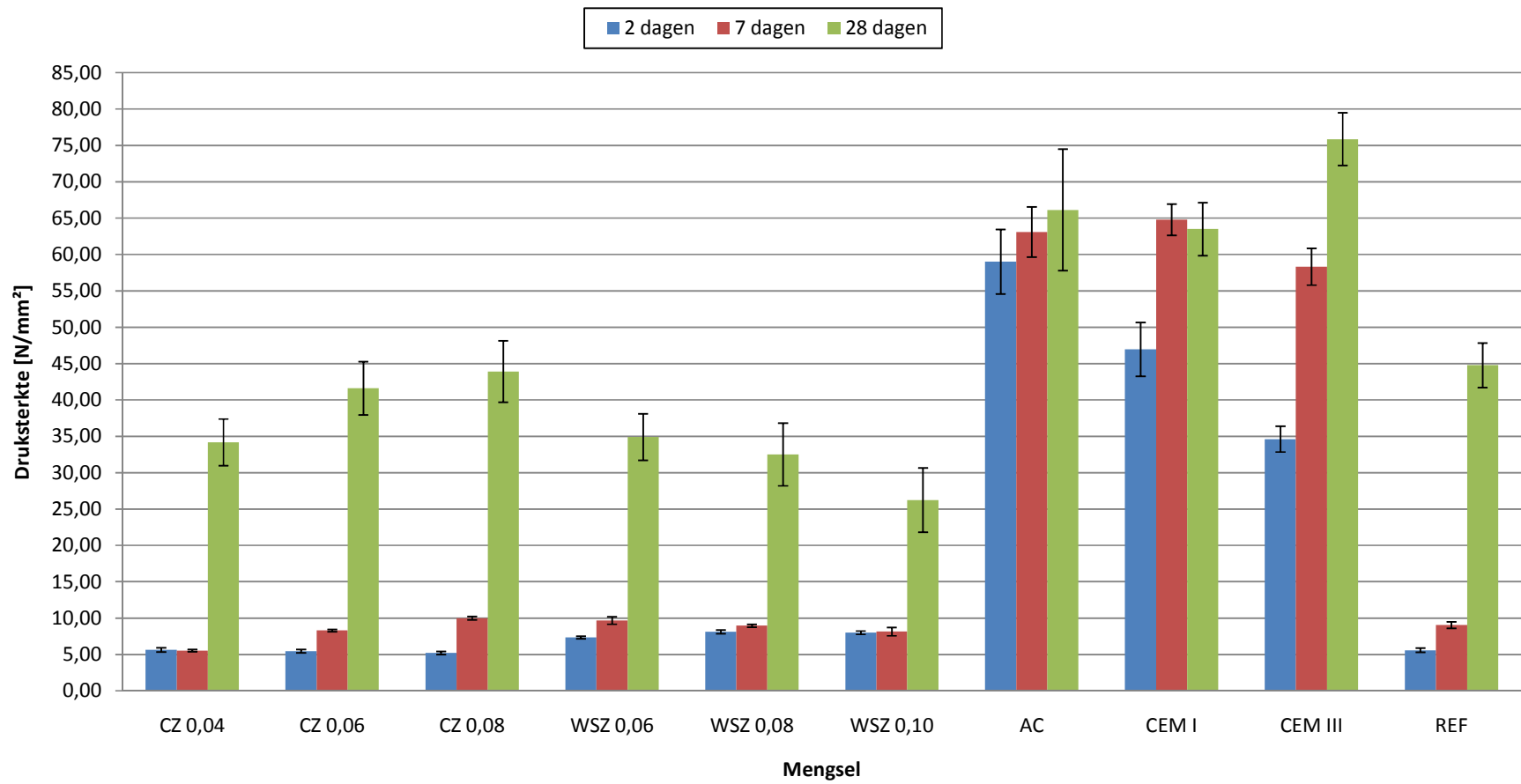
Ouderdom	Mengsel	Buigtreksterkte [N/mm ²]	σ	Druksterkte [N/mm ²]	σ	Volumemassa [kg/m ³]	σ
2 dagen	CZ 0,04	1,82	0,10	5,65	0,28	-	-
	CZ 0,06	1,86	0,18	5,48	0,24	-	-
	CZ 0,08	1,78	0,07	5,22	0,21	-	-
	WSZ 0,06	2,13	0,05	7,35	0,17	-	-
	WSZ 0,08	2,33	0,08	8,13	0,26	-	-
	WSZ 0,10	2,25	0,08	8,01	0,23	-	-
	AC	8,57	0,24	59,02	4,43	-	-
	CEM I	9,56	0,04	46,97	3,69	-	-
	CEM III	7,20	0,56	34,63	1,78	-	-
	REF	2,13	0,04	5,60	0,29	-	-
7 dagen	CZ 0,04	2,46	0,13	5,55	0,14	-	-
	CZ 0,06	2,59	0,10	8,32	0,16	-	-
	CZ 0,08	3,41	0,15	10,00	0,24	-	-
	WSZ 0,06	3,12	0,20	9,70	0,52	-	-
	WSZ 0,08	3,47	0,09	8,97	0,19	-	-
	WSZ 0,10	2,46	0,35	8,15	0,57	-	-
	AC	9,26	0,03	63,12	3,45	-	-
	CEM I	10,82	0,29	64,80	2,16	-	-
	CEM III	10,31	1,31	58,33	2,53	-	-
	REF	2,64	0,17	9,06	0,45	-	-
28 dagen	CZ 0,04	7,37	0,13	34,19	3,21	2034,10	19,86
	CZ 0,06	8,19	0,54	41,63	3,66	2174,28	22,65
	CZ 0,08	8,66	0,46	43,92	4,23	2139,71	5,24
	WSZ 0,06	7,58	0,89	34,91	3,20	2102,18	8,07
	WSZ 0,08	7,42	0,55	32,51	4,31	2171,17	31,15
	WSZ 0,10	6,43	0,81	26,25	4,41	2163,35	18,44
	AC	11,48	0,47	66,15	8,36	-	-
	CEM I	11,36	0,19	63,50	3,65	2298,67	9,66
	CEM III	10,94	0,13	75,88	3,62	2352,76	9,50
	REF	8,36	0,56	44,77	3,06	2117,96	10,04



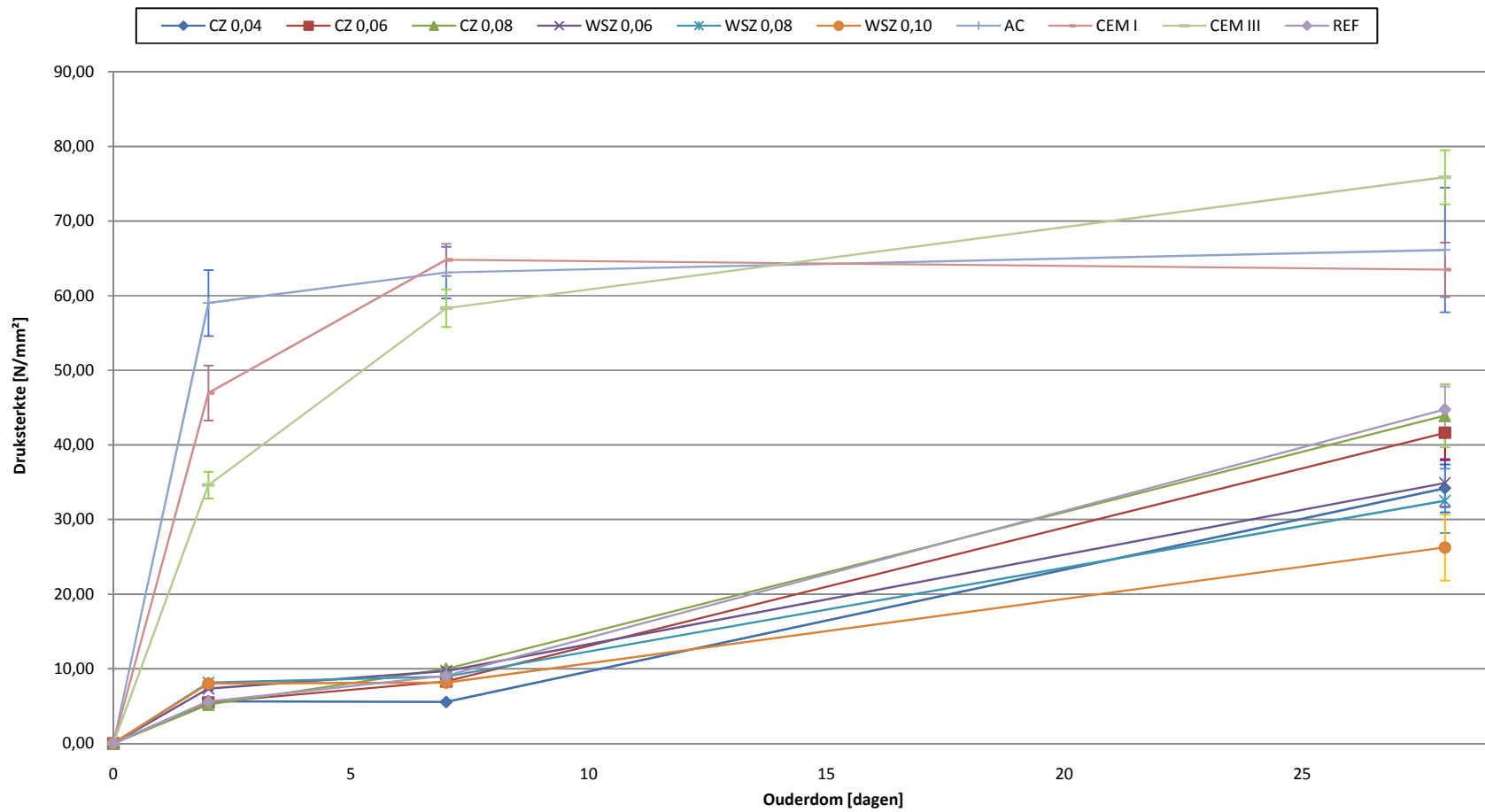
Figuur C. 1: Gemiddelde buigtreksterkte mortelprisma's op 2, 7 en 28 dagen ouderdom



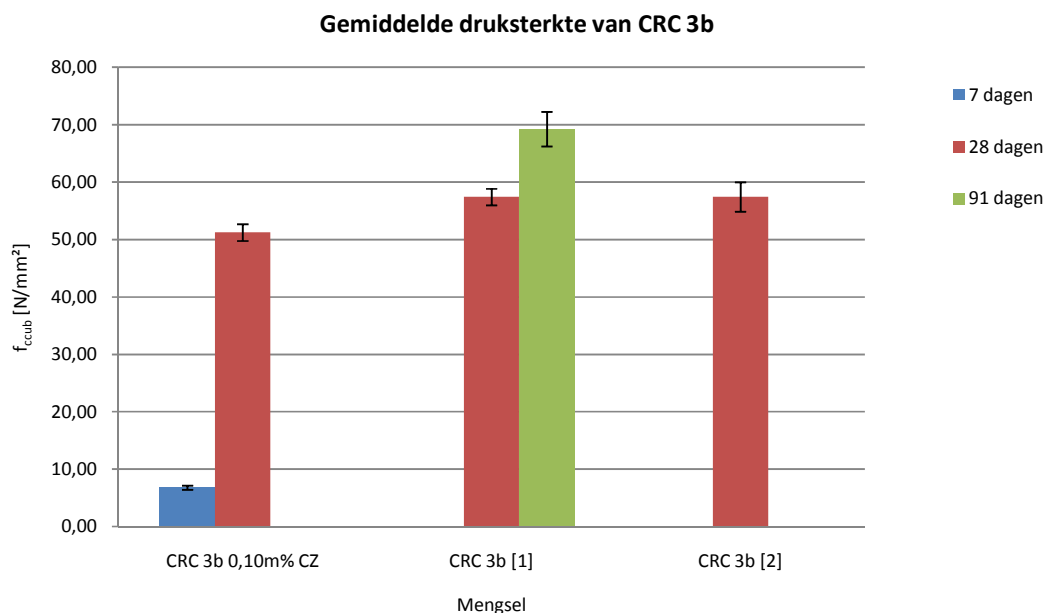
Figuur C. 2: Verloop buigtreksterkte mortelprisma's in functie van de tijd



Figuur C. 3: Gemiddelde druksterkte mortelprisma's op 2, 7 en 28 dagen ouderdom



Figuur C. 4: Verloop druksterkte mortelprisma's in functie van de tijd



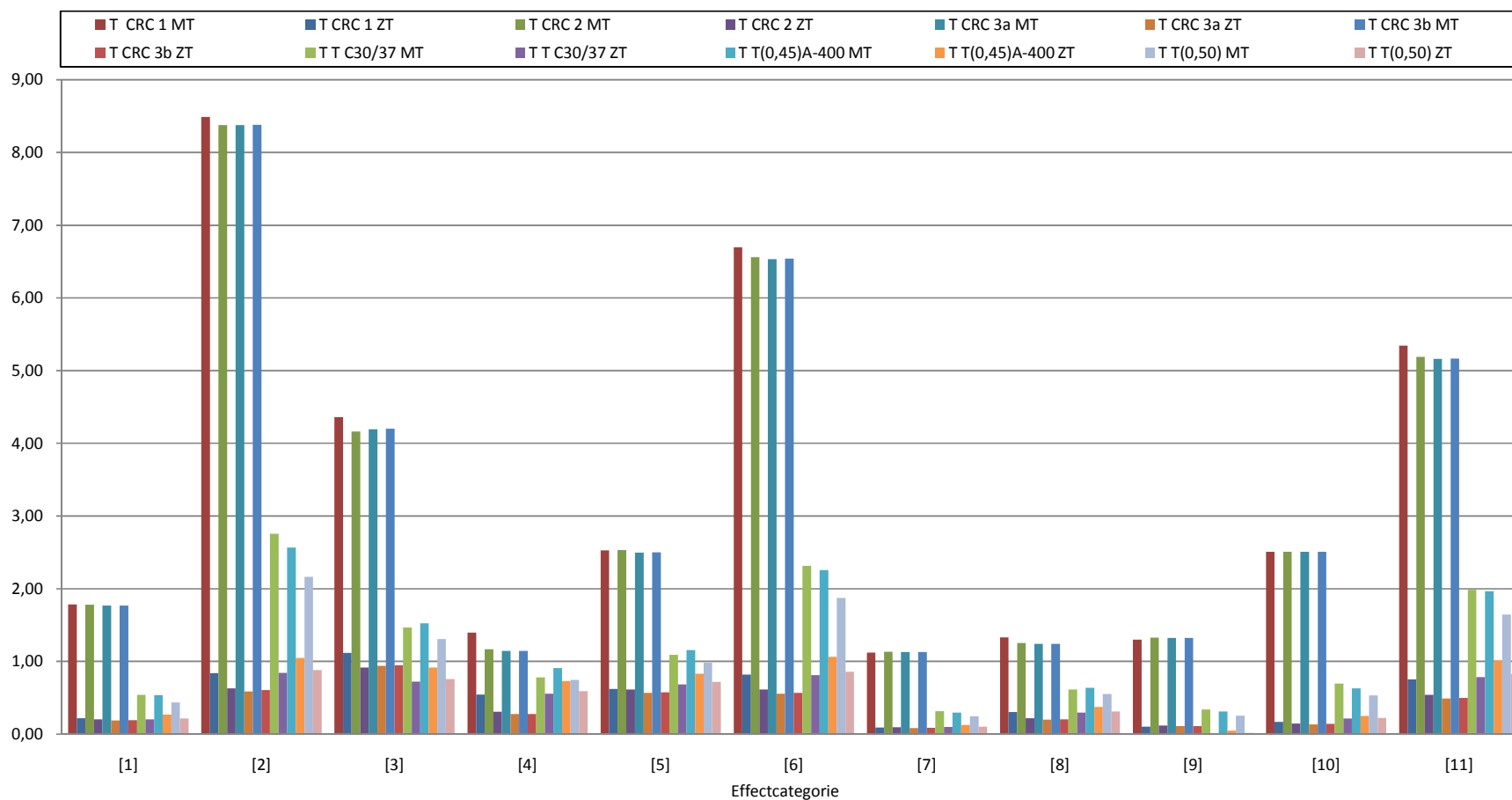
Figuur C. 5: Gemiddelde kubusdruksterkte voor CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] op 7, 28 en 91 dagen ouderdom, met en zonder toevoeging van 0,10m% bindingsvertrager citroenzuur

Tabel C. 2: Verwerkbaarheid en luchtgehalte van CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] met en zonder gebruik van 0,10m% citroenzuur als bindingsvertrager

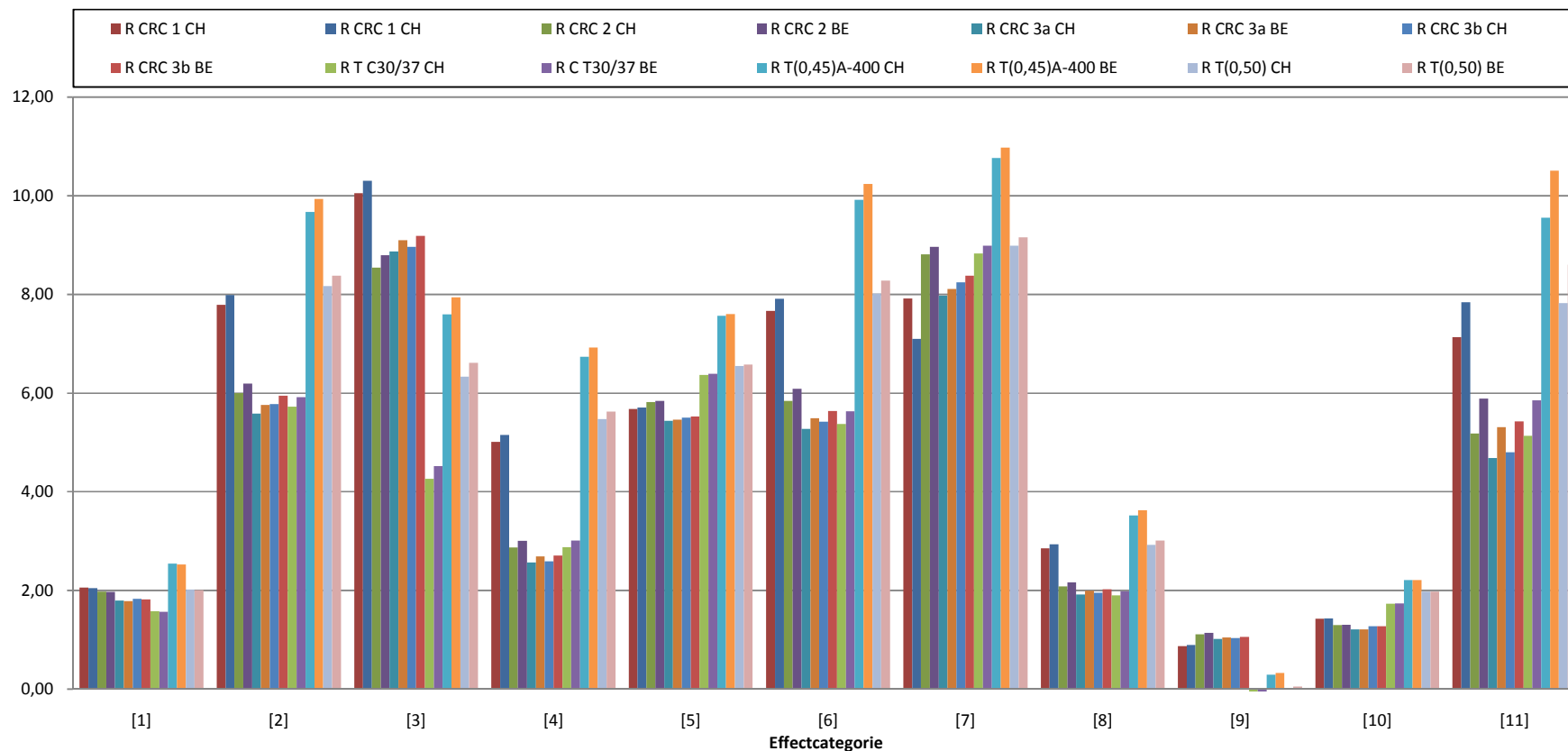
Mengsel	CRC 3b 0,10m% CZ	CRC 3b
W/CM	0,40	0,40
Superplastificeerder [ml/kg BM]	8,0	7,8
Citroenzuur [m% BM]	0,10	0,00
Zetmaat (slump) [mm]	255,0	5,0
Zetmaat (slump) [klasse]	S5	S1
Schokmaat (flow) [mm]	655,0	-
Schokmaat (flow) [klasse]	F6	-
Luchtbelvormer [ml/kg BM]	2,0	2,9
Volume lucht [%]	3,6	4,4
Volumegewicht vers beton [kg/m ³]	2306,3	2312,5

Bijlage D

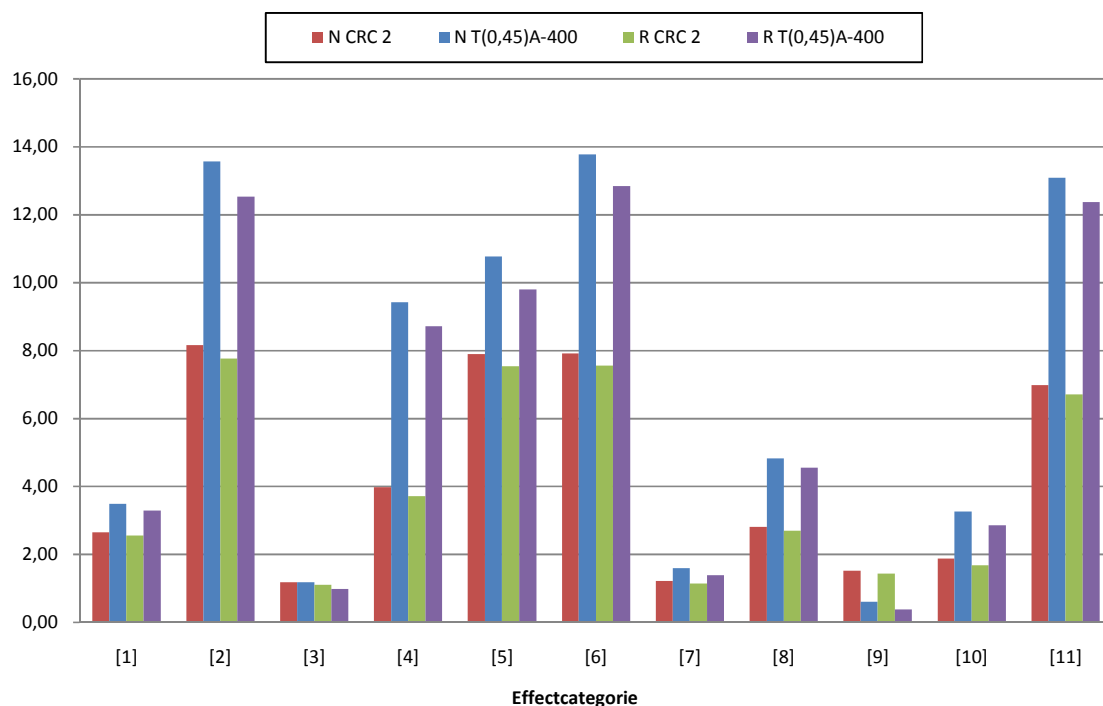
Levenscyclusanalyse



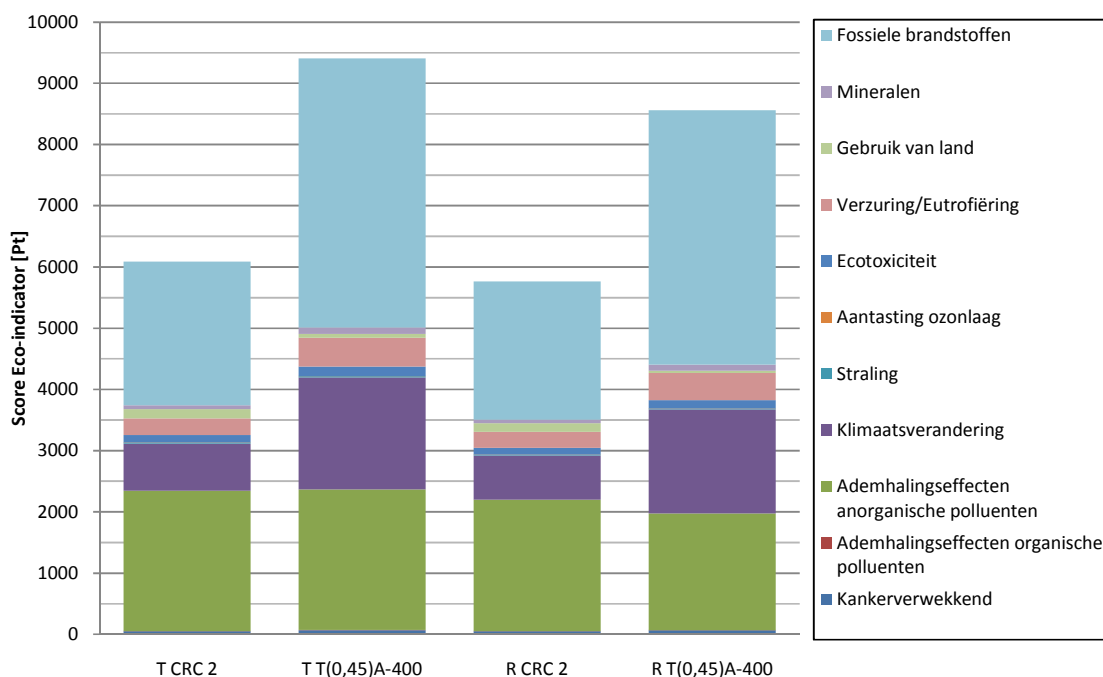
Figuur D. 1: Effectcategorieën voor een kubieke meter beton: MT = met transport; ZT = zonder transport. [1] Kankerverwekkend [DALY*10⁻⁵]; [2] Ademhalingsproblemen organische pollutanten [DALY*10⁻⁷]; [3] Ademhalingseffecten - anorganische pollutanten [DALY*10⁻⁴]; [4] Klimaatverandering [DALY*10⁻⁴]; [5] Straling [DALY*10⁻⁶]; [6] Aantasting ozonlaag [DALY*10⁻⁸]; [7] Ecotoxiciteit [PDF*m²*jr*10²]; [8] Verzuring/Eutrofiëring [PDF*m²*jr*10]; [9] Gebruik van land [PDF*m²*jr*10]; [10] Mineralen [MJ*10 extra]; [11] Fossiele brandstoffen [MJ*10² extra]



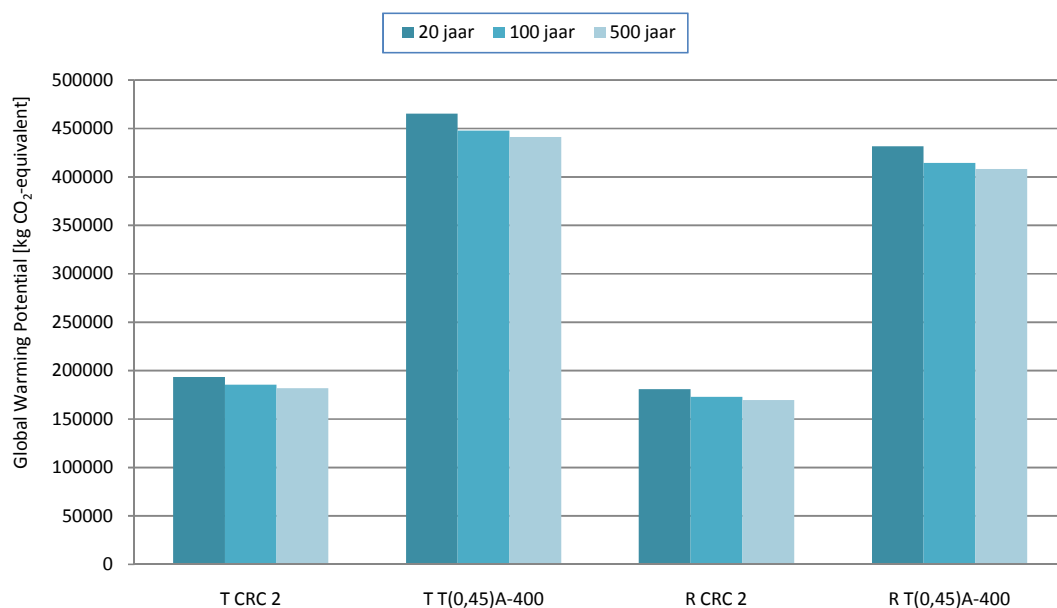
Figuur D. 2: Effectcategorieën voor een kubieke meter beton met gerecycleerd cement: BE = België, CH = Zwitserland. [1] Kankerverwekkend [DALY*10⁻⁶]; [2] Ademhalingsproblemen organische pollutanten [DALY*10⁻⁸]; [3] Ademhalingseffecten - anorganische pollutanten [DALY*10⁻⁵]; [4] Klimaatsverandering [DALY*10⁻⁵]; [5] Straling [DALY*10⁻⁷]; [6] Aantasting ozonlaag [DALY*10⁻⁹]; [7] Ecotoxiciteit [PDF*m²*jr*10]; [8] Verzuring/Eutrofiëring [PDF*m²*jr]; [9] Gebruik van land [PDF*m²*jr]; [10] Mineralen [MJ extra]; [11] Fossiele brandstoffen [MJ*10 extra]



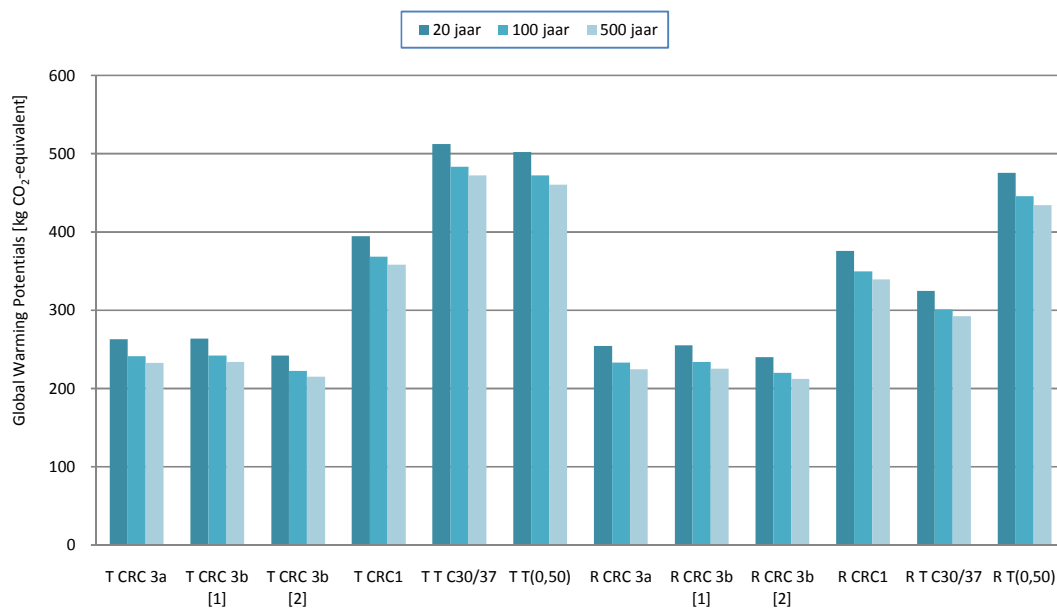
Figuur D. 3: Effectcategorieën voor één kilometer betonweg met gebruik van zowel traditioneel als gerecycleerd cement
 [1] Kankerverwekkend [$\text{DALY} \cdot 10^{-3}$]; [2] Ademhalingsproblemen organische polluenten [$\text{DALY} \cdot 10^{-5}$]; [3] Ademhalingseffecten - anorganische polluenten [$\text{DALY} \cdot 10^{-1}$]; [4] Klimaatsverandering [$\text{DALY} \cdot 10^{-2}$]; [5] Straling [$\text{DALY} \cdot 10^{-4}$]; [6] Aantasting ozonlaag [$\text{DALY} \cdot 10^{-6}$]; [7] Ecotoxiciteit [$\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{jr} \cdot 10^3$]; [8] Verzuring/Eutrofiëring [$\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{jr} \cdot 10^3$]; [9] Gebruik van land [$\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{jr} \cdot 10^3$]; [10] Mineralen [$\text{MJ} \cdot 10^3$ extra]; [11] Fossiele brandstoffen [$\text{MJ} \cdot 10^4$ extra]



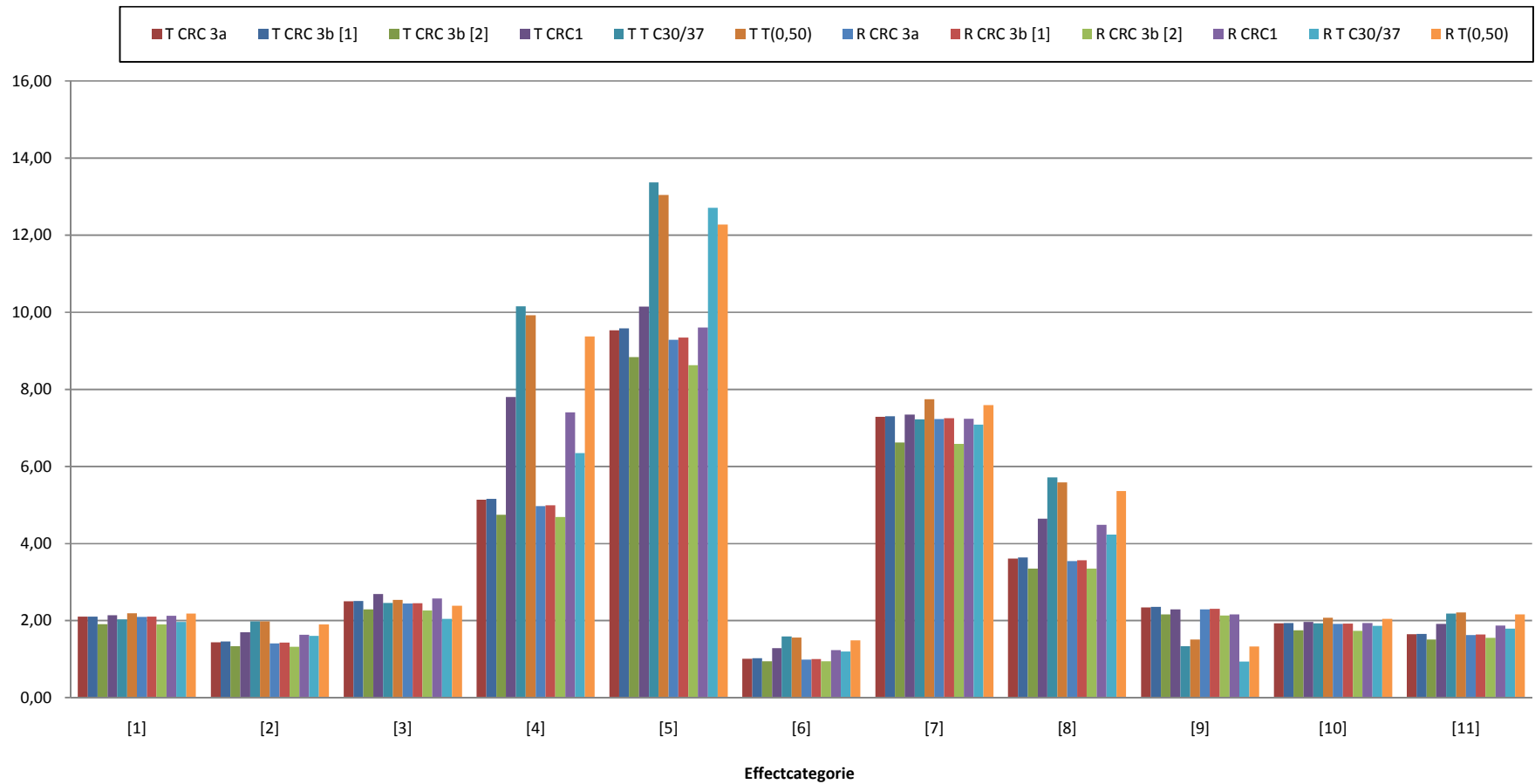
Figuur D. 4: Eco-indicator voor 1 kilometer betonweg met gebruik van zowel traditioneel als gerecycleerd cement



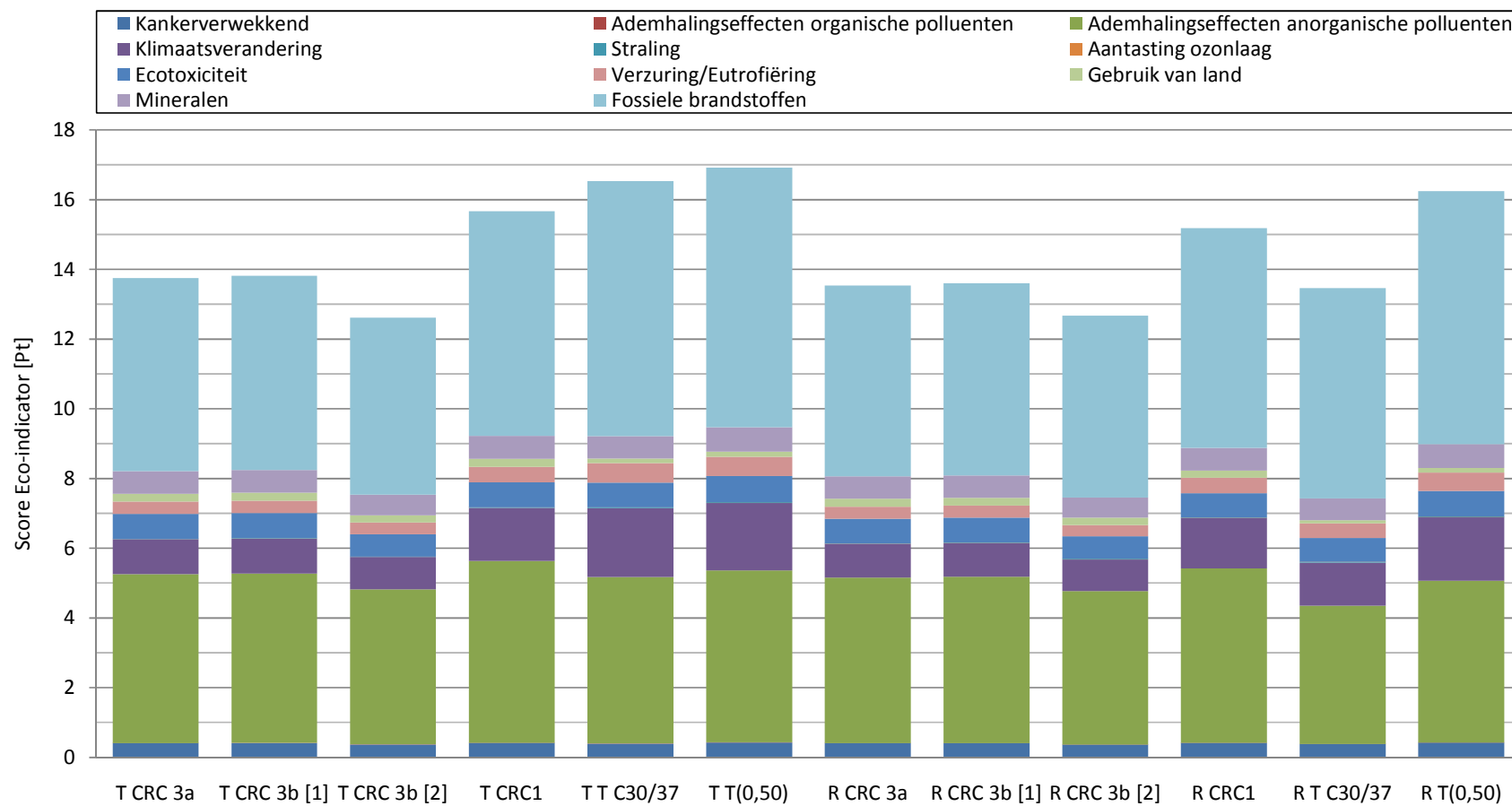
Figuur D. 5: Global Warming Potential van wegbeton voor een één kilometer lange weg
CRC 2 = [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]



Figuur D. 6: Global Warming Potential van een isostatisch opgelegde balk op 2 kolommen
CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35], CRC 3a [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] en CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]



Figuur D. 7: Effectcategorieën voor een op twee kolommen isostatisch opgelegde balk [1] Kankerverwekkend [$\text{DALY} \cdot 10^{-5}$]; [2] Ademhalingsproblemen organische polluenten [$\text{DALY} \cdot 10^{-7}$]; [3] Ademhalingseffecten - anorganische polluenten [$\text{DALY} \cdot 10^{-4}$]; [4] Klimaatsverandering [$\text{DALY} \cdot 10^{-5}$]; [5] Straling [$\text{DALY} \cdot 10^{-7}$]; [6] Aantasting ozonlaag [$\text{DALY} \cdot 10^{-8}$]; [7] Ecotoxiciteit [$\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{jr}$]; [8] Verzuuring/Eutrofiëring [$\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{jr}$]; [9] Gebruik van land [$\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{jr}$]; [10] Mineralen [$\text{MJ} \cdot 10$ extra]; [11] Fossiele brandstoffen [$\text{MJ} \cdot 10^2$ extra]



Figuur D. 8: Eco-indicator voor een op twee kolommen isostatisch opgelegde balk met gebruik van zowel traditioneel als gerecycleerd cement
CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35], CRC 3a [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] en CRC 3b [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]

Lijst van figuren

FIGUUR 2-1: OVERZICHT PRINCIPE CEMENTPRODUCTIE [FEBELCEM (2006)]	6
FIGUUR 2-2: BIJDRAGE VAN DE VERSCHILLENDE CEMENTMINERALEN AAN DE STERKTEONTWIKKELING [SOUWERBREN (1998)].....	7
FIGUUR 2-3: KOPERSLAKKEN GEZIEN DOOR MICROSCOOP [MOURA ET AL. (2007)]	13
FIGUUR 2-4: SCHEMATISCH VERLOOP VAN CORROSIE DOOR CARBONATATIE VAN STAAL IN BETON [SOUWERBREN (1998)]	22
FIGUUR 2-5: DRIEDIMENSIONALE VOORSTELLING VAN HET CARBONATATIEMODEL [ATIS (2004)]	39
FIGUUR 2-6: MICROSCOPISCHE FOTO VAN GECARBONATEERDE VLEGAS [MONKMAN & SHAO (2006)].....	41
FIGUUR 2-7: MICROSCOPISCHE FOTO VAN GECARBONATEERDE HOOGOVENS�AKKEN [MONKMAN & SHAO (2006)]	43
FIGUUR 3-1: CITROENZUUR	55
FIGUUR 3-2: WIJNSTEENZUUR.....	56
FIGUUR 3-3: WERKING VAN EEN BINDINGSVERTRAGER [UNSIN (2003)].....	56
FIGUUR 3-4: CORRELATIE TUSSEN DE GEMIDDELTE DRUKSTERKTE VAN KUBUSSEN MET ZIJDE 150MM EN KUBUSSEN MET ZIJDE 100 MM [MANSUR ET AL. (2002)]	60
FIGUUR 3-5: PRINCIPE VAN OPSTELLING VOOR DE VORST/DOOIPROEF [NBN EN 1338 (2003)] [1: PROEFOPPERVLAK; 2: AFSCHERMING PROEFOPPERVLAK; 3: VRIESMEDIUM (ZOUTOPLOSSING); 4: PROEFSTUK; 5: PVC-BUIS; 6: THERMISCHE ISOLATIE; 8:STROOK DICHTINGSMIDDEL]	63
FIGUUR 3-6: PROEFSTUKKEN VORST/DOOICYCLI.....	63
FIGUUR 3-7: PROEFSTUK VOOR EN NA VORST-DOOICYCLI.....	64
FIGUUR 3-8: AFGESCHILFERD MATERIAAL	64
FIGUUR 3-9: TIJD-TEMPERATUURCYCLUS [NBN EN 1338 (2000)]	65
FIGUUR 3-10: OPSTELLING TAP-WIELEN.....	66
FIGUUR 3-11: GEBROKEN TAP-WIEL.....	67
FIGUUR 3-12: BEPALING CHLORIDE-INDRINGING.....	67
FIGUUR 3-13: OPSTELLING CHLORIDE-INDRINGING KUBUSSEN	68
FIGUUR 3-14: OPSTELLING VACUÛMVERZADIGING	69
FIGUUR 3-15: OPSTELLING VAN DE CTH-PROEF	69
FIGUUR 3-16: OPSTELLING VAN DE CTH-PROEF [NT BUILD 492 (1999)] [A: RUBBEREN OMHULSEL; B: ANOLIET; C: ANODE; D: PROEFSTUK; E:KATHOLIET; F: KATHODE; G: STEUN, H: BASSIN]	70
FIGUUR 3-17: OPMETING CHLORIDE-INDRINGING [NT BULD 492 (1999)]	70
FIGUUR 3-18: INDRINGSDIEPTE BEPAALD MET FENOLFTHALEÏNE ALS KLEURINDICATOR	73
FIGUUR 3-19: RELATIE TUSSEN DE KLEURLOZE FENOLFTHALEÏNEDIEPTE EN DE CARBONATATIEGRAAD VAN BETON NA 8 EN 16 WEKEN VERSNELDE CARBONATATIE [CHANG & CHEN (2006)].....	73
FIGUUR 3-20: BEPALEN VAN HET CARBONATATIEFRONT M.B.V. MICROSCOOPANALYSE [BOVEN: GECARBONATEERD BETON, ONDER: NIET-GEARBONATEERD; VERGROTING = 5x]	75
FIGUUR 3-21: VACUÛMTANK VOOR WATEROPSLOPING	78

FIGUUR 3-22: TREKPROEF MET BEHULP VAN VASTGEKLEEFDE CILINDER [LINKS: VOORBEREID PROEFSTUK MET VASTGEKLEEFDE CILINDER; RECHTS: PROEF IN UITVOERING]	79
FIGUUR 3-23: SLIJTAFEL [CENTRAAL: INGEKLEMD PROEFSTUK]	80
FIGUUR 3-24: BEPALING FLOW.....	82
FIGUUR 3-25: BEPALING SLUMP	82
FIGUUR 3-26: FRESHCON-OPSTELLING VOOR ULTRASONE TRANSMISSIE EN SEMI-ADIABATISCHE CALORIMETRIE [VOORAAN: MONSTER IN CONTAINER VOOR ULTRASOONMETING; LINKS: GEÏSOLEERD VAT MET MONSTER VOOR TEMPERATUURSMETING; MIDDEN (VAN BOVEN NAAR ONDER): TEMPERATUURSKAART, PULSGENERATOR, VOORVERSTERKER; RECHTS: MONITOR]	83
FIGUUR 3-27: BEPALING LUCHTGEHALTE [LINKS: DRUKMETER; RECHTS: MET MORTEL GEVULD VAT]	84
FIGUUR 3-28: DRIEPUNTSBUIGPROEF	84
FIGUUR 3-29: DRUKPROEF	84
FIGUUR 4-1: GEMIDDELTE DRUKSTERKTE [N/mm^2] VAN DE RECYCLEERBARE MENGELINGEN IN FUNCTIE VAN DE OUDERDOM CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35]; CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]; CRC 3A [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]; CRC 3B [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]	86
FIGUUR 4-2: CAPILLAIRE POROSITEIT, GELPOROSITEIT EN TOTALE OPEN POROSITEIT VAN DE BEPROEFDE MENGSELS OP 6 MAAND OUDERDOM, WANNEER HET PROEFSTUK EERST GEDROOGD EN VERVOLGENS VERZADIGD WERD. [A = AFSTRIJKVLAK, B = BEKISTINGSVLAK]	87
FIGUUR 4-3: TOTALE OPEN POROSITEIT VAN DE BEPROEFDE MENGSELS OP 6 MAAND OUDERDOM. [A = AFSTRIJKVLAK, B = BEKISTINGSVLAK]	89
FIGUUR 4-4: BEPALING VAN DE OPPERVLAKESTERKTE VAN CRC 2 A.D.H.V. EEN TREKPROEF OP EEN VASTGEKLEEFDE CILINDER	90
FIGUUR 4-5: LOSGESCHEURDE METALEN CILINDERS OP HET BEPROEFDE AFSTRIJKVLAK	90
FIGUUR 4-6: LOSGESCHEURDE METALEN CILINDERS OP HET BEPROEFDE BEKISTINGSVLAK.....	91
FIGUUR 4-7: AFSLIJTING VAN HET BETONOPPERVLAK NA 500 METER SLIJTWEG	92
FIGUUR 4-8: AFSCHILFERING VAN HET BETONOPPERVLAK IN FUNCTIE VAN DE OUDERDOM VAN HET MENGSEL	93
FIGUUR 4-9: AFSCHILFERING AFSTRIJKVLAK NA 28 VORST-DOOICYCLI OP 3 EN 6 MAAND OUDERDOM	94
FIGUUR 4-10: AFSCHILFERING AFSTRIJKVLAK NA 28 VORST-DOOICYCLI OP 1 EN 3 MAAND OUDERDOM	95
FIGUUR 4-11: VERGELIJKING AFSCHILFERING BEKISTINGSVLAK - AFSTRIJKVLAK OP 1 MAAND OUDERDOM	95
FIGUUR 4-12: VERGELIJKING AFSCHILFERING BEKISTINGSVLAK - AFSTRIJKVLAK OP 3 MAAND OUDERDOM	96
FIGUUR 4-13: VERGELIJKING AFSCHILFERING BEKISTINGSVLAK - AFSTRIJKVLAK OP 6 MAAND OUDERDOM	96
FIGUUR 4-14: EVOLUTIE VAN DE AFGESCHILFERDE MASSA IN FUNCTIE VAN DE OUDERDOM VAN HET PROEFSTUK EN HET AANTAL CYCLI WAARAAN HET PROEFSTUK WORDT ONDERWORPEN [CRC 1 = LS98-FA2-C(I)65-FA35].....	97
FIGUUR 4-15: EVOLUTIE VAN DE AFGESCHILFERDE MASSA IN FUNCTIE VAN DE OUDERDOM VAN HET PROEFSTUK EN HET AANTAL CYCLI WAARAAN HET PROEFSTUK WORDT ONDERWORPEN [CRC 2 = LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]	98
FIGUUR 4-16: EVOLUTIE VAN DE AFGESCHILFERDE MASSA IN FUNCTIE VAN DE OUDERDOM VAN HET PROEFSTUK EN HET AANTAL CYCLI WAARAAN HET PROEFSTUK WORDT ONDERWORPEN [CRC 3B = LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6].....	99
FIGUUR 4-17: EVOLUTIE VAN DE AFGESCHILFERDE MASSA IN FUNCTIE VAN DE OUDERDOM VAN HET PROEFSTUK EN HET AANTAL CYCLI WAARAAN HET PROEFSTUK WORDT ONDERWORPEN.....	100
FIGUUR 4-18: AFGESCHILFERD MATERIAAL BIJ REFERENTIEMENGELING T(0,45).....	101

FIGUUR 4-19: AFGESCHILFERD MATERIAAL BIJ RECYCLEERBAAR MENGSEL	101
FIGUUR 4-20: CHLORIDE-INDRINGING TAP-WIELEN OP 28 DAGEN OUDERDOM	103
FIGUUR 4-21: CHLORIDE-INDRINGING TAP-WIELEN OP 91 DAGEN OUDERDOM	103
FIGUUR 4-22: CHLORIDE-INDRINGING IN BETON OP 1 MAAND OUDERDOM BIJ NAT-DROOG-CYCLI VAN TWAALF UUR	104
FIGUUR 4-23: CHLORIDE-INDRINGING IN BETON OP 1 MAAND OUDERDOM BIJ NAT-DROOG-CYCLI VAN ÉÉN UUR	104
FIGUUR 4-24: CHLORIDE-INDRINGING IN BETON OP 3 MAAND OUDERDOM BIJ NAT-DROOG-CYCLI VAN TWAALF UUR	105
FIGUUR 4-25: CHLORIDE-INDRINGING IN BETON OP 3 MAAND OUDERDOM BIJ NAT-DROOG-CYCLI VAN ÉÉN UUR	105
FIGUUR 4-26: TIJDSAFHANKELIJKE MIGRATIECOËFFICIËNT D_{NSM} OP 6 MAAND OUDERDOM	108
FIGUUR 4-27: TRENDLIJNEN TER BEPALING VAN DE CARBONATATIECOËFFICIËNT OP 1 MAAND OUDERDOM ($x=k \cdot t^{0.5}$) CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35]; CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]; CRC 3A [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]; CRC 3B [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]	111
FIGUUR 4-28: TRENDLIJNEN TER BEPALING VAN DE CARBONATATIECOËFFICIËNT OP 1 MAAND OUDERDOM ($x=k \cdot t^{0.4}$) CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35]; CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]; CRC 3A [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]; CRC 3B [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]	112
FIGUUR 4-29: TRENDLIJNEN TER BEPALING VAN DE CARBONATATIECOËFFICIËNT OP 3 MAANDEN OUDERDOM ($x=k \cdot t^{0.5}$) CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35]; CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]; CRC 3B [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]	113
FIGUUR 4-30: TRENDLIJNEN TER BEPALING VAN DE CARBONATATIECOËFFICIËNT OP 3 MAANDEN OUDERDOM ($x=k \cdot t^{0.4}$) CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35]; CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]; CRC 3B [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]	113
FIGUUR 4-31: TRENDLIJNEN TER BEPALING VAN DE CARBONATATIECOËFFICIËNT ($x=k \cdot t^{0.5}$); CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]	117
FIGUUR 4-32: TRENDLIJNEN TER BEPALING VAN DE CARBONATATIECOËFFICIËNT ($x=k \cdot t^{0.4}$); CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]	117
FIGUUR 4-33: LIGGING VAN HET CARBONATATIEFRONT VOLGENS DE METINGEN MET FENOLFTHALEÏNE ALS KLEURINDICATOR EN VOLGENS DE MICROSCOOPANALYSE	119
FIGUUR 4-34: GEDEELTELIJK GECARBONATEERD CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35] [VERGROTING = 5x]	120
FIGUUR 4-35: VERWERKBAARHEID VAN DE MORTEL MET EN ZONDER TOEVOEGING VAN EEN BINDINGSVERTRAGER [CZ = CITROENZUUR, WSZ = WIJNSTEENZUUR, REF = REFERENTIEMENGSEL ZONDER BINDINGSVERTRAGER]	121
FIGUUR 4-36: SLUMP BIJ TOEVOEGING VAN WIJNSTEENZUUR TER GROOTTE VAN 1,00M% VAN HET GEHEEL AAN BINDMIDDELEN	122
FIGUUR 4-37: VERWERKBAARHEID VAN DE MORTEL MET TOEVOEGING VAN GIPS OF CITROENZUUR IN POEDERVORM	123
FIGUUR 4-38: VERLOOP VAN DE BUIGTREKSTERKTE IN FUNCTIE VAN DE OUDERDOM VOOR MENGSELS MET CITROENZUUR ALS BINDINGSVERTRAGER	125
FIGUUR 4-39: VERLOOP VAN DE DRUKSTERKTE IN FUNCTIE VAN DE OUDERDOM VOOR MENGSELS MET CITROENZUUR ALS BINDINGSVERTRAGER	125
FIGUUR 4-40: VERLOOP VAN DE BUIGTREKSTERKTE IN FUNCTIE VAN DE OUDERDOM VOOR MENGSELS MET WIJNSTEENZUUR ALS BINDINGSVERTRAGER	127

FIGUUR 4-41: VERLOOP VAN DE DRUKSTERKTE IN FUNCTIE VAN DE OUDERDOM VOOR MENGSELS MET WIJNSTEENZUUR ALS BINDINGSVERTRAGER.....	127
FIGUUR 4-42: VERLOOP VAN DE SNELHEID VAN DE ULTRASONE GOLF IN FUNCTIE VAN DE OUDERDOM VAN DE MENGSELS.....	128
FIGUUR 4-43: DETAIL VAN DE BINDINGSSNELHEID IN FUNCTIE VAN DE OUDERDOM VAN HET MENGSEL.....	130
FIGUUR 4-44: SEMI-ADIABATISCHE TEMPERATUURSMETING	131
FIGUUR 4-45: VERGELIJKING TUSSEN DE VOORTPLANTINGSSNELHEID VAN DE ULTRASONE GOLF IN FUNCTIE VAN DE BETONLEEF TIJD VOOR CRC 3B MET 0,10M% CITROENZUUR EN DE EQUIVALENTE MORTEL	131
FIGUUR 5-1: AFSTRIJKVLAK T(0,45) OP 6 MAAND OUDERDOM NA 28 VORST-DOOICYCLI.....	135
FIGUUR 5-2: BEKISTINGSVLAK CRC 1 OP 6 MAAND OUDERDOM NA 28 VORST-DOOICYCLI	135
FIGUUR 5-3: BEKISTINGSVLAK CRC 3B OP 1 MAAND OUDERDOM NA 28 VORST-DOOICYCLI.....	136
FIGUUR 6-1: STADIA VAN EEN LCA [ISO 14040 (2006)]	145
FIGUUR 6-2: KWALITATIEVE RELATIES EN STROMEN IN EEN DUURZAAM INDUSTRIEEL PROCES [VIGON (2002)]	145
FIGUUR 6-3: SYSTEEMGRENZEN VAN EEN PRODUCTSYSTEEM MET EEN IN- EN UIT-KANT [BRAS-KLAPWIJK ET AL. (2003)]	147
FIGUUR 6-4: ONDERSCHIED TUSSEN DE TECHNISCHE BESCHRIJVING VAN EEN PRODUCTSYSTEEM EN DE TOEWIJZINGSPROCEDURE VOOR RECYCLAGE [ISO 14044 (2006)]	148
FIGUUR 6-5: LEVENSCYCLUS MET AANDUIDING VAN DE SYSTEEMGRENZ VOOR TRADITIONEEL BETON [DE SCHEPPER (2009)].....	149
FIGUUR 6-6: LEVENSCYCLUS MET AANDUIDING VAN DE SYSTEEMGRENZ VOOR VOLLEDIG RECYCLEERBAAR BETON [DE SCHEPPER (2009)]	149
FIGUUR 6-7: SCHEMATISCH OVERZICHT VAN DE DOOR KOLOMMEN ISOSTATISCH ONDERSTEUNDE BALK.....	155
FIGUUR 6-8: AFMETINGEN VAN DE BALK EN DE KOLOMMEN MET GEBRUIK VAN DE VERSCHILLENDE MENGSELS	159
FIGUUR 6-9: ALGEMENE PROCEDURE VOOR DE BEREKENING VAN DE ECO-INDICATOREN [MINISTRY OF HOUSING, SPATIAL PLANNING AND THE ENVIRONMENT (2000)]	162
FIGUUR 6-10: MATERIAALSTROOMDIAGRAM VOOR DE PRODUCTIE VAN ÉÉN TON TRADITIONEEL PORTLANDCEMENT [HUNTZINGER & EATMON (2009)].....	164
FIGUUR 6-11: GEBRUIK NATUURLIJKE GRONDSTOFFEN VOOR 1M ³ BETON	167
FIGUUR 6-12: GEBRUIK NATUURLIJKE GRONDSTOFFEN VOOR EEN 1 KILOMETER LANGE WEG.....	168
FIGUUR 6-13: VERBRUIK GRONDSTOFFEN VOOR EEN DOOR TWEE KOLOMMEN ISOSTATISCH ONDERSTEUNDE BALK MET EEN LEVENS DUUR VAN 100 JAAR	168
FIGUUR 6-14: MONDIALE UITSTOOT VAN BROEIKASGASSEN [BETONIEK (2009)]	169
FIGUUR 6-15: BRONNEN VAN CO ₂ IN EEN GEMIDDELD EUROPEES PORTLANDCEMENT IN PROCENTEN [BETONIEK (2009)]	170
FIGUUR 6-16: GLOBALE UITSTOOT BROEIKASGASSEN [CO ₂ -EQUIVALENT] EN DE BIJDRAGE VAN DE CEMENTINDUSTRIE [HUMPHREYS & MAHASANAN (2002)]	170
FIGUUR 6-17: EFFECTCATEGORIEËN VOOR DE VERSCHILLENDE CEMENTSOORTEN. [1] KANKERVERWEKKEND [DALY *10 ⁻⁶]; [2] ADEMHALINGSEFFECTEN ORGANISCHE POLLUENTEN [DALY*10 ⁻⁷]; [3] ADEMHALINGSEFFECTEN ANORGANISCHE POLLUENTEN [DALY*10 ⁻⁴]; [4] KLIMAATSVERANDERING [DALY*10 ⁻⁴]; [5] STRALING [DALY*10 ⁻⁵]; [6] AANTASTING OZONLAAG [DALY*10 ⁻⁸]; [7] ECOTOXICITEIT [PDF*M ² *JR]; [8] VERZURING/EUTROFIËRING [PDF*M ² *JR]; [9] GEBRUIK VAN LAND [PDF*M ² *JR]; [10] MINERALEN [MJ EXTRA]; [11] FOSSIELE BRANDSTOFFEN [MJ*102 EXTRA].....	175
FIGUUR 6-18: INDIVIDUELE BIJDRAGE VAN ELKE SCHADECATEGORIE TOT DE TOTALE ECO-INDICATOR VOOR ÉÉN TON CEMENT	176

FIGUUR 6-19: GLOBAL WARMING POTENTIAL VOOR DE VERSCHILLENDE CEMENTSOORTEN IN FUNCTIE VAN DE TIJDSHORIZON	177
FIGUUR 6-20: ECO-INDICATOR VOOR EEN KUBIEKE METER BETON, MET EN ZONDER TRANSPORT VAN DE AFGEWERKTE BETONBESTANDDELEN [MT = MET TRANSPORT, ZT = ZONDER TRANSPORT]	181
FIGUUR 6-21: GLOBAL WARMING POTENTIAL VOOR 1M ³ VAN DE VERSCHILLENDE BETONSOORTEN IN FUNCTIE VAN DE TIJDSHORIZON [1] = [T CRC 1 MT]; [2] = [T CRC 1 ZT]; [3] = [T CRC 2 MT]; [4] = [T CRC 2 ZT]; [5] = [T CRC 3A MT]; [6] = [T CRC 3A ZT]; [7] = [T CRC 3B MT]; [8] = [T CRC 3B ZT]; [9] = [T T C30/37 MT]; [10] = [T T C30/37 ZT]. [11] = [T T(0,45)A-400 MT]; [12] = [T T(0,45)A-400 ZT]; [13] = [T T(0,50) MT]; [14] = [T T(0,50) ZT].....	183
FIGUUR 6-22: ECO-INDICATOR VOOR 1M ³ VAN DE GERECYCLEERDE BETONSOORTEN ZONDER TRANSPORT VAN DE AFGEWERKTE BETONBESTANDDELEN [BE = BELGISCH BETON, CH = ZWITSERS BETON]	184
FIGUUR 6-23: GLOBAL WARMING POTENTIAL VOOR 1M ³ VAN DE VERSCHILLENDE BETONSOORTEN IN FUNCTIE VAN DE TIJDSHORIZON [1] = R CRC 1 CH; [2] = R CRC 1 BE; [3] = [R CRC 2 CH]; [4] = [R CRC 2 BE]; [5] = [R CRC 3A CH]; [6] = [R CRC 3A BE]; [7] = [R CRC 3B CH]; [8] = [R CRC 3B BE]; [9] = [R T C30/37 CH]; [10] = [R T C30/37 BE]. [11] = [R T(0,45)A-400 CH]; [12] = [R T(0,45)A-400 BE]; [13] = R T(0,50) CH; [14] = [R T(0,50) BE] [BE = BELGISCH BETON, CH = ZWITSERS BETON].....	185
FIGUUR A. 1: KORRELVERDELINGSDIAGRAM RIVIERZAND 0/4	194
FIGUUR A. 2: KORRELVERDELINGSDIAGRAM KALKSTEENZAND1 0/4	194
FIGUUR A. 3: KORRELVERDELINGSDIAGRAM KALKSTEENZAND2 0/4	195
FIGUUR A. 4: KORRELVERDELINGSDIAGRAM KALKSTEENSLAG 2/6.....	195
FIGUUR A. 5: KORRELVERDELINGSDIAGRAM KALKSTEENSLAG 6/20.....	196
FIGUUR A. 6: KORRELVERDELINGSDIAGRAM PORFIERSTEENSLAG 6/20	196
FIGUUR B. 1: GEMIDDELTE DRUKSTERKTE VAN DE MENGELINGEN[N/MM ²]	198
FIGUUR C. 1: GEMIDDELTE BUIGTREKSTERKTE MORTELPRISMA'S OP 2, 7 EN 28 DAGEN OUDERDOM	200
FIGUUR C. 2: VERLOOP BUIGTREKSTERKTE MORTELPRISMA'S IN FUNCTIE VAN DE TIJD.....	201
FIGUUR C. 3: GEMIDDELTE DRUKSTERKTE MORTELPRISMA'S OP 2, 7 EN 28 DAGEN OUDERDOM.....	202
FIGUUR C. 4: VERLOOP DRUKSTERKTE MORTELPRISMA'S IN FUNCTIE VAN DE TIJD	203
FIGUUR C. 5: GEMIDDELTE KUBUSDRUKSTERKTE VOOR CRC 3B [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] OP 7, 28 EN 91 DAGEN OUDERDOM, MET EN ZONDER TOEVOEGING VAN 0,10M% BINDINGSVERTRAGER CITROENZUUR.....	204
FIGUUR D. 1: EFFECTCATEGORIEËN VOOR EEN KUBIEKE METER BETON: MT = MET TRANSPORT; ZT = ZONDER TRANSPORT. [1] KANKERVERWEKKEND [DALY*10 ⁻⁵]; [2] ADEMHALINGSPROBLEMEN ORGANISCHE POLLUENTEN [DALY*10 ⁻⁷]; [3] ADEMHALINGSEFFECTEN - ANORGANISCHE POLLUENTEN [DALY*10 ⁻⁴]; [4] KLIMAATSVERANDERING [DALY*10 ⁻⁴]; [5] STRALING [DALY*10 ⁻⁶]; [6] AANTASTING OZONLAAG [DALY*10 ⁻⁸]; [7] ECOTOXICITEIT [PDF*M ² *JR*10 ²]; [8] VERZURING/EUTROFIËRING [PDF*M ² *JR*10]; [9] GEBRUIK VAN LAND [PDF*M ² *JR*10]; [10] MINERALEN [MJ*10 EXTRA]; [11] FOSSIELE BRANDSTOFFEN [MJ*10 ² EXTRA]	206

FIGUUR D. 2: EFFECTCATEGORIEËN VOOR EEN KUBIEKE METER BETON MET GERECYCLEERD CEMENT: BE = BELGIË, CH = ZWITSERLAND. [1] KANKERVERWEKKEND [DALY*10 ⁻⁶]; [2] ADEMHALINGSPROBLEMEN ORGANISCHE POLLUENTEN [DALY*10 ⁻⁸]; [3] ADEMHALINGSEFFECTEN - ANORGANISCHE POLLUENTEN [DALY*10 ⁻⁵]; [4] KLIMAATSVERANDERING [DALY*10 ⁻⁵]; [5] STRALING [DALY*10 ⁻⁷]; [6] AANTASTING OZONLAAG [DALY*10 ⁻⁹]; [7] ECOTOXICITEIT [PDF*M ² *JR*10]; [8] VERZURING/EUTROFIËRING [PDF*M ² *JR]; [9] GEBRUIK VAN LAND [PDF*M ² *JR]; [10] MINERALEN [MJ EXTRA]; [11] FOSSIELE BRANDSTOFFEN [MJ*10 EXTRA]	207
FIGUUR D. 3: EFFECTCATEGORIEËN VOOR ÉÉN KILOMETER BETONWEG MET GEBRUIK VAN ZOWEL TRADITIONEEL ALS GERECYCLEERD CEMENT [1] KANKERVERWEKKEND [DALY*10 ⁻³]; [2] ADEMHALINGSPROBLEMEN ORGANISCHE POLLUENTEN [DALY*10 ⁻⁵]; [3] ADEMHALINGSEFFECTEN - ANORGANISCHE POLLUENTEN [DALY*10 ⁻¹]; [4] KLIMAATSVERANDERING [DALY*10 ⁻²]; [5] STRALING [DALY*10 ⁻⁴]; [6] AANTASTING OZONLAAG [DALY*10 ⁻⁶]; [7] ECOTOXICITEIT [PDF*M ² *JR*10 ³]; [8] VERZURING/EUTROFIËRING [PDF*M ² *JR*10 ³]; [9] GEBRUIK VAN LAND [PDF*M ² *JR*10 ³]; [10] MINERALEN [MJ*10 ³ EXTRA]; [11] FOSSIELE BRANDSTOFFEN [MJ*10 ⁴ EXTRA]	208
FIGUUR D. 4: ECO-INDICATOR VOOR 1 KILOMETER BETONWEG MET GEBRUIK VAN ZOWEL TRADITIONEEL ALS GERECYCLEERD CEMENT	208
FIGUUR D. 5: GLOBAL WARMING POTENTIAL VAN WEGBETON VOOR EEN ÉÉN KILOMETER LANGE WEG CRC 2 = [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]	209
FIGUUR D. 6: GLOBAL WARMING POTENTIAL VAN EEN ISOSTATISCH OPGELEGDE BALK OP 2 KOLOMMEN CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35], CRC 3A [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] EN CRC 3B [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]	209
FIGUUR D. 7: EFFECTCATEGORIEËN VOOR EEN OP TWEE KOLOMMEN ISOSTATISCH OPGELEGDE BALK [1] KANKERVERWEKKEND [DALY*10 ⁻⁵]; [2] ADEMHALINGSPROBLEMEN ORGANISCHE POLLUENTEN [DALY*10 ⁻⁷]; [3] ADEMHALINGSEFFECTEN - ANORGANISCHE POLLUENTEN [DALY*10 ⁻⁴]; [4] KLIMAATSVERANDERING [DALY*10 ⁻⁵]; [5] STRALING [DALY*10 ⁻⁷]; [6] AANTASTING OZONLAAG [DALY*10 ⁻⁸]; [7] ECOTOXICITEIT [PDF*M ² *JR]; [8] VERZURING/EUTROFIËRING [PDF*M ² *JR]; [9] GEBRUIK VAN LAND [PDF*M ² *JR]; [10] MINERALEN [MJ*10 EXTRA]; [11] FOSSIELE BRANDSTOFFEN [MJ*10 ² EXTRA]	210
FIGUUR D. 8: ECO-INDICATOR VOOR EEN OP TWEE KOLOMMEN ISOSTATISCH OPGELEGDE BALK MET GEBRUIK VAN ZOWEL TRADITIONEEL ALS GERECYCLEERD CEMENT CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35], CRC 3A [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] EN CRC 3B [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]	211

Lijst van tabellen

TABEL 2-1: OVERZICHT KLINKERMINERALEN [SOUWERBREN (1998)].....	7
TABEL 2-2: SAMENVATTING VAN DE COMPONENTEN GEÏDENTIFICEERD DOOR RÖNTGENSTRALENDIFFRACTIE VAN BETON OP JONGE LEEFTIJD [GU ET AL. (1997)]	11
TABEL 2-3: VOORBEELD GEMIDDELDE CHEMISCHE SAMENSTELLING VliegAS [BELGISCHE BETONGROEPER (2006)]	14
TABEL 2-4: OVERZICHT VAN GEHANTEERDE WAARDEN IN DE LITERATUUR VOOR LSF, SM, AM, HM EN DE POTENTIËLE MINERALOGISCHE SAMENSTELLING VOLGENS DE FORMULES VAN BOGUE *STREEFWAARDEN; ** WAARDEN VAN GEREALISEERDE SAMENSTELLINGEN [DE SCHEPPER (2009)].....	15
TABEL 2-5: MAXIMUM CHLORIDENGELAATTE VAN BETON [NEN EN206-1 (2000), TABEL 10].....	19
TABEL 2-6: GEMIDDELDE SAMENSTELLING ZEEWATER [DE ROUCK (2009)].....	20
TABEL 2-7: CORROSIE GEÏNITIEERD DOOR CHLORIDEN [NEN EN 206-1 (2000), TABEL 1]	21
TABEL 2-8: AANTASTING DOOR VORST-DOOICYCLI [NEN-EN 206-1 (2000), TABEL 1]	23
TABEL 2-9: MILIEUKLASSEN CARBONATATIE [NEN-EN 206-1 (2000), TABEL 1].....	35
TABEL 3-1: CHEMISCHE SAMENSTELLING GEBRUIKTE MATERIALEN	46
TABEL 3-2: CHEMISCHE SAMENSTELLING KOPERSLAKKEN	47
TABEL 3-3 : PROEVEN OP VliegAS [NBN EN 450-1 (2005)]	48
TABEL 3-4: CHEMISCHE SAMENSTELLING VliegAS.....	49
TABEL 3-5: EIGENSCHAPPEN MICRO-Air 103 CON.4%.....	50
TABEL 3-6: EIGENSCHAPPEN GLENium 51 CON.35%	50
TABEL 3-7: SAMENSTELLING RECYCLEERBARE BETONMENGSELS.....	51
TABEL 3-8: DUURZAAMHEIDSEISEN VOLGENS NBN B 15-001 (2004), NORMATIEVE BIJLAGE F: TABEL F.2	53
TABEL 3-9: BETONTYPEN VOLGENS NBN B 15-001 (2004), NORMATIEVE BIJLAGE F: TABEL F.1.....	53
TABEL 3-10: SAMENSTELLING REFERENTIEMENGSELS	53
TABEL 3-11: WATERABSORPTIECOËFFICIËNT EN SPECIFIEKE OPPERVLAKE GEBRUIKTE MATERIALEN.....	54
TABEL 3-12: SAMENSTELLING MBE	55
TABEL 3-13: OVERZICHT MENGSELS MET BINDINGSVERTRAGERS	56
TABEL 3-14: OVERZICHT REFERENTIEMENGSELS	57
TABEL 3-15: ZETMAAT EN SCHUDMAAT VOLGENS NBN B 15-001 (2004)	58
TABEL 3-16: EIGENSCHAPPEN VAN DE VERSE BETONSPECIE BIJ DE VERSCHILLENDE MENGSELS.....	59
TABEL 3-17: TEMPERATUURSKARAKTERISTIEKEN BELGIË OVER PERIODE 1999-2008 [KMI]	62
TABEL 3-18: COÖRDINATEN VAN DE KNIPUNTEN TIJD-TEMPERATUURCYCLUS [NBN EN 1338 (2000)].....	65
TABEL 4-1: BEOORDELING VAN DE TOEGESTANE SLIJTAGE EN DE ONDERVERDELING IN KLASSE BIJ EEN SLIJTWEG VAN 3000M [WTCB (1997)]	92
TABEL 4-2: OVERZICHT UITGEVOERDE PROEVEN M.B.T. BESTANDHEID TEGEN VORST EN DOOIZOUTEN [A = AFSTRIJKVLAK, B = BEKISTINGSVLAK, X = ONDERZOCHT, 0 = NIET ONDERZOCHT]]	93
TABEL 4-3: BEREKENING INTRINSIEKE DIFFUSIECOËFFICIËNT D_0	110

TABEL 4-4: BEPALING VAN DE DIFFUSIECOËFFICIËNT OP 1 JAAR OUDERDOM	110
TABEL 4-5: CARBONATATIEDIEPTE IN FUNCTIE VAN DE TIJD.....	114
TABEL 4-6: CARBONATATIECOËFFICIËNT IN FUNCTIE VAN MENGSEL, OUDERDOM EN TOEGEPASTE WET [* HET REFERENTIEMENGSEL T(0,50) WERD NIET MEEGEREKEND TER BEPALING VAN DE GEMIDDELDE CORRELATIECOËFFICIËNT]; CRC 1 [LS98-FA2- C(I)65-FA35]; CRC 2 [LS98-CS2-LF100-C(III)65-FA35]; CRC 3A [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]; CRC 3B [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]	115
TABEL 4-7: CARBONATATIECOËFFICIËNT IN FUNCTIE VAN DE OUDERDOM, DE OMGEVING EN DE TOEGEPASTE WET VERWACHTE INDRINGINGSDIEPTE IN FUNCTIE VAN OUDERDOM, OMGEVING EN TOEGEPASTE WET NA 50 JAAR BLOOTSTELLING	116
TABEL 4-8: THEORETISCH EN EXPERIMENTEEL BEPAALDE CARBONATATIECOËFFICIËNT [* : R^2 HEEFT BETREKKING OP DE CORRELATIE VAN DE EXPERIMENTEEL BEPAALDE CARBONATATIECOËFFICIËNT ONDER NORMALE OMSTANDIGHEDEN].....	118
TABEL 4-9: SLUMP, FLOW EN LUCHTGEHALTE VAN DE VERSE MORTELSPECIE	123
TABEL 6-1: OVERZICHT BETONSOORTEN	146
TABEL 6-2: EISEN GESTELD AAN BETONWEGEN [STANDAARDBESTEK 250 VOOR WEGEN (2006)]	152
TABEL 6-3: BETONSAMENSTELLING T(0,45)A-400.....	153
TABEL 6-4: AANBEVOLEN ONTWERPBREEDTES PER SNELHEIDSREGIME [BIVV (2005)] [* 3,15 M BIJ HOOGFREQUENT AANBOD OPENBAAR VERVOER OF BELANGRIJK AANDEEL ZWAAR VRACHTVERKEER]	153
TABEL 6-5: EIGENSCHAPPEN MENGSELS	154
TABEL 6-6: REFERENTIEMENGSELS T(0,50) EN T C30/37	155
TABEL 6-7: AANBEVOLEN STRUCTURELE CLASSIFICATIE [EUROCODE 2 (2002)]	156
TABEL 6-8: WAARDEN VAN DE MINIMAAL BENODIGDE DEKKING $c_{min,dur}$ MET BETREKKING TOT DE DUURZAAMHEID VOOR BETONSTAAL	157
TABEL 6-9: VERWACHTE LEVENSDUUR IN FUNCTIE VAN DE CO_2 -CONCENTRATIE BIJ EEN BETONDEKKING VAN 35MM	157
TABEL 6-10: OVERZICHT BENODIGDE HOEVEELHEDEN BETON	159
TABEL 6-11: VERBRUIK AAN NATUURLIJKE GRONDSTOFFEN VOOR DE PRODUCTIE VAN ÉÉN TON KLINKER VOLGENS ECOINVENT ...	165
TABEL 6-12: OVERZICHT CODES ONDERZOCHE CEMENTSOORTEN [JOSA ET AL. (2004)]	165
TABEL 6-13: GRONDSTOFFENVERBRUIK VOOR 1 KILOGRAM CEMENT [JOSA ET AL. (2004)]	166
TABEL 6-14: SAMENVATTING VAN DE BELANGRIJKSTE BROEIKASGASSEN UITGESTOTEN IN DE LUCHT [IN GRAM] BIJ DE PRODUCTIE VAN 1 KILOGRAM CEMENT [JOSA ET AL. (2004)]	171
TABEL 6-15: ECO-INDICATOR [PT] VOOR DE VERSCHILLENDE CEMENTSOORTEN.....	175
TABEL 6-16: $KG CO_2$ -EQUIVALENT VAN DE CEMENTSOORTEN OP VERSCHILLENDE LEEFTIJDEN.....	177
TABEL 6-17: OPBOUW VAN DE ECO-INDICATOR UIT DE VERSCHILLENDE SCHADECATEGORIEËN	182
TABEL 6-18: ECO-INDICATOR VAN HET WEGENBETON EN ONDERVERDELING IN DE DRIE SUBCATEGORIEËN CRC 2 = [LS98-CS2- LF100-C(III)65-FA35]	186
TABEL 6-19: GLOBAL WARMING POTENTIAL [TON CO_2 -EQUIVALENT] VAN WEGENBETON IN EEN ÉÉN KILOMETER LANGE WEG... 186	
TABEL 6-20: AANTAL NOODZAKELIJKE VERNIEUWINGEN VAN DE BETONWEG OVER EEN BESCHOUWDE PERIODE VAN 30 JAAR, REKENING HOUDEND MET DE DUURZAAMHEID VAN HET BETON	187
TABEL 6-21: ECO-INDICATOR VAN HET WEGENBETON EN ONDERVERDELING IN DE DRIE SUBCATEGORIEËN, REKENING HOUDEND MET DE DUURZAAMHEID VAN HET BETON	187

TABEL 6-22: GLOBAL WARMING POTENTIAL [TON CO ₂ -EQUIVALENT] VAN EEN ÉÉN KILOMETER LANGE BETONWEG, REKENING HOUDEND MET DE DUURZAAMHEID VAN HET BETON	187
TABEL 6-23: ECO-INDICATOR VAN EEN OP TWEE KOLOMMEN ISOSTATISCH OPGELEGDE BALK EN ONDERVERDELING IN DE DRIE SUBCATEGORIEËN CRC 1 [LS98-FA2-C(I)65-FA35], CRC 3A [LS100-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] EN CRC 3B [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6]	188
TABEL 6-24: GLOBAL WARMING POTENTIAL [KG CO ₂ -EQUIVALENT] VOOR EEN OP TWEE KOLOMMEN ISOSTATISCH OPGELEGDE BALK	188
 TABEL B. 1: DRUKSTERKTE VAN DE BEPROEFDE MENGSELS OP 28 DAGEN EN 91 DAGEN OUDERDOM	197
 TABEL C. 1: GEMIDDELDE BUIGTREKSPANNING, DRUKSPANNING EN VOLUMEMASSA BIJ BREUK, SAMEN MET DE STANDAARDAFWIJKINGEN OP DE INDIVIDUELE WAARDES.....	199
TABEL C. 2: VERWERKBAARHEID EN LUCHTGEHALTE VAN CRC 3B [LS97-P3-LF-C(III)58-C(A)10-FA32-G6] MET EN ZONDER GEBRUIK VAN 0,10M% CITROENZUUR ALS BINDINGSVERTRAGER.....	204

Bibliografie

Al-Jabri K.S., Hisada M., Al-Oraimi S.K. & Al-Saidy A.H. (2009), *Copper slag as sand replacement for high performance concrete*, Cement & Concrete Composites 31, p. 483-488

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

Atis C.D. (2003), *Accelerated carbonatation and testing of concrete made with fly ash*, Construction and Building Materials 17, p. 147-152

Atis C.D. (2004), *Carbonation-Porosity-Strength Model for Fly Ash Concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, Januari/Februari 2004, p. 91-94

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

Baert G., Gruyaert E. Audenaert K. & De Belie N. (2008), *Chloride ingress in high-volume fly ash concrete*, 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, 13-15 October 2008, Nanjing, China

Betoniek (2009), *Beton & CO₂*, Betoniek 23, Vakblad voor bouwen met beton, april 2009, 12 p.

Boel V. (2001), *Efficiëntie van nabehandelsproducten voor beton*, Scriptie, Universiteit Gent, 167p.

Bouikni A., Swamy R.N. & Bali A. (2009), *Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag*, Construction and Building Materials 23, p. 2836-2845

Bras-Klapwijk R.M., Heijungs R. & van Mourik P. (2003), *Levenscyclusanalyse voor onderzoekers, ontwerpers en beleidsmakers*, Delft University Press, The Netherlands, 203 p.

Cement&BetonCentrum (1976-2001), *Wapeningscorrosie door chloriden*, Uit: Betoniek 3/26, *Roesten van wapening*, juni 1976, Betoniek 6/1, *De rol van chloride*, januari 1983, Betoniek 6/13, *Chloridepenetratie*, maart 1984, Betoniek 9/15, *Kritisch chloridegehalte*, mei 1993, Betoniek 12/10, *Nog twee jaar VBT*, november/december 2001

Cement&Betoncentrum (1980-1999), *Vorst en dooizouten*, Uit: Betoniek 5/9, *Schade door vorst en dooizouten*, oktober 1980, Betoniek 10/2, *Onderhuids*, februari 1995, Betoniek 10/20, *Bellen in beton*, novemeber/december 1996, Betoniek 11/11, *Vorst en dooi*, januari 1999

Cement&Betoncentrum (1984-1991), *Wapeningscorrosie door carbonatatie*, Uit: Betoniek 6/11, *Carbonatatie*, januari 1984, Betoniek 8/22, *Carbonatatie en corrosie*, februari 1991

Chang C.-F. & Chen J.-W. (2006), *The experimental investigation of concrete carbonation depth*, Cement and Concrete Research 36, p. 1760-1767

Cho T. (2007). *Prediction of cyclic freeze-thaw damage in concrete structures based on response surface method*, Construction and Building Materials, 21, p. 2031-2040.

Crevits H. (2010), *Rapport winterschade: De wegen die er het slechtst aan toe waren, hebben het zwaarst geleden*, persmededeling kabinet Vlaams minister van Mobiliteit en Openbare Werken Hilde Crevits, 7 mei 2010

Damtoft J.S., Lukasik J., Herfort D., Sorrentino D. & Gartner E.M. (2008), *Sustainable development and climate change initiatives*, Cement and Concrete Research 38, p. 115-127

De Belie N., Monteny J. & Taerwe L. (2002), *Apparatus for accelerated degradation testing of concrete specimens*, Materials and Structures, Vol. 35, p. 427-433

De Rouck J. (2009), *Zee- en Havenbouw*, Cursustekst, Universiteit Gent

De Schepper M. (2009), *Volledig recycleerbaar beton voor een meer milieuvriendelijke bouwsector*, Scriptie, Universiteit Gent, 175p.

De Winne E. (2008), *Wegenbouw*, Universiteit Gent, Cursustekst

Desmyter J. & Martin Y. (2001), *De milieu-impact van bouwmaterialen en gebouwen*, WTCB-tijdschrift, winter 2001, p. 3-13

Eurocode 2 (2002), Eurocode 2: *Design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings*, prEN 1992-1-1, November 2002

Febelcem (2006), *Milieurapport van de Belgische cementnijverheid 2006*, Febelcem

Fernández-Carrasco L. & Vázquez E. (2009), *Reactions of fly ash with calcium aluminate cement and calcium sulphate*, Fuel 88, p. 1533-1538

- Galbenis C.-T. & Tsimas S. (2006), *Use of construction and demolition wastes as raw materials in cement clinker production*, China Paricuology, Vol.4, No. 2, p. 83-85
- Gebler S.H. & Klieger P. (1986), *Effect of fly ash on the durability of air-entrained concrete*, V.M. Malhotra, ACI Special Publication SP-91, American Concrete Institute, Detroit, p. 483-519
- Ghosh S.N. (2002), *Advances in cement technology: chemistry, manufacture and testing*, Tech Books International, New Delhi, India, 2nd Edition, 804 p.
- Gu P., Beaudoin J.J., Quinn E.G. & Myers R.E. (1997), *Early Strength Development and Hydration of Ordinary Portland Cement / Calcium Aluminate Cement Pastes*, Advanced Cement Based Materials 6, p. 53-58
- Hewlett P.C. (1998), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Arnold, London, 4th ed.
- Houst Y.F. & Wittmann F.H. (1994), *Influence on porosity and water content on the diffusivity of CO₂ through hydrated cement paste*, Cement and Concrete Research 24, p. 1165-1176
- Humphreys K. & Mahasenan M. (2002), *Toward a sustainable cement industry: Sub-study 8: Climate Change, An Independent Study Commissioned to Battelle by World Business Council for Sustainable Development*
- Huntzinger D.N. & Eatmon T.D. (2009), *A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies*, Journal of Cleaner Production 17, p. 668-675
- IPCC (2001), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Geneva, Switzerland
- IPCC (2007), *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland
- ISO 14040 (2006), *Environmental management: Life cycle assessment: Principles and framework*
- ISO 14044 (2006), *Environmental management: Life cycle assessment: Requirements and guidelines*
- Josa A., Aguado A., Cardim A. & Byars E. (2007), *Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU*, Cement and Concrete Research 37, p. 781-788
- Josa A., Aguado A., Heino A., Byars E. & Cardim A. (2004), *Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU*, Cement and Concrete Research 34, p. 1313-1320

- Kellenberger D., Althaus H.-J., Künniger T., Lehmann M., Jungbluth N. & Thalmann P. (2007), *Life Cycle Inventories of Building Products*, Ecoinvent report No. 7, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, December 2007
- Khanzadi M. & Behnood A. (2009), Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate, *Construction and Building Materials* 23, p. 2183-2188
- Khunthongkeaw J., Tangtermsirikul S. & Leelawat T. (2006), *A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete*, *Construction and Building Materials* 20, p. 744-753
- Lammertijn S. (2007), *Carbonatatie en chloride-indringing bij hoog-volume-vliegashbeton*, Scriptie, Universiteit Gent, 171p.
- Lizarazo-Marriaga J. & Claisse P. (2009), *Determination of the concrete chloride diffusion coefficient based on an electrochemical test and an optimization model*, *Materials Chemistry and Physics* 117, p. 536-543
- Mansur M.A., Asce M. & Islam M.M. (2002), *Interpretation of Concrete Strength for Nonstandard Specimens*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 2, April 1
- Marchand J., Pigeon M., Bager D. & Talbot C. (1999), *Influence of chloride solution concentration of salt scaling deterioration of concrete*, *ACI Materials Journal*, July-August 1999, p. 429-435
- Melchers R.E. & Li C.Q. (2009), *Reinforcement corrosion initiation and activation times in concrete structures exposed to severe marine environments*, *Cement and concrete Research* 29, p. 1068-1076
- Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (2000), *The Eco-indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Manual for Designers*, October 2000
- Monkman S. & Shao Y. (2006), *Assessing the carbonation Behavior of Cementitious Materials*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, November/December 2006
- Moura W.A., Goncalves J.P. & Lima M.B.L. (2007), *Copper slag waste as a supplementary cementing material to concrete*, 4th Brazilian MRS Meeting, 5p.
- NBN B 15-001 (2004), *Aanvulling op NBN EN 206-1: Beton: Eisen, gedraging, vervaardiging en overeenkomstigheid*
- NBN B 15-002 (2005), *Berekenen van betonconstructies – Algemene regels en regels voor gebouwen*, (ENV 1992-1-1 met NTD) aangeduid als Eurocode 2

- NBN B 15-220 (1970), *Proeven op beton - Drukproef*
- NBN B 15-223 (1990), *Proeven op beton - Afslijting*
- NBN EN 121350-2 (1999), *Beproeving van betonspecie – Deel 2: Zetmaat*
- NBN EN 121350-5 (1999), *Beproeving van betonspecie – Deel 5: Schudmaat*
- NBN EN 12350-7 (2000), *Beproeving van betonspecie – Deel 7: Luchtgehalte – drukmethode*
- NBN EN 1338 (2003), *Betonstraatstenen – Eisen en beproevingsmethoden*
- NBN EN 196-1 (2005), *Methods of testing cement — Part 1: Determination of strength*
- NBN EN 196-2 (2005), *Beproevingsmethoden voor cement – Deel 2: chemische analyse van cement*
- NBN EN 196-21 (1991), *Beproevingsmethoden voor cement – bepaling van de gehalten chloride, koolstofdioxide en alkali van cement*
- NBN EN 197-1 (2000), *Cement – Deel 1: Samenstelling, specificatie en overeenkomstigheidscriteria voor gebruikelijke cementsoorten*
- NBN EN 413-2 (2005), *Masonry cement – Part 2: Test methods*
- NBN EN 450-1 (2005), *Vliegas voor beton – Deel 1: Definitie, specificaties en overeenkomstigheidscriteria*
- NBN EN 451-1 (2004), *Beproevingsmethode voor vliegas – Deel 1: Bepaling van het gehalte aan vrij calciumoxide*
- NBN EN 451-2 (1995), *Beproevingsmethode voor vliegas – Deel 2: Bepaling van de fijnheid door natte zeven*
- NEN EN 206-1 (2000), *Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity*
- Neville A.M. (1996), *Properties of Concrete*, John Wiley & Sons, Inc., New York
- NT BUILD 492 (1992), *Nordtest method: Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*, 8p.
- OCCN (2004), *Toepassingsreglement “BETON”*, TRA 550, geldig vanaf 01/08/2008, uitgave 2.2, 80p.
- Oh B.H. & Jang S. Y. (2007), *Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures*, Cement and concrete Research 37, p. 47-53

- Papadakis V.G. (2000), *Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress*, Cement and Concrete Research 30, p. 291-299
- Peter M.A., Muntean A., Meier S.A. & Böhm M. (2008), *Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study*, Cement and Concrete Research 38, p.1385-1393
- Rens L. (2009), *Betonwegen: Een doordachte en duurzame keuze*, Febelcem, 32p.
- Robeyst N. (2010), *Monitoring Setting and Microstructure Development in Fresh Concrete with the Ultrasonic Through-Transmission Method*, doctoraatsthesis, Universiteit Gent, 251p.
- Robeyst N., Gruyaert E., Grosse C.U., De Belie N. (2008), *Monitoring the setting of concrete containing blast-furnace slag by measuring the ultrasonic p-wave velocity*, Cement and Concrete Research 38, p. 1169-1176
- Rovers A.M.M. & van den Beld H. (2003), *Onderzoeksresultaten CROW-werkgroep Evaluatie, Onderhoudservaringen Betonwegen*
- Russell A. (2008), *The cement industry in Europe and the Middle East: A market/technology report*, Materials Technology Publications
- Schießl P. (1986), *Durability of concrete structures*, Studiedag Duurzaamheid van betonkonstrukties, Laboratorium Magnel
- SCS (2009), *Life-Cycle Assessment (LCA) Framework for Greenhouse Gas (GHG) Accounting - For Use in Cap & Trade Programs, Climate Registries and International GHG Protocols*, 23p.
- Seghers C. (2007), *Experimentele studie van chloridepenetratie in gescheurd beton*, Scriptie, Universiteit Gent, 225p.
- Sellevoid E.J. & Farstad T. (1991), *Frost/Salt testing of concrete: effect of test parameters and concrete moisture history*, Nord. Concr. Res. 10 (1991), p. 121-138
- Shi C., Meyer C. & Behnood A. (2008), *Utilization of copper slag in cement and concrete*, Resources, Conservation and Recycling 52, p. 1115-1120
- Siebel E. (1989), *Air-void characteristics and freezing and thawing resistance of superplasticized air-entrained concrete with high workability*, V.M Malhotra, ACI Special Publication SP-119, 1989, p. 297-319

- Sisomphon K. & Franke L. (2007), *Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials*, Cement and Concrete Research 37, p.1647-1653
- Song H.-W. & Saraswathy V. (2006), *Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag – An overview*, Journal of Hazardous Materials, B138 (2006), p. 226-233
- Souwerbren C. et al. (1998), *BetonTechnologie*, Cement en Beton, Studieboek voor de cursus Betontechnoloog van de Betonvereniging, BetonPrisma, 's-Hertogenbosch, 10^e herziene druk, 399p.
- Söylev T.A. & Richardson M.G. (2008), *Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report*, Construction and Building Materials 22 (2008), p.609-622
- Standaardbestek 250 voor wegen (2006), versie 2.1
- Stark J. & Ludwig H.M. (1997), *Freeze-thaw and freeze-deicing salt resistance of concretes containing cement rich in granulated blast-furnace slag*, Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, vol. 4, SINTEF, Trondheim, Norway
- Sulapha P., Wong S.F., Wee T.H. & Swaddiwudhipong S. (2003), *Carbonation of Concrete Containing Mineral Admixtures*, Journal of Materials in Civil Engineering, March/April 2003, p. 134-143
- Taerwe L. (2004), *Betontechnologie*, Cursustekst, Universiteit Gent
- Tamura M., Noguchi T. & Tomosawa F. (2004), *Cementitious waste-free-type completely recyclable concrete*, RILEM International Symposium on Environment-Conscious Materials and Systems for Sustainable Development, September 6-7, 2004, Koriyama, Japan, p. 69-78
- Tang L. (1996), *Chloride transport in concrete-measurement and prediction*, doctoraatsthesis, Department of Building Materials, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden
- Taylor H.F.W. (1997), *Cement chemistry*, Thomas Telford, London, second edition
- Thaulow N. Sahu S. (2004), *Mechanism of concrete deterioration due to salt crystallization*, Materials Characterization 53, p. 123-127
- Thomas M.D.A. & Bamforth P.B., *Modelling chloride diffusion in concrete. Effect of fly ash and slag*, Cement and Concrete Research 29, p. 487-495

Unsin J. (2003), *How lignosulphonate, citric acid, tartaric acid and lithium carbonate effect the setting and hardening of Istra 40*, HCA Customer event, Leimen, 18 november 2003, 51p.

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

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

Van den Heede P. (2008), *Porositeit en transporteigenschappen van 'groene' betonsoorten*, Scriptie, Universiteit Gent, 189p.

Van den Heede P., Gruyaert E., Robeyst N. & De Belie N. (2010), *Life Cycle Assessment of a column supported isostatic beam in high-volume fly ash concrete (HVFA Concrete)*, - Nog te publiceren- , 8p.

Vernimmen L. (2010), *De regeneratie van cement uit volledig recycleerbaar beton*, Scriptie, Universiteit Gent

Vigon B. (2002), *Towards a Sustainable Cement Industry: Substudy 9: Industrial Ecology in the Cement Industry*, An Independent Study Commissioned by World Business Council for Sustainable Development

Wee T.H., Suryavanshi A.K. & Logendran D. (1999), *Pore structure controlling the carbonation of a hardened cement matrix blended with mineral admixture*, Advances in Cement Research 11, p. 81-95

WTCB (1997), *Cementgebonden bedrijfsvloeren*, Technische Voorlichting 204, juni 1997, 60p.

Yang Q., Wu X. & Huang S., *Concrete deterioration due to physical attack by salt crystallization*, Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg