### Beoordeling van kleurschakeringen van zichtbeton

### **Christophe Landuyt**

Promotor: prof. dr. ir. Geert De Schutter Begeleiders: ir.-arch. Emmanuel Annerel, dr. ir. Katrien Audenaert

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 2008-2009



### Voorwoord

#### Dankwoord

Er zijn heel wat mensen die een bijdrage geleverd hebben bij het tot stand komen van dit werk en deze wil ik dan ook bedanken.

In de eerste plaats gaat mijn dank uit naar mijn promotor Prof. dr. ir. Geert De Schutter. Ik bedank u voor het in mij gestelde vertrouwen en kritische kijk op mijn afstudeerwerk.

Mijn dank gaat ook zeker en vast uit naar mijn begeleider Ir.-arch. Emmanuel Annerel voor de bereidwillige steun en hulp bij het verwerven van het inzicht in deze problematiek en voor het geduldig nalezen van de tekst op fouten.

Ook het bouwbedrijf Furnibo zou ik willen bedanken voor mijn vakantiejob die ik afgelopen zomer in het kader van deze thesis heb uitgeoefend bij dit bedrijf. Het was een interessante praktijkervaring die me in staat gesteld heeft om bepaalde zaken in deze thesis kritisch te beoordelen.

Tot slot zou ik ook nog mijn ouders willen bedanken, zonder wiens praktische en – misschien nog wel belangrijker – morele steun dit alles niet haalbaar zou geweest zijn.

#### 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.

Mei, 2009

Christophe Landuyt

#### Overzicht

Beoordeling van kleurschakeringen van zichtbeton door Christophe Landuyt Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Academiejaar 2008-2009

Promotor: Prof. dr. ir. Geert De Schutter Begeleider: Ir.-arch. Emmanuel Annerel Faculteit Ingenieurwetenschappen Universiteit Gent

Vakgroep Bouwkundige constructies Voorzitter: Prof. dr. ir. Luc Taerwe

#### Samenvatting

Zichtbeton is ter plaatse gestort beton dat omwille van zijn specifieke esthetische eisen in het zicht gelaten wordt en gebouwen vaak een bijzondere uitstraling geeft. Dergelijke projecten verlopen echter meestal niet vlekkeloos. De basisprincipes tot uitstekende oppervlakken (aandacht bekisting, compatibiliteit olie, type cement, W/C-factor, zuiverheid granulaten, ...) zijn nochtans gekend, echter in de praktijk kunnen verschillende factoren die soms niet in te schatten zijn, zoals de weersomstandigheden, een rol spelen en zij kunnen het project doen fout lopen. Bovendien kent België, in tegenstelling tot zijn buurlanden, geen wetgevend kader, wat tot oeverloze discussies en financiële drama's leidt indien het vooropgestelde referentiemonster, dat dikwijls op een niet representatieve schaal geproduceerd werd, niet bereikt wordt.

In deze thesis wordt niet enkel zichtbeton besproken, maar wordt het ook uitgebreid naar beoordeling van kleurschakeringen van betonoppervlakken in het algemeen. Het doel van deze thesis is het uitwerken van een beoordelingsmethode op basis van digitale fotografie, maar in eerste instantie wordt onderzoek verricht naar kleurverschillen bij kleinschalige elementen met behulp van een spectrofotometer.

Daartoe wordt na een korte inleiding over de huidige beoordeling van kleurverschillen, in hoofdstuk 2 onderzoek verricht naar de algemene L\*a\*b\*-kleurwaarden van grijze betontypes.

In hoofdstuk 3 worden zelf proefstukken van 6 betontypes vervaardigd waarvan de kleurevolutie van jong beton na ontkisten opgevolgd wordt.

In hoofdstuk 4 wordt een convergentiematrix opgesteld om een specifiek fototoestel te calibreren. Deze convergentiematrix zet de RGB-kleurwaarden van de foto om naar L\*a\*b\*-kleurwaarden. Met deze L\*a\*b\*-kleurwaarden kunnen kleurverschillen bepaald worden.

Ten slotte wordt in hoofdstuk 5 het specifieke fototoestel gebruikt om kleurverschillen in betonoppervlakken in praktijk te beoordelen.

Trefwoorden: klimaatkasten, L\*a\*b\*-kleurwaarde, kleurverschil ΔE, convergentiematrix, RAW

## Determination of colour differences from aesthetic concrete

Christophe Landuyt

Supervisors: prof. dr. ir. G. De Schutter, ir.-arch. E. Annerel

Abstract- This thesis investigates the possibility to assess colour differences from aesthetic concrete with the use of a digital camera. Therefore, the L\*a\*b\*colour values of different concrete types are studied with a spectrophotometer and the evolution of the colour is studied in time after casting.

Keywords: climate rooms, L\*a\*b\*-colour value<sup>[1]</sup>, RAW, conversion matrix,colour difference  $\Delta E$ 

#### I. INTRODUCTION

Currently, colour differences are determined with a grayscale (reference chart). This chart is placed on a dried concrete surface that is lying in the shade. The determination is done on a distance of 3m [2]. The tolerable deviations in colour are expressed in a number of scale classifications from the CIB-grayscale. In a second stage, the colour differences can be characterized with a colorimeter. A limitation of this instrument is that the measurements are locally (diameter 50mm), so the overall determination may differ. The use of a digital camera could be a solution for this problem. It would be possible to indicate a region on the photograph and to compare two spots mutually:  $\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}. \quad L_1^* a_1^* b_1^* \quad \text{and}$  $L_2^* a_2^* b_2^*$  are the average colour values of each spot. The assessment criteria for their  $\Delta E$ -values are described in several technical regulations.

#### II. L\*a\*b\*-COLOUR VALUES FOR DIFFERENT TYPES OF CONCRETE

Twelve types of concrete have been investigated: HPC (= high performance concrete), TC2k (= traditional calcareous concrete), TC (= traditional siliceous concrete), SCC (= self-compacting concrete), 4 types of concrete where Portland cement is replaced by blast furnace slag and 4 types of concrete where Portland cement has been replaced by fly ash.

The influence of the a\*-colour value (-0,12 till 0,87) on the colour difference for grey types of concrete is negligible. The b\*-colour value (5,89 till 9,8) has already a bigger influence but the L\*-colour value (59,6 till 73) is the most determinant factor for the colour difference.

SCC has the biggest L\*-colour value, while the b\*-colour value is the smallest of all the types of concrete. When the Portland cement is partly replaced by blast furnace slag, the L\*-colour value increases linear with the amount of blast furnace slag, while the a\*- en b\*-value remain constant. When the Portland cement is partly replaced by fly ash, the L\*-, a\*- and b\*-colour values decrease linear with the amount of fly ash (from 35% fly ash).

III. EVOLUTION OF COLOUR FROM FRESH CONCRETE

In the Laboratory Magnel for Concrete Research, tiles of 6 types of concrete are fabricated: HPC, TC2k, TC, SCC, SCC with a red pigment and TC with a red pigment. For each concrete, 5 tiles are casted: three tiles were stored outside (one tile without reinforcement that is demoulded after 72 hours and two tiles who have been demoulded after 24 hours and with respectively reinforcement and no reinforcement), one tile with reinforcement was stored in a climate chamber (20 °C and a R.H. of 60%). The latter tile with reinforcement was stored in a climate room (20 °C and a R.H. >90%).

Each tile is measured on 30 fixed places several times during a period of 28 days after casting. The measurement is done with a photospectrometer (X-rite SP60). In Figure 1, the evolution of the L\*-value for SCC is shown, whereas the other values  $(a^*, b^*, \Delta E)$  may also be plotted.



Fig. 1: Evolution of the L\*-value for SCC

In Figure 1, it can be noticed that there's a big difference between the tiles that are stored outside and the tiles that are stored in the climate rooms. The L\*-value of the tiles in the climate rooms is higher in comparison with those from outside. For SCC the ultimate L\*-value is already obtained after approximately 3 days. The evolution for the colour difference  $\Delta E$  is similar to the evolution of the L\*value but here the tiles from the climate rooms produce the lowest  $\Delta E$ -value. The strong increase in the beginning is ascribed to the constant relative humidity. For the tiles stored outside approximately 10 days is needed to reach their ultimate L\*- and  $\Delta E$ -value, because of the variable air moisture the first days after demoulding. For SCC were the weather conditions better (constant air moisture), so the tiles who were stored outside have also a strong increase in the beginning. The most important conclusion from these results is the fact that a storage of a tile in a climate room for a couple days has a positive influence on the appearance of the concrete surface.

## IV. THE DETERMINATION OF COLOUR DIFFERENCES

A photograph cannot be taken immediately in L\*a\*b\*-colour values. For this reason, it is necessary to calibrate the digital camera to convert the RGB-colour values into the actual L\*a\*b\*-colour values. This conversion is realized with a conversion matrix. The calibration of a digital camera is not easy, because the luminance is not continuous during photographing. The photographs are taking at a grey sky to restrict the variation of the luminance up to minimum. Because of this, the position of the sun doesn't influence the results.

A calibration chart which is produced according to the IT 8.7/2 and ISO 12641 standard (Fig. 2) is used to calibrate the digital camera. The XYZcolour values and the  $L^*a^*b^*$ -colour values is measured by the manufacturer.



Fig. 2: Calibration chart (IT 8.7/2 and ISO 12641 standard)

A photograph in RAW with the "*Canon Powershot S50*" is taken from this calibration chart to calibrate the digital camera. An determination of colour differences based on JPEG-photographs causes an underestimation of  $\Delta E$ . Nevertheless, this method cannot be generalized, since RAW format depends on the camera type that is used.

The calibration is based on the methodology described by Kang and Hardeberg [3]. The RGBcolour values of each colour area are determined with Matlab. After this, the conversion matrix converts the RGB values into the corresponding L\*a\*b\*-colour values (least square method). The conversion from XYZ-values into L\*a\*b\*-values is done with mathematical formulas [3]. A linear and a non-linear polynomial calibration assumes the existence of a respectively linear and non-linear relationship between the RGB colour space and the XYZ colour space. The linear relationship is expressed as:

```
 \begin{pmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_M & G_M & B_M \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_M & Y_M & Z_M \end{pmatrix}
```

where M presents the number of colour areas in the calibration chart. The accuracy of the conversion increases with an increase of the number of polynomial terms. Ultimately a regression with 60 polynomial terms is chosen. With this convergence matrix an average colour difference of 2,27 (=  $\Delta E$ ) is found against the actual L\*a\*b\*-colour values from the calibration chart.

This conversion matrix can now be used to assess colour differences from concrete surfaces. By means of several practical examples it is possible to determine a maximum acceptable colour difference of  $\Delta E = 10$ . The spots are compared to each other. The suggestion to take a limiting value of 10 can be criticized. It's not the intention to replace the existing regulations, but it can be a supplementation.

- Poynton, C.,, "Frequently Asked Questions about Color", March (1997)
- [2] Mahieu, E., "Objectieve beoordeling van kleurverschillen", Brussel, WTCB, Infofiche nr.25, December (2007)
- [3] Sokolowski, K., "Colour scanner calibration- A comparison of different methods", Royal Institute of Technologie, Department of Numerical Analysis and Computer Science, October (2003)

### Inhoudsopgave

VOORWOO	ORD	
OVERZICH	IT	
HOOFDST	UK1: INLEIDING	1
HOOFDST	UK 2: PROEFRESULTATEN LABO: SPECTROFOTOMETER	3
2.1 SPECT	ROFOTOMETER	4
2.1.1	Algemeen	.4
2.1.2 I	INTERPRETATIE VAN DE UITVOERGEGEVENS	.4
2.2 WERK	WIJZE	6
2.3 BETON	NTYPES	8
2.3.1	ΔE-waarden van HPC/TC2k/TC/SCC	.9
2.3.1.	1 HPC	.9
2.3.1.2	2 TC2k	10
2.3.1.3	3 TC	11
2.3.1.4	4 SCC	11
2.3.1.	5 Vergelijking HPC/TC2k/TC/SCC	12
2.3.2	GEMIDDELDE L*A*B*-WAARDE VAN HPC/TC2K/TC/SCC	13
2.3.3 (	GEDEELTELIJKE VERVANGING VAN CEMENT DOOR HOOGOVENSLAK	14
2.3.3.	1 Overzicht $\Delta E$ -waarden van beton met hoogovenslak	14
2.3.3.2	2 Overzicht L*a*b*-waarden van beton met hoogovenslak	16
2.3.4 0	GEDEELTELIJKE VERVANGING VAN CEMENT DOOR VLIEGAS	17
2.3.4.	1 Overzicht $\Delta E$ -waarden van beton met vliegas	17
2.3.4.2	2 Overzicht L*a*b*-waarden van beton met vliegas	19
2.4 SAMEN	NVATTING VAN ALLE BETONTYPES2	20

HOOFDSTUK	3: KLEUREVOLUTIE VAN JONG BETON NA ONTKISTEN	24
3.1 INLEIDIN	G	24
3.1.1 KLEU	IRVERSCHILLEN IN BETONOPPERVLAKKEN	24
3.1.1.1	Kleurverschillen door verontreiniging	24
3.1.1.2	Kleurverschillen door afscheiding van water en fijne deeltjes uit de betonspecie	25
3.1.1.3	Kleurverschillen door variatie van de samenstellende bestanddelen van het beton en door	
	variatie in de mengverhouding	26
3.1.1.4	Kleurverschillen door verschillen in luchtinwerking	26

3.1.2	3.1.2 Betonsamenstellingen		
3.1.3	3 Bekisting		
3.1.4	BENAMING TEGELS	29	
3.2 KLEU	JREVOLUTIE VAN DE GRIJZE TEGELS	32	
3.2.1	GLOBAAL OVERZICHT SCC	33	
3.2.2	AFWIJKINGEN EN GELIJKENISSEN VAN DE ANDERE BETONTYPES T.O.V. SCC	37	
3.2.2	2.1 Betontype TC2k t.o.v. SCC (grafieken: zie Bijlage D)	37	
2.2.2	2.2 Betontype TC t.o.v. SCC (grafieken: zie Bijlage D)	38	
3.2.2	2.3 Betontype HPC t.o.v. SCC (grafieken: zie Bijlage D)	41	
2 2 VI EI	ΙΔΕΥΩΙ ΠΤΙΕ ΥΛΝ ΝΕ ΔΩΝΕ ΤΕΩΕΙ ς	4.4	
3.3 KLEU	JREVOLUTIE VAN DE RODE TEGELS		
3.3 KLEU 3.3.1	GLOBAAL OVERZICHT SCC_ROOD	44	
3.3 KLEO 3.3.1 3.3.2	GLOBAAL OVERZICHT SCC_ROOD	44 44 46	
3.3.1 3.3.2 3.4 PARA	GLOBAAL OVERZICHT SCC_ROOD Afwijkingen en gelijkenissen van TC_rood t.o.v. SCC_rood (grafieken: zie Bijlage E)	44 	
3.3 KLEU 3.3.1 3.3.2 <b>3.4 PAR</b> A 3.4.1	GLOBAAL OVERZICHT SCC_ROOD Afwijkingen en gelijkenissen van TC_rood t.o.v. SCC_rood (grafieken: zie Bijlage E) AMETERSTUDIE Invloed van de ontkistingstijd		
3.3 KLEC 3.3.1 3.3.2 <b>3.4 PAR</b> 3.4.1 3.4.2	GLOBAAL OVERZICHT SCC_ROOD		
3.3.1 3.3.2 3.4 PARA 3.4.1 3.4.2 3.4.3	GLOBAAL OVERZICHT SCC_ROOD		
3.3.1 3.3.2 3.4 PARA 3.4.1 3.4.2 3.4.3 3.4.4	GLOBAAL OVERZICHT SCC_ROOD AFWIJKINGEN EN GELIJKENISSEN VAN TC_ROOD T.O.V. SCC_ROOD (GRAFIEKEN: ZIE BIJLAGE E) AMETERSTUDIE INVLOED VAN DE ONTKISTINGSTIJD. INVLOED VAN DE BEWARINGSLOCATIE. INVLOED VAN DE BEWARINGSLOCATIE. INVLOED VAN DE BETONSAMENSTELLING.		
3.3.1 3.3.2 3.4 PARA 3.4.1 3.4.2 3.4.3 3.4.4 3.4.5	GLOBAAL OVERZICHT SCC_ROOD		

HOOFDSTUK 4: CALIBRATIE VAN HET FOTOTOESTEL56		
4.1 VERS	CHIL TUSSEN RGB -EN L*A*B*-KLEURSYSTEEM	57
4.2 WER	KWIJZE	60
4.3 JPEG	/TIFF/RAW-FORMAAT	61
4.3.1	BASISPRINCIPES	61
4.3.2	RAW-FORMAAT	62
4.3.3	OMZETTING VAN RAW NAAR TIFF OF JPEG	63
4.3.4	JPEG-COMPRESSIE	64
4.4 CONV	/ERGENTIEMATRIX RAW	65
4.4.1.	Calibratiemethoden	65
4.4.2	1.1 Lineaire polynomische calibratie	
4.4.2	1.2 Niet-lineaire polynomische calibratie	
4.5 CONV	/ERGENTIEMATRIX JPEG	

4.6 CONCLUSIE	76
---------------	----

HOOFDS	TUK 5: BEOORDELING VAN KLEURSCHAKERINGEN	77
5.1 INLE	IDING	77
5.2 DIGI	TALE CAMERA'S	80
5.2.1	CANON POWERSHOT S50/TRAVELER DC-7900	80
5.3 VER(	GELIJKING VAN DE RESULTATEN TUSSEN SPECTROFOTOMETER EN FOTOTOESTEL	81
5.3.1	Vergelijking van de L*a*b*-waarden	81
5.3.2	Vergelijking van de $\Delta E$ -waarden	82
5.4 BASI	SWERKWIJZE	83
5.5 PAR/	AMETERSTUDIE	85
5.5.1	RAW vs. JPEG	85
5.5.2	INVLOED VAN HET AANTAL OPDELINGSZONES	87
5.5.3	AANTAL POLYNOMISCHE TERMEN WAARMEE CONVERGENTIEMATRIX BEPAALD IS	88
5.5.4	INVLOED VAN DE KEUZE VAN DE REFERENTIEWAARDE	90
5.5.5	INVLOED VAN DE INSTELLINGEN VAN HET FOTOTOESTEL	91

5.6 TOELAATBARE VISUELE AFWIJKINGEN	
5.6.1 Inleiding	92
5.6.2 Praktijkvoorbeelden	92
5.6.2.1 Bovengrens ΔE	
5.6.2.2 Ondergrens $\Delta E$	
5.6.3 Conclusie: Toelaatbare $\Delta$ E-waarden	

HOOFDSTUK 6: BESLUITEN	
6.1 KLEURVERSCHILLEN VOOR VERSCHILLENDE BETONSAMENSTELLINGEN	
6.2 KLEUREVOLUTIE VAN JONG BETON NA ONTKISTEN	
6.3 BEOORDELING VAN KLEURSCHAKERINGEN	

BIJLAGE A: ΔE-WAARDEN VOOR 50% EN 70% HOOGO	VENSLAK106
BIJLAGE B: ΔE-WAARDEN VOOR 35% EN 50% VLIEGA	S
BIJLAGE C: WEERGEGEVENS GENT + PLANNING OPME	TING

BIJLAGE D: VERLOOP VAN DE L*, A*, B* -EN ΔE-WAARDEN VAN IEDER GRIJS BETONTYPE	112
BIJLAGE E: VERLOOP VAN DE L*, A*, B* -EN ∆E-WAARDEN VAN TC_ROOD	118
BIJLAGE F: START- EN EIND L*A*B*-WAARDE EN DE START EN −EIND ΔE-WAARDE VAN IEDERE TEGEL (ONTKISTINGSTIJD)	120
BIJLAGE G: START- EN EIND L*A*B*-WAARDE EN DE START EN –EIND ΔE-WAARDE VAN IEDERE TEGEL BEWARINGSLOCATIE)	121
BIJLAGE H: OMZETTING KLEURWAARDEN VAN 2°/D65 NAAR 10°/C	122
BIJLAGE I: UITLEG COMMANDO'S MATLAB	129
BIJLAGE J: KLEINSTE KWADRATENMETHODE	130
BIJLAGE K: VERLOOP VAN DE ΔE-WAARDE VOOR ALLE 288 "PUNTEN" MET 6, 11, 20, 29 EN 44 POLYNOMISCHE TERMEN	131
BIJLAGE L: DE CIB-GRIJSSCHAAL	136

## Tabel van afkortingen en symbolen

SP	spectrophotometer
HPC	hoge sterkte beton
TC2k	traditionele kalksteenbeton
ТС	traditionele kiezelsteenbeton
SCC	zelfverdichtend beton
HOS	hoogovenslak
VA	vliegas
W	water
С	cement
bu	buiten
nk	natte kast
kz	kruipzaal
ZW	zonder wapening
mw	met wapening
RV	relatieve vochtigheid
CIE	Commission International de l'Eclairage
RGB	Rood-Groen-Blauw

## Hoofdstuk 1 Inleiding

In onze maatschappij worden verschillende begrippen gebruikt om zichtbaar esthetisch beton te beschrijven. In tegenstelling tot Nederland, waar de algemene term "schoon beton" wordt gebruikt, wordt in België onderscheid gemaakt tussen ter plaatste gestort beton en geprefabriceerd beton. De benaming hiervoor is respectievelijk "zichtbeton" en "sierbeton". De benaming sierbeton kan nog eens opgedeeld worden in "architectonische elementen van sierbeton" en "industriële elementen van sierbeton".

In de praktijk worden steeds grotere gevelelementen gebruikt waardoor kleurschakeringen tussen de verschillende elementen steeds meer opvallen. Lichte kleurverschillen kunnen de architecturale kenmerken van een gevel versterken, terwijl grote kleurverschillen als onaangenaam ervaren kunnen worden wanneer ze niet homogeen over de gevel verdeeld zijn.

In tegenstelling tot Nederland (CUR-Aanbeveling 100), Duitsland (Merkblatt Sichtbeton) en Luxemburg (CDC-BET), zijn er in ons land momenteel geen technische normen of richtlijnen beschikbaar die specifiek van toepassing zijn op de beoordeling en uitvoering van werken in zichtbeton. Deze technische normen zullen niet meer zo lang op zich laten wachten. De PTV 21-601[1], waarnaar veelal verwezen wordt, geldt immers enkel voor geprefabriceerde architectonische en industriële elementen van sierbeton.

Bij de vervaardiging van elementen van één bestelling kunnen talrijke betonmengelingen en opeenvolgende bewerkingen vergen gedurende een heel lange tijd. Het is dus normaal dat een zeker verschil in uitzicht tussen de elementen onderling en in eenzelfde element aanvaard wordt. Momenteel wordt in eerste instantie de toelaatbare afwijking in het uitzicht beoordeeld op grond van de CIB-grijsschaal (Figuur 1-1).



Figuur 1-1: CIB-grijsschaal [2]

De waarnemer moet zich bij de beoordeling op minstens 3m van het droge en in de schaduw gelegen oppervlak bevinden. De toelaatbare afwijkingen verschillen zo sterk voor de verschillende referentiedocumenten met eenzelfde basis, wat de controle en de overeenkomstige opstelling van rapporten niet vergemakkelijkt. In dit opzicht vormen het begrip 'rekenkundige gemiddelde afwijking' en de keuze van een welbepaald referentiedocument een noodzakelijke werkbasis [3].

Het zou interessant zijn om deze beoordeling ook te kunnen uitvoeren m.b.v. een fototoestel, daar de beoordeling a.d.h.v. de CIB-schaal toch een subjectief karakter vertoont. De foto van het te beoordelen element kan omgezet worden naar het L\*a\*b\*-kleursysteem, waaruit dan de kleurschakeringen  $\Delta E = \sqrt{(L^* - L_{ref}^*)^2 + (a^* - a_{ref}^*)^2 + (b^* - b_{ref}^*)^2}$  bepaald worden. Naargelang de kwaliteitsklasse die vereist wordt, kunnen grenzen vastgelegd worden waarbinnen de  $\Delta E$ waarde moet liggen.

In hoofdstuk 2 wordt onderzoek verricht naar de algemene L\*a\*b\*-kleurwaarden van grijze betontypes. Hiervoor worden kubussen van verschillende betontypes uit het Laboratorium Magnel voor Betononderzoek opgemeten met een spectrofotometer.

In hoofdstuk 3 worden zelf proefstukken van 6 betontypes vervaardigd waarvan de kleurevolutie van jong beton na ontkisten opgevolgd wordt. Deze opvolging loopt over een periode van 28 dagen en de opmeting wordt ook uitgevoerd met een spectrofotometer.

In hoofdstuk 4 wordt een convergentiematrix opgesteld om een specifiek fototoestel (*"Canon Powershot S50" en "Traveler DC-7900"*) te calibreren. Deze convergentiematrix zet de RGB-kleurwaarden van de foto om naar L\*a\*b\*-kleurwaarden. Met deze L\*a\*b\*-kleurwaarden kunnen kleurverschillen bepaald worden.

Ten slotte wordt het specifieke fototoestel in hoofdstuk gebruikt om kleurverschillen in betonoppervlakken in praktijk te beoordelen. Hierbij wordt in eerste instantie het gehele betonoppervlak algemeen beoordeeld. Vervolgens worden de vlekken afzonderlijk met elkaar vergeleken.

## Hoofdstuk 2: Proefresultaten labo: spectrofotometer

De kleuren in deze thesis worden weergegeven in het L\*a\*b\*-kleurmodel. Het is het meest complete kleurmodel dat standaard wordt gebruikt om alle kleuren te beschrijven die zichtbaar zijn voor het menselijk oog. Elke kleur kan nauwkeurig geïdentificeerd worden a.d.h.v. de specifieke "a\*" -en "b\*"-waarde en de helderheid "L\*". "L\*" geeft de helderheid weer en gaat van 0 (zwart) tot +100 (wit). "a\*" gaat van -60 (groen) tot +60 (rood) en "b\*" gaat van -60 (blauw) tot +60 (geel). Dit is weergegeven in Figuur 2-1. Het is een driedimensionale kleurruimte waarin kleuren die volgens de waarneming even veel van elkaar verschillen ook even ver uit elkaar worden weergegeven [4]. De beoordeling van kleurschakeringen van zichtbeton kan gebeuren op basis van de  $\Delta E$ -waarde:  $\Delta E = \sqrt{(L^* - L_{ref}^*)^2 + (a^* - a_{ref}^*)^2 + (b^* - b_{ref}^*)^2}$  [CIE: Commission International de l'Eclairage]. Dit kleurmodel zal nog uitvoerig besproken worden in Hoofdstuk 4.



Figuur 2-1: CIELAB kleurmodel [4]

In het Laboratorium Magnel voor Betononderzoek zijn kubussen (150x150x150mm) van verschillende betontypes aanwezig, die zich reeds enkele jaren in de kruipzaal ( $20\pm1$  °C en 60% RV) bevinden. In dit hoofdstuk is het de bedoeling om de L\*a\*b\*-waarden van de verschillende betontypes in kaart te brengen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een spectrofotometer. In hetgeen volgt, moet er wel steeds rekening gehouden worden met het feit dat er gebruik gemaakt is van een spectrofotometer met de eigenschappen: D65/10°. Deze eigenschappen zullen verder besproken worden in Hoofdstuk 4.

### 2.1 Spectrofotometer

#### 2.1.1 Algemeen

De bepaling van de kleur bij de verschillende betonsoorten gebeurt met de X-Rite SP60 spectrofotometer (Figuur 2-2). Deze spectrofotometer meet kleur volgens het L\*a\*b\*-kleurmodel.



Figuur 2-2: Spectrofotometer

#### 2.1.2 Interpretatie van de uitvoergegevens

Het spectrum van zichtbaar licht gaat van 400 tot 800nm en is weergegeven in Figuur 2-3. De kleurenvolgorde rood-oranje-geel-groen-blauw-indigo-violet komt overeen met de kleuren van de regenboog en tevens met dalende golflengte van de lichtgolven.



Figuur 2-3: Spectrum van zichtbaar licht

De spectrofotometer geeft de reflectiewaarden weer van de kleuren van 400 tot 700nm in stappen van 10nm. Figuur 2-4 geeft de output weer van de spectrofotometer van een rode betontegel.

> 6,61 6,67 6,54 6,6 6,61 6,59 6,59 6,65 6,66 6,74 6,79 6,89 7 7,17 7,5 8,15 9,44 11,53 14,46 17,77 20,4 22,17 23,33 24,12 24,64 25,1 25,57 26,17 26,74 40,43 27,24 22,14 27,83 16,37 0

Figuur 2-4: Output spectrofotometer van een rode betontegel

De eerste kolom met de waarden (40,43; 22,14; 16,37) stelt de L\*a\*b\*-waarde voor. De 2<sup>e</sup> kolom geeft de reflectiewaarden weer van de overeenkomstige kleur. Indien de reflectiewaarden worden uitgezet t.o.v. de respectievelijke kleuren (400 tot 700nm met tussenstappen van

10nm), dan wordt het resultaat bekomen dat in Figuur 2-5 is weergegeven. Merk op dat voor de rode betontegel de golflengten >600nm aangesproken worden.



Figuur 2-5: Reflectiewaarde van een rode betontegel i.f.v. de kleuren

#### 2.2 Werkwijze

Alle kubussen zijn na het gieten 28 dagen in de natte kast (20±1 °C en >90% relatieve vochtigheid) bewaard. Na deze 28 dagen zijn de kubussen overgebracht naar de kruipzaal (20±1 °C en 60% relatieve vochtigheid) waar ze tot datum van opmeting gebleven zijn. Dit varieert van 2 tot 3 jaar. Het aantal kubussen dat van ieder betontype beschikbaar is, varieert van 1 tot 28. Een overzicht van deze betontypes is weergegeven in §2.3. Per kubus worden 3 zijden opgemeten zoals weergegeven in Figuur 2-6. Per zijde worden 9 metingen uitgevoerd. Dit is weergegeven op Figuur 2-7. In totaal worden dus per kubus 27 metingen uitgevoerd.



Figuur 2-6: Zijden van de kubus die worden opgemeten



Figuur 2-7: Negen metingen per zijde

Door telkens op de zelfde plaats te meten zitten de niet representatieve kleurverschillen er indirect in. Indien bij het opmeten van de kubussen op het eerste zicht al voor de kleur niet representatieve vlekken (vochtige vlekken,..) aanwezig zijn, dan worden deze posities niet opgemeten.

#### 2.3 Betontypes

De eerste vier betontypes die besproken worden zijn HPC (=hoge sterkte beton), TC2k (= traditionele kalksteenbeton), TC (= traditionele kiezelsteenbeton) en SCC (= zelfverdichtend beton). Deze vier betontypes worden ook gebruikt om de kleurevolutie na ontkisten op te volgen. Dit wordt besproken in Hoofdstuk 3. Vervolgens worden 4 betontypes onderzocht waarbij het aandeel portlandcement respectievelijk voor 0%, 50%, 70% en 85% vervangen is door hoogovenslak: HOS 0%, HOS 50%, HOS 70% en HOS 85%. Tenslotte worden ook 4 betontypes behandeld waarbij het aandeel portlandcement respectievelijk voor 0%, 35%, 50% en 67% vervangen is door vliegas: VA 0%, VA 35%, VA 50% en VA 67%. Deze 12 betonsamenstellingen zijn weergegeven in Tabel 2-1.

	НРС	TC2k	тс	SCC	HOS 0%	HOS 50%	HOS 70%	HOS 85%	VA 0%	VA 35%	VA 50%	VA 67%
zand [kg/m <sup>3</sup> ]	650	663	640	782	791	791	791	791	668	668	668	668
grind 2/8 [kg/m <sup>3</sup> ]	530	-	525	300	425	425	425	425	437	437	437	437
grind 8/16 [kg/m <sup>3</sup> ]	720	-	700	340	618	618	618	618	678	678	678	678
kalksteen 2/6 [kg/m <sup>3</sup> ]	-	450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
kalksteen 6/20 [kg/m <sup>3</sup> ]	-	759	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEM I 52,5 [kg/m <sup>3</sup> ]	400	350	350	400	350	175	105	53	400	260	200	132
hoogovenslak [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	-	175	245	297	-	-	-	-
vliegas [kg/m³]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	140	200	268
water [kg/m <sup>3</sup> ]	132	165	165	192	174	174	174	174	160	160	160	160
kalksteen poeder [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	300	-	-	-	-	-	-	-	-
"glenium 51" [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	2,9	-	-	-	-	-	-	-	-
"glenium 27" [kg/m <sup>3</sup> ]	16,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W/C [-]	0,33	0,47	0,47	0,48	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
druksterkte 28d [N/mm <sup>2</sup> ]	77,3	60,3	56,5	65,9	-	-	-	-	-	-	-	-
Aantal kubussen	25	28	10	12	12	13	12	12	6	6	19	14

Tabel 2-1: Betonsamenstelling van de 12 betontypes

#### 2.3.1 ΔE-waarden van HPC/TC2k/TC/SCC

Voor ieder  $\Delta$ E-waarde: betontype wordt in eerste instantie de  $\Delta E = \sqrt{\left(L^* - L^*_{ref}\right)^2 + \left(a^* - a^*_{ref}\right)^2 + \left(b^* - b^*_{ref}\right)^2}$  van iedere meting bepaald, waarbij de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van alle kubussen als referentiewaarde optreedt. De 27 metingen per kubus worden zoals uitgelegd in §2.2 uitgevoerd met een spectrofotometer. Als referentie L\*a\*b\*waarde wordt de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van alle metingen van het onderzochte betontype genomen. Hierbij kan als geheugensteuntje gebruikt worden dat een ΔE-waarde vanaf 1,5-2 zichtbaar is voor het menselijk oog. Onderstaande figuren geven de  $\Delta E$ -waarden weer van alle metingen van de betontypes.





Figuur 2-8: ΔE van HPC voor 675 metingen (25 kubussen)

De 25 kubussen van HPC zijn in 5 reeksen gestort met respectievelijk 2, 15, 2, 2 en 4 kubussen. De grenzen tussen deze reeksen zijn aangeduid met verticale lijnen in Figuur 2-8. Uit Figuur 2-8 is niet echt een onderscheid te maken tussen deze verschillende reeksen. Hieruit kan eventueel afgeleid worden dat het betontype HPC vrij homogeen van kleur is over de verschillende stortingen. Dit in tegenstelling tot TC2k (§2.3.1.2).



Figuur 2-9: ΔE van TC2k voor 756 metingen (28 kubussen)

De 28 kubussen zijn in 2 reeksen gestort. Reeks 1 omvat de metingen 1-351, terwijl reeks 2 de metingen 352-756 omvat. Dit is aangeduid in Figuur 2-9 met een verticale lijn. In Figuur 2-9 valt op dat de 1<sup>e</sup> helft van de metingen merkelijk grotere  $\Delta$ E-waarden heeft in vergelijking met de 2<sup>e</sup> helft. Dit is het gevolg van het feit dat de kubussen in de 1<sup>e</sup> helft op een ander ogenblik gestort dan de kubussen uit de 2<sup>e</sup> helft. Indien de opmetingen van deze 2 reeksen kubussen worden opgesplitst, dan worden de  $\Delta$ E-waarden uit Tabel 2-2 verkregen.

	$\Delta E_{gemiddeld}$	$\Delta E_{max}$	$\Delta E_{min}$
Reeks 1 (13 kubussen)	2,81	10,76	0,23
Reeks 2 (15 kubussen)	2,09	8,06	0,19

Hieruit blijkt dat er toch een groot verschil kan optreden tussen 2 verschillende betonstortingen met betrekking tot de onderlinge kleurverschillen tussen kubussen van een reeks. De gemiddelde L\*-waarde van reeks 2 is 65,04 t.o.v. 64,52 voor reeks 1. De waarde van L\* zou een invloed kunnen hebben op de  $\Delta$ E-waarde: hoe kleiner het verschil in L\*-waarde, hoe kleiner de  $\Delta$ E-waarde. De variatie van de a\*- en b\*-waarde is minder uitgesproken bij grijs beton.



Dit betontype werd in één reeks gestort. Indien de gemiddelde  $\Delta E$ -waarden van het betontype TC en TC2k met elkaar vergeleken worden, dan valt op te merken dat het gebruik van grind (TC) - in tegenstelling tot kalksteen (TC2k) - aanleiding geeft tot een grotere gemiddelde  $\Delta E$ -waarde, terwijl de gemiddelde en maixmale  $\Delta E$ -waarde hetzelfde is.



2.3.1.4 SCC

Figuur 2-11: ΔE van SCC voor 324 metingen (12 kubussen)

Van het betontype SCC is er slechts 1 reeks van 12 kubussen gestort. Toch valt op dat SCC de kleinste gemiddelde en maximale  $\Delta$ E-waarde heeft van alle betontypes. Een vermoedelijke reden hiervoor kan de grootste gemiddelde L\*-waarde zijn die SCC heeft.

#### 2.3.1.5 Vergelijking HPC/TC2k/TC/SCC

In Figuur 2-12 wordt een overzicht gegeven van de gemeten  $\Delta E$ -waarden van alle betontypes. Hierbij worden  $\Delta E_{\text{gemiddeld}}$  en  $\Delta E_{\text{max}}$  voorgesteld op de linkeras, terwijl  $\Delta E_{\text{min}}$  voorgesteld wordt op de rechteras.



Figuur 2-12:  $\Delta$ Egemiddeld,  $\Delta$ Emax en  $\Delta$ Emin voor alle betontypes

Uit Figuur 2-12 valt af te lezen dat SCC de kleinste gemiddelde  $\Delta$ E-waarde heeft. Deze vaststelling vraagt echter om voorzichtigheid, daar bijvoorbeeld in §2.3.1.2 voor reeks 2 van betontype TC2k een gemiddelde  $\Delta$ E-waarde van 2,09 werd bekomen. De maximale  $\Delta$ E-waarde en minimale  $\Delta$ E-waarde vertonen een gelijke trend als de gemiddelde  $\Delta$ E-waarde. Hoe kleiner  $\Delta$ E<sub>gemiddeld</sub> is, hoe kleiner dat ook  $\Delta$ E<sub>min</sub> en  $\Delta$ E<sub>max</sub> zijn. In volgende paragraaf wordt naar een verband gezocht tussen de gemiddelde L\*a\*b\*-waarden van de betontypes en de overeenkomstige  $\Delta$ E-waarden.

#### 2.3.2 Gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van HPC/TC2k/TC/SCC

In Figuur 2-13 wordt de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde weergegeven voor alle betontypes. Hierbij wordt de L\*-waarde voorgesteld op de linkeras, terwijl de a\* -en de b\*-waarde voorgesteld worden op de rechteras.



Figuur 2-13: Gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van de verschillende betontypes

Uit Figuur 2-13 volgt dat de a\*-waarde voor de verschillende betontypes praktisch gelijk gesteld kan worden aan 0 (enkel voor grijze beton). Ook de b\*-waarde geeft geen overtuigende kleurrichting aan. De b\*-schaal loopt van -60 (blauw) tot +60 (geel), zodat een b\*-waarde van 7 overeenstemt met een enorm lichte kleur geel. In combinatie met een kleine a\*-waarde geeft dit erg gesatureerde kleuren (~ grijs). De factor die de belangrijkste invloed zal hebben op het waarneembaar kleurverschil is de L\*-waarde van het beton. In Figuur 2-13 is te zien dat SCC een L\*-waarde heeft die merkelijk groter is dan deze van de overige betontypes. T.o.v. traditionele beton zal zelfverdichtend beton dus veel lichter van kleur zijn. In §2.3.1.4 werd ook voor SCC de kleinste gemiddelde  $\Delta$ E-waarde bekomen. Er zit dus een verband tussen de L\*-waarde en de gemiddelde  $\Delta$ E-waarde. Dit kan bevestigd worden door het betontype HPC, want HPC heeft de 2<sup>e</sup> grootste L\*-waarde en de 2<sup>e</sup> kleinste gemiddelde  $\Delta$ E-waarde.

In Tabel 2-3 zijn de standaardafwijkingen van de L\*-, a\*- en b\*-waarde van alle metingen weergegeven voor alle betontypes. Indien Tabel 2-3 vergeleken wordt met Figuur 2-12 dan kan afgeleid worden dat het betontype met de kleinste standaardafwijking voor L\* ook het

betontype is met de kleinste gemiddelde  $\Delta E$ -waarde (SCC). Algemeen kan op basis van genoemde testresultaten voor grijs beton gesteld worden:  $a^*$ = -0.4 tot 0.73,  $b^*$ = 5.02 tot 9.44 en  $L^*$ = 61.6 tot 75.1. De L\*-waarde heeft dus de grootste invloed op de  $\Delta E$ -waarde.

	HPC	TC2k	ТС	SCC
L*-waarde	2,27	2,53	3,2	2,14
a*-waarde	0,18	0,2	0,23	0,2
b*-waarde	0,98	1,03	1,11	0,97

Tabel 2-3: Standaardafwijking van L\*, a\* en b\*

#### 2.3.3 Gedeeltelijke vervanging van cement door hoogovenslak

In dit puntje wordt de invloed van hoeveelheid hoogovenslak op de  $\Delta$ E- en de L\*a\*b\*-waarden onderzocht. Er wordt uitgegaan van een vaste betonsamenstelling, waarbij telkens het aandeel portlandcement (CEM I 52.5N) gedeeltelijk wordt vervangen door hoogovenslak. De W/(C+HOS) is telkens gelijk aan 0,5. Er zijn 4 verschillende types gemaakt: 0%, 50%, 70% en 85% van het portlandcement is vervangen door hoogovenslak. De samenstellingen zijn weergegeven in Tabel 2-1. Een deel van deze kubussen zijn gedeeltelijk bedekt met aluminiumfolie in het kader van een ander onderzoek, zodat op deze kubussen slechts 15 metingen zijn uitgevoerd.

#### 2.3.3.1 Overzicht ΔE-waarden van beton met hoogovenslak

In Figuren 2-14 en 2-15 is het verloop van de  $\Delta$ E-waarde weergeven voor gehaltes van respectievelijk 0% en 85% hoogovenslak. Het beton waarbij 0% portlandcement vervangen is door hoogovenslak is gestort in 3 reeksen, terwijl bij 85% hoogovenslak in 2 reeksen gestort is. Dit wordt weergegeven door de verticale lijnen.



Figuur 2-14: Verloop ΔE met 0% hoogovenslak voor 136 metingen (12 kubussen)



Figuur 2-15: Verloop  $\Delta E$  met 85% hoogovenslak voor 179 metingen (12 kubussen)

Uit Figuren 2-14 en 2-15 valt af te lezen dat de gemiddelde  $\Delta E$ -waarde afneemt bij toenemend percentage hoogovenslak. In Bijlage A is tevens het verloop van  $\Delta E$  terug te vinden voor 50% en 70% hoogovenslak. In Figuur 2-16 zijn de resultaten samengevat.



Figuur 2-16: Overzicht ΔE-waarden voor de verschillende verhoudingen hoogovenslak

In Figuur 2-16 kan een lineair dalend verloop opgemerkt worden voor de gemiddelde en maximale  $\Delta E$ -waarde bij een toenemende hoeveelheid hoogovenslak. Voor de minimale  $\Delta E$ -waarden is dat verband niet vast te stellen.

#### 2.3.3.2 Overzicht L\*a\*b\*-waarden van beton met hoogovenslak

In Figuur 2-17 wordt een overzicht gegeven van de gemiddelde L\*a\*b\*-waarden voor de verschillende verhoudingen hoogovenslak. Hierbij wordt de L\*-waarde voorgesteld op de linkeras en de a\* -en b\*-waarde op de rechteras. Zowel de a\*-waarden als de b\*-waarden vertonen geen significante verschillen. De L\*-waarde neemt toe bij een toenemende hoeveelheid hoogovenslak. Deze vaststelling benadrukt nog eens het feit dat de a\* -en b\*-waarde van grijze beton een veel kleinere invloed hebben dan de L\*-waarde met betrekking tot beoordeling van de kleurverschillen. Indien Figuren 2-16 en 2-17 vergeleken worden, dan kan afgeleid worden dat  $\Delta E$  afneemt bij een toename van de L\*-waarde.



Figuur 2-17: Overzicht L\*a\*b\*-waarden voor de verschillende verhoudingen hoogovenslak

#### 2.3.4 Gedeeltelijke vervanging van cement door vliegas

In dit puntje wordt er op dezelfde manier te werk gegaan als bij de gedeeltelijke vervanging van cement door hoogovenslak. De invloed van de hoeveelheid vliegas op de  $\Delta$ E- en de L\*a\*b\*-waarden wordt onderzocht. Ook hier wordt er uitgegaan van een vaste betonsamenstelling. De verhouding van portlandcement (CEM I 52.5N) tot vliegas wordt telkens gewijzigd. De W/(C+VA) is altijd gelijk aan 0,4. Er zijn 4 verschillende types gemaakt: 0%, 35%, 50% en 67% van het portlandcement is vervangen door vliegas. In Tabel 2-1 zijn de betonsamenstellingen terug te vinden. Een deel van deze kubussen zijn gedeeltelijk bedekt met aluminiumfolie in het kader van een ander onderzoek, zodat op deze kubussen slechts 15 metingen zijn uitgevoerd.

#### 2.3.4.1 Overzicht $\Delta E$ -waarden van beton met vliegas

In de Figuren 2-18 en 2-19 wordt het verloop van de  $\Delta$ E-waarden weergeven voor respectievelijk 0% en 67% vliegas. Het verloop van  $\Delta$ E voor 35% en 50% vliegas wordt weergegeven in Bijlage B. Het beton waarbij 0% portlandcement vervangen is door vliegas is gestort in 2 reeksen, terwijl bij 85% vliegas het beton in 3 reeksen gestort is. Dit wordt weergegeven door de verticale lijnen.



Figuur 2-18: Verloop  $\Delta E$  met 0% vliegas voor 63 metingen (6 kubussen)



Figuur 2-19: Verloop ΔE met 67% vliegas voor 192 metingen (14 kubussen)

De  $\Delta$ E-waarden voor de verschillende verhoudingen worden uitgezet in Figuur 2-20.



Figuur 2-20: Overzicht  $\Delta E$ -waarden voor de verschillende verhoudingen vliegas

In Figuur 2-20 valt af te lezen dat bij een toename van het percentage vliegas de gemiddelde en maximale  $\Delta$ E-waarde eerst afneemt (35% vliegas) en dan terug toeneemt (50% vliegas). Voor de minimale  $\Delta$ E-waarde is opnieuw niet echt een verband waar te nemen. De betrouwbaarheid van de resultaten voor 0% en 35% vliegas is kleiner dan deze voor 50% en 67% vliegas. Dit is te wijten aan het gering aantal proefstukken waardoor het slechts mogelijk was om hiervoor respectievelijk 63 en 85 metingen te doen. Dit is slechts 1/3 van het aantal metingen bij 50% en 67% vliegas. Bij toename van de hoeveelheid vliegas vanaf 50%, is de toename van de gemiddelde  $\Delta$ E-waarde klein.

#### 2.3.4.2 Overzicht L\*a\*b\*-waarden van beton met vliegas

In Figuur 2-21 wordt een overzicht gegeven van de gemiddelde L\*a\*b\*-waarden voor de verschillende verhoudingen vliegas. Hierbij wordt de L\*-waarde voorgesteld op de linkeras en de a\*- en b\*-waarde op de rechteras.



Figuur 2-21: Overzicht L\*a\*b\*-waarden voor de verschillende verhoudingen vliegas

Het merkwaardig verschijnsel uit Figuur 2-20 is hier toch terug te vinden. Bij een toenemende hoeveelheid vliegas is er opnieuw eerst een toename van L\*waarde (35% vliegas), waarna de L\*-waarde terug afneemt (50% vliegas). Er bestaat dus opnieuw een verband tussen de grootte van L\*-waarde en de maximale en gemiddelde  $\Delta$ E-waarde. Dit volgt in principe rechtstreeks uit de formule van  $\Delta$ E.

#### 2.4 Samenvatting van alle betontypes

In Figuur 2-22 is een overzicht gegeven van de L\*a\*b\*-waarde van alle betontypes die in dit hoofdstuk besproken zijn. Hierbij is de L\*-waarde voorgesteld op de linkeras, terwijl de a\*- en b\*-waarde voorgesteld zijn op de rechteras. Hieruit kunnen enkele besluiten worden opgesteld. Er kan afgeleid worden dat de a\*-waarde van grijze betontypes praktisch geen invloed heeft op de kleurverschillen daar de range van deze waarde gaat van -0,4 tot 0,73. De b\*-waarde met een range van 5,02 tot 9,44 heeft al een grotere invloed, maar het is de L\*-waarde met een range van 57,4 tot 75,1 die de meest kritische factor is met betrekking tot het kleurverschil.

SCC heeft de grootste L\*-waarde, terwijl de b\*-waarde van dit betontype het kleinst is. Indien de betontypes waarvan het portlandcement gedeeltelijk wordt vervangen door hoogovenslak en vliegas van naderbij bestudeerd, dan kunnen ook enkele zaken afgeleid worden. Er wordt een praktisch lineair stijgend verband verkregen voor de L\*-waarde bij een toenemende hoeveelheid hoogovenslak, terwijl de a\*- en b\*-waarde constant blijven (het beton wordt dus lichter/witter van kleur). Dit in tegenstelling tot het betontype waarbij het portlandcement gedeeltelijk wordt vervangen door vliegas. Vanaf 35% vliegas wordt een lineair dalend verband vastgesteld tussen de L\*-waarde en de hoeveelheid vliegas. Dit verband is ook terug te vinden voor de a\*- en b\*waarde. Dus bij een toenemende hoeveelheid hoogovenslak wordt een lichtere kleur verkregen en bij een toenemende hoeveelheid vliegas wordt een donkerdere kleur verkregen.



Figuur 2-22: Overzicht L\*a\*b\*-waarde van alle betontypes

In Figuur 2-23 is de minimale, gemiddelde en maximale  $\Delta E$ -waarde weergegeven van ieder betontype. Hierbij zijn  $\Delta E_{gemiddeld}$  en  $\Delta E_{max}$  voorgesteld op de linkeras, terwijl  $\Delta E_{min}$  voorgesteld is op de rechteras.



 $\blacksquare \Delta Egemiddeld \quad \blacksquare \Delta Emax \quad \blacksquare \Delta Emin$ 

Figuur 2-23: Overzicht  $\Delta E$ -waarde van alle betontypes

In Figuur 2-23 is de grote invloed van de L\*-waarde van op de  $\Delta$ E-waarde goed te zien. Dit wordt bevestigd door de resultaten van de standaardafwijkingen in Tabel 2-3 (§2.3.2). De L\*-waarde heeft een grotere standaardafwijking dan de a\*- en b\*-waarde, dus zal de  $\Delta$ E-waarde het meest beïnvloed worden door L\*. De gemiddelde  $\Delta$ E-waarde van SCC is het kleinst, terwijl dit betontype de grootste L\*-waarde heeft. Hieruit kan besloten worden dat indien de keuze van betonkleur vrij te kiezen is, beter geopteerd wordt voor een lichtere kleur (grotere L\*-waarde) daar deze resulteert in kleinere kleurverschillen.

In dit hoofdstuk is enkel gebruik gemaakt van kubussen van de betreffende betontypes ter bepaling van de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde en het kleurverschil  $\Delta E$ . Deze kubussen verschillen met de constructieve elementen uit de praktijk: geen naden, geen wapening, kleinere afmetingen,... In Hoofdstuk 3 zullen grotere elementen (tegels) geproduceerd worden om na te gaan of de bekomen resultaten uit dit hoofdstuk ook terug te vinden zijn in deze elementen.

Ten slotte wordt er als voorbeeld vanuit gegaan dat de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van het betontype TC als referentiewaarde optreedt. In Tabel 2-4 wordt het kleurverschil tussen TC en de andere betontypes weergegeven.

	kleurverschil ΔE
НРС	2,4
TC2k	0,8
SCC	8,5
0% hoogovenslak	1,9
50% hoogovenslak	2,7
70% hoogovenslak	5,3
85% hoogovenslak	6,6
0% vliegas	4,7
35% vliegas	1,6
50% vliegas	2,7
67% vliegas	5,8

Tabel 2-4: Kleurverschil tussen TC en de andere betontypes

Indien er van uitgegaan wordt dat een  $\Delta E$  lager dan 1,5 niet waarneembaar is voor het menselijk oog, dan is het enkel TC2k die niet te onderscheiden valt van TC. Het gebruik van kalksteen i.p.v. grind zou dus in principe geen invloed mogen hebben op de kleur van het beton. In Hoofdstuk 3 zal nagegaan worden of dit ook bij grotere elementen het geval is.

## Hoofdstuk 3 Kleurevolutie van jong beton na ontkisten

### 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de kleurevolutie van jong beton besproken voor zes verschillende betontypes: HPC (= hoge sterkte beton), TC2k (= traditionele kalksteenbeton), TC (= traditionele kiezelsteen-beton) en SCC (= zelfverdichtend beton), TC met rood pigment en SCC met rood pigment. Per betontype zijn 5 tegels gemaakt en deze zijn uitgevoerd in het Laboratorium Magnel voor Betononderzoek. In deze inleiding wordt eerst een kort overzicht gegeven van de mogelijke kleurverschillen die kunnen optreden bij het maken van deze tegels. Daarna wordt een overzicht gegeven van de betonsamenstellingen, bekistingen en de 5 type tegels.

#### 3.1.1 Kleurverschillen in betonoppervlakken<sup>[5]</sup>

#### 3.1.1.1 Kleurverschillen door verontreiniging

De verontreinigingen :

- reeds aanwezig in de betonspecie
- afkomstig van de bekistingen (ontkistingsmiddel)
- afkomstig van buiten af, na ontkisten

#### Betonspecie

De verontreinigingen komen bijna steeds voor in het toeslagmateriaal:

- zand: bevat soms slib en/of humus wat respectievelijk aanleiding kan geven tot groenachtige en bruinachtige kleur. Onvoldoende menging kan al voor het ontkisten aanleiding geven tot kleurverschillen.
- grind: aanwezigheid van pyriet in het grind kan na ontkisten roestvlekken veroorzaken indien het pigment dicht bij het betonoppervlak ligt. Ijzerconcentraties in het grind kunnen ook aanleiding geven tot roestvlekken.

 Het aanmaakwater bevat soms ook toevoegingen zoals luchtbelvormers en/of plastificeermiddelen die aanleiding kunnen geven tot bruinachtige verkleuren wanneer deze toevoegingen een bruine kleur hebben.

#### Bekistingen

- bekistingsmateriaal: de verontreinigingen kunnen veroorzaakt worden door vuil, houtafval,
  zaagsel e.d. die in het horizontale vlak van de bekisting van de tegel achtergebleven zijn.
- ontkistingsmiddel: wanneer het ontkistingsmiddel een lage viscositeit heeft of zelf verontreinigingen bevat, dan kan dit leiden tot crèmeachtige of bruinachtige verkleuringen. Het niet gelijkmatig, overmatig of te laat aanbrengen van het ontkistingsmiddel kan ook aanleiding geven tot kleurverschillen

#### Van buiten af

Na ontkisten kunnen kleurveranderende stoffen zoals roetdeeltjes, mos en uitlaatgassen zich afzetten op het betonoppervlak.

# 3.1.1.2 Kleurverschillen door afscheiding van water en fijne deeltjes uit de betonspecie

In dit puntje wordt enkel de absorptie van bekistingsmateriaal besproken. Sedimentatie van de betonmening treedt niet op door de horizontale uitvoering van de tegel en lekken in de bekisting worden uitgesloten door de eenvoudige uitvoering van de bekisting.

#### Absorptie van het bekistingmateriaal

Water met daarin de fijnste cementdeeltjes en eventueel ook de fijnste toeslagdeeltjes worden in het bekistingsmateriaal gezogen. Dit geeft het betonoppervlak een donkerdere kleur naargelang:

- de grotere poreusheid van het oppervlak
- de grovere cementkorrels die achterblijven hebben een donkerder kleur dan de fijne cementkorrels: hoe groter de absorptie, hoe donkerder de kleur van het beton is.

#### 3.1.1.3 Kleurverschillen door variatie van de samenstellende bestanddelen van het beton door variatie in de en mengverhouding

De kleur van het beton hangt af van:

- de kleuren van het cement en het zand
- water/cement-factor

#### Kleuren van het cement en het zand

De menging van deze materialen bepaalt de kleur van het betonoppervlak. De kleur van het cement is afhankelijk van die van de grondstoffen. Het is dus belangrijk om voor ieder object cement te gebruiken uit dezelfde fabriek, maar ook hier kunnen verschillen optreden door verschillende leveringen. Variaties in kleur van het zand dient ook vermeden te worden door zand te gebruiken afkomstig uit één groeve of baggerplaats. Het kan aanbevolen zijn om het zand met gelijke kleur en korrelgradering afzonderlijk op te slaan en hierbij een goede controle op verontreinigingen uitvoeren. Omdat de kleuren van cement en zand principieel verschillen is een voldoende mengtijd noodzakelijk.

#### Water/cement-factor

Een hoge water/cement-factor leidt tot een lichter kleur dan een lage water/cement-factor. Het is van belang om voor ieder object de variaties van de water/cement-factor zo gering mogelijk te houden. Hierbij dient het vochtgehalte van het zand permanent gecontroleerd te worden zodat de toe te voegen hoeveelheid water steeds aangepast kan worden aan de water/cement-factor die nodig is.

#### 3.1.1.4 Kleurverschillen door verschillen in luchtinwerking

Het tijdstip van ontkisten staat in verband met het verschil in luchtinwerking. Het vroegtijdig loslaten van de hoeken van de bekistingsvlakken veroorzaakt een luchttoetreding die zorgt voor een vroegtijdigere carbonatatie van deze hoeken. Door op tijd te ontkisten kan de luchtinwerking beperkt worden.

De vrije kalk die ontstaat bij de hydratatie van het cement gaat carbonateren door het contact van het beton met de lucht. Deze kristallen zetten zich af in de poriën. Tijdens het verhardingsproces zullen de kristallen die in het water opgelost zijn naar het oppervlak
meegevoerd worden (bij droog oppervlak). Het water verdampt waardoor de kalk achterblijft. De inwerking van CO<sub>2</sub> uit de lucht zal het kalk carbonateren en een lichtere tint geven aan het oppervlak. Bij een nat oppervlak, zal de in het water opgeloste kalk niet alleen naar het oppervlak migreren, maar zich daar ook verder verspreiden waardoor witte uitslag of sluier ontstaat [6] en [7].

#### 3.1.2 Betonsamenstellingen

De eerste vier betontypes die besproken worden zijn HPC, TC2k, TC en SCC. Er wordt telkens uitgegaan van een betonmengeling van 200 liter. De samenstelling van alle betontypes is weergegeven in Tabel 3-1. Voor TC\_rood en SCC\_rood wordt een rood pigment toegevoegd aan het beton: rode ijzeroxide. Pigmenten zijn dure producten, zodat hiermee rekening moet gehouden worden. In een betoncentrale wordt er meestal voorgesteld om 5% pigment - berekend op de hoeveelheid cement - toe te voegen. Dit pigmentgehalte geeft reeds een voldoende kleuring aan de meeste betonsoorten. Het pigmentgehalte moet wel groter zijn dan 1 à 3%, anders is er kans op vlekvorming [8].

	HPC	TC2k	SCC	ТС	TC rood	SCC rood
	siliceous	calcareous	siliceous	siliceous	siliceous	siliceous
zand 0/4 [kg/m <sup>3</sup> ]	650	663,8	782	640	640	782
grind 2/8 [kg/m <sup>3</sup> ]	530	-	300	525	525	300
grind 8/16 [kg/m <sup>3</sup> ]	240	-	340	700	700	340
kalksteen 2/6 [kg/m <sup>3</sup> ]	-	450,7	-			-
kalksteen 6/20 [kg/m <sup>3</sup> ]	-	759,25	-			-
CEM I 52.5 [kg/m <sup>3</sup> ]	400	350	400	350	350	400
water [kg/m <sup>3</sup> ]	132	165	192	165	165	192
limestone powder P2	_	_	300	_	_	300
$[kg/m^3]$			500			500
glenium 27 [kg/m <sup>3</sup> ]	16,2	-	-	-	-	-
glenium 51 [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	3,9	-	-	3,65
rood pigment [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	17,5	20
W/C	0,33	0,47	0,48	0,47	0,47	0,48

Tabel 3-1: Betonsamenstellingen

Voor iedere betonsamenstelling worden ook een aantal standaardproeven uitgevoerd: slump test (flow), volumemassa, uitspreiding op de schoktafel, V-funnel, luchtgehalte vers beton en de druksterkte na 28 dagen. Deze eigenschappen van de betontypes worden weergegeven in Tabel 3-2.

	HPC	TC2k	SCC	TC	TC rood	SCC rood
	siliceous	calcareous	siliceous	siliceous	siliceous	siliceous
slump test [mm]	39	26	-	10	16	-
slump-flow [mm]	-	-	795	-	-	660
volumemassa [kg/m <sup>3</sup> ]	2412,5	2362,5	2356,25	2400	2362,5	2356,5
uitspreiding schoktafel [-]	-	1,44	-	1,5	1,36	-
V-funnel [sec]	-	-	9,47	-	-	11,79
luchtgehalte vers beton [%]	-	-	1,9	2,1	2,8	2,5
druksterkte na 28d [N/mm <sup>2</sup> ]	76,2	64,5	64,7	57,9	60,6	64,6

Tabel 3-2: Eigenschappen van de betontypes

### 3.1.3 Bekisting

Alle tegels hebben volgende afmetingen: 63x63x7cm. De bekistingen worden gemaakt met spaanplaten (type polyspan).



Figuur 3-1a: Afmetingen bekisting



Figuur 3-1b: Uitzicht bekisting

Alle bekistingen worden voor het storten van het beton ingewreven met Q8 Da Vinci AMX. Dit is een algemeen bruikbaar ontkistingsmiddel, dat aangeraden wordt voor gebruik op houten of stalen bekisting in combinatie met vrijwel alle types beton. Het ontkistingsmiddel wordt m.b.v. doekjes (Tork Premium Multipurpose Cloth) mooi droog gewreven, waardoor een zo dun mogelijke laag aan ontkistingsmiddel verkregen wordt. Overtollig gebruik kan aanleiding geven tot vlekvorming en verzanding [9].

Na het storten van de tegels worden ze naar hun respectievelijke bewaringslocatie gebracht tot het moment van ontkisten (Tabel 3-3). De tegels wordt beschermd tegen regen door een afdak zodat er geen indringing van regenwater tussen de bekisting en het beton kan optreden.



Figuur 3-2: Betontegel na storten

## 3.1.4 Benaming tegels

Per betontype worden 5 tegels gemaakt. Deze tegels worden respectievelijk tegel 1, tegel 2, tegel 3, tegel 4 en tegel 5 genoemd. Iedere tegel krijgt een persoonlijke code die ook in de tekst als benaming gebruikt wordt. In Tabel 3-3 wordt een overzicht gegeven van de 5 tegels. In de persoonlijke code kan "betontype" 6 mogelijke benamingen hebben: HPC, TC2k, SCC, TC, TC\_rood en SCC\_rood.

Benaming	Tegelcode	Wapening	Ontkisten	Bewaring
Tegel 1	betontype_24u_bu_zw	-	24u	buiten
Tegel 2	betontype_72u_bu_zw	-	72u	buiten
Tegel 3	betontype_24u_nk_mw	Х	24u	natte kast (20±1 °C en >90% RV)
Tegel 4	betontype_24u_bu_mw	Х	24u	buiten
Tegel 5	betontype_24u_kz_mw	Х	24u	kruipzaal (20±1 °C en 60% RV)

Tabel 3-3: Beschrijving van de 5 verschillende tegels

Vier tegels worden dus na 24 uur ontkist en één tegel na 72 uur. Na ontkisten worden de tegels op regelmatige tijdstippen (na 0, 1, 2, 6 (of4), 10, 20 en 28 dagen) opgemeten met de spectrofotometer om zo te zien hoe de kleur evolueert. Hiervoor worden 30 metingen uitgevoerd per tegel op welbepaalde plaatsen, vastgelegd door middel van een blad met uitsparingen (zie Figuren 3-3a en 3-3b).

123					6,5cm	12	,5_12	,5 <u>1</u> 2	,5 <u>1</u> 2	,5	<u>6,5cm</u>
	-	1-			ບຼ່				ļ		-
		ł.			9 				D		
		1									
		1									
		-	-								
				-							
				- I	3,5cm						_

Figuur 3-3a: 30 metingen per tegel



In eerste instantie wordt de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van de 30 metingen van elke tegel bepaald. Daarna wordt elke meting vergeleken met deze gemiddelde L\*a\*b\*-waarde aan de hand van de  $\Delta E = \sqrt{(L^* - L_{ref}^*)^2 + (a^* - a_{ref}^*)^2 + (b^* - b_{ref}^*)^2}$ . Vervolgens wordt het gemiddelde van deze 30  $\Delta E$ -waarden bepaald en deze waarde wordt samen met de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van deze tegels uitgezet in functie van de tijd (aantal dagen na ontkisten).

In Bijlage C zijn de gegevens van het weer van iedere dag en de planning van opmeten terug te vinden. De weersomstandigheden kunnen een belangrijke invloed hebben op het resultaat. Deze invloed zal onderzocht worden verderop in §3.4.5.

In bovenstaande wordt bij het beoordelen van de tegels de vlekken ter plaatse van de afstandhouders buiten beschouwing gelaten. In Figuur 3-4 is een tegel weergegeven waar de afstandhouders goed zichtbaar zijn. Ter illustratie zal de evolutie van het kleurverschil tussen zone 1 en zone 2 (afstandhouder) uitgezet worden. Dit is geïllustreerd in Figuur 3-5.



Figuur 3-4: Tegel met zichtbare afstandhouders (na 1 dag)



Figuur 3-5: Evolutie van kleurverschil tussen zone 1 en zone 2

Uit Figuur 3-5 valt af te leiden dat het kleurverschil tussen de twee zones afneemt maar na 6 dagen toch reeds stabiliseert tot een verschil dat duidelijk waarneembaar blijft voor het menselijk oog.

## 3.2 Kleurevolutie van de grijze tegels

In Figuur 3-6 is een globaal overzicht gegeven van de 5 tegels (HPC) net na ontkisten van de tegel die 72 uur in zijn bekisting zit. Van links naar rechts zijn respectievelijk de tegels HPC\_72u\_bu\_zw, HPC\_24u\_nk\_zw, HPC\_24u\_bu\_mw, HPC\_24u\_bu\_mw en HPC\_24u\_kz\_mw weergegeven. Voor dit betontype werden 2 tegels met wapening buiten geplaatst, terwijl dit voor de andere betontypes 1 met wapening en 1 zonder wapening was. Deze 2 gelijk behandelde tegels worden verder besproken in §3.2.2.3.



Figuur 3-6: Overzicht van de 5 betontegels

In onderstaande zal in eerste instantie één betontype (SCC) volledig besproken worden. Vervolgens worden de afwijkingen en de gelijkenissen van de overige grijze betontypes ten opzichte van dit betontype besproken. Opmerkelijke verschijningen worden ook in een apart puntje aangehaald. Het onderzoek van enkele belanghebbende parameters (ontkistingstijd, bewaringslocatie, wapening, betonsamenstelling en het weer) worden besproken in §3.4.

#### 3.2.1 Globaal overzicht SCC

De evolutie van de L\*-waarde, de a\*-waarde en de b\*-waarde van de 5 tegels in functie van de bewaringstijd na ontkisten worden respectievelijk voorgesteld in Figuur 3-7, Figuur 3-8 en Figuur 3-9.



Figuur 3-7: Verloop L\*-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (SCC)

Uit Figuur 3-7 valt al af te leiden dat bij eenzelfde betonmengsel met gelijke behandeling, bekisting en bekistingsolie een verschil kan verkregen worden voor de helderheid (L\*-waarde) van de tegel enkel door een verschil in bewaring.



Figuur 3-8: Verloop a\*-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (SCC)



Figuur 3-9: Verloop van b\*-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (SCC)

Net als bij de kubussen uit Hoofdstuk 2 wordt voor de SCC-betontegels een lichte kleur bekomen (grote L\*-waarde). De L\*-waarde van de tegel uit de kruipzaal (SCC\_24u\_kz\_mw) en de tegel uit de natte kast (SCC\_24u\_nk\_mw) hebben nagenoeg een identiek verloop voor de L\*-waarde. Bij de tegels die buiten worden bewaard is dit niet het geval. De tegels SCC\_24u\_bu\_zw en SCC\_24u\_bu\_mw hebben opmerkelijk een lagere L\*-waarde, met onderling een parallel verloop tussen deze twee tegels. De tegel zonder wapening heeft de kleinste L\*-waarde van de twee. De tegel die na 72 uur ontkist wordt vertoont een meer onregelmatig verloop. Dit kan misschien veroorzaakt worden door de invloed van het weer. Dit zal verder besproken worden in §3.3. Indien de a\* -en b\*-waarden van naderbij bestudeerd worden, dan valt op dat de tegels uit de klimaatkasten (kruipzaal+natte kast) net na ontkisten dezelfde waarde hebben, maar ze ondergaan een ander verloop om dan na 28 dagen terug dezelfde waarde te hebben. Bij de tegels die buiten bewaard worden is eveneens een parallel verloop op te merken voor de a\*-waarde met de kleinste waarde voor de tegel zonder wapening. Het verloop voor de b\*-waarde is praktisch identiek. Het verloop van a\* en b\* is opnieuw onregelmatig voor de tegel die na 72 uur ontkist wordt, hoewel er toch overeenkomsten tussen de 2 verlopen op te merken zijn. De uiteindelijke L\*a\*b\*-waarde van SCC wordt snel bereikt (na 3 dagen).



Figuur 3-10: Verloop van ΔE voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (SCC)

In Figuur 3-10 wordt het verloop van  $\Delta E$  weergegeven. Hiervoor wordt in eerste instantie de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van de tegel bepaald. Deze waarde treedt op als referentie. Voor iedere meting (van de 30 metingen) wordt de respectievelijke L\*a\*b\*-waarde vergeleken met deze referentiewaarde:  $\Delta E = \sqrt{\left(L^* - L^*_{ref}\right)^2 + \left(a^* - a^*_{ref}\right)^2 + \left(b^* - b^*_{ref}\right)^2}$ . Tot slot wordt het gemiddelde van deze 30  $\Delta E$ -waarden berekend, dit is de  $\Delta E$ -waarde die telkens wordt weergegeven in Figuur 3-10.

Voor tegel SCC\_72u\_bu\_zw is een meer onregelmatig verloop op te merken voor  $\Delta E$ , dat gelijkaardig is met het verloop van zijn overeenkomstige b\*-waarde uit Figuur 3-9. Voor de tegels SCC\_24u\_bu\_zw en SCC\_24u\_bu\_mw is het verloop van de  $\Delta E$ -waarde omgekeerd evenredig met het verloop van de L\*-waarde, maar met dit verschil dat de tegel uit de kruipzaal een kleiner kleurverschil  $\Delta E$  heeft. Ook hier wordt snel na ontkisten (na 3 dagen) de definitieve  $\Delta E$ -waarde verkregen. De  $\Delta E$ -waarde van 0,45 voor de tegel uit de kruipzaal is heel klein en komt overeen met een perfecte tegel. Deze tegel is weergegeven in Figuur 3-11. Bij de beoordeling van de tegels worden de vlekken ter plaatse van de afstandhouders buiten beschouwing gelaten. In de figuren die volgen worden telkens de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van de tegel en de gemiddelde  $\Delta E$ -waarde (met de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde als referentiewaarde) weergegeven op de figuur.



Figuur 3-11: SCC\_24u\_kz\_mw na 28 dagen

Het is ook mogelijk om de tegel uit de natte kast als referentietegel (gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van deze tegel is de referentie L\*a\*b\*-waarde) te laten optreden. In Figuur 3-12 is het verloop van het kleurverschil  $\Delta E$  tussen deze referentietegel en de andere 4 tegels weergegeven.



Figuur 3-12: Verloop ΔE met tegel SCC\_24\_nk\_mw als referentie

Uit Figuur 3-12 volgt dat de tegel uit de kruipzaal het minst afwijking vertoont t.o.v. de tegel uit de natte kast. De tegels die buiten staan vertonen een grote kleurafwijking tegenover de tegels uit de klimaatkasten (natte kast+kruipzaal).

#### 3.2.2 Afwijkingen en gelijkenissen van de andere betontypes t.o.v. SCC

Het verloop van de L\*, a\* -en b\*-waarde en het verloop van de  $\Delta$ E-waarde (enkel met de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde als referentie) van TC2k, TC en HPC zijn weergegeven in Bijlage D. De afwijkingen en gelijkenissen van deze betontypes t.o.v. SCC worden in volgende paragrafen besproken. Opmerkelijke verschillen worden ook besproken.

#### 3.2.2.1 Betontype TC2k t.o.v. SCC (grafieken: zie Bijlage D)

In tegenstelling tot SCC is de uiteindelijke gemiddelde L\*a\*b\*-waarde voor de tegels die buiten bewaard worden onafhankelijk van de bekistingstijd. De tegel die na 72 uur ontkist wordt (TC2k\_72u\_bu\_zw), begint wel met een veel lagere L\*-waarde, maar na reeds 6 dagen bevindt de L\*-waarde zich op het niveau van de tegels TC2k\_24u\_bu\_zw en TC2k\_24u\_bu\_mw.

Net als bij SCC dient opgemerkt te worden dat de tegels die in de kruipzaal en natte kast bewaard worden sneller hun definitieve L\*a\*b\*-waarde bereiken dan de tegels die buiten bewaard worden. De definitieve L\*a\*b\*-waarde voor de tegels die buiten staan worden pas bereikt na 10 dagen, terwijl dit voor de tegels uit de klimaatkasten al optreedt na 3 dagen.

In tegenstelling tot SCC waar de tegel uit de kruipzaal de kleinste  $\Delta$ E-waarde heeft, is het bij TC2k de tegel uit de natte die de kleinste waarde heeft. Deze waarde blijft ook praktisch constant gedurende de volledige periode na ontkisten. Ook de  $\Delta$ E-waarde van de tegel uit de kruipzaal heeft een constant verloop, maar de waarde ligt iets hoger. Voor de tegels die buiten bewaard worden, treedt constante  $\Delta$ E-waarde op vanaf dag 10. Ook valt nog op te merken dat de tegel die na 72 uur ontkist wordt dezelfde  $\Delta$ E-waarde bereikt als de tegel uit de kruipzaal.

Het uitzicht van de tegels TC2k\_72u\_bu\_zw en TC2k\_24\_nk\_mw na respectievelijk 0 en 28 dagen is weergegeven in Figuur 3-13.

In Figuur 3-13 is te zien dat tegel TC2k\_24\_nk\_mw praktisch geen verandering ondergaat tussen dag 0 en dag 28, terwijl tegel TC2k\_72u\_bu\_zw net na ontkisten heel donker is en vlekken vertoont. Na 28 dagen is de tegel egaal van kleur en net een beetje lichter van kleur is dan tegel 3 na 28 dagen (onderste tegelreeks in Figuur 3-13). Deze opmerkingen volgen ook uit het verloop van de L\*a\*b\*-waarden.



TC2k\_24u\_nk\_mw net na ontkisten

TC2k\_24u\_nk\_mw na 28 dagen

Figuur 3-13: Uitzicht tegels 2 (TC2k\_72u\_bu\_zw) en 3 (TC2k\_24u\_nk\_mw) na 0 en 28 dagen

#### 2.2.2.2 Betontype TC t.o.v. SCC (grafieken: zie Bijlage D)

In tegenstelling tot SCC hebben de tegels TC\_24u\_bu\_zw en TC\_24u\_bu\_mw een nagenoeg identiek verloop voor de L\*-, a\*- en b\*-waarde. De wapening in de tegel heeft dus geen invloed op de kleur van de tegel bij TC. Er is een groot verschil op te merken tussen de L\*-waarde van de twee tegels uit de klimaatkasten en deze die buiten blijven staan:  $\Delta$ L\*=5,5. De twee tegels uit de klimaatkasten blijken ook opnieuw snel hun definitieve L\*a\*b\*-waarde te bereiken (na 2 dagen) in tegenstelling tot de tegels die buiten staan (na 10 dagen).

Net als bij SCC is het opnieuw de tegel uit de kruipzaal die de beste resultaten voor  $\Delta E$  oplevert. Opmerkelijk in het verloop van de  $\Delta E$ -waarde van tegel TC\_24u\_bu\_zw zijn de piekwaarden na 1, 2 en 6 dagen. In Figuren 3-14a en 3-14b wordt het verloop van het uitzicht van deze tegel weergeven om deze grote  $\Delta E$ -waarden fysisch te kunnen interpreteren.



TC\_24u\_bu\_zw na 2 dagen

TC\_24u\_bu\_zw na 6 dagen

Figuur 3-14a: Uitzicht van tegel TC\_24u\_bu\_zw na 0, 1, 2 en 6 dagen

De lichtere kleur van de tegel rechtsboven in Figuur 3-14a is het gevolg van het zonlicht die er op schijnt. Het zonlicht beïnvloedt de resultaten van de spectrometer niet.



TC\_24u\_bu\_zw na 28 dagen

ΔE 2,14

Figuur 3-14b: Uitzicht van tegel TC\_24u\_bu\_zw na 10, 20 en 28 dagen

De foto van de tegel linksonder in Figuur 3-14b is genomen in RAW, terwijl de andere twee tegels genomen zijn in JPEG. Dit verklaart de lichtere kleur op de foto. De grote  $\Delta$ E-waarden bij 1, 2 en 6 dagen worden veroorzaakt door de witte vlekken die na 1 dag zichtbaar zijn. Dit is een merkwaardig verschijnsel. Juist na ontkisten zijn deze vlekken niet aanwezig, maar na één dag wel. Deze vlekken verdwijnen opnieuw na dag 6. Na dag 6 neemt de  $\Delta$ E-waarde terug af. Deze vlekvorming treedt niet op bij de tegels van de klimaatkasten en de tegel die na 72 uur ontkist wordt. Tegel TC\_24u\_bu\_mw is ook onderhevig aan deze vlekvorming, maar in mindere mate dan tegel TC\_24u\_bu\_zw.

#### 3.2.2.3 Betontype HPC t.o.v. SCC (grafieken: zie Bijlage D)

Door een andere verdeling in bewaringslocatie zijn er voor HPC twee tegels met wapening gegoten die buiten bewaard zijn en na 24 uur ontkist worden. Dit is niet in overstemming met de andere betontypes waar 1 tegel met wapening en 1 tegel zonder wapening buiten bewaard wordt. Hierdoor is de tegel uit de natte kast uitgevoerd zonder wapening. Opmerkelijk is dat deze twee gelijk behandelde tegels een opmerkelijk kleurverschil hebben. In Figuur 3-15 zijn deze twee tegels weergegeven net na ontkisten. Het valt op te merken dat de linkertegel een lichtere kleur heeft dan de rechtertegel.



Figuur 3-15: Twee tegels met zelfde bewaringsomstandigheden: HPC\_24u\_bu\_mw

Om dit fenomeen van naderbij te bestuderen, wordt het verloop van de gemiddelde L\*a\*b\*waarde van deze twee tegels uit de figuren in Bijlage D afgezonderd. In Figuur 3-16 is het verloop van de gemiddelde L\*-waarde uitgezet, terwijl in Figuur 3-17 het verloop van de gemiddelde a\* -en b\*-waarde wordt voorgesteld.



Figuur 3-16: Verloop van de L\*-waarde



Figuur 3-17: Verloop van de a\* -en b\*-waarde

In Figuur 3-17 wordt de b\*-waarde voorgesteld op de linkeras en de a\*-waarde op de rechteras.

Uit Figuren 3-16 en 3-17 kan afgeleid worden dat de L\* -en de b\*-waarde van beide tegels een parallel verloop hebben in de tijd terwijl de tegels een kleurverschil behouden. Het verloop van de a\*-waarde is slechts parallel tot 10 dagen.

In Figuur 3-18 wordt het verloop van de  $\Delta$ E-waarde (met de gemiddelde waarde van de tegel als referentiewaarde) weergegeven.



Figuur 3-18: Verloop van ΔE

De evolutie van de  $\Delta$ E-waarde van beide tegels verloopt niet gelijkaardig. Er kan enkel waargenomen worden dat de  $\Delta$ E-waarde convergeert naar 1. Deze waarde 1 duidt op een heel mooie egale tegel, daar  $\Delta$ E=1 niet waarneembaar is voor het menselijk oog. Beide panelen hebben dus een zelfde verkleuring in de tijd, enkel een verschillende startwaarde. In Figuur 3-19 is een foto weergegeven van tegel HPC\_24u\_bu\_mw na 28 dagen.



Figuur 3-19: Tegel 4 (HPC\_24u\_bu\_mw) na 28 dagen

Wanneer in Figuur 3-19 de vlekken ter plaatse van de afstandhouders buiten beschouwing worden gelaten, zijn toch nog tal van kleine zwarte vlekjes waarneembaar voor het menselijk oog. Hieruit volgt een beperking van de spectrofotometer: de metingen gebeuren locaal, zodat een globale beoordeling toch een verschillend resultaat kan opleveren. Dit kan opgelost worden door meer metingen te verrichten, maar dit brengt natuurlijk meer werk met zich mee.

De tegels HPC\_24u\_kz\_mw en HPC\_24u\_nk\_zw bereiken praktisch onmiddellijk na ontkisten hun uiteindelijke L\*a\*b\*-waarde. Dit in tegenstelling tot de tegel HPC\_72u\_bu\_zw die een zeer onregelmatig verloop heeft. De gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van tegel HPC\_72u\_bu\_zw ligt een stuk lager deze van tegel HPC\_24u\_kz\_mw en tegel HPC\_24u\_nk\_zw en zal waarschijnlijk ook nooit meer de helderheid (L\*-waarde) van deze tegels bereiken.

De mooiste resultaten bij de HPC-tegels worden dus bekomen wanneer de betontegel wordt bewaard in de kruipzaal (20±1 °C en 60% RV):  $\Delta E_{max}$ =0,8. Het grote voordeel is hierbij dat het eindresultaat snel na ontkisten wordt bereikt. Dit kan een belangrijk aspect zijn voor de prefabindustrie.

## 3.3 Kleurevolutie van de rode tegels

Er zal één betontype (SCC\_rood) algemeen besproken worden. Vervolgens worden de afwijkingen en de gelijkenissen van het overige betontype (TC\_rood) met dit betontype besproken.

#### 3.3.1 Globaal overzicht SCC\_rood

De evolutie van de L\*-waarde, de a\*-waarde en de b\*-waarde van de 5 tegels wordt respectievelijk voorgesteld in Figuur 3-20, Figuur 3-21 en Figuur 3-22.





Figuur 3-20: Verloop L\*-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (SCC\_rood)

Figuur 3-21: Verloop a\*-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (SCC\_rood)



Figuur 3-22: Verloop b\*-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (SCC\_rood)

De L\*-waarden zijn kleiner dan bij traditioneel grijs beton. Er is ook een groter verschil betreffende de L\*-waarde van de tegels in de klimaatkasten en de tegels die buiten staan:  $\Delta$ L\*=8,5. Bij SCC\_rood is de uiteindelijke L\*-waarde afhankelijk van de ontkistingstijd. De tegel die in de kruipkamer (tegel 5) bewaard wordt heeft de meest uitgesproken rode tint, daar deze tegel de grootste a\*-waarde heeft. Tegel SCC\_rood\_24u\_nk\_mw en tegel SCC\_rood\_24u\_kz\_mw verlopen redelijk analoog, terwijl voor de overige tegels er toch wat onregelmatigheden in het verloop zitten. Tenslotte wordt in Figuur 3-23 het verloop van  $\Delta$ E (met de gemiddelde waarde van de tegel als referentiewaarde) weergegeven.



Figuur 3-23: Verloop ΔE voor tegel 1, 2, 3, 4 en 5 (SCC\_rood)

Uit Figuur 3-23 blijkt dat -zoals al enkele keren in dit hoofdstuk- de tegels uit de klimaatkasten de kleinste  $\Delta$ E-waarden hebben en dus het mooiste resultaat opleveren. In Figuren 3-24a en 3-24b zijn tegel SCC\_rood\_24u\_bu\_mw en tegel SCC\_rood\_24u\_nk\_mw na 10 dagen weergegeven.





Figuur 3-24a: Tegel SCC\_rood\_24u\_bu\_mw na 10 dagen

Figuur 3-24b: Tegel SCC\_rood\_24\_nk\_mw na 10 dagen

Tegel SCC\_rood\_24u\_bu\_mw heeft inderdaad geen mooi resultaat ( $\Delta E=3,1$ ), terwijl tegel SCC\_rood\_24u\_nk\_mw perfect is ( $\Delta E=0,5$  en vlekken afstandhouders buiten beschouwing gelaten).

# 3.3.2 Afwijkingen en gelijkenissen van TC\_rood t.o.v. SCC\_rood (grafieken: zie Bijlage E)

In tegenstelling tot SCC\_rood wordt de L\*-waarde niet beïnvloed door de bekistingstijd en wordt de definitieve L\*-waarde opnieuw sneller na ontkisten wordt bereikt t.o.v. traditionele grijze beton.

Opmerkelijk is dat de tegel uit de kruipzaal een veel lagere a\*-waarde heeft dan de andere tegels. Dit is fysisch goed zichtbaar in Figuren 3-25a en 3-25b.



Figuur 3-25a: SCC\_rood\_24\_kz\_mw na 20 dagen

Figuur 3-25b: SCC\_rood\_24\_bu\_mw na 20 dagen

In Figuren 3-25a en 3-25b is duidelijk op te merken dat SCC\_rood\_24u\_bu\_mw een rodere tint heeft dan SCC\_rood\_24u\_kz\_mw. De ontkistingstijd speelt ook geen grote rol voor de a\* -en b\*-waarde.

De  $\Delta E$ -waarden liggen merkelijk hoger dan bij traditionele grijze beton. De tegels uit de klimaatkasten hebben opnieuw de beste kwaliteit.

#### 3.4 Parameterstudie

Er wordt een overzicht gegeven wat de invloed is van de ontkistingstijd, bewaringslocatie, wapening, betonsamenstelling en het weer.

#### 3.4.1 Invloed van de ontkistingstijd

Om de invloed van de ontkistingstijd na te gaan, wordt onderzoek verricht naar het verschil in kleurevolutie van de tegels betontype\_24u\_bu\_zw en betontype\_72u\_bu\_zw. Het betontype HPC is niet weergegeven omdat van dit type geen tegel zonder wapening gestort is die buiten bewaard werd. In Figuren 3-26 en 3-27 wordt het verloop van de L\*- en  $\Delta$ E-waarde weergegeven voor de betontypes SCC, TC2k en SCC. Bij  $\Delta$ E wordt als referentiewaarde opnieuw de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van de tegel genomen. In Bijlage F is een tabel weergegeven

waarin voor ieder betontype de start –en eind L\*a\*b\*-waarde en de start en –eind  $\Delta$ E-waarde voor deze tegels wordt weergegeven waarbij telkens ook het verschil tussen deze start –en eindwaarde wordt bepaald. In hetgeen volgt worden enkel de grijze betontypes besproken.



Figuur 3-26: Verloop van de L\*-waarde voor SCC, TC2k en TC



Figuur 3-27: Verloop van de ∆E-waarde voor SCC, TC2k en TC

Uit Figuur 3-26 kan algemeen afgeleid worden dat de bekistingstijd praktisch geen invloed heeft op de uiteindelijke helderheid van de tegel. Een langere bekistingstijd heeft een negatieve invloed op de SCC omdat SCC\_72u\_bu\_zw een grotere  $\Delta E$  heeft na 28 dagen dan SCC\_24u\_bu\_zw en die tegel ondergaat ook een kleinere afname van  $\Delta E$ .

Opmerkelijk bij TC2k is dat in eerste instantie tegel TC2k\_24u\_bu\_zw een kleiner kleurverschil heeft dan TC2k\_72u\_bu\_zw, maar na 28 dagen is het net omgekeerd. Daarom kan voor TC2k eerder een bekistingstijd van 72 uur aanbevolen worden, daar deze de meest egale kleur voor de tegel oplevert.

Voor grijze TC wordt geopteerd voor een bekistingstijd van 24 uur omdat daar de kleinste  $\Delta E$  optreedt na 28 dagen.

#### 3.4.2 Invloed van de bewaringslocatie

Er zijn 3 bewaringslocaties: buiten, kruipzaal ( $20\pm1$  °C en RV=60%) en de natte kast ( $20\pm1$  °C en RV>90%). Daar de tegels in de klimaatkasten wapening bevat, worden de resultaten van deze tegels vergeleken met de tegel van buiten die ook wapening bevat. Voor HPC bevat de tegel uit de natte kast toch geen wapening maar de tegel wordt wel vergeleken met een tegel van buiten die wapening bevat. In deze paragraaf wordt de tegel uit de natte kast als referentie beschouwd. In eerste instantie wordt het verloop van het kleurverschil tussen de tegels uit de kruipzaal en de tegels uit de natte kast bepaald (Figuur 3-28). Vervolgens wordt het verloop van het kleurverschil tussen de tegels uit de ratte a'b\*-waarde en de start en –eind  $\Delta$ E-waarde voor deze tegels wordt weergegeven waarbij telkens ook het verschil tussen deze start- en eindwaarde bepaald.

Uit Figuur 3-28 valt af te leiden dat voor SCC geen kleurverschil op te merken is tussen de tegel uit de kruipzaal en de natte kast vermits  $\Delta E < 1$ . Wel opmerkelijk is het grote verschil bij HPC. Het is dus niet aan te raden om HPC-tegels in 2 verschillende klimaatkasten (kruipzaal en natte kast) te bewaren.



Figuur 3-28: Kleurverschil tussen tegels uit natte kast en uit de kruipzaal



Figuur 3-29: Kleurverschil tussen tegels uit de natte kast en de tegels van buiten

De tegels die buiten staan vertonen een veel groter kleurverschil t.o.v. de tegels uit de natte kast in vergelijking met de tegels uit de kruipzaal (behalve HPC). Voor alle betontypes is het mogelijk om een tegel die buiten bewaard wordt op kleur te onderscheiden van een tegel die in de natte kast bewaard wordt omdat  $\Delta$ E hiervoor groter is dan 2 voor alle betontypes. Uit Figuur 3-29 valt ook op te merken dat een HPC-tegel beter buiten bewaard wordt dan in een kruipzaal als er naar een referentietegel uit de natte kast gestreefd wil worden.

#### 3.4.3 Invloed van de wapening

De invloed van de wapening wordt onderzocht door de resultaten van de tegels met en zonder wapening die buiten bewaard worden te vergelijken (betontype\_24u\_bu\_zw en betontype\_24u\_bu\_mw). Deze resultaten zijn weergegeven in Tabel 3-4. De HPC-tegels worden opnieuw niet in rekening gebracht omdat de tegels die buiten bewaard worden en na 24 uur ontkist worden allebei wapening bevatten.

		beton	type_24u	_bu_zw	betontype_24u_bu_mw					
	SCC	TC2k	ТС	SCC_ro	TC_ro	SCC	TC2k	ТС	SCC_ro	TC_ro
L* <sub>start</sub>	50,9	49,46	51,53	40,10	37,54	53,9	50 <i>,</i> 8	53 <i>,</i> 6	43,8	37,6
$L^*_{einde}$	69,90	64,07	62,51	42,50	43,37	72	64,2	62 <i>,</i> 4	44,7	42,6
$\Delta L^*$	+19	+14,61	+10,98	+2,4	+5,83	+18,1	+13,4	+8,8	+0,9	+5
a* <sub>start</sub>	0,26	0,65	0,78	25,84	24,90	0,29	0,73	0,7	26,13	24,7
$a_{einde}^{*}$	-0,22	-0,02	0,27	25,40	22,57	-0,2	-0,01	0,32	26,2	22,7
∆a*	-0,48	-0,67	-0,51	-0,44	-2,33	-0,49	-0,72	-0,38	+0,07	-2
b* <sub>start</sub>	8,05	10,57	11,28	19,59	20,65	8,7	11,1	10,9	18,6	20,9
$b^*_{einde}$	3,70	4,66	6,68	18,80	16,92	3,8	4,89	7,2	19,2	17,4
Δb*	-4,35	-5,91	-4,6	-0,79	-3,73	-4,9	-6,21	-3,7	+0,5	-3,5
$\Delta E_{start}$	1,78	1,04	1,94	1,81	3,13	1,7	0,93	1,7	2,8	2,46
$\Delta E_{einde}$	0,66	2,20	2,14	3,00	2,98	0,61	1,58	1,38	3,1	2,5
$\Delta E_{verschil}$	-1,12	+1,16	+0,2	+1,19	-0,15	-1,09	+0,65	-0,32	+0,3	+0,04

Tabel 3-4: Evolutie van L\*, a\*, b\* en  $\Delta E$ 

Voor de L\*-waarde zijn het enkel de betontypes SCC en SCC\_rood die een merkbaar verschil hebben. Het is niet met zekerheid te zeggen dat dit te wijten is aan de wapening. De a\* -en b\*waarde ondergaan geen noemenswaardige wijzigen.

Er kan wel vastgesteld worden dat het uiteindelijke gemiddelde kleurverschil  $\Delta E$  opmerkelijk kleiner is bij TC2k en TC voor de tegel met wapening. Maar opnieuw is het met dit proefonderzoek niet mogelijk om te bevestigen dat dit veroorzaakt wordt door de wapening.

Betreffende de afstandhouders kan het volgende gezegd worden: bij niet alle tegels zijn de afstandhouders even zichtbaar. Indien de afstandhouders duidelijk zichtbaar zijn in het begin, dan neemt deze zichtbaarheid wel af in loop van de tijd maar het blijft steeds een storende vlek in het element (zie §3.1.4). Een oplossing is om gebruik te maken van kunststof ringen als afstandhouders i.p.v. de betonnen blokjes die nu als afstandhouders gebruikt zijn. De kunststof ringen zijn soms ook zichtbaar, maar er worden geen kleurvlekken veroorzaakt zoals bij de betonnen blokjes.

#### 3.4.4 Invloed van de betonsamenstelling

In §3.1.1.3 werd verteld dat een hoge water/cement factor leidt tot een lichter kleur dan een lage water/cement-factor. De lichtheid of helderheid van een tegel wordt bepaald door de L\*-waarde. Hoe hoger L\*, hoe helderder de tegel is. In Tabel 3-5 wordt de voor alle betontypes de W/C-factor en de uiteindelijke L\*-waarde van alle tegels gegeven.

	SCC	TC2k	ТС	HPC	SCC_rood	TC_rood
W/C	0,48	0,47	0,47	0,33	0,48	0,47
L* betontype_24u_bu_zw	69,90	64,07	62,51	65 <i>,</i> 37 (mw)	42,50	43,37
L* betontype_72u_bu_zw	70,30	65,09	61,65	60,07	45,70	42,95
L* betontype_24u_nk_mw	75,5	68,1	67,4	63,7 (zw)	51,7	50,9
L* betontype_24u_bu_mw	72	64,2	62,4	63,84	44,7	42,6
L* betontype_24u_kz_mw	75,6	66,4	67,6	66,4	52	52,4

Tabel 3-5: W/C en uiteindelijke L\*-waarde voor alle betontypes

Bovenstaande stelling heeft eigenlijk enkel betrekking op de tegels uit de natte kast en de tegels die pas na 72 uur ontkist worden. Vooral op merkelijk bij de twee tegels die buiten na 24 uur ontkist worden, is de hoge waarde van L\* voor HPC. Voor de tegels uit de kruipzaal kan de stelling eigenlijk ook nog kloppen.

Voor het overige zijn geen specifieke verbanden terug te vinden tussen de betonsamenstelling en de resultaten van de betontypes.

#### 3.4.5 Invloed van het weer

In §3.2 en §3.3 werd vastgesteld dat de tegels die bewaard worden in de klimaatkasten sneller hun definitieve L\*a\*b\* -en  $\Delta$ E-waarde bereiken dan de tegels die buiten bewaard worden. Dit zou het resultaat kunnen zijn van een constante relatieve vochtigheid en temperatuur die heerst in deze klimaatkasten. In Bijlage C worden de weergegevens van Gent en de planning van de opmeting van de tegels weergegeven. Het kan zijn dat de relatieve vochtigheid die er in de eerste dagen na ontkisten heerst, een invloed heeft op het verloop van de L\*a\*b\*-waarde. Dit wordt in onderstaande onderzocht.

In Figuur 3-30 zijn de daggemiddelden van de luchtvochtigheid uitgezet in functie van de tijd.



Datum

Figuur 3-30: Verloop van de luchtvochtigheid

In §3.2 wordt vastgesteld dat tegels die buiten bewaard worden van het betontype SCC sneller hun definitieve L\*a\*b\*-waarde bereiken dan de overige betontypes. Er wordt nu gecontroleerd of er een verband te leggen is met de luchtvochtigheid die in de eerste dagen na ontkisten aanwezig was. Hiervoor wordt Figuur 3-30 uitvergroot naar de betreffende periode na ontkisten. De L\*-waarde van de SCC-tegels die buiten staan, wordt ook uitgezet in deze grafiek in functie van het aantal dagen na ontkisten. Dit is weergegeven in Figuur 3-31.



Figuur 3-31: Luchtvochtigheid en L\*-waarde van de 3 tegels

Er valt dus op te merken dat de L\*-waarde van de tegels SCC\_24u\_bu\_zw en SCC\_24u\_bu\_mw snel stijgen. Dit zou in verband kunnen staan met het feit dat in de periode van dag 2 tot dag 5 een redelijk constante luchtvochtigheid (70-75%) aanwezig is. Ook de temperatuur in die periode is redelijk constant. Dit is natuurlijk relatief, vermits de luchtvochtigheid en temperatuur toch wijzigingen ondergaan gedurende dag en nacht. Tegel SCC\_72u\_bu\_zw wordt niet meer beïnvloed door de pieken van 27 en 28 maart, terwijl SCC\_24u\_bu\_zw en SCC\_24u\_bu\_mw wel nog beïnvloed worden door deze schommelende daggemiddelden. Dit zou een aanleiding kunnen zijn voor de nog steilere helling van de curve van L\* voor SCC\_72u\_bu\_zw in vergelijking met de twee tegels die na 24 uur ontkist worden. Een periode met een constant daggemiddelde voor de luchtvochtigheid en temperatuur geeft aanleiding tot het sneller bereiken van de uiteindelijke kleur van de tegel. Dit is ook het principe van een klimaatkast: constante temperatuur en luchtvochtigheid. De andere betontypes bereiken trager hun definitieve L\*a\*b\*-waarde. Dit zou te wijten kunnen zijn aan de onregelmatige daggemiddelden van de luchtvochtigheid in de eerste dagen na ontkisten.

## 3.5 Conclusie

De belangrijkste conclusie die uit dit hoofdstuk afgeleid kan worden is het belang van de bewaringslocatie. De tegels die in klimaatkasten bewaard worden bereiken sneller hun definitieve L\*a\*b\*-waarde (3 dagen) dan de tegels die buiten bewaard worden (10 dagen). Deze tegels hebben ook een lichtere kleur (grotere L\*-waarde) en een heel kleine ΔE-waarde wat overeenkomt met een mooie egale kleur. Uit bovenstaande volgt dat de luchtvochtigheidsgraad en temperatuur belangrijke parameters zijn. Dit is ook af te leiden uit het resultaat dat de grijze SCC-tegels die buiten bewaard worden ook heel snel hun definitieve L\*a\*b\*-waarde bereiken. Dit is het gevolg van het stabiele weer (constante luchtvochtigheid en temperatuur) die er heerste in de eerste dagen na ontkisten. Deze conclusie kan heel interessant zijn voor de prefab industrie. Een bewaring van slechts enkele dagen in een klimaatkast heeft een gunstige invloed op het uiterlijk van het betonoppervlak. Een proefhal waar er naar gestreefd wordt om een constante luchtvochtigheid en temperatuur te onderhouden, zou reeds een positieve invloed kunnen hebben op het uitzicht van de betonoppervlakken.

De bekistingstijd heeft praktisch geen invloed op de uiteindelijke helderheid van de tegel. Een langere bekistingstijd heeft wel een negatieve invloed op de kleurverschillen bij SCC omdat SCC\_72u\_bu\_zw een grotere  $\Delta$ E heeft na 28 dagen dan SCC\_24u\_bu\_zw en die tegel ondergaat ook een kleinere afname van  $\Delta$ E. Voor TC2k wordt eerder een bekistingstijd van 72 uur aanbevolen, daar deze de meest egale kleur voor de tegel oplevert. Voor TC wordt geopteerd voor een bekistingstijd van 24 uur omdat daar opnieuw de kleinste  $\Delta$ E optreedt na 28 dagen.

De invloed van de wapening is gering: voor de L\*-waarde zijn het enkel de betontypes SCC en SCC\_rood die een merkbaar verschil hebben. De a\* -en b\*-waarde ondergaan geen noemenswaardige wijzigen. Er kan wel vastgesteld worden dat het uiteindelijke gemiddelde kleurverschil  $\Delta E$  opmerkelijk kleiner is bij TC2k en TC voor de tegel met wapening. Bovenstaande vaststelling is wel onder voorbehoud omdat het met dit proefonderzoek onmogelijk te concluderen is dat bovenstaande opmerkingen veroorzaakt worden door de wapening.

## Hoofdstuk 4 Calibratie van het fototoestel

De kleuren in deze thesis worden weergegeven in het L\*a\*b\*-kleurmodel. Het L\*a\*b\*kleurmodel werd in 1976 ontwikkeld door de CIE (Commission International de l'Eclairage) om de kleurweergave te verbeteren. Het is het meest complete kleurmodel dat standaard wordt gebruikt om alle kleuren te beschrijven die zichtbaar zijn voor het menselijk oog. Het is een driedimensionale kleurruimte waarin kleuren die volgens de waarneming even veel van elkaar verschillen ook even ver uit elkaar worden weergegeven. Dit verschil kan uitgedrukt worden in een  $\Delta$ E-waarde die in §4.1 besproken wordt[4]. Een foto kan niet onmiddellijk in L\*a\*b\*kleurwaarden genomen worden. Daarom moet een calibratie van het fototoestel worden uitgevoerd om de RGB-kleurwaarden te kunnen omzetten naar de werkelijke L\*a\*b\*kleurwaarden. Deze omzetting wordt gerealiseerd met een convergentiematrix.

In Figuur 4-1 is een flowchart weergegeven die de opeenvolgende stappen beschrijft tussen het nemen van een foto en het meten van de kleurschakeringen op de foto. Bij iedere tussenstap staat een verwijzing naar de overeenkomstige subtitel van dit hoofdstuk.



Figuur 4-1: Flowchart Hoofdstuk 4

Een fototoestel calibreren is niet evident, omdat tijdens het fotograferen steeds een andere belichting optreedt en dus eigenlijk steeds een andere convergentiematrix nodig is. In deze thesis worden de foto's genomen bij een grijze hemel, zodat de belichtingssterkte overal even groot is. De invloed van de stand van de zon speelt zo geen rol.

#### 4.1 Verschil tussen RGB – en L\*a\*b\*-kleursysteem<sup>[7]</sup>

Door de combinatie van de drie primaire kleuren Rood-Groen-Blauw is het mogelijk om een kleur uit te drukken (RGB-kleursysteem). De hoeveelheid van elke primaire kleur die nodig is om het gewenste kleur te verkrijgen, wordt uitgedrukt in een getal dat meestal bestaat uit 8 bits en kan variëren tussen 0 en 255. Deze 8 bits komen overeen met een reeks cijfertjes (8 cijfertjes) die de waarde 0 of 1 kunnen hebben en waarbij 00000000 het getal 0 voorstelt en 1111111 het getal 255. RAW-bestanden van digitale camera's - zie §4.3.2- bevatten meestal 12-bits kleurwaarden.

Het is nu de bedoeling om deze RGB-kleurwaarden om te zetten in L\*a\*b\*-kleurwaarden, zodoende dat de beoordeling van kleurschakeringen van zichtbeton kan gebeuren op basis van

de  $\Delta E$ -waarde:  $\Delta E = \sqrt{\left(L^* - L_{ref}^*\right)^2 + \left(a^* - a_{ref}^*\right)^2 + \left(b^* - b_{ref}^*\right)^2}$  [CIE: Commission International de l'Eclairage]. Het L\*a\*b\*-kleursysteem werd in 1976 ontwikkeld door de CIE om de kleurweergave te verbeteren. Dit is het meest complete kleursysteem dat standaard wordt gebruikt om alle kleuren te beschrijven die zichtbaar zijn voor het menselijk oog. Elke kleur kan nauwkeurig geïdentificeerd worden a.d.h.v. de specifieke "a\*" -en "b\*"-waarde en de helderheid "L\*". "L\*" geeft de helderheid weer, ze gaat van 0 (zwart) tot +100 (wit). "a\*" gaat van -60 (groen) tot +60 (rood) en "b\*" gaat van -60 (blauw) tot +60 (geel). Dit is weergegeven in Figuur 4-2.



Figuur 4-2: CIELAB kleurmodel [4]

Deze L\*a\*b\*-kleurwaarden volgen uit het XYZ-kleursysteem. Dit kleursysteem wordt nog steeds gebruikt als standaardreferentie voor het definiëren van kleuren die worden waargenomen door het menselijk oog en als referentie voor andere kleurruimten. Net als het RGB-kleurmodel maakt het XYZ-kleurmodel gebruik van 3 spectraal gedefinieerde denkbeeldige primaire kleuren: X, Y en Z die de weergave vormen van kleuren die kunnen worden gecombineerd om alle kleuren te beschrijven die zichtbaar zijn. Voor de omrekening van XYZ naar L\*a\*b\* geldt het volgende<sup>[10]</sup>:

$$L^* = 116 \cdot f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16\tag{1}$$

$$a^* = 500 \cdot \left[ f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right]$$
(2)

$$b^* = 200 \cdot \left[ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right]$$
(3)

Geldig indien

 $f(t) = t^{1/3} als t > 0,008856$ , zoniet geldt  $f(t) = 7,7867 \cdot t + \frac{16}{116}$ 

Het is belangrijk dat de sterretjes vermeld worden bij het L\*a\*b\*-kleursysteem. Een Labkleursysteem zonder sterretjes is de beschrijving van de hunterlab-kleurruimte waarvoor andere omrekenregels van XYZ naar Lab gelden.

De omgekeerde conversie (voor  $\frac{Y}{Y_n} > 0,008856$ ) is:

$$X = X_n \cdot \left(P + \frac{a^*}{500}\right)^3 \tag{4}$$

$$Y = Y_n \cdot P^3 \tag{5}$$

$$Z = Z_n \cdot \left(P - \frac{b^*}{200}\right)^3 \tag{6}$$

Met

$$P = \frac{L^* + 16}{116}$$

Hier zijn  $X_n$ ,  $Y_n$ ,  $Z_n$  de tristimuluswaarden van de referentie wit. Deze waarden zijn afhankelijk van het soort illuminant (= theoretische lichtbron). Voorbeelden van illuminanten zijn b.v. A (licht van een gloeilamp), C (gemiddeld daglicht), D65 (gemiddelde daglicht op de middag) en D50 (gemiddelde daglicht bij zonsopgang).

Daar elke persoon een kleur op een subjectieve manier beoordeeld, is het noodzakelijk om de menselijke waarnemer te standaardiseren als een beschrijving van wat de "gemiddelde" persoon ziet. In 1931 werd de 2° CIE Standaard Waarnemer ontwikkeld en in 1964 de 10° CIE Standaard Waarnemer. De CIE is de *Commission Internationale de l'Eclairage*. Met de 2° en de 10° wordt de grootte van het gezichtsveld weergegeven. De grotere hoek van 10° komt overeen met het nemen van een foto.



Figuur 4-3: 2°-10° waarnemer [11]

De 10° CIE Standaardwaarnemer wordt momenteel aangenomen als best aansluitend bij de gemiddelde beoordeling van menselijke waarnemers. Toch wordt de 2° CIE Standaard Waarnemer nog steeds gebruikt voor meting van objecten die bekeken worden van op een bepaalde afstand. In Tabel 4-1 worden de  $X_n$ ,  $Y_n$ ,  $Z_n$ -waarden weergegeven voor de respectievelijke waarnemers voor verschillende illuminanten.

	CIE 1931 standard observer (2°)			CIE 1964 sta	ndard ol	bserver (10°)
Illuminant	X <sub>n</sub>	Y <sub>n</sub>	Z <sub>n</sub>	X <sub>n</sub>	Y <sub>n</sub>	Z <sub>n</sub>
А	109,85	100	35,585	111,144	100	35,2
С	98,074	100	118,232	97,285	100	116,145
D50	96,422	100	82,521	96,72	100	81,427
D65	95,047	100	108,883	94,811	100	107,304

Tabel 4-1:  $X_n$ ,  $Y_n$  en  $Z_n$  voor standard observer 2° en 10° [12]

## 4.2 Werkwijze

Figuur 4-4 geeft het beeld van een calibratiekaart (geproduceerd volgens de IT 8.7/2 en ISO 12641 standaard). Deze kaart wordt gebruikt om het fototoestel te calibreren. Elk kleurvakje is opgemeten door de fabrikant met een spectrofotometer (2°, D50). Er wordt een foto genomen van deze calibratiekaart om het fototoestel te calibreren. Er wordt een foto genomen in RAW ("Canon Powershot S50") en in JPEG ("Traveler DC-7900") bij een grijze hemel. Het is belangrijk dat de kleurverschillen in een later stadium beoordeeld worden met dezelfde toestellen en dezelfde omstandigheden.



Figuur 4-4: Calibratiekaart (IT 8.7/2 en ISO 12641 standaard) <sup>[13]</sup>

De calibratiekaart bevat 288 "kleurvakken" waarvan de werkelijke XYZ- en L\*a\*b\*-waarden gekend zijn (terug te vinden op www.colour-science.com). Daar een fototoestel kan beschouwd worden als een 10° CIE Standaardwaarnemer bij een illuminant C, moeten deze kleurwaarden van de fabrikant (2°/D50) omgezet worden naar 10°/C. Dit wordt uitgevoerd met de vergelijkingen (1), (2), (3), (4), (5) en (6) uit §4.1, rekening houdend met de gegevens uit Tabel 4-1. Deze herrekende waarden zijn weergegeven in Bijlage H.

## 4.3 JPEG/TIFF/RAW-formaat<sup>[14]</sup>

Bij veel gebruikers van een digitale camera heerst er verwarring wat betreft het verschil tussen RAW, JPEG en TIFF-bestanden.

## 4.3.1 Basisprincipes

De digitale sensor bij de meerderheid van de digitale camera's staat beter bekend als de BAYER PATTERN sensor. Deze heeft betrekking op de verdeling van de rode, groen en blauw-gevoelige zones. Een typische sensor is weergegeven in Figuur 4-5.



Figuur 4-5: BAYER PATTERN sensor

Elke pixel in de sensor komt overeen met rood, groen of blauw licht en er zijn 2 groengevoelige pixels voor elke rode en groene pixel. Dit komt omdat het menselijk oog meer gevoelig is voor groen. De sensor meet de intensiteit van het licht dat erop invalt. De groene pixel meet het groene licht, het rode het rode licht en het blauwe het blauwe licht.

Een digitale afbeelding heeft pixels die rood, groen, blauw kunnen zijn of om het even welk van de miljoenen kleuren die bestaan. Om deze afbeelding te kunnen genereren uit de uitvoergegevens van de sensor is een zeker hoeveelheid signaalverwerking vereist. Deze verwerking wordt '*Bayer interpolation*' genoemd en het berekent welke kleur iedere pixel heeft.

#### 4.3.2 RAW-formaat

Foto's maken in RAW-formaat is heel populier bij de professionele fotografen. RAW biedt meer kwaliteit, flexibiliteit en creativiteit dan bestandsformaten als JPEG en TIFF, maar de verwerking ervan kost veel tijd.

RAW staat voor ruw. En dat is precies waar het hier omdraait. RAW geeft ruwe informatie over de genomen afbeelding. Zoals een negatief in de analoge fotografie een ruwe weergave is van de geschoten foto, is een RAW-bestand als een 'negatief' van een digitale foto. Wanneer je een JPEG opslaat, gebruikt de camera deze ruwe data en voert hier een aantal standaard bewerkingen op uit afhankelijk van de camera instellingen. De ingestelde (of automatisch bepaalde) witbalans wordt doorgevoerd, een bepaalde verscherping wordt uitgevoerd en het bestand wordt van (bijvoorbeeld) 12 bits omgezet naar de 8 bits die een JPEG kan bevatten.

In Figuur 4-6 wordt het verschil tussen een RAW-bestand en een JPEG-bestand schematisch voorgesteld. Wanneer men een foto in het RAW-formaat opslaat, worden al de instellingen wel opgeslagen, maar deze zijn niet definitief. Achteraf kan men met gespecialiseerde software de instellingen nog naar wens aanpassen. Dit alles gebeurt zonder aantasting van het RAW-bestand. Elke keer men de RAW afbeelding bekijkt, worden de opgeslagen instellingen doorgevoerd voordat de foto getoond wordt. Bij JPEG zijn al deze bewerkingen echter al doorgevoerd en de enige manier om ze te wijzigen is door het bronbestand aan te tasten. Hierbij gaat altijd informatie verloren.



Figuur 4-6: Verschillen tussen RAW-formaat en JPEG-formaat
### 4.3.3 Omzetting van RAW naar TIFF of JPEG

Als men een foto in RAW-formaat neemt, dan kan men deze afbeelding later omzetten naar JPEG of TIFF met gespecialiseerde software. Dit proces wordt weergegeven in Figuur 4-7.



Figuur 4-7: Omzetting van RAW naar TIFF of JPEG

Figuur 4-6 is vergelijkbaar met Figuur 4-7, met het verschil dat nu het gehele proces wordt uitvoerd met software i.p.v. de camera. Een voordeel van het RAW-formaat is dat men deze kan omzetten naar een 8 of 16 bits TIFF-formaat. TIFF-bestanden zijn groter dan JPEG-bestanden, maar ze behouden de volledige kwaliteit van de afbeelding. Een JPEG-bestand met een grootte van 1MB komt overeen met een RAW-bestand van 5MB en een TIFF-bestand van 15MB. Men heeft ook speciale software nodig om RAW-bestanden te kunnen openen. In deze thesis zijn de foto's in RAW-formaat genomen en dan omgezet naar verliesloos TIFF-formaat, dit omwille van het feit dat RAW-bestanden niet leesbaar zijn in Matlab. Matlab wordt gebruikt om de RGB-waarden uit te lezen en om te zetten naar de overeenkomstige L\*a\*b\*-waarden. Er wordt hiervoor gebruik gemaakt van het programma *"Stepok's RAW importer"*, dat gratis te downloaden is op het internet [http://www.stepok.net/eng/raw\_importer.htm]. In Tabel 4-2 worden de parameters weergegeven waarmee de foto's genomen zijn (Canon Powershot S50).

Tabel 4-2: Parameters	(Canon Powerhot S50)
-----------------------	----------------------

Belichtingscompensatie	±0
Witbalans	Bewolkt
ISO speed	50
Flits	Uit
File	RAW

#### 4.3.4 JPEG-compressie

De JPEG-compressie wordt uitgevoerd om de bestandsgrootte te verkleinen. De veelheid aan informatie is immers voor de gewone gebruiker niet nodig. Het JPEG algoritme verdeelt de foto in blokken van bijvoorbeeld 8 bij 8 pixels. Dit naargelang de compressiegrootte. Hoe hoger de compressie des te kleiner het bestand, en des te geringer de beeldkwaliteit. Het JPEG algoritme neemt het gemiddelde van de kleuren van al deze pixels. Het bewaart dit gemiddelde als de waarde voor de pixel linksboven in het blok. De kleuren van de andere pixels worden dan weergegeven in relatie tot de eerste pixel. Nu hoeven voor de resterende 63 pixels niet meer zoveel bits gebruikt te worden, omdat het kleurverschil tussen een pixel van een blok en het gemiddelde van dit blok niet zo groot is[15]. In Figuur 4-8 is een opsplitsing weergegeven van een foto in blokken van 8x8 pixels.



Figuur 4-8: Opsplitsing foto in blokken van 8x8 pixels voor JPEG-compressie<sup>[15]</sup>

## 4.4 Convergentiematrix RAW

In eerste instantie wordt m.b.v. Matlab de RGB-waarden van ieder "kleurvak" van de calibratiekaart bepaald. Hiervoor worden volgende commando's gebruikt:

foto1=imread('calibratiekaart.tif'); calibratiekaart=imcrop(foto1); imshow(calibratiekaart); *j=0;i=0;m=1;* while (j<816) while(i<1496) subvierkant=calibratiekaart(j+29:j+39,i+29:i+39,:); rgbkleur=squeeze(mean(mean(subvierkant))); rgbmatrix(m,1,:)=rgbkleur; i=i+68; m=m+1;end j=j+68;i=0; end xlswrite('rgbwaardencalibratiekaart.xlsx',rgbmatr(:,:,1),'Blad1','A1'); xlswrite('rgbwaardencalibratiekaart.xlsx',rgbmatr(:,:,2),'Blad1','B1'); xlswrite('rgbwaardencalibratiekaart.xlsx',rgbmatr(:,:,3),'Blad1','C1');

Met behulp van deze commando's bekomt men 288 RGB-waarden van de respectievelijke "kleurvakken" van de calibratiekaart. In Bijlage I worden de betekenissen van de Matlabcommando's toegelicht.

#### 4.4.1. Calibratiemethoden

De calibratiemethoden zijn gebaseerd op de methode beschreven door Kang en Hardeberg [10]. Er wordt onderscheid gemaakt tussen lineaire polynomische calibratie en niet-lineaire polynomische calibratie. Beide calibraties worden op 2 manieren uitgevoerd: Bij de 1<sup>e</sup> manier worden de RGB-waarden van de foto met een convergentiematrix omgezet naar XYZ-waarden. Deze XYZ-waarden worden dan met behulp van vergelijkingen (1), (2) en (3) uit §4.1 omgezet naar de L\*a\*b\*-waarden (RGB→XYZ→L\*a\*b\*). Bij de 2<sup>e</sup> manier worden de RGB-waarden van de foto met één convergentiematrix rechtstreeks omgezet naar de L\*a\*b\*-waarden (RGB→L\*a\*b\*).

#### 4.4.1.1 Lineaire polynomische calibratie

Het lineaire verband wordt als volgt uitgedrukt:

$$P(R,G,B) = a_1R + a_2G + a_3B$$

• RGB $\rightarrow$ XYZ $\rightarrow$ L\*a\*b\*

$$\begin{pmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_M & G_M & B_M \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_M & Y_M & Z_M \end{pmatrix}$$

Deze XYZ-waarden worden dan m.b.v. vergelijkingen (1), (2) en (3) omgezet naar de overeenkomstige  $L^*a^*b^*$ -waarden.

• RGB→L\*a\*b\*

$$\begin{pmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_M & G_M & B_M \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} L_1 & a_1 & b_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_M & a_M & b_M \end{pmatrix}$$

Waarbij M het aantal punten van de calibratiekaart is (=288).

Om de coëfficiënten  $a_{11}...a_{33}$  van de matrix te vinden, maken we gebruik van de kleinste kwadratenmethode (zie Bijlage J). In Matlab worden hiervoor volgende commando's gebruikt:

```
A=xlsread('rgb.xlsx');

b=xlsread('xyz.xlsx');

r=size(A,1);

A2=[A zeros(r,3) zeros(r,3); zeros(r,3) A zeros(r,3); zeros(r,3) A];

[Q R]=qr(A2);

[m n]=size(A2);

RN=R(1:n,:);

QT=Q';

QNT=QT(1:n,:);

x=inv(RN)*QNT*b(:);
```

In Bijlage I worden deze Matlab-commando's met hun respectievelijke betekenis.

Dit levert volgende convergentiematrices (enkel geldig voor RAW-foto met *"Canon Powershot S50"*):

• RGB $\rightarrow$ XYZ $\rightarrow$ L\*a\*b\*

$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$		/ 0,120004	0,040677	-0,03684
$a_{21}$	a <sub>22</sub>	a <sub>23</sub>	) =	0,125045	0,235348	-0,00892
$a_{31}$	a <sub>32</sub>	a <sub>33</sub> /		\-0,03078	-0,06164	0,217868/

• RGB $\rightarrow$ L\*a\*b\*

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,090992 & 0,415208 & 0,181193 \\ 0,28947 & -0,59116 & 0,482876 \\ 0,013614 & 0,199674 & -0,54828 \end{pmatrix}$$

Indien de L\*a\*b\*-waarden met deze convergentiematrices bepaald worden, dan wordt er een zekere afwijking vastgesteld t.o.v. de exacte L\*a\*b\*-waarden. Dit komt omdat het onmogelijk is voor de convergentiematrices om alle RGB-waarden exact om te zetten naar de overeenkomstige L\*a\*b\*-waarden. De kleinste kwadratenmethode zoekt de best passende curve, maar een afwijking is niet te vermijden. Deze afwijking kan weergeven worden a.d.h.v. de  $\Delta$ E-waarde. In Figuren 4-9 en 4-10 zijn de  $\Delta$ E-waarden weergegeven voor alle 288 "kleurvakken". De volgorde van de metingen verloopt van A1->A22,...,L1->L22, GRIJSSCHAAL 0-> GRIJSSCHAAL23 (zie Figuur 4-4).



Figuur 4-9: Kleurafwijking bij lineair 3x3 RGB->XYZ->L\*a\*b\*



Figuur 4-10: Kleurafwijking bij lineair 3x3 RGB->L\*a\*b\*

### 4.4.1.2 Niet-lineaire polynomische calibratie

De benadering voor niet-lineaire polynomische calibratie komt overeen met deze van de lineaire calibratie, met de uitzondering dat de polynomen niet-lineair zijn. Er wordt gestart met een multipele regressie met 6 polynomische termen.

$$P(R, G, B) = a_1 R + a_2 G + a_3 B + a_4 R G + a_5 G B + a_6 R B$$

Of in matrixvorm:

$$\begin{pmatrix} R_{1} & G_{1} & B_{1} & R_{1}G_{1} & G_{1}B_{1} & R_{1}B_{1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{M} & G_{M} & B_{M} & R_{M}RG_{M} & G_{M}B_{M} & R_{M}B_{M} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} X_{1} & Y_{1} & Z_{1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{M} & Y_{M} & Z_{M} \end{pmatrix}$$

Op analoge manier wordt ook de rechtstreekse omzetting naar L\*a\*b\* bepaald.

De werkwijze om bovenstaande convergentiematrix te bepalen is analoog als bij lineaire calibratie.

Vervolgens worden de polynomen uitgebreid met additionele termen, nl.: 11, 20, 29, 44 en 60. We doen dit om de nauwkeurigheid van de conversie van RGB naar XYZ en L\*a\*b\* te verhogen.

$$P(R, G, B) = a_0 + a_1 R + a_2 G + a_3 B + a_4 R G + a_5 G B + a_6 R B + a_7 R^2 + a_8 G^2 + a_9 B^2 + a_{10} R G B$$

$$P(R, G, B) = a_0 + a_1 R + a_2 G + a_3 B + a_4 R G + a_5 G B + a_6 R B + a_7 R^2 + a_8 G^2 + a_9 B^2 + a_{10} R G B$$
$$+ a_{11} R^3 + a_{12} G^3 + a_{13} B^3 + a_{14} R G^2 + a_{15} R^2 G + a_{16} G B^2 + a_{17} G^2 B + a_{18} R B^2$$
$$+ a_{19} R^2 B$$

$$\begin{split} P(R,G,B) &= a_0 + a_1 R + a_2 G + a_3 B + a_4 R G + a_5 G B + a_6 R B + a_7 R^2 + a_8 G^2 + a_9 B^2 + a_{10} R G B \\ &+ a_{11} R^3 + a_{12} G^3 + a_{13} B^3 + a_{14} R G^2 + a_{15} R^2 G + a_{16} G B^2 + a_{17} G^2 B + a_{18} R B^2 \\ &+ a_{19} R^2 B + a_{20} R^4 + a_{21} G^4 + a_{22} B^4 + a_{23} R G^3 + a_{24} R^3 G + a_{25} G B^3 + a_{26} G^3 B \\ &+ a_{27} R B^3 + a_{28} R^3 B \end{split}$$

$$\begin{split} P(R,G,B) &= a_0 + a_1 R + a_2 G + a_3 B + a_4 R G + a_5 G B + a_6 R B + a_7 R^2 + a_8 G^2 + a_9 B^2 + a_{10} R G B \\ &+ a_{11} R^3 + a_{12} G^3 + a_{13} B^3 + a_{14} R G^2 + a_{15} R^2 G + a_{16} G B^2 + a_{17} G^2 B + a_{18} R B^2 \\ &+ a_{19} R^2 B + a_{20} R^4 + a_{21} G^4 + a_{22} B^4 + a_{23} R G^3 + a_{24} R^3 G + a_{25} G B^3 + a_{26} G^3 B \\ &+ a_{27} R B^3 + a_{28} R^3 B \end{split}$$

$$\begin{split} P(R,G,B) &= a_0 + a_1 R + a_2 G + a_3 B + a_4 R G + a_5 G B + a_6 R B + a_7 R^2 + a_8 G^2 + a_9 B^2 + a_{10} R G B \\ &+ a_{11} R^3 + a_{12} G^3 + a_{13} B^3 + a_{14} R G^2 + a_{15} R^2 G + a_{16} G B^2 + a_{17} G^2 B + a_{18} R B^2 \\ &+ a_{19} R^2 B + a_{20} R^4 + a_{21} G^4 + a_{22} B^4 + a_{23} R G^3 + a_{24} R^3 G + a_{25} G B^3 + a_{26} G^3 B \\ &+ a_{27} R B^3 + a_{28} R^3 B + a_{29} R^2 G B \quad a_{30} R G^2 B \quad + a_{31} R G B^2 + a_{32} R^3 G B \\ &+ a_{33} R G^3 B \quad + a_{34} R G B^3 + a_{35} R^5 + a_{36} G^5 + a_{37} B^5 + a_{38} R G^4 + a_{39} R^4 G \\ &+ a_{40} G B^4 + a_{41} G^4 B + a_{42} R B^4 + a_{43} R^4 B \end{split}$$

Voor 60 termen wordt dit op analoge manier opgesteld.

In Tabel 4-3 wordt de afwijking  $\Delta E$  weergegeven voor een multipele regressie met respectievelijk 6, 11, 20, 29, 44 en 60 polynomische termen. Ook de  $\Delta E$ -waarde voor een multipele regressie met 3 termen is weergegeven.

	RGB->XYZ->L*a*b*			RGB	->L*a*b*	k
Aantal polynomische termen	$\Delta E_{gemiddeld}$	$\Delta E_{max}$	$\Delta E_{min}$	$\Delta E_{gemiddeld}$	$\Delta E_{max}$	$\Delta E_{min}$
3	14,24	34,38	0,67	7,65	25,44	0,36
6	9,22	33	0,37	5,26	15,97	0,33
11	3,10	17,89	0,27	3,88	14,76	0,25
20	2,88	15,74	0,24	3,21	13,79	0,19
29	2,68	13,68	0,12	2,96	13,39	0,17
44	2,42	10,94	0,11	2,65	11,64	0,13
60	2,27	10,15	0,09	2,35	10,71	0,11

Tabel 4-3:  $\Delta E$ -waarden voor verschillend aantal polynomische termen RAW

In Figuren 4-11 en 4-12 is het verloop van de  $\Delta$ E-waarde voor alle 288 "kleurvakken" weergegeven voor een multipele regressie met 60 polynomische termen. Het verloop van de  $\Delta$ E-waarde voor alle andere polynomische termen wordt weergegeven in Bijlage K.



• 60 polynomische termen

Figuur 4-11: Kleurafwijking bij poly 60x3 RGB->XYZ->L\*a\*b\*



Figuur 4-12: Kleurafwijking bij poly 60x3 RGB->L\*a\*b\*

In Figuur 4-11 (Poly 60x3 RGB->XYZ->L\*a\*b\*) treden de grootste afwijkingen op bij donkerrood, donkerblauw, donkergroen en donkergrijs tot zwart. Dit donkergrijs is al veel donkerder dan de kleur van traditionele beton.

In Figuren 4-13, 4-14 en 4-15 wordt het verloop van  $\Delta E_{gemiddeld}$ ,  $\Delta E_{max}$  en  $\Delta E_{min}$  weergegeven i.f.v. het aantal polynomische termen.



Figuur 4-13:  $\Delta E_{gemiddeld}$  i.f.v. het aantal polynomische termen



Figuur 4-14:  $\Delta E_{max}$  i.f.v. het aantal polynomische termen



Figuur 4-15:  $\Delta E_{min}$  i.f.v. het aantal polynomische termen

Uit bovenstaande figuren kan afgeleid worden dat de  $\Delta E$ -waarde niet noemenswaardig meer afneemt vanaf 30 polynomische termen.

Ter vergelijking worden in Tabel 4-4 de  $\Delta$ E-waarden weergegeven voor de opeenvolgende convergentiematrices bij de calibratie van een scanner. Hierbij zijn kleinere  $\Delta$ E-waarden merkbaar.

	RGB->XYZ->L*a*b*			RGB	->L*a*b*	k
Aantal polynomische termen	$\Delta E_{gemiddeld}$	$\Delta E_{max}$	$\Delta E_{min}$	$\Delta E_{gemiddeld}$	$\Delta E_{max}$	$\Delta E_{min}$
3	4,05	21,14	0,39	7,74	35,94	2,06
6	2,68	17,83	0,43	3,97	20,92	0,37
11	1,5	16,05	0,04	1,76	13,85	0,25
14	0,96	4,52	0,08	1,43	6,99	0,06
20	0,85	4,5	0,05	0,72	2,62	0,07

Tabel 4-4: ΔE-waarden voor verschillend aantal polynomische termen voor scanner<sup>[12]</sup>

Er wordt voor de extra nauwkeurigheid verder gewerkt met 60 polynomische termen. Hierdoor is de convergentiematrix een 60x3 matrix die zorgt voor de omzetting van RGB-waarden naar XYZ-waarden. De omzetting van XYZ naar L\*a\*b\*-waarden gebeurt m.b.v. de mathematische vergelijkingen (1), (2) en (3) uit §4.1.

Op de volgende bladzijde is de 60x3 convergentiematrix weergegeven.

In Hoofdstuk 5 zal deze convergentiematrix gebruikt worden om kleurschakeringen in betonoppervlakken te beoordelen. Er zal onderzocht worden of de gebruikte calibratiekaart welke in eerste instantie is opgesteld voor het calibreren van scanners, tot aanvaardbare resultaten kan leiden.

	<u> </u>		
(	98,9997	106,245	80,6614
[	1,8409	1,7517	0,26938
	-1,9032	-1,7646	-2,4836
	-2,1932	-2,3768	-0,1984
	-0,0192	-0,0195	0,00307
	0,00812	0,00076	-0,0057
	-0,0063	-0,0059	-0,0146
	-0.0012	-0.0021	0.00426
	0.02416	0.03017	0.02255
	0.02666	0.03169	0.02122
	0.00018	0.00021	0.00013
	-2E-05	-3E-05	-9E-05
	-3E-05	-5E-05	-0.0001
	-0.0003	-0.0003	-0.0002
	9.6E-05	8 4E-05	-0.0001
	1E-05	7.9E-06	5 5F-05
	0.00026	0.00031	-6F-05
	-0.00020	-0.00031	9.7E-05
	-0,0004 -7E-05	-0,0004 -0F-05	5,7E-05
	-7E-05	- 75-05 3 1 F_04	-7E-06
	-0E-00	3,1E-00 2 7E 07	-/E-00
	2,4E-07	2,/E-U/ 7E 07	4,2E-07
	-/E-U/	-/E-U/	/,1E-00 6 2E 07
	1E-00	1,1E-00	0,2E-07
	1,/E-08	1,2E-07	8,1E-07
	-1E-07	-1E-07	-3E-07
	-1E-06	-1E-06	-3E-08
	2,4E-06	2,5E-06	8,2E-08
	8,5E-07	9,3E-07	1,8E-09
	-1E-08	-2E-08	2,2E-07
	-8E-07	-9E-07	-2E-07
	-9E-07	-1E-06	-7E-07
	9E-08	6,6E-08	-3E-07
	-2E-10	-1E-10	9,7E-10
	1,4E-09	1,7E-09	4E-10
	2,9E-09	3,2E-09	1,7E-09
	-6E-10	-6E-10	-5E-10
	2,6E-09	2,8E-09	5,6E-10
	-1E-09	-1E-09	-6E-10
	-5E-10	-8E-10	-1E-09
	2,7E-10	2,2E-10	2,3E-10
	1,7E-09	1,6E-09	-2E-10
	-5E-09	-5E-09	-5E-10
	-3E-09	-3E-09	-1E-09
	1,9E-10	1,3E-10	-8E-10
	-69,141	-64,358	-1,8068
	-27,951	-29,681	-12,235
	13,9607	11,2222	-20,763
	0,51439	0,49947	0,21322
	0,15866	-1E-04	0,41591
	0,05115	0,14777	0,08579
	-0,0016	-0,0015	-0,0005
	-0,0014	-0,0009	-0,002
	-0,0001	-0,0003	-6E-05
	2,24738	2,2673	-1,3921
	2,65747	2,41003	-0,0893
	0,00053	0,00049	-0,0002
	-0,1755	-0,1617	0,07001
	1,9E-06	1E-06	7,1E-06
	-0,0004	-0,0002	-0,0011
$\langle$	15,749	12,6888	-10,287 /
``			

 $[R \ G \ B \ \dots \ R^3/(R \cdot G \cdot B)] \quad \bullet$ 

 $= [L^* a^* b^*]$ 

## 4.5 Convergentiematrix JPEG

Door de JPEG-compressie die besproken werd in §4.3.4 zou een convergentiematrix voor een JPEG-foto onbetrouwbare resultaten moeten opleveren voor de kleurverschillen  $\Delta E$ . Deze onbetrouwbaarheid wordt verder onderzocht in Hoofdstuk 5. In het kader van dit onderzoek wordt de convergentiematrix voor een JPEG-foto bepaald. Er wordt hierbij analoog te werk gegaan als bij de convergentiematrix voor een RAW-foto. In Tabel 4-5 wordt de nauwkeurigheid van de convergentie weergegeven. De L\*a\*b\*-waarden die met deze convergentiematrices bepaald worden, zullen een zekere afwijking vertonen t.o.v. de exacte L\*a\*b\*-waarden, omdat het onmogelijk is voor de convergentiematrices om alle RGB-waarden exact om te zetten naar de overeenkomstige L\*a\*b\*-waarden. Deze afwijking wordt uitgedrukt a.d.h.v. de  $\Delta E$ -waarde.

	RGB->XYZ->L*a*b*		RGB	->L*a*b*	¢	
Aantal polynomische termen	$\Delta E_{gemiddeld}$	$\Delta E_{max}$	$\Delta E_{min}$	$\Delta E_{gemiddeld}$	$\Delta E_{max}$	$\Delta E_{min}$
3	12,11	36,45	2,3	7,01	25,42	0,41
6	7,91	30,6	0,37	4,1	16,92	0,23
11	2,42	14,04	0,13	3,29	13,52	0,1
20	2,17	17,29	0,09	2,09	8,19	0,1
29	1,89	9,88	0,08	1,76	7,43	0,09
44	1,76	8	0,08	1,36	6,52	0,09
60	1,61	10,15	0,07	1,25	6,84	0,02

Tabel 4-5:  $\Delta E$ -waarden voor verschillend aantal polynomische termen JPEG

In tegenstelling tot de RAW-convergentie wordt bij de JPEG-convergentie de grootste nauwkeurigheid bekomen wanneer er rechtstreeks overgegaan wordt van RGB naar L\*a\*b\* i.p.v. RGB->XYZ->L\*a\*b\*.

Uit Tabel 4-5 volgt dat de calibratie van een JPEG-foto nauwkeuriger kan gebeuren dan van een RAW-foto. Het verschil tussen de beoordeling van kleurschakeringen van een gevelpaneel, waarvan zowel in RAW als JPEG een foto genomen is, wordt verder besproken in Hoofdstuk 5.

## 4.6 Conclusie

Om een fototoestel te calibreren, wordt gebruikt gemaakt van een calibratiekaart, welke in eerste instantie opgesteld is voor het calibreren van scanners. Deze calibratiekaart wordt gebruikt om de digitale camera's (De "*Canon Powershot S50*" voor RAW-foto's en de "*Traveler DC-7900*" voor JPEG) te calibreren. De vraag of deze calibratiekaart tot aanvaardbare resultaten voor de kleurverschillen kan leiden zal verder onderzocht worden in Hoofdstuk 5. Belangrijk dient opgemerkt te worden dat de convergentiematrices niet algemeen toegepast mogen worden op RAW- en JPEG-foto's. De convergentiematrices mogen enkel gebruikt worden voor foto's die genomen zijn met de "*Canon Powershot S50*" (RAW) en de "*Traveler DC-7900*" (JPEG).

Bij het calibreren van de "*Canon Powershot S50*" worden de RGB-kleurwaarden van de foto's eerst omgezet naar de overeenkomstige XYZ-kleurwaarden met behulp van de 60x3 convergentiematrix die in §4.4.1.2 bepaald werd. Deze XYZ-kleurwaarden worden vervolgens omgezet naar de overeenkomstige L\*a\*b\*-kleurwaarden m.b.v. de mathematische vergelijkingen (1), (2) en (3) uit §4.1. Bij het calibreren van de *"Traveler DC-7900"* worden de RGB-kleurwaarden rechtstreeks omgezet naar de overeenkomstige L\*a\*b\*-kleurwaarden m.b.v. een 60x3 convergentiematrix. Bovenstaande werkwijzen worden gehanteerd omdat deze manier van calibreren de grootste nauwkeurigheid oplevert.

De methode van de kleinste kwadraten geeft de best passende curve weer, maar er zal steeds een zekere afwijking zijn tussen de bekomen L\*a\*b\*-waarden en de exacte L\*a\*b\*-waarden. Bij de *"Canon Powershot S50"* is de gemiddelde afwijking gelijk aan 2,27 (RAW), terwijl een gemiddelde afwijking van 1,25 wordt bekomen bij de *"Traveler DC-7900"* (JPEG). Deze kleinere afwijking wordt veroorzaakt door de JPEG-compressie. Bij calibratie van een scanner met dezelfde calibratiekaart kan een gemiddelde afwijking van 0,72 bekomen worden.

Met behulp van deze convergentiematrices wordt in Hoofdstuk 5 onderzoek verricht naar de kleurschakeringen in betonoppervlakken.

# Hoofdstuk 5 Beoordeling van kleurschakeringen

# 5.1 Inleiding

Aan de hand van de convergentiematrices die in Hoofdstuk 4 bepaald zijn, worden in dit hoofdstuk de kleurschakeringen in gevelpanelen bestudeerd. Voor dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van digitale camera's als objectieve aanvulling van het menselijk oog. Het uiteindelijke doel van dit hoofdstuk bestaat erin om grenzen te bepalen voor de toelaatbare kleurverschillen die bepaald zijn met gebruikte digitale camera's. Door de foutmarge die aanwezig is in de convergentiematrix zouden deze grenzen een afwijking kunnen vertonen t.o.v. de richtlijnen die op dit moment in de technische voorschriften voorgeschreven worden. Dit onderzoek is enkel toegepast op RAW-foto's die genomen zijn met de *"Canon Powershot S50"* en JPEG-foto's die genomen zijn met de *"Traveler DC 7900"*, omdat de convergentiematrices enkel zijn opgesteld voor deze toestellen. In dit hoofdstuk worden ook verschillende parameters onderzocht: RAW vs. JPEG, invloed van het aantal opdelingszones, invloed van het aantal polynomische termen waarmee de convergentiematrix bepaald is, de invloed van de referentiewaarde en de invloed van de instellingen van het fototoestel.

Bij de beoordeling van betonoppervlakken wordt al een geruime tijd beroep gedaan op de CIBgrijsschaal. Deze beoordeling wordt geïllustreerd in Figuur 5-1.



Figuur 5-1: Beoordeling van kleurverschillen bij zichtbeton<sup>[16]</sup>

In Bijlage L is er ook een voorbeeld weergegeven van de CIB-grijsschaal.

In de literatuur zijn verschillen bronnen terug te vinden die de toelaatbare kleurafwijkingen beschrijven. De toelaatbare kleurafwijkingen die gehanteerd worden zijn sterk verschillend voor de verschillende referentiedocumenten met eenzelfde basis. Dit vergemakkelijkt de controle en de overeenkomstige opstelling van de rapporten niet. De 'rekenkundige gemiddelde afwijking' en de keuze van een welbepaald referentiedocument vormen een noodzakelijke werkbasis [3]. Tabel 5-1 geeft een globaal beeld van de vastgestelde verschillen tussen de verschillende documenten.

Referentiedocument	Verschil (ΔE) gemeten tussen de verschillende indelingen van de grijsschaal	Berekend gemiddeld verschil (ΔE)	Toegelaten visuele afwijking
CIB-rapport (1973)	Van 4,72 tot 12,04	≈ 8,50	verzorgd beton: 2 à 3 indelingen, of $\Delta E$ van 17 tot 25,5 speciaal beton: 2 indelingen of $\Delta E$ van 17
Aanbevelingen van de FeBe (3º uitgave)	Van 1,79 tot 5,56	≈ 4,51	1 indeling, of $\Delta E$ van 4,51
NBN-norm (1980)	Van 0,27 tot 11,64	≈ 6,43	Beton van de klasse A2: 2 indelingen, of $\Delta E$ van 12,86 Beton van de klasse A1: 1 indeling, of $\Delta E$ van 6,43
PTV 21-601 (2001) [1]	5	5	architectonisch beton: ΔE van 10 industriële elementen: ΔE van 15

Tabel 5-1: Dispersie van de waarden bekomen met de diverse referentiedocumenten<sup>[3]</sup>

Het CIB-rapport nr. 24 werd reeds gebruikt voor de opstelling van verschillende normen en technische aanbevelingen. De technische voorschriften omtrent geprefabriceerde architectonische en industriële elementen zijn vastgelegd in de PTV 21-601 (2001) [1].

Voor deze publicaties dient het oppervlak dat beoordeeld wordt, droog te zijn en in de schaduw gelegen zijn. De beoordeling gebeurt op een afstand van 3m. De toelaatbare kleurafwijking wordt uitgedrukt door een aantal schaalindelingen verschil tussen twee waarden van de CIBgrijsschaal. Deze grijsschaal wordt op het te beoordelen oppervlakte aangebracht en onder bovenstaande voorwaarden beoordeeld. Eén schaalindeling op de grijsschaal waarnaar verwezen wordt in de PTV 21-601 komt overeen met een  $\Delta$ E-waarde van 5. De toelaatbare kleurafwijking van twee (architectonisch beton) of drie (industriële beton) CIB-schaalwaarden komt dus respectievelijk overeen met een  $\Delta$ E-waarde van 10 en 15 [16].

Het uitzicht van ter plaatse gestort beton zal doorgaans minder uniform zijn dan geprefabriceerde elementen, omdat de betonsamenstelling en de wijze van uitvoering verschillen. Voor ter plaatste gestort zichtbeton wordt gebruik gemaakt van het oorspronkelijke CIB-rapport voor zichtbeton, daar er geen recente documenten bestaan. Daarom lijkt het billijk om voor ter plaatste gestort zichtbeton een verschil van minstens 3 CIB-schaalindelingen toe te laten, wat overeenkomt van een  $\Delta$ E-waarde van 15 [16].

Bij de interpretatie van de resultaten ( $\Delta$ E-waarden) die in dit hoofdstuk bekomen worden, wordt rekening gehouden met bovenstaande toelaatbare kleurafwijkingen.

Om een fysische interpretatie van een  $\Delta E$ -waarde te kunnen maken, is in Tabel 5-2 de relatie weergegeven tussen de visuele waarneming en de  $\Delta E$ -waarde. Deze tabel is natuurlijk wel opnieuw voor discussie vatbaar: wat is zichtbaar, wat is heel zichtbaar,...?

ΔΕ	Kleurverschil
Tot 0,2	Onzichtbaar
0,2-0,5	Heel licht
0,5-1,5	Licht
1,5-3	Zichtbaar
3-6	Heel zichtbaar
6-12	Groot
Meer dan 12	Heel groot

Tabel 5-2: Relatie tussen visuele waarneming en  $\Delta E$   $^{[17]}$ 

Afhankelijk van de kleur kan met het blote oog een kleurverschil  $\Delta E > 1$  of 2 waargenomen worden[16].

# 5.2 Digitale camera's

Er wordt gebruik gemaakt van twee digitale camera's: de *"Canon Powershot S50"* om foto's in RAW te nemen en de *"Traveler DC-7900"* om foto's in JPEG te nemen. Het is heel belangrijk dat de foto's steeds met dezelfde instellingen genomen worden. De invloed van bepaalde instellingen wordt ook als parameter beschouwd in §5.4.

## 5.2.1 Canon Powershot S50/Traveler DC-7900

De eigenschappen en de instellingen waarmee de foto's genomen zijn, worden weergegeven in Tabel 5-3. In Figuren 5-2a en 5-2b zijn beide toestellen weergegeven.

	Canon Powershot S50	Traveler DC7900
EIGENSCHAPPEN		
Opname-senor	CCD	CCD
Megapixels	5	7
Digitale zoom	4,1	4
Optische zoom	3	3
INSTELLINGEN		
Flits	Uit	Uit
Zoom	Volledig uitgezoomd	Volledig uitgezoomd
Belichtingscompensatie	±0	±0
Witbalans	Bewolkt	Bewolkt
ISO-waarde	50	64
Formaat	RAW	JPEG

#### Tabel 5-3: Eigenschappen en instellingen van de fototoestellen





Figuur 5-2a: Canon Powershot S50

Figuur 5-2b: Traveler DC7900

# 5.3 Vergelijking van de resultaten tussen spectrofotometer en fototoestel

Met de convergentiematrix die in Hoofdstuk 4 bepaald werd, zal steeds een zekere afwijking optreden. In deze paragraaf zal nagegaan worden wat de afwijking is wanneer de convergentiematrix toegepast wordt op betonoppervlakken. Dit wordt enkel gecontroleerd voor de *"Canon Powershot S50"* (RAW).

## 5.3.1 Vergelijking van de L\*a\*b\*-waarden

Om het verschil tussen de L\*a\*b\*-waarden te onderzoeken wordt een foto (RAW) genomen van een grijze betontegel die weergegeven is in Figuur 5-3. Deze foto is genomen bij een grijze hemel, net zoals bij de foto van de calibratiekaart waarmee het fototoestel gecalibreerd is. De lichtsterkte die overeen met deze grijze hemel is  $\approx$ 2500 lux. Dit is opgemeten met een lichtmeter (*IKOPHOT* Zeiss Ikon). De tegel is anderzijds ook opgemeten met een spectrofotometer (10°, D65).



Figuur 5-3: Betontegel ter vergelijking van de L\*a\*b\*-waarden

Van deze tegel is dus een foto genomen in RAW ( $10^\circ$ , C) en de gemiddelde RGB-waarde van de tegel is met de 60x3 convergentiematrix uit Hoofdstuk 4 omgezet naar de overeenkomstige XYZ-waarden, waarna met de mathematische vergelijkingen (1), (2) en(3) de omzetting naar de L\*a\*b\*-waarden bekomen wordt. De L\*a\*b\*-waarde die bekomen wordt is: (67.97; 0.05; 10.21). Om deze L\*a\*b\*-waarde te kunnen vergelijken, wordt de betontegel ook opgemeten met een

spectrofotometer (10°, D65). De gemiddelde L\*a\*b\*-waarde wordt bekomen door het rekenkundig gemiddelde van de L\*a\*b\*-waarden van 100 metingen die verspreid over de tegel worden uitgevoerd. De L\*a\*b\*-waarde die bekomen wordt is: (66.98; 0.10; 4.24). Om de L\*a\*b\*waarde van het fototoestel en de spectrofotometer te mogen vergelijken, moet er eerst nog een omzetting gebeuren van de L\*a\*b\*-waarde van de spectrometer. Dit omdat de spectrometer een illuminant D65 heeft en een fototoestel een illuminant C. Het verschil tussen deze illuminanten wordt uitgelegd in §4.1 van Hoofdstuk 4. Met behulp de formules (1), (2), (3), (4), (5) en (6) uit §4.1 wordt de L\*a\*b\*-waarde van de spectrofotometer omgezet naar een L\*a\*b\*-waarde van een fototoestel met illuminant C. Dit levert ons de L\*a\*b\*-waarde: (66.98; -2.95; 7.85). Indien deze L\*a\*b\*-waarde nu vergeleken wordt met de L\*a\*b\*-waarde die bekomen wordt met het fototoestel dan wordt een afwijking  $\Delta E=3,94$  bekomen. Deze afwijking valt behoorlijk mee. Een afwijking van 3,94 op de L\*a\*b\*-waarde dient niet te leiden tot een invloed op het beoordelen van kleurverschillen met behulp van een fototoestel. Dit wordt verder besproken in §5.3.2. Deze kleine afwijkingen kunnen wel slechts bekomen worden indien de foto genomen wordt bij grijze hemel. Zonlicht zal namelijk voor een grotere L\*-waarde zorgen (lichtere kleur), terwijl schaduw zorgt voor een lagere L\*-waarde (donkere kleur).

#### 5.3.2 Vergelijking van de ΔE-waarden

Wanneer bijvoorbeeld twee vlekken op een tegel zowel zijn opgemeten met het fototoestel als de spectrofotometer, dan kunnen deze twee toestellen toch hetzelfde kleurverschil  $\Delta E$  opleveren onafhankelijk van de L\*a\*b\*-waarden van respectievelijke toestellen. Dit wordt onderzocht met een betontegel die vlekken vertoont (Figuur 5-4).



Figuur 5-4: Betontegel ter vergelijking van de ΔE-waarden

Voor de betontegel in Figuur 5-4 wordt de L\*a\*b\*-waarde van zone 1 en zone 2 opgemeten respectievelijk met het fototoestel en de spectrofotometer. Voor ieder toestel wordt dan het kleurverschil  $\Delta E$  tussen deze twee zones bepaald. Met de fotospectrometer wordt tussen zone 1 en zone 2 een kleurverschil  $\Delta E = 10,35$  bekomen, terwijl dit kleurverschil voor het fototoestel met de convergentiematrix op  $\Delta E = 10,78$  berekend wordt. Deze resultaten komen goed overeen zodat een beoordeling van kleurverschillen op basis van een foto tot een goede interpretatie kan leiden van deze kleurverschillen.

#### 5.4 Basiswerkwijze

Bij het beoordelen van een gevelpaneel zal het gevelpaneel opgedeeld worden in een aantal zones. In Figuur 5-5 is er bijvoorbeeld gekozen voor een opdeling in 25 zones.

New York	the second	the second		
	in Son			
			dad sales	

Figuur 5-5: Opdeling van het gevelpaneel in 25 zones

Er wordt telkens gekozen om bij deze opdeling evenveel rijen als kolommen te gebruiken (vandaar de rechthoekvormen in Figuur 5-5). In §5.5.2 wordt de invloed van het aantal zones op het resultaat onderzocht.

Om de L\*a\*b\*-waarden van de verschillende zones uit te lezen wordt in Matlab een programma geschreven. Met dit programma wordt de gemiddelde RGB-waarde van elke zone bepaald. Die RGB-waarde wordt dan m.b.v. convergentiematrix (uit Hoofdstuk 4) omgezet naar de overeenkomstige L\*a\*b\*-waarde. Met deze L\*a\*b\*-waarden kan het kleurverschil  $\Delta E = \sqrt{(L^* - L_{ref}^*)^2 + (a^* - a_{ref}^*)^2 + (b^* - b_{ref}^*)^2}$  bepaald worden. Voor een RAW-foto wordt de

convergentiematrix RGB->XYZ->L\*a\*b\* gebruikt terwijl voor een JPEG-foto de convergentiematrix RGB->L\*a\*b\* de voorkeur geniet. Deze matrices worden gebruikt, omdat ze de grootste nauwkeurigheid hebben (zie Hoofdstuk 4). In Matlab worden hiervoor volgende commando's ingegeven:

```
function labwaardenbepalenraw(f)
[a b c]=size(f);
j=0;i=0;m=1;
r = (floor(a/5));
s = (floor(b/5));
while(j<(r*5))</pre>
while(i<(s*5))</pre>
subvakje=f(j+1:j+r,i+1:i+s,:);
rgbkleur=squeeze(mean(mean(subvakje)));
rgbmatrix(m,1,:)=rgbkleur;
i=i+s;
m = m + 1;
end
j=j+r;
i=0;
end
xlswrite('rgbwaarden60.xlsx',rgbmatrix(:,:,1),'Blad1','B1');
xlswrite('rgbwaarden60.xlsx',rgbmatrix(:,:,2),'Blad1','C1');
xlswrite('rgbwaarden60.xlsx',rgbmatrix(:,:,3),'Blad1','D1');
rgbwaarden60=xlsread('rgbwaarden60.xlsx');
convergentiematrix60=xlsread('convergentiematrix60.xlsx');
xyzwaarden=rgbwaarden60*convergentiematrix60;
xlswrite('omzetting_xyz_naar_lab.xlsx',xyzwaarden,'Blad1','A2');
```

Een belangrijke vraag bij het beoordelen van kleurverschillen is ten opzichte van welk vlak (referentiekleur) het kleurverschil bepaald wordt? Hier zijn verschillende mogelijke oplossingen voor: gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van het volledige paneel (=  $L^*a^*b^*_{gemiddeld}$ ), kleinste L\*a\*b\*-waarde van het volledige paneel (=  $L^*a^*b^*_{min}$ ), grootste L\*a\*b\*-waarde van het volledige paneel (=  $L^*a^*b^*_{max}$ ), tussenliggende gemiddelde L\*a\*b\*-waarde:  $L^*a^*b^*_1$  of  $L^*a^*b^*_2$  (zie vergelijkingen (7) en (8)), gekozen referentievlak (in foto of in situ), referentietegel. Deze parameter wordt ook verder in dit hoofdstuk onderzocht. In onderstaande vergelijkingen wordt de bepaling van  $L^*a^*b^*_1$  en  $L^*a^*b^*_2$  weergegeven.

$$L^*a^*b_1^* = \frac{L^*a^*b_{min}^* + L^*a^*b_{gemiddeld}^*}{2}$$
(7)

$$L^*a^*b_2^* = \frac{L^*a^*b_{gemiddeld}^*L^*a^*b_{max}^*}{2}$$
(8)

## 5.5 Parameterstudie

#### 5.5.1 RAW vs. JPEG

In deze paragraaf wordt onderzocht wat de invloed van het bestandsformaat (RAW of JPEG) is op de gemiddelde  $\Delta$ E-waarde van het gevelpaneel. Hierbij wordt de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van het paneel als referentiewaarde genomen. Er wordt gewerkt met de convergentiematrix die gebruik maakt van 60 polynomische termen (zie Hoofdstuk 4). Er wordt gekozen voor een opdeling in 400 zones. Het onderzoek wordt uitgevoerd op verschillende gevelpanelen om zo een goede beoordeling te kunnen maken van deze parameter.

> In Figuur 5-6 wordt een prefab gevelpaneel weergegeven van een industriegebouw te Evergem (Zeeschipstraat 119). In Tabel 5-4 worden de gemiddelde en maximale  $\Delta$ E-waarde weergegeven.



Figuur 5-6: Gevelpaneel prefab (Evergem)

	$\Delta E_{gemiddeld}$	$\Delta E_{\text{max}}$
RAW	2,62	6,46
JPEG	1,78	3,97

Tabel 5-4:  $\Delta E_{gemiddeld}$  en  $\Delta E_{max}$  voor RAW en JPEG

Uit Tabel 5-4 volgt dat de gemiddelde en maximale  $\Delta$ E-waarde bij de JPEG-foto opmerkelijk kleiner zijn dan de RAW-foto. Dit zou mogelijk veroorzaakt kunnen zijn door de JPEG-compressie (zie §4.3.4 uit Hoofdstuk 4). Bovenstaande resultaten zijn echter onvoldoende afwijkend om nu al te mogen aannemen dat kleurverschillen niet a.d.h.v. JPEG-foto's beoordeeld mogen worden.

In Figuur 5-7 wordt een prefab gevelpaneel weergegeven van een industriegebouw te Lichtervelde (Mortelputstraat).



Figuur 5-7: Gevelpaneel prefab (Lichtervelde)

Bij dit paneel is een opdeling in 400 zones zeker aangewezen, daar de zones met een lichtere kleur een geringe oppervlakte hebben. In Tabel 5-5 wordt opnieuw de gemiddelde en maximale  $\Delta$ E-waarde weergegeven.

Tabel 5-5:  $\Delta E_{gemiddeld}$  en  $\Delta E_{max}$  voor RAW en JPEG

	$\Delta E_{\text{gemiddeld}}$	$\Delta E_{\text{max}}$
RAW	3,88	17,31
JPEG	2,79	14,33

Opnieuw blijkt dat de JPEG-foto opmerkelijk lagere  $\Delta$ E-waarden geeft. Indien de foto met een kritisch oog bekeken wordt, zou toch kunnen vastgesteld worden dat de  $\Delta$ E<sub>max</sub>-waarde toch hoger moet zijn dan 14,33. Om toch zekerheid te verwerven betreffende het verkeerd

beoordelen van kleurfoto's a.d.h.v. JPEG-foto's, zal bij het onderzoeken van de invloed van de andere parameters ook het JPEG-resultaat besproken worden.

#### 5.5.2 Invloed van het aantal opdelingszones

Door eenvoudige aanpassing van de programmatiecode in Matlab is het mogelijk om het gevelpaneel op te delen in het gewenste aantal zones. Hieronder wordt onderzocht wat de invloed is van het aantal opdelingszones op de gemiddelde en maximale  $\Delta$ E-waarde. Als referentiewaarde wordt de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van het gevelpaneel gebruikt en er wordt gebruik gemaakt van de 60x3 convergentiematrix. De invloed van de opdeling wordt onderzocht met Figuur 5-6. De gemiddelde en maximale  $\Delta$ E-waarde worden respectievelijk bepaald voor 4, 9, 25, 49, 100 en 400 opdelingszones. Er worden telkens evenveel rijen als kolommen gekozen, maar met eenvoudige aanpassing van het Matlab-programma zijn andere mogelijkheden uitvoerbaar.

	RAW	/	JPEG				
	$\Delta E_{gemiddeld}$	$\Delta E_{max}$	$\Delta E_{gemiddeld}$	$\Delta E_{max}$			
4 zones	1,40	1,61	0,6	0,67			
9 zones	1,91	2,95	0,86	1,21			
25 zones	2,05	4,46	1,05	2,05			
49 zones	2,31	5,57	1,19	2,57			
100 zones	2,45	6,39	1,42	3,09			
400 zones	2,62	6,46	1,78	3,97			

Tabel 5-6:  $\Delta E_{gemiddelde}$  en  $\Delta E_{max}$  voor verschillende aantal zones (RAW en JPEG)

Uit Tabel 5-6 volgt een bevestiging van het vermoeden dat de beoordeling op basis van JPEGfoto's niet representatief is. Bij een indeling in 4 zones wordt bij JPEG slechts een  $\Delta$ E-waarde van 0,6 verkregen, wat niet waarneembaar is voor het menselijk oog. In Figuur 5-6 is toch een licht kleurverschil waarneembaar, zodat een  $\Delta$ E-waarde van 1,4 realistischer lijkt. Uit Tabel 5-6 blijkt ook dat bij een toename van het aantal zones, de  $\Delta$ E-waarde ook toeneemt. Deze opdeling is dus een belangrijke parameter en kan bijvoorbeeld vastgelegd worden via de afstand tot het vlak. Bijvoorbeeld bij een afstand tot het vlak die groter is dan 30m kan een opdeling in 4 zones gekozen worden, terwijl een opdeling in 100 zones meer tot zijn recht komt bij een afstand van 5m tot het vlak. Hoe verder een persoon zich van een vlak bevindt, hoe moeilijker het wordt om een groot aantal opdelingszones met het blote oog te onderscheiden. In Figuur 5-8 is een overzicht gegeven van de verschillende vlakjes bij opdeling in 25 zones.



Figuur 5-8: Overzicht van de vlakjes bij opdeling in 25 zones (JPEG)

Bij de opdeling in 25 zones treedt de maximale  $\Delta E$ -waarde op in het 1° vlakje op de laatste rij. De L\*a\*b\*-waarde van dit vlakje wijkt dus het meest af t.o.v. de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van het volledige paneel. In Figuur 5-8 kan bij nauwkeurig beoordeling opgemerkt worden dat dit vlakje praktisch het donkerste kleur van alle vakjes heeft. Dit veroorzaakt de grote  $\Delta E$ -waarde.

#### 5.5.3 Aantal polynomische termen waarmee convergentiematrix bepaald is

In Hoofdstuk 4 werden opeenvolgende convergentiematrices bepaald met een toenemend aantal polynomische termen ter verhoging van de nauwkeurigheid. Hieronder wordt de invloed van het aantal polynomische termen op de  $\Delta$ E-waarde besproken. Hierbij wordt de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van het paneel als referentiewaarde genomen. Er wordt opnieuw gebruik gemaakt van Figuur 5-6. In Tabellen 5-7 en 5-8 zijn de resultaten weergegeven respectievelijk voor RAW en JPEG.

	4 zo	4 zones		9 zones		25 zones		49 zones		100 zones		400 zones	
Convergentiematrix	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	
	gemid	max	gemid	max	gemid	max	gemid	max	gemid	max	gemid	max	
3x3	0,93	1,27	1,24	2,23	1,27	2,92	1,41	3,22	1,53	3,38	1,67	3,44	
6x3	1,15	1,26	1,57	2,41	1,71	3,74	3,74	7,58	4,70	8,04	5,38	8,31	
11x3	1,41	1,68	1,91	3,00	2,03	4,28	2,29	5,31	2,44	6,06	2,62	6,11	
20x3	1,40	1,68	1,90	3,00	2,02	4,27	2,28	5,30	2,43	6,05	2,60	6,10	
29x3	1,43	1,72	1,93	3,08	2,04	4,32	2,30	5,34	2,45	6,09	2,63	6,14	
44x3	1,42	1,68	1,93	3,07	2,04	4,35	2,31	5,56	2,45	6,37	2,63	6,43	
60x3	1,40	1,68	1,91	3,05	2,05	4,36	2,31	5,57	2,45	6,39	2,62	6,46	

Tabel 5-7:  $\Delta E$ -waarden voor verschillend aantal polynomische termen RAW

Tabel 5-8:  $\Delta E$ -waarden voor verschillend aantal polynomische termen JPEG

	4 zc	ones	9 zones		25 zones		49 zones		100 zones		400 zones	
Convergentiematrix	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE	ΔE
	gemid	max	gemid	max	gemid	max	gemid	max	gemid	max	gemid	max
3x3	0,67	0,70	1,04	1,55	1,30	2,51	1,47	3,18	1,74	3,54	2,22	5,20
6x3	0,64	0,67	0,94	1,35	1,15	2,22	1,31	2,80	1,57	3,30	1,98	4,39
11x3	0,62	0,67	0,91	1,31	1,12	2,16	1,27	2,73	1,52	3,24	1,92	4,22
20x3	0,57	0,59	0,86	1,23	1,06	2,09	1,20	2,65	1,43	2,93	1,81	4,06
29x3	0,59	0,63	0,86	1,22	1,06	2,07	1,20	2,62	1,43	3,03	1,80	3,95
44x3	0,59	0,65	0,86	1,21	1,05	2,07	1,19	2,60	1,42	3,04	1,77	3,92
60x3	0,60	0,66	0,86	1,21	1,05	2,05	1,19	2,57	1,42	3,09	1,78	3,97

Uit bovenstaande tabellen zijn heel wat conclusies af te leiden. Uit Tabel 5-7 kan afgeleid worden dat het niet nodig is om een 60x3 convergentiematrix te gebruiken. Reeds vanaf een 11x3 matrix treedt een stabilisatie van de  $\Delta$ E-waarden op voor RAW. Voor JPEG is dit de 20x3 matrix. Een 11x3 matrix leidt tot eenvoudigere berekeningen die handmatig kunnen uitgevoerd worden. Indien RAW met JPEG vergeleken wordt, valt onmiddellijk op dat bij RAW de  $\Delta$ E-waarden toenemen bij een toenemend aantal polynomische termen, terwijl dit bij JPEG net omgekeerd is. Opmerkelijk is ook dat er bij JPEG een geringer verschil is tussen de 3x3 matrix en de 60x3 matrix in vergelijking met RAW. Dit kan opnieuw een indicatie zijn voor de onbetrouwbaarheid van JPEG.

#### 5.5.4 Invloed van de keuze van de referentiewaarde

In §5.5.1 t.e.m. §5.5.3 is uitgegaan van een referentiewaarde die gelijk is aan de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van het hele paneel. Dit kan evengoed een andere keuze zijn: de maximale, minimale of een gemiddelde tussenliggende waarde. Ook een referentietegel of referentiepaneel behoren tot de mogelijkheden. In hetgeen volgt, is er toch verder gewerkt met de 60x3 convergentiematrix om zo de grootste nauwkeurigheid te hebben. Voor alle opdelingszones (4, 9, 25, 49, 100 en 400) zijn volgende referentiewaarden gebruikt (zie §5.3): de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde (=  $L^*a^*b^*_{gemiddeld}$ ), de minimale L\*a\*b\*-waarde (=  $L^*a^*b^*_{min}$ ), de maximale L\*a\*b\*-waarde (=  $L^*a^*b^*_{max}$ ) en twee tussenliggende gemiddelde L\*a\*b\*-waarden:  $L^*a^*b^*_1$  en  $L^*a^*b^*_2$  (vergelijking (7) en (8) uit §5.4). De invloed van deze parameter wordt uitgevoerd bij de RAW-foto van Figuur 5-6.

	4 zo	nes	9 zones		25 zones		49 zones		100 zones		400 zones	
Referentiematrix	ΔΕ	ΔΕ	ΔE	ΔΕ	ΔE	ΔΕ	ΔE	ΔΕ	ΔΕ	ΔΕ	ΔE	ΔE
	gemid	max	gemid	max	gemid	max	gemid	max	gemid	max	gemid	max
$L^*a^*b^*_{min}$	1,6	2,5	3,1	4,7	4,6	7,3	5,4	8,0	6,4	9,4	6,9	10,3
$L^*a^*b^*_{gemiddeld}$	1,4	1,7	1,9	3,1	2,1	4,4	2,3	5,6	2,5	6,4	2,6	6,5
$L^*a^*b_{max}^*$	1,6	2,5	2,2	4,7	3,2	7,3	2,9	7,9	3,3	9,2	3,8	10,2
$L^*a^*b_1^*$	1,5	1,9	2,3	3,3	3,0	5,1	3,2	5,2	3,7	6,3	4,1	7,1
$L^*a^*b_2^*$	1,5	2,0	1,9	3,8	2,3	5,9	2,3	6,7	2,4	7,7	2,6	8,4

Tabel 5-9:  $\Delta E$ -waarden voor de verschillende referentiewaarden

Uit Tabel 5-9 kan afgeleid worden dat de keuze van de referentiewaarde heel belangrijk is met betrekking tot de resultaten van de  $\Delta$ E-waarden. Door de grote spreiding van de resultaten zou het beter zijn om niet uit te gaan van één van bovenstaande referentiewaarden. Een betere keuze zou zijn om in eerste instantie de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van het te beoordelen paneel te vergelijken met de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van een referentiepaneel. In tweede instantie kunnen dan de vlekken op een paneel afzonderlijk met elkaar vergeleken worden. Deze bovenvermelde procedure zal toegepast worden in §5.6 bij de bepaling van de grenzen van de toelaatbare kleurverschillen.

#### 5.5.5 Invloed van de instellingen van het fototoestel

De instellingen van het fototoestel die in rekening kunnen gebracht worden, zijn de witbalans en de belichtingscompensatie. De invloed van de witbalans wordt niet gecontroleerd, vermits er steeds uitgegaan wordt van een bewolkte lucht. Zo speelt de stand van de zon geen rol van betekenis.

Met de belichtingscompensatie (EV-compensatie) kan de ingestelde belichting van de digitale camera handmatig aangepast worden. De EV-compensatie kan worden aangepast van -1.0EV tot +2.0EV. Bij een RAW-foto is het mogelijk om deze EV-compensatie na het nemen van de foto m.b.v. software aan te passen. In dit puntje wordt onderzocht wat de invloed is van deze belichtingscompensatie op de  $\Delta$ E-waarden. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de calibratie van de *"Canon Powershot S50"* uitgevoerd is op basis van een EV-compensatie van ±0. Voor dit onderzoek wordt opnieuw gebruik gemaakt van Figuur 5-6 (enkel RAW) waarbij alle opdelingszones (4, 9, 25, 49, 100 en 400) onderzocht worden en de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van het paneel optreedt als referentiewaarde. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 5-10.

	4 zo	ones	9 zc	9 zones		25 zones		49 zones		100 zones		400 zones	
EV-compensatie	ΔΕ	ΔΕ	ΔΕ	ΔΕ	ΔΕ	ΔΕ	ΔΕ	ΔΕ	ΔΕ	ΔΕ	ΔΕ	ΔΕ	
	gemid	max	gemid	max	gemid	max	gemid	max	gemid	max	gemid	max	
-1.0EV	1,22	1,54	1,62	2,72	1,71	3,56	1,86	4,28	1,87	5,07	1,90	5,54	
0.0EV	1,38	1,63	1,88	2,98	2,03	4,32	2,21	5,24	2,22	6,19	2,28	6,98	
+1.0EV	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
+2.0EV	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	

Tabel 5-10: Invloed van de EV-compensatie op de  $\Delta$ E-waarden

De foto's met EV-compensatie +1.0 en +2.0 kunnen niet onderzocht worden omdat deze compensatie-waarden een totale overbelichting van de foto veroorzaakten. Uit Tabel 5-10 is af te leiden dat de instelling van de belichtingscombinatie belangrijk is. Foto's dienen dus genomen te worden met dezelfde compensatiewaarde als die van de foto waarmee het fototoestel gecalibreerd is. Indien dit niet in acht wordt genomen dan worden verkeerde  $\Delta$ E-waarden uitgerekend.

# 5.6 Toelaatbare visuele afwijkingen

# 5.6.1 Inleiding

Zoals in §5.5.4 reeds beschouwd werd, zal bij de bepaling van de toelaatbare visuele afwijkingen uitgegaan worden van volgende procedure: in eerste instantie wordt de gemiddelde L\*a\*b\*waarde van het te beoordelen paneel te vergelijken met de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van een referentiepaneel. In tweede instantie worden de vlekken op het paneel afzonderlijk met elkaar vergeleken. Er wordt bij deze opstelling van de klassen enkel gebruik gemaakt van RAW-foto's ("Canon Powershot S50"). Als convergentiematrix tussen de RGB-waarden en de L\*a\*b\*waarden wordt de 60x3 matrix gebruikt en de foto's worden genomen bij een grijze hemel. Om de grenswaarden van  $\Delta E$  op te stellen wordt uitgegaan van enkele prefab praktijkvoorbeelden waarin ontoelaatbare kleurafwijkingen aanwezig zijn.

# 5.6.2 Praktijkvoorbeelden

## 5.6.2.1 Bovengrens $\Delta E$



Industriegebouw (Amersveldestraat 21/A, Kortemark)

Figuur 5-9: Overzichtsfoto industriegebouw (Amerveldestraat 21/A, Kortemark)

Er wordt een keuze gemaakt welk paneel als referentie gebruikt wordt (**A**). Daarna wordt een beoordelingspaneel (**B**) gekozen die veel vlekvorming vertoont.

In Figuren 5-10a en 5-10b zijn respectievelijk het referentiepaneel en het te beoordelen paneel weergegeven.



Figuur 5-10a: Referentiepaneel

Figuur 5-10b: Te beoordelen paneel

In eerste instantie wordt de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van beide panelen (Figuren 5-10a en 5-10b) met elkaar vergeleken:  $\Delta E = 12,9$ . Indien nog andere – op het eerste zicht ontoelaatbare panelen gecontroleerd worden tegenover het referentiepaneel, dan worden volgende  $\Delta E$ waarden bekomen van: 4,8/16,5/5,8/9,5/9,2/4,25. Hieruit blijkt dat de gemiddelde L\*a\*b\*waarde van een paneel vaak tot een onderschatting leidt van de  $\Delta E$ -waarde in vergelijking met de menselijke waarneming. Een paneel kan genoeg lichtere vlekken bevatten om de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde voldoende te verhogen zodat de donkere vlekken gecompenseerd worden. In deze situatie is de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde niet representatief voor de globale beoordeling van het paneel.

In 2<sup>e</sup> instantie de lichte en donkere vlekken van een paneel afzonderlijk met elkaar vergeleken worden. Indien de lichte vlek links onderaan van Figuur 5-10b vergelijkt met de donkere rand rond deze vlek, dan wordt een  $\Delta$ E-waarde van 24,4 verkregen.

#### Spreiding RGB-kleurwaarden

Om een idee te krijgen van het verschil in spreiding van de kleurwaarden van Figuren 5-10a en 5-10b wordt gebruik gemaakt van het programma *"Digital Photo Professional"*. Met dit programma is het mogelijk om de RGB-waarden van een foto uit te zetten in een grafiek. In Figuren 5-11a en 5-11b wordt voor de respectievelijke panelen uit Figuren 5-10a en 5-11b de spreiding van de RGB-waarden weergegeven. Een RGB-waarde (0,0,0) komt overeen met zwart, terwijl een RGB-waarde (255,255,255) wit voorstelt. Bij de onderste 2 figuren is ingezoomd op de figuur die er boven staat zodat de spreiding beter kan waargenomen worden.



Figuur 5-11a: RGB-waarden referentiepaneel (Fig. 5-10a) Figuur 5-11b: RGB-waarden van het te beoordelen paneel (Fig 5-10b)

In Figuren 5-11a en 5-11b stelt de rode, groene en rode lijn (zone) respectievelijk de R-, G- en Bwaarde voor, waarvan de waarde wordt weergegeven op de horizontale as. Het is goed te zien dat de grafiek van de RGB-waarden van het paneel met de vlekken een veel bredere voet en een smalle piek heeft in vergelijking met de grafiek van het referentiepaneel. Het zwaartepunt van de grafiek ligt ook meer naar links. Dit is logisch, daar de vlekken een donkere kleur hebben (RGB-waarde (0,0,0)=> zwart).

Er wordt nu overgegaan naar een paneel die via bovenstaande werkwijze een  $\Delta$ E-waarde heeft van 4,25. In dit paneel zullen de vlekken onderling met elkaar vergeleken worden. Een afbeelding van dit paneel is weergegeven in Figuur 5-12.



Figuur 5-12: Uitzicht paneel

De roestvlekken worden buiten beschouwing gelaten, daar deze sowieso al ontoelaatbaar zijn. Het kleurverschil tussen zone 1 en zone 2 bedraagt  $\Delta E = 13,1$ . Volgens Tabel 5-1 zou deze vlek nog aanvaardbaar moeten zijn (industrieel element PTV 21-601). Ter vergelijking wordt ook de  $\Delta E$ -waarde bepaald tussen zone 1 en zone 3, dit levert een  $\Delta E$  op van 6,3. Maar indien nu het donkerste deeltje van het paneel (zone 4) vergeleken wordt met zone 1, wordt een  $\Delta E$  van 18,23 bekomen wat niet aanvaardbaar is volgens de PTV 21-601. Hier kan opnieuw gediscussieerd worden over wat de oppervlakte van een vlek mag zijn.



Industriegebouw (mortelputstraat, Lichtervelde)

Figuur 5-13: Drie gevelpanelen

In Figuur 5-13 zijn 3 gevelpanelen weergegeven. Het middelste paneel wordt gebruikt als referentiepaneel. Het bovenste paneel lijkt op het eerste zicht onaanvaardbaar qua kleurverschil, terwijl het onderste paneel een kleur heeft die tussen het referentiepaneel en het bovenste paneel ligt. In eerste instantie wordt de  $\Delta$ E-waarde bepaald tussen het referentiepaneel en de overige 2 panelen a.d.h.v. de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van ieder paneel. Tussen het onderste en het referentiepaneel is een  $\Delta E = 4,3$  terug te vinden, terwijl de  $\Delta$ E-waarde tussen het bovenste en het referentiepaneel 9,4 bedraagt. Opnieuw blijkt dat wanneer de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van het volledige paneel als referentiewaarde gebruikt wordt, de  $\Delta$ E-waarde kleiner blijft dan 10. Er wordt opnieuw gekozen om de panelen in verschillende zones op te delen waar vlekvorming verder onderzocht wordt. De locatie van deze zones is weergegeven in Figuur 5-14 waarbij zone 1 optreedt als referentiezone.



Figuur 5-14: Locatie van de beoordeelde zones

#### In Tabel 5-11 wordt de kleurafwijking $\Delta E$ weergegeven van alle zones met zone 1 als referentie.

_	kleurverschil ∆E
zone 2	16,2
zone 3	4,6
zone 4	15,5
zone 5	30,6
zone 6	14
zone 7	5,4
zone 8	6,6
zone 9	16,5

#### Tabel 5-11: Kleurafwijking van alle zones t.o.v. zone 1

Hieruit blijkt nogmaals dat een globale beoordeling van een paneel a.d.h.v. een gemiddelde L\*a\*b\*-waarde niet altijd een goede indicatie is voor de kleurafwijking, daar de afzonderlijke vlekken veel groter zijn. Op zones 3, 7 en 8 na vertonen alle zones van het bovenste paneel grote kleurafwijkingen t.o.v. zone 1. Dit is visueel ook goed te zien op Figuur 5-14. Het onderste paneel is meer aanvaardbaar dan het bovenste, maar het vertoont toch heel zichtbare vlekken.

#### Kantoorgebouw (Ambachtstraat, Nieuwpoort)

Als laatste praktijkvoorbeeld wordt een kantoorgebouw besproken. Dit type gebouw heeft esthetisch hogere eisen dan een industriegebouw. De locatie is in Figuur 5-15 weergegeven.



Figuur 5-15: Kantoorgebouw (Nieuwpoort)

Eerst wordt het kleurverschil in het paneel naast de deur van naderbij bestudeerd. Dit is weergegeven in Figuur 5-16.



Figuur 5-16: Paneel naast de deur

Indien de zone boven en onder de vlek wordt vergeleken met de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van de vlek zelf, dan worden respectievelijke  $\Delta$ E-waarden 14,7 en 15,4 verkregen wat niet aanvaardbaar is volgens PTV 21-601 indien uitgegaan wordt van architectonisch beton (Tabel 5-1).

Vervolgens wordt ook het paneel naast het raam beschouwd waar ook een grote zwarte vlek aanwezig is. Deze vlek (zone 3) wordt vergeleken met zone 1 en zone 2. Dit is weergegeven in Figuur 5-17.


Figuur 5-17: Paneel naast het raam

Het kleurverschil  $\Delta E$  tussen zone 3 en zone 1 en zone 2 is respectievelijk 32,1 en 19,4. Dit is zonder discussie onaanvaardbaar.

Uit al deze praktijk bevindingen kan nu een globaal beeld gevormd worden over welke  $\Delta E$ -waarden aanvaardbaar zijn en welke niet. Dit wordt besproken in §5.6.3.

### 5.6.2.2 Ondergrens $\Delta E$

In §5.6.2.1 zijn de  $\Delta$ E-waarden van de ontoelaatbare vlekken bepaald. Het zou ook interessant kunnen zijn om eens te zoeken naar een ondergrens voor de  $\Delta$ E-waarde. Hiervoor worden opnieuw enkele praktijkvoorbeelden bestudeerd. In Figuur 5-18 is opnieuw het referentiepaneel weergegeven dat reeds in §5.5.1 bespreken werd. Indien het kleurverschil tussen zone 1 en zone 2 berekend wordt, dan wordt een kleurverschil  $\Delta E = 2$ , terwijl tussen zone 1 en zone 3 een kleurverschil  $\Delta E = 4,2$  optreedt.



Figuur 5-18: Prefab gevelpaneel ter bepaling van ondergrens ΔE (Evergem)

Woning (Victor Demeyerlaan, Oostduinkerke/Furnibo)

Omdat het uitzicht van ter plaatse gestort beton doorgaans minder uniform is dan geprefabriceerde elementen zal ook een praktijkvoorbeeld van ter plaatse gestort beton gecontroleerd worden ter bepaling van de ondergrens van  $\Delta E$ . In Figuur 5-19 is een muur weergegeven die ter plaatse gestort is.



Figuur 5-19: Wand in ter plaatse gestort beton

Het kleurverschil tussen zone 1 en zone 2 bedraagt  $\Delta E = 2,9$ , terwijl tussen zone 1 en zone 3 de  $\Delta E = 6,1$ . Ter illustratie wordt ook nog eens het kleurverschil bepaald tussen zone 1 en een centerpen:  $\Delta E = 33,9$ .

Uit deze twee voorbeelden kan een eerste beeld gevormd worden voor de ondergrens van  $\Delta E$ . Wanden en prefab panelen die zones bevatten waartussen het kleurverschil  $\Delta E = 5$  is, zouden zeker aanvaard moeten worden. Voor ter plaatse gestort beton mag dit kleurverschil toch iets groter genomen worden

### 5.6.3 Conclusie: Toelaatbare ΔE-waarden

Uit de praktijkvoorbeelden die in §5.6.2 besproken zijn, is het mogelijk om een richtwaarde voor de grens van toelaatbaarheid van  $\Delta E$  vast te leggen. In het geen volgt wordt geen onderscheid gemaakt tussen architectonisch beton en industriële elementen zoals in de PTV 21-601 (Tabel 5-1). Er zou gestreefd moeten worden naar een maximale  $\Delta E$ -waarde van 10. Hierbij worden de vlekken afzonderlijk met elkaar vergeleken. De controle a.d.h.v de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van ieder paneel leidt tot een grote onderschatting van het kleurverschil, behalve wanneer alle panelen een egale kleur hebben en toch opmerkelijk van kleur verschillen t.o.v. elkaar. Een ondergrens voor  $\Delta E$  mag begroot worden op een waarde van 5.

De procedure om het kleurverschil tussen 2 vlekken te bepalen is vrij eenvoudig. Er wordt gebruikt gemaakt van onderstaand programma in Matlab:

function labwaardenbepalen\_raw\_1waarde(f) u=imcrop(f) rgbkleur=squeeze(mean(mean(u))); xlswrite('rgbwaarden60\_1waarde.xlsx',rgbkleur(1,1),'Blad1','B1'); xlswrite('rgbwaarden60\_1waarde.xlsx',rgbkleur(2,1),'Blad1','C1'); xlswrite('rgbwaarden60\_1waarde.xlsx',rgbkleur(3,1),'Blad1','D1'); rgbwaarden60=xlsread('rgbwaarden60\_1waarde.xlsx'); convergentiematrix60=xlsread('convergentiematrix60.xlsx'); xyzwaarden=rgbwaarden60\*convergentiematrix60; xlswrite('omzetting1waarde.xlsx',xyzwaarden,'Blad1','A2');

Eerst wordt de foto ingelezen in Matlab met het commando: *foto\_paneel= imread('paneel.tif'*). Hierna wordt het programma gestart met het commando: *labwaardenbepalen\_raw\_1waarde (foto\_paneel)*. Wanneer dit programma loopt zal de foto van het paneel geopend worden en kan de vlek met een muisklik geselecteerd worden. Het programma berekent vervolgens de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van de vlek. Voor de tweede vlek wordt opnieuw dezelfde procedure doorlopen. Uiteindelijk kan dan met behulp van formule $\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}$ het kleurverschil tussen de twee vlekken bepaald worden.

Het voorstel om een grenswaarde  $\Delta E = 10$  te hanteren moet wel kritisch benaderd worden en dient zeker niet ter vervanging van bestaande richtlijnen en normen, maar het geeft wel een goede indicatie. Er moet namelijk steeds rekening gehouden worden met het feit dat er een zekere foutmarge zit op de convergentiematrix, waardoor er ook een zekere foutmarge op de  $\Delta$ E-waarde zit. Een heel belangrijk punt is dat de convergentiematrix enkel toepasbaar is voor RAW-foto's van de *"Canon Powershot S50"*. De RAW-foto's die genomen worden met een ander type fototoestel, moeten geconvergeerd worden met een matrix die volgens de procedure in Hoofstuk 4 bepaald wordt voor het betreffende toestel.

# Hoofdstuk 6 Besluiten

In de hoofdstukken 2 tot 5 zijn de resultaten na elk onderzoek samengevat. Hierna wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste besluiten.

### 6.1 Kleurverschillen voor verschillende betonsamenstellingen

Uit het onderzoek waarbij kubussen van verschillende betontypes op kleurwaarde en kleurverschillen onderzocht werden, kan besloten worden dat de a\*-kleurwaarde van grijze betonsoorten praktisch te verwaarlozen is (range: -0,4 tot 0,73). De b\*-waarde met een range van 5,02 tot 9,44 heeft een grotere invloed, maar het is vooral de L\*-waarde met een range van 59,6 tot 75,1 die de meest kritische factor is met betrekking tot het kleurverschil.

SCC (=zelfverdichtend beton) heeft de grootste L\*-waarde (lichtste kleur), terwijl de b\*-waarde van dit betontype het kleinst is. Bij betontypes waarvan het portlandcement gedeeltelijk wordt vervangen door hoogovenslak wordt een praktisch lineair stijgend verband vastgesteld voor de L\*-waarde bij een toenemende hoeveelheid hoogovenslak, terwijl de a\*- en b\*-waarde constant blijven. Dit in tegenstelling tot het betontype waarbij het portlandcement gedeeltelijk wordt vervangen door vliegas. Vanaf 35% vliegas wordt een lineair dalend verband vastgesteld tussen de L\*-waarde en de hoeveelheid vliegas. Dit verband is ook terug te vinden voor de a\*- en b\*-waarde.

De gemiddelde  $\Delta E$ -waarde van SCC is het kleinst. Bij vervanging van de portlandcement door respectievelijk hoogovenslak en vliegas, wordt hetzelfde lineair verband als bij de L\*-waarde vastgesteld voor  $\Delta E_{gemiddeld}$  en  $\Delta E_{max}$ . Hieruit kan besloten worden dat indien de keuze van betonkleur vrij te kiezen is, beter geopteerd wordt voor een lichtere kleur (grotere L\*-waarde) daar deze dus resulteert in kleinere kleurverschillen. Richtcijfers voor deze L\*a\*b\*-waarden zijn terug te vinden in Hoofstuk 2.

### 6.2 Kleurevolutie van jong beton na ontkisten

Klimaatkasten als bewaringslocatie hebben een gunstige invloed op de kleurevolutie van jong beton na ontkisten. De tegels die op deze locatie bewaard worden bereiken sneller hun definitieve L\*a\*b\*-waarde (na 3 dagen) dan de tegels die buiten bewaard worden (na 10 dagen). De tegels uit de klimaatkasten hebben ook een lichtere kleur (grotere L\*-waarde) en een heel kleine  $\Delta$ E-waarde, wat overeenkomt met een mooie egale kleur. De oorzaak van deze gunstige invloed is de constante luchtvochtigheidsgraad en temperatuur die er heerst in de klimaatkasten. Dit wordt enigszins bevestigd door het resultaat dat de grijze SCC-tegels die buiten bewaard worden. Door het stabiele weer (constante luchtvochtigheid en temperatuur) bereiken de grijze SCC-tegels snel hun definitieve L\*a\*b\*-waarde bereikten. Deze conclusie kan heel interessant zijn voor de prefab industrie. Een bewaring van slechts enkele dagen in een klimaatkast heeft een gunstige invloed op het uiterlijk van het betonoppervlak. Een proefhal waarin de relatieve vochtigheid en temperatuur gecontroleerd worden, kan ook al een gunstige invloed op het uiterlijk hebben.

De bekistingstijd heeft praktisch geen invloed op de uiteindelijke helderheid van de tegel. Een langere bekistingstijd heeft wel een negatieve invloed op de kleurverschillen bij SCC omdat SCC\_72u\_bu\_zw een grotere  $\Delta$ E heeft na 28 dagen dan SCC\_24u\_bu\_zw en die tegel ondergaat ook een kleinere afname van  $\Delta$ E. Voor TC2k wordt eerder een bekistingstijd van 72 uur aanbevolen, daar deze de meest egale kleur voor de tegel oplevert. Voor TC wordt geopteerd voor een bekistingstijd van 24 uur omdat daar opnieuw de kleinste  $\Delta$ E optreedt na 28 dagen.

De invloed van de wapening is gering: voor de L\*-waarde zijn het enkel de betontypes SCC en SCC\_rood die een merkbaar verschil ( $\Delta$ L\*=3) hebben. Er kan wel vastgesteld worden dat het uiteindelijke gemiddelde kleurverschil  $\Delta$ E opmerkelijk kleiner is bij TC2k en TC voor de tegel met wapening. Bovenstaande vaststelling is wel onder voorbehoud omdat het met dit proefonderzoek onmogelijk te concluderen is dat bovenstaande opmerkingen veroorzaakt worden door de wapening. Er zijn enkel vlekken opgetreden van de afstandhouders. Het wapeningsnet was niet zichtbaar aan het oppervlak.

### 6.3 Beoordeling van kleurschakeringen

In deze thesis is gebruik gemaakt van 2 digitale camera's: de *"Canon Powershot S50"* voor het nemen van foto's in RAW en de *"Traveler DC-7900"* waarmee JPEG's genomen zijn. Het is heel belangrijk te beseffen dat de bekomen resultaten toestelafhankelijk zijn en niet veralgemeend mogen worden voor RAW en JPEG. Voor beide toestellen wordt telkens gebruik gemaakt van een convergentiematrix om de RGB-kleurwaarden van de foto's die met Matlab uitgelezen worden om te zetten naar L\*a\*b\*-kleurwaarden. Voor JPEG zorgt de convergentiematrix voor een rechtstreekse omzetting van RGB naar L\*a\*b\*, terwijl bij RAW de convergentiematrix gebruikt wordt om de RGB-kleurwaarden omzetten naar hun overeenkomstige XYZ-waarden. Deze XYZwaarden worden dan met mathematische vergelijkingen omgezet naar de L\*a\*b\*-kleurwaarden. Dit verschil in werkwijze is te wijten aan het feit dat er naar gestreefd wordt om met de grootst mogelijke nauwkeurigheid (kleinste  $\Delta E$ ) te werken. Deze convergentiematrices worden namelijk bepaald met de kleinste kwadratenmethode en een zekere afwijking is hier niet uit te sluiten.

Met behulp van deze convergentiematrices werd in Hoofdstuk 5 onderzoek verricht naar de kleurschakeringen in betonoppervlakken. Uit de praktijkvoorbeelden die besproken zijn, is het mogelijk om een richtwaarde voor de grens van toelaatbaarheid van de kleurafwijking  $\Delta E$  vast te leggen. Hierbij is geen onderscheid gemaakt tussen architectonisch beton en industriële elementen zoals in de PTV 21-601 [1]. Er zou gestreefd moeten worden naar een maximale  $\Delta E$ -waarde van 10. Hierbij worden de vlekken ten opzichte van hun achtergrond onderzocht. De controle a.d.h.v de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van ieder paneel leidt tot een grote onderschatting van het kleurverschil. Het voorstel om een grenswaarde  $\Delta E = 10$  te hanteren moet wel verder kritisch getest worden en heeft enkel betrekking op de gehanteerde methodes uit de thesis. Er moet namelijk steeds rekening gehouden worden met het feit dat er een zekere foutmarge zit op de convergentiematrix, waardoor er ook een zekere foutmarge op de  $\Delta E$ -waarde zit. Het voorbeeld dat in thesis werd aangehaald, vertoonde toch slechts een afwijking van 0,43 in vergelijking met de opmeting door een spectrofotometer

De procedure om het kleurverschil tussen 2 vlekken te bepalen is vrij eenvoudig. Er wordt gebruikt gemaakt van een programma in Matlab (§5.6.3). Eerst wordt de foto ingelezen in Matlab, waarna het programma wordt opgestart. Wanneer dit programma loopt zal de foto van het paneel geopend worden en kan de vlek met een muisklik geselecteerd worden. Het programma berekent vervolgens de gemiddelde L\*a\*b\*-waarde van de vlek. Voor de tweede vlek wordt opnieuw dezelfde procedure doorlopen. Uiteindelijk kan dan met behulp van de formule voor  $\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}$  het kleurverschil tussen de twee vlekken bepaald worden.

Het is heel belangrijk op te merken dat een foto steeds een momentopname is. De convergentiematrices zijn opgesteld voor een grijze hemel, maar dan kan de lichtsterkte nog variëren. Echter door deze grijze hemel speelt de stand van de zon geen rol en hebben reflectie en absorptie van zonlicht geen invloed op het resultaat. Elk beton is onderhevig aan carbonatatie en vervuiling, wat een tijdsafhankelijk proces is. Het moment van opname kan ook hier een rol spelen.

De ontwikkelde methodes kunnen helpen in de problematiek omtrent het beoordelen van kleurverschillen en een hulpmiddel zijn om tal van discussies te vermijden.



Bijlage A: ΔE-waarden voor 50% en 70% hoogovenslak

Figuur A-1: Verloop ΔE met 50% hoogovenslak voor 186 metingen (13 kubussen)



Figuur A-2: Verloop ΔE met 70% hoogovenslak voor 179 metingen (12 kubussen)





Figuur B-1: Verloop ΔE met 35% vliegas voor 85 metingen (6 kubussen)



Figuur B-2: Verloop ΔE voor 50% vliegas voor 258 metingen (19 kubussen)

## **Bijlage C: Weergegevens Gent + planning opmeting**

			Tem	o [° C]	Datum	Uur	RV [%]	Temp	o [° C]
Datum	Uur	RV [%]							
			min	max				min	max
17/02/2009	DG	100	1	6	07/04/2009	DG	84	3	10
20/02/2009	DG	80	3	6	08/04/2009	DG	90	1	8
21/02/2009	DG	87	5	6	09/04/2009	DG	88	10	17
23/02/2009	DG	90	3	3	10/04/2009	DG	64	10	20
24/02/2009	DG	95	5	6	11/04/2009	DG	66	8	16
25/02/2009	DG	86	5	9	12/04/2009	DG	81	7	15
26/02/2009	DG	74	5	8	13/04/2009	DG	88	8	17
01/03/2009	DG	76	6	11	14/04/2009	DG	72	11	22
02/03/2009	DG	84	2	8	15/04/2009	DG	81	12	22
03/03/2009	DG	76	4	7	16/04/2009	DG	100	8	15
04/03/2009	DG	89	-1	4	17/04/2009	DG	100	8	12
05/03/2009	DG	68	3	7	18/04/2009	DG	100	9	14
06/03/2009	DG	62	0	7	20/04/2009	DG	100	9	19
07/03/2009	DG	81	7	10	21/04/2009	DG	100	6	19
11/03/2009	DG	66	6	11	22/04/2009	DG	78	4	17
12/03/2009	DG	96	5	10	23/04/2009	DG	64	6	18
13/03/2009	DG	67	6	12	24/04/2009	DG	61	5	19
14/03/2009	DG	94	5	12	25/04/2009	DG	64	8	18
16/03/2009	DG	76	4	13	26/04/2009	DG	79	6	15
17/03/2009	DG	80	0	13	27/04/2009	DG	64	8	15
18/03/2009	DG	71	1	12	28/04/2009	DG	81	5	14
19/03/2009	DG	68	0	13	30/04/2009	DG	71	10	19
20/03/2009	DG	68	-1	11	01/05/2009	DG	70	9	20
23/03/2009	DG	87	5	10	03/05/2009	DG	90	8	14
24/03/2009	DG	100	3	8	04/05/2009	DG	100	9	13
25/03/2009	DG	97	5	8	05/05/2009	DG	100	8	15
26/03/2009	DG	94	3	11	06/05/2009	DG	100	10	17
27/03/2009	DG	72	4	9	07/05/2009	DG	100	7	18
30/03/2009	DG	89	2	12	08/05/2009	DG	93	8	19
31/03/2009	DG	71	3	14	09/05/2009	DG	70	7	17
01/04/2009	DG	72	6	15	10/05/2009	DG	69	8	20
02/04/2009	DG	71	7	15	11/05/2009	DG	70	10	20
03/04/2009	DG	80	8	17	12/05/2009	DG	80	12	16
04/04/2009	DG	88	8	17	13/05/2009	DG	83	11	22
05/04/2009	DG	86	7	16	14/05/2009	DG	88	11	18
06/04/2009	DG	81	8	16	15/05/2009	DG	88	7	14

• Weergegevens Gent (DG= daggemiddelde)

### • Planning opmeting

DATUM	HPC	TC2k	SCC	тс	TC_rood	SCC_rood
16/03/	gegoten					
2009						
17/03/	aag U (1 4 5 2)					
2009	(1,4,5,5)					
2009	$(1 \ 1 \ 5 \ 3)$					
10/02/	$d_2(1/153)$					
2009	en d 0 (2)					
20/03/						
2009	dag 1 (2)					
21/03/						
2009						
22/03/						
2009	$d \in (1 \land 5 ?)$					
23/03/ 2009	en <i>d</i> 4 (2)	gegoten				
24/03/		dag 0				
2009		(1,4,5,3)				
25/03/		dag 1				
2009		(1,4,5,3)				
26/03/		$a \ge (1,4,5,3)$	gegoten			
2005		en a o (2)	daa 0			
2009		dag 1 (2)	(1,4,5,3)			
28/03/						
2009						
29/03/	daa 10 (2)		daa 0 (2)			
2009						
30/03/		$u \in (1,4,5,3)$	$a_3(1,4,5,3)$	gegoten		
2003		en <i>u</i> 4 (2)	en u 1 (2)	daa 0		
2009				(1453)		
01/04/				daa 1		
2009		dag 6 (2)		(1.4.5.3)		
02/04/			d 6 (1,4,5,3)	<i>d 2</i> (1,4,5,3)		
2009			en <i>d</i> 4 (2)	en d 0 (2)		
03/04/		dag 10		dag 1(2)		
2009		(1,4,5,3)		uug 1 (2)		
04/04/						
2009						
2009		dag 10 (2)				
06/04/	dag 20		dag 10	d 6 (1,4,5,3)	gogoton	
2009	(1,4,5,3)		(1,4,5,3)	en <i>d 4</i> (2)	gegoten	
07/04/					dag 0	
2009					(1,4,5,3)	
08/04/	daa 20 (2)		daa 10 (2)		dag 1	
2009					(1,4,5,3)	
09/04/					<i>d 2</i> (1,4,5,3)	

2009					en d 0 (2)	
10/04/ 2009				dag 10 (1,4,5,3) )	dag 1 (2)	
11/04/ 2009						
12/04/ 2009				dag 10 (2)		
13/04/ 2009		dag 20 (1.4.5.3)			d 6 (1,4,5,3) en d 4 (2)	
14/04/	<i>dag 28</i> (1.4.5.3)					gegoten
15/04/	(_) ) ) ) ) ]	dag 20 (2)				dag 0 (1 4 5 3)
16/04/ 2009	dag 28 (2)		dag 20 (1.4.5.3)			dag 1 (1.4.5.3)
17/04/ 2009			(_,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,		dag 10 (1,4,5,3)	dag 0 (2)
18/04/ 2009			dag 20 (2)			
19/04/ 2009					dag 10 (2)	
20/04/ 2009				dag 20 (1,4,5,3)		
21/04/ 2009		dag 28 (1.4.5.3)				<i>d 6</i> (1,4,5,3) en <i>d 4</i> (2)
22/04/ 2009		(_, ,, ,, ,, ,, ,,		dag 20 (2)		
23/04/ 2009		dag 28 (2)				
24/04/ 2009			dag 28 (1.4.5.3)			
25/04/ 2009						dag 10 (1.4.5.3)
26/04/ 2009			dag 28 (2)			(-) -) - ) - )
27/04/ 2009					dag 20 (1,4,5,3)	dag 10 (2)
28/04/ 2009				dag 28 (1,4,5,3)		
29/04/ 2009					dag 20 (2)	
30/04/ 2009				dag 28 (2)		
01/05/ 2009						
02/05/ 2009						
03/05/ 2009						
04/05/ 2009						
05/05/ 2009					dag 28 (1,4,5,3)	dag 20 (1,4,5,3)

06/05/ 2009				
07/05/ 2009			dag 28 (2)	dag 20 (2)
08/05/ 2009				
09/05/ 2009				
10/05/ 2009				
11/05/ 2009				
12/05/ 2009				
13/05/ 2009				dag 28 (1,4,5,3)
14/05/ 2009				
15/05/ 2009				dag 28 (2)

### Bijlage D:Verloop van de L\*, a\*, b\* -en ΔE-waarden van ieder grijs betontype



Figuur D-1: Verloop van de L\*-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (TC2k)



Figuur D-2: Verloop van de a\*-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (TC2k)







Figuur D-4: Verloop van de ΔE-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (TC2k)







Figuur D-6: Verloop van de a\*-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (TC)







Figuur D-8: Verloop van de  $\Delta$ E-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (TC)







Figuur D-10: Verloop van de a\*-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (HPC)



Figuur D-11: Verloop van de b\*-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (HPC)



Figuur D-12: Verloop van de  $\Delta$ E-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (HPC)



Bijlage E: Verloop van de L\*, a\*, b\* -en  $\Delta$ E-waarden van TC\_rood

Figuur E-1: Verloop van de L\*-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (TC\_rood)



Figuur E-2: Verloop van de a\*-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (TC\_rood)



Figuur E-3: Verloop van de b\*-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (TC\_rood)



Figuur E-4: Verloop van de ΔE-waarde voor tegels 1, 2, 3, 4 en 5 (TC\_rood)

### Bijlage F: Start- en eind L\*a\*b\*-waarde en de start en –eind ΔE-waarde van iedere tegel (ontkistingstijd)

		betont	type_24u	_bu_zw		betontype_72u_bu_zw				
	SCC	TC2k	TC	SCC_ro	TC_ro	SCC	TC2k	тс	SCC_ro	TC_ro
L* <sub>start</sub>	50,9	49,46	51,53	40,10	37,54	55,97	42,21	56,68	40,55	38,58
L* <sub>einde</sub>	69,90	64,07	62,51	42,50	43,37	70,30	65,09	61,65	45,70	42,95
ΔL*	+19	+14,61	+10,98	+2,4	+5,83	+14,33	+22,8	+4,97	+5,15	+4,37
a* <sub>start</sub>	0,26	0,65	0,78	25,84	24,90	0,34	0,44	0,33	27,23	24,08
a* <sub>einde</sub>	-0,22	-0,02	0,27	25,40	22,57	0,21	0,00	0,20	26,00	22,43
∆a*	-0,48	-0,67	-0,51	-0,44	-2,33	-0,13	-0,44	-0,13	-1,23	-1,65
b* <sub>start</sub>	8,05	10,57	11,28	19,59	20,65	7,02	7,38	7,50	20,97	19,39
b* <sub>einde</sub>	3,70	4,66	6,68	18,80	16,92	5,96	5,04	6,30	18,00	16,06
∆b*	-4,35	-5,91	-4,6	-0,79	-3,73	-1,06	-2,34	-1,2	-2,97	-3,33
ΔE <sub>start</sub>	1,78	1,04	1,94	1,81	3,13	1,70	2,42	1,41	1,83	2,80
$\Delta E_{einde}$	0,66	2,20	2,14	3,00	2,98	1,13	1,17	1,51	2,25	2,90
$\Delta E_{verschil}$	-1,12	+1,16	+0,2	+1,19	-0,15	-0,57	-1,25	+0,1	+0,42	+0,1

Tabel F-1: Evolutie van L\*, a\*, b\* en  $\Delta E$ 

### Bijlage G: Start- en eind L\*a\*b\*-waarde en de start en –eind ΔE-waarde van iedere tegel (bewaringslocatie)

	beto	betontype_24u_bu_mw				betontype_24u_kz_mw				betontype_24u_nk_zw			
	SCC	TC2k	тс	HPC	SCC	TC2k	тс	HPC	SCC	TC2k	тс	HPC	
L* <sub>start</sub>	53,9	50,8	53,6	68,4	69	62,9	64	65,1	69,6	62,5	61,2	64,3	
L* <sub>einde</sub>	72	64,2	62,4	65,4	75,6	66,4	67,6	66,4	75,5	68,1	67,4	63,7	
ΔL*	+18,1	+13,4	+8,8	-3	+16,6	+3,5	+3,6	+1,3	+5,9	+5,6	+6,2	-0,6	
a* <sub>start</sub>	0,29	0,73	0,7	-0,51	-0,22	0,04	0,03	-0,23	-0,22	0	0,05	-0,17	
$a_{einde}^{*}$	-0,2	-0,01	0,32	-0,29	0,04	0,11	0,01	-0,05	0	0,14	0,17	-0,26	
∆a*	-0,49	-0,72	-0,38	+0,22	-0,26	+0,07	-0,02	+0,18	+0,22	+0,14	+0,12	+0,09	
b* <sub>start</sub>	8,7	11,1	10,9	3,95	4,23	6,75	6,5	7,11	4,15	6,72	6,52	7,2	
$b*_{einde}$	3,8	4,89	7,2	4,16	4,81	6,53	6	7,7	4,7	5,10	4,65	5,08	
∆b*	-4,9	-6,21	-3,7	+0,21	+0,58	-0,22	-0,5	+0,59	+0,55	-1,62	+1,87	-2,12	
ΔE <sub>start</sub>	1,7	0,93	1,7	1,7	0,95	1,05	1,17	0,7	1,17	0,78	1,74	0,66	
ΔE <sub>einde</sub>	0,61	1,58	1,38	0,97	0,45	1,21	1,04	0,66	0,75	0,79	1,37	1,72	
$\Delta E_{verschil}$	-1,09	+0,65	-0,32	-0,73	-0,5	+0,16	-0,13	-0,03	-0,36	+0,01	-0,37	+1,06	

Tabel G-1: Evolutie van L\*, a\*, b\* en  $\Delta E$  voor de grijze betontypes

Tabel G-2: Evolutie van L\*, a\*, b\* en  $\Delta E$  voor de rode betontypes

	betontype_2	4u_bu_mw	betontype_2	24u_kz_mw	betontype_24u_nk_mw		
	SCC_rood	TC_rood	SCC_rood	TC_rood	SCC_rood	TC_rood	
L* <sub>start</sub>	43,8	37,6	47,3	45,2	49,3	44,5	
$L_{einde}^{*}$	44,7	42,6	52	52,4	51,7	50,9	
ΔL*	+0,9	+5	+4,7	+7,2	+2,4	6,4	
a* <sub>start</sub>	26,13	24,7	27,4	22,1	27	23,5	
$a_{einde}^{*}$	26,2	22,7	26,7	20,6	26,4	22,3	
∆a*	+0,07	-2	-0,7	-1,5	-0,6	-1,2	
b* <sub>start</sub>	18,6	20,9	18,1	16,7	17,3	16,9	
$\mathbf{b^*}_{einde}$	19,2	17,4	17,3	20,6	16,6	14	
Δb*	+0,5	-3,5	-0,8	+3,9	-0,7	-2,9	
ΔE <sub>start</sub>	2,8	2,46	1,04	2,32	0,77	2,45	
$\Delta E_{einde}$	3,1	2,5	0,7	2	0,58	1,79	
ΔE <sub>verschil</sub>	+0,3	+0,04	-0,34	-0,32	-0,19	-0,66	

# Bijlage H: omzetting kleurwaarden van 2°/D65 naar 10°/C

	2°/D50						10°/C		
	L*	a*	b*	Х	Y	Z	L*	a*	b*
A1	15,01	17,99	-5,55	2,69	1,91	2,12	15,01	17,54	0,80
A2	18,45	25,73	0,20	4,08	2,62	2,14	18,45	25,21	6,58
A3	21,80	32,19	2,57	5,73	3,46	2,53	21,80	31,61	9,32
A4	24,26	37,12	5,84	7,21	4,18	2,65	24,26	36,50	12,68
A5	34,70	15,43	-0,29	9,88	8,35	6,96	34,70	14,74	9,15
A6	34,52	28,44	1,99	11,51	8,26	6,36	34,52	27,71	11,15
A7	32,55	42,99	3,46	12,38	7,33	5,33	32,55	42,24	12,10
A8	32,30	52,58	6,66	13,68	7,22	4,64	32,30	51,81	14,91
A9	63,57	7,53	0,03	33,21	32,27	26,61	63,57	6,49	14,80
A10	62,81	12,81	1,43	33,79	31,36	25,07	62,81	11,77	15,91
A11	62,69	17,41	1,96	34,98	31,22	24,66	62,69	16,35	16,36
A12	62,42	24,59	2,83	36,78	30,9	23,93	62,42	23,51	17,09
A13	87,72	-3,69	-5,10	67,24	71,49	64,19	87,72	-5,00	14,70
A14	87,99	3,85	-5,67	71,27	72,04	65,27	87,99	2,51	14,24
A15	89,36	0,25	-1,29	72,37	74,93	63,16	89,36	-1,09	18,41
A16	85,43	0,59	-3,30	64,73	66,86	58,36	85,43	-0,71	15,88
A17	86,51	4,71	-3,78	68,69	69,01	60,68	86,51	3,38	15,66
A18	87,07	-3,15	-3,11	66,21	70,15	60,98	87,07	-4,46	16,36
A19	85,44	1,00	-8,29	64,93	66,88	63,42	85,44	-0,30	11,43
A20	23,30	8,44	-0,21	4,34	3,89	3,24	23,30	7,92	7,11
A21	24,48	35,57	14,54	7,15	4,25	1,74	24,48	34,95	20,49
A22	30,03	48,69	29,49	11,64	6,25	1,28	30,03	47,96	34,86
B1	14,95	16,51	-0,02	2,6	1,9	1,57	14,95	16,07	5,73
B2	18,28	19,83	6,51	3,63	2,58	1,5	18,28	19,34	12,17
B3	19,47	25,22	12,48	4,36	2,86	1,19	19,47	24,70	17,72
B4	21,69	33,00	10,59	5,76	3,43	1,66	21,69	32,42	16,45
B5	34,35	16,45	7,49	9,82	8,18	5,15	34,35	15,76	16,03
B6	34,50	25,05	16,08	11,03	8,25	3,69	34,50	24,33	23,72
B7	33,29	40,48	21,97	12,48	7,67	2,58	33,29	39,73	28,75
B8	32,68	53,54	33,03	14,09	7,39	1,36	32,68	52,76	38,51
B9	63,54	7,49	3,77	33,17	32,24	24,47	63,54	6,46	18,13
B10	63,41	13,03	6,57	34,6	32,08	22,84	63,41	11,97	20,61
B11	63,34	17,97	11,58	35,98	32	20,25	63,34	16,91	25,07
B12	63,14	22,92	15,86	37,22	31,76	18,09	63,14	21,84	28 <i>,</i> 85
B13	86,15	-8,05	-7,32	62,29	68,28	63,67	86,15	-9,34	12,43
B14	86,10	10,08	-8,85	70,37	68,19	65,19	86,10	8,74	11,06
B15	90,84	0,22	3,47	75,45	78,14	60,91	90,84	-1,15	22,93
B16	83,10	0,41	-2,97	60,3	62,36	54,19	83,10	-0,86	15,75
B17	85,01	9,07	-1,80	67,72	66,02	56,19	85,01	7,75	17,14
B18	85,01	-9,67	-0,71	59 <i>,</i> 52	66,03	55,16	85,01	-10,93	18,12

B19	81,70	0,41	-12,75	57,77	59,74	61,36	81,70	-0,84	6,76
B20	20,63	20,77	6,37	4,4	3,15	1,89	20,63	20,24	12,48
B21	27,38	43,62	23,90	9,46	5,23	1,36	27,38	42,94	29,38
B22	59,35	26,01	16,30	33,3	27,41	15,13	59,35	24,97	28,53
C1	20,87	5,54	3,82	3,43	3,21	2,2	20,87	5,05	10,25
C2	23,41	8,01	10,94	4,34	3,92	1,91	23,41	7,48	17,08
C3	24,23	12,69	17,36	4,97	4,17	1,45	24,23	12,14	22,96
C4	27,07	17,62	24,00	6,48	5,12	1,31	27,07	17,02	29,41
C5	47,97	12,08	14,95	18,39	16,77	8,94	47,97	11,23	25,21
C6	48,25	19,39	33,66	20,07	16,99	4,73	48,25	18,51	41,96
C7	47,01	28,02	52,76	20,75	16,03	1,8	47,01	27,13	58,78
C8	50,82	36,02	58,70	26,24	19,11	1,86	50,82	35,06	64,79
C9	67,06	6,40	6,23	37,33	36,71	26,51	67,06	5,32	20,98
C10	66,40	9,84	14,37	37,51	35,84	21,48	66,40	8,76	28,12
C11	66,66	13,90	22,63	39,14	36,19	17,78	66,66	12,80	35,54
C12	66,95	19,23	29,99	41,25	36,56	14,89	66,95	18,11	42,16
C13	82,48	-13,65	-10,49	53,48	61,18	60,43	82,48	-14,87	8,93
C14	81,19	17,88	-13,81	64,28	58,81	61,55	81,19	16,58	5,72
C15	89,20	0,23	11,70	72,03	74,59	50,39	89,20	-1,12	29,97
C16	75,82	-0,01	-1,18	47,82	49,6	41,85	75,82	-1,19	16,00
C17	79,49	15,99	1,62	60,31	55,79	44,69	79,49	14,72	19,18
C18	80,62	-14,83	5,54	49,97	57,78	43,08	80,62	-16,02	22,88
C19	75,20	1,64	-19,27	47,44	48,59	56,72	75,20	0,47	-0,26
C20	22,55	13,72	8,49	4,49	3,67	2,01	22,55	13,19	14,73
C21	46,80	36,53	26,66	22,37	15,87	5,61	46,80	35,62	35,45
C22	67,10	14,85	13,13	40,05	36,77	22,74	67,10	13,75	27,15
D1	22,12	0,11	6,08	3,43	3,55	2,19	22,12	-0,38	12,50
D2	24,03	1,40	11,63	4,06	4,11	1,95	24,03	0,88	17,81
D3	25,77	0,09	19,91	4,51	4,67	1,46	25,77	-0,44	25,52
D4	27,90	-0,56	22,18	5,18	5,42	1,58	27,90	-1,12	27,94
D5	53,37	1,80	15,62	21	21,39	11,6	53,37	0,91	26,82
D6	52,44	4,81	34,48	20,79	20,54	6,01	52,44	3,92	43,48
D7	53,03	3,40	55,60	21,02	21,07	2,63	53,03	2,50	62,43
D8	55,97	1,05	62,49	23,26	23,88	2,41	55,97	0,13	69,12
D9	71,89	1,22	6,63	42,35	43,5	31,39	71,89	0,09	22,23
D10	71,58	2,17	17,81	42,21	43,03	24,37	71,58	1,04	32,15
D11	71,25	3,55	26,59	42,2	42,55	19,59	71,25	2,42	39,93
D12	72,07	5,14	33,45	43,94	43,77	17,12	72,07	3,99	46,20
D13	78,82	-18,57	-13,79	45,8	54,61	57,46	78,82	-19,73	5,30
D14	76,64	24,49	-18,24	58,72	50,94	58,14	76,64	23,23	0,93
D15	87,46	0,54	22,20	68,65	70,94	39,29	87,46	-0,79	39,02
D16	69,04	0,26	-0,30	38,07	39,4	32,71	69,04	-0,83	15,52
D17	74,16	20,99	5 <i>,</i> 86	53,02	46,96	34,53	74,16	19,78	21,97
D18	75,70	-20,74	11,17	40,52	49,4	32,72	75,70	-21,85	26,99
D19	67,69	2,98	-25,66	37,11	37,55	50,63	67,69	1,90	-7,36

D20	42,23	28,99	23,94	16,93	12,65	4,61	42,23	28,16	32,18
D21	54,63	16,14	17,33	25,41	22,57	11,75	54,63	15,19	28,58
D22	71,26	10,67	13,03	44,64	42,57	26,77	71,26	9,52	27,83
E1	22,65	-4,27	7,35	3,3	3,7	2,15	22,65	-4,76	13,74
E2	24,92	-6,23	12,67	3,8	4,39	2	24,92	-6,74	18,91
E3	27,49	-13,37	20,92	4,07	5,27	1,63	27,49	-13,88	26,74
E4	29,81	-17,32	24,38	4,51	6,16	1,68	29,81	-17,85	30,26
E5	39,41	-4,79	8,85	9,89	10,9	6,72	39,41	-5,49	18,18
E6	40,18	-13,18	21,13	9,26	11,36	4,48	40,18	-13,86	29,29
E7	41,34	-20,86	36,52	8,94	12,08	2,5	41,34	-21,54	43,23
E8	42,91	-28,48	44,58	8,84	13,1	1,91	42,91	-29,15	50,72
E9	63,30	-3,20	6,79	29,95	31,95	22,63	63,30	-4,20	20,78
E10	63,07	-6,51	14,22	28,82	31,67	18,78	63,07	-7,50	27,37
E11	63,46	-8,50	20,05	28,74	32,14	16,5	63,46	-9,49	32,64
E12	64,80	-11,83	26,58	29,38	33,8	14,78	64,80	-12,83	38,72
E13	71,95	-26,29	-18,48	33,87	43,58	50,78	71,95	-27,34	-0,16
E14	71,38	31,63	-22,93	52,49	42,74	53,95	71,38	30,42	-4,24
E15	85,78	1,78	32,07	65,92	67,54	30,42	85,78	0,48	47,51
E16	60,90	0,17	0,27	28,13	29,13	23,89	60,90	-0,82	14,52
E17	68,32	27,46	11,18	46,08	38,41	24,93	68,32	26,30	25,63
E18	70,19	-26,71	15,16	31,62	41,02	24,51	70,19	-27,73	29,53
E19	61,46	4,08	-30,53	29,77	29,77	45,56	61,46	3,08	-12,86
E20	47,98	41,59	48,22	24,66	16,78	2,47	47,98	40,65	54,90
E21	50,12	30,78	40,00	24,29	18,52	4,18	50,12	29,84	47,97
E22	61,10	26,11	31,60	35,52	29,36	10,73	61,10	25,05	42,51
F1	16,00	-10,41	5,04	1,6	2,1	1,3	16,00	-10,79	10,44
F2	17,83	-12,93	4,59	1,81	2,48	1,6	17,83	-13,32	10,38
F3	17,92	-15,56	7,58	1,72	2,5	1,36	17,92	-15,94	13,06
F4	18,89	-17,00	8,88	1,83	2,72	1,39	18,89	-17,39	14,40
F5	31,00	-12,34	2,16	5,31	6,65	5,06	31,00	-12,91	10,65
F6	30,47	-23,41	8,25	4,27	6,43	3,83	30,47	-23,94	15,99
F7	30,64	-28,82	13,43	3,94	6,5	3,1	30,64	-29,33	20,64
F8	33,73	-32,36	21,38	4,65	7,88	2,75	33,73	-32,90	28,31
F9	63,48	-5,42	0,70	29,57	32,17	26,14	63,48	-6,42	15,38
F10	63,57	-11,14	3,49	28,18	32,27	24,65	63,57	-12,13	17,88
F11	63,66	-16,63	4,18	26,91	32,39	24,36	63,66	-17,60	18,52
F12	64,50	-23,46	6,47	26,12	33,42	23,9	64,50	-24,42	20,72
F13	63,21	-34,01	-22,52	22,41	31,84	41,53	63,21	-34,92	-5,39
F14	66,27	38,68	-27,06	46,92	35,67	49,7	66,27	37,51	-8,87
F15	84,12	2,93	41,70	63,27	64,3	23,15	84,12	1,64	55,80
F16	52,46	-0,22	0,62	19,78	20,56	16,7	52,46	-1,09	13,26
F17	62,48	33,62	12,24	39,68	30,97	19,23	62,48	32,52	25,49
F18	63,24	-33,19	19,37	22,62	31,88	16,63	63,24	-34,11	32,00
F19	52,85	5,53	-36,93	21,31	20,91	38,89	52,85	4,63	-20,17
F20	59,60	14,11	19,07	30,31	27,68	14,21	59,60	13,11	31,05

F21	63,21	22,08	32,97	37,05	31,84	11,47	63,21	21,00	44,12
F22	70,04	14,42	20,45	44,12	40,81	21,58	70,04	13,28	34,22
G1	17,27	-8,13	-3,97	1,91	2,36	2,38	17,27	-8,53	2,64
G2	18,28	-11,99	-3,83	1,93	2,58	2,57	18,28	-12,39	2,95
G3	18,32	-12,88	-5,19	1,9	2,59	2,75	18,32	-13,28	1,74
G4	21,43	-16,17	-4,27	2,36	3,36	3,36	21,43	-16,60	3,14
G5	34,31	-12,86	-4,20	6,55	8,16	7,76	34,31	-13,46	5,59
G6	33,71	-23,21	-3,81	5,38	7,87	7,4	33,71	-23,78	5,83
G7	34,50	-26,72	-4,19	5,37	8,25	7,84	34,50	-27,29	5 <i>,</i> 63
G8	37,54	-29,91	-2,68	6,25	9,83	8,84	37,54	-30,50	7,54
G9	63,38	-6,94	-2,76	29,06	32,05	28,08	63,38	-7,94	12,28
G10	63,76	-13,09	-4,07	27,9	32,51	29,28	63,76	-14,07	11,18
G11	64,76	-19,00	-4,64	27,5	33,75	30,73	64,76	-19,97	10,85
G12	63,71	-26,56	-4,06	24,58	32,45	29,22	63,71	-27,50	11,18
G13	56,88	-37,05	-25,14	16,41	24,8	35,37	56,88	-37,87	-8,90
G14	61,12	45,21	-31,02	41,53	29,38	45,48	61,12	44,09	-13,36
G15	82,05	4,69	51,56	60,19	60,39	16,73	82,05	3,42	64,21
G16	45,04	-0,05	-0,19	14,04	14,57	12,09	45,04	-0,83	11,16
G17	57,63	38,74	16,20	34,83	25,57	14,01	57,63	37,68	28,12
G18	57,41	-37,92	21,68	16,66	25,34	11,9	57,41	-38,74	32,97
G19	46,71	7,29	-40,76	16,5	15,8	34,04	46,71	6,46	-24,73
G20	66,68	8,65	15,73	37,52	36,21	21,04	66,68	7,57	29,39
G21	67,53	17,37	38,61	41,47	37,34	12,08	67,53	16,25	49,96
G22	66,83	22,10	77,99	42,04	36,41	2,81	66,83	20,98	84,97
H1	16,31	-4,67	-9,51	1,88	2,16	2,86	16,31	-5,07	-2,49
H2	17,41	-4,17	-14,76	2,11	2,39	3,91	17,41	-4,59	-6,97
H3	18,05	-5,83	-19,05	2,16	2,53	4,85	18,05	-6,25	-10,67
H4	20,60	-7,81	-19,01	2,6	3,14	5,71	20,60	-8,25	-10,17
H5	34,33	-8,28	-10,41	7,01	8,17	9,47	34,33	-8,90	0,06
H6	32,90	-16,10	-17,61	5,69	7,49	10,92	32,90	-16,68	-6,64
H7	33,94	-17,68	-21,74	5,95	7,98	12,94	33,94	-18,27	-10,13
H8	37,21	-18,98	-26,27	7,18	9,65	16,95	37,21	-19,61	-13,56
H9	63,19	-4,10	-8,02	29,58	31,81	31,15	63,19	-5,10	7,55
H10	64,06	-9,45	-11,59	29,16	32,87	34,55	64,06	-10,45	4,52
H11	64,94	-15,19	-17,24	28,66	33,97	39,76	64,94	-16,18	-0,36
H12	62,60	-23,58	-21,69	24,16	31,11	40,08	62,60	-24,51	-4,77
H13	53,27	-36,96	-26,88	13,81	21,29	32,3	53,27	-37,73	-11,12
H14	55,63	50,43	-34,63	35,75	23,55	40,79	55,63	49,37	-17,60
H15	79,40	7,63	62,14	56,68	55,63	11,06	79,40	6,39	73,16
H16	37,11	-0,47	-0,60	9,2	9,6	8,08	37,11	-1,14	9,32
H17	52,71	43,63	19,46	30,26	20,78	10,01	52,71	42,62	30,12
H18	49,14	-41,87	25,84	10,52	17,71	6,67	49,14	-42,58	35,15
H19	38,97	7,90	-44,84	11,32	10,64	28,07	38,97	7,17	-29,81
H20	69,84	6,42	23,14	41,14	40,52	20,08	69,84	5,31	36,58
H21	66,57	3,98	18,58	35,95	36,06	19,56	66,57	2,91	31,91

H22	70,75	5,62	38,61	42,17	41,82	14,09	70,75	4,50	50,56
11	20,56	2,26	-15,68	3,15	3,13	5,03	20,56	1,79	-7,21
12	21,36	5,16	-24,50	3,54	3,34	7,25	21,36	4,67	-14,93
13	20,71	2,94	-32,12	3,23	3,17	8,96	20,71	2,46	-21,84
14	22,48	4,74	-39,09	3,83	3,65	12,09	22,48	4,24	-27,74
15	38,73	1,20	-10,70	10,28	10,5	11,96	38,73	0,50	0,61
16	39,00	0,09	-19,71	10,29	10,66	15,5	39,00	-0,62	-7,37
17	38,98	-0,15	-26,98	10,25	10,65	18,63	38,98	-0,85	-13,87
18	38,18	-1,64	-34,14	9,62	10,19	21,41	38,18	-2,33	-20,41
19	63,10	-0,50	-9,72	30,44	31,71	32,17	63,10	-1,51	6,01
110	63,67	-0,44	-12,34	31,12	32,4	34,61	63,67	-1,46	3,78
111	64,05	-0,12	-19,08	31,65	32,86	39,99	64,05	-1,15	-2,17
112	63,96	0,15	-24,31	31,62	32,75	43,99	63,96	-0,87	-6 <i>,</i> 85
113	51,18	-35,08	-28,43	12,71	19,42	30,96	51,18	-35,84	-12,90
114	50,31	57,55	-36,82	31,23	18,68	35,62	50,31	56,53	-20,55
I15	76,59	10,16	75,20	52,87	50,85	6,21	76,59	8,94	84,29
116	30,38	-0,88	-0,69	6,08	6,39	5,41	30,38	-1,47	8,00
117	47,35	48,96	22,80	25,76	16,29	6,66	47,35	48,00	32,11
118	44,60	-42,78	28,82	8,04	14,26	4,47	44,60	-43,43	36,96
119	31,28	11,81	-48,37	7,73	6,77	22,6	31,28	11,17	-34,38
120	70,55	-4,51	25,51	38,61	41,53	19,53	70,55	-5,60	38,83
121	51,59	-12,56	34,09	16,71	19,78	5,78	51,59	-13,39	42,97
122	68,33	-20,41	21,58	31,15	38,42	19,58	68,33	-21,42	34,91
J1	13,17	8,85	-15,29	1,88	1,59	2,91	13,17	8,45	-8,23
J2	14,46	14,50	-25,30	2,39	1,81	4,86	14,46	14,07	-16,92
J3	12,54	17,70	-36,43	2,15	1,49	6,48	12,54	17,28	-27,21
J4	13,59	19,25	-45,48	2,44	1,66	9,27	13,59	18,81	-35,09
J5	34,82	4,68	-12,68	8,64	8,41	10,41	34,82	4,02	-1,88
J6	34,92	8,90	-19,94	9,19	8,46	12,9	34,92	8,22	-8,34
J7	34,84	12,67	-28,03	9,61	8,42	15,97	34,84	11,98	-15,57
J8	35,34	16,79	-36,43	10,41	8,67	20,12	35,34	16,08	-22,97
19	63,26	2,47	-9,16	31,43	31,9	31,98	63,26	1,45	6,54
J10	63,58	4,19	-13,30	32,29	32,29	35,17	63,58	3,16	2,91
J11	63,38	6,76	-19,90	32,76	32,04	39,73	63,38	5,72	-3,02
J12	63,50	9,35	-23,78	33,65	32,19	42,93	63,50	8,31	-6,46
J13	48,65	-29,79	-31,47	11,89	17,31	30,12	48,65	-30,52	-16,08
J14	43,33	64,53	-40,45	25,34	13,38	30	43,33	63,58	-25,08
J15	73,60	12,37	86,36	48,84	46,08	3,26	73,60	11,19	93,70
J16	23,54	-0,27	-0,29	3,8	3,96	3,31	23,54	-0,78	7,08
J17	42,19	52 <i>,</i> 45	28,51	21,51	12,62	3,82	42,19	51,55	36,24
J18	40,61	-41,97	31,56	6,36	11,62	2,97	40,61	-42,57	38,67
J19	25,56	14,59	-50,86	5,61	4,6	18,97	25,56	14,02	-37,66
J20	62,19	-25 <i>,</i> 09	9,51	23,41	30,62	20,29	62,19	-26,01	23,00
J21	32,88	-28,54	26,58	4,66	7,48	1,98	32,88	-29,08	32,79
J22	15,33	-12,19	6,03	1,43	1,97	1,14	15,33	-12,56	11,19

K1	19,52	13,25	-12,77	3,55	2,87	4,18	19,52	12,76	-4,80
К2	21,28	25,75	-20,70	5	3,32	6,33	21,28	25,20	-11,55
К3	21,62	32,75	-26,87	5,71	3,41	7,96	21,62	32,17	-16,99
К4	23,87	39,67	-34,04	7,3	4,06	11,2	23,87	39,04	-22,97
K5	38,09	11,53	-11,44	11,3	10,14	11,84	38,09	10,80	-0,17
К6	38,48	21,49	-18,60	12,99	10,36	14,7	38,48	20,73	-6,48
К7	38,48	31,00	-25,54	14,49	10,36	17,59	38,48	30,21	-12,67
K8	38,55	36,73	-31,53	15,5	10,4	20,43	38,55	35,93	-18,01
К9	62,95	5,57	-8,08	31,92	31,53	30,93	62,95	4,55	7,45
K10	63,52	11,77	-12,22	34,38	32,22	34,35	63,52	10,72	3,86
K11	63,03	17,42	-18,68	35,41	31,62	38,36	63,03	16,36	-1,99
K12	62,22	24,21	-24,38	36,4	30,66	41,65	62,22	23,14	-7,23
K13	46,22	-25,83	-33,23	10,98	15,43	28,61	46,22	-26,55	-18,10
K14	38,20	67,55	-40,75	21,07	10,2	24,93	38,20	66,65	-26,30
K15	72,51	13,61	85,69	47,58	44,42	3,09	72,51	12,44	92,89
K16	15,75	0,08	-0,20	1,98	2,05	1,71	15,75	-0,33	5,72
K17	35,83	58,28	30,63	17,24	8,92	2,09	35,83	57,44	36,95
K18	37,86	-38,41	34,32	5,61	10,01	2,07	37,86	-38,99	40,62
K19	17,74	20,45	-53,36	3,52	2,46	14,31	17,74	19,96	-41,35
K20	23,30	-13,39	-1,38	2,93	3,89	3,41	23,30	-13,85	6,07
K21	15,17	-11,22	2,11	1,44	1,94	1,42	15,17	-11,58	7,67
K22	16,21	-8,43	-9,98	1,71	2,14	2,9	16,21	-8,81	-2,93
L1	15,70	15,77	-10,02	2,73	2,04	2,79	15,70	15,32	-3,06
L2	18,10	24,36	-9,05	3,88	2,54	3,22	18,10	23,85	-1,74
L3	20,08	29,92	-11,85	4,92	3,01	4,19	20,08	29,37	-3,87
L4	22,79	34,81	-12,70	6,36	3,74	5,2	22,79	34,21	-4,13
L5	34,88	16,29	-7,76	10,09	8,44	8,98	34,88	15,60	2,53
L6	34,52	29,01	-9,30	11,59	8,26	9,24	34,52	28,27	1,08
L7	33,56	44,06	-12,62	13,2	7,8	9,73	33,56	43,30	-2,06
L8	33,82	53,65	-12,12	14,91	7,92	9,71	33,82	52,85	-1,56
L9	63,04	7,87	-4,59	32,67	31,64	28,84	63,04	6,83	10,58
L10	63,22	13,68	-6,76	34,55	31,85	30,38	63,22	12,62	8,68
L11	62,88	21,08	-10,03	36,31	31,44	32,12	62,88	20,01	5,69
L12	61,53	28,69	-13,36	36,86	29,86	32,79	61,53	27,61	2,48
L13	41,69	-18,30	-36,56	9,43	12,3	25,96	41,69	-18,98	-21,91
L14	37,37	63,74	-35,08	19,56	9,74	21,18	37,37	62,87	-21,40
L15	71,12	14,89	83,44	45,9	42,36	3,07	71,12	13,74	90,63
L16	9,88	1,02	-0,86	1,1	1,11	0,97	9,88	0,69	4,02
L17	33,56	55 <i>,</i> 87	38,61	15,1	7,8	1,06	33,56	55,07	43,66
L18	34,68	-34,14	33,88	4,83	8,34	1,58	34,68	-34,69	39,64
L19	14,46	20,93	-49,03	2,72	1,81	10,8	14,46	20,48	-38,10
L20	14,90	-4,08	-8,15	1,66	1,89	2,39	14,90	-4,46	-1,53
L21	12,22	2,05	-5,41	1,46	1,44	1,63	12,22	1,69	0,42
L22	14,90	12,19	-2,92	2,37	1,89	1,83	14,90	11,76	3,13
GS0	91,72	0,39	-2,34	77,4	80,07	68,6	91,72	-0,99	17,91

GS1	88,64	0,65	-3,09	71,09	73,41	63,75	88,64	-0,69	16,67
GS2	83,79	0,46	-3,29	61,58	63,66	55,6	83,79	-0,82	15,59
GS3	77,26	0,53	-2,48	50,31	51,97	44,9	77,26	-0,66	15,10
GS4	72,64	0,73	-1,71	43,27	44,62	38,07	72,64	-0,41	14,93
GS5	69,26	0,74	-0,95	38,52	39,71	33,41	69,26	-0,36	14,98
GS6	64,35	0,79	-0,82	32,27	33,24	27,92	64,35	-0,24	14,19
GS7	59,38	0,58	0,06	26,6	27,44	22,61	59 <i>,</i> 38	-0,39	14,05
GS8	54,00	0,74	0,18	21,34	21,97	18,05	54,00	-0,16	13,15
GS9	49,95	0,31	0,32	17,78	18,38	15,04	49,95	-0,54	12,53
GS10	47,53	0,16	0,24	15,87	16,43	13,47	47,53	-0,65	12,01
GS11	44,07	0,43	-0,53	13,46	13,89	11,64	44,07	-0,34	10,68
GS12	39,88	-0,15	-1,01	10,76	11,18	9,52	39,88	-0,86	9,47
GS13	35,02	-0,32	-1,06	8,17	8,51	7,28	35,02	-0,97	8,52
GS14	31,21	-0,51	-0,76	6,45	6,74	5,72	31,21	-1,11	8,08
GS15	26,39	-0,33	-0,68	4,68	4,88	4,14	26,39	-0,87	7,27
GS16	23,64	0,04	-0,12	3,85	3,99	3,31	23,64	-0,47	7,25
GS17	20,32	0,35	-0,38	2,98	3,07	2,58	20,32	-0,12	6,40
GS18	16,45	0,40	-0,03	2,13	2,19	1,81	16,45	-0,01	6,00
GS19	13,35	0,75	-0,42	1,59	1,62	1,37	13,35	0,37	5,08
GS20	10,26	1,38	-0,97	1,16	1,16	1,02	10,26	1,04	4,01
GS21	8,99	1,32	-1,22	1	1	0,89	8,99	0,99	3,57
GS22	8,39	1,28	-1,37	0,93	0,93	0,84	8,39	0,97	3,21
GS23	8,22	0,89	-1,30	0,9	0,91	0,82	8,22	0,57	3,17

# Bijlage I: Uitleg commando's Matlab

Commando	Syntax	Engelstalige uitleg
imread	A = imread(filename)	Read image from graphics file
imcrop	I2 = imcrop(I)	Crop (=bijsnijden) image
imshow	imshow(I)	Display image
squeeze	B = squeeze(A)	B = squeeze(A) returns an array B with the same elements as A, but with all singleton dimensions removed. A singleton dimension is any dimension for which size(A,dim) = 1. Two-dimensional arrays are unaffected by squeeze; if A is a row or column vector or a scalar (1-by-1) value, then B = A.
mean	M = mean(A)	Returns the mean values of the elements along different dimensions of an array.
xlswrite	xlswrite(filename, M, sheet, 'range')	Writes matrix M to a rectangular region specified by range in worksheet sheet of the file filename
xlsread	num = xlsread(filename)	Returns numeric data in double array num from the first sheet in the Microsoft Excel spreadsheet file named filename. The filename argument is a string enclosed in single quotes
size	m = size(X,dim)	Returns the size of the dimension of X specified by scalar dim
qr	[Q,R] = qr(A)	<ul> <li>produces an upper triangular matrix R of the same dimension as A and a unitary matrix Q so that A = Q*R.</li> <li>For sparse matrices, Q is often nearly full. If [m n] = size(A), then Q is m-by-m and R is m-by-n</li> </ul>
inv	Y = inv(X)	Returns the inverse of the square matrix X. A warning message is printed if X is badly scaled or nearly singular

### Bijlage J: kleinste kwadratenmethode<sup>[12]</sup>

A preferable notation in books [17] of least squares data-fitting problem is:

$$A x \approx b$$

In our case, Equation 3.4, presented in A.2, must be rewritten to conform with A.1, which is done in A.3.

The Least squares solution to Equation A.3 is solved with QR Factorization [17]. This is a factorization of a  $m \times n$  matrix **A** into a  $m \times n$  matrix **Q**, with property  $\mathbf{Q}^T \mathbf{Q} = \mathbf{I}$  (**Q** is orthonormal), and a  $n \times n$  upper triangular matrix **R**, i.e.  $\mathbf{A} = \mathbf{QR}$ . The matrices **Q** and **R** are calculated through a number of Householder Transformations [11]. The least squares solution to Equation A.1 is a minimization of  $\|\mathbf{b} - \mathbf{Ax}\|_2^2$ , where  $\|\cdot\|_2$  is the length of a vector, also called the second norm of a vector. This expression be rewritten as:

$$\|\mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}\|_{2}^{2} = \|\mathbf{b} - \mathbf{Q}\mathbf{R}\mathbf{x}\|_{2}^{2} = \|\mathbf{Q}^{T}(\mathbf{b} - \mathbf{Q}\mathbf{R}\mathbf{x})\|_{2}^{2} = \|\mathbf{Q}^{T}\mathbf{b} - \mathbf{R}\mathbf{x}\|_{2}^{2}$$
(A.4)

The third steps involes a multiplication with a matrix with orthonormal columns, i.e.  $\|\mathbf{Q}^T \mathbf{x}\| = \|\mathbf{x}\|$ . So, the solution to the least squares equation is:

$$\mathbf{x} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{Q}^T\mathbf{b} \tag{A.5}$$

(A.1)

# Bijlage K: Verloop van de ΔE-waarde voor alle 288 "punten" met 6, 11, 20, 29 en 44 polynomische termen



• 6 polynomische termen





Figuur 3: Kleurafwijking bij poly 6x3 RGB->L\*a\*b\*

• 11 polynomische termen



Figuur 4: Kleurafwijking bij poly 11x3 RGB->XYZ->L\*a\*b\*



Figuur 5: Kleurafwijking bij poly 11x3 RGB ->L\*a\*b\*

• 20 polynomische termen



Figuur 6: Kleurafwijking bij poly 20x3 RGB->XYZ->L\*a\*b\*



Figuur 7: Kleurafwijking bij poly 20x3 RGB ->L\*a\*b\*

• 29 polynomische termen



Figuur 8: Kleurafwijking bij poly 29x3 RGB->XYZ->L\*a\*b\*



Figuur 9: Kleurafwijking bij poly 29x3 RGB ->L\*a\*b\*
## • 44 polynomische termen



## Figuur 10: Kleurafwijking bij poly 44x3 RGB->XYZ->L\*a\*b\*



Figuur 11: Kleurafwijking bij poly 11x3 RGB ->L\*a\*b\*

## Bijlage L: De CIB-GRIJSSCHAAL<sup>[2]</sup>



ANNEXE D : NUANCIER GRIS CIB

Figuur 12: De CIB-grijsschaal<sup>[2]</sup>

## Referenties

- [1] Technische voorschriften (PTV) 21-601: Geprefabriceerde architectonische en industriële elementen van Sierbeton, 2<sup>de</sup> uitgave, Probeton, 2001
- [2] J. DESMYTER / N. CAUBERG /J. PIERARD, Ter plaatste gestort zichtbeton: aandacht voor kwaliteit, WTCB, Katern nr. 4,
- [3] A. PIEN, Gevels van sierbeton, WTCB, 3e trimester (1994), p. 3-8
- [4] LACIE, Witboek 3 over kleurbeheer: Kleurruimten en kleuromzetting, www.lacie.com/download/whitepaper/wp\_colormanagement\_3\_nl.pdf
- [5] CUR-rapport 36: Schoon beton, Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, Gouda, 1966
- [6] Uitbloeiing en uitslag, Dossier Cement, bulletin 5, FEBELCEM, Brussel, 1995
- [7] Uitslag op beton en mortel, Technische fiche, FEBELCEM, Brussel, 1996
- [8] J. TACK, Gekleurd beton, De Nayer Instituut Departement industriële wetenschappen, academiejaar 1998-1999
- [9] F. DURSIN/J. MOYAERT, de invloed van ontkistingsmiddelen op het oppervlakte-uitzicht en de textuur van zelfverdichtend beton, KHBO Departement industriële wetenschappen en technologie, academiejaar 2002-2003
- [10] A. FORD/A. ROBERTS, Colour space conversions, 1998
- [11] HunterLab, Insight on color: CIE Standard Observers, Vol. 19 No. 10, 2008
- [12] K. Sokolowski, Colour scanner calibration- A comparison of different methods, Royal Institute of Technologie, Department of Numerical Analysis and Computer Science, 2003
- [13] Website: http://www.colour-science.com
- [14] B. ATKINS, Raw, jpeg and tiff, photo.net, 2004
- [15] Website: http://www.ams.org/featurecolumn/archive/image-compression.html
- [16] E. MAHIEU, Objectieve beoordeling van kleurverschillen, WTCB, Infofiche nr. 25, Brussel, oktober 2007
- [17] K. WAELBERS, Aesthetic rehabilitation concrete structures, Vol. 7 No. 6, Centre National de la Recherche Scientifique, 1993