

# Tegengaan van wapeningscorrosie door zelfherstel van scheuren in beton

Sam Vantuyghem

Promotor: prof. dr. ir. Nele De Belie

Begeleiders: dr. ing. Kim Van Tittelboom, ir. Mathias Maes

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Master of Science in Civil Engineering

Vakgroep Bouwkundige Constructies

Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2013-2014





# Tegengaan van wapeningscorrosie door zelfherstel van scheuren in beton

Sam Vantuyghem

Promotor: prof. dr. ir. Nele De Belie

Begeleiders: dr. ing. Kim Van Tittelboom, ir. Mathias Maes

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Master of Science in Civil Engineering

Vakgroep Bouwkundige Constructies

Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2013-2014



### **De toelating tot bruikleen**

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

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.”

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

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

# Dankwoord

Onder het motto 'ere wie ere toekomt', wens ik vooreerst iedereen te bedanken die bijgedragen heeft tot deze masterscriptie. In de eerste plaats wil ik Kim en Mathias bedanken voor de uitmuntende begeleiding. Het zou zondermeer onmogelijk geweest zijn om deze thesis tot een goed einde te brengen zonder jullie continue opvolging en raadgevingen. Ook wens ik Kim te bedanken om alle maatregelen te treffen waardoor het mogelijk was met de potentiostaat metingen uit te voeren. Eveneens wil ik Philip, João en Hugo bedanken voor hun raad indien zich kleine problemen voordeden in het labo. Graag bedank ik ook prof. De Belie voor het aanreiken van dit thesisonderwerp.

Tevens wens ik alle techniekers die mij geholpen hebben te bedanken: In het bijzonder bedank ik Dieter voor zijn toegewijde hulp en raad bij het vervaardigen van alle proefstukken, Nicolas om me wegwijs te maken in het labo, Marc om het zaagwerk uit te voeren en Peter voor de hulp bij het opstarten van de proeven met de drukpers.

Ook bedank ik Michel en Rosie van de vakgroep analytische chemie voor hun uitleg over de potentiostaat en het helpen bij de verhuis van het toestel van de Sterre naar labo Magnel. Graag bedank ik prof. Adriaens om de potentiostaat ter beschikking te stellen.

Uiteraard wil ik ook mijn ouders bedanken voor alle steun. Bedankt mama om iedere week mijn was te doen en eten te voorzien opdat ik een ganse week kan overleven. Bedankt papa om elk weekend bereid te zijn mijn mountainbike te kuisen en te onderhouden, hoe vuil deze ook mag zijn. Bedankt om samen op jullie eigen manier altijd voor amusement te zorgen tijdens de weekends. Ik ben trots dat jullie mijn ouders zijn.

Tenslotte wens ik ook mijn vriendin te bedanken voor alle mooie momenten die we samen reeds beleefd hebben. Jij weet als geen ander hoe mij te steunen en maakt mij altijd intens gelukkig. Een leven zonder jou kan ik me niet meer voorstellen. Je bent de vrouw met wie ik de rest van m'n leven wil delen, ik hou van je.

# **Tegengaan van wapeningscorrosie door zelfherstel van scheuren in beton**

door  
Sam Vantyghem

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Master of Science in Civil Engineering

Promotor: prof. dr. ir. Nele De Belie  
Begeleiders: dr. ing. Kim Van Tittelboom, ir. Mathias Maes  
Vakgroep: Bouwkundige constructies  
Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur  
Universiteit Gent  
Academiejaar 2013-2014

## **Samenvatting**

Scheuren in gewapende betonconstructies zijn onvermijdelijk door de geringe treksterkte van beton. Door de aanwezigheid van de scheuren, kunnen agressieve stoffen makkelijker het beton binnendringen. De indringing van chloriden, ondermeer aanwezig in dooizouten en maritieme milieus, kan hierdoor versneld tot wapeningscorrosie leiden. CO<sub>2</sub> zal eveneens de wapening sneller bereiken doorheen een scheur en corrosie van de wapening initiëren. De gevormde corrosieproducten nemen een groter volume in dan de niet gecorrodeerde wapeningsstaaf, wat trekspanningen in het omringde beton kan veroorzaken met delaminatie tot gevolg. Hierdoor komt de veiligheid van de constructie in het gedrang. Herstelingswerken worden dan noodzakelijk, maar zijn duur en komen in vele gevallen te laat. Een duurzame oplossing voor het gestelde probleem dringt zich op.

Autonoom scheurherstel kan bekomen worden door capsules, gevuld met helende agentia, in te mengen in het beton. Bij scheurvorming breken de capsules en komt het helend agens vrij. De scheur wordt gevuld door het helend agens en herstelt het beton. Wapeningscorrosie kan hierdoor tegengegaan worden op een efficiënte, economische en duurzame manier.

In deze masterscriptie worden twee types polyurethaan en één waterafstotend middel als helend agens toegepast. Chloride en CO<sub>2</sub> diffusietesten worden uitgevoerd om na te gaan in welke mate het autonoom scheurherstel de indringing van agressieve stoffen kan verhinderen. Tevens worden gewapende mortelbalken blootgesteld aan een chloridenmilieu om m.b.v. corrosiemetingen de performantie van de heling te onderzoeken.

**Trefwoorden:** autonome heling, chloride geïnitieerde corrosie, carbonatatie geïnitieerde corrosie

# Prevention of reinforcement corrosion by self-repair of cracks in concrete

Sam Vantuyghem

Supervisors: prof. dr. ir. Nele De Belie, dr. ing. Kim Van Tittelboom, ir. Mathias Maes

**Abstract**— The formation of cracks in the tensile zone of reinforced concrete is inevitable because of the relatively low concrete tensile strength. Aggressive substances, like chloride ions and CO<sub>2</sub>, can penetrate through these cracks, initiating reinforcement corrosion more rapidly compared to sound concrete. Reinforcement corrosion can eventually lead to spalling of the concrete and large maintenance works could be needed. The design lifetime of concrete structures can be extended if the ever present cracks were healed autonomously after appearance. Autonomous healing of the cracks can be obtained by embedding glass capsules with encapsulated healing agents in the tensile zone of a concrete element. The brittle capsules will break when being intersected by the crack face, triggering the release of the healing agent into the crack. The healing capacity of two different polyurethane (PU) based agents was examined. PU healing agents will prevent the ingress of aggressive substances by physical blocking of the crack after polymerization of the PU. Chloride and CO<sub>2</sub> diffusion tests were performed in order to examine the efficiency of autonomously healed mortar samples in the prevention of chloride and CO<sub>2</sub> ingress.

**Keywords**— autonomous healing, reinforcement corrosion

## I. INTRODUCTION

The penetration of chlorides in cracks has already been a topic of interest for many authors in literature. Ismail et al. [1] obtained a chloride penetration perpendicular to the crack in mortar samples with a crack width of only 30µm. Corrosion measurements on cracked concrete have also shown the accelerative impact of small cracks (140µm) on reinforcement corrosion [2]. On above, cracks with a crack width of 60µm showed an increased CO<sub>2</sub> penetration in the crack [3]. The above mentioned research illustrates the vulnerability of concrete to reinforcement corrosion due to the presence of small cracks, which are on the level of a strength calculation mostly allowed. Autonomous healing of the cracks could delay the penetration of aggressive substances and increase the durability of concrete structures in an economical way [4]. Some autonomous healing mechanisms have already successfully been developed in order to prevent chloride ingress in cracks. Wang et al. [5] embedded ureum formaldehyde spherical microcapsules, with embedded epoxy in the concrete matrix. The epoxy was released by breakage of the capsules when a crack was initiated. The same chloride diffusion coefficient as for uncracked samples was obtained when 6m% -with regard to the cement mass- microcapsules was embedded. Pelletier et al. [6] encapsulated a Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> solution in spherical PU microcapsules. When released, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> reacts with Ca(OH)<sub>2</sub> and forms a CSH gel, which blocks the crack physically. The time until severe corrosion appeared was delayed 7.6 times compared with cracked

samples. Dry [7] attached coated porous fibers to the reinforcement. These fibers were filled with Ca(NO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>, which is an inhibitor for chloride induced corrosion. The coating of polyol dissolved when it came in contact with chloride ions, leading to a release of the calcium nitrite which protected the reinforcement. In this research, autonomous healing is obtained by encapsulating PU agents in glass capsules. The brittle capsules will break when being intersected by the crack face, triggering the release of the healing agents. The PU agents will polymerize upon release and create a closed cell structure in the crack, physically blocking the ingress of aggressive substances. PU agents have already successfully been tested as a surface protection coating to prevent chloride [8] and CO<sub>2</sub> [9] penetration. In previous research [10] it was proved that encapsulation of a PU agent can reduce the water permeability with a factor of 10<sup>2</sup> compared with sound mortar, which is promising in order to prevent the ingress of aggressive substances.

## II. MATERIALS AND METHODS

### A. Materials

A mortar mixture of 1760g/dm<sup>3</sup> sand 0/4, 590g/dm<sup>3</sup> CEM I 52,5N and 265g/dm<sup>3</sup> water (W/C = 0.45) was used. The glass capsules had an inner diameter of 3mm. The capsules were sealed with a droplet of methyl methacrylate (MMA) glue at one side. After the injection of the healing agent with a syringe and a needle, the other side was sealed with MMA. Two commercial PU based healing agents were tested. The first one is MEYCO MP, produced by BASF (PU BASF). An accelerator was encapsulated in another capsule and embedded just next to the encapsulated prepolymer in the mortar sample. The second used PU agent is called HA Flex SLV AF and is produced by de Neef Conchem (PU SLV).

Cylindrical mortar samples with a height of 50mm and a diameter of 100mm were casted. Nylon wires were attached to the PVC moulds and capsules were glued on them by means of a droplet of MMA in order to prevent the capsules from floating during casting. The embedded capsules were 35mm long and 6 capsules were equally divided along the diameter over two layers, on 12.5mm and 37.5mm height as shown in Figure 1. After all moulds were filled with mortar, they were vibrated on a vibrating table and transported to an air-conditioned room with a temperature of 20°C and a R.H. of more than 95%. One day after casting, the samples were demoulded and stored under water until they were 21 days old.

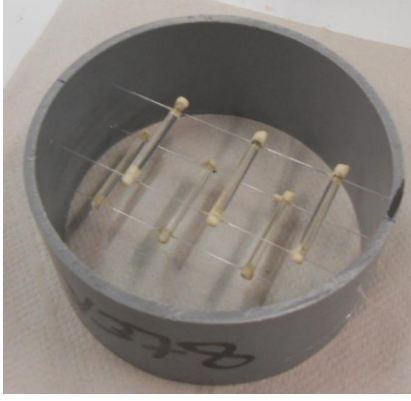


Figure 1: Cylindrical mould with positioned capsules.

Besides the test series containing encapsulated healing agent (CAPS), manually healed test series (MAN) were also prepared. Manual healing was obtained by filling the crack with a syringe and a needle after crack initiation. In addition, a reference series (REF, cracked but not healed) and uncracked test series (UNCR) were examined.

### B. Methods

Cracks were created in the cylindrical mortar samples at the age of 22 days by means of a splitting test. Before, the circumference of the samples was coated with epoxy in order to work as a kind of confinement reinforcement, preventing the sample from breaking. A crack was created perpendicular to the height of the cylindrical capsules. The displacement controlled test was executed until a crack width of  $400\mu\text{m}$  was obtained. Two LVDT's, placed on both flat sides of the samples measured the crack width during the test. The crack width after unloading was measured each centimeter along the crack with a stereo microscope. The average crack width was calculated and amounted to  $200\mu\text{m}$  for most of the samples. No significant difference in crack width between the different test series was obtained. Afterwards, all faces of the samples, except the one to be exposed to the chlorides or  $\text{CO}_2$ , were coated with epoxy (SikaCor-277).

The chloride diffusion test was performed in accordance with the NT Build 443 test method. The samples were submerged during one week in a saturated  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  solution. For the next 7 weeks, the samples were submerged in a  $2.8\text{mol/l}$  sodium chloride solution. Afterwards some samples were split perpendicular to the crack and sprayed with silver nitrate in order to examine the chloride penetration front. Other samples were used to perform titrations. Therefore, every 2mm a mortar layer along the crack was grinded until a depth of 20mm. The chlorides were extracted from the powder and this solution was titrated with an automatic titration device. The non steady state diffusion coefficient of the crack  $D_{\text{nssd}}$  was determined by a non linear regression analysis in accordance with the method of least squares applied on (1), which is mentioned in the NT Build 443 test method:

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

With  $c(x, t)$  the experimentally obtained chloride concentration at depth  $x$  (mm) after a time  $t$  of 7 weeks,  $c_s$  the surface concentration and  $c_i$  the initial concentration in the mortar which was assumed to be zero.

Cylindrical mortar samples exposed to the  $\text{CO}_2$  diffusion test were kept in a climate chamber (R.H. 65%,  $\text{CO}_2$  concentration of 10%) during 9 weeks. The samples were split perpendicular to the crack and sprayed with phenolphthalein in order to determine the carbonation front.

## III. RESULTS AND DISCUSSION

### A. Chloride diffusion test

The chloride penetration front obtained from the sample halves which were sprayed with silver nitrate can be categorized in 4 classes, as is shown in Figure 2. Sample halves which belong to class A show an equal chloride penetration from the exposed surface. In class B an additional penetration through the crack can be noticed. Samples of class C show a full penetration through the crack and in the case of class D an accumulation of chlorides at the coated surface was obtained. In Table 1 the distribution of the amount of samples per test series is presented. Five samples were foreseen within every test series.

The uncracked samples showed always an equal chloride penetration front. Within the test series MAN BASF, 80% of the samples showed an equal penetration. These samples resulted in complete healing of the crack. The other 20% were only partially healed, since they showed an additional penetration through the crack. The samples with encapsulated PU BASF were able to heal the crack completely for 40% of the samples. 20% showed an additional chloride ingress and no crack healing (class C) occurred for 40% of the samples. However, no accumulation of chlorides at the other side of the sample was noticed in contrast to the samples of the reference series, where 60% of the samples belonged to class D. All other reference samples obviously belonged to class C.

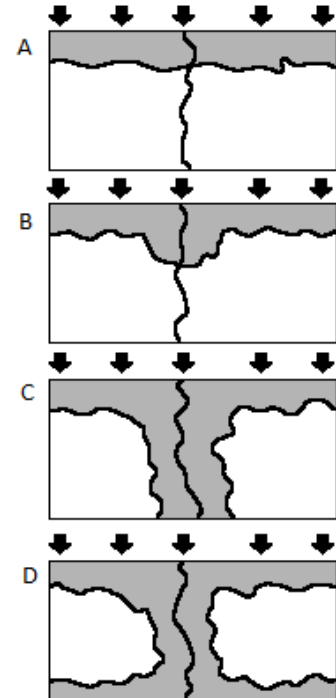


Figure 2: Measured chloride profiles: (A) Equal penetration (B) Additional penetration through crack (C) Complete penetration through crack (D) Complete penetration through crack and chlorides accumulate at opposite surface. The grey hatched area corresponds to the zone where chlorides penetrated. Arrows indicate the direction of chloride ingress.

Within the test series MAN SLV no sample was able to obtain a full crack closure. Moreover, 80% of the samples did not heal the crack at all (class C or D). On the other hand, the test series with encapsulated PU SLV performed remarkably better. Only 20% of these samples showed no crack healing. 60% showed a partial healing of the crack, whereas 20% obtained a full crack healing.

Table 1: Amount of samples belonging to each of the categories after 7 weeks of exposure to chlorides.

	REF	MAN BASF	CAPS BASF	MAN SLV	CAPS SLV	UNCR
A	0%	80%	40%	0%	20%	100%
B	0%	20%	20%	20%	60%	0%
C	40%	0%	40%	60%	20%	0%
D	60%	0%	0%	20%	0%	0%

After the sample halves were studied, they were split along the crack in order to study the release efficiency of the PU in the crack. The PU was colored with a fine red marker. Photos were taken, which were analyzed with Photoshop. The red pixels can easily be selected and the amount of pixels can be determined. From the ratio of the amount of red pixels on the amount of pixels of the complete quarter sample, the covered PU surface could be determined. The total amount of the PU area in the crack is obtained by the sum of the surface ratios of two quarters which belonged together. This is presented in Figure 3 for every healed sample.

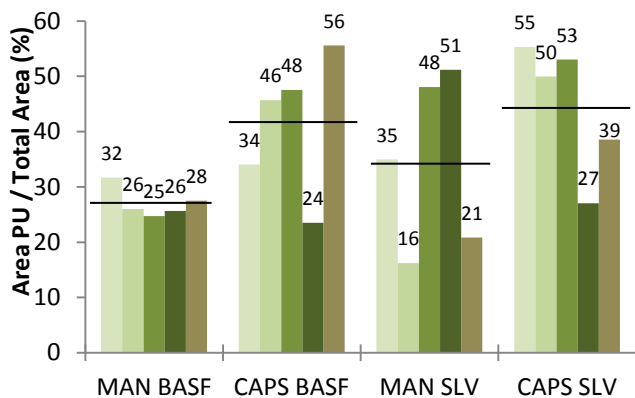


Figure 3: Surface ratios of PU in the crack for every healed sample. The horizontal black lines indicate the mean per test series.

Remarkably, the lowest amount of PU in the crack was found in the samples of the series MAN BASF, which based on Table 1, performed best. The samples healed with PU SLV show more penetration of PU in the crack, which is logical since the viscosity is about 3.5 times lower compared with PU BASF. Nevertheless, the large amount of PU SLV in the crack did not result in a better healing of the crack. It was noticed that the distribution of PU in the crack of the PU SLV samples did not create a continuous closed cell structure along the crack. PU SLV was able to penetrate over the whole crack surface, but it was distributed on discontinuous areas in the crack. As a result the chlorides were -in some cases- still able to penetrate through the crack in between the polymerized PU SLV. In the case of PU BASF a far more closed PU structure

was obtained. Almost all areas with PU BASF were connected as a continuous physical barrier in the crack. On the other hand, it was noticed that PU BASF did not succeed in penetrating further than half of the crack depth in the manually healed test series. This led to a smaller release of PU in the crack, but also to a more dense PU foam. As a consequence, very good healing of the crack was obtained with test series MAN BASF.

Per test series, 3 samples were made in order to determine the non steady state diffusion coefficient. Figure 4 renders the obtained diffusion coefficient of the crack for every tested sample. The horizontal black lines indicate the mean diffusion coefficient per test series.  $D_{nssd}$  amounts to  $4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  for the uncracked samples. Within the MAN BASF and CAPS BASF test series, one out of three has resulted in a diffusion coefficient of approximately the same magnitude ( $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  and  $6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), indicating a complete healing of the crack. On the other hand, one sample of the series CAPS BASF could not heal the crack since its diffusion coefficient was  $19 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , which is about the same as for the reference samples. The other samples of the PU BASF test series resulted in partial healing of the crack, with  $D_{nssd}$  varying from  $8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  until  $13 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . The PU SLV samples only lead to partial healing of the crack for most of the samples. One sample with encapsulated PU SLV was not able to heal the crack at all ( $22 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ). A 5% significant difference in  $D_{nssd}$  was only obtained between the reference and uncracked test series. However, the effective significance level was only 4.8%. The mean values show on the other hand a reduction of  $D_{nssd}$  by 60%, 39%, 43% and 35% with respect to the reference samples for respectively the test series MAN BASF, CAPS BASF, MAN SLV and CAPS SLV.

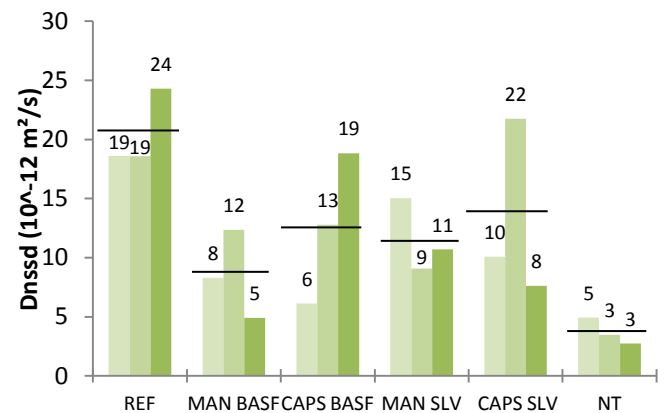


Figure 4: Diffusion coefficient along the crack for every tested sample. The black horizontal lines indicate the mean per test series.

### B. $\text{CO}_2$ diffusion test

Only samples with PU BASF as healing agent were examined. The samples can be classified in two categories based on the carbonation front, in a similar way as for the chloride diffusion tests (Figure 2). Sample halves indicating an equal penetration of  $\text{CO}_2$  from the exposed surface are classified as class A. If an additional penetration is noticed along the crack, the sample belongs to class B. The penetration of the carbonation front after 9 weeks of exposure was rather low, and by consequence no carbonation front showed an ingress along the whole depth of the crack. Three samples were examined per test series. Table 2 shows the amount of samples belonging to each of the categories. The

carbonation front of all reference samples showed an additional penetration through the crack. On the other hand, the carbonation front of all uncracked samples indicate an equal penetration from the exposed surface. The manually healed samples seem capable to prevent CO<sub>2</sub> ingress through the crack, since all samples have an equal CO<sub>2</sub> penetration depth. Two out of three samples within the CAPS BASF series did also succeed in preventing the penetration of CO<sub>2</sub> through the crack.

Table 2: Amount of samples belonging to each of the categories after 9 weeks of exposure to 10% CO<sub>2</sub>.

	REF	MAN BASF	CAPS BASF	UNCR
A	0%	100%	67%	100%
B	100%	0%	33%	0%

#### IV. CONCLUSIONS

The chloride diffusion tests proved the possibility to prevent chloride penetration through the crack by means of encapsulated PU agents. A complete crack healing was obtained for some of the samples. Nevertheless, mostly a partial healing of the crack was noticed. On the other hand, only a small minority of the samples did not show any healing at all. The samples which were manually healed with PU MEYCO MP performed best and 80% of them were able to prevent any chloride ingress through the crack. The healing capacity of the samples, manually healed with PU Flex SLV was relatively poor. Nevertheless, when the samples were healed by encapsulation of PU, both PU types performed almost equally well.

The diffusion coefficient through the crack of these test series decreased on average about 40% with regard to the reference samples. From the analysis of the release of PU in the crack, it was noticed that PU Flex SLV was able to penetrate the crack very easily. However, the PU did not succeed in creating a continuous barrier after polymerization in order to prevent the chloride ingress. PU MEYCO MP on the contrary did create a single closed foam barrier in the crack. Yet, the penetration of PU MEYCO MP in the crack was rather limited. The autonomous healing of cracks could in the future be improved by developing a PU which combines the properties of both tested PU agents. The viscosity of the PU agents should be somewhere between the one of PU Flex SLV and PU MEYCO MP in order to obtain better crack healing.

The CO<sub>2</sub> diffusion tests did also demonstrate the efficiency of encapsulated PU healing agents. A complete crack healing was obtained for all manually healed samples. By encapsulation of PU MEYCO MP, 2 out of 3 samples healed completely. These results are quite promising, nevertheless, additional long term diffusion tests should be carried out in order to confirm the efficiency of autonomous healing.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to acknowledge prof. dr. ir. Nele De Belie, dr. ing. Kim Van Tittelboom and ir. Mathias Maes for their valuable support.

#### REFERENCES

- [1] Ismail, M., Toumi, A., François, R., Gagné, R. (2008). Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in cracked mortar samples. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, 1106-1111.
- [2] Sahmaran, M., Yaman, I. Ö. (2008). Influence of transverse crack width on reinforcement corrosion initiation and propagation in mortar beams. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 35, 236-245.
- [3] Alahmad, S., Toumi, A., Verdier, J., François, R. (2009). Effect of crack opening on carbon dioxide penetration in cracked mortar samples. *Materials and Structures*, Vol. 42, 559-566.
- [4] van Breugel, K. (2007). *Is there a market for self-healing cement-based materials*. Paper presented at the Proceedings of the first conference on self healing materials, Noordwijk aan Zee, Nederland.
- [5] Wang, X., Xing, F., Zhang, M., Han, N., Qian, Z. (2013). Experimental study on cementitious composites embedded with organic microcapsules. *Materials*, Vol. 6, 4064-4081.
- [6] Pelletier, M. M., Brown, R., Shukla, A., Bose, A. (2010). Self-healing concrete with a microencapsulated healing agent (D. o. M. Dynamic Photomechanics Laboratory, Industrial and Systems Engineering, Trans.). Kingston, USA: University of Rhode Island.
- [7] Dry, C. M., Corsaw, M. J. T. (1998). A time-release technique for corrosion prevention. *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, 1133-1140.
- [8] Medeiros, M. H. F., Helene, P. (2009). Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. *Construction and building materials*, Vol. 23, 1476-1784.
- [9] Tsukagoshi, Masayuki, Miyauchi, Hiroyuki, Tanaka, Kyoji. (2012). Protective performance of polyurethane waterproofing membrane against carbonation in cracked areas of mortar substrate. *Construction and building materials*, Vol. 36, 895-905.
- [10] Van Tittelboom, K. (2012). *Zelfhelend beton door incorporatie van ingekapselde bacteriële of polymeergebaseerde helende agentia*. Universiteit Gent.

# Inhoudstafel

Hoofdstuk 1 Inleiding.....	1
Hoofdstuk 2 Literatuurstudie.....	2
2.1    Inleiding.....	2
2.2    Chloride geïnitieerde corrosie .....	4
2.2.1    De invloed van scheuren op de diffusiecoëfficiënt en het chloride penetratieprofiel....	4
2.2.2    Invloed van scheuren op de propagatie snelheid van corrosie .....	11
2.2.3    Invloed van autogene heling op chloride indringing .....	13
2.2.4    Verbeterde autogene heling en chloride indringing.....	16
2.2.5    Invloed van autonome helingsmechanismen op de chloride indringing.....	18
2.3    Carbonatatie geïnitieerde corrosie .....	20
2.3.1    De invloed van scheuren op de CO <sub>2</sub> diffusiecoëfficiënt.....	20
2.3.2    Invloed van verbeterde autogene helingsmechanismen op carbonatatie geïnitieerde corrosie .....	22
2.4    Conclusie literatuurstudie.....	23
Hoofdstuk 3 Materialen en methoden .....	24
3.1    Materialen.....	24
3.1.1    Mortel .....	24
3.1.2    Capsules .....	24
3.1.3    PU van BASF als helend agens .....	25
3.1.4    PU van de Neef Conchem als helend agens.....	25
3.1.5    Waterafstotend middel van Wacker als helend agens .....	25
3.1.6    Cilindrische mortelproefstukken.....	25
3.1.7    Prismatische mortelproefstukken.....	27
3.2    Methoden .....	28
3.2.1    Scheurvorming cilindrische mortelproefstukken.....	28
3.2.2    Scheurvorming prismatische mortelproefstukken .....	29
3.2.3    Opmeten van de scheurwijdtes .....	30
3.2.4    Proefreeksen .....	31
3.2.5    Scheurherstel .....	32
3.2.6    Chloride diffusietest.....	32

3.2.7	CO <sub>2</sub> diffusietest .....	38
3.2.8	Corrosiemetingen .....	39
3.2.9	Statistische gegevensverwerking.....	46
Hoofdstuk 4 Resultaten en discussie .....		47
4.1	Chloride diffusietest.....	47
4.1.1	Scheurwijdtes.....	47
4.1.2	De totale chloride indringingsoppervlakte .....	49
4.1.3	Chloride indringing vanaf het oppervlak en loodrecht op de scheur .....	54
4.1.4	Oppervlakte PU in de scheur .....	55
4.1.5	Chlorideprofiel op basis van de titraties .....	57
4.2	CO <sub>2</sub> diffusietest na 2 weken .....	62
4.2.1	Scheurwijdtes.....	62
4.2.2	De totale gecarbonateerde oppervlakte.....	63
4.2.3	CO <sub>2</sub> -indringing vanaf het oppervlak.....	64
4.2.4	Oppervlakte PU in de scheur .....	64
4.3	CO <sub>2</sub> diffusietest na 9 weken .....	65
4.3.1	Scheurwijdtes.....	65
4.3.2	De totale gecarbonateerde oppervlakte.....	66
4.3.3	CO <sub>2</sub> -indringing vanaf het oppervlak en loodrecht op de scheur .....	68
4.3.4	Oppervlakte PU in de scheur .....	69
4.4	Corrosiemetingen .....	69
4.4.1	Scheurwijdtes.....	69
4.4.2	Verloop van de corrosiemetingen in de tijd .....	70
4.4.3	Vergelijking tussen de verschillende reeksen onderling.....	84
4.4.4	Conclusie corrosiemetingen.....	87
Hoofdstuk 5 Conclusie .....		88
Bijlage A.....		90
Literatuurlijst.....		99
Lijst van figuren.....		103
Lijst van tabellen .....		107

# Tabel van afkortingen en symbolen

Afkorting/symbool	Betekenis	Eenheid
A	Carbonatatiecoëfficiënt	[m/s <sup>-1/2</sup> ]
A	Gepolariseerde oppervlakte van de wapening	[cm <sup>2</sup> ]
AgCl	Zilverchloride	-
AgNO <sub>3</sub>	Zilvernitraat	-
Ag <sub>2</sub> O	Zilveroxide	-
ANOVA	Analysis of Variance	-
c	Chloride concentratie	[m%]
c <sub>i</sub>	Initiële chloride concentratie	[m%]
c <sub>s</sub>	Oppervlakte chloride concentratie	[m%]
Ca <sup>2+</sup>	Calciumion	-
CaCl <sub>2</sub>	Calciumchloride	-
CaCO <sub>3</sub>	Calciumcarbonaat	-
Ca(NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	Calciumnitriet	-
Ca(OH) <sub>2</sub>	Calciumhydroxide	-
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> N <sub>4</sub>	Urotropine	-
Cl <sup>-</sup>	Chloorionen	-
CO <sub>2</sub>	Koolstofdioxide	-
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Carbonaation	-
CSH	Calcium Silicaat Hydraat	-
D	Diameter wapening	[cm]
D	Diffusiecoëfficiënt	[m <sup>2</sup> /s]
D <sub>eq</sub>	Equivalenten diffusiecoëfficiënt	[m <sup>2</sup> /s]
D <sub>nssd</sub>	Niet stationaire diffusiecoëfficiënt	[m <sup>2</sup> /s]
e <sup>-</sup>	Elektronen	-
ECC	Engineered Cementitious Composite	-
E <sub>corr</sub>	Corrosiepotentiaal	[mV]
Fe <sup>2+</sup>	Ijzerionen	-
FeCl <sub>2</sub>	Ijzerdichloride	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ijzeroxide	-
Fe(OH) <sub>2</sub>	Ijzerdihydroxide	-
FRP	Fibre Reinforced Polymer	-
H <sup>+</sup>	Waterstofion	-
HCl	Zoutzuur	-
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Waterstofcarbonaation	-
HCP	Half Cell Potential	-
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	Kalomel elektrode	-
HNO <sub>3</sub>	Salpeterzuur	-
H <sub>2</sub> O	Water	-
i <sub>corr</sub>	Corrosiestroomdichtheid	[μA/cm <sup>2</sup> ]
I <sub>corr</sub>	Corrosiestroom	[mA]
KCl	Kaliumchloride	-
K(OH)	Kaliumhydroxide	-
l	Gepolariseerde lengte van de wapeningsstaaf	[cm]
LDPE	Lagedichtheidspolyethyleen	-

LPR	Linear Polarization Resistance	-
LVDT	Linear Variable Differential Transformer	-
m%	Massaprocent	[%]
MMA	Methyl methacrylaat	-
NaCl	Natriumchloride	-
Na(OH)	Natriumhydroxide	-
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Natriumsilicaat	-
O <sub>2</sub>	Zuurstof	-
OH <sup>-</sup>	Hydroxylionen	-
pH	Zuurtegraad	-
PP	Polypropyleen	-
PU	Polyurethaan	-
PVC	Polyvinylchloride	-
RCM	Rapid Chloride Migration test	-
RCP	Rapid Chloride Penetration test	-
R. V.	Relatieve vochtigheid	[%]
SAP	Super Absorberend Polymeer	-
t	Tijd	[s]
Vol%	Volumeprocent	[%]
w	Scheurwijdte	[μm]
w <sub>cr</sub>	Kritische scheurwijdte	[μm]
W/C	Water-cement factor	-
WRA	Water repellent agent / water afstotend middel	-
x	Chloride of CO <sub>2</sub> indringingsdiepte	[m]

# Hoofdstuk 1

## Inleiding

Door de lage treksterkte van beton zijn scheuren onvermijdelijk in de getrokken zone. Chloriden, aanwezig in dooizouten, maritieme klimaten, etc. en CO<sub>2</sub> kunnen daardoor versneld het beton binnendringen en wapeningscorrosie vroegtijdig initiëren. Dit heeft in het verleden reeds veelvuldig tot een verminderde levensduur van constructies geleid. Brugliggers, staketsels, zwembaden en nog vele andere bouwwerken moeten bijgevolg vroegtijdig gerenoveerd of zelfs volledig afgebroken worden. Het spreekt voor zich dat dit leidt tot een financiële aderlating en bovendien de broeikasgasuitstoot verhoogt aangezien de cementproductie milieuvriendelijk is.

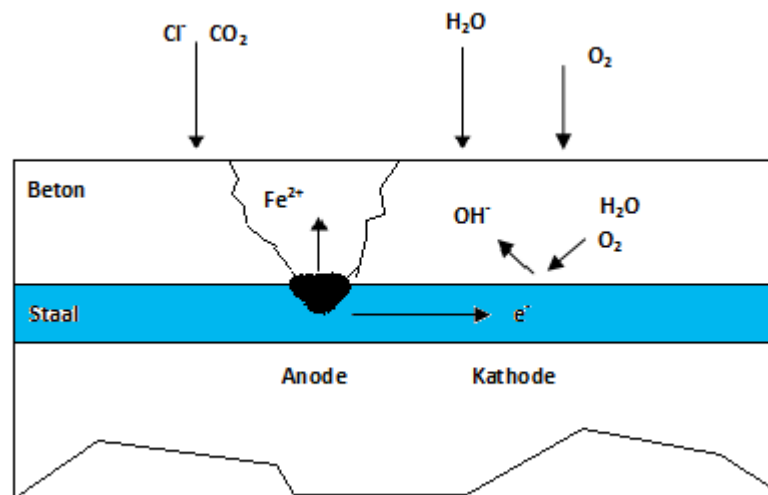
Deze masterscriptie onderzoekt de mogelijkheid om wapeningscorrosie tegen te gaan door het zelfherstel van scheuren in beton. Om dit te verwezenlijken worden capsules met helende agentia ingebetonneerd. Bij scheurvorming dienen de capsules te breken waarbij het helend agens de scheur opvult. Er worden twee commerciële polyurethaan producten en een waterafstotend middel als helend agens onderzocht. Op basis van diffusietesten kan geverifieerd worden of de chloriden en CO<sub>2</sub> het beton vertraagd via de scheur indringen na het optreden van zelfherstel. Uiteraard worden eveneens corrosiemetingen uitgevoerd op mortelbalken die aan chloriden blootgesteld zijn.

# Hoofdstuk 2

## Literatuurstudie

### 2.1 Inleiding

Corrosie is een elektrochemisch proces waarbij ijzer (hoofdcomponent van staal) reageert met water en zuurstof. De ionen worden getransporteerd doorheen een elektrolytoplossing vanaf de anode naar de kathode. In beton vervult het poriënwater de rol van de elektrolyt. De anode en kathode worden gevormd op het oppervlak van het staal, door de heterogene eigenschappen van het staal. Een vereenvoudigd model van het corrosieproces in gewapend beton wordt gegeven in Figuur 2-1.

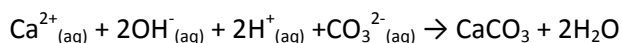
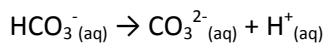
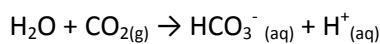


Figuur 2-1: Vereenvoudigde schematische voorstelling van het corrosieproces in gewapend beton.

Ter hoogte van de anode gaan de ijzerionen in oplossing (=oxidatiereactie). De overblijvende elektronen worden getransporteerd naar de kathode waar in de aanwezigheid van water en zuurstof hydroxyl ionen worden gevormd (=reductiereactie). Deze migreren via de elektrolytoplossing en reageren met de ijzerionen tot  $Fe(OH)_2$  wat verder oxideert tot  $Fe_2O_3$ . Het staal in beton begint echter niet onmiddellijk te corroderen. Door de hoge pH ( $\pm 13$ ) t.g.v. het hoog gehalte aan alkaliën die tijdens de hydratatiereactie gevormd worden, wordt het staal gepassiveerd. Hierdoor zal het niet actief corroderen. De passivering wordt gevormd door de aanwezigheid van een hoog gehalte aan  $OH^-$  ionen die reageren met  $Fe^{2+}$ . In een  $OH^-$  rijke omgeving (in jong beton t.g.v. de hydratatie) slaat

het  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  neer op het staal. Dit vormt een dunne beschermende laag die verdere oplossing van ijzerionen voorkomt. Indien de pH daalt wordt de passiveringslaag echter poreus, waardoor het staal actief kan corroderen. De passiveringslaag wordt in hoofdzaak aangevallen door de indringing van  $\text{CO}_2$  of  $\text{Cl}^-$ . Gedurende de initiatiefase wordt het staal gedepassiverd door de indringing van deze stoffen. Het staal corrodeert nog niet actief in deze fase. Pas indien het staal gedepassiverd is, begint het actief te corroderen. Dit wordt gedefinieerd als de propagatiefase. Tijdens deze fase zet het staal volumetrisch uit door de vorming van corrosieproducten ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Dit resulteert in trekspanningen in het omringende beton met excessieve scheurvorming of delaminatie tot gevolg. De veiligheid van de structuur kan hierdoor in het gedrang komen.

In het geval van carbonatatie geïnitieerde corrosie wordt depassivatie bereikt indien de pH in het beton daalt tot 8 à 9. Dit gebeurt door het binnendringen van  $\text{CO}_2$  (aanwezig in de lucht, 0,03 vol% tot 0,3 vol% in grootsteden) welke reageert met alkalische elementen, zoals  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Na}(\text{OH})$  of  $\text{K}(\text{OH})$  en zelfs CSH. Van deze laatste wordt voornamelijk  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  gecarbonateerd. Dit gebeurt via onderstaand vereenvoudigd reactieschema:



Het gevormde  $\text{CaCO}_3$  zorgt echter voor een gereduceerde porositeit en vermindert dus de snelheid van  $\text{CO}_2$  indringing (Houst & Wittmann (1994)). Dit is evenwel enkel het geval indien Portland cement gebruikt wordt. Zolang het carbonatatiefront de wapening niet bereikt, heeft het dus geen schadelijk effect. In de aanwezigheid van additieven zoals hoogovenslak en vliegashouding neemt de porositeit echter toe t.g.v. carbonatatie (De Schutter (2012), Gruyaert et al. (2013), Gruyaert et al. (2010)). Hierdoor wordt de initiatiefase ingekort wat tot een verminderde levensduur van de constructie kan leiden. Voorts is het nog belangrijk op te merken dat de diffusie van  $\text{CO}_2$  sterk afhankelijk is van de relatieve vochtigheid. De diffusie van  $\text{CO}_2$  gebeurt uitermate traag in water. Carbonatatie is dus weinig te vrezen indien de constructie permanent onder water staat. Anderzijds is water nodig om de reactie te initiëren. Carbonatatie is dus het meest te vrezen bij een relatieve vochtigheid van 50 tot 80% en waarbij de constructie aan afwisselende nat en droog cycli is onderworpen. Deze bevinding werd vastgesteld door Houst & Wittmann (1994) die bovendien de invloed van de porositeit onderzochten. Hun onderzoek toonde aan dat de  $\text{CO}_2$  diffusiecoëfficiënt met een factor 10 toenam indien de W/C steeg van 0,4 tot 0,8. Met dalende W/C stemt echter eveneens een stijgende alkaliniteit overeen zodat dit resultaat niet enkel aan de invloed van de porositeit kan toegeschreven worden.

Chloride ionen kunnen het beton binnendringen indien de constructie blootgesteld is aan zeewater, industrieel afvalwater, dooizouten, etc. De chloriden migreren in hoofdzaak door drie transportmechanismen: diffusie, capillaire zuiging en permeabiliteit, d.i. door een piëzometrische druk (Medeiros & Helene (2009)). Als het betonelement in een droge omgeving is opgesteld, komt de indringing in de buitenste 20 mm aan het betonoppervlak voornamelijk tot stand door capillaire zuiging. Meer naar de kern van het betonelement toe wordt de migratie hoofdzakelijk door diffusie gestuurd (De Schutter (2012)). De depassivatie van het staal is in het geval van chloride geïnitieerde corrosie nog niet volledig begrepen. Algemeen is de literatuur erover eens dat chloride ionen de

passiveringslaag kunnen binnendringen, waardoor het de porositeit ervan vergroot. Chloride ionen reageren dan met  $\text{Fe}^{2+}$  tot oplosbaar ijzerchloride. Dit wordt vervolgens geoxideerd met de vorming van ijzerhydroxide tot gevolg. In de aanwezigheid van zuurstof vormt dit roest,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . De chloride ionen komen na de vorming van  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  echter terug vrij in de poriënwateroplossing waardoor deze opnieuw met ijzer ionen kunnen reageren. Er worden dus geen chloriden ‘opgebruikt’ waardoor de concentratie  $\text{Cl}^-$  in het beton snel kan toenemen (Zivica (2003)). Daarenboven gebeurt de depassivatie door  $\text{Cl}^-$  eerder lokaal waardoor chloride geïnitieerde corrosie in discrete punten zeer snel tot ernstige schade kan leiden.

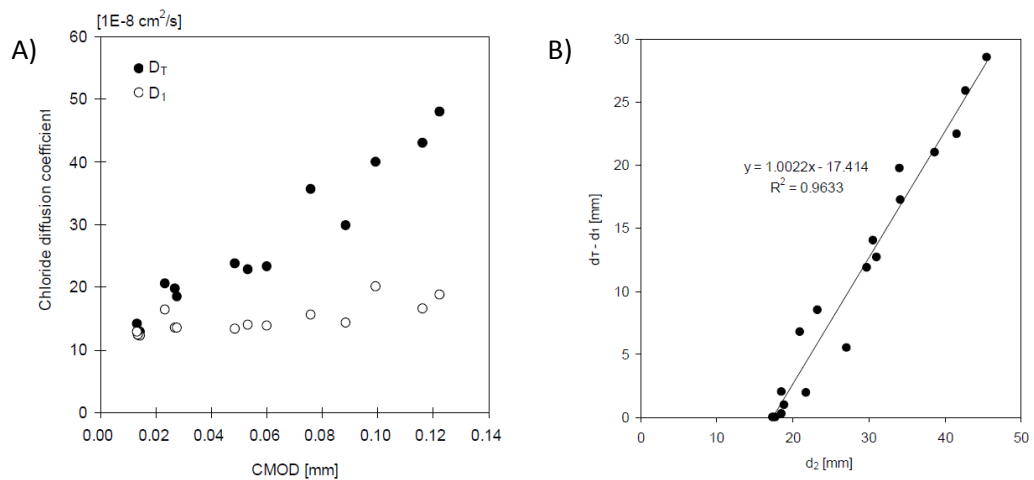
Corrosie van de wapening wordt dus veroorzaakt door de migratie van schadelijke stoffen ( $\text{CO}_2$  en Chloriden) in het beton. Door de aanwezigheid van scheuren kan men intuïtief vermoeden dat de corrosiesnelheid toeneemt. Scheuren zijn steeds in beton aanwezig door de lage treksterkte van het materiaal. Vooral in maritieme omgevingen en bruggen zijn dergelijke duurzaamheidsproblemen een veelvuldig terugkomend fenomeen. Jaarlijks worden wereldwijd miljarden gespendeerd aan het opvolgen en herstellen van constructies met corrosieproblemen (van Breugel (2007)). Deze thesis handelt over het tegengaan van wapeningscorrosie d.m.v. zelfhelend beton. Beton wordt als zelfhelend gedefinieerd indien het de capaciteit bezit om scheuren te dichten zonder een manuele ingreep tijdens de ontwerplevensduur van de constructie. Binnen deze thesis zal gebruik gemaakt worden van ingekapselde helende agentia. Bij deze vorm van zelfhelend beton wordt de scheurvorming gebruikt als initiator van het helend proces. De capsules dienen te breken wanneer er een scheur gevormd wordt, waarna deze gevuld wordt met het uitstromend helend agens dat de scheur opnieuw dient te dichten. Indien kan bewezen worden dat dit de chloride- en  $\text{CO}_2$ -indringing significant verlaagt, zal dit de duurzaamheid van de constructie merkkelijk verbeteren. Als men erin slaagt om dit te verwezenlijken kunnen eventueel op lange termijn veiligheidsfactoren verminderd worden, waardoor minder materiaal zal kunnen gebruikt worden. Hierdoor worden niet enkel de bouwkosten gedrukt, het komt ook het broeikasgaseffect ten goede aangezien de cementproductie verantwoordelijk is voor 5 à 7% van de totale  $\text{CO}_2$  productie (van Breugel (2007)). Desondanks de verhoogde initiële kosten, kan men met zelfhelend beton op termijn een goedkoper, meer duurzaam bouw materiaal ontwikkelen.

## **2.2 Chloride geïnitieerde corrosie**

### **2.2.1 De invloed van scheuren op de diffusiecoëfficiënt en het chloride penetratieprofiel**

Om de impact van zelfheling op het tegengaan van chloride indringing beter te begrijpen dient men vooreerst het gedrag van chloriden in traditioneel (gescheurd) beton te bestuderen. Een maat voor de tijdsduur van de initiatiefase is de diffusiecoëfficiënt. De propagatiefase kan gemonitord worden door een waaier aan beschikbare corrosiemetingen (zie paragraaf 2.2.2). In eerste instantie wordt nu nader ingegaan op het chloride penetratieprofiel en de diffusiecoëfficiënt in gescheurd beton of mortel. Omtrent dit topic is behoorlijk veel onderzoek uitgevoerd. Er is echter een lichte discrepantie in de resultaten. In wat volgt wordt telkenmale de scheurwijdte na ontlasting bedoeld tenzij expliciet anders vermeld.

Yoon et al. (2007) onderzochten de kritische scheurwijdte in combinatie met de scheurdiepte voor chloride penetratie in beton. De kritische scheurwijdte, voorts afgekort als  $w_{cr}$ , wordt gedefinieerd als de maximale scheurwijdte die geen significante invloed heeft op de snelheid van het chloriden transport doorheen het beton. In het onderzoek werd na het uitvoeren van een *Rapid Chloride Migration* test (op beton met  $W/C = 0,5$ ) de penetratiediepten t.h.v. gescheurde en ongescheurde zones evenals de scheurdiepte opgemeten. Hieruit werden de diffusiecoëfficiënten berekend. Uit deze gegevens bleek dat de diffusiecoëfficiënt in de ongescheurde zone  $D_1$  nagenoeg constant was i.f.v. de scheurwijdte (Figuur 2-2A). Dit is uiteraard een eerder triviaal resultaat. Veel interessanter is de nagenoeg lineaire toename van de diffusiecoëfficiënt in de gescheurde zone  $D_T$ . Dit werd waargenomen voor scheurwijdten (na ontlasting) tussen  $10\mu\text{m}$  en  $130\mu\text{m}$ .

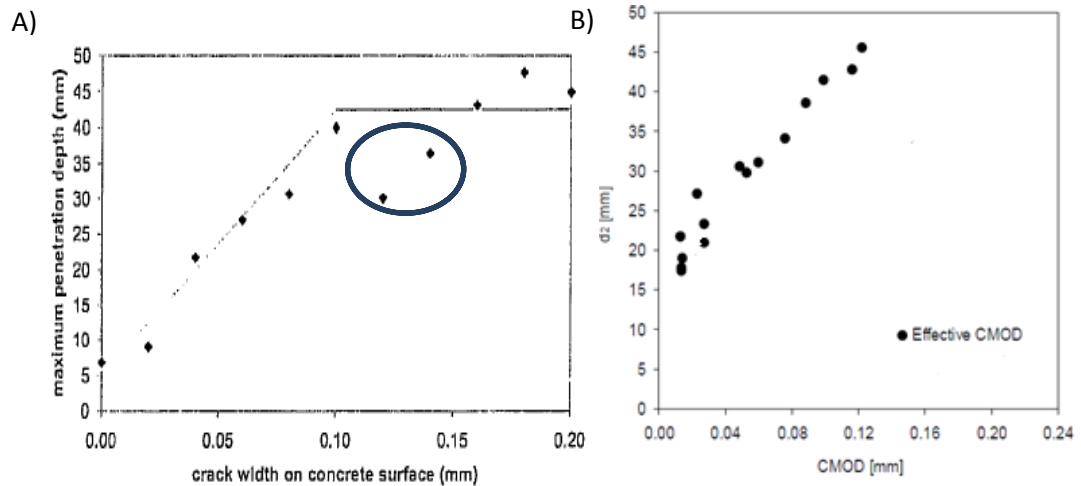


**Figuur 2-2: A) Diffusiecoëfficiënt in de gescheurde ( $D_T$ ) en ongescheurde ( $D_1$ ) zone i.f.v. de scheurwijdte na ontlasting. B) Verschil in penetratiediepte tussen gescheurde ( $d_T$ ) en ongescheurde ( $d_1$ ) zone i.f.v. de scheurdiepte ( $d_2$ ). Yoon et al. (2007).**

In Figuur 2-2B wordt op de verticale as het verschil in penetratiediepte tussen de gescheurde en ongescheurde zone weergegeven terwijl  $d_2$  de scheurdiepte voorstelt. Uit deze grafiek kan afgeleid worden dat de scheur de indringing van chloriden niet significant verhoogt indien de scheurdiepte kleiner is dan 17,4mm. Bij deze scheurdiepte is er volgens de regressielijn immers geen verschil tussen de indringing in de gescheurde en ongescheurde zone. Voor de beproefde samples stemt deze scheurdiepte overeen met een scheurwijdte van  $12\mu\text{m}$ . Dit is eveneens waar te nemen op Figuur 2-2A daar  $D_1$  nog gelijk is aan  $D_T$  voor deze scheurwijdte.

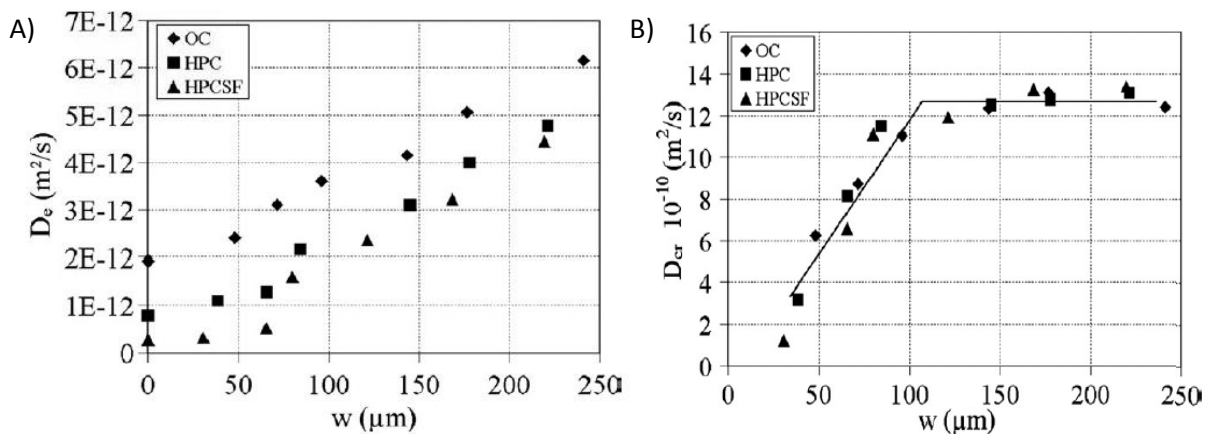
Uiteraard kunnen de absolute waarden van de resultaten niet zomaar vergeleken worden met deze van andere auteurs daar de betonsamenstelling steeds verschillend is. Wel zou men kunnen verwachten tot gelijkaardige constataties te komen indien enkel beton zonder additieven wordt vergeleken met eenzelfde  $W/C$ . Het onderzoek uitgevoerd door Audenaert et al. (2009) sluit in die zin goed aan op Yoon's onderzoek. Cilindrische betonproefstukken met  $W/C = 0,5$  werden onderworpen aan een *non steady state migration* test. Er dient hierbij wel opgemerkt te worden dat de proefstukken niet allen op dezelfde dag getest werden. Om toch rekening te houden met de voortdurende hydratatie van het beton (en de daarmee gepaard gaande afname in de diffusiecoëfficiënt) werden alle resultaten daarom omgerekend tot deze met een referentieleeftijd van 6 maanden. Dit kan evenwel de nauwkeurigheid van de resultaten beïnvloed hebben, wat

eventueel de afwijking voor scheurwijdten tussen 100 en 150µm in Figuur 2-3A kan verklaren. De grafiek duidt een lineair verband aan tussen de penetratiediepte en de scheurwijdte wanneer deze beperkt blijft tot 100µm. Dit stemt indirect overeen met Yoon's resultaten: De scheurdiepte stijgt ongeveer lineair met de scheurwijdte volgens Figuur 2-3B. Wanneer de relatieve indringingsdiepte uit Figuur 2-2B vervolgens uitzet wordt t.o.v. de scheurwijdte wordt dus wederom een lineair verband gevonden zoals in Figuur 2-3A.



**Figuur 2-3: A) Penetratiediepte  $Cl^-$  loodrecht op de scheur i.f.v. de scheurwijdte volgens Audenaert et al. (2009). B) Scheurdiepte ( $d_2$ ) i.f.v. de scheurwijdte volgens Yoon et al. (2007).**

Djerbi et al. (2008) kwamen eveneens tot een gelijkaardig resultaat na het uitvoeren van een *steady state migration test*.



**Figuur 2-4: A) Totale diffusiecoëfficiënt ( $D_e$ ) i.f.v. de scheurwijdte. B) Diffusiecoëfficiënt doorheen de scheur ( $D_{cr}$ ) i.f.v. de scheurwijdte. Djerbi et al. (2008)**

In Figuur 2-4A wordt de totale diffusiecoëfficiënt van de gescheurde proefstukken weergegeven i.f.v. de scheurwijdte. Voor OC (= ordinary concrete, met  $W/C = 0,49$  zonder additieven) bemerkt men eenzelfde lineaire toename als in Figuur 2-2A. Er werd tevens vastgesteld dat hoge sterkte beton (HPC) een betere weerstand heeft tegen het indringen van chloriden, wat te verwachten is gezien de lagere porositeit. Het toevoegen van silica fume resulteert eveneens in een kleinere porositeit waardoor de diffusiecoëfficiënt nog iets kleiner uitvalt. Figuur 2-4B stemt goed overeen met de

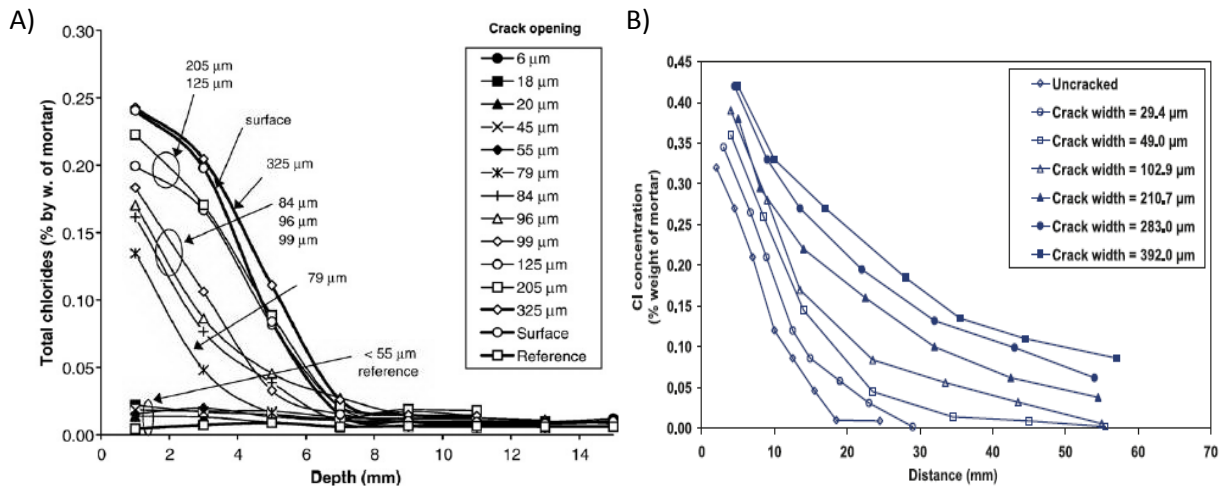
bevindingen van Audenaert et al. (2009). Op basis van de veronderstelling dat de totale diffusieflux van gescheurd beton kan gesuperponeerd worden als de som van de flux door ongescheurd beton en de flux door de scheur zelf werd de diffusiecoëfficiënt doorheen de scheur berekend. Figuur 2-4B stelt het resultaat van deze berekening voor. Men bemerkt dezelfde lineaire toename als vastgesteld door Audenaert et al. (2009). Opmerkelijk is het feit dat de diffusie doorheen de scheur onafhankelijk is van de betonsamenstelling en de textuur van de scheur.

Aldea et al. (1999) bekwamen echter compleet tegenstrijdige resultaten uit de *Rapid Chloride Penetration* test. Wanneer de initiële stroom uitgezet werd i.f.v. de scheurwijdte (variërend van 0 tot 400 $\mu\text{m}$  onder belasting) werd een nagenoeg constante waarde bekomen. Hieruit werd besloten dat er geen relatie bestaat tussen de aanwezigheid van scheuren en de chloridepermeabiliteit. Anderzijds werd in hetzelfde onderzoek de permeabiliteit van water bestudeerd i.f.v. de scheurwijdte. Dit werd gedaan door het uitvoeren van een klassieke waterpermeabiliteitstest met constant verval. Er werd een snelle toename van de waterdoorlatendheid geconstateerd indien de scheurwijdte groter was dan 200 $\mu\text{m}$  onder belasting. De corresponderende effectieve scheurwijdte na belasting bedroeg  $\pm 75\mu\text{m}$ . Het verschil in gedrag werd door Aldea toegeschreven aan het feit dat de waterpermeabiliteit evenredig is met de scheurwijdte tot de macht drie, terwijl de chloridepermeabiliteit recht evenredig is met de scheurwijdte en dus veel minder gevoelig is (Edwardsen (1999)). Uiteraard dient dit dan ook tot uiting te komen in de resultaten van de *RCP* test, wat echter niet het geval is. Dit duidt aan dat de *RCP* test niet accuraat uitgevoerd werd wat eveneens door Jang et al. (2011) wordt vermeld. Jang voerde bovendien een *steady state migration* test uit. Er werd vastgesteld dat de diffusiecoëfficiënt in de gescheurde proefstukken nagenoeg gelijk blijft aan die van ongescheurde proefstukken indien de scheurwijdte beperkt wordt tot 55 à 80 $\mu\text{m}$ . Deze  $w_{cr}$  is merklijk groter dan deze gevonden door Yoon et al. (2007). De auteur van onderhavige literatuurstudie is van de mening dat Jang's resultaten betreffende de kritische scheurwijdte beter de werkelijkheid zullen beschrijven daar deze direct opgemeten werden uit de *steady state migration* test, terwijl Yoon et al. op indirecte wijze (via de scheurdieptemeting) de diffusiecoëfficiënt bekomen. Voor scheurwijdten groter dan 80 $\mu\text{m}$  wordt door Jang een toename in de diffusiecoëfficiënt waargenomen welke echter behoorlijk grillig verloopt i.f.v. de scheurwijdte door een grote spreiding in de testresultaten. Er is echter opnieuw een lineaire toename waar te nemen. Jang et al. (2011) introduceren tevens het begrip equivalente diffusiecoëfficiënt ( $D_{eq}$ ). Dit begrip geeft een kwalitatief verband tussen de scheurwijdte en de diffusiecoëfficiënt van beton. Het gaat uit van de veronderstelling dat de totale flux geschreven kan worden als de som van de flux doorheen de gescheurde en ongescheurde zones. Voor de precieze uitwerking en gemaakte veronderstellingen wordt verwezen naar Jang et al. (2011). Via deze mathematische benadering toont Jang evenwel aan dat de diffusiecoëfficiënt lineair afhankelijk is van de scheurwijdte indien de scheur als perfect rechthoekig gemodelleerd wordt. Dit leunt echter niet aan bij de in de realiteit typisch V-vormige scheur. Om hiermee rekening te houden wordt een correctiefactor geïntroduceerd. Het lineaire verband komt alleszins goed tot uiting in de experimentele metingen van Yoon et al., Audenaert et al. en Djerbi en medewerkers. Er dient hierbij echter nog opgemerkt te worden dat dergelijke afleiding van een equivalente diffusiecoëfficiënt enkel geldig is in verzadigd beton waarin diffusie het enige transportmechanisme is.

Ismail et al. (2008) hebben het effect van scheuren op de diffusiecoëfficiënt in mortelspecies met  $W/C = 0,5$  onderzocht. Na het aanbrengen van de scheuren werden de proefstukken in een *chloride penetration cell* gebracht gedurende 14 dagen. Via titratie werd een chloride concentratieprofiel opgesteld loodrecht op het scheuroppervlak. Er werd een  $w_{cr}$  van  $30\mu\text{m}$  vastgesteld. Voor scheurwijdten tussen  $80\mu\text{m}$  en  $100\mu\text{m}$  was de indringing loodrecht op de scheur 2 maal kleiner dan aan het oppervlak van ongescheurde proefstukken. Voor proefstukken met scheuren groter dan  $200\mu\text{m}$  werd vanuit het scheurvlak een nagenoeg compleet identiek concentratieprofiel bekomen als van aan het oppervlak van ongescheurde proefstukken. Dit duidt erop dat het scheurpatroon geen invloed heeft in dergelijk grote scheuren. De aanwezigheid van scheuren  $>200\mu\text{m}$  zal dus de corrosiesnelheid ongetwijfeld sterk doen toenemen aangezien het blootgesteld oppervlak vergroot en de scheur een bepaalde diepte heeft waardoor de wapening sneller bereikt wordt. De sterke toename in de diffusiecoëfficiënt vanaf een scheurwijdte van  $200\mu\text{m}$  werd eveneens door Park et al. (2012) vastgesteld op proefstukken met  $W/C = 0,44$ , blootgesteld aan een omgeving met 90% R.V. en 0,5M NaCl gedurende 100 dagen. Zij namen bovendien een toename in de diffusiecoëfficiënt waar vanaf scheurwijdtes van  $100\mu\text{m}$ . In het onderzoek van Ismail et al. werd eveneens aangetoond dat autogene heling (zie paragraaf 2.2.3) het diffusieproces vertraagt. Proefstukken met eenzelfde scheurwijdte gescheurd na 28 dagen vertoonden een merkelijk lagere chloride concentratie dan deze gescheurd op 2 jarige leeftijd.

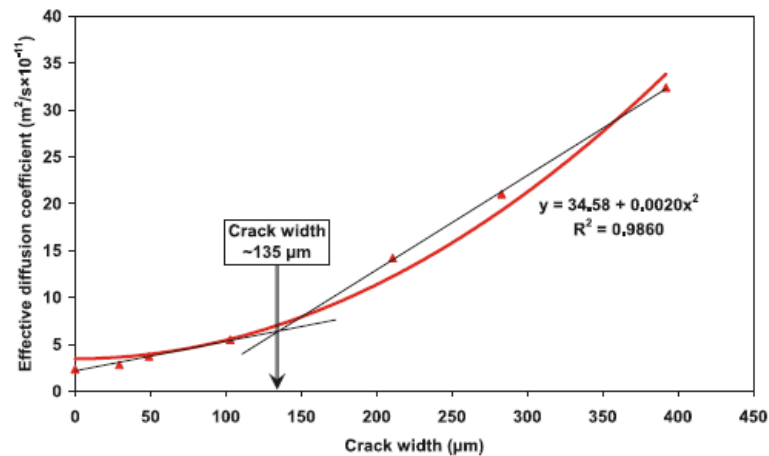
Ook Win et al. (2004) bevestigen de resultaten van Ismail min of meer. Aan de hand van *Electron Probe Micro Analysis* en colorimetrische testen werd de chloride penetratiediepte en concentratie opgemeten in gewapende betonproefstukken met variërende  $W/C$  factoren. In dit onderzoek werden proefstukken met scheurwijdte bij belasting van 100, 200, 300, 400 en  $500\mu\text{m}$  onderzocht. Voor een  $W/C = 0,45$  en  $0,65$  werd geconstateerd dat de penetratiediepte vanaf het oppervlak van de scheur iets groter is dan die aan het ongescheurd oppervlak terwijl de concentratieprofielen net een omgekeerd gedrag vertonen. De reden voor de grotere penetratiediepte langs de scheur zou kunnen te wijten zijn aan kleine beschadigingen langs het scheuroppervlak terwijl de kleinere concentratie verklaard zou kunnen worden door de binding en adhesie van chloride ionen langs het langere penetratie pad. Voorts werd een toename van de chloride indringing gevonden met stijgende  $W/C$  wat evident is gezien de meer poreuze structuur. Langs de wapening werd eveneens een verhoogde chloride stroming waargenomen wat verklaard werd door de verhoogde porositeit van de interface door het bleeding verschijnsel. Anderzijds kan dit tevens het resultaat zijn van beschadigingen door de slip van de wapening met het beton.

Het chloride penetratieprofiel gevonden door Ismail et al. kan vergeleken worden met dit van Sahmaran & Yaman (2008). Zij voerden een *salt ponding* test volgens de norm AASHTO T259-80 op mortel met  $W/C = 0,485$  uit. Vervolgens werd de chloride concentratie bepaald door titratie.



Figuur 2-5: Cl<sup>-</sup> penetratieprofiel loodrecht op de scheur volgens A) Ismail et al. en B) Sahmaran & Yaman.

Uiteraard verschillen beide grafieken aanzienlijk in absolute waarde aangezien twee verschillende tests werden uitgevoerd. Doch vindt men niet dezelfde bevindingen terug bij Sahmaran & Yaman. Op basis van hun chloride penetratieprofiel is het moeilijk een kritische scheurwijdte terug te vinden. Sahmaran & Yaman bepalen de diffusiecoëfficiënt door toepassen van de wet van Fick en regressie analyse op de gevonden chloride profielen. Dit resultaat wordt weergegeven in Figuur 2-6. Het dient opgemerkt te worden dat de wet van Fick theoretisch enkel het diffusieproces beschrijft. Bij het uitvoeren van de *salt ponding* test vindt echter eveneens transport van chloride ionen door capillaire absorptie en permeabiliteit plaats. Het valt dus in twijfel te trekken of het bekomen resultaat wel correct is. Bovendien wordt door Sahmaran & Yaman  $w_{cr}$  op een eerder subjectieve, onnauwkeurige wijze bepaald. Hun conclusie luidt echter dat  $w_{cr}$  135µm bedraagt en de scheurwijdte de diffusiecoëfficiënt kwadratisch doet toenemen.



Figuur 2-6: Diffusiecoëfficiënt i.f.v. de scheurwijdte door Sahmaran & Yaman (2008).

Marsavina et al. (2009) voerden een *non steady state migration* test uit op betoncilinders met W/C = 0,5 en twee verschillende cement hoeveelheden (300kg/m<sup>3</sup> en 400kg/m<sup>3</sup>). Deze werden voorzien van een artificiële scheur met wijdte 200µm en 300µm. Ook de invloed van de scheurdiepte werd bestudeerd. Na het opmeten van het chlorideprofiel loodrecht op de scheur nam men enkel een duidelijke invloed van scheurwijdte waar bij de proefstukken met de hoogste cementhoeveelheid. De

maximale penetratiediepte bij eenzelfde scheurwijdte daalde daarentegen met stijgende cementhoeveelheid. Dit laatste kan verklaard worden doordat de chloriden meer de mogelijkheid hebben om te binden met de cementmatrix bij een hogere cementhoeveelheid wat eveneens door Delagrave et al. (1996) werd vastgesteld. Het is bijgevolg eerder contradictorisch dat enkel bij de proefstukken met de hoogste cementhoeveelheid de invloed van de scheurwijdte waarneembaar is. Men zou hieruit kunnen besluiten dat de scheurwijdte toch niet de primaire invloedsfactor is bij het bestuderen van de chloride indringing. Dit is dan evenwel in schril contrast met alle bovenvermelde onderzoeken. Om de invloed van de scheurdiepte na te gaan werd de additionele chloride indringingsdiepte uitgezet i.f.v. de scheurdiepte. Met de additionele chloride indringingsdiepte wordt de afstand vanaf het chloride penetratiefront tot de scheurtip bedoeld. Er werd vastgesteld dat deze waarde afnam met een stijgende scheurdiepte. Ergens is dit logisch aangezien de chloride ionen er een zekere tijd zullen over doen om in de scheur binnen te dringen. Anderzijds is dit in contrast met de bevindingen van Win et al. (2004) die net het tegengestelde constateerden. Win et al. staven echter dat de indringing ter hoogte van de scheur groter is door kleine beschadigingen, welke bij de artificiële scheur van Marsavina et al. (2009) uiteraard afwezig zijn. Niettegenstaande de afname van de additionele indringingsdiepte, drongen de Chloride ionen nog steeds dieper door indien de scheurdiepte toenam. Het besluit van Marsavina et al. luidt dan ook dat de scheurdiepte een grotere invloed heeft dan de scheurwijdte op de chloride indringing. In het geval dat artificiële scheuren geïnitieerd worden is dit misschien wel een begrijpelijke conclusie. 'Natuurlijke' scheuren, zoals deze gevormd in de getrokken zone van een op buiging belaste ligger, zullen echter een V-vormig patroon hebben waardoor deze bevindingen veel minder uitgesproken zullen zijn. Bovendien zal een wijdere scheur dan automatisch tot een diepere scheur leiden. Aanvullend onderzoek is evenwel vereist om deze correlaties van naderbij te onderzoeken.

Tot dusver werd enkel aandacht geschonken aan de indringing van chloride ionen indien de proefstukken niet tegelijkertijd belast worden. Gowripalan et al. (2000) onderzocht de diffusie van chloriden in betonproefstukken met  $W/C = 0,6$  tijdens belasting in buiging. Er werd waargenomen dat de diffusiecoëfficiënt in de getrokken zone groter was dan in de gedrukte zone. Wanneer de staalsectie verdubbeld werd, kon een sterke afname in diffusiecoëfficiënt in de drukzone worden waargenomen. Anderzijds bleek de diffusie in de getrokken zone slechts marginaal toe te nemen. Hieruit kan besloten worden dat het gedrag van onbelaste proefstukken een zekere representatieve waarde heeft, zelfs voor belast beton. Voorts zijn Gowripalan et al. van de mening dat niet de scheurwijdte als dominant criterium dient genomen te worden wanneer de wapeningscorrosie onderzocht wordt. Er wordt gesteld dat corrosie sneller geïnitieerd wordt indien de betondekking kleiner is. Daarom wordt voorgesteld om de verhouding scheurwijdte/betondekking als parameter te gebruiken. De auteur van onderhavig werk is echter van de overtuiging dat dit geen goede redenering is aangezien het verhogen van de betondekking het niet nuttige eigengewicht sterk zal vergroten wat niet economisch zou zijn. Daarentegen zou de kwaliteit van de betondekking verbeteren wel een goede aanpak zijn. De betondekking bepaalt immers in welke mate zuurstof aanwezig is aan de kathode, welke zich steeds in de ongescheurde zone van het beton bevindt.

Als besluit kan gesteld worden dat  $w_{cr}$  volgens de literatuur varieert tussen 12 en 80  $\mu\text{m}$ . Het zelfhelingsmechanisme dient er dus naartoe te streven om de aanwezige scheuren tot deze grootteorde te reduceren of een doorlatendheid te creëren overeenstemmend met de

diffusiecoëfficiënt bij deze scheurwijdtes. Er werd meestal een lineair verband gevonden voor de diffusiecoëfficiënt i.f.v. de scheurwijdte. Dit duidt aan dat de corrosie initiatie sterk kan vertraagd worden door de scheuren te helen. In de volgende paragraaf wordt dieper ingegaan op de invloed van scheuren op de propagatie snelheid van corrosie.

### 2.2.2 Invloed van scheuren op de propagatie snelheid van corrosie

Naast een *salt ponding* test werd door Sahmaran & Yaman (2008) eveneens een versnelde corrosie test uitgevoerd. De test bestaat uit het aanleggen van een 12V gelijkstroom op de wapening van in NaCl ondergedompelde, gescheurde mortelprisma's (W/C = 0,485). Door het aanleggen van deze anodische potentiaal migreren de negatief geladen chloride ionen naar de positief geladen wapening wat dan het corrosieproces veroorzaakt. Na afloop van de test wordt de wapening vrij gemaakt van de corrosieproducten. Uit de relatieve gewichtsafname van de wapening kan de corrosie activiteit bepaald worden. Sahmaran & Yaman vermelden op basis van de gewichtsafname i.f.v. de scheurwijdte en de gemeten stroom tijdens de test i.f.v. de tijd een kritische scheurwijdte van 140µm. Zoals reeds vermeld is hier wederom  $w_{cr}$  eerder subjectief bepaald.

Door Otieno et al. (2010) werden verschillende meettechnieken voor de corrosiegraad in beton onderzocht. Op de bespreking van deze technieken zal hier niet verder in detail worden ingegaan. De lezer wordt hiervoor verwezen naar de desbetreffende literatuur. Het onderzoek betreft de vergelijking van een *Linear Polarization Resistance* (LPR) methode, een conductiviteitsmeting, een *half-cell potential* (HCP) meting en een resistiviteitsmeting. Beton met W/C = 0,4 en 0,55 met scheurwijdten van 400µm en 700µm werden getest. Behalve wat betreft de resistiviteitsmeting werd door de andere meettechnieken een toename in de corrosie intensiteit waargenomen met stijgende scheurwijdte. De corrosie snelheid stijgt significant in de volgorde ongescheurd < beginnende scheur < scheurwijdte 400µm < scheurwijdte 700µm. De inconsistentie van de resistiviteitsmeting werd veroorzaakt doordat de scheuren nog verzadigd waren met NaCl op het ogenblik van testen. Hierdoor werd een continu elektrische connectiviteit over de scheur gecreëerd wat tot foutieve resultaten leidde. De scheurwijdte van de beginnende scheur werd helaas niet nader gespecificeerd buiten de omschrijving "zeer smalle scheur".

Tabel 2-1: Bevindingen Otieno et al. (a)=LPR, (b)=conductiviteitstest, (c)=HCP, (d)=resistiviteitsmeting.

		PC-40	PC-55	
(a)	Average $i_{corr}$ , weeks 26 to 31, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Uncracked	0.04 (0.01 <sup>*</sup> )	0.10 (0.01 <sup>*</sup> )
		Incipient-cracked	0.14 (0.01 <sup>*</sup> )	0.31 (0.01 <sup>*</sup> )
		0.4 mm cracked	0.36 (0.01 <sup>*</sup> )	0.78 (0.01 <sup>*</sup> )
		0.7 mm cracked	0.69 (0.03 <sup>*</sup> )	0.93 (0.03 <sup>*</sup> )
(b)	Average CCI, mS/cm	28 day	1.05 (0.08 <sup>*</sup> )	1.50 (0.21 <sup>*</sup> )
		90 day	0.86 (0.02 <sup>*</sup> )	0.83 (0.04 <sup>*</sup> )
(c)	Average HCP, weeks 26 to 31, Ag/AgCl, -mV	Uncracked	185 (16 <sup>*</sup> )	259 (14 <sup>*</sup> )
		Incipient-cracked	491 (34 <sup>*</sup> )	508 (22 <sup>*</sup> )
		0.4 mm cracked	527 (23 <sup>*</sup> )	586 (35 <sup>*</sup> )
		0.7 mm cracked	586 (12 <sup>*</sup> )	625 (39 <sup>*</sup> )
(d)	Average resistivity, weeks 26 to 31, $\text{k}\Omega\text{-cm}$	Uncracked	15.3 (3.1 <sup>*</sup> )	9.0 (1.8 <sup>*</sup> )
		Incipient-cracked	15.4 (3.1 <sup>*</sup> )	8.6 (2.2 <sup>*</sup> )
		0.4 mm cracked	15.4 (3.4 <sup>*</sup> )	8.8 (1.8 <sup>*</sup> )
		0.7 mm cracked	15.3 (3.0 <sup>*</sup> )	8.6 (2.2 <sup>*</sup> )

\*Standard deviation.

Saraswathy & Song (2007) testten betonplaatjes ( $W/C = 0,58$ ) met een scheurwijdte van  $100\mu\text{m}$ . Volgens de galvanostatische LPR meting en gravimetrische gewichtsafname van de wapening na beëindiging van de proeven kon een lichte toename worden waargenomen in corrosiestroomdichtheid t.o.v. ongescheurde proefstukken. De potentiostaat meting gaf echter een tegengesteld resultaat. Dit zou kunnen aantonen dat  $w_{cr}$  zich om en bij de  $100\mu\text{m}$  situeert.

Er kan gesteld worden dat ook de propagatiesnelheid van corrosie versneld plaats vindt door de aanwezigheid van scheuren. Aanvullend onderzoek dient nog uitgevoerd te worden aangezien er een grote onenigheid heerst in de literatuur. Schiessl & Raupach (1997) vonden bijvoorbeeld dat de scheurwijdte de initiatiefase significant deed afnemen, terwijl de corrosie tijdens de propagatiefase onverschillig was. De onenigheid wordt mede veroorzaakt door de grote waaier aan mogelijke meettechnieken die niet allen even betrouwbaar zijn. Door Song & Saraswathy (2007) wordt aangeraden om indien mogelijk een combinatie van verschillende meettechnieken toe te passen. Niettegenstaande moet op basis van deze en vorige paragraaf besloten worden dat scheuren met een scheurwijdte van  $\pm 100\mu\text{m}$  corrosie (de initiatie en propagatie) significant versnellen.

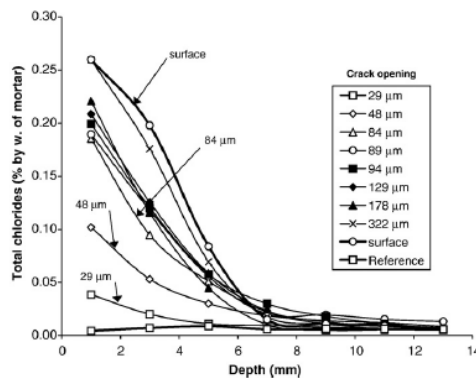
### 2.2.3 Invloed van autogene heling op chloride indringing

Onder autogene heling verstaat men het dichten van scheuren door een natuurlijk zelfherstel van het beton. Het autogene helingsproces kan tot stand komen door verschillende mechanismen. (Edvardsen (1999)):

- Voortzetting van de hydratatiereactie.
- Precipitatie van  $\text{CaCO}_3$  kristallen door de reactie van  $\text{Ca(OH)}_2$  met  $\text{CO}_2$  en water.
- Het blokkeren van de scheur door vaste onzuiverheden in het water dat de scheur binnendringt.
- Het blokkeren van de scheur door losgekomen betonpartikels als resultaat van de vorming van de scheur.
- Zwelling van de matrix.

Voor alle bovenstaande mechanismen is de aanwezigheid van water noodzakelijk. Verdergaande hydratatie is de belangrijkste drijfveer voor autogene heling bij beton op jonge leeftijd. Wanneer hoogovenslak of vliegashoeveel toegevoegd wordt zal dit het helingsproces versterken indien verdergaande hydratatie het dominante mechanisme is (Van Tittelboom (2012)). Indien het beton op latere leeftijd scheurt, is de precipitatie van  $\text{CaCO}_3$  het voornaamste mechanisme. Het dominante mechanisme is eveneens sterk afhankelijk van de blootstelling van het beton. Indien het beton continu verzadigd is, zal verdergaande hydratatie de heling veroorzaken, terwijl bij afwisselende nat-droog cycli  $\text{CaCO}_3$  precipitatie de drijvende kracht zal zijn. Onderzoek naar autogene heling is reeds veelvuldig uitgevoerd. De efficiëntie ervan op het tegengaan van wapeningscorrosie is daarentegen een minder besproken topic. Zoals reeds aangehaald, werd autogene heling waargenomen bij het onderzoek van Ismail et al. (2008). Door het vergelijken van de chloride penetratieprofielen van mortel proefstukken met eenzelfde samenstelling gescheurd op 28 dagen en 2 jaar, werd geconcludeerd dat autogene heling de chloride diffusie kan vertragen. Meer bepaald werd waargenomen dat wanneer de scheurwijdte groter is dan  $60\mu\text{m}$  het tijdstip van de scheurvorming geen significante invloed heeft op het chloride profiel. Anderzijds kon gesteld worden dat indien  $w < 60\mu\text{m}$  het zelfhelingsproces de chloride indringing sterk reduceert wanneer de scheur voorkomt in beton op jonge leeftijd (28 dagen). Dit betekent dat volgens Ismail et al. autogene heling enkel efficiënt is indien de scheurwijdte beperkt blijft tot  $60\mu\text{m}$ . Dit is waar te nemen door Figuur 2-5A te vergelijken met Figuur 2-7.

Door Sahmaran (2007) werd de vorming van witte kristallen waargenomen in mortel proefstukken met scheurwijdtes tot  $49\mu\text{m}$  en dit na 30 dagen blootstelling aan een  $\text{NaCl}$  oplossing. Na X-ray diffractie van het scheuroppervlak bleek de precipitatie van  $\text{CaCO}_3$  de drijvende kracht van deze zelfheling te zijn. Door de vorming van deze helingsproducten is de snelheid van de chloride penetratie in de gescheurde zone amper groter dan deze van ongescheurde proefstukken zoals eveneens waar te nemen op Figuur 2-6. De grootte orde van de scheurwijdte waarbij zelfheling merkbaar is komt dus zeer goed overeen met de bevindingen van Ismail et al.



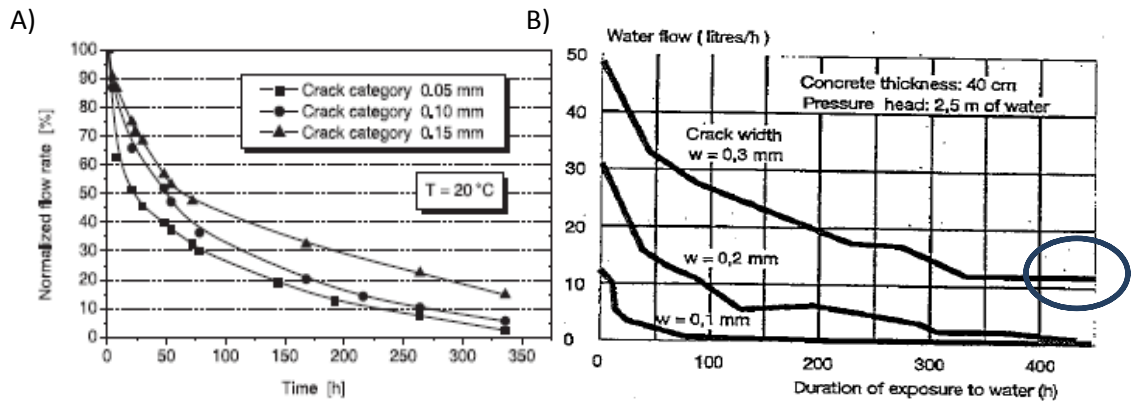
**Figuur 2-7: Chloride penetratieprofiel, loodrecht op de scheur die werd vervaardigd na 2 jaar. (Ismail et al. (2008))**

Door Ramm & Biscop (1998) werd een 2 jaar durende corrosie meting uitgevoerd. Het beton ( $W/C = 0,55$ ) werd tijdens deze periode blootgesteld aan gedeïoniseerd water met pH waarden van 7; 6,1 en 5,2. Op geregelde tijdstippen werd een *electrical element current* meting uitgevoerd. De proefstukken hadden scheurwijdten van 100, 200, 300 en 400 $\mu\text{m}$ . Er wordt echter niet vermeld of dit de scheurwijdte na ontlasting is of niet. Gezien de afgeronde waarden kan verondersteld worden dat dit scheurwijdten onder belasting zijn. Door de elastische respons van het beton zal de effectieve scheurwijdte na ontlasting lager zijn. Hoeveel lager is uiteraard afhankelijk van de samenstelling van het beton etc. en kan niet eenduidig worden afgeleid. Benaderend kan gesteld worden dat de scheurwijdte na ontlasting  $\pm 60\%$  bedraagt van deze tijdens de belasting naar analogie met Van Tittelboom (2012). Er werd waargenomen dat na 2 jaar de proefstukken met een scheurwijdte van 100 $\mu\text{m}$  nog steeds geen corrosie vertoonden terwijl indien  $w = 200\mu\text{m}$  reeds corrosieproducten werden waargenomen. Deze resultaten komen dan qua grootte orde goed overeen met de eerder besproken onderzoeken. Voorts wordt nog opgemerkt dat de corrosiegraad stijgt met toenemende scheurwijdte en afnemende pH. Dit laatste is te verklaren doordat de alkaliniteit in het beton daalt waardoor het staal makkelijker zal corroderen wegens het afbreken van de passiveringslaag.

Er zijn echter eveneens onderzoeken die tegenstrijdige bevindingen aantonen. Reinhardt & Jooss (2003) onderzochten de water permeabiliteit van hoge sterkte beton met  $W/C = 0,37$  i.f.v. de temperatuur en scheurwijdte. De scheurwijdtes varieerden van 50 tot 200 $\mu\text{m}$ . Voor alle proefstukken werd zelfheling waargenomen daar het doorstroomdebiet door de scheur afneemt i.f.v. de tijd voor proefstukken van elke scheurwijdte.

Ook in het onderzoek van Edvardsen (1999) wordt zelfheling waargenomen bij proefstukken met alle scheurwijdten (tot 300 $\mu\text{m}$ ). Dit werd analoog als bij Reinhardt & Jooss (2003) waargenomen door een afname van het doorstroomdebiet i.f.v. de tijd door het toepassen van een water permeabiliteitstest. Zoals te zien op Figuur 2-8 leveren beide onderzoeken een gelijkaardig verband op. Uiteraard is de absolute waarde van de resultaten afhankelijk van de opgelegde piëzometrische stijghoogte welke volgens Edvardsen lineair evenredig is met het debiet. Edvardsen stelt bovendien dat  $\text{CaCO}_3$  precipitatie de voornaamste drijfveer in het autogene helingsproces is wat een verrassende conclusie is op basis van een permeabiliteitstest in afwezigheid van  $\text{CO}_2$ . Zij verklaart de sterke initiële afname van het doorstroomdebiet door de aanwezigheid van voldoende  $\text{Ca}^{2+}$  ionen aan het oppervlak van de scheur. Wanneer deze allen weg gereageerd zijn, worden door diffusie  $\text{Ca}^{2+}$

ionen aangevoerd uit het binnenste van het beton. Dit proces verloopt trager waardoor het debiet meer gestaag afneemt.



Figuur 2-8: Doorstroomdebiet doorheen de scheur i.f.v. de tijd volgens A) Reinhardt (2003) en B) Edvardsen (1999).

Op basis van bovenvermelde literatuur is het onduidelijk in welke mate autogene heling de mogelijkheid biedt om scheuren te dicht en desbetreffend de chloride indringing te verminderen. Bovendien merkt de kritische lezer op Figuur 2-8 dat bij de grootste scheurwijdten geen volledige zelfheling optreedt. Van Tittelboom (2012) geeft op basis van microscopische scheuropvolging min of meer uitsluitsel over de efficiëntie van autogene heling. Mortelproefstukken gescheurd op 28 daagse leeftijd werden in water bewaard om autogene heling toe te staan. Op geregelde tijdstippen werd een microscopische analyse van de scheur uitgevoerd na drogen van de proefstukken. Er werd vastgesteld dat scheuren konden helen tot scheurwijdten van  $200\mu\text{m}$  en dit binnen 42 dagen. Het blijft uiteraard de vraag of dit voldoende is om chloride indringing tegen te gaan.

Jacobson et al. (1996) hebben de efficiëntie van het autogene helingsproces bestudeerd voor Portland beton met  $W/C = 0,4$ . Scheuren werden gecreëerd door proefstukken te onderwerpen aan vorst-dooi cycli (met willekeurige scheurwijdte). Proefstukken die zich gedurende 3 maanden in een kalk verzadigde wateroplossing bevonden toonden een reductie van de chloride migratie van 28 tot 35% t.o.v. onbehandelde gescheurde proefstukken. Niettegenstaande is de chloride indringing nog steeds significant groter dan deze van ongescheurde proefstukken.

Het besluit van deze paragraaf luidt dat autogene heling scheuren tot  $200\mu\text{m}$  kan dicht. Dit levert een sterke afname van de waterdoorlatendheid door de scheur. De chloride indringing blijkt daarentegen minder efficiënt tegengegaan te worden. Bovendien zou uit de bevindingen van Ismail et al., Sahmaran en Ramm kunnen geconcludeerd worden dat de aanwezigheid van chloriden het autogene helingsproces verstoort aangezien zij de heling enkel bij duidelijk kleinere scheuren constateerden. Hieromtrent dient echter nog meer onderzoek uitgevoerd te worden. Een mogelijke verklaring hiervoor kan liggen in het feit dat chloride ionen reageren met de hydratatieproducten van de cementpasta (Delagrave et al., 1996). De Chloride ionen reageren met  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en vormen oplosbaar  $\text{CaCl}_2$ . Deze uitloging van calcium vergroot de porositeit en werkt wellicht de autogene heling tegen. Bovendien wordt nog vermeld dat autogene heling de aanwezigheid van water noodzakelijk maakt waardoor het een onvoorspelbaar mechanisme is.

#### 2.2.4 Verbeterde autogene heling en chloride indringing

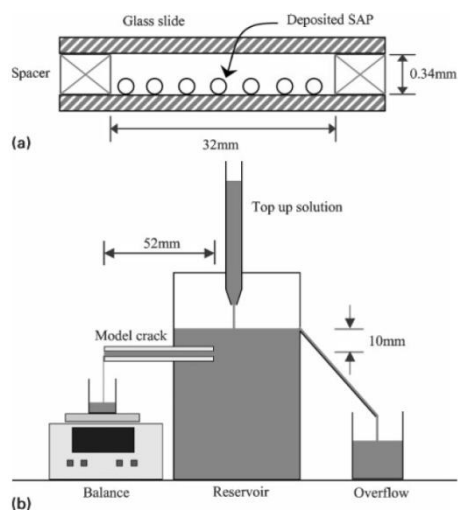
Door betontechnologische ingrepen op de betonsamenstelling kan het autogene helingsproces efficiënter benut worden. Zo kan bijvoorbeeld een deel van het cement vervangen worden door trager reagerende bindmiddelen zoals hoogovenslak en vliegas. Hoogovenslak is een latent hydraulisch materiaal. Dit betekent dat de hydratatiereactie geactiveerd wordt indien zowel water als  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aanwezig is. Vliegas heeft daarentegen puzzolane eigenschappen, wat inhoudt dat het bindt met  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Het  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  is voornamelijk afkomstig van de hydratatie van de cementklinker. Het cement dient dus eerst gedeeltelijk te hydrateren om de reactie met de alternatieve bindmiddelen te initiëren. Door de lage hydratatiegraad van deze bindmiddelen kan de verdergaande hydratatie tot een grotere autogene heling leiden. Er zijn echter nog steeds nadelen aan verbonden. Ten eerste consumeren deze bindmiddelen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  zodat de mogelijkheid tot precipitatie van  $\text{CaCO}_3$  gereduceerd wordt. Bovendien moet er voldoende ongereageerd bindmiddel en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aanwezig zijn. Dit laatste is niet steeds het geval wanneer het beton aan carbonatatie werd onderworpen. Om de reactie te doen plaatsvinden dient eveneens voldoende ruimte aanwezig te zijn. Deze wordt echter door de scheur gecreëerd. De opgesomde nadelen komen ook tot uiting in het besluit van Van Tittelboom (2012). De substitutie van cement door alternatieve bindmiddelen komt enkel de autogene heling ten goede indien voortdurende hydratatie de belangrijkste drijfveer is. Van Tittelboom bekommt een reductie in de waterdoorlatendheid met een factor 10 à 75 voor cementvervanging door hoogovenslak en net geen factor 10 voor vliegas. Dit kan doen vermoeden dat de chloride indringing eveneens kan gereduceerd worden door de invloed van alternatieve bindmiddelen. De resultaten van Termkhajornkit et al. (2009) beaamen dit. De diffusiecoëfficiënt op 91 daagse leeftijd van proefstukken met 25% vliegas (t.o.v. de cementmassa) is 10 maal kleiner dan deze van beton met Portlandcement. Saraswathy & Song (2007) toonden eveneens aan dat de corrosiesnelheid significant lager was in proefstukken met 25% vliegas vervanging, zowel in ongescheurd als gescheurd beton (scheurwijdte =  $100\mu\text{m}$ ). Tijdens de 16 weken durende blootstelling aan 3% NaCl nat en droog cycli werd met de *Open Circuit Potential* meting een potentiaal opgemeten die een passieve staat van corrosie aanduidt. Dit in tegenstelling tot het Portland beton welke steeds actief gecorrodeerd werd. Ook de LPR en gravimetrische methode duiden een significant lagere corrosiegraad aan bij de proefstukken met 25% vliegasvervanging. Dit wordt verklaard doordat vliegas het gehalte aan vrije chloriden reduceert. Het  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in het vliegas reageert immers met  $\text{Cl}^-$  met de vorming van chloroaluminaten. De corrosie wordt echter enkel door de vrije  $\text{Cl}^-$  veroorzaakt waardoor vliegas dus een zekere weerstand tegen chloride geïnitieerde corrosie bezit.

Gezien de vermelde nadelen zal de vervanging door alternatieve bindmiddelen echter nooit leiden tot een volledig herstel van de scheuren. Het kan wel gunstig zijn om krimpscheuren op jonge leeftijd te helen. Daarenboven zijn alternatieve bindmiddelen nefast indien carbonatatie geïnitieerde corrosie mogelijk is. Zo werd door Gruyaert et al. (2010) een decalcificatie van het CSH waargenomen, welke een kleiner volume inneemt en samen met de ontwikkeling van een ruwere poriënstructuur leidt tot een grotere gas permeabiliteit. De makkelijkere indringing van  $\text{CO}_2$ , gecombineerd met een lagere alkaliniteit van hoogovenslak beton heeft dan een verminderde carbonatatiweerstand tot gevolg. Ook in het geval van silica fume addities -typisch in hoog sterktebeton- werd een verminderde carbonatatie geïnitieerde corrosiweerstand gevonden indien meer dan 10% t.o.v. de cementmassa werd toegevoegd (Kulakowski et al. (2009)).

Een andere mogelijkheid om het autogene helingsproces beter aan te spreken bestaat uit het beperken van de scheurwijdte. Li & Li (2011) hebben reeds enkele jaren een vezel versterkt beton (ECC) ontwikkeld. De vezels zorgen voor het ontstaan van verschillende fijnere scheuren i.p.v. één grote scheur. Hierdoor blijft de maximum scheurwijdte beperkt tot 60µm. Aangezien deze scheurwijdte in de buurt van de hoger gedefinieerde  $w_{cr}$  ligt zou dit de initiatie periode significant kunnen vergroten. Li & Li (2011) kwamen echter tot de constatactie dat door blootstelling aan chloriden de treksterkte met 7 tot 13% verminderde. Bovendien bleek de maximale scheurwijdte nu 100µm te bedragen. De mindere performantie van het ECC werd verklaard door de uitloging van calcium, waardoor de vezels minder goed hechtten aan de cementmatrix. Dit is min of meer in overeenstemming met de bevindingen van Ismail (2008), Sahmaran (2007), Ramm (1998) en Delagrave (1996).

In plaats van vezels kan men ook polymeren in de betonmixer inmengen. Aggarwal et al. (2007) bekwam zo een reductie tot 45% en 40% in resp. het carbonatatie - en chloriden front met een 10% epoxy/cement ratio.

Een laatste mogelijkheid die hier nog vermeld wordt is het gebruik van super absorberende polymeren (SAP). Dit polymeermateriaal is in staat om vele malen het eigen gewicht aan water op te slorpen en vast te houden. Het mechanisme werkt theoretisch als volgt: Tijdens de cement hydratatie laten de SAP hun geabsorbeerd water los, waardoor ze krimpen en kleine macro poriën creëren. Wanneer een scheur geïnitieerd wordt zullen de SAP het instromend water opnemen en deze fysisch blokkeren door te zwellen. In droge perioden verliezen de SAP opnieuw hun water, waardoor autogene heling gestimuleerd wordt. De zwellingscapaciteit is echter afhankelijk van de alkaliniteit en ionische concentratie waardoor het tegengaan van de wapeningscorrosie (zowel door carbonatatie als chloriden) onvoorspelbaar lijkt. Lee et al. (2010) bekwam evenwel een reductie van drie grootteordes in het doorstroomdebiet van water en NaCl doorheen een gemodelleerde scheur. Anderzijds bleek het doorstroomdebiet van zeewater niet significant verminderd te zijn door de aanwezigheid van SAP. Het is ook in vraag te stellen hoe de meetopstelling de realiteit voorstelt aangezien enkel rekening wordt gehouden met de permeabiliteit en niet met diffusie en capillaire absorptie. Deze laatste twee mechanismen zijn echter de grootste drijfveren voor chloride indringing indien het betonelement in den droge is opgesteld.



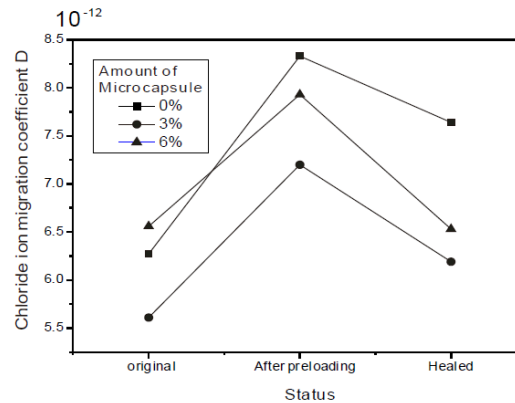
**Figuur 2-9: Meetopstelling gemodelleerde scheur Lee(2010).**

Het toevoegen van polymeren of vezels lijken veelbelovende mogelijkheden om de wapeningscorrosie tegen te gaan. Een volledige heling is echter uitgesloten en blijft steeds afhankelijk van het onvoorspelbare autogene helingsproces.

### **2.2.5 Invloed van autonome helingsmechanismen op de chloride indringing**

Een helingsmechanisme wordt autonoom genoemd indien een ingebetonnerde scheurdichtende component de ontstane scheuren afdicht. Een autonoom herstel kan bekomen worden door ingekapselde helende agentia. Een brede waaier aan mogelijke agentia is reeds onderzocht. Deze kunnen reageren met vocht, lucht, de cementmatrix of met een tweede component die eveneens is ingekapseld. De helende agentia dienen vrij te komen indien een scheur de brosse capsule doet breken. Als alternatief kunnen capsules gebruikt worden die smelten onder warmtetoevoer (Nishiwaki et al., 2006). Dit heeft echter als nadeel niet toegepast te kunnen worden indien de constructie moeilijk te bereiken is. Het valt buiten het bereik van deze literatuurstudie om een overzicht te geven over alle tot nu toe toegepaste autonome helingsmechanismen. De besproken literatuur toont daarentegen aan dat autonome heling een mogelijkheid heeft om wapeningscorrosie op een uiterst efficiënte wijze tegen te gaan.

Wang et al. (2013) ontwikkelden microcapsules uit ureum formaldehyde met ingesloten epoxy. De gemiddelde diameter van deze sferische capsules bedraagt  $166\mu\text{m}$ , terwijl de wanddikte slechts  $4\text{ à }8\mu\text{m}$  bedraagt. Wanneer een scheur geïnitieerd wordt, breken deze capsules en komt de epoxy in contact met een katalysator die eveneens ingekapseld werd. Na het uitvoeren van een RCM test blijkt dat de chloride indringing nagenoeg gelijk is aan deze van de ongescheurde proefstukken indien 6% microcapsules (t.o.v. de cementmassa) werden ingebed.



**Figuur 2-10: Diffusiecoëfficiënt i.f.v. de ongescheurde (original), belaste (after preloading) en geheelde (healed) proefstukken, Wang et al. (2013).**

In het onderzoek van Pelletier et al. (2010) werd een  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  oplossing ingekapseld in sferische PU microcapsules. De diameter van de capsules varieerde van  $40\mu\text{m}$  tot  $800\mu\text{m}$ . Wanneer het  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  in contact komt met  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  wordt een CSH gel gevormd die de scheur dient te dichtten. Er wordt bemerkt dat dit mechanisme minder efficiënt zal werken indien de constructie aan carbonatatie is blootgesteld. Door het toevoegen van 2 volumeprocent capsules werd de tijd vooraleer ‘ernstige’ corrosie optrad gemiddeld verlengd met een factor 7,6. De auteurs stellen twee mechanismen voor die hiervoor verantwoordelijk zijn. Uiteraard wordt de scheur gedicht waardoor de porositeit daalt en de chloriden minder makkelijk kunnen migreren. Anderzijds wordt gesteld dat er een passiveringslaag rondom de wapening wordt gevormd door de reactie van de helende agentia.

Dry & Corsaw (1998) wonden gecoate poreuze vezels langsheen de wapening. Deze werden gevuld met  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ . Het coaten gebeurde met polyol, welke oplost in aanwezigheid van  $\text{Cl}^-$ . Wanneer de chlorideconcentratie te groot wordt komt  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$  vrij en dient de corrosie tegengaan te worden. Het calciumnitriet is immers een inhibitor in het geval van chloride geïnitieerde corrosie: De nitriet ionen gaan binden met de ijzer ionen aan het oppervlak van het staal waardoor minder oplosbaar ijzerchloride gevormd wordt. Ondanks de wat tegenstrijdige testresultaten bekomen uit hun verschillende metingen bleken de proefstukken met vezels de corrosie significant tegen te werken.

Bovenstaande autonome helingsprocessen illustreren de mogelijkheid om wapeningscorrosie te bestrijden. In deze masterproef wordt de zelfheling gerealiseerd door het vrijkomen van helend agens uit glazen cilindrische capsules. Het commercieel PU uit het doctoraat van Van Tittelboom (2012) zal onder meer onderzocht worden. Dit bleek de waterpermeabiliteit met een factor  $10^2$  tot  $10^4$  te verkleinen t.o.v. niet geheelde proefstukken. Dit resultaat is veelbelovend om de chloride indringing tegen te gaan en zo de initiatiefase te verlengen. De efficiëntie van PU in het tegengaan van de chloride indringing werd eveneens gevonden door Medeiros & Helene (2009). In hun onderzoek werden verschillende courante oppervlakte coatings onderzocht. Een capillaire waterabsorptietest, pipet absorptietest en RCM test werd uitgevoerd om zo de efficiëntie van de coatings te bepalen indien respectievelijk capillaire zuiging, permeabiliteit of diffusie het drijvend chloride indringingsmechanisme is. De PU coating was de enige die in alle tests significant beter presteerde dan de referentieproefstukken. Een waterafstotend middel (wat eveneens binnen deze thesis onderzocht zal worden) gaf teleurstellende resultaten in de diffusietest. Er dient hierbij evenwel opgemerkt te worden dat de PU oppervlakte coating een compleet andere textuur bezit dan

het ingekapselde PU. Het eerstgenoemde PU is een elastomeer, terwijl laatstgenoemde een schuim vormt.

## 2.3 Carbonatatie geïnitieerde corrosie

Vooreerst wordt opgemerkt dat de literatuur betreffende carbonatatie in gescheurd beton veel beperkter is dan in het geval van chloride geïnitieerde corrosie. Een mogelijke verklaring hiervoor kan gevonden worden in het feit dat carbonatatie tot een uniformere corrosie van de wapening leidt. Chloride geïnitieerde corrosie treedt echter meer lokaal op, zij het met een verhoogde corrosiegraad (putcorrosie). Hierdoor wordt deze meer gevreesd qua veiligheid gezien z'n snellere degradatie van de wapening met eventueel plots falen tot gevolg. Carbonatatie is evenwel een vaak terugkerend probleem bij oudere gebouwen en is daarom zeker niet minder belangrijk. Door de beperkte literatuur zal deze paragraaf bijgevolg beknopter en algemener behandeld worden. Het illustreert echter de noodzaak tot onderzoek naar dit onderwerp.

### 2.3.1 De invloed van scheuren op de CO<sub>2</sub> diffusiecoëfficiënt

Net als bij chloride geïnitieerde corrosie is de diffusiecoëfficiënt een maat voor de duur van de initiatiefase. In de literatuur is men immers eensgezind over het feit dat het carbonatatiefront propageert volgens de betrekking (De Schutter (2012)):

$$x = A\sqrt{t} \quad (2.1)$$

Hierin is  $x$  de diepte van de gecarbonateerde zone gemeten vanaf het betonoppervlak,  $t$  de tijd en  $A$  de carbonatatiecoëfficiënt. Houst & Wittmann (2002) vermelden in het bijzonder:

$$A = \sqrt{\frac{2Dc}{a}} \quad (2.2)$$

Met  $D$  de diffusiecoëfficiënt van CO<sub>2</sub>,  $c$  de CO<sub>2</sub> concentratie in de lucht en  $a$  de concentratie van de reactieve componenten. Bij een verviervoudiging van  $D$  zal in eenzelfde tijdsduur het carbonatatiefront dus 2 maal dieper doorgedrongen zijn. Een eerste indicatie van de invloed van scheuren op de diffusiecoëfficiënt werd bekomen in het onderzoek van Houst & Wittmann (2002). Zij bestudeerden het carbonatatieprofiel in ongescheurde mortel. Na het uitvoeren van een fenolftaleïne test op proefstukken met  $W/C = 0,4$  werd geconstateerd dat het carbonatatiefront zich niet volgens een vloeiende lijn aftekende. Lokaal werden diepere 'insnijdingen' gevonden in de niet gecarbonateerde zone. Een mogelijke verklaring van de auteurs was de aanwezigheid van microscheuren door de grote autogene krimp bij lage  $W/C$ . De indringing doorheen microscheuren zou echter zeer miniem zijn volgens Alahmad et al. (2009). Zij onderzochten het gedrag van CO<sub>2</sub> diffusie in gescheurde mortelprisma's ( $W/C = 0,48$ ). Indien de scheurwijdte kleiner was dan 9µm werd geen indringing loodrecht op het scheuroppervlak waargenomen na 65 dagen blootstelling aan een CO<sub>2</sub> concentratie van 50% en R. V. 65%. Bij scheuren met scheurwijdte groter dan 60µm werd vastgesteld dat de CO<sub>2</sub> indringing doorheen het oppervlak van de scheur van eenzelfde grootte was als aan het oppervlak van ongescheurde mortel. De aanwezigheid van scheuren zou op basis van dit

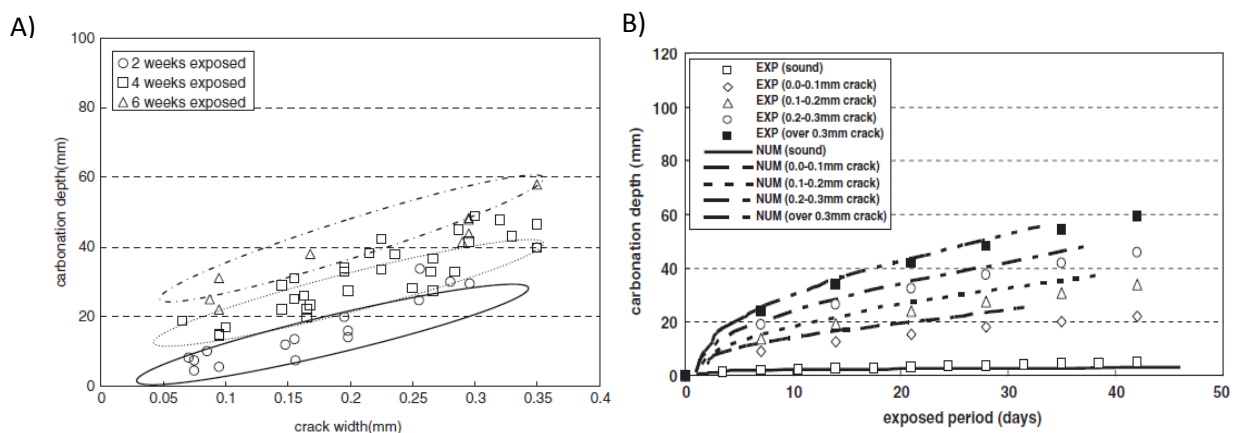
resultaat dus redelijk snel leiden tot een lokaal dieper carbonatatiefront gezien de zekere diepte van de scheur.

Ann et al. (2010) hebben het carbonatatiefront opgemeten bij kernen geboord uit een 18 jaar oude betonbrug (W/C = 0,45). De brug vertoonde scheuren (onder de belasting van de brug) met breedtes tussen 100 en 200µm. Gemiddeld was het carbonatatiefront ter hoogte van de scheur meer dan 2 keer zo diep doorgedrongen t.o.v. kernen uit ongescheurde zones. Deze waarde is echter beduidend kleiner dan de waarnemingen van Song et al. (2006). In Tabel 2-2 ziet men immers dat scheuren ,zij het na ontlasting, tussen 100 en 200µm een 7,4 maal diepere indringing vertoonden in eenzelfde tijdsduur. Er dient hierbij echter opgemerkt te worden dat in de kernen uit de ongescheurde zones van de brug bestudeerd door Ann et al. wellicht eveneens microscheuren aanwezig waren waardoor deze vergelijking een overdreven resultaat levert.

**Tabel 2-2: Carbonatatiecoëfficiënt voor verschillende scheurbreedtes op beton met W/C = 0,45, Song et al. (2006).**

Crack width	<i>A</i>
0 (sound surface)	1.856
0.0–0.1 mm	8.984
0.1–0.2 mm	13.798
0.2–0.3 mm	18.767
Over 0.3 mm	24.107

Song et al. (2006) introduceerden eveneens het gebruik van een equivalente CO<sub>2</sub> diffusiecoëfficiënt. Deze wordt op een analoge wijze als de D<sub>eq</sub> voor chloriden bekomen (cf. supra: Jang et al. (2011)). Er werd echter eveneens rekening gehouden met de temperatuur en de porositeit van het beton, evenals het feit dat CO<sub>2</sub> zowel in de gas als in de opgeloste fase toestand (in het poriënwater) volgens een verschillende diffusiecoëfficiënt diffundeert. Indien verondersteld wordt dat een scheur als een v-vormig prisma kan gemodelleerd worden, is D<sub>eq</sub> evenredig met de scheurbreedte in het kwadraat. Volgens de betrekking van Houst & Wittmann (2002) zou dit tot een lineaire toename van het carbonatatiefront i.f.v. de scheurbreedte moeten leiden wat duidelijk zichtbaar is in Figuur 2-11A.



**Figuur 2-11: A) Carbonatatiefront i.f.v. de scheurbreedte (experimenteel), B) Carbonatatiefront i.f.v. de blootstellingsduur (exp=experimenteel, Num= numerieke simulatie), Song et al. (2006).**

Uit Figuur 2-11B kan men waarnemen dat scheuren een sterke invloed hebben op de indringing van CO<sub>2</sub>. Voorts werd nogmaals bevestigd dat het carbonatatiefront verder doordringt bij een stijgende W/C en dus meer poreus beton. Dit is in overeenstemming met Houst & Wittmann (1994).

In de beperkte literatuur is men eensgezind over het feit dat scheuren leiden tot een versnelde CO<sub>2</sub> indringing. Dit is echter meestal lokaal terwijl carbonatatie geïnitieerde corrosie uniform over de lengte van de wapening voorkomt. Het blijft dus de vraag in welke mate scheuren eveneens de propagatie van corrosieproducten t.g.v. CO<sub>2</sub> indringing in de hand werken. In de literatuur is echter geen informatie beschikbaar over corrosiemetingen bij gescheurd beton onderworpen aan carbonatatie. Ook de invloed van autogene heling op carbonatatie geïnitieerde corrosie is een tot dusver vrijwel onbesproken onderwerp in de literatuur. Daarom wordt in de volgende paragraaf onmiddellijk overgegaan naar de bespreking van enkele verbeterde autogene helingsmechanismen.

### **2.3.2 Invloed van verbeterde autogene helingsmechanismen op carbonatatie geïnitieerde corrosie**

In het onderzoek van Sanjuán et al. (1998) werd de invloed van polypropyleen (PP) vezels op carbonatatie geïnitieerde corrosie bestudeerd. De PP vezels dienen als secundaire wapening, welke als doel hebben de scheurwijdten te beperken. De precipitatie van scheuren gevormd door de uitzetting van de corrosieproducten werd gemonitord tijdens de proefopstelling. De proefstukken met PP vezels vertoonden kleinere scheurwijdtes waardoor zelfheling visueel werd waargenomen met een verminderde CO<sub>2</sub> indringing tot gevolg. Dit duidt aan dat autogene heling in zekere zin in staat is om de corrosie initiatie te vertragen.

Aangezien in onderhavige thesis o.a. PU als helend agens wordt gebruikt, wordt hier kort het onderzoek van Tsukagoshi et al. (2012) vermeld. Zij bestudeerden de performantie van een PU membraan coating op het morteloppervlak (W/C = 0,6). Na aanbrengen van de PU laag werden de proefstukken onderworpen aan een driepuntsbuigproef totdat een scheur met breedte 1mm werd bekomen aan het PU gecoat oppervlak. Na 5 jaar blootstelling aan de buitenlucht werd bij de niet gecoat proefstukken een CO<sub>2</sub> indringing opgemeten van 2,5mm in de ongescheurde zone en 11,5mm ter plaatse van de scheur. Indien een 0,5mm dikke membraanlaag werd gebruikt bleek het carbonatatiefront even diep doorgedrongen te zijn als in het geval van de niet behandelde proefstukken. Dit was het gevolg van een scheur in het PU membraan. Bij een 1mm dikke PU laag bleek er echter nog geen CO<sub>2</sub> doorgedrongen te zijn in de proefstukken (indringing =0mm, zelfs ter plaatse van de scheur). Hiermee wordt aangetoond dat PU wel degelijk in staat is om de CO<sub>2</sub> indringing significant terug te dringen. Het illustreert echter ook dat de sterkte en eveneens de elasticiteit van het verharde PU voldoende hoog moet zijn opdat het niet zou scheuren bij een verdere toename van de scheurwijdte door herbelasting. Wederom wordt opgemerkt dat oppervlakte coating PU een elastomeer is (en geen schuim zoals in deze masterproef) zodat het aangehaalde onderzoek enkel indicatief dient geïnterpreteerd te worden en de mogelijke efficiëntie van PU schuim kan insinueren. Er wordt terloops nog opgemerkt dat de ratio van de CO<sub>2</sub> indringing in de gescheurde/ongescheurde zone (=11,5/2,5) bij de niet behandelde proefstukken relatief dicht aansluit bij de resultaten van Song et al. (2006). Deze laatste vonden voor een W/C =0,65 en scheurwijdtes >300µm een ratio van 30,67mm op 4,47mm.

Tenslotte toont het onderzoek van Heiyantuduwa et al. (2006) aan dat corrosie inhibitoren de mogelijkheid hebben om in het beton te diffunderen om zo een passiveringslaag op de wapening te vormen. Hun amino-alcohol gebaseerde inhibitor bleek immers capabel om vanaf het betonoppervlak tot aan de wapening door te dringen waardoor de initiatie van carbonatatie geïnitieerde corrosie werd uitgesteld. Zelfs in gecarbonateerd beton migreerden de corrosie inhibitoren tot aan de wapening en werd na verloop van tijd opnieuw een passieve corrosietoestand bereikt.

De aangehaalde literatuur toont aan dat helingsmechanismen zeker in staat zijn om carbonatatie geïnitieerde corrosie tegen te gaan. Over autonome helingsmechanismen is echter nog geen literatuur beschikbaar, maar op basis van deze paragraaf kan men vermoeden dat deze een voldoende efficiëntie kunnen behalen.

## **2.4 Conclusie literatuurstudie**

Uit de bestudeerde literatuur kan men stellen dat scheuren zowel in het geval van chloride- als carbonatatie geïnitieerde corrosie leiden tot een versnelde degradatie van de wapening. Enkel een autonoom helingsmechanisme zou in staat kunnen zijn om ten allen tijde corrosie van de wapening op een elegante manier tegen te gaan. In het geval van chloride geïnitieerde corrosie zijn reeds enkele onderzoeken uitgevoerd waarbij de performantie van het helingsmechanisme aangetoond is (Wang et al. (2013), Pelletier et al. (2010)). De beperkte literatuur die beschikbaar is betreffende carbonatatie van gescheurd beton duidt aan dat scheuren de initiatie van corrosie drastisch kunnen inkorten. Er dient in de toekomst dus zeker meer onderzoek uitgevoerd te worden naar dit onderwerp.

# Hoofdstuk 3

## Materialen en methoden

### 3.1 Materialen

#### 3.1.1 Mortel

In deze masterscriptie werd steeds met eenzelfde mortelsamenstelling gewerkt. De W/C bedroeg 0,45 volgens Tabel 3-1. Het cement was van het type CEM I 52,5 N en als aanmaakwater werd kraantjeswater gebruikt. De mortel werd steeds aangemaakt volgens dezelfde gestandaardiseerde mengprocedure: eerst werden water en cement gedurende 30 seconden gemengd. Daarna werd het zand geleidelijk toegevoegd gedurende 30 seconden, waarna de mortel nog 30 seconden lang werd gemengd. Vervolgens werd in een tijdspanne van 30 seconden de mortel van de mortelmenger (CreteAngle® Model 'S') afgeschraapt om dan 1 minuut te laten rusten. Tenslotte werd nog 1 minuut verder gemengd. Er werd gemengd met een snelheid van 140 rotaties per minuut.

Tabel 3-1: Mortelsamenstelling

Materiaal	Hoeveelheid (g/dm <sup>3</sup> )
Zand 0/4	1760
Cement CEM I 52,5 N	590
Water	265

#### 3.1.2 Capsules

De capsules dienen voldoende bros te zijn om te breken indien een scheur zich voordoet. Daartoe werd gebruik gemaakt van holle cilindrische glazen capsules met een inwendige diameter van 3mm en een wanddikte van 175µm. De capsules werden afgesneden van een 1m lange buis op 3,5cm (voor de diffusietesten) en 7,5cm (voor de corrosiemetingen) m.b.v. een diamantmes. Eerst werd één kant van de capsules afgedicht met methyl methacrylaat (MMA) lijm. Vervolgens konden de capsules gevuld worden met het helend agens d.m.v. een spuit met naald. Daarna werd het andere uiteinde eveneens afgedicht met MMA.

### **3.1.3 PU van BASF als helend agens**

Het eerste helend agens dat gebruikt werd is een 1-component polyurethaan gebaseerd agens, genaamd MEYCO MP 355 1K, geproduceerd door BASF. Wanneer het in contact komt met water vormt het een schuim welke tot 30 maal z'n initieel volume kan innemen. Door deze grote volume-expansie is het in staat om grote scheuren te vullen, terwijl het ingenomen volume tijdens de inkapseling beperkt blijft. Hierdoor wordt de scheur fysisch geblokkeerd waardoor de indringing van agressieve stoffen gereduceerd wordt. Om de reactiesnelheid van het PU agens te vergroten werd een tweede component eveneens ingekapseld. Deze bestond uit een mengsel van kraantjeswater en 10 massapercent accelerator. Het prepolymer en de accelerator werden in twee afzonderlijke capsules geïnjecteerd en vervolgens aan elkaar bevestigd met MMA. Indien een scheur zich voordoet, breken beide capsules waardoor het PU begint te polymeriseren. Het duurt dan echter nog enkele minuten vooraleer het PU schuim volledig uitgehard is. De viscositeit van het PU en de accelerator bedraagt respectievelijk 700mPas en 70mPas.

### **3.1.4 PU van de Neef Conchem als helend agens**

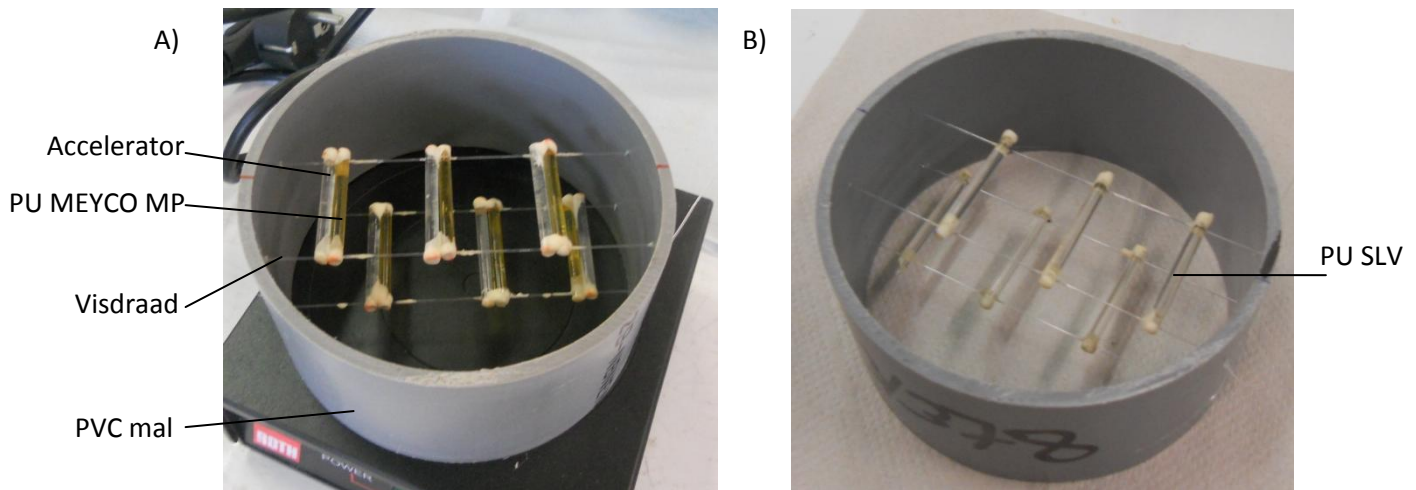
Het tweede helend agens betreft een 1-component polyurethaan injectiehars, HA Flex SLV AF, geproduceerd door de Neef Conchem. Het reageert wanneer het in contact komt met water en vormt een hydrofobe flexibele gesloten celstructuur. Het product is gezien z'n lage viscositeit (200mPas) speciaal ontwikkeld om scheuren met breedte < 0,5mm te dichten. Bij een temperatuur van 25°C eindigt de reactie na ongeveer 5 minuten en neemt het tot 14 keer z'n initieel volume in. Wederom wordt de indringing van agressieve stoffen gereduceerd door een fysische blokkering van de scheur.

### **3.1.5 Waterafstotend middel van Wacker als helend agens**

Als laatste helend agens werd een waterafstotend middel (WRA) getest. Het betreft het product Silres BS 1701, geproduceerd door Wacker. Het is een mengsel van octyltriethoxysilaan isomeren met iso-octyltriethoxysilaan als hoofdcomponent. Het mengsel bestaat voor 99% uit deze silanen en 1% alcohol. Het WRA reageert met vocht in de lucht of poriënwater waardoor het de water absorptiecapaciteit van de mortel sterk reduceert, echter zonder de scheuren fysisch te blokkeren.

### **3.1.6 Cilindrische mortelproefstukken**

Vooreerst werden de mallen aangemaakt. Deze werden verzaagd van een polyvinylchloride (PVC) BENOR gecertificeerde afvoerbuis met een inwendige diameter van 100,8mm, zodat een 50mm hoge mal bekomen werd. De ontstane bramen werden verwijderd m.b.v. schuurpapier. Vervolgens werden, met een boor met een diameter van 1mm, vier gaatjes geboord op een hoogte van 12,5mm en 37,5mm met een tussenafstand van 30mm, symmetrisch t.o.v. de diagonaal. Hierdoor werd visdraad gespannen waarop de 35mm lange capsules met MMA geschrinkt opgelijmd werden. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 3-1. De proefstukken met WRA als helend agens hebben een zelfde uitzicht als deze met Flex SLV.



**Figuur 3-1: Cilindrische mortelproefstukken voor het storten van de mortel met A) PU MEYCO MP en B) Flex SLV.**

Door de capsules op visdraad te bevestigen werd het opdrijven tijdens het trillen vermeden. De positie van de capsules was op deze wijze exact gekend, zodat men nagenoeg zekerheid had dat het te creëren scheurvlak de capsules zou kruisen. De afstand tussen twee helende agentia was bepaald zodat ze vanuit bovenaanzicht gelijkmatig over de diameter van de mal verdeeld waren.

Onmiddellijk na het aanmaken van de mortel werden de mallen zorgvuldig gevuld. De mallen waren ingeklemd op een houten plaat (Figuur 3-2) zodat het lekken van mortel via de onderzijde vermeden werd. Wanneer alle mallen gevuld waren met mortel, werden ze een eerste maal getrild op een triltafel. Daar waar nodig werden de mallen nog aangevuld met mortel zodat een 50mm hoog mortelproefstuk bekomen werd. Vervolgens werd nog een tweede maal kort getrild, waarna de bovenzijde van de proefstukken afgestreken werd.



**Figuur 3-2: Inklemming van de mallen op de triltafel.**

Zoals te zien op Figuur 3-2 werden niet alle mallen voorzien van visdraad en capsules. De lege mallen dienden als referentie, ongescheurde of manueel geheelde proefstukken. In paragraaf 3.2.4 wordt dit verder toegelicht.

Na het storten van de mortel werden de proefstukken bewaard in een geklimatiseerde ruimte met een temperatuur van  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  en relatieve vochtigheid van meer dan 95%. Na 24 uur werden de proefstukken ontkist door een zaagsnede te maken in de pvc mal. De proefstukken werden vervolgens onder water bewaard in de geklimatiseerde ruimte tot een leeftijd van 21 dagen.

### 3.1.7 Prismatische mortelproefstukken

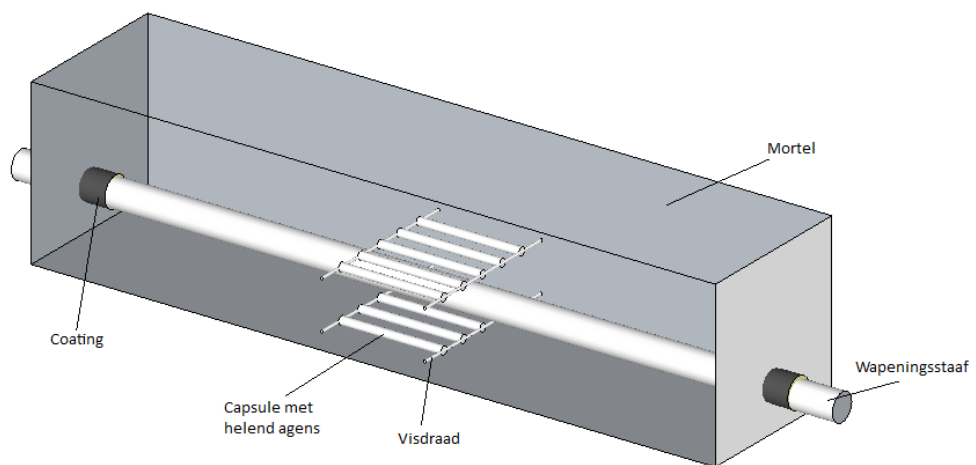
Teneinde corrosiemetingen uit te voeren, werden prismatische balken met afmeting  $500 \times 120 \times 120 \text{mm}^3$  gestort. Deze bevatten een 600mm lange wapeningsstaaf S500 met diameter 10mm. De wapeningsstaaf stak aan weerszijden van de balk 50mm uit om de werkelektrode op de wapening te kunnen aansluiten (zie 3.2.8). Er werd 25mm betondekking op de wapening voorzien. Om eenzelfde referentietoestand te bekomen werd de wapening voorafgaandelijk gereinigd. Eerst werden de wapeningsstaven gedurende 5 minuten ondergedompeld in een chemische reinigungsoplossing. Deze bestond uit een 1:1 verhouding van zoutzuur (HCl) en gedestilleerd water, waaraan 3g/l urotropine ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$ ) werd toegevoegd. Vervolgens werden de staven in een maatcilinder, gevuld met de reinigungsoplossing, in een ultrasoon bad geplaatst gedurende 2 minuten. Dit wordt weergegeven in Figuur 3-3. Aangezien geen enkele maatcilinder, noch een ander object de wapening volledig kon onderdompelen in deze fase, werd de wapening omgedraaid en nog een tweede maal gedurende 2 minuten in het ultrasoon bad geplaatst. Daaropvolgend werd de wapening gespoeld met gedestilleerd water en gedroogd m.b.v. een haardroger en een elektrisch vuurtje. Om een in de praktijk gebruikte wapeningstaaf te simuleren, werd de wapening uiteindelijk voorgeroest door ze 2 weken in de geklimatiseerde ruimte ( $20^{\circ}\text{C}$ , R.V. 95%) te bewaren. Hierbij werden de staven aan hun uiteinden opgelegd op een PVC mesoplegging. Zo konden de staven uniform corroderen langs hun hele omtrek. Daags voor het storten van de mortel werd de wapening gecoat met epoxy (SikaCor-277) ter hoogte van het uittredevlak van de wapeningsstaaf. De wapening werd aan weerszijden van dit vlak over een lengte van 2cm gecoat (zie Figuur 3-4). Op deze plaats was het risico op ernstige degradatie van de wapening immers het grootst aangezien de wapening er niet gepassiveerd werd en mogelijks blootgesteld werd aan chloriden. Dit diende vermeden te worden opdat de potentiaalmetingen niet beïnvloed zouden worden.



Figuur 3-3: Plaatsen van de wapening in het ultrasoon bad.

Net zoals bij de cilindrische mortelproefstukken werden de capsules op visdraad gelijmd met MMA. De visdraad was bevestigd aan de houten bekisting op een hoogte van 12,5mm en 47,5mm, gemeten vanaf de onderzijde van de balk (zie Figuur 3-4). Uiteraard werden eveneens proefstukken zonder visdraad en capsules voorzien die als referentie, ongescheurde of manueel geheelde proefstukken dienden (zie paragraaf 3.2.4).

Wederom werden de proefstukken na het storten van de mortel bewaard in de geklimatiseerde ruimte (20°C en 95% R.V). Na 24 uur werden de proefstukken ontkist. De uiteinden van de wapening werden volledig omwikkeld met parafilm om degradatie aan de uiteinden te verhinderen. De proefstukken werden vervolgens onder water bewaard in de geklimatiseerde ruimte tot een leeftijd van 21 dagen.

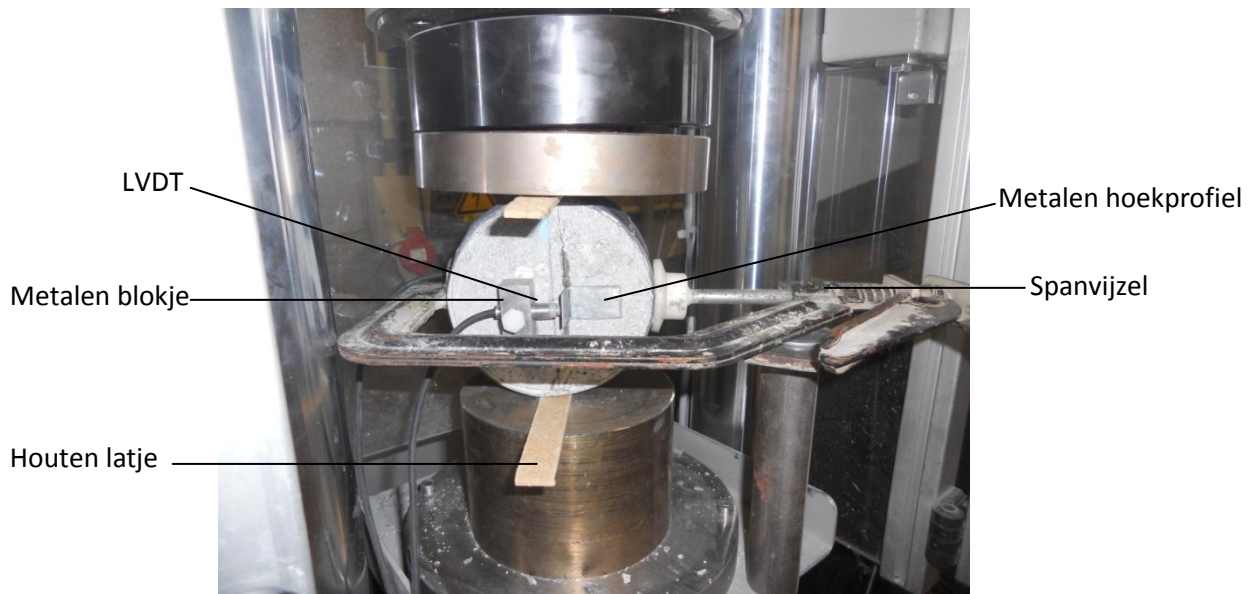


Figuur 3-4: Schetsmatige voorstelling prismatische mortelproefstukken.

## 3.2 Methoden

### 3.2.1 Scheurvorming cilindrische mortelproefstukken

Op een leeftijd van 21 dagen werden de proefstukken uit het water gehaald en werd het afstrijkvlak geëffend. De proefstukken werden daartoe op de slijpbank vastgezet en vervolgens haaks afgeslepen met een slijpmachine. Na droging werd de omtrek van de mortelcilinders een eerste maal gecoat met een 2-componenten epoxy (SikaCor-277). Wanneer de epoxy uitgehard was, kon een verplaatsingsgestuurde slijtproef met de W+B BD 250/15 testmachine uitgevoerd worden. De coating diende samen met de spanvijzel om het uit elkaar vallen van het proefstuk in twee helften te voorkomen. De spanvijzel werd steeds zo goed als mogelijk loodrecht op het scheurvvlak aangebracht. Tussen het proefstuk en de testmachine werden plexihouten latjes geplaatst zodoende een gelijkmatig verdeelde lijnlast op het proefstuk ontstond.



**Figuur 3-5: Proefopstelling scheurvorming cilindrische mortelproefstukken.**

Aan beide vlakke zijden van het proefstuk werd een *linear variable differential transformer* (LVDT, Solartron AX/0.5/S) met een meetbereik van 1mm en nauwkeurigheid van  $1\mu\text{m}$  geplaatst. De scheurwijdte van een doorgaande scheur kan immers variëren naargelang de zijde van het proefstuk. Door twee LVDT's aan te sluiten op de testmachine werd de gemiddelde scheurwijdte bepaald, welke gebruikt werd om de splijtproef te sturen. De LVDT werd geklemd in een metalen blokje dat vastgelijmd werd aan het proefstuk met secondelijm (Loctite 401). Aan de andere zijde van het te creëren scheurvlak werd een metalen hoekprofiel opgelijmd. Wanneer een scheur ontstaat, verwijderen beide helften zich van elkaar waardoor de tip van de LVDT uitschuift. Aldus wordt de scheurwijdte aan het oppervlak gemeten.

De splijtproef werd verplaatsingsgestuurd uitgevoerd totdat een gemiddelde scheurwijdte van  $400\mu\text{m}$  onder belasting bekomen werd. Aangezien de proefstukken ongewapend waren, vertoonden deze een extreem bros scheurgedrag met potentieel excessieve scheurwijdte vorming of zelfs verbrijzeling tot gevolg. Om dit te vermijden werd de snelheid waarmee de scheurwijdte toenam bij het begin van de meting beperkt tot  $0,000125\text{mm/s}$  totdat een doorgaande macroscheur waargenomen kon worden. Vervolgens werd de snelheid stapsgewijs verhoogd tot maximaal  $0,002\text{mm/s}$ . Nadat een scheur van  $400\mu\text{m}$  bereikt was, werd het proefstuk ontlast met een snelheid van  $0,5\text{kN/s}$ .

### **3.2.2 Scheurvorming prismatische mortelproefstukken**

Tussen de leeftijd van 21 en 28 dagen werden de balken onderworpen aan een driepuntsbuigproef. Er werd een groef met een diepte van  $\pm 4\text{mm}$  voorzien in het midden van het proefstuk, zodat de scheur gedwongen werd daar te ontstaan. Twee LVDT's werden aan de onderzijde van de balk over de groef opgelijmd op een analoge wijze als hiervoor beschreven. De LVDT's waren gepositioneerd op 2cm van de langsas van de balk. De ongescheurde balken (deze werden niet aan een driepuntsbuigproef onderworpen) werden eveneens voorzien van een groef zodoende iedere balk eenzelfde referentietoestand bekam.

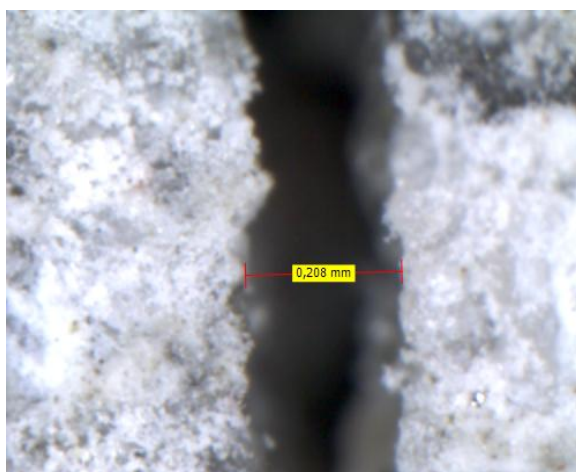


**Figuur 3-6: Driepuntsbuigproef.**

De oplegrollen werden 48cm uit elkaar verwijderd. De rol die overlans op Figuur 3-6 in het midden ligt, belette dat de LVDT's beschadigd zouden worden indien de balk brak, maar maakte geen contact indien de driepuntsbuigproef feilloos verliep. De verplaatsingsgestuurde proef nam aan met een snelheid van 0,0005mm/s tot een scheurwijdte van 25 $\mu$ m bereikt was. Bij deze scheurwijdte werd er reeds een macroscheur vastgesteld. Vervolgens werd de snelheid verhoogt naar 0,005mm/s. De proef werd stopgezet indien een scheurwijdte van 400 $\mu$ m bereikt werd. De terugval van de scheurwijdte na ontlasting was groot (tot  $\pm 120\mu$ m), maar een grotere scheurwijdte onder belasting instellen was onmogelijk gezien de scheur dan over de ganse hoogte zou doorlopen met breuk tot gevolg. De eerste beproefde balken vertoonden eveneens ongewenste dwarskrachtscheuren, waardoor beslist werd *Fibre Reinforced Polymer* (FRP) wapening op te lijmen. Deze werkte als dwarskrachtwapening en geen enkele dwarskracht scheur werd nog waargenomen. De FRP wapening bestaat uit een orthogonaal net van zwarte koolstofvezels en witte glasvezels. De aanhechting werd verwezenlijkt door middel van de polymerisatie van een 2-componenten epoxylijm (Tradecc PC5800).

### **3.2.3 Opmeten van de scheurwijdtes**

Aangezien de scheurwijdtes na ontlasting steeds terug afnemen en de scheurwijdte sterk kan variëren langsheen de scheur, werd de scheurwijdte nadien opgemeten m.b.v. een stereo microscoop (Leica S8APO en DFC295 camera). Om de centimeter langsheen de scheur werd de scheurwijdte bepaald door middel van fotoanalyse met de software Leica. Het gemiddelde van de opgemeten scheurwijdtes werd verder gebruikt in de analyse van de resultaten. Het opmeten van de scheurwijdtes werd uitgevoerd voor zowel de cilindrische als de prismatische proefstukken. In het geval van de cilindrische mortelproefstukken werd de scheurwijdte enkel aan het afstrijkvlak opgemeten, gezien het bekistingsvlak niet aan een agressief milieu werd blootgesteld (zie paragraaf 3.2.6 en 3.2.7).



Figuur 3-7: Voorbeeld van het opmeten van een scheur met de software Leica.

### 3.2.4 Proefreeksen

In Tabel 3-2 wordt een overzicht gegeven van de verschillende courant gebruikte proefreeksen. Eveneens wordt de code vermeld welke in de bespreking van de resultaten zal gebruikt worden. De testreeks MAN BASF 2 is een herhaling van testreeks MAN BASF die uitgevoerd werd wegens tegenvallende zelfheling van deze laatste bij de chloride diffusietest. Tabel 3-3 geeft aan welke proefreeksen onderzocht werden bij de verschillende testmethoden.

Tabel 3-2: Beschrijving en afkorting testreeksen.

Code	Beschrijving
NT	Ongescheurd
REF	Gescheurd, niet geheeld
MAN BASF	Gescheurd, manueel geheeld met PU Meyco MP 355
MAN BASF 2	Herhaling van testreeks MAN BASF
MAN SLV	Gescheurd, manueel geheeld met PU Flex SLV
MAN WRA	Gescheurd, manueel geheeld met WRA Silres BS 1701
CAPS BASF	Gescheurd, geheeld met PU Meyco MP 355 door inkapseling
CAPS SLV	Gescheurd, geheeld met PU Flex SLV door inkapseling
CAPS WRA	Gescheurd, geheeld met WRA Silres BS 1701 door inkapseling

Tabel 3-3: Aanduiding uitgevoerde proeven per proefreeks.

Code	CO <sub>2</sub> diffusietest (2 weken)	CO <sub>2</sub> diffusietest (9 weken)	Chloride diffusietest	Corrosiemetingen
NT	X	X	X	X
REF	X	X	X	X
MAN BASF	X	X	X	X
MAN BASF 2			X	
MAN SLV			X	X
MAN WRA			X	X
CAPS BASF	X	X	X	X
CAPS SLV			X	X
CAPS WRA			X	X

### 3.2.5 Scheurherstel

Manueel scheurherstel werd bekomen door het helend agens met een spuit en naald rechtstreeks in de scheur te injecteren. De zone naast de scheur werd afgeplakt met tape zodoende enkel de scheur geheeld werd en de indringing aan het morteloppervlak buiten de scheur niet verstoord werd t.o.v. andere proefreeksen. In het geval van het PU van BASF werden het prepolymer en de accelerator voorgemengd en met één spuit in de scheur geïnjecteerd.

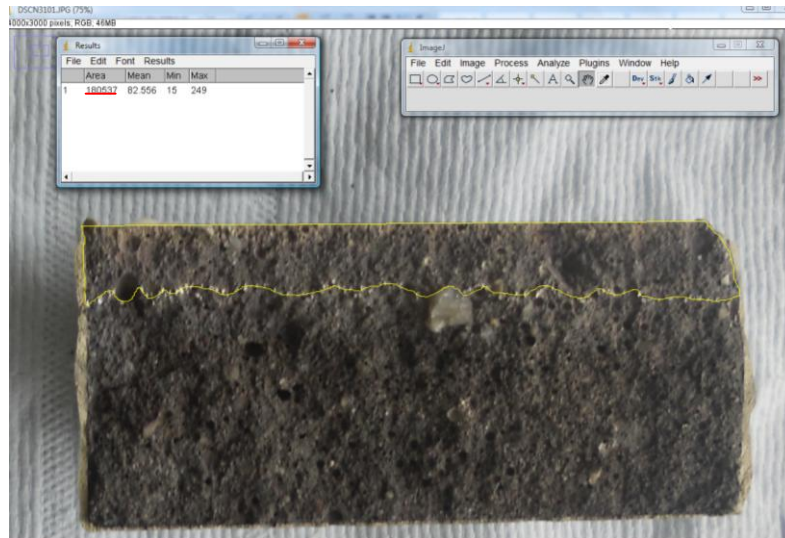
Het autonoom scheurherstel werd verwezenlijkt door het breken van de capsules bij het vormen van de scheuren. De helende agentia vloeiden in de scheur door capillaire krachten. Het uitvloeien van het helend agens werd steeds waargenomen aan het oppervlak bij het vormen van de scheuren.

### 3.2.6 Chloride diffusietest

De chloride diffusietest was gebaseerd op de NT Build 443 test methode. De omtrek en het bekistingsvlak van de cilindrische mortelproefstukken werden na het creëren van de scheur en de eventuele manuele heling gecoat met epoxy (SikaCor-277). Hierdoor werd enkel het afstrijkvlak blootgesteld aan de oplossing. Op 28 daagse leeftijd werden de proefstukken ondergedompeld in een verzadigde  $\text{Ca(OH)}_2$  oplossing voor een periode van 7 dagen. De verzadigde oplossing zorgt ervoor dat diffusie het enige transportmechanisme is. Nadien werden de samples ondergedompeld in een 165g/l (of 2,8mol/l) NaCl oplossing bij 20°C. De proefstukken werden met het vrije oppervlak naar boven geplaatst, 6cm onder het vloeistofoppervlak. De chloriden konden hierbij enkel via het niet gecoate oppervlak diffunderen. Om verdamping van het water en dus stijging van de concentratie NaCl tegen te gaan, werden de oplossingen afgesloten met een deksel. Na 7 weken werden alle proefstukken uit de oplossing gehaald.

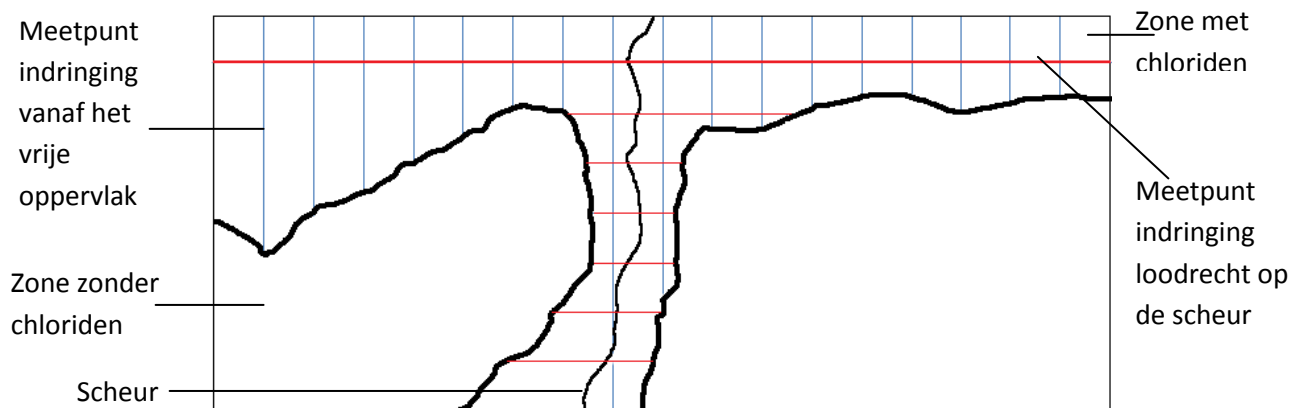
Een deel van de proefstukken werd gespleten loodrecht op de scheur, waarna de beide helften besprenkeld werden met een 0,1M  $\text{AgNO}_3$  oplossing. Het chloride penetratiefront werd door precipitatie van AgCl kristallen afgetekend door een zilverwitte kleurverandering. De zones waar nog geen chloriden in doorgedrongen zijn kleuren donker bruin door de vorming van  $\text{Ag}_2\text{O}$  na de binding van het zilver met hydroxylionen in de mortel. De kleuromslag vindt plaats bij een chlorideconcentratie van 0,20% t.o.v. de cementmassa wat net hoger is dan de steeds in beton aanwezige concentratie aan chloriden. Aangezien er soms een verschillende aftekening van het chloridenfront op beide helften van eenzelfde proefstuk werd waargenomen, werden beide helften verder bestudeerd in de analyse. Om een indicatie te verkrijgen over de efficiëntie van de helende agentia werden volgende zaken opgemeten:

- De verhouding van de oppervlakte waarin chloriden binnengedrongen waren op de totale oppervlakte van de proefstukhelft. Dit werd bekomen door de oppervlaktes af te tekenen op foto's m.b.v. de software ImageJ. Hiermee kon het aantal pixels van een geselecteerd gebied gemeten worden. De verhouding van het aantal pixels in de gebieden met chloriden en van de volledige proefstukhelft is dan gelijk aan de oppervlakteverhouding. Figuur 3-8 illustreert de werking van ImageJ.



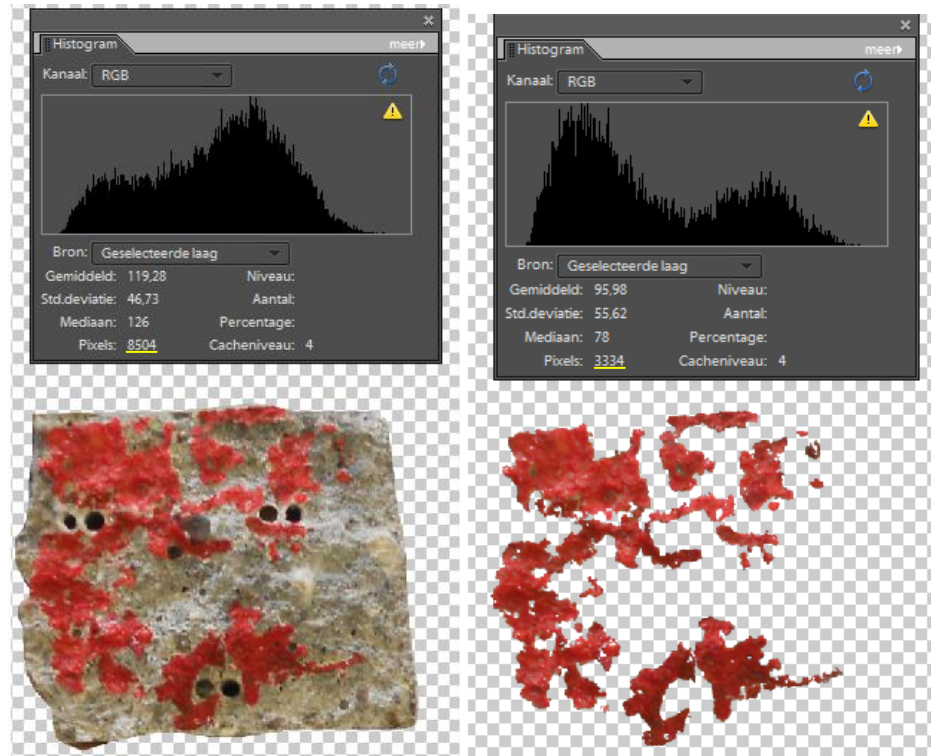
**Figuur 3-8: Bepaling van de oppervlakte waarin chloriden binnengedrongen zijn m.b.v. ImageJ. Het aantal pixels kan afgelezen worden boven de rode lijn.**

- Om de halve centimeter langsheen het blootgestelde vlak werd de indringing vanaf dit vlak gemeten. Dit wordt voorgesteld door de blauwe lijnen in Figuur 3-9.
- Eveneens werd de indringing loodrecht op de scheur opgemeten. Dit gebeurde wederom om de halve centimeter langs de scheur. De rode lijnen in Figuur 3-9 geven dit weer.



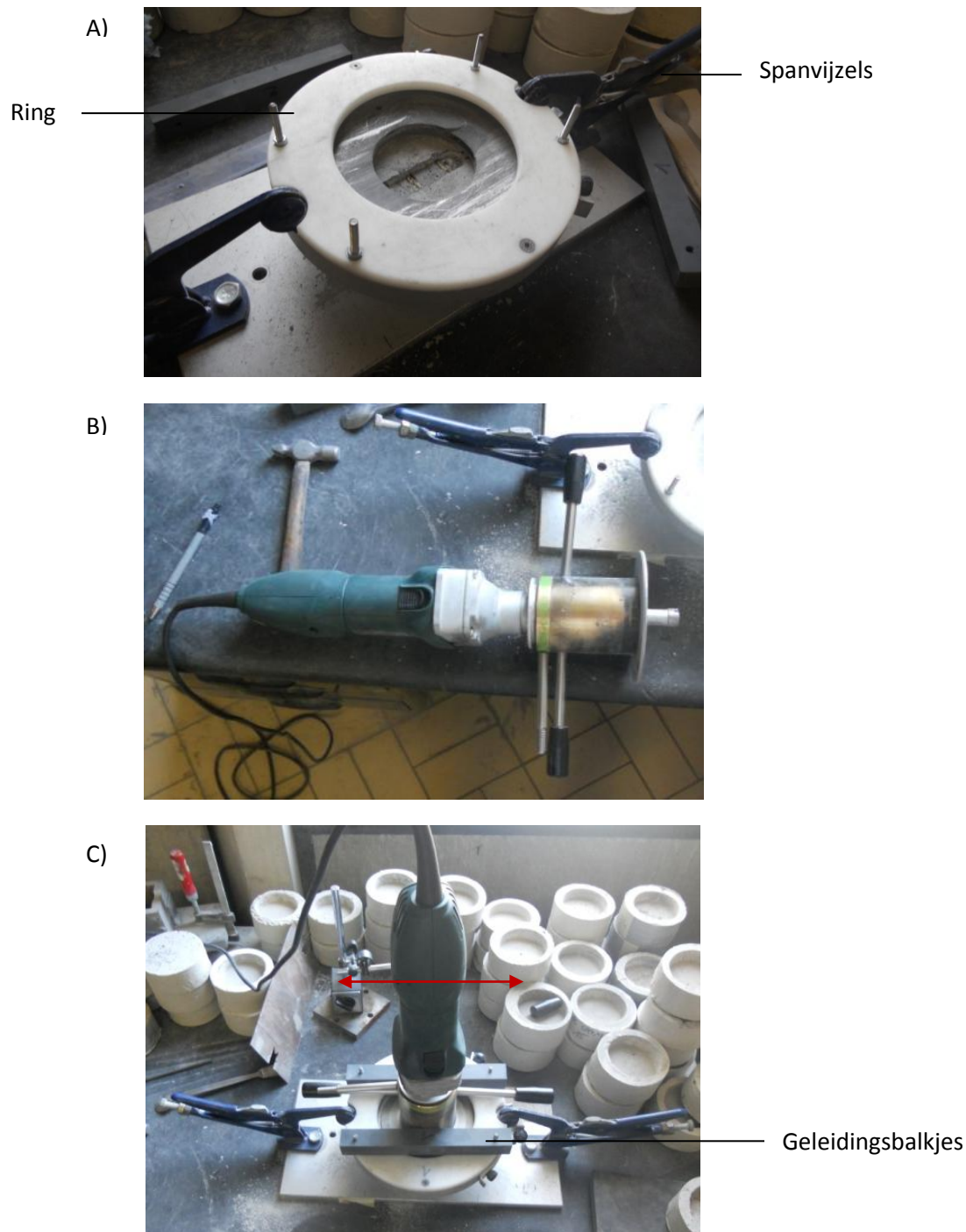
**Figuur 3-9: Schematische voorstelling van het opmeten van een proefstukheft.**

- In het geval van de proefstukken met PU van BASF en PU Flex SLV werden de helften van de proefstukken nogmaals gespleten, ditmaal volgens de scheur. De zichtbare oppervlakten PU werden afgetekend met alcoholstift om m.b.v. adobe photoshop elements 6.0 de verhouding van de oppervlakte aan PU op de totale oppervlakte van het proefstukdeel op te meten. Door het PU in het rood in te kleuren, konden deze zones makkelijker geselecteerd worden op basis van de kleurintensiteit. De geselecteerde zones werden in lagen gedefinieerd, zodat het aantal pixels in de laag bepaald kon worden. De verhouding van het aantal pixels was wederom gelijk aan de verhouding van de oppervlaktes.



**Figuur 3-10: Bepaling van de oppervlakte PU in de scheur: Het aantal pixels van de afbeelding kan boven de gele lijn afgelezen worden.**

Een tweede deel van de proefstukken werd gereserveerd om titraties op uit te voeren. Hiermee kon het chlorideprofiel in de scheur opgesteld worden door op verschillende dieptes de chlorideconcentratie te bepalen. Vooreerst diende poeder bekomen te worden op verschillende dieptes in het proefstuk. Het proefstuk werd geklemd op een werktafel zoals te zien op Figuur 3-11 A. Twee aan de werktafel geboute spanvizels klemmen een ring op het proefstuk. Door PVC geleidingsbalkjes evenwijdig met de scheur op de ring te bevestigen, kon de *profile grinder* (PF1100 German Instruments) enkel over de scheur heen bewogen worden. De *profile grinder* was voorzien van een diamanten boorkop met een diameter van 18mm, waarmee telkens laagjes van 2mm afgemaald werden. Het bekomen poeder werd verzameld met een lepel en bewaard in een lagedichtheidpolyethyleen (LDPE) zakje. Ieder proefstuk werd afgemaald tot op een diepte van 20mm.



**Figuur 3-11: Uitvoeringsprocedure bij het afmalen: A) Klemmen van het proefstuk, B) De *profile grinder*, C) Bevestigen van de geleidingsbalkjes.**

Enkele dagen voor het uitvoeren van de eigenlijke titratie, werd het poeder gezeefd op een  $160\mu\text{m}$  zeef en gedroogd op  $80^\circ\text{C}$  gedurende minstens 24 uur. Het totale chloridegehalte werd bepaald volgens de volgende werkwijze: eerst werd  $\pm 2\text{g}$  van het gedroogde poeder afgewogen op een weegschaal met een nauwkeurigheid van  $0,0001\text{g}$ . De exacte massa werd steeds bijgehouden en verwerkt in de formules ter bepaling van het chloridegehalte. Aan de beker met  $2\text{g}$  poeder werd  $35\text{ml}$  gedestilleerd water en  $5\text{ml}$  salpeterzuur ( $0,3\text{M HNO}_3$ ) toegevoegd. De oplossing werd manueel geroerd gedurende 1 minuut waarna het net tot koken gebracht werd. Na afkoeling werd de

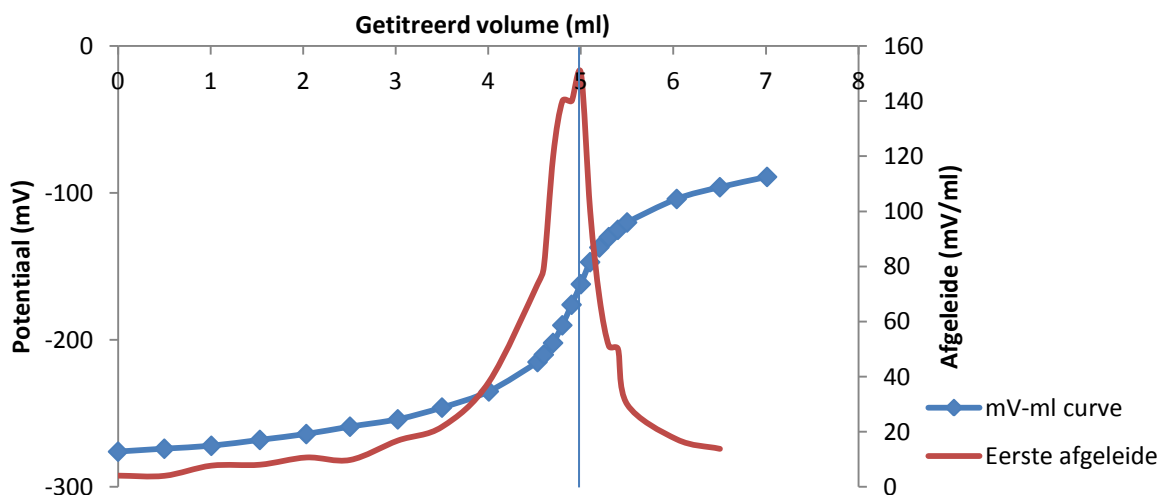
oplossing over filterpapier in een maatkolf gegoten. De maatkolf werd aangelengd tot 100ml oplossing bekomen werd, door de beker na te spoelen met gedestilleerd water. De uiteindelijke analyseoplossing werd bekomen door 10ml uit de maatkolf te pipetteren in een oplossing van 20ml 0,3M HNO<sub>3</sub> en 20ml gedestilleerd water.

Aan de hand van de analyseoplossing kon de chlorideconcentratie van de desbetreffende laag bepaald worden m.b.v. het Metrohm MET 702 automatisch titreertoestel. Deze voert een potentiometrische titratie uit met als titratievloeistof een 0,01M AgNO<sub>3</sub> oplossing. De titratievloeistof wordt via een pompsysteem aan de analyseoplossing toegevoegd, die zich op een magnetische roerder bevindt. Een 'Ag/0..70°C KNO<sub>3</sub> sat.' elektrode meet terwijl de potentiaal van de oplossing. Aangezien de concentratie van de titratievloeistof niet exact gekend is, moet deze eerst gesteld worden. Ook de potentiaal waarbij alle AgNO<sub>3</sub> gebonden is aan het NaCl is afhankelijk van de omgevingstoestand (relatieve vochtigheid, temperatuur,..). Zodoende dient men het toestel eerst te kalibreren.

Om het toestel te kalibreren werd eerst een manuele titratie uitgevoerd met een kalibratie oplossing van 20ml 0,3M HNO<sub>3</sub>, 25ml gedestilleerd water en 5ml 0,01M NaCl. De potentiaal werd hierbij afgelezen per toevoeging van 0,5ml zilvernitraat tot 0,5ml voor het geschatte buigpunt van de mV-ml curve. Dit buigpunt kon geschat worden met volgende formule:

$$\text{Concentratie AgNO}_3 * \text{Volume AgNO}_3 = \text{Concentratie NaCl} * \text{Volume NaCl} \quad (3.1)$$

Aangenomen dat de concentratie NaCl exact 0,01M is, het volume NaCl in de kalibratie oplossing 5ml bedraagt en de concentratie AgNO<sub>3</sub> op 0,01M geschat kan worden, zal het geschatte buigpunt van de mV-ml curve dus op een getitreerd volume van 5ml AgNO<sub>3</sub> liggen. Wanneer 4,5ml getitreerd was, werd het getitreerd volume toegevoegd per 0,1ml tot in totaal 5,5ml toegevoegd was. Vervolgens werd de potentiaal nog afgelezen voor de volgende 2ml toegevoegde AgNO<sub>3</sub>. Om de gedachten te vestigen wordt in Figuur 3-12 een voorbeeld gegeven van de bekomen mV-ml curve na dergelijke manuele titratie.



Figuur 3-12: Voorbeeld van een mV-ml curve met bijhorende eerste afgeleide bekomen na een manuele titratie.

Uit de mV-ml curve kon de potentiaal waarbij het exacte buigpunt gelegen is bepaald worden. Deze potentiaal diende dan als input om een tweede automatische kalibrerende titratie uit te voeren. Een nieuwe kalibratie oplossing werd automatisch getitreerd waaruit uiteindelijk een getitreerd volume  $\text{AgNO}_3$  kon afgelezen worden. Uit dit volume kon dan wederom met formule (3.1) de exacte concentratie van de titreervloeistof op het moment van de analyse bepaald worden. Deze exacte concentratie is van belang bij de bepaling van het totaal chloridegehalte. Na kalibratie konden de analyseoplossingen getitreerd worden. Het resultaat hiervan is telkens een getitreerd volume  $\text{AgNO}_3$ . Het totaal chloridegehalte voor een bepaalde laag wordt dan gegeven door:

$$[\text{Cl}^-] = \frac{10 \cdot 100 \cdot 35,45 \cdot \text{exacte } [\text{AgNO}_3] \cdot \text{getitreerd vol. AgNO}_3}{1000 \cdot \text{massa poeder}} \quad (3.2)$$

Met:

- $[\text{Cl}^-]$  de concentratie chloriden uitgedrukt in massapercent t.o.v. de mortel.
- 10 een verdunningsfactor rekening houdend met het feit dat 10ml uit 100ml oplossing werd gepipetteerd.
- 35,45 de atoommassa van Cl uitgedrukt in g/mol.
- De exacte concentratie  $\text{AgNO}_3$  (mol/l) deze bekomen uit de kalibratie.
- Het getitreerd volume  $\text{AgNO}_3$  (ml) het resultaat van de titratie van de analyseoplossing.
- 1000 een factor rekeninghoudend met de consistentie van de eenheden.
- de massa poeder (g) de exacte massa die afgewogen werd bij het aanmaken van de analyseoplossing en  $\pm 2\text{g}$  bedroeg.

Door de chlorideconcentratie in functie van de laagdiepte te plotten werd het chlorideprofiel in de scheur bekomen.

Aanvullend werd de niet-stationaire diffusiecoëfficiënt  $D_{\text{nssd}}$  bepaald. De berekeningsmethode is gebaseerd op de tweede wet van Fick:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{\text{nssd}} \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (3.3)$$

Hierin is  $c(x,t)$  de chlorideconcentratie op diepte  $x$  en tijdstip  $t$  in massapercent mortel. Om de oplossing van de differentiaalvergelijking te vereenvoudigen wordt  $D_{\text{nssd}}$  constant verondersteld volgens Yuan et al. (2009), wat een courante benadering is in de literatuur. De oplossing van de tweede wet van Fick wordt dan:

$$c(x, t) = c_s - (c_s - c_i) \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4D_{\text{nssd}}t}} \right) \quad (3.4)$$

Met:

- $c_s$  de totale chlorideconcentratie aan het oppervlak in massapercent mortel.
- $c_i$  de initiële totale chlorideconcentratie voor een bepaald laagje in massapercent mortel.
- $D_{\text{nssd}}$  de niet-stationaire diffusiecoëfficiënt in  $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ .
- $x$  de afstand van het oppervlak tot het midden van de beschouwde laag in meter.
- $t$  de blootstellingsduur in seconden.

Op basis van Yuan et al. (2009) wordt aangenomen dat  $c_i$  0m% bedraagt. Hierdoor treedt een kleine fout op die verwaarloosd wordt. Om een eenvoudigere formule te bekomen wordt de errorfunctie (erf) eveneens benaderd door een cumulatieve normale verdeling. Uiteindelijk wordt volgende formule bekomen:

$$c(x, t) = c_s - 2c_s \left[ \Phi \left( \frac{\sqrt{2}x}{\sqrt{4D_{nssd}t}} \right) - \frac{1}{2} \right] \quad (3.5)$$

Door bovenstaande formule aan te passen aan de experimenteel bekomen chlorideconcentraties d.m.v. een niet-lineaire regressie analyse in overeenstemming met de methode der kleinste kwadraten kan de diffusiecoëfficiënt bepaald worden. Hierbij dient de eerste laag nabij het blootgestelde oppervlak uit de regressieanalyse weggelaten te worden, in overeenstemming met NT Build 433 (1995). De regressieanalyse levert dan niet enkel de geschatte waarde van  $D_{nssd}$  maar ook de oppervlakteconcentratie  $c_s$ . De regressieanalyse werd uitgevoerd met het softwarepakket SPSS Statistics 20.

De chloride diffusietest werd uitgevoerd op alle in Tabel 3-2 beschreven proefreeksen. Van iedere proefreeks werden 5 proefstukken verwerkt in de analyse met besprenkeling van  $AgNO_3$ . De titraties werden uitgevoerd op 3 proefstukken per proefreeks.

### 3.2.7 CO<sub>2</sub> diffusietest

Net als bij de chloride diffusietest werd de omtrek (een tweede maal) en het bekistingsvlak van de cilindrische proefstukken gecoat met epoxy SikaCor-277. Wanneer de proefstukken een leeftijd van 28 dagen bereikt hadden, werden deze in de CO<sub>2</sub> kast geplaatst. De CO<sub>2</sub> kast voorzag een relatieve vochtigheid van 65% en CO<sub>2</sub> gehalte van 10% bij een temperatuur van 20°C. Proefstukken werden gedurende 2 weken in de CO<sub>2</sub> kast bewaard, waarna ze gespleten werden loodrecht op de scheur. Er werden eveneens andere proefstukken gedurende 9 weken in de CO<sub>2</sub> kast bewaard, waarna ze tevens gespleten werden. Door de proefstukhelften te besprenkelen met fenolftaleïne werd het CO<sub>2</sub> diffusiefront afgetekend. De carbonatatie van de mortel gaat immers gepaard met een daling van de pH tot 8 à 9. Fenolftaleïne heeft de eigenschap om een kleuromslag te vertonen bij een pH van 9,5. Hierbij kleurt het niet gecarbonateerde deel paars. Het gecarbonateerde deel vertoont uiteraard geen kleuromslag. Analoog als in paragraaf 3.2.6 werden volgende zaken opgemeten op beide proefstukhelften:

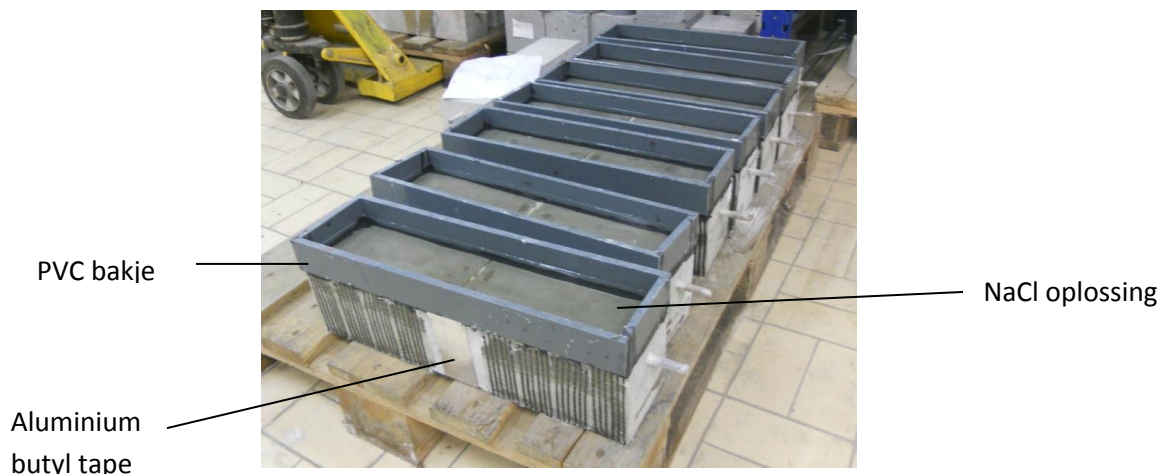
- De verhouding van de gecarbonateerde oppervlakte op het totale oppervlak van de proefstukhelft met m.b.v. ImageJ.
- Om de halve centimeter langsheen het blootgestelde vlak werd de indringing vanaf het niet gecoate vlak gemeten op het slijtvlak.
- Om de halve centimeter langsheen de scheur werd de indringing loodrecht op scheur opgemeten op het slijtvlak.
- De helften van de gehele proefstukken werden nogmaals gespleten, ditmaal volgens de scheur. De verhouding van de oppervlakte bedekt met PU op de totale oppervlakte van het proefstukdeel werd opgemeten met Photoshop.

Enkel de proefreeksen NT, REF, MAN BASF en CAPS BASF werden beproefd. Binnen iedere proefreeks werden 3 herhalingen voorzien.

### 3.2.8 Corrosiemetingen

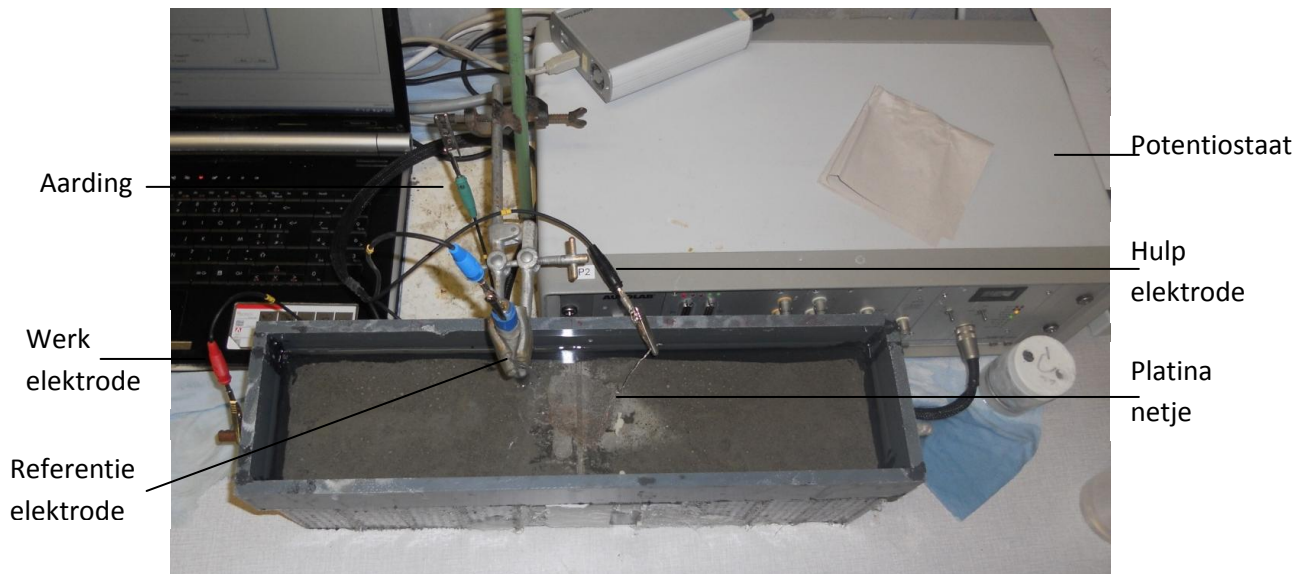
De proefopstelling is gebaseerd op het werk van Otieno et al. (2010). Op het bekistingsvlak (het vlak met de scheur, onderaan Figuur 3-6) werden de balken voorzien van een bassin. Deze bestond uit PVC rechthoekige plaatjes die aan elkaar gelijmd werden met siliconen (TEC7). De bakjes werden eveneens met siliconen op de balken gelijmd. Het contactoppervlak tussen de balken en een plaat van het bakje was 2,5mm breed. De zijkant van de scheur werd afgeplakt met aluminium butyl tape om eventueel lekken te vermijden. Bij de enkele balken waar fijne dwarskrachtscheuren zichtbaar waren, werden deze eveneens afgeplakt met een zeer smalle strook ( $\pm 2$ mm) aluminium butyl tape om indringing via deze scheuren te beperken.

In iedere één week durende cyclus werden de bakjes gedurende 3 dagen gevuld met een 165g/l NaCl oplossing. Er werd 1,2l oplossing in de bakjes gegoten, zodat  $\pm 2$ cm oplossing op de balken stond. De balken werden bewaard bij een temperatuur van 20°C en een R.V. van 65%. Net voor het verwijderen van de oplossing werd de potentiostaat meting uitgevoerd. Vervolgens werd de oplossing uitgegoten en kon de meting met de GalvaPulse (German Instruments A/S) aangevat worden. Daaropvolgend werden de balken 4 dagen lang aan de lucht (R.V. 65% en 20°C) blootgesteld. De cycli werden herhaald tot het einde van de masterscriptie.



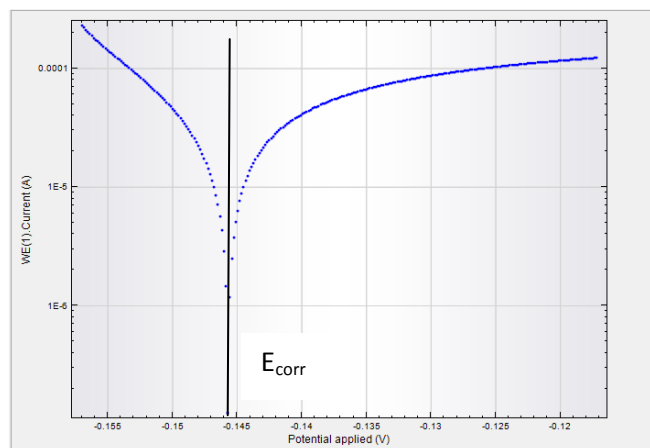
**Figuur 3-13: Blootstelling van prismatische mortelproefstukken aan NaCl oplossing.**

De potentiostatische meting (een LPR techniek) werd uitgevoerd met het Metrohm Autolab pgstat 10 toestel en de NOVA 1.10.1.9 software. De meetopstelling is weergegeven in Figuur 3-14. De rode werkelektrode werd met een klem steeds aangesloten op hetzelfde uiteinde van de wapening, waarvan de parafilm tijdelijk verwijderd werd. De appelblauwzeegroene aarding werd aangesloten op de duimvijzel van het statief die op zijn beurt de kalomelektrode (in het blauw) klemde. De kalomel referentie-elektrode werd zo dicht mogelijk naast het platina netje gepositioneerd. Dit netje werd boven de groef geplaatst en bevestigd met de zwarte hulpelektrode. Na het uitvoeren van de meting werd de kalomelektrode ( $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ) afgespoeld met gedestilleerd water en gedroogd met een papieren doek. Wanneer de kalomelektrode niet gebruikt werd, werd deze bewaard in een verzadigde KCl oplossing.



**Figuur 3-14: Meetopstelling tijdens het uitvoeren van een potentiostatische meting met het Metrohm Autolab toestel.**

In een eerste stap werd een HCP meting uitgevoerd met als doel de corrosiepotentiaal te bepalen. Tijdens de HCP meting werd het potentiaalverschil opgemeten tussen de wapening en de kalomel referentie-elektrode. Na 200s of indien de verandering van de potentiaal in de tijd ( $dE/dt$ ) kleiner was dan  $10^{-8}V/s$ , werd aangenomen dat het potentiaalverschil gestabiliseerd was. Deze waarde werd dan als input gebruikt om de feitelijke potentiostatische meting uit te voeren. Hierbij werd een potentiaal opgelegd aan de wapening zodat deze 20mV van z'n evenwichtspotentiaal afweek (zowel in de positieve als negatieve zin). Om de 0,15mV werd het daarbij optredende stroomverval opgemeten. Het resultaat van de meting was dan een typisch symmetrisch v-vormige curve indien het logaritme van de stroom  $I$  uitgezet werd in functie van de opgelegde potentiaal  $E$ . De corrosiepotentiaal  $E_{corr}$  is daarbij gelegen in het dal van de v-curve.

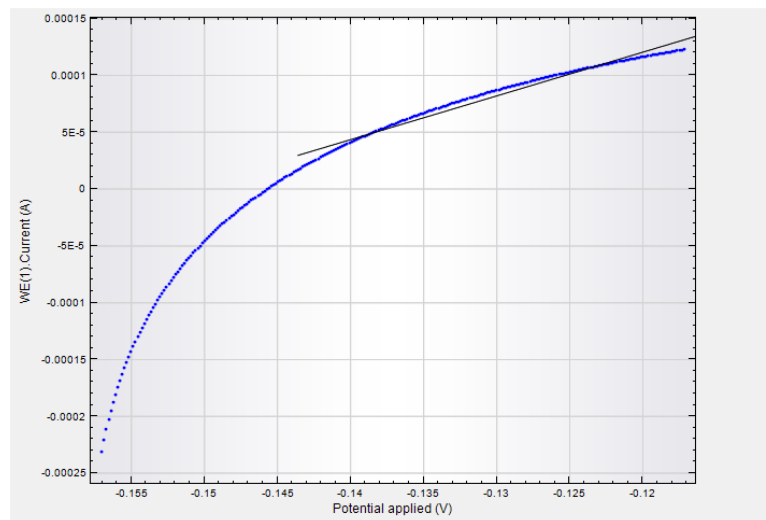


**Figuur 3-15: v-vormige curve indien  $\log I$  (A) uitgezet wordt i.f.v.  $E$  (V).**

De lezer bemerkt ongetwijfeld dat de curve in Figuur 3-15 niet perfect symmetrisch is. De asymmetrie is te verklaren door het feit dat er zich nog geen volledig stabiel circuit gevormd had. Hierdoor was er een afwijking (max. 10mV) in de corrosiepotentiaal bepaald met de HCP meting t.o.v. de corrosiepotentiaal bepaald met de potentiostatische meting. Aangezien de corrosiepotentiaal uit

de HCP meting als input van de potentiostatische meting gebruikt werd, leidde dit tot een asymmetrische curve. Niettegenstaande is het voorbeeld dat in Figuur 3-15 aangehaald werd voldoende nauwkeurig zolang de typische v-vorm zich voordoet (Stern & Geary, 1957). In de analyse van de resultaten werd de corrosiepotentiaal bepaald met de potentiostatische meting gebruikt aangezien deze meer nauwkeurig wordt geacht. Naarmate de proef vorderde, kon waargenomen worden dat de curves meer en meer symmetrisch werden doordat de corrosiegraad toenam. Een toename van de corrosiegraad leidde immers tot een stabiel elektrochemisch circuit.

Door de stroom te plotten in functie van de potentiaal dient volgens de theorie van de elektrochemie een rechte bekomen te worden. De richtingscoëfficiënt ( $dl/dE$ ) van deze rechte wordt dan gedefinieerd als de corrosiestroom  $I_{corr}$ . Wederom week de experimenteel bekomen curve af van de theoretische rechte doordat het elektrochemisch gecreëerde circuit onvoldoende stabiel was. Het is in de elektrochemie dan echter courante praktijk (Stern & Geary, 1957) om zoals in Figuur 3-16 een lineaire regressie uit te voeren op enkel het rechterdeel van de bekomen grafiek.



**Figuur 3-16: Verloop I in functie van de opgelegde potentiaal (blauw) en de toegepaste lineaire regressie (zwart).**

De richtingscoëfficiënt van de regressierechte  $I_{corr}$  is omgekeerd evenredig met de polarisatieweerstand  $R_p$ . De corrosiestroomdichtheid  $i_{corr}$  ( $\mu A/cm^2$ ) wordt volgens Stern & Geary (1957) gegeven door:

$$i_{corr} = \frac{B}{AR_p} \quad (3.6)$$

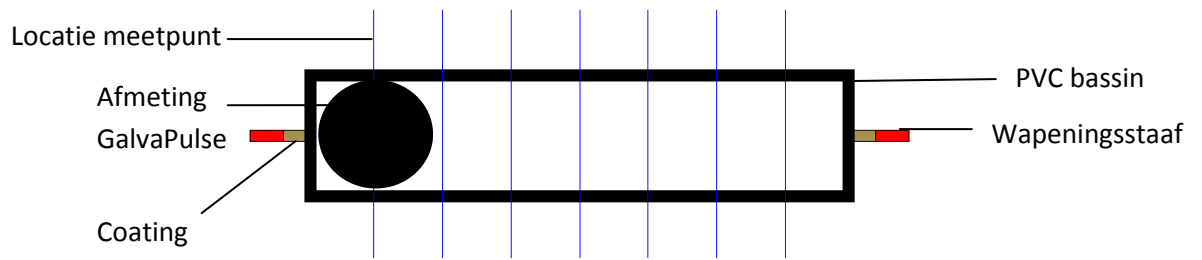
Met B de Stern-Geary constante, welke gelijk genomen wordt aan 26mV (Andrade et al., 2004) en A ( $cm^2$ ) de gepolariseerde oppervlakte van de wapening. Met D de diameter en l de lengte van de wapening die gepolariseerd is, herleidt de formule zich tot:

$$i_{corr} = \frac{B}{\pi D l R_p} \quad (3.7)$$

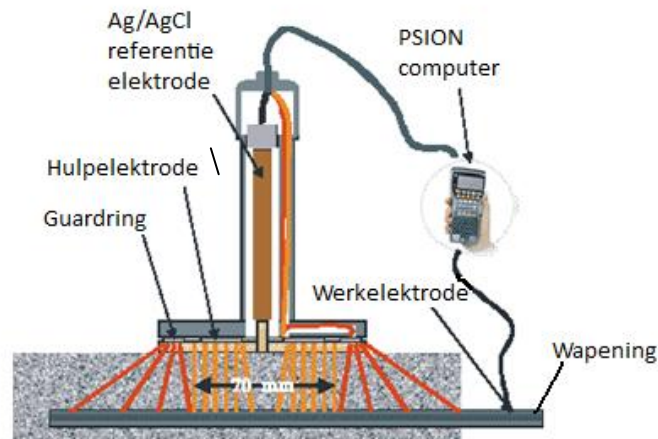
De diameter van de wapening bedroeg 10mm, terwijl de lengte van de wapeningsstaaf 60cm was. Er werd echter aangenomen dat enkel het ingebetonnerde gedeelte van de wapeningsstaaf gepolariseerd werd tijdens de meting zodat  $l = 50\text{cm}$  genomen werd. De aandachtige lezer merkt hierbij op dat de oppervlakte van de wapening slechts benaderd werd door een cilindrisch oppervlak terwijl de werkelijke oppervlakte groter zal zijn door de aanwezigheid van de ribben op de wapeningsstaaf. De benadering levert echter een veilige benadering op in de interpretatie van de resultaten aangezien deze leidt tot een grotere corrosiestroomdichtheid.

Het voordeel van de potentiostaat was ongetwijfeld z'n zeer grote nauwkeurigheid bij het gebruik in een laboratoriumomgeving. Naast de corrosiepotentiaal, die een indicatie van de waarschijnlijkheid op corrosie weergaf (zie Tabel 3-4), kon eveneens de corrosiestroomdichtheid bepaald worden. Dit laatste gaf inzicht in de ogenblikkelijke snelheid waarmee de wapening corrodeerde. De corrosiestroomdichtheid gaf dus veel beter dan de corrosiepotentiaal weer of de chloriden de wapening reeds bereikt hadden. De corrosiepotentiaal was immers afhankelijk van de begintoestand van de wapening. Hierdoor kon het zich bijvoorbeeld voordoen dat de wapeningsstaaf actief aan het corroderen was (volgens de interpretatie van  $E_{\text{corr}}$ ), echter met een zeer lage snelheid (lage  $i_{\text{corr}}$ ) omdat de chloriden de wapening nog niet bereikt hadden. Het nadeel van een potentiostatische meting is daarentegen het feit dat een gemiddelde waarde van de corrosiepotentiaal en corrosiestroomdichtheid bepaald wordt over de volledige lengte van de wapeningsstaaf. Chloride geïnitieerde corrosie is echter een zeer lokale vorm van aantasting, die een verhoogde corrosiegraad ontwikkeld op een klein deel van de wapening. In deze proefopstelling zou de aantasting zich waarschijnlijk ter hoogte van de scheur voordoen. Om dit te kunnen waarnemen, werden metingen met de GalvaPulse uitgevoerd.

Het GalvaPulse toestel kon twee types metingen uitvoeren: een HCP en een galvanostatische LPR meting. In de eerste week werd een galvanostatische puls meting uitgevoerd op 7 gelijk verdeelde punten langs het bekistingvlak (Figuur 3-17). Bij deze meting werd gedurende 10 seconden een anodische stroom van  $23\mu\text{A}$  gepulseerd door de hulpelektrode. De wapening werd hierdoor gepolariseerd in de anodische richting in vergelijking met z'n evenwichtspotentiaal. Ondertussen werd met de Ag/AgCl referentie-elektrode de verandering in potentiaal opgemeten. De software in de psion computer van de GalvaPulse voerde dan automatisch een linearisatie (met de methode van de kleinste kwadraten) uit op de experimenteel bekomen potentiaal-tijds curve. Met behulp van deze linearisatie werd dan de polarisati weerstand en dus ook de corrosiestroomdichtheid bepaald, welke op het scherm van de psion computer konden afgelezen worden, samen met de potentiaal-tijds curve. Deze laatste vertoonde bij de ingestelde 10s en  $23\mu\text{A}$  vrij weinig spreiding, waardoor een betrouwbare berekening van de corrosiestroomdichtheid aangenomen kon worden. Bij een grote spreiding in de meetpunten zou de linearisatie immers onnauwkeurig uitgevoerd worden.



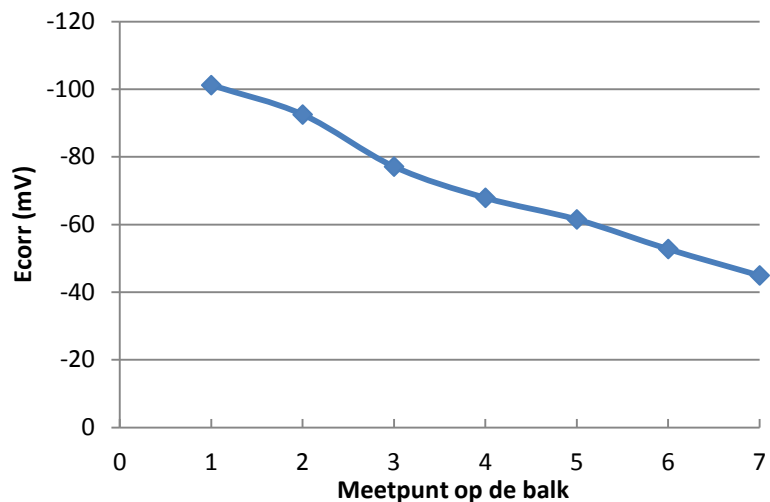
**Figuur 3-17: Aanduiding van de locatie van de 7 meetpunten (blauwe lijnen) op een schematische voorstelling van het bovenaanzicht van de prismatische mortelproefstukken.**



**Figuur 3-18: Schematische doorsnede GalvaPulse (Poursaee & Hansson, 2008).**

Figuur 3-18 geeft een schematische voorstelling van de GalvaPulse weer. De psion computer was verbonden met de wapening via de werkelektrode. De hulpelektrode en de *guardring* bestonden uit 2 circulaire zink elektroden met uitwendige/inwendige diameters van respectievelijk 60/30mm en 100/86mm. Tussen de elektroden en het proefstuk werd eveneens een natte spons aangebracht om een goede geleiding te verwezenlijken. De *guardring* was ingeschakeld (er kan ook zonder de *guardring* gewerkt worden) en diende ervoor te zorgen dat de wapening enkel over een zone van 70mm gepolariseerd werd.

Uit de metingen van de eerste week bleek echter dat de GalvaPulse meting de wapening te veel polariseerde en/of de *guardring* onvoldoende efficiënt werkte. Bij iedere balk kon een toename van de corrosiepotentiaal waargenomen worden naarmate de meting vorderde over de 7 meetpunten op eenzelfde balk (Figuur 3-19). Het feit dat deze waarneming zich bij iedere balk voordeed toonde aan dat de pulsmethode niet in staat was om een betekenisvolle meting uit te voeren met het oog op het bestuderen van een zeer lokaal effect. Ook op basis van de corrosiestroomdichtheden kon geen logisch besluit getrokken worden. Bij de ene balk nam  $i_{corr}$  monotoon toe met een stijgend aantal metingen, terwijl er eveneens balken waren waarbij  $i_{corr}$  monotoon afnam.



Figuur 3-19: Illustratie van de gevolgen van de polarisatie na toepassen van de galvanostatische pulsmeting.

Aangezien weinig nuttige informatie bekomen werd bij het uitvoeren van 7 metingen met de pulsmethode en de potentiostaat meting geacht werd  $E_{corr}$  en  $i_{corr}$  nauwkeuriger te bepalen, werd beslist om de galvanostatische metingen niet meer te herhalen.

Ter vervanging van de pulstechniek werd vanaf de 2<sup>e</sup> cyclus een eenvoudige HCP meting met het GalvaPulse toestel uitgevoerd. Zoals reeds vermeld werd dan enkel een potentiaalverschil tussen de referentie elektrode en de evenwichtspotential van de wapening opgemeten, zonder het opleggen van een potentiaal/stroom. Hierdoor werd het corrosiegedrag van de wapening dus niet beïnvloed. Door de *guardring* zou echter nog steeds een lokale (in een zone van 70mm)  $E_{corr}$  van de wapening gemeten worden, zodat een lokaal effect kon waargenomen worden. De GalvaPulse was hierdoor in staat het nadeel van de potentiostatische meting op te vangen. De HCP meting werd iedere week op dezelfde 7 gelijk verdeelde punten langsheen de balk uitgevoerd zoals aangeduid op Figuur 3-17.



Figuur 3-20: Meetopstelling GalvaPulse tijdens het uitvoeren van een HCP meting.

Tenslotte wordt in Tabel 3-4 een overzicht gegeven van de interpretatie van de bekomen corrosiepotentialen. De potentiostatische meting werd uitgevoerd met een kalomel referentie elektrode, terwijl het GalvaPulse toestel uitgerust was met een Ag/AgCl referentie elektrode. Tabel 3-5 geeft het verband weer tussen de toestand van de wapening en de corrosiestroomdichtheid.

Tabel 3-4: Waarschijnlijkheid op corrosie gebaseerd op  $E_{corr}$  volgens ASTM C876-91 (1999).

Corrosie activiteit	$E_{corr}$ (mV) Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	$E_{corr}$ (mV) Ag/AgCl
Lage kans op corrosie (10%)	>-125	>-106
Verhoogde kans op corrosie	-125 tot -275	-106 tot -256
Hoge kans op corrosie (90%)	<-276	<-256
Ernstige degradatie	<-426	<-406

Tabel 3-5: Relatie tussen de toestand van de wapening en  $i_{corr}$  volgens Andrade et Al. (1990).

Toestand van de wapening	Corrosiestroomdichtheid $i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
Gepassiveerde wapening	<0,1
Laag tot gemiddelde corrosie	0,1 tot 0,5
Gemiddeld tot hoge corrosie	0,5 tot 1
Zeer actieve corrosie	>1

De corrosiemetingen werden uitgevoerd op alle in Tabel 3-2 vermelde proefreeksen. Iedere proefreeks was voorzien van drie herhalingen met uitzondering de reeks CAPS SLV. Deze laatste reeks bestond uit slechts twee proefstukken, aangezien het derde dwarskrachtscheuren vertoonde.

Aangezien de invloed van de verzadigingsgraad van de balken op het resultaat van de corrosiemetingen groot geacht wordt, werden vier extra ongescheurde balken aangemaakt. Een eerste balk werd permanent bewaard bij dezelfde klimatologische omstandigheden als alle andere proefstukken, maar werd echter niet blootgesteld aan chloriden. De balk (afkorting KRUIPZAAL) werd enkel bevochtigd met kraantjeswater voor het uitvoeren van de GalvaPulse meting. De potentiostatische meting kon hierop niet verwezenlijkt worden. Een tweede balk (afkorting OND H<sub>2</sub>O) werd permanent volledig ondergedompeld in een bak water. Het bovenvlak van de balk lag 2cm onder de waterspiegel. Enkel tijdens de GalvaPulse meting werd de balk uit de bak gehaald. Om de potentiostatische meting uit te voeren, werd de balk half uit de met water gevulde bak gelicht. Het platina netje en de referentie elektrode werden tijdens de meting manueel vastgehouden in het water. Een derde balk (afkorting OND NaCl) werd permanent volledig ondergedompeld in een 165g/l NaCl oplossing. Het bovenvlak van de balk lag eveneens 2cm onder het vloeistofoppervlak. De corrosiemetingen geschieden op dezelfde wijze als de balk OND H<sub>2</sub>O. Tenslotte werd nog een balk (afkorting CONT NaCl) voorzien van eenzelfde opgelijmd bakje als de normale proefreeksen. Het bakje werd echter permanent gevuld met de NaCl oplossing. Enkel tijdens de GalvaPulse meting werd de oplossing uitgegoten om onmiddellijk erna het bakje terug te vullen met een nieuwe NaCl oplossing.

### 3.2.9 Statistische gegevensverwerking

De resultaten werden statistisch geanalyseerd m.b.v. de software SPSS Statistics 20. Twee gemiddelden werden vergeleken door het uitvoeren van een t-test. Bij het vergelijken van meerdere gemiddelden werd een Analysis of Variance (ANOVA) uitgevoerd. Hierbij werden de afhankelijke variabelen (de meetwaarden) berekend en op basis van een Levene's test werd de homogeniteit van de varianties bestudeerd. Bij homogene varianties werd de meervoudige vergelijkingstoets van Student-Newman-Keuls uitgevoerd. Wanneer de varianties niet homogeen waren, werd een Dunnett's T3 test uitgevoerd. Op basis van de twee laatst vermelde testen kon besloten worden of de gemiddelden significant verschillend waren. Er werd hierbij steeds een significantieniveau van 5% gehanteerd.

Alle grafieken in Hoofdstuk 4 -Resultaten en discussie- geven gemiddelde waarden aan, tenzij expliciet anders vermeld. De foutenbalken geven de standaardfouten op de gemiddelde waarden weer.

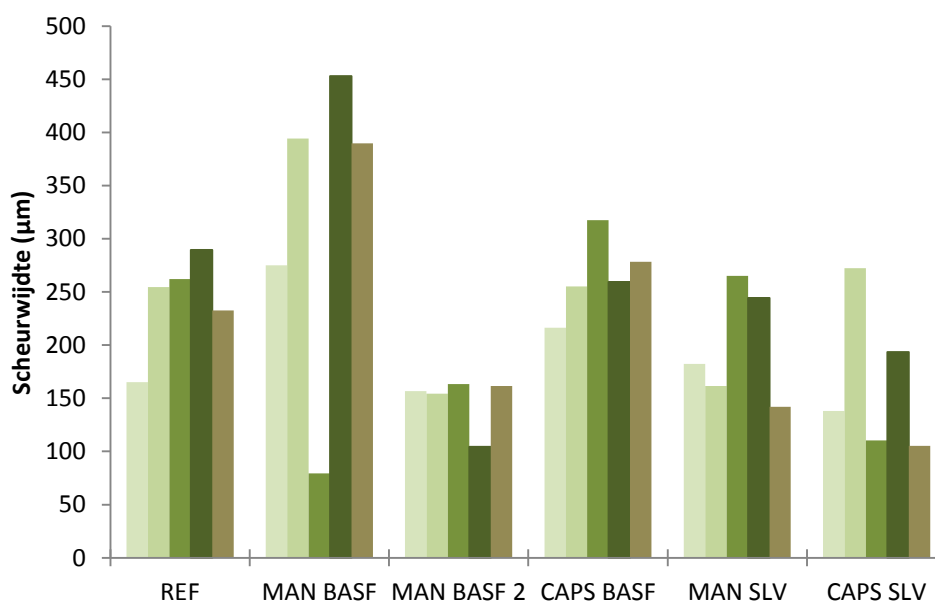
# Hoofdstuk 4

## Resultaten en discussie

### 4.1 Chloride diffusietest

#### 4.1.1 Scheurwijdtes

Figuur 4-1 geeft de opgemeten scheurwijdte van ieder proefstuk weer dat na de diffusietest met  $\text{AgNO}_3$  besprenkeld is. Het algemeen gemiddelde van de scheurwijdte bedraagt  $223\mu\text{m}$  met  $79\mu\text{m}$  en  $453\mu\text{m}$  als uiterste waarden. Er is geen significant verschil tussen de verschillende proefreeksen, zodat gesteld kan worden dat de aanwezigheid van de capsules de scheurwijdte niet beïnvloed heeft.



Figuur 4-1: Opgemeten scheurwijdtes van ieder proefstuk per proefreeks.

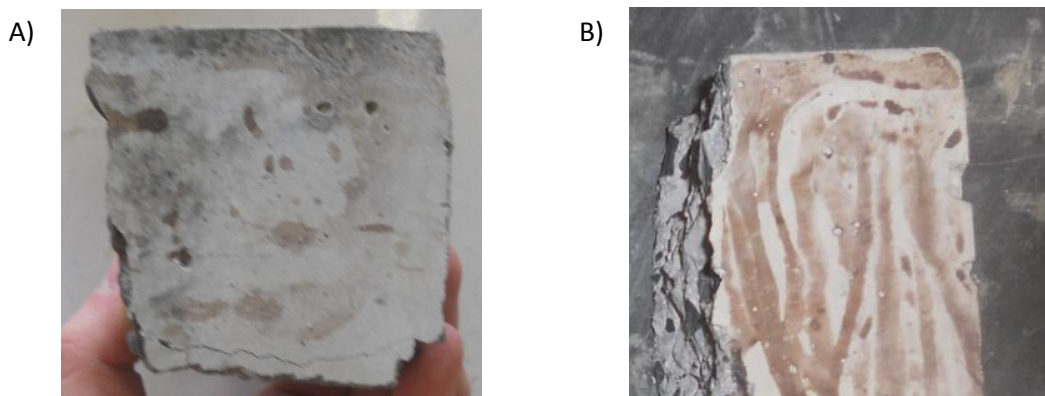
De aandachtige lezer bemerkt de afwezigheid van de proefreeksen MAN WRA en CAPS WRA in Figuur 4-1. Deze zullen enkel in paragraaf 4.1.5, welke over de resultaten van de titraties handelt, besproken worden. De proefstukken met WRA als helend agens vertonen immers een vrij chaotisch chlorideprofiel waarop geen analyse uitgevoerd kan worden. Figuur 4-2 illustreert een typerend uitzicht van een met WRA geheeld proefstuk na besprenkeling met  $\text{AgNO}_3$ . Langs het niet gecoate vlak kan een uiterst fijne zone met witte kleuromslag waargenomen worden (bovenkant Figuur 4-2).

De witte kleuromslag tekent zich eveneens af langs de scheur, evenals op verschillende plekken die quasi random op het proefstuk terug te vinden zijn. Normaliter wijst dit op de aanwezigheid van chloriden. Doordat de witte kleuromslag discontinu verdeeld is over het ganse proefstuk wijst dit op een mogelijke reactie van het waterafstotend middel met het zilvernitraat. Naast de witte zones kan ook een zone met een zeer donkere kleur waargenomen worden. De bruin/zwarte kleur van deze zone is gelijkaardig aan de kleur die bij de overige proefreeksen (REF, NT, ...) vastgesteld wordt in de zones waarin geen chloriden gepenetreerd zijn. Tussen de donkere en witte zones tekent zich op de proefstukken met WRA een paarse zone af. Dit is een atypische kleuromslag na het besprenkelen met  $\text{AgNO}_3$ .



**Figuur 4-2: Aftekening op een met WRA geheeld proefstuk na het besprenkelen met  $\text{AgNO}_3$ .**

Om na te gaan welke kleurverandering de reactie van het WRA met  $\text{AgNO}_3$  teweeg brengt, werden twee niet aan chloriden blootgestelde OC betonstukken beproefd. Het betonstuk in Figuur 4-3 A werd niet met WRA bevochtigd, terwijl het betonstuk B over het volledige oppervlak bevochtigd werd. Na 24u werden de betonstukken met 0,1M  $\text{AgNO}_3$  besprenkeld. Op het met WRA bevochtigde proefstuk kon een bruine aftekening met licht paarse schijn waargenomen worden. Het niet bevochtigde proefstuk verkleurde daarentegen niet.



**Figuur 4-3: Betonstukken ter verificatie van de reactie van het WRA met  $\text{AgNO}_3$ . A) Oppervlak niet met WRA bevochtigd, B) Oppervlak volledig met WRA bevochtigd.**

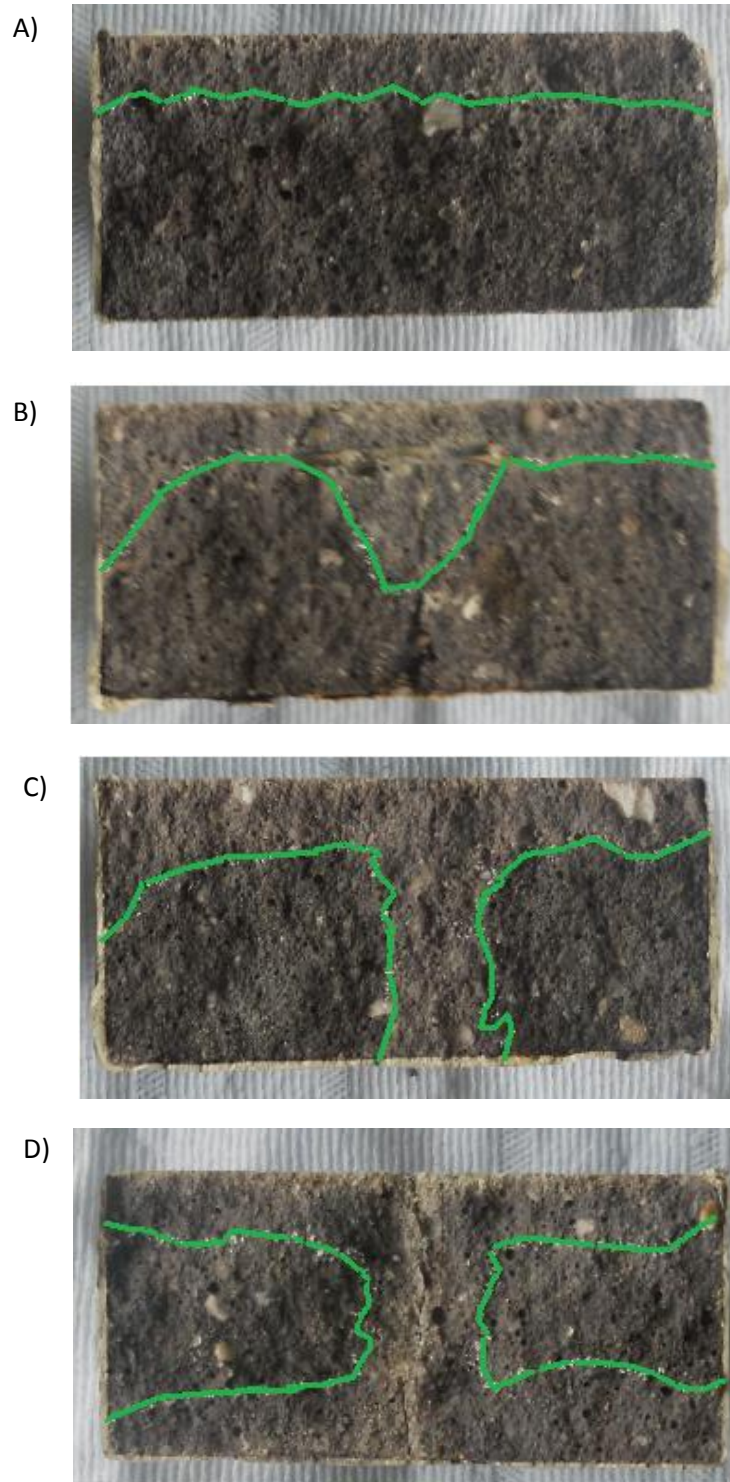
Doordat het WRA in contact met  $\text{AgNO}_3$  in een kleurverandering resulteert, kan geen besluit getrokken worden uit de geteste proefreeksen MAN WRA en CAPS WRA. Er kan eventueel aangenomen worden dat de bruine/zwarte zones uit Figuur 4-2 geen chloriden, noch WRA bevatten.

De discontinue verdeling van witte en paarse zones vertonen een te chaotisch gedrag om enige conclusies over het tegengaan van de chloride indringing te kunnen trekken.

Welke reactie de paarse kleurverandering precies veroorzaakt is niet achterhaald kunnen worden binnen het kader van deze thesis. Wanneer een gelijke hoeveelheid van het WRA met 0,1M  $\text{AgNO}_3$  gemengd wordt, wordt geen kleurverandering waargenomen. Ook het toevoegen van een 0,1M NaCl oplossing aan het mengsel van WRA en  $\text{AgNO}_3$  resulteerde niet in een kleurverandering. Daaruit kan wel verwacht worden dat een component uit de mortel eventueel in combinatie met een alkalisch milieu noodzakelijk is om de reactie te initiëren. Het discontinue optreden van de paarse zones, zou dan door de heterogene samenstelling van de mortel kunnen verklaard worden. In de literatuur is geen informatie teruggevonden over de eventuele reactie van een WRA met  $\text{AgNO}_3$ . Het besprenkelen met zilvernitraat is zelfs al succesvol toegepast indien WRA als oppervlakte coating gebruikt werd op ongescheurd beton (Medeiros & Helene, 2009). De specifieke samenstelling van het gebruikte waterafstotend middel zal dus eveneens een bepalende rol spelen in de reactie. In de toekomst wordt aangeraden om de performantie van dit WRA in het tegengaan van chloride indringing in de scheur te evalueren m.b.v. *Electron Probe Microscopy Analysis*. Een andere optie zou kunnen bestaan uit het extraheren van het WRA met een oplosmiddel, alvorens het proefstuk te besprenkelen met zilvernitraat.

#### **4.1.2 De totale chloride indringingsoppervlakte**

Om de lezer een beter inzicht in de resultaten te geven kunnen de afgetekende chlorideprofielen opgedeeld worden in verschillende klassen. Een visualisatie van de classificatie wordt gegeven in Figuur 4-4. Klasse A wordt gekenmerkt door een homogene equidistante indringing van de chloriden over de ganse breedte van het proefstuk. Proefstukken die tot klasse B behoren vertonen een geringe additionele indringing van de chloriden in de scheur. Bij klasse C kan een penetratie van de chloriden over de ganse scheur tot aan het niet gecoate vlak waargenomen worden. Proefstukken van klasse D vertonen een chloride indringing over de volledige scheur en een indringing van chloriden aan de gecoate zijde over het ganse proefstuk. Een verklaring van dit a priori onverwacht profiel kan te vinden zijn in de slechte hechting van de coating aan de mortel. Wanneer de  $\text{Cl}^-$  tot aan het gecoate vlak via de scheur zijn binnengedrongen stapelen deze zich daar op. Door een slechte hechting van de epoxy coating kunnen de chloriden echter tussen de coating en de mortel diffunderen, waarna ze een gelijkaardige indringing als aan het niet gecoate vlak veroorzaken.



**Figuur 4-4: Verduidelijking van de classificatie der chlorideprofielen: A) gelijke indringing, B) lokaal diepere indringing aan de scheur, C) Chloride indringing over de ganse scheur, D) volledige indringing over de scheur en accumulatie van chloriden aan het gecoate vlak. De chloride indringing is mogelijk vanaf de bovenkant van de foto's. De groene lijnen bakenen het chloridefront af. In de donkerste zones zijn geen  $\text{Cl}^-$  doorgedrongen.**

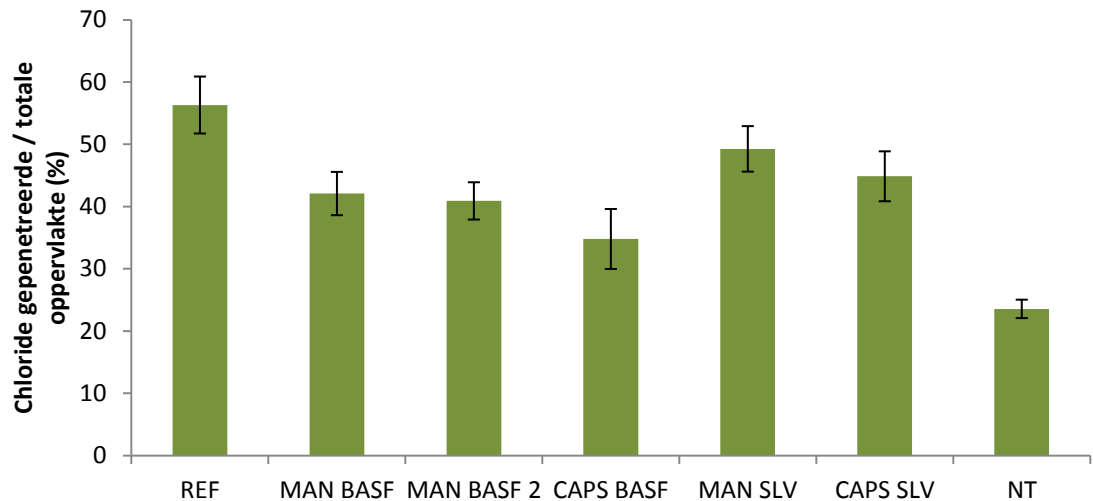
In Tabel 4-1 is vermeld hoeveel proefstukken in een bepaalde klasse gecategoriseerd kunnen worden. Alle referentieproefstukken vertonen een chloride indringing over de volledige scheur. Voor 60% van de referentieproefstukken accumuleren de chloriden zelfs aan het niet gecoate vlak. De

proefstukken van de reeks MAN BASF geven een tegenvallend resultaat. Alle proefstukken uit die reeks behoren tot klasse C. Deze tegenvallende resultaten zijn het gevolg van een slechte indringing van het PU in de scheur, wat in paragraaf 4.1.4 verder zal toegelicht worden. De zelfhelende capaciteit van het PU van BASF wordt echter bewezen door de proefreeksen MAN BASF 2. Er werd een volledige heling vastgesteld bij 80% van deze proefstukken. Bij de overige 20% is een additionele indringing ter hoogte van de scheur waarneembaar. 40% van de proefstukken met ingekapseld PU van BASF vertonen een volledige heling met dezelfde performantie als de niet gescheurde proefstukken. Anderzijds vertonen 40% van de proefstukken een chloride indringing over de volledige scheur. De proefreeksen MAN SLV heeft eveneens tot een tegenvallend resultaat geleid. Bij slechts 20% van de proefstukken kan een verminderde indringing ter hoogte van de scheur waargenomen worden. De ingekapselde proefstukken met PU SLV presteren beter dan de manueel geheelde reeks. Hiermee is dus duidelijk aangetoond dat ook dit helend agens tot een gereduceerde chloride indringing kan leiden. In 20% van de gevallen werd volledige heling waargenomen. Anderzijds vertoonden slechts 20% (klasse C) geen heling van de scheur.

**Tabel 4-1: Procentueel aantal proefstukken die tot een bepaalde klasse horen per proefreeks.**

	REF	MAN BASF	MAN BASF 2	CAPS BASF	NT	MAN SLV	CAPS SLV
<b>A</b>	0%	0%	80%	40%	100%	0%	20%
<b>B</b>	0%	0%	20%	20%	0%	20%	60%
<b>C</b>	40%	100%	0%	40%	0%	60%	20%
<b>D</b>	60%	0%	0%	0%	0%	20%	0%

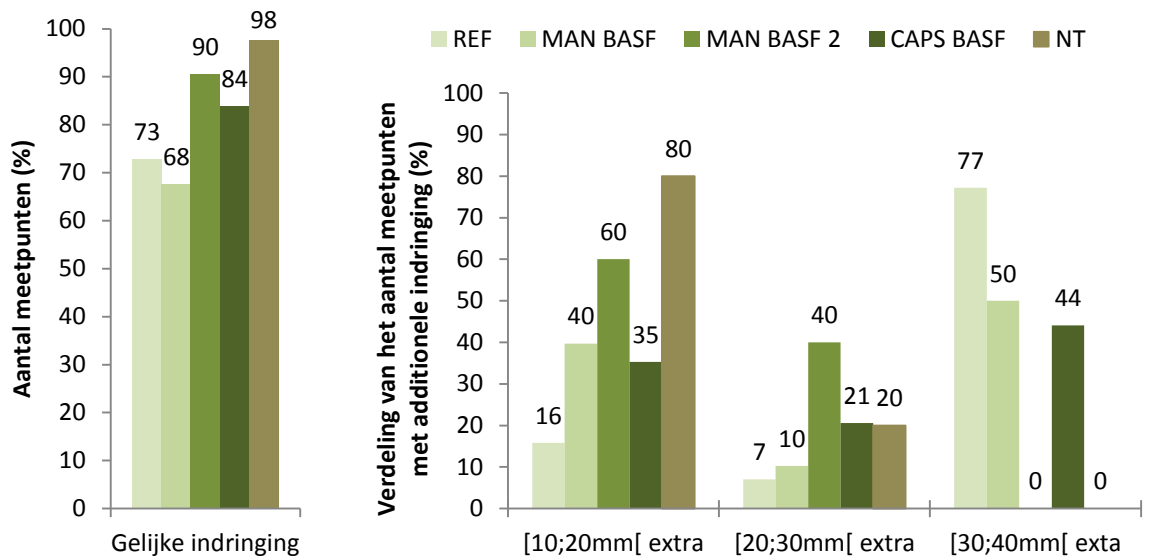
Met de in paragraaf 3.2.6 uiteengezette methode werd de gemiddelde verhouding van de met chloriden ingedrongen oppervlakte op de totale oppervlakte per proefreeks bepaald. Figuur 4-5 geeft hiervan het resultaat weer. In het geval van de niet gescheurde proefstukken zijn de chloriden in ongeveer 25% van de totale oppervlakte binnengedrongen. Dit is significant lager dan de percentages waargenomen voor alle andere proefreeksen. De proefreeksen CAPS BASF en MAN BASF 2 onderscheiden zich met een verhouding van respectievelijk 35% en 41% tevens significant van de referentie proefstukken, waarvoor de gemiddelde verhouding 56% bedraagt. De overige autonoom geheelde proefstukken presteren allen beter dan de referentie proefstukken, echter zonder significant te verschillen. Zoals reeds aangehaald is de slechte performantie van de proefreeksen MAN BASF te verklaren door een beperkte indringing van het PU in de scheur. Op basis van de classificatie bij de op het oog waargenomen chlorideprofielen (zie Tabel 4-1) vertonen de proefstukken CAPS SLV en MAN BASF 2 echter een beter resultaat dan wat op basis van Figuur 4-5 vastgesteld wordt. Dit kan verklaard worden door de grotere gemiddelde indringing van de chloriden vanaf het niet gecoate vlak. In paragraaf 4.1.3 zal aangetoond worden dat deze indringing significant verschillend is van de overige proefreeksen, waardoor Figuur 4-5 in het geval van de proefreeksen CAPS SLV en MAN BASF 2 een vertekend beeld geeft.



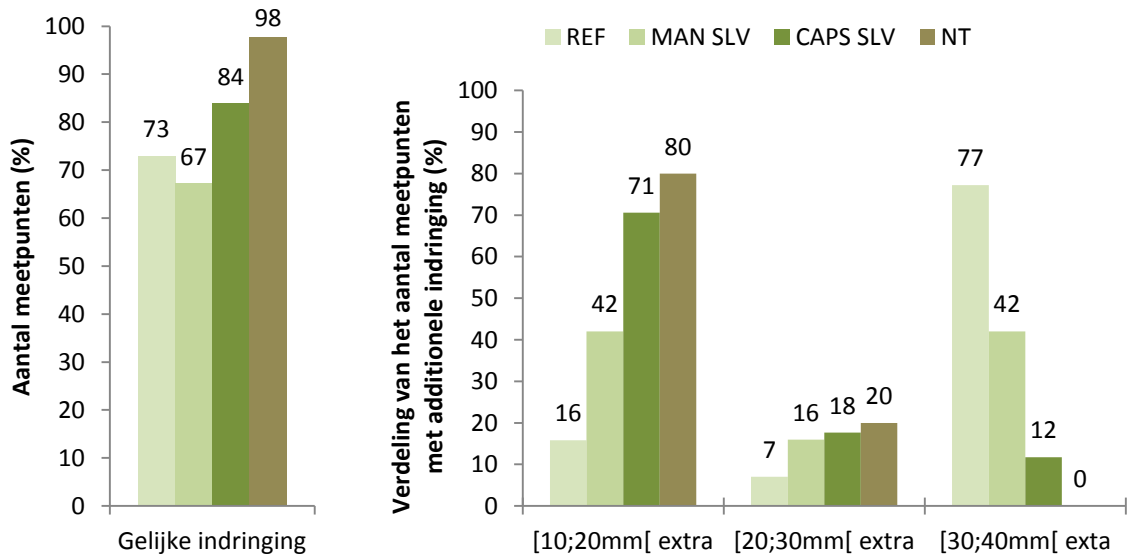
**Figuur 4-5: Gemiddelde procentuele verhouding van de oppervlakte waarin chloriden binnengedrongen zijn op de totale oppervlakte voor iedere proefreeks.**

Aansluitend op de meting van de totale chloride gepenetreerde oppervlakte, wordt de chloride indringing vanaf het blootgestelde vlak om de halve centimeter gemeten. Dit resulteert in 21 meetpunten langsheen het in twee gespleten proefstuk. De 5 meetpunten met de kleinste chloride indringing worden gebruikt om een referentie indringingsdiepte te bepalen. Indien de indringingsdiepte op een ander meetpunt minder dan 10mm van de berekende referentie indringingsdiepte verschilt, wordt aangenomen dat dit meetpunt een gelijke indringing vertoont. Vervolgens worden nog 3 intervallen met een additionele chloride indringing gedefinieerd. Indien de indringing in een meetpunt 10mm tot 20mm groter is dan de referentie indringingsdiepte, wordt dit meetpunt in de klasse '[10;20mm[ extra' gecategoriseerd. Op analoge wijze worden de klassen '[20;30mm[ extra' en '[30;40mm[ extra' gedefinieerd. Bij deze laatste klasse zijn de chloriden over het volledige proefstuk doorgedrongen. Het spreekt voor zich dat de kans op chloride geïnitieerde corrosie groter wordt naarmate meer meetpunten tot de hogere klasse '[30;40mm[ extra' behoren.

De hierboven beschreven meetprocedure is op iedere helft van de proefstukken herhaald. Vervolgens is per proefreeks berekend hoeveel meetpunten tot een bepaalde categorie behoren. Figuur 4-6 en Figuur 4-7 stellen de procentuele verdeling van de meetpunten in iedere klasse per proefreeks voor. De REF en NT reeks zijn in beide figuren weergegeven om het vergelijken met de autonoom geheelde proefreeksen te vereenvoudigen.



Figuur 4-6: Verdeling van het aantal meetpunten volgens de chloride indringing gemeten vanaf het blootgestelde vlak voor de proefreeksen REF, MAN BASF, MAN BASF 2, CAPS BASF en NT.



Figuur 4-7: Verdeling van het aantal meetpunten volgens de chloride indringing gemeten vanaf het blootgestelde vlak voor de proefreeksen REF, MAN SLV, CAPS SLV en NT.

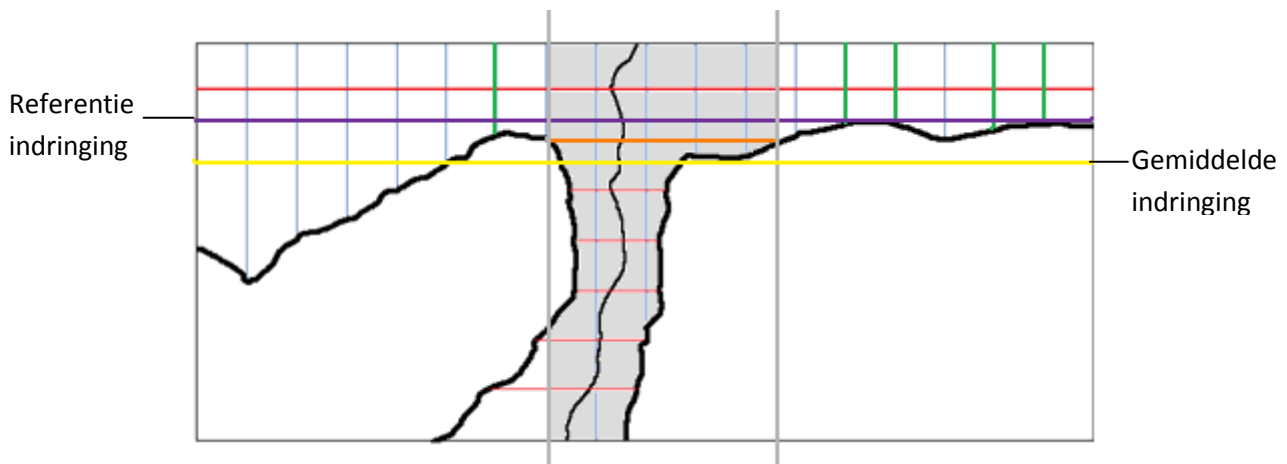
De NT proefreeks vertoont voor 98% van alle meetpunten een gelijke chloride indringing. Van de overige 2% meetpunten met additionele indringing bevindt 80% zich in de klasse '[10;20mm[ extra' en 20% in de klasse '[20;30mm[ extra'. Deze extra indringing is wellicht te wijten aan een slechte hechting van de coating aan de omtrek van de proefstukken, waardoor daar een lokaal diepere insnijding van het chlorideprofiel merkbaar is. De Referentie proefreeks vertoont voor 73% van de meetpunten een gelijke indringing. Van de meetpunten met een additionele indringing kan duidelijk vastgesteld worden dat voor de meerderheid van de overige meetpunten (77%) de chloriden tot aan de onderzijde van het proefstuk zijn doorgedrongen. De reeksen MAN BASF en MAN SLV hebben met resp. 68% en 67% zelfs een kleiner aantal meetpunten met gelijke indringing dan de referentieproefstukken. Beide reeksen vertonen eveneens een groot aantal meetpunten (50%

en 42% resp.) in de klasse '[30;40mm[ extra'. De reeks MAN BASF 2 heeft daarentegen voor 90% van alle meetpunten een gelijke indringing. De additionele indringing is voor 80% van de overige meetpunten zelfs beperkt tussen 10mm en 20mm. Dit toont duidelijk aan dat in het geval van de proefreeksen MAN BASF 2 een nagenoeg volledige heling bereikt is.

De performantie van de proefreeksen met ingekapseld helend agens komt ook in deze voorstelling van het bekomen chlorideprofiel terug. Zowel de reeks CAPS BASF als CAPS SLV vertonen voor 84% van de meetpunten een gelijke indringing. Deze waarde ligt ongeveer in het midden tussen de 73% van de referentie proefstukken en 98% van de niet gescheurde proefstukken. In het geval van de proefstukken met ingekapseld PU van BASF is de additionele indringing in 56% van de meetpunten beperkt tot 30mm. Echter 44% van de meetpunten met additionele indringing behoort nog steeds tot de meest nadelige klasse '[30;40mm[ extra'. De additionele indringing bij de reeks CAPS SLV blijkt daarentegen eerder beperkt te zijn. Slechts 12% van de meetpunten met additionele indringing behoort tot de meest nadelige klasse, terwijl 71% beperkt blijft tot een additionele indringing van slechts 10 à 20mm.

#### 4.1.3 Chloride indringing vanaf het oppervlak en loodrecht op de scheur

Zoals reeds vermeld onder paragraaf 3.2.6 werd ook de indringing loodrecht op de scheur om de halve centimeter opgemeten. Dit resulteert in 9 meetpunten, gelijk verdeeld langsheen de scheur. Vanaf de hiervoor reeds bepaalde referentie indringingsdiepte (paarse lijn in Figuur 4-8) werd de maximale indringing loodrecht op de scheur (oranje lijn Figuur 4-8) bijgehouden. De gemiddelde chloride indringing vanaf het afstrijkvlak (gele lijn Figuur 4-8) werd dan bepaald als het gemiddelde van alle meetpunten die buiten de maximale indringing loodrecht op de scheur gelegen waren (buiten de grijs gearceerde zone van Figuur 4-8). Figuur 4-8 verduidelijkt de berekeningswijze van de gemiddelde chloride indringing.

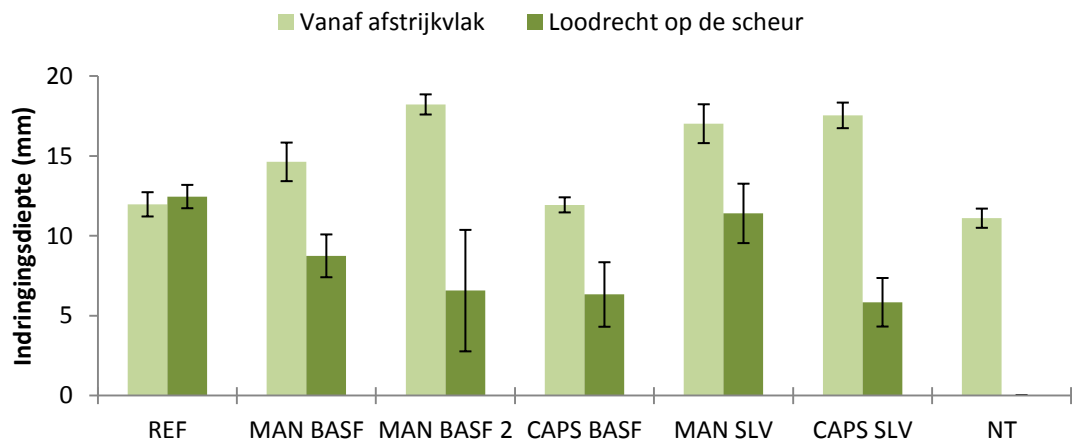


Figuur 4-8: Verduidelijking bepaling gemiddelde indringingsdiepte vanaf het afstrijkvlak en loodrecht op de scheur.

Nadat de gemiddelde chloride indringing vanaf het afstrijkvlak bepaald was, werd de gemiddelde indringing loodrecht op de scheur berekend. Alle meetpunten langs de scheur die dieper dan de gemiddelde indringing vanaf het afstrijkvlak gelegen zijn, werden hiervoor in rekening gebracht. Bij de proefstukken die een chloride indringing langs het gecoate vlak (klasse D uit Tabel 4-1) vertoonden, werd de gemiddelde indringing loodrecht op de scheur enkel berekend met de

meetpunten die niet tot deze zone behoren. De absolute waarde van de indringingsdiepte loodrecht op de scheur is enkel van belang in het geval van de referentieproefstukken. Bij de overige proefreeksen duidt een kleinere gemiddelde indringing loodrecht op de scheur op een verhoogde mate van zelfheling.

Figuur 4-9 geeft de berekende gemiddelde indringingsdiepte per proefreeks weer. De indringing vanaf het afstrijkvlak van de proefreeksen CAPS SLV en MAN BASF 2 is significant groter dan deze van de proefreeksen NT, REF en CAPS BASF. Ook de proefreeks MAN SLV vertoont een grotere gemiddelde indringing welke echter niet significant is. Aangezien de proefreeksen CAPS SLV en MAN SLV op eenzelfde dag aangemaakt zijn, kan de grotere indringing te wijten zijn aan het aanmaken van de mortelproefstukken. Een slechtere verdichting kan bijvoorbeeld leiden tot een grotere indringing van de chloriden. De reeks MAN BASF 2 werd op nog een andere datum aangemaakt, maar eenzelfde redenering kan de grotere gemiddelde indringingsdiepte verklaren. Zoals reeds aangehaald kan de grotere gemiddelde indringing vanaf het afstrijkvlak de schijnbaar mindere performantie van de proefreeksen CAPS SLV en MAN BASF 2 in Figuur 4-5 verklaren.



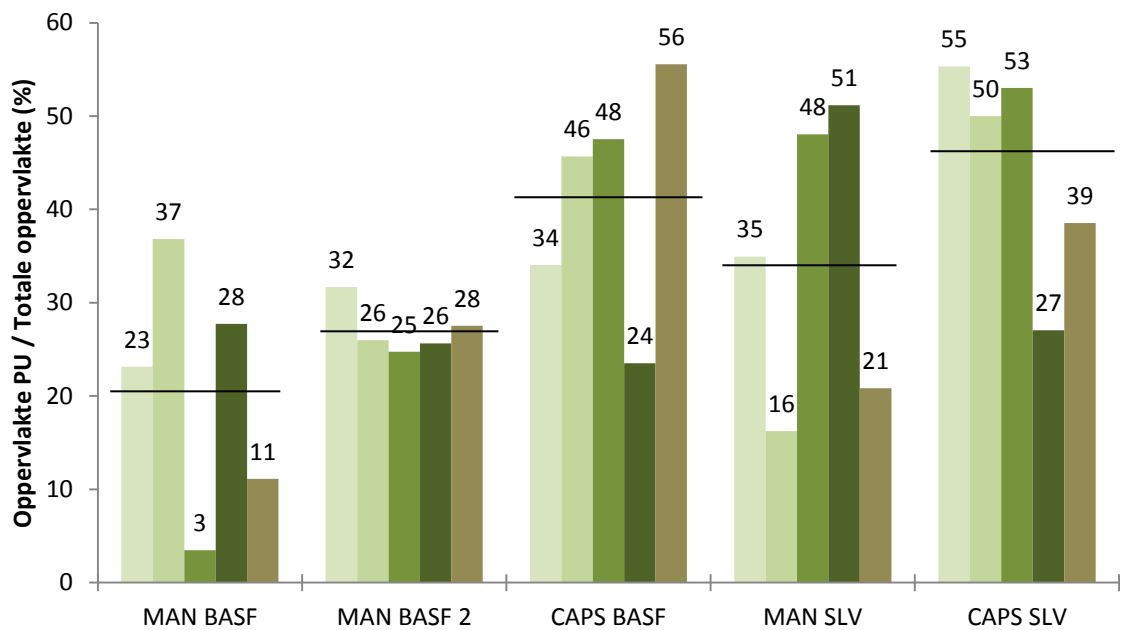
**Figuur 4-9: Gemiddelde indringingsdiepte per proefreeks.**

Figuur 4-9 toont eveneens aan dat bij de referentieproefstukken de chloride indringing loodrecht op de scheur ongeveer even groot is als deze vanaf het afstrijkvlak. Voor de opgemeten scheurwijdtes is deze vaststelling volledig in overeenstemming met het onderzoek van Ismail et al. (2008). De indringing loodrecht op de scheur van de proefreeksen MAN BASF en MAN SLV is ondanks de mindere zelfheling toch kleiner dan voor referentieproefstukken. In het geval van de proefreeksen CAPS BASF en CAPS SLV is de gemiddelde indringing vanaf het scheurvlak met ongeveer 6mm de helft van deze bij de referentieproefstukken. Dit is te verklaren omdat in ongeveer de helft van deze proefstukken een partiële of volledige zelfheling van de scheur waargenomen kan worden. Bij de proefstukken die tot klasse C uit Tabel 4-1 behoren is de indringing vanaf de scheur uiteraard ook  $\pm 12$ mm.

#### **4.1.4 Oppervlakte PU in de scheur**

De slechte performantie van de proefreeksen MAN BASF en MAN SLV kan verklaard worden door de beperkte penetratie van het PU in de scheur. Figuur 4-10 geeft voor ieder proefstuk weer hoeveel

van de totale oppervlakte van de scheur met PU bedekt is. In de reeks MAN BASF kan zelfs een proefstuk worden aangetroffen waarin slechts 3% van de scheur met PU bedekt is. De indringing van het PU blijft er ook beperkt tot in ongeveer de helft van het scheurvlak, wat tevens in Figuur 4-24 geïllustreerd wordt. In het geval van het PU van BASF kan de beperkte penetratie te wijten zijn aan de te snelle polymerisatie van het PU, waardoor het slechts over een klein deel in de scheur kon doordringen alvorens uit te harden. De beperkte indringing kan echter ook te wijten zijn aan het opschuimen van het PU.



**Figuur 4-10: Deel van de oppervlakte in de scheur die met PU bezet is, weergegeven voor ieder proefstuk.**

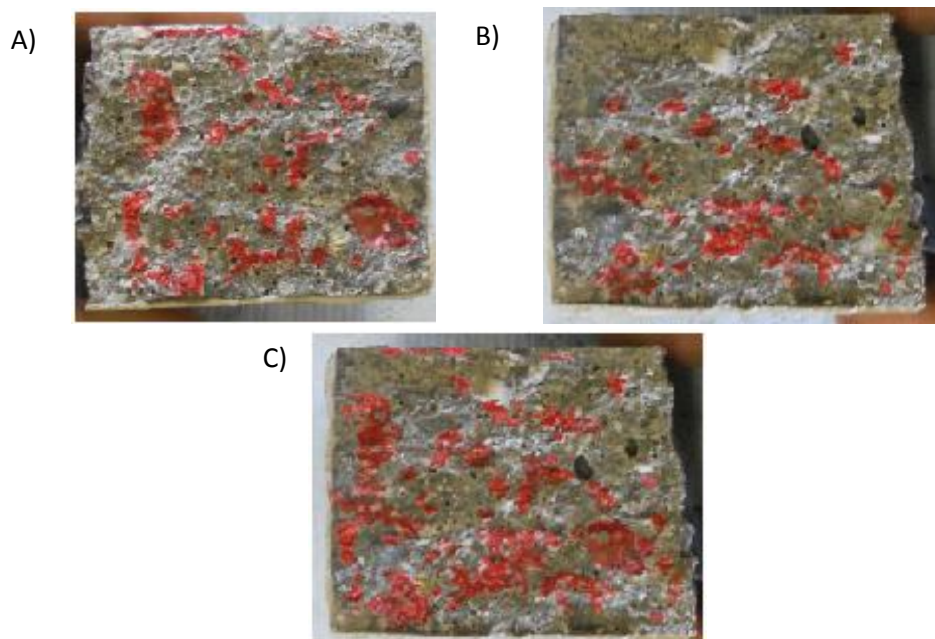
Het gemiddelde per proefreeks van de in Figuur 4-10 voorgestelde resultaten is weergegeven door de zwarte horizontale lijn. De proefreeks MAN BASF vertoont met een oppervlakteverhouding van 20% significant minder PU in de scheur dan de proefreeks CAPS SLV waarvoor 45% van de scheur bedekt is. Door de grote standaardfout kan echter geen significant verschil met de reeks CAPS BASF (gemiddeld 41%) gevonden worden. Bij de proefreeks MAN SLV blijkt de scheur voor 34% gevuld te zijn. Toch leidt dit niet tot een goede heling op basis van bovenstaande paragrafen. Opmerkelijk is ook het zeer kleine gemiddelde van de proefreeks MAN BASF 2. Slechts 27% van het oppervlak is bedekt met PU, wat tegen alle verwachtingen in gaat wanneer de performantie van deze reeks beschouwd wordt. De met PU bedekte zone beperkt zich ,net zoals bij de reeks MAN BASF, echter nog steeds tot de bovenste helft van het scheurvlak. Er kan daarom gesteld worden dat de goede heling van de reeks MAN BASF 2 voornamelijk tot stand komt door de vorming van een continue PU barrière in de scheur. De proefstukken uit de reeks MAN SLV vertonen dit niet, waardoor ondanks de grotere hoeveelheid PU in de scheur nog steeds open zones aanwezig zijn in de door PU gevormde structuur. De chloriden kunnen hierdoor nog steeds diffunderen met een mindere heling tot gevolg. De vorming van de continue PU barrière in de scheur van de proefstukken uit de reeks MAN BASF 2 wordt illustratief aangetoond m.b.v. Figuur 4-11. A) en B) geven de foto's weer van twee proefstukdelen die bekomen zijn na het splijten van een proefstukhelft volgens het scheurvlak. Vervolgens is met photoshop het ingekleurde PU van foto A geselecteerd, waarna deze gespiegeld

werd. Na herschaling van het proefstukdeel van foto A op foto B, kan het geselecteerde PU van foto A gereconstrueerd worden op foto B. Aldus wordt foto C bekomen, welke een benaderde reconstructie van het PU in de scheur weergeeft.



**Figuur 4-11: Illustratieve reconstructie van het PU in de scheur voor een proefstuk uit reeks MAN BASF 2.**

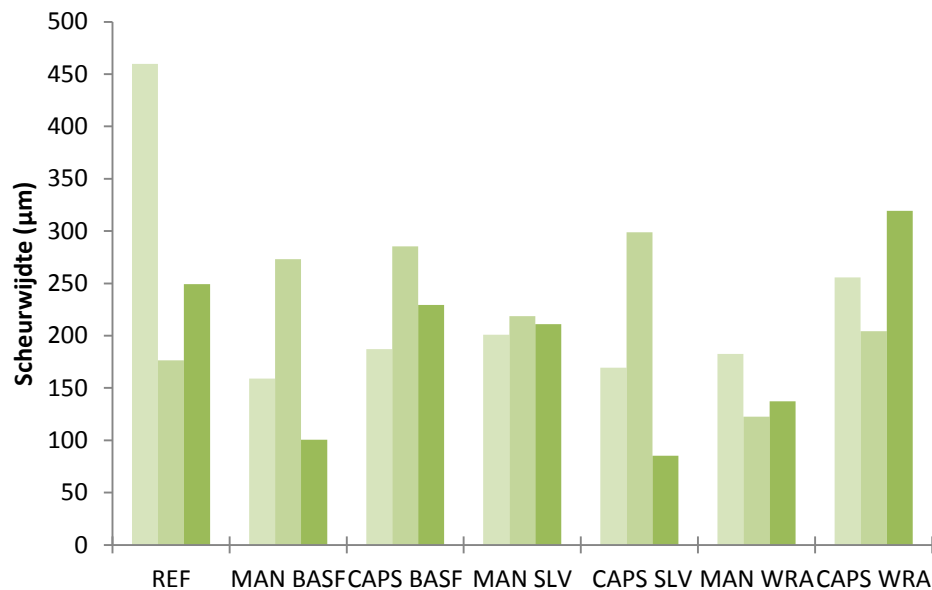
Dezelfde bewerking is in Figuur 4-12 uitgevoerd voor een proefstukheft uit de reeks MAN SLV. Er kan worden vastgesteld dat het PU flex SLV over het volledige scheurvvlak verdeeld is. Er wordt echter veel minder een gesloten, continue PU structuur gevormd in vergelijking met het PU MEYCO MP.



**Figuur 4-12: Illustratieve reconstructie van het PU in de scheur voor een proefstuk uit de reeks MAN SLV.**

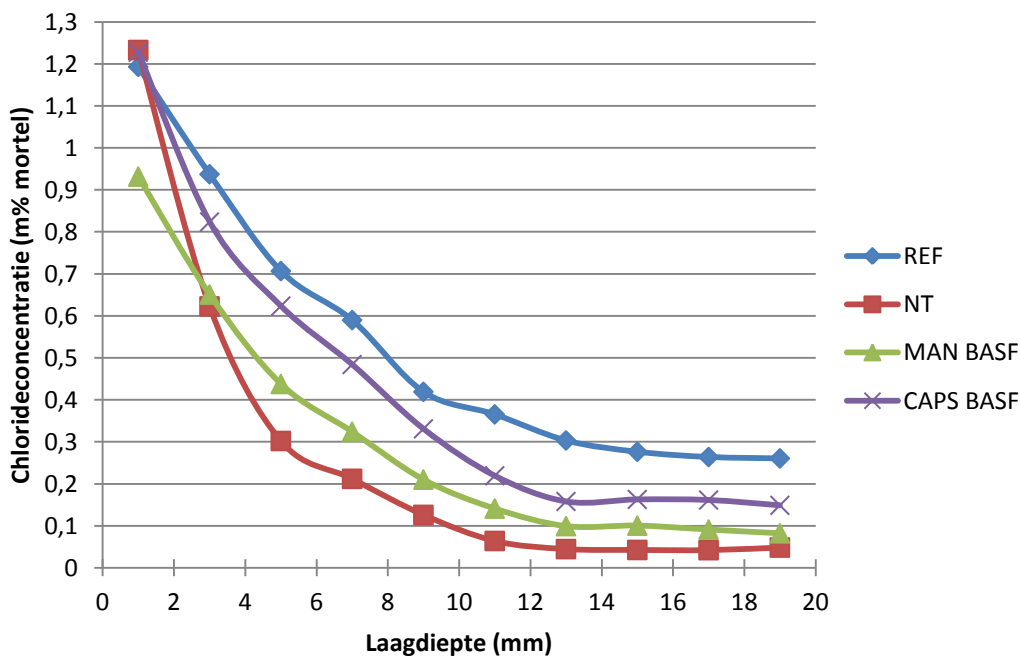
#### **4.1.5 Chlorideprofiel op basis van de titraties**

Figuur 4-13 geeft de scheurwijdtes weer van ieder proefstuk waarop een titratie uitgevoerd is. Het algemeen gemiddelde van de scheurwijdte bedraagt  $189\mu\text{m}$  met  $457\mu\text{m}$  en  $85\mu\text{m}$  als resp. maximum en minimum. Er is geen significant verschil tussen de scheurwijdtes van de verschillende proefreeksen.



Figuur 4-13: Scheurwijdtes per proefstuk binnen elke reeks.

Figuur 4-14 tot en met Figuur 4-16 geeft het gemiddeld chlorideprofiel van de drie proefstukken per proefreeks weer. De reeksen REF en NT zijn in iedere grafiek herhaald om het vergelijken van de resultaten te vereenvoudigen. De standaardfouten zijn bewust uit de grafieken weggelaten om de leesbaarheid ervan te verbeteren. In Bijlage A wordt het experimenteel chlorideprofiel van ieder proefstuk weergegeven. Ook het chlorideprofiel op basis van de fitting aan de tweede wet van Fick wordt in Bijlage A geplot.

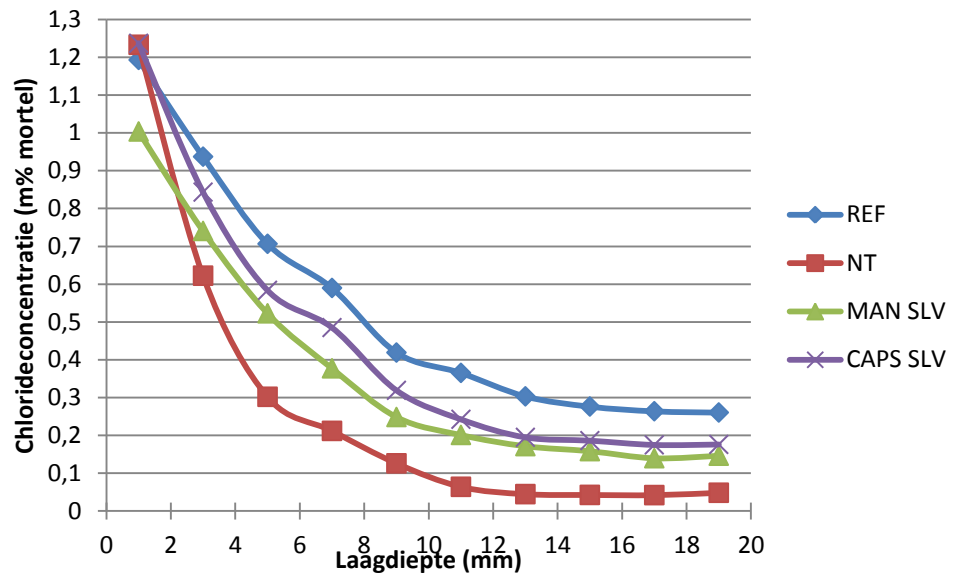


Figuur 4-14: Gemiddeld chlorideprofiel langsheen de scheur voor de reeksen REF, NT, MAN BASF en CAPS BASF.

Figuur 4-14 toont duidelijk aan dat de met PU van BASF autonoom geheelde proefstukken de chloride indringing langsheen de scheur beperken. De ongescheurde proefstukken vertonen een

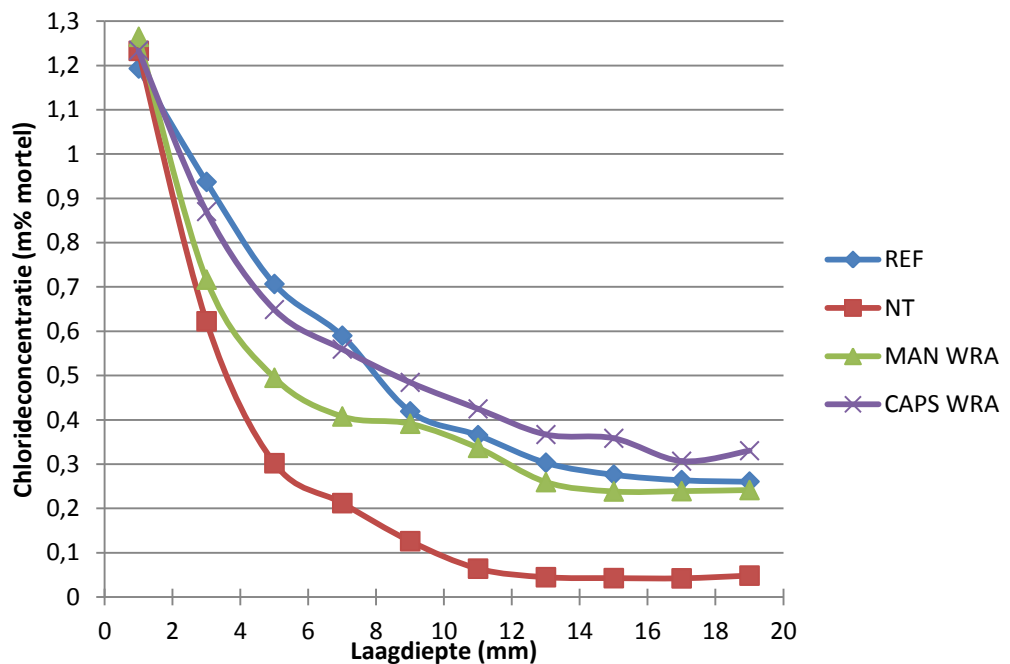
chloride indringing tot op ongeveer 12mm. In de diepere lagen is een chlorideconcentratie van ongeveer 0,04m% t.o.v. de mortel aanwezig. Voor de gebruikte mortelsamenstelling stemt dit overeen met ongeveer 0,20m% t.o.v. het cementgehalte. Dit chloridegehalte is de concentratie die altijd present is in een mortelmengeling door de aanwezigheid van chloriden in het aanmaakwater en het zand. Het is tevens de concentratie waarbij de kleuromslag van  $\text{AgNO}_3$  na het besprenkelen plaats vindt. De indringingsdiepte van 12mm stemt dan ook goed overeen met de in Figuur 4-9 opgemeten indringing vanaf het afstrijkvlak in het geval van de niet gescheurde proefreeks. Bij de referentieproefstukken stagneert de chlorideconcentratie in de scheur vanaf 15mm tot ongeveer 0,25m% t.o.v. de mortel. Wellicht zal ook in de dieper gelegen lagen eenzelfde concentratie teruggevonden worden. Het chlorideprofiel van de reeks MAN BASF nadert bijna tot deze van de ongescheurde proefreeks. De gemiddelde chlorideconcentratie wordt er in de diepere lagen gelijk aan 0,08m% t.o.v. de mortel. De chlorideconcentratie van de proefreeks met ingekapseld PU van BASF nadert tot 0,15m% t.o.v. de mortel. De verminderde performantie van deze reeks is voornamelijk te wijten aan een slechte heling van één der drie proefstukken (zie Figuur 4-17). Gemiddeld genomen is er dus geen volledige zelfheling waarneembaar, maar toch is er een merkkelijk betere weerstand tegen de indringing van chloriden gekomen.

Figuur 4-15 geeft het gemiddeld chlorideprofiel van de proefstukken met PU Flex SLV als helend agens weer. De chlorideconcentratie stagneert naar een waarde van 0,14m% en 0,18m% t.o.v. de mortel indien de heling respectievelijk door manuele injectie of vrijstelling van ingekapseld helend agens gekomen was. Opnieuw kan dus in vergelijking met de referentiereeks een merkkelijk beter resultaat van de autonoom geheelde proefstukken waargenomen worden, echter zonder dat een volledige heling gekomen is. De performantie van de reeks CAPS BASF is iets beter dan van de reeks CAPS SLV. Bij de manueel geheelde reeksen is een duidelijk betere heling gekomen met het PU MEYCO MP in vergelijking met het PU flex SLV. Dit wijst er nogmaals op dat het PU van BASF beter in staat is om een gesloten celstructuur te vormen, terwijl anderzijds het PU Flex SLV door z'n lage viscositeit beter de scheur kan vullen vanuit een capsule. Voorts tonen Figuur 4-14 en Figuur 4-15 eveneens aan dat de chlorideconcentratie aan het oppervlak (op diepte 1mm) bij de manueel geheelde reeksen kleiner is dan bij de overige reeksen. Wellicht heeft de expansieve vorming van het PU schuim ervoor gezorgd dat een deel van het oppervlak naast de scheur bedekt was met PU.



Figuur 4-15: Gemiddeld chlorideprofiel in de scheur voor de reeksen REF, NT, MAN SLV en CAPS SLV.

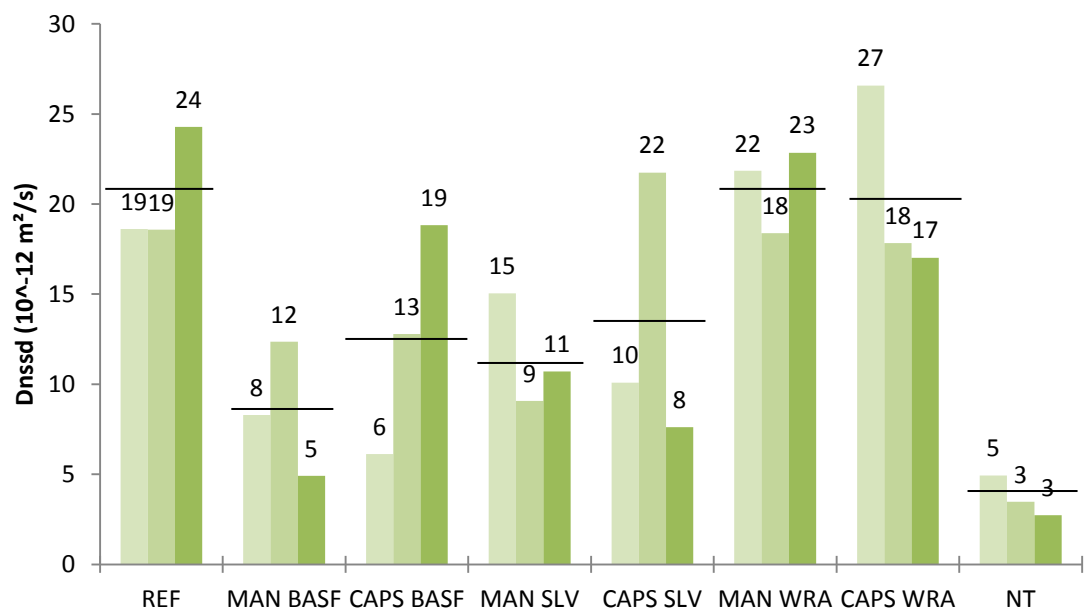
Tenslotte wordt in Figuur 4-16 het gemiddeld chlorideprofiel van de reeksen met waterafstotend middel als helend agens weergegeven. Met een stagnatie naar een concentratie van 0,24m% en 0,33m% t.o.v. de mortel van respectievelijk de reeksen MAN WRA en CAPS WRA lijkt het waterafstotend middel de chloride indringing niet te verhinderen.



Figuur 4-16: Gemiddeld chlorideprofiel in de scheur voor de reeksen REF, NT, MAN SLV en CAPS SLV.

Figuur 4-17 geeft de berekende niet stationaire diffusiecoëfficiënt van ieder getitreerd proefstuk weer. In de reeks MAN BASF vertoont één proefstuk met  $D_{nssd} = 5 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$  een volledige heling van de scheur. De overige twee proefstukken binnen die reeks hebben tot een partiële heling van de scheur geleid ( $D_{nssd} = 8 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$  en  $12 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ). Bij de ingekapselde proefstukken met PU van BASF

kan eveneens één proefstuk als volledig geheeld beschouwd worden ( $D_{nssd} = 6 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ). Een ander proefstuk presteert daarentegen met een  $D_{nssd}$  van  $19 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$  even slecht als twee van de referentieproefstukken. De proefstukken met Flex SLV als helend agens zijn er niet in geslaagd om een volledige heling van de scheur te verwezenlijken. Ook bij de ingekapselde proefreeksen CAPS SLV is bij één proefstuk geen heling van de scheur opgetreden ( $D_{nssd} = 22 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ). Zoals reeds op de weergave van de chlorideprofielen kon waargenomen worden hebben de proefstukken met het waterafstotend middel als helend agens geen positief effect op het tegengaan van de chloride indringing in de scheur. De zwarte horizontale lijnen in Figuur 4-17 geven het gemiddelde van  $D_{nssd}$  per reeks weer. Statistisch gezien is er enkel een significant verschil in de diffusiecoëfficiënt tussen de reeks NT enerzijds en de reeksen REF ( $\alpha_{\text{eff}} = 4,8\%$ ) en MAN WRA ( $\alpha_{\text{eff}} = 1,4\%$ ) anderzijds. Er kan echter een duidelijk verschil opgemerkt worden tussen de met PU geheelde reeksen en de referentiereeks.



Figuur 4-17:  $D_{nssd}$  voor ieder proefstuk, per proefreeks.

Er dient echter opgemerkt te worden dat tijdens het uitvoeren van de titraties van de met WRA geheelde proefstukken zich enkele complicaties voordeden. Zo werd tijdens het roeren van het afgemaalde poeder met de zuurextractie oplossing (5ml 0,3M  $\text{HNO}_3$  en 35ml  $\text{H}_2\text{O}$ ) geen goede menging bekomen. Door de aanwezigheid van het WRA kon een zekere flocculatie waargenomen worden. Ook bij het filteren van de oplossing kon gezien worden dat het poeder samenklitte en het de oplossing afstootte. Deze twee processen zullen zeker een invloed gehad hebben op de uiteindelijk bekomen chlorideconcentratie. Het kan tevens de slechte fitting van het chlorideprofiel op basis van  $D_{nssd}$  verklaren (zie Bijlage A). Om een betere fitting te bekomen, werd de initiële chlorideconcentratie dan ook gelijk gesteld aan 0,04m% t.o.v. de mortel i.p.v. 0m% zoals bij de andere proefstukken aangenomen werd. De waarde van 0,04m% werd gekozen omdat dit ongeveer het steeds in beton aanwezige chloridegehalte was, althans op basis van de ongescheurde proefstukken. Hierdoor werd een merkelijk betere correlatiecoëfficiënt van het gefitte chlorideprofiel bekomen.



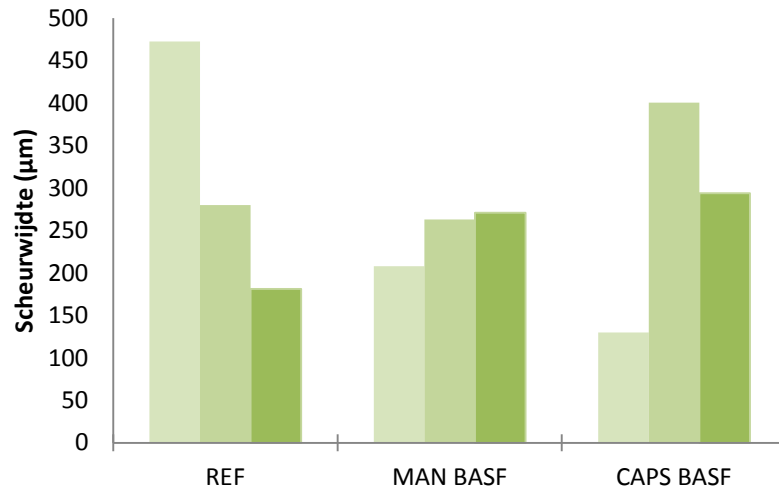
**Figuur 4-18: Flocculatie van het poeder tijdens de titraties van met WRA geheelde proefstukken.**

De grote diffusiecoëfficiënt van de met WRA geheelde proefstukken is wellicht niet enkel te wijten aan de waargenomen flocculatie tijdens het aanmaken van de titratie oplossing. Om dit aan te tonen werden twee bijkomende oplossingen getitreerd. De eerste oplossing bestond uit een mengsel van 5ml 0,01M NaCl en 45ml gedestilleerd water. Het equivalentiepunt werd bereikt wanneer 4,598ml 0,01M  $\text{AgNO}_3$  getitreerd werd. Een tweede oplossing werd bekomen door 5ml 0,01M NaCl te mengen met 45ml gedestilleerd water en 5ml WRA. 4,690ml 0,01M  $\text{AgNO}_3$  diende toegevoegd te worden om het equivalentiepunt te bereiken. Dit verschil van 0,092ml is niet groot, maar illustreert wel dat door toevoeging van het WRA de binding van zilverionen met chloride ionen verstoort wordt. Hierdoor zou de werkelijke chlorideconcentratie lager kunnen zijn dan deze die op basis van de metingen bepaald werd.

## **4.2 $\text{CO}_2$ diffusietest na 2 weken**

### **4.2.1 Scheurwijdtes**

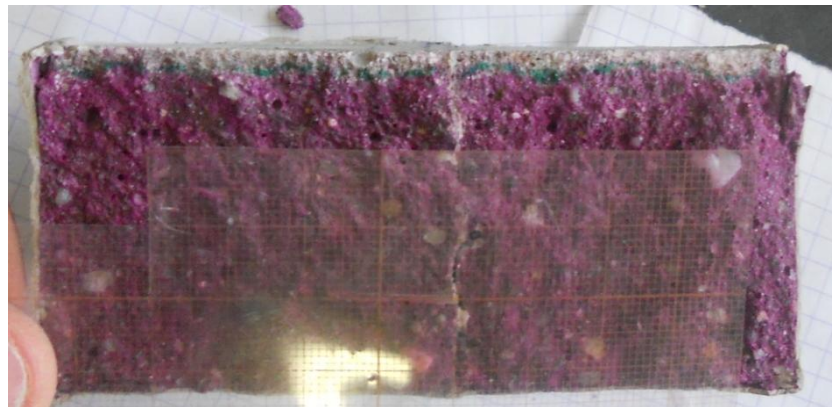
In Figuur 4-19 worden de opgemeten scheurwijdtes na ontlasting weergegeven. Wegens het brosse scheurgedrag van de proefstukken is er een aanzienlijke spreiding in de scheurwijdtes merkbaar. Het algemeen gemiddelde van de scheurwijdte bedraagt  $278\mu\text{m}$ . Ondanks de spreiding in de scheurwijdtes wordt geen significant verschil vastgesteld tussen de verschillende proefreeksen.



Figuur 4-19: Opgemeten scheurwijdte van de proefstukken.

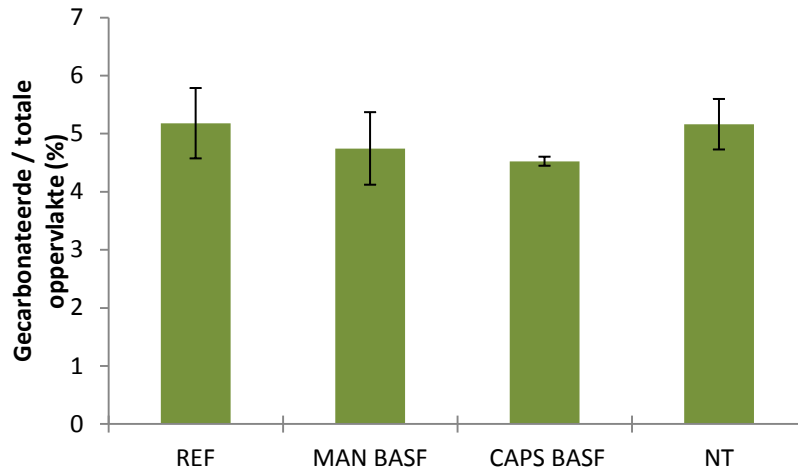
#### 4.2.2 De totale gecarbonateerde oppervlakte

Alle proefstukken vertonen eenzelfde homogene CO<sub>2</sub> indringing vanaf het niet gecoate vlak. Er wordt nog geen additionele indringing via de scheur waargenomen. Figuur 4-20 illustreert de aftekening van het carbonatatiefront die op het oog bij ieder proefstuk afgetekend werd.



Figuur 4-20: Typerende aftekening van het carbonatatiefront na 2 weken.

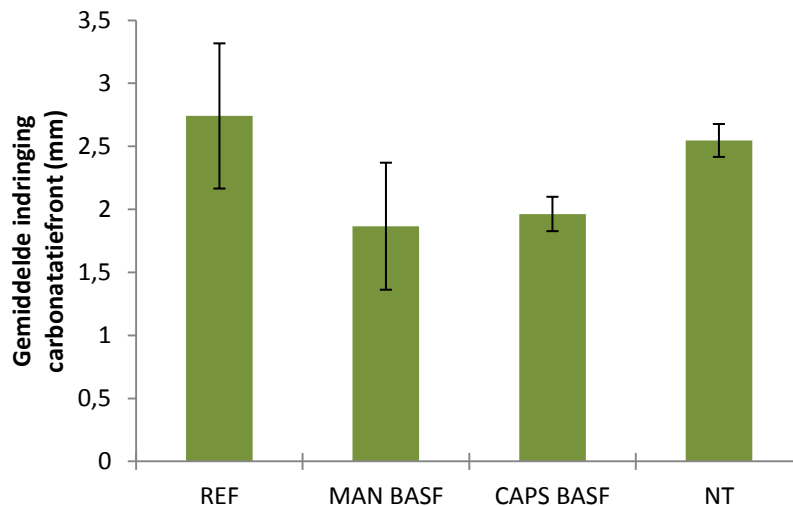
In Figuur 4-21 wordt de verhouding van de gecarbonateerde op de totale oppervlakte weergegeven. Een marginale verbetering bij de geheelde proefreeksen kan worden vastgesteld. Dit verschil is echter niet significant voor de verschillende proefreeksen. De kleinere oppervlakte verhouding bij de geheelde proefstukken kan verklaard worden doordat PU zich eveneens in een fijne zone over de scheur afgezet had. Hierdoor wordt de indringing aan het ongecoate vlak gehinderd met een kleinere gecarbonateerde oppervlakte tot gevolg.



Figuur 4-21: Gemiddelde verhouding van de gecarbonateerde op totale oppervlakte bij de verschillende proefreeksen.

#### 4.2.3 CO<sub>2</sub> -indringing vanaf het oppervlak

Daar er geen additionele indringing ter hoogte van de scheur vastgesteld kon worden, werd om de halve centimeter over de ganse lengte van de loodrecht op de scheur gespleten proefstukken de indringing van het carbonatatiefront vanaf het ongecoate vlak gemeten. De gemiddelde indringing bij de verschillende proefreeksen wordt weergegeven in Figuur 4-22. Net als in paragraaf 4.2.2 wordt een kleinere indringing waargenomen bij de geheelde reeksen. Wederom kan dit verklaard worden door de afzetting van PU aan het oppervlak over de scheur. Alhoewel het effect hiervan in Figuur 4-22 duidelijker is dan in Figuur 4-21, is het verschil nog steeds niet significant.

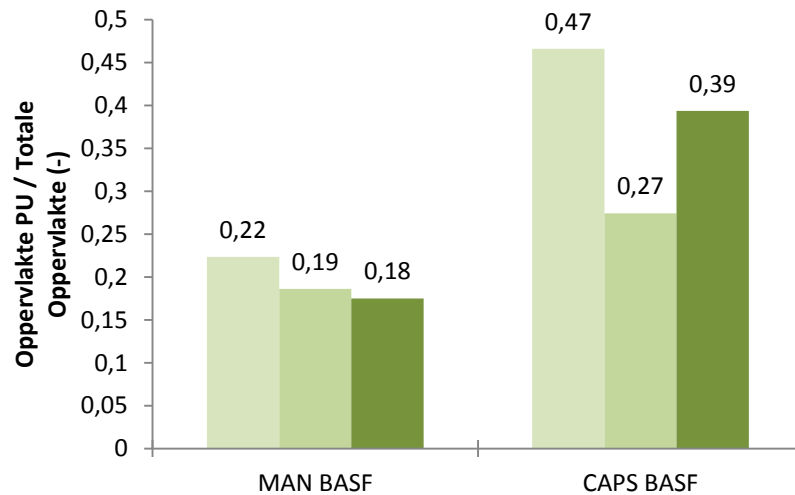


Figuur 4-22: Gemiddelde indringing van het carbonatatiefront bij de verschillende proefreeksen.

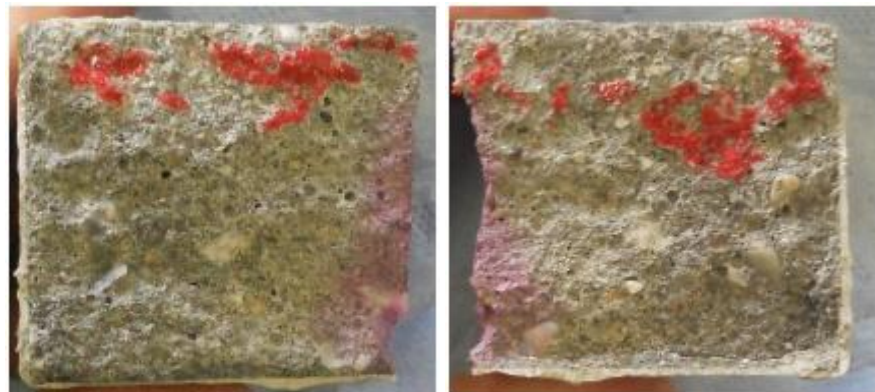
#### 4.2.4 Oppervlakte PU in de scheur

Ondanks de marginaal betere resultaten van beide geheelde proefreeksen, werd een significant grotere opvulling van de scheur vastgesteld bij de proefreeks met ingekapseld helend agens. Figuur 4-23 geeft de verhouding van de oppervlakte PU op de totale oppervlakte van de scheur weer voor ieder autonoom geheeld proefstuk. De spreiding binnen de resultaten van de ingekapselde

proefreeks is groot, maar leidt in het beste geval tot een opvulling over bijna de helft van het scheurvlak. De manueel geheelde proefstukken vertonen typisch een homogene penetratie van het PU vanaf het niet gecoate vlak tot ongeveer de helft van het proefstuk, zoals geïllustreerd in Figuur 4-24. Op de onderste helft van het scheurvlak werd amper tot geen PU teruggevonden. De homogene, maar geringe penetratie van het PU blijkt voldoende te zijn om de carbonatatie af te remmen.



Figuur 4-23: Oppervlakte PU in de scheur bij de verschillende proefstukken.

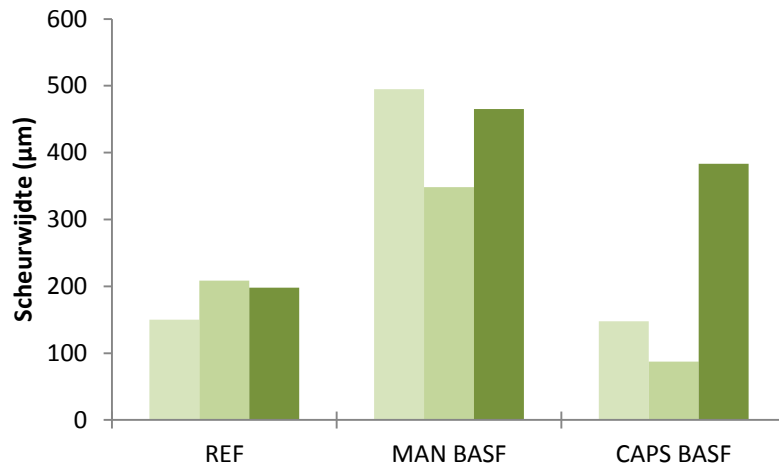


Figuur 4-24: Aftekening van PU in de scheur bij een manueel geheeld proefstuk.

## 4.3 CO<sub>2</sub> diffusietest na 9 weken

### 4.3.1 Scheurwijdtes

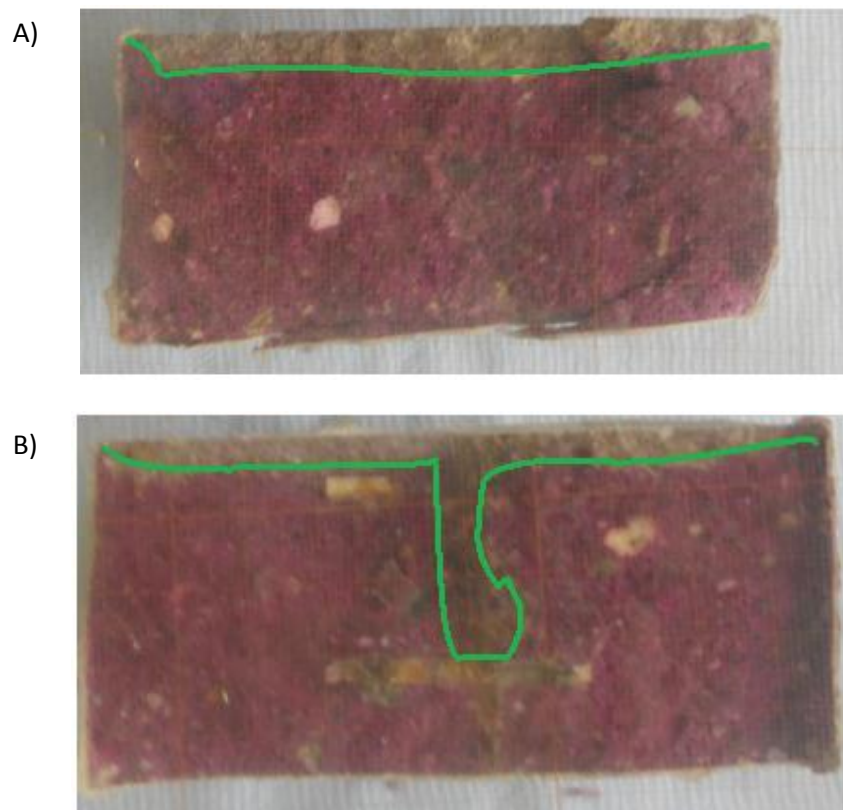
Wederom is er een grote spreiding in de scheurwijdtes merkbaar. Er wordt net geen significant verschil waargenomen ( $\alpha_{\text{eff}} = 5,5\%$ ) tussen de scheurwijdtes van de referentie en manueel geheelde reeks. Het algemeen gemiddelde van de scheurwijdte bedraagt 276 $\mu\text{m}$ .



Figuur 4-25: Scheurwijdtes van de verschillende proefstukken.

### 4.3.2 De totale gecarbonateerde oppervlakte

Net als bij de chloride diffusietesten kan ook hier een opdeling gemaakt worden in verschillende op het oog waarneembare profielen. De proefstukken kunnen in 2 klassen opgedeeld worden. Klasse A vertoont een geringe equidistante  $\text{CO}_2$  indringing vanaf het blootgestelde vlak, terwijl klasse B een additionele indringing ter hoogte van de scheur vertoont. Er dient hierbij benadrukt te worden dat de additionele indringing aan de scheur nog steeds een zeer lichte kleuromslag vertoont. Figuur 4-26 geeft een illustratie van de twee te onderscheiden klassen weer.



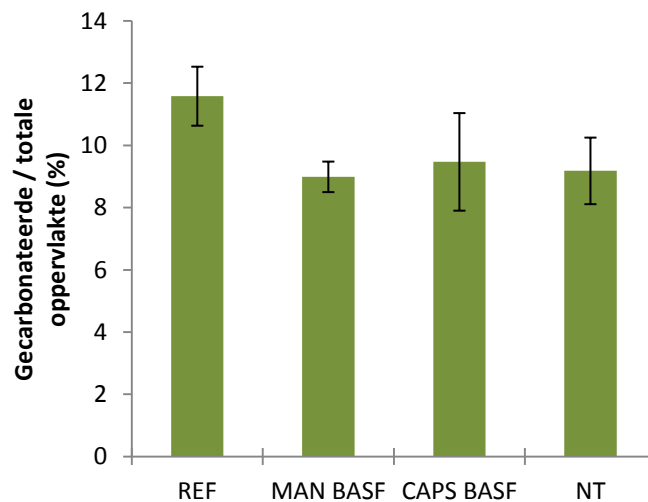
Figuur 4-26: Classificatie van de afgetekende carbonatieprofielen: A) Equidistante indringing  $\text{CO}_2$ , B) Additionele  $\text{CO}_2$  indringing aan de scheur.

In Tabel 4-2 wordt weergegeven hoeveel proefstukken in een bepaalde proefreeks tot klasse A of B horen. De referentie proefstukken vertonen allen een extra indringing langs de scheur, terwijl de manueel geheelde proefstukken allen eenzelfde carbonatatiefront aftekenen als de niet gescheurde proefstukken. Bij de proefstukken met ingekapseld helend agens vertoont één proefstuk een additionele indringing (zie Figuur 4-26 B).

**Tabel 4-2: Procentuele verdeling van het aantal proefstukken over de verschillende klassen per proefreeks.**

	REF	MAN BASF	CAPS BASF	NT
A	0%	100%	67%	100%
B	100%	0%	33%	0%

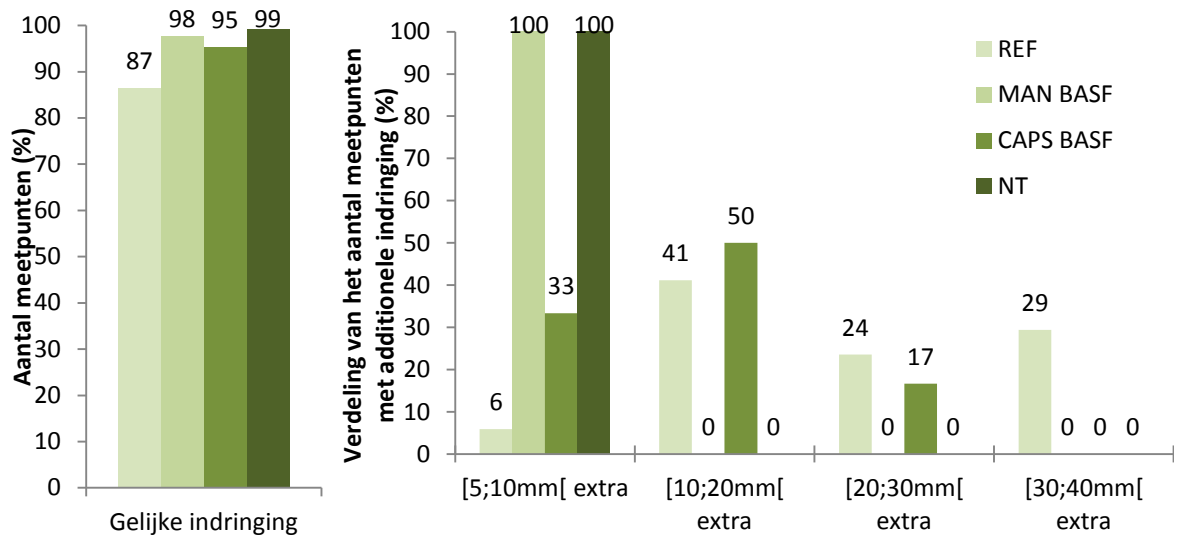
Ondanks de additionele indringing via de scheur bij de referentieproefstukken kan nog steeds geen significant verschil tussen de verschillende proefreeksen vastgesteld worden indien de gecarbonateerde oppervlakteverhoudingen statistisch geanalyseerd worden. Op Figuur 4-27 kan echter wel een marginaal grotere gecarbonateerde oppervlakte vastgesteld worden bij de referentie reeks. Gezien de vrij geringe CO<sub>2</sub> indringingsdiepte (zowel vanaf het afstrijkvlak, als loodrecht op de scheur) kan bovendien gesteld worden dat de verhouding van de gecarbonateerde oppervlakte een weinig gevoelige parameter is om de performantie van de zelfheling te toetsen. Dit in tegenstelling tot de chloride diffusietesten, waar de indringingsdiepte veel groter is.



**Figuur 4-27: Gemiddelde verhouding van de gecarbonateerde op totale oppervlakte voor iedere proefreeks.**

Tenslotte wordt in Figuur 4-28 op analoge wijze als in paragraaf 4.1.2 een inventaris van de CO<sub>2</sub> indringing gemeten op vast bepaalde meetpunten weergegeven. Aangezien de indringing vanaf het afstrijkvlak nu echter tot een vijftal millimeter beperkt is, wordt een gelijke indringing aangenomen indien het verschil kleiner is dan 5mm t.o.v. de referentie indringingsdiepte. In het geval van de referentiereeks werd in 87% van de meetpunten een gelijke indringing waargenomen. Dit is merkbaar lager dan de >95% in het geval van de geheelde en niet gescheurde proefreeksen. Bij de additionele indringing kan worden vastgesteld dat de manueel geheelde en niet gescheurde reeks enkel een geringe extra indringing van 5 à 10mm vertonen. Op basis van de waarnemingen in Tabel 4-2 kan gesteld worden dat deze extra indringing te wijten is aan toevallige fluctuaties in de aftekening van

het carbonatatiefront. De referentieproefstukken vertonen een vrij fijne, maar diepe CO<sub>2</sub> indringing: 29% van de meetpunten met additionele indringing geeft een penetratie van meer dan 30mm weer. Het enkele proefstuk uit de ingekapselde reeks die geen volledige zelfheling vertoonde, heeft anderzijds de CO<sub>2</sub> indringing toch ietwat gehinderd aangezien in het interval [30;40mm[ extra geen meetpunten werden vastgesteld.

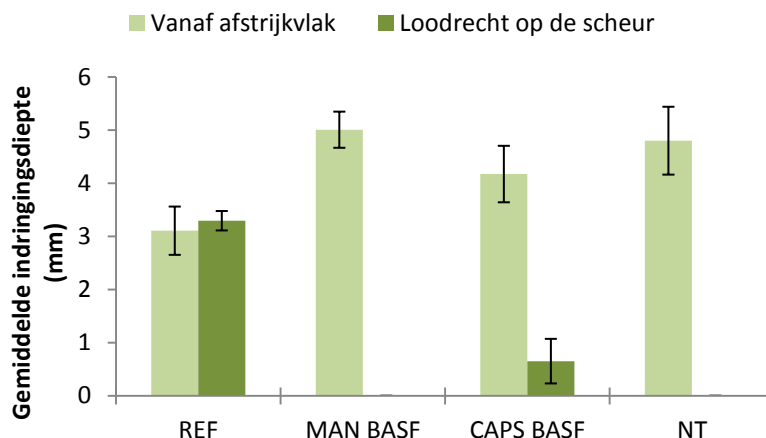


Figuur 4-28: Verdeling van de CO<sub>2</sub> indringing gemeten op vaste meetpunten.

### 4.3.3 CO<sub>2</sub>-indringing vanaf het oppervlak en loodrecht op de scheur

Analoog als in paragraaf 4.1.3 werd de gemiddelde indringingsdiepte opgemeten vanaf het afstrijkvlak. Een in Figuur 4-29 duidelijk merkbaar verschil tussen de referentiereeks ( $\pm 3$ mm) en de overige proefreeksen ( $\pm 5$ mm) kan worden vastgesteld. Wederom is dit verschil echter niet significant. Het kan evenwel de beperkte sensitiviteit van de verhouding van de gecarbonateerde oppervlakte uit 4.3.2 verklaren. Immers, indien de referentieproefstukken eenzelfde indringingsdiepte vanaf het afstrijkvlak zouden vertonen, zou de gecarbonateerde oppervlakte verhouding nog groter uitvallen. Een mogelijke verklaring voor de kleinere indringingsdiepte van de referentieproefstukken kan een toevallig betere verdichting van de proefstukken zijn.

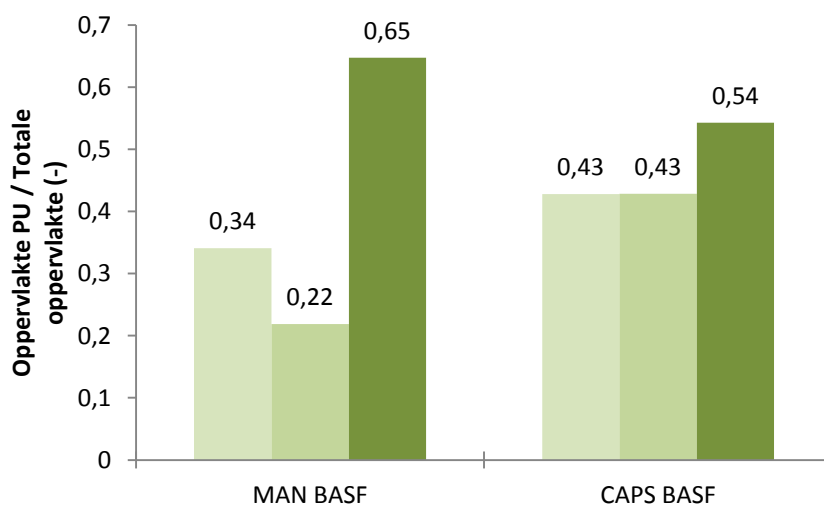
Figuur 4-29 geeft tevens de gemiddelde indringing loodrecht op de scheur weer. In het geval van de referentieproefstukken is deze nagenoeg gelijk aan de indringing vanaf het afstrijkvlak, wat in overeenstemming is met het onderzoek van Alahmad et al. (2009). De gemiddelde indringingsdiepte loodrecht op de scheur van de ingekapselde proefreeksen geeft in feite een vertekend beeld weer aangezien slechts één proefstuk een indringing via de scheur vertoont. De gemiddelde indringing loodrecht op de scheur van het proefstuk in kwestie bedraagt 1,96mm, wat echter nog steeds significant verschillend is van de referentieproefstukken. Dit toont aan dat, zelfs indien geen volledige zelfheling bereikt is, de CO<sub>2</sub> indringing nog steeds tegengewerkt wordt. De manueel geheelde en niet gescheurde proefreeksen vertoonden geen indringing loodrecht op de scheur.



Figuur 4-29: Gemiddelde CO<sub>2</sub> indringingsdiepte gemeten vanaf het afstrijklak en loodrecht op de scheur.

#### 4.3.4 Oppervlakte PU in de scheur

De proefstukken met ingekapseld helend agens vertonen een vrij goede opvulling van het scheurvlak. Gemiddeld 46% van de scheur werd gevuld met PU. De manueel geheelde proefstukken vertonen een betere afzetting van PU in de scheur dan voorheen. Een proefstuk heeft de scheur zelfs voor 65% gevuld met PU. Een mogelijke verklaring kan de grotere scheurwijdte van de manueel geheelde proefstukken zijn. Hierdoor vloeit het PU makkelijker dieper in de scheur. Er is geen significant verschil in de oppervlakte van het scheurvlak bedekt met PU voor beide helingsmechanismen.



Figuur 4-30: Verhouding van de oppervlakte bedekt met PU in de scheur voor de verschillende proefstukken.

### 4.4 Corrosiemetingen

#### 4.4.1 Scheurwijdtes

In Figuur 4-31 wordt de opgemeten scheurwijdte van iedere balk weergegeven. Zoals reeds vermeld is één balk uit de reeks CAPS SLV weggelaten door de vorming van dwarskrachtscheuren. De scheurwijdtes van de reeksen REF, MAN BASF, MAN SLV, MAN WRA en CAPS WRA werden bepaald zoals besproken in paragraaf 3.2.3. De scheurwijdtes van de reeksen CAPS SLV en CAPS BASF zijn niet

bepaald geweest door het opmeten van de scheurwijdte met de microscoop om de centimeter langs de scheur. De groef van deze proefstukken was immers volledig met PU gevuld, waardoor de scheur niet teruggevonden kon worden. Daarom werd de scheurwijdte van deze balken gelijk gesteld aan deze opgemeten door de LVDT's op het einde van de driepuntsbuigproef. Aangezien er nog een reserve balk aangemaakt was, is een extra balk manueel geheeld met het PU van BASF. De gemiddelde scheurwijdte bedraagt 110 $\mu$ m. Tussen de verschillende proefreeksen kan geen significant verschil in scheurwijdte vastgesteld worden.

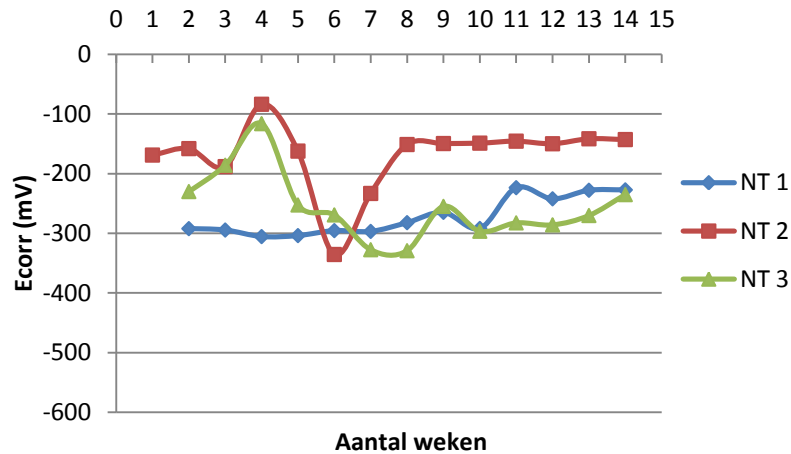


Figuur 4-31: Scheurwijdte van ieder proefstuk per proefreeks.

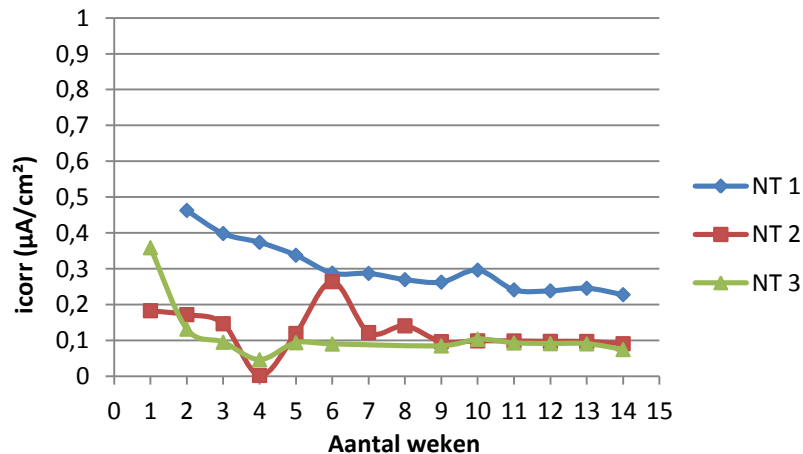
#### 4.4.2 Verloop van de corrosiemetingen in de tijd

Figuur 4-32 geeft het verloop weer van de corrosiepotentiaal -gemeten met de potentiostaat- van de ongescheurde proefstukken. Het verloop van de corrosiestroomdichtheid van de ongescheurde proefstukken wordt voorgesteld in Figuur 4-33. Bij de meting in de eerste week kon voor balk NT 1 en NT 3 geen v-vormige curve bekomen worden uit de log  $i$  – E grafiek (zie paragraaf 3.2.8). Bijgevolg kon de corrosiepotentiaal en de corrosiestroomdichtheid niet bepaald worden, waardoor deze uit de grafieken weggelaten zijn. In de vierde week kan een stijging van  $E_{corr}$  en een afname van  $i_{corr}$  waargenomen worden voor de balken NT 2 en NT 3. Dit duidt op een vermindering van de corrosie activiteit, maar kwam tot stand doordat deze meetcyclus verstoord werd. Door een stroomonderbreking in het labo diende de meting een dag vervroegd te worden, waardoor de NaCl oplossing slechts twee dagen in het bassin had gestaan. De balk NT 2 vertoont in week 6 een potentiaalval en een corresponderende piek in de corrosiestroomdichtheid. In de daaropvolgende weken blijven  $E_{corr}$  en  $i_{corr}$  echter nagenoeg constant op de voorheen bepaalde waarden. De potentiaalval kan verklaard worden doordat het PVC bakje niet perfect lekdicht is, waardoor zout zich afzet rond het uiteinde van de wapeningsstaaf. Dit zout werd sinds week 6 wekelijks verwijderd waardoor  $E_{corr}$  terug toenam. Gezien de vrij positieve  $E_{corr}$  en lage  $i_{corr}$  van balk NT 2, kan aangenomen worden dat de chloriden de wapening nog niet bereikt hebben en de wapeningsstaaf na 14 weken nog steeds in een passieve toestand verkeerd. De corrosiepotentiaal van balk NT 1 en NT 3 schommelt daarentegen vanaf week 5 rond -300mV. Op basis van de classificatie in Tabel 3-4 duidt dit op een hoge kans op corrosie. De corrosiestroomdichtheid van balk NT 3 is echter slechts 0,10 $\mu$ A/cm<sup>2</sup>, wat volgens Tabel 3-5 met een passieve corrosietoestand overeenstemt. Er kan daarom worden aangenomen dat de wapeningsstaaf van balk NT 3 eveneens nog steeds gepassiveerd is en

nog geen actieve corrosie is opgetreden. Balk NT 1 vertoont daarentegen een corrosiestroomdichtheid van  $0,25\mu\text{A}/\text{cm}^2$  wat op een laag tot gemiddelde corrosie activiteit duidt. Ook op basis van het verloop van  $E_{\text{corr}}$  bekommt men eenzelfde bevinding. De chloriden hebben de wapening echter nog niet bereikt aangezien geen potentiaalval of stroompiek waargenomen kan worden. De hoge waarden van  $E_{\text{corr}}$  en  $i_{\text{corr}}$  zijn wellicht te wijten aan een meer gecorrodeerde begintoestand van de wapeningsstaaf.

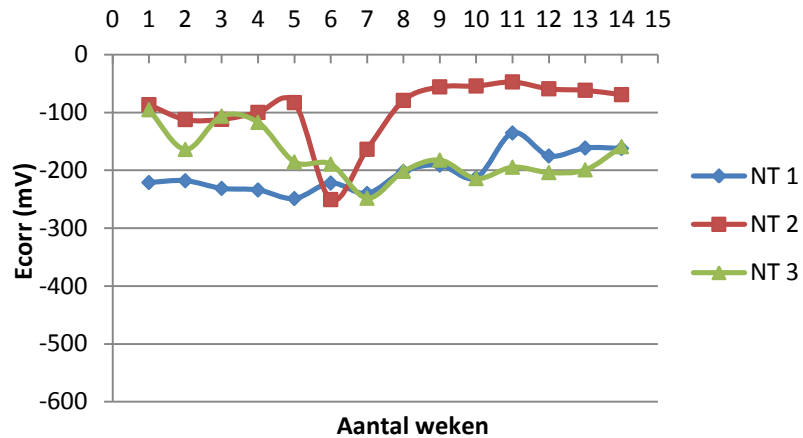


Figuur 4-32: Verloop van  $E_{\text{corr}}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de ongescheurde proefstukken, gemeten met de potentiostaat.



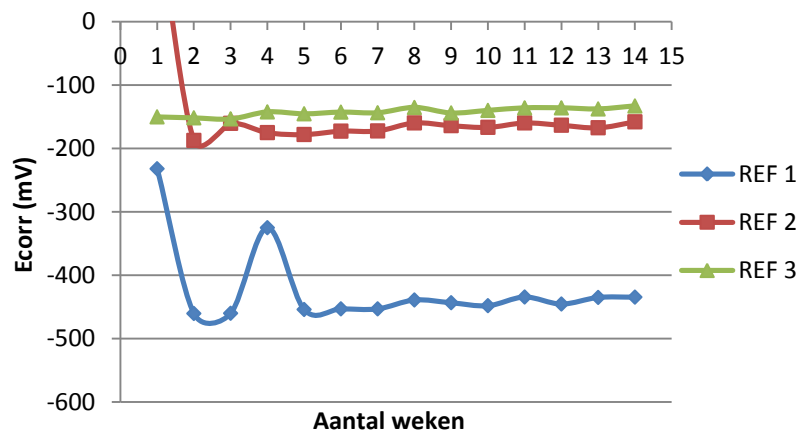
Figuur 4-33: Verloop van  $i_{\text{corr}}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) i.f.v. de tijd (weken) voor de ongescheurde proefstukken.

Figuur 4-34 geeft het verloop van de corrosiepotentiaal van de ongescheurde proefstukken weer op basis van de metingen uitgevoerd met de GalvaPulse. De corrosiepotentiaal is op 7 meetpunten langsheen de balk opgemeten, waarna het gemiddelde van deze 7 waarden berekend is. Deze gemiddelde waarde van de corrosiepotentiaal wordt weergegeven in de grafiek. Het verloop van de corrosiepotentiaal is volkomen gelijkvormig aan deze bepaald uit de potentiostatische metingen. Niettegenstaande geeft de GalvaPulse een mindere corrosie activiteit aan op basis van Tabel 3-4.

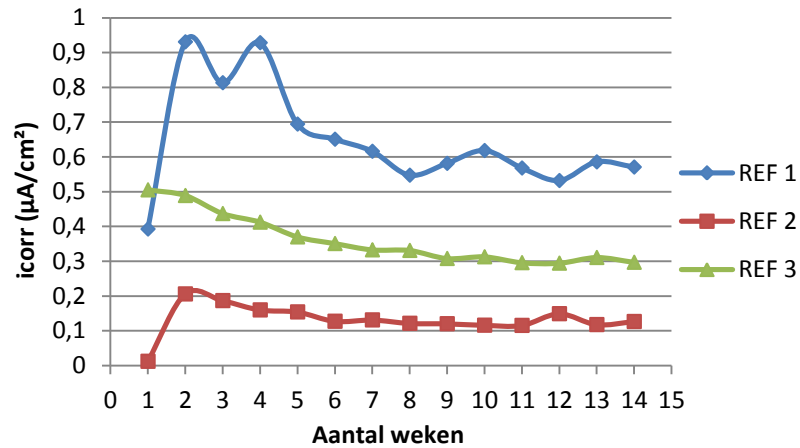


Figuur 4-34: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de ongescheurde proefstukken, gemeten met de GalvaPulse.

Figuur 4-35 geeft het verloop van de corrosiepotentiaal, bepaald met de potentiostaat, van de referentieproefstukken weer. Men bemerkt bij balk REF 1 wederom de invloed van de verstoorde meetcyclus in week 4, waar verder geen aandacht aan moet geschonken worden. De chloriden hebben de wapeningsstaaf van balk REF 1 reeds bereikt na week 2. Een potentiaalval kan waargenomen worden in Figuur 4-35, terwijl in Figuur 4-36 een stijging in het verloop van  $i_{corr}$  voorkomt. De corrosiepotentiaal blijft in de daaropvolgende weken rond  $-460\text{mV}$  schommelen. Op basis van de classificatie van Tabel 3-4 en Tabel 3-5 kan gesteld worden dat de wapening van balk REF 1 reeds vanaf week 2 actief aan het corroderen is. Balk REF 2 vertoont daarentegen een nagenoeg constant verloop van de corrosie activiteit met  $E_{corr} \approx -180\text{mV}$  en  $i_{corr} \approx 0,15\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . De chloriden hebben de wapeningsstaaf duidelijk nog niet bereikt. Ondanks de grotere corrosiestroomdichtheid ( $0,3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) van balk REF 3, moet besloten worden dat de chloriden de wapening van deze balk ook nog steeds niet bereikt hebben. Wellicht is dit te verklaren doordat de scheur rondom de wapeningsstaaf opnieuw is dichtgedrukt na het uitvoeren van de driepuntsbuigproef. Niettegenstaande wordt verwacht dat de wapening van deze balken in de nabije toekomst actief zal beginnen corroderen. Helaas valt dit buiten het tijdsbestek van deze masterscriptie.

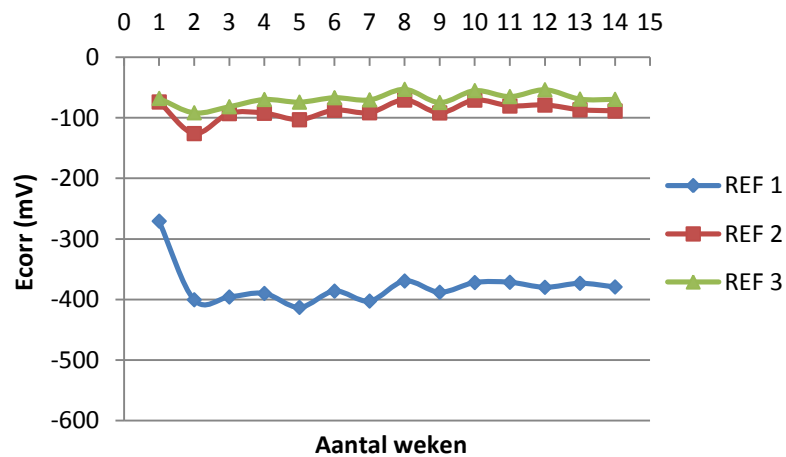


Figuur 4-35: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de referentie proefstukken, gemeten met de potentiostaat.



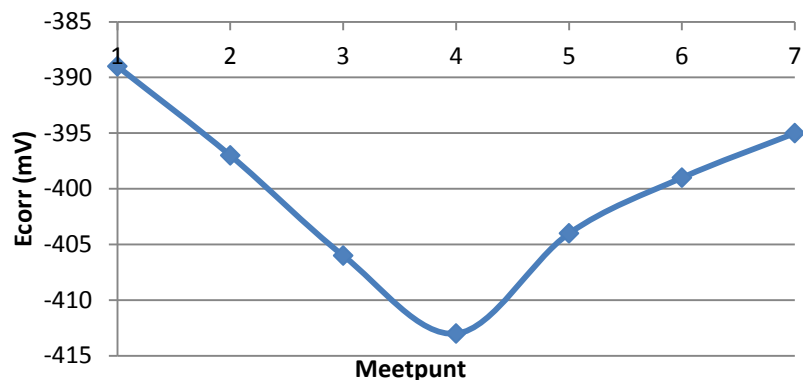
Figuur 4-36: Verloop van  $i_{corr}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) i.f.v. de tijd (weken) voor de referentieproefstukken.

In Figuur 4-37 wordt het verloop van  $E_{corr}$ , bepaald met de GalvaPulse, weergegeven. Opnieuw kan een gelijkvormig verloop in vergelijking met Figuur 4-35 vastgesteld worden. De stijging van de potentiaal van balk REF 1 in week 4 is echter niet aanwezig op Figuur 4-37. Opnieuw geeft de meting met de GalvaPulse een lagere corrosie activiteit aan op basis van Tabel 3-4.



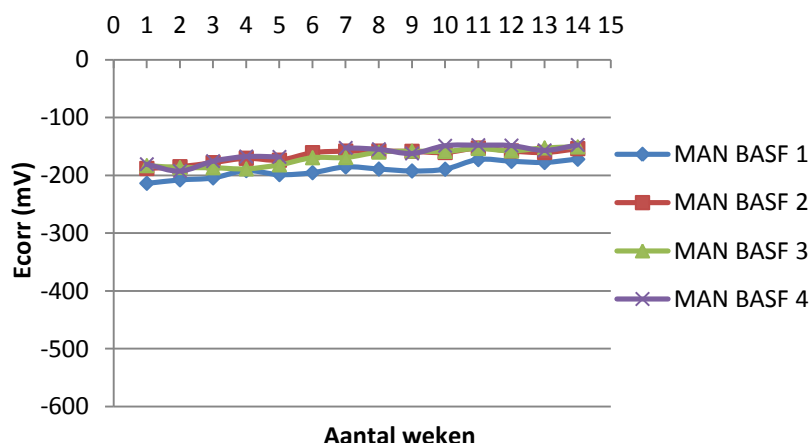
Figuur 4-37: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de referentie proefstukken, gemeten met de GalvaPulse.

Figuur 4-38 toont de opgemeten variatie van de corrosiepotentiaal langsheen balk REF 1. Er kan duidelijk worden vastgesteld dat de corrosie geïnitieerd is ter hoogte van de scheur (meetpunt 4). Een minimum waarde van  $E_{corr}$  wordt er opgemeten. Bij alle overige balken is de variatie van de corrosiepotentiaal tussen de verschillende meetpunten immers beperkt tot maximaal 3mV.

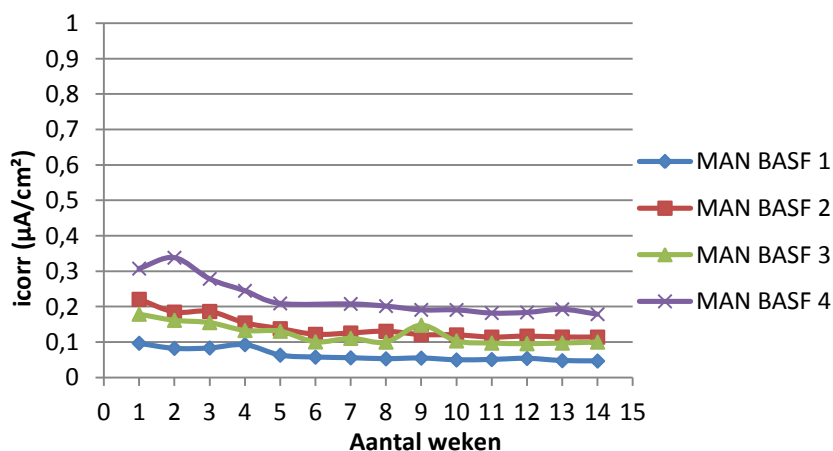


Figuur 4-38: Variatie van  $E_{corr}$  (mV) langsheen balk REF 1, gemeten in de 2<sup>e</sup> week met de GalvaPulse.

Het verloop van  $E_{corr}$  en  $i_{corr}$  -gemeten met de potentiostaat- voor de met PU MEYCO MP manueel geheelde proefstukken wordt respectievelijk weergegeven in Figuur 4-39 en Figuur 4-40. De corrosiepotentiaal van alle balken is nagenoeg constant in de tijd en beperkt tot ongeveer -175mV. De stroomdichtheid is eveneens constant in de tijd en varieert van  $0,05\mu A/cm^2$  tot  $0,20\mu A/cm^2$  voor de verschillende balken. De wapening van de balken is duidelijk nog in een passieve toestand.

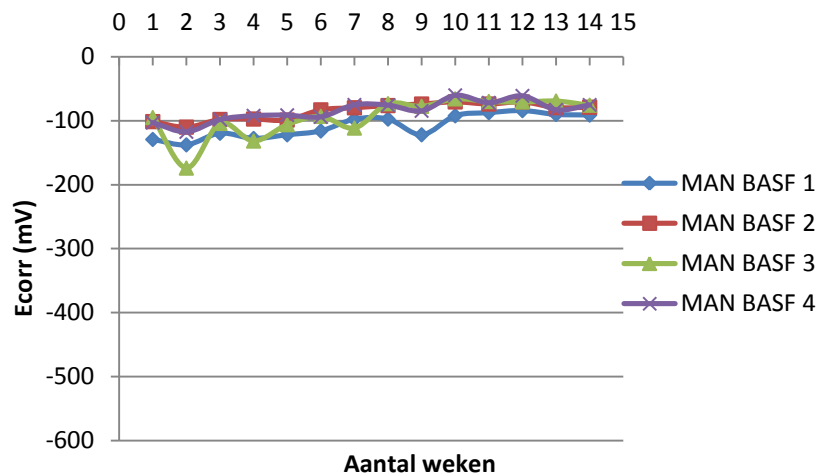


Figuur 4-39: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor manueel met PU MEYCO MP geheelde proefstukken, gemeten met de potentiostaat.



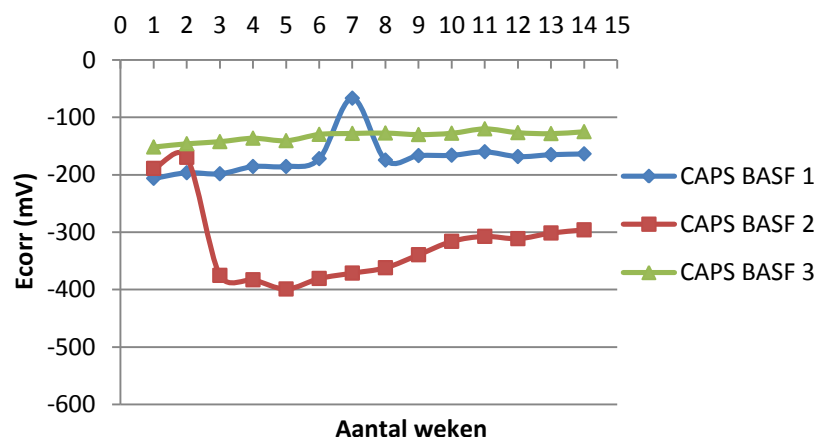
Figuur 4-40: Verloop van  $i_{corr}$  ( $\mu A/cm^2$ ) i.f.v. de tijd (weken) voor manueel met PU MEYCO MP geheelde proefstukken.

Figuur 4-41 geeft de corrosiepotentiaal weer, gemeten met de GalvaPulse. Het verloop van  $E_{corr}$  is opnieuw bijna identiek aan deze van Figuur 4-39, echter de waarden duiden opnieuw op een lagere corrosie activiteit.

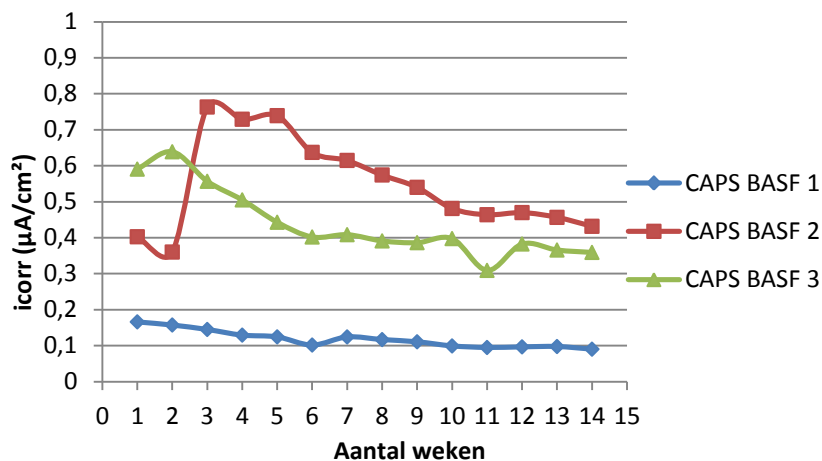


Figuur 4-41: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor manueel met PU MEYCO MP geheelde proefstukken, gemeten met de GalvaPulse.

De wapening van balk CAPS BASF 2 vertoont vanaf week 3 een actieve corrosietoestand. Een potentiaalval met overeenkomstige stijging in  $i_{corr}$  is duidelijk waarneembaar op resp. Figuur 4-42 en Figuur 4-43. De heling van balk CAPS BASF 2 was duidelijk ontoereikend om corrosie tegen te gaan. In het geval van de balken CAPS BASF 1 en CAPS BASF 3 zijn de chloriden nog niet tot aan de wapening doorgedrongen. Beide balken hebben een nagenoeg constant verloop van  $E_{corr}$  in de tijd. De wapening van balk CAPS BASF 1 verkeert op basis van beide grafieken duidelijk in een passieve toestand. De corrosiestroomdichtheid van balk CAPS BASF 3 is met  $0,35\mu\text{A}/\text{cm}^2$  na 14 weken vrij hoog, wat wijst op een gemiddelde corrosie activiteit. Anderzijds kan worden vastgesteld dat  $i_{corr}$  sinds de eerste meting monotoon is afgenomen. Dit wijst op de passiverende werking van de omringende mortel. De grote corrosiestroomdichtheid is dus het gevolg van de begintoestand van de wapeningsstaaf, welke meer gecorrodeerd was.

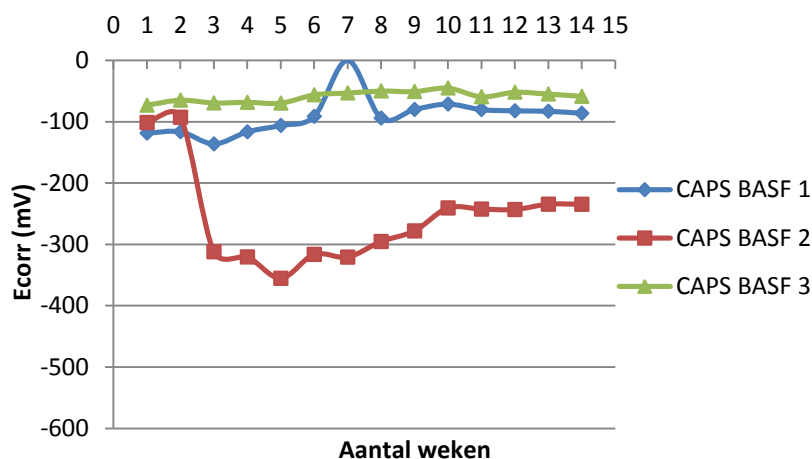


Figuur 4-42: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor met PU MEYCO MP ingekapselde proefstukken, gemeten met de potentiostaat.

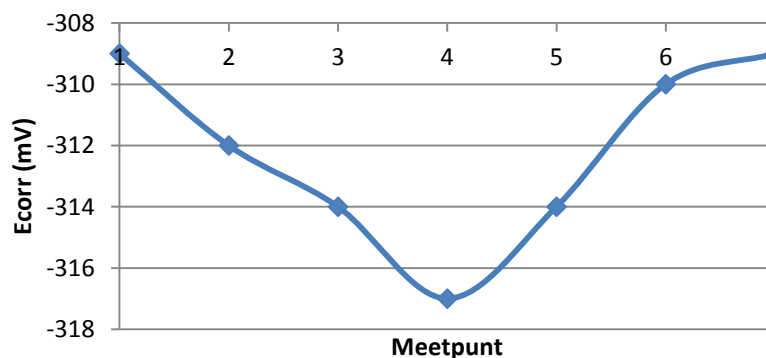


Figuur 4-43: Verloop van  $i_{corr}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) i.f.v. de tijd (weken) voor met PU MEYCO MP ingekapselde proefstukken.

Opnieuw kan een zeer gelijkvormig verloop van  $E_{corr}$ , gemeten met de twee verschillende meettoestellen, waargenomen worden wanneer Figuur 4-42 vergeleken wordt met Figuur 4-44. Figuur 4-45 toont aan dat de initiatie van de actieve corrosie toestand in balk CAPS BASF 2 tot stand gekomen is ter hoogte van de scheur.

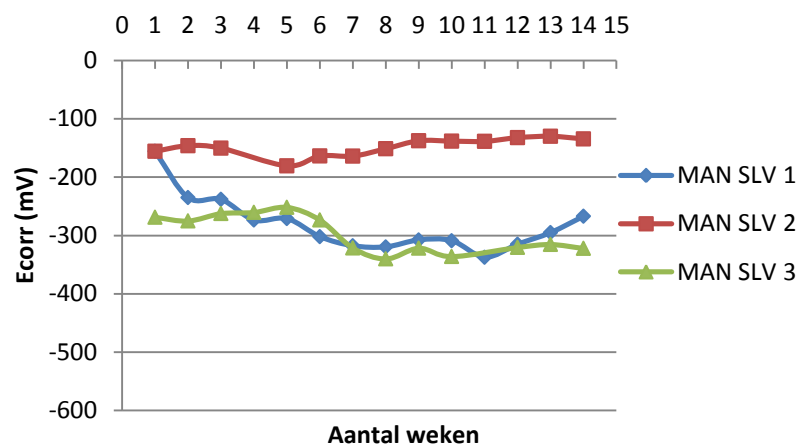


Figuur 4-44: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor met PU MEYCO MP ingekapselde proefstukken, gemeten met de GalvaPulse.

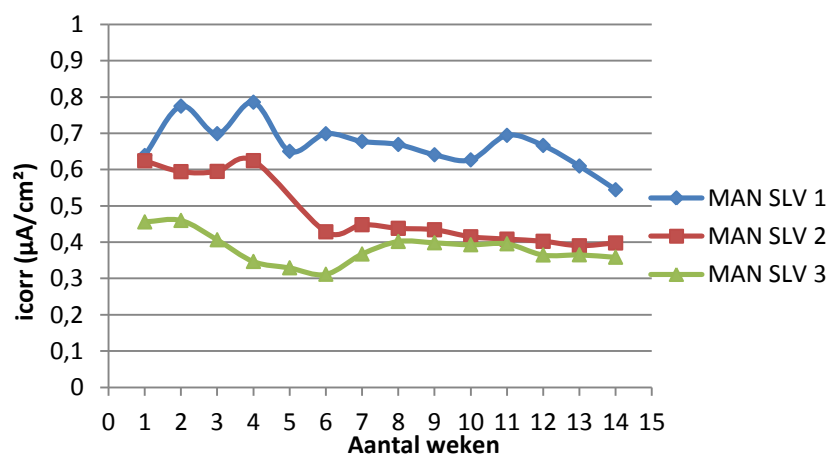


Figuur 4-45: Variatie van  $E_{corr}$  (mV) langsheen balk CAPS BASF 2, gemeten in de 3<sup>e</sup> week met de GalvaPulse.

Figuur 4-46 en Figuur 4-47 geven resp. het verloop van  $E_{corr}$  en  $i_{corr}$  -gemeten met de potentiostaat- van de proefreeks MAN SLV weer. De balk MAN SLV 1 vertoont een vrijwel monotone afname van  $E_{corr}$  in de tijd, terwijl  $i_{corr}$  nagenoeg constant rond  $0,65\mu A/cm^2$  blijft schommelen. De corrosiestroomdichtheid duidt volgens Tabel 3-5 op een hoge corrosie activiteit van de wapening. De balk vertoont echter afzetting van zout rondom het uiteinde van de wapeningsstaaf door een lek in het PVC bakje. Ondanks de aangebrachte coating ter hoogte van het uittreden van de wapeningsstaaf en de omwikkeling met parafilm heeft de neerslag van het NaCl toch voor de initiatie van corrosie gezorgd. De HCP meting uitgevoerd met de GalvaPulse toont dit duidelijk aan. De corrosiepotentiaal is het meest negatief ter hoogte van de uitstekende wapening waarrond de zoutafzetting waargenomen is (meetpunt 1 op Figuur 4-49). Het verloop van  $E_{corr}$  en  $i_{corr}$  van de balken MAN SLV 2 en MAN SLV 3 is vrij constant in de tijd, wat erop wijst dat de chloriden de wapening nog niet bereikt hebben. De hoge waarde van  $i_{corr}$  rond  $0,4\mu A/cm^2$  na 14 weken duidt echter op een vrij grote corrosie activiteit die aan de begintoestand van de wapening toegeschreven kan worden.

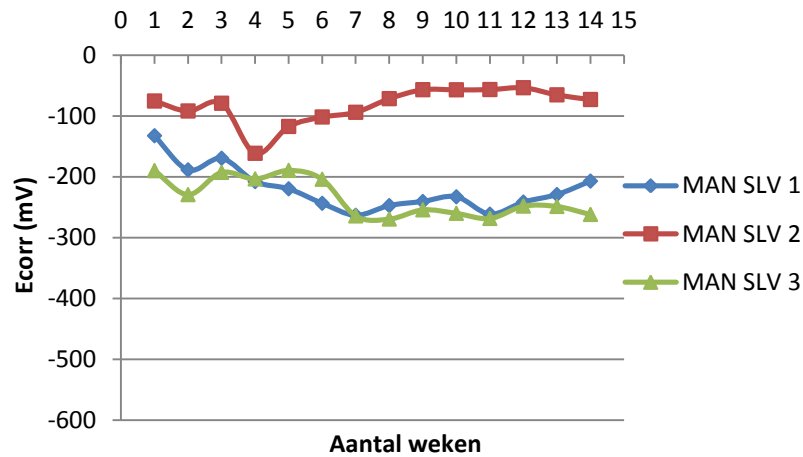


Figuur 4-46: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de manueel met PU flex SLV geheelde proefstukken, gemeten met de potentiostaat.

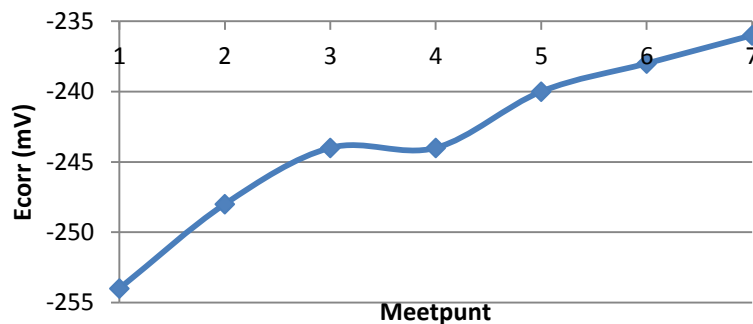


Figuur 4-47: Verloop van  $i_{corr}$  ( $\mu A/cm^2$ ) i.f.v. de tijd (weken) voor de manueel met PU flex SLV geheelde proefstukken.

De metingen uitgevoerd met de GalvaPulse (Figuur 4-48) leiden wederom tot eenzelfde verloop van de corrosiepotentiaal in vergelijking met de meting van de potentiostaat:

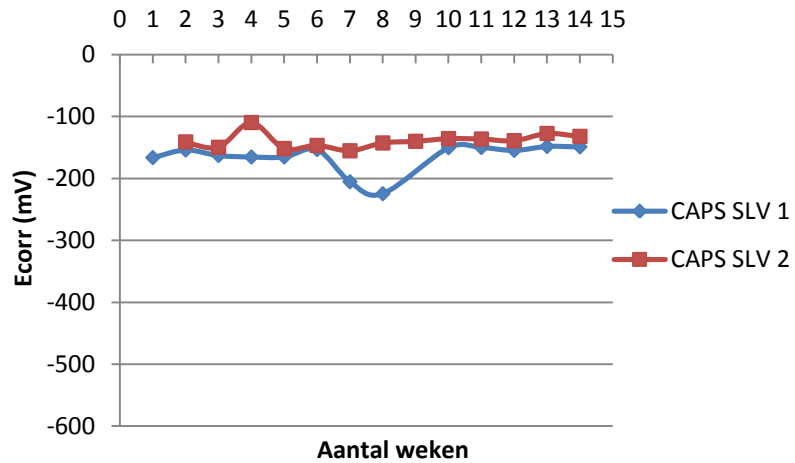


Figuur 4-48: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de manueel met PU flex SLV geheelde proefstukken, gemeten met de GalvaPulse.

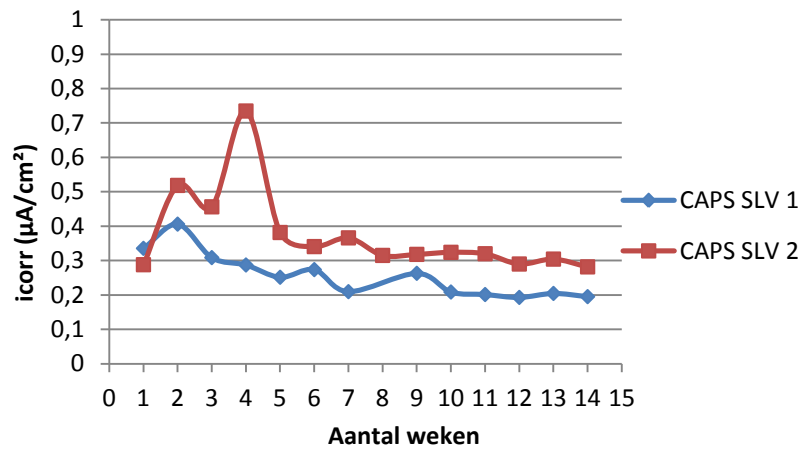


Figuur 4-49: Variatie van  $E_{corr}$  (mV) langsheen balk MAN SLV 1, gemeten in de 7<sup>e</sup> week met de GalvaPulse.

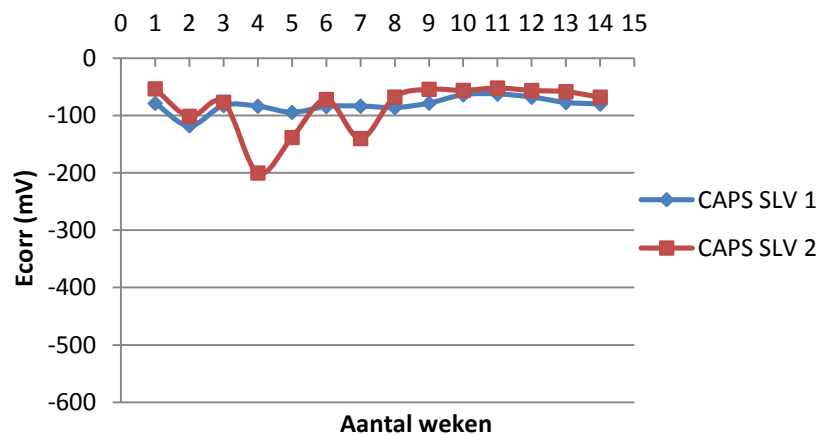
Op basis van Figuur 4-50 en Figuur 4-51 kan gesteld worden dat de chloriden de wapening van balk CAPS SLV 1 nog niet bereikt hebben. Met een nagenoeg constante  $E_{corr} = -175\text{mV}$  en  $i_{corr} = 0,22\mu\text{A}/\text{cm}^2$  verkeert de wapening na 14 weken nog steeds in een vrij passieve toestand. De corrosiepotentiaal van balk CAPS SLV 2 duidt eveneens op een lage kans op corrosie, echter de corrosiestroomdichtheid vertoont een piek in de 4<sup>e</sup> week. Opnieuw is dit een ongewenst randeffect door een lek in het PVC bassin met zoutafzetting rond de wapeningsstaaf tot gevolg. Na verwijdering van dit zout en dichting van het lek is de passieve toestand van de wapening van balk CAPS SLV 2 echter teruggekeerd. De corrosiepotentiaal gemeten met de GalvaPulse (Figuur 4-52) geeft in tegenstelling tot Figuur 4-50 wel een afname van  $E_{corr}$  in de 4<sup>e</sup> week, die meer in overeenkomst is met het verloop van  $i_{corr}$ .



Figuur 4-50: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor met PU flex SLV ingekapselde proefstukken, gemeten met de potentiostaat.



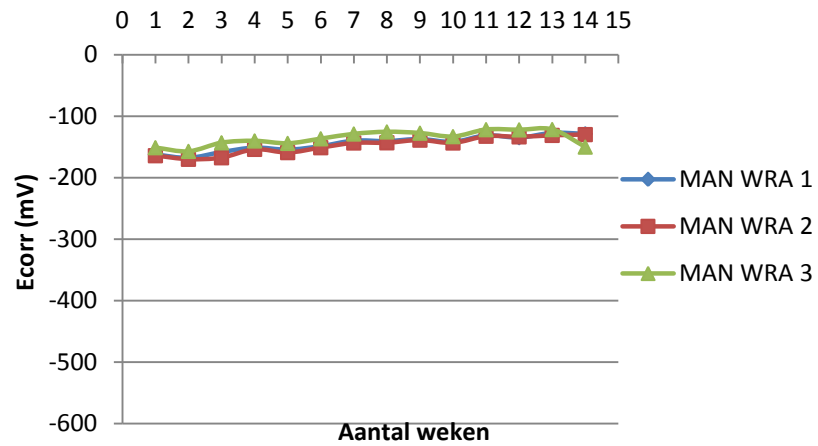
Figuur 4-51: Verloop van  $i_{corr}$  (µA/cm²) i.f.v. de tijd (weken) voor met PU flex SLV ingekapselde proefstukken.



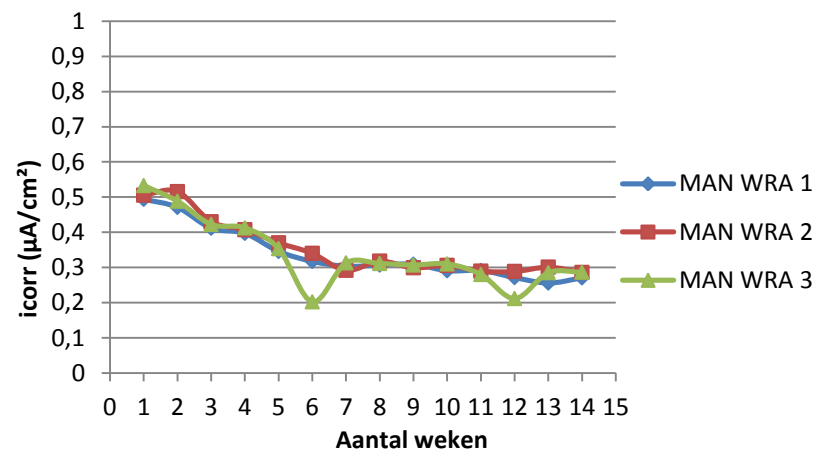
Figuur 4-52: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor met PU flex SLV ingekapselde proefstukken, gemeten met de GalvaPulse.

Alle balken van de reeks MAN WRA vertonen eenzelfde verloop van de corrosiepotentiaal en de corrosiestroomdichtheid in de tijd. Een licht monotone stijging van  $E_{corr}$  in de tijd kan waargenomen worden op Figuur 4-53, terwijl  $i_{corr}$  monotoon afneemt volgens Figuur 4-54. De chloriden hebben

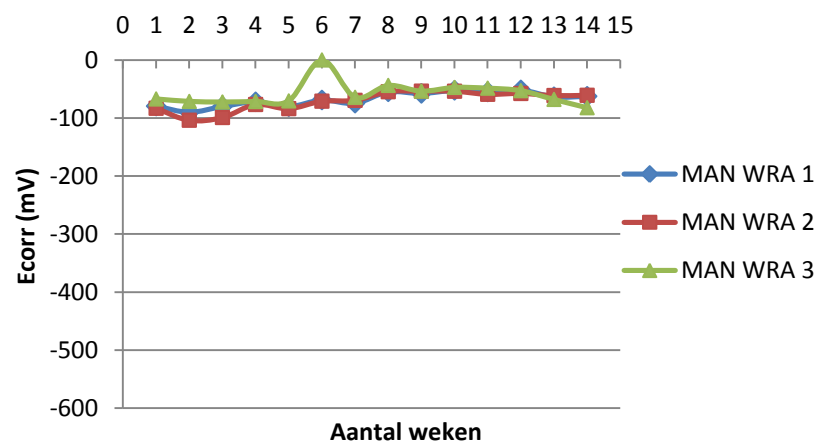
duidelijk de wapening nog niet bereikt. In tegenstelling tot wat de diffusietesten doen uitschijnen wordt de performantie van het waterafstotend middel als helend agens hier vrij duidelijk bewezen. Ook de metingen met de GalvaPulse leiden tot eenzelfde conclusie.



Figuur 4-53: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de manueel met WRA geheelde proefstukken, gemeten met de potentiostaat.

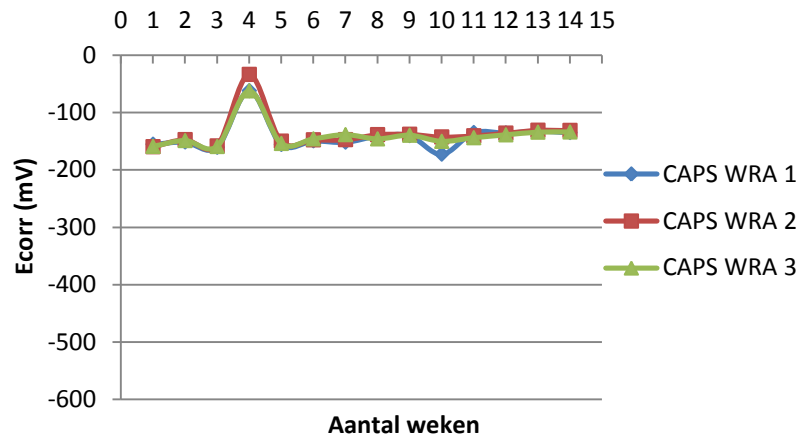


Figuur 4-54: Verloop van  $i_{corr}$  (µA/cm²) i.f.v. de tijd (weken) voor de manueel met WRA geheelde proefstukken.

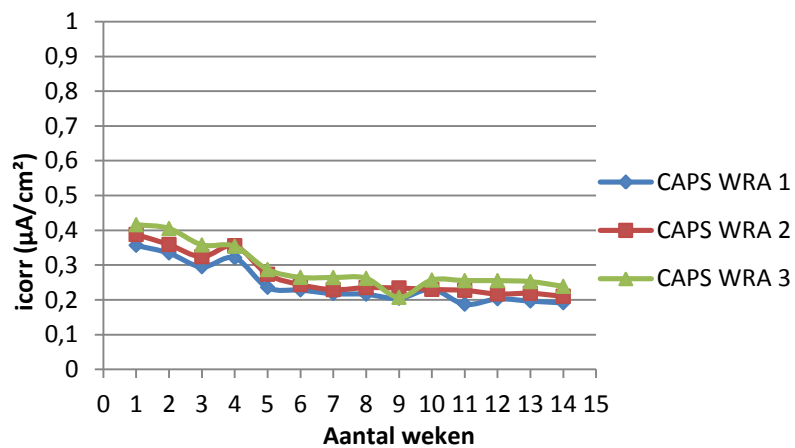


Figuur 4-55: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de manueel met WRA geheelde proefstukken, gemeten met de GalvaPulse.

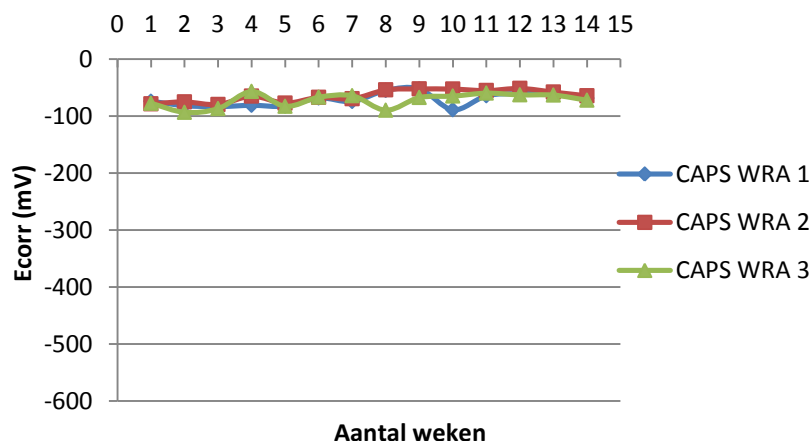
Figuur 4-56 en Figuur 4-57 tonen resp. het verloop van  $E_{corr}$  en  $i_{corr}$  -gemeten met de potentiostaat- van de proefreeks CAPS WRA. Opnieuw is een stijging in de corrosiepotentiaal waarneembaar in de vierde week, wellicht doordat de blootstellingsduur aan de NaCl oplossing slechts 2 dagen was. Met de GalvaPulse werd deze potentiaalstijging (Figuur 4-58) anderzijds niet gemeten. Overigens kan op basis van de grafieken waargenomen worden dat de chloriden de wapening nog niet bereikt hebben.



Figuur 4-56: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor met WRA ingekapselde proefstukken, gemeten met de potentiostaat.

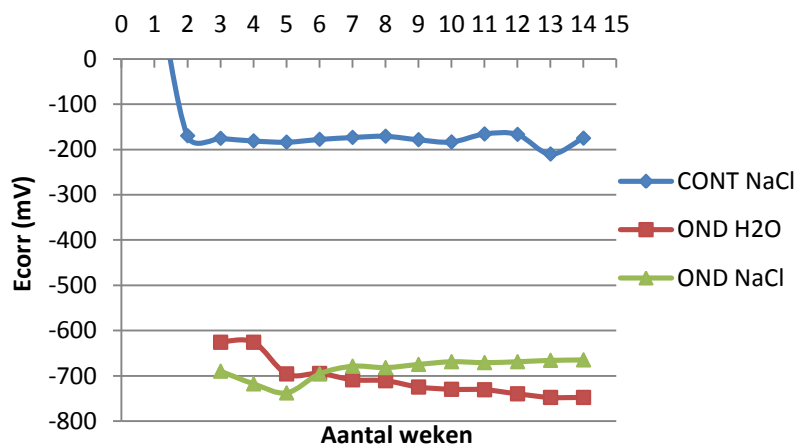


Figuur 4-57: Verloop van  $i_{corr}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) i.f.v. de tijd (weken) voor met WRA ingekapselde proefstukken.

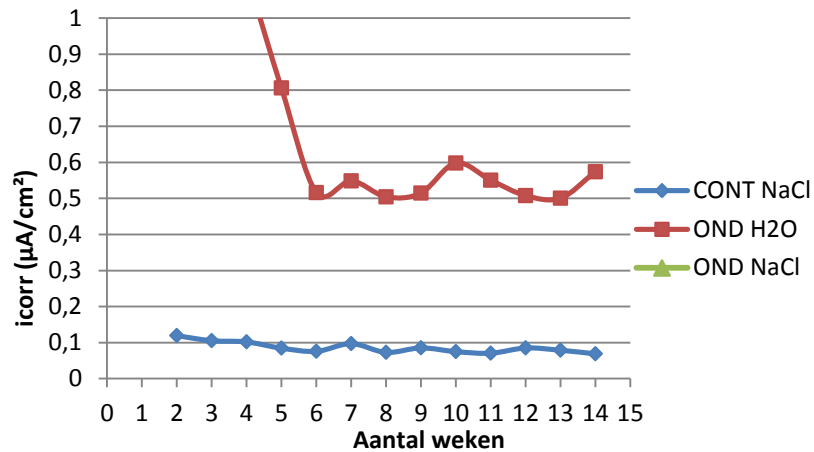


Figuur 4-58: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor met WRA ingekapselde proefstukken, gemeten met de GalvaPulse.

Tenslotte wordt in Figuur 4-59 en Figuur 4-60 het verloop van  $E_{corr}$  en  $i_{corr}$  -gemeten met de potentiostaat- i.f.v. de tijd van de proefstukken CONT NaCl, OND H<sub>2</sub>O en OND NaCl weergegeven. De potentiostatische meting werd pas vanaf de 3<sup>e</sup> week uitgevoerd op de proefstukken OND H<sub>2</sub>O en OND NaCl. Beide balken vertonen echter onmiddellijk een zeer actieve corrosie toestand. De corrosiestroomdichtheid van balk OND NaCl bedraagt zelfs ongeveer 3,6  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  gedurende de volledige tijdsduur van de metingen. Dergelijke ernstige degradatie van de wapening kan enkel het gevolg zijn van corrosie van de niet gepassiveerde uiteinden van de wapening. De afscherming van de wapeningsuiteinden met coating en parafilm was blijkbaar niet in staat om corrosie van de uiteinden te voorkomen bij de ondergedompelde balken. De corrosiepotentiaal en corrosiestroomdichtheid van balk CONT NaCl kent een nagenoeg constant verloop in de tijd. Met  $E_{corr} \approx -180\text{mV}$  en  $i_{corr} \approx 0,08\mu\text{A}/\text{cm}^2$  is de wapeningsstaaf na 14 weken nog steeds gepassiveerd.

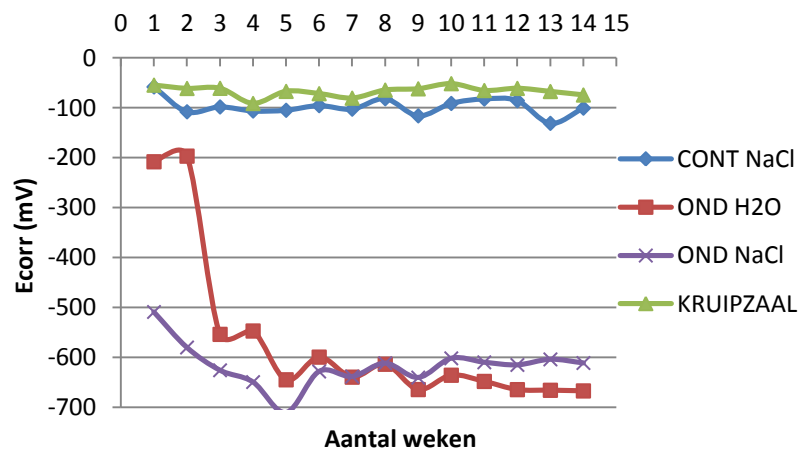


Figuur 4-59: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de proefstukken CONT NaCl, OND H<sub>2</sub>O en OND NaCl, gemeten met de potentiostaat.



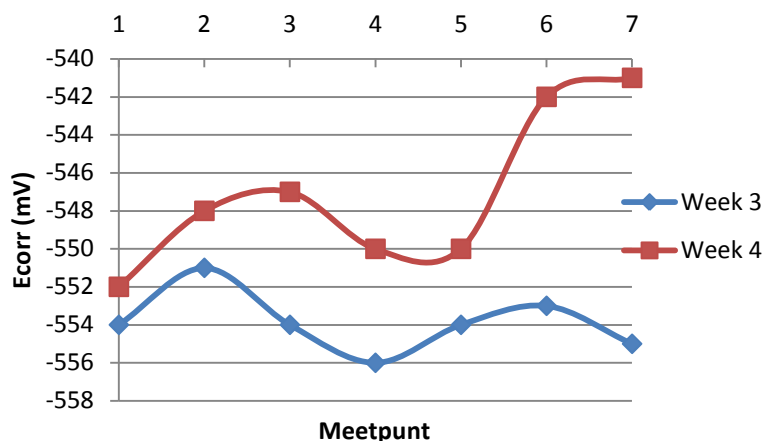
Figuur 4-60: Verloop van  $i_{corr}$  (µA/cm²) i.f.v. de tijd (weken) voor de proefstukken CONT NaCl, OND H<sub>2</sub>O en OND NaCl.

De metingen uitgevoerd met de GalvaPulse worden weergegeven in Figuur 4-61. Balk OND NaCl is onmiddellijk actief beginnen corroderen aan de wapeningsuiteinden. De wapeningsuiteinden van balk OND H<sub>2</sub>O zijn pas vanaf de 3<sup>e</sup> week actief beginnen corroderen. De wapening van balk KRUIPZAAL is nog steeds gepassiveerd, wat uiteraard te verwachten is aangezien deze niet aan chloriden wordt blootgesteld. De constante corrosiepotentiaal van deze balk wijst erop dat het GalvaPulse toestel gedurende de meetperiode steeds (kwalitatief) betrouwbare metingen heeft uitgevoerd.



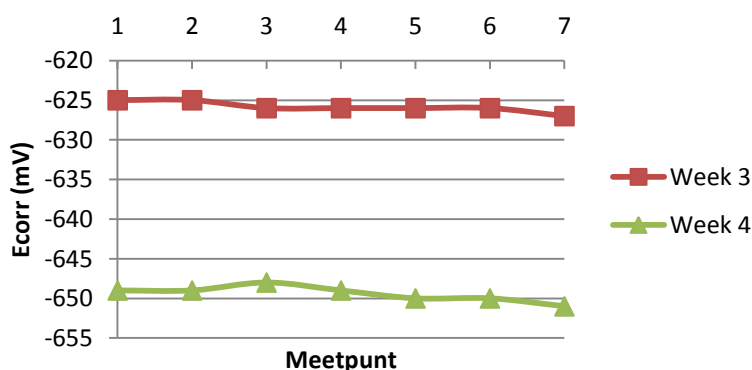
Figuur 4-61: Verloop van  $E_{corr}$  (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de proefstukken CONT NaCl, OND H<sub>2</sub>O en OND NaCl, gemeten met de GalvaPulse.

Vreemd genoeg kon de initiatie van corrosie aan de wapeningsuiteinden van de balken OND H<sub>2</sub>O en OND NaCl niet waargenomen worden met de GalvaPulse. Figuur 4-62 illustreert het verloop van  $E_{corr}$  langsheen balk OND H<sub>2</sub>O in de 3<sup>e</sup> en 4<sup>e</sup> week. De variatie in  $E_{corr}$  is in week 3 vrij beperkt (5mV) en onlogisch verdeeld. In week 4 is de variatie in  $E_{corr}$  al meer uitgesproken (11mV), doch kan niet echt waargenomen worden dat beide wapeningsuiteinden corrosie initiatie veroorzaakt hebben. In de daaropvolgende weken kan hier ook geen aanduiding van bekomen worden.



Figuur 4-62: Variatie van  $E_{corr}$  langsheen balk OND  $H_2O$  in week 3 en 4.

Figuur 4-63 geeft de variatie van  $E_{corr}$  langsheen balk OND NaCl weer. Er is een maximaal verschil van 3mV tussen de verschillende meetpunten tijdens week 3 en week 4. Ook voor de daaropvolgende weken wordt eenzelfde geringe variatie in  $E_{corr}$  bekomen. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat de guard ring bij dergelijke actieve corrosietoestand niet meer naar behoren functioneert.



Figuur 4-63: Variatie in  $E_{corr}$  langsheen balk OND NaCl tijdens week 3 en week 4.

#### 4.4.3 Vergelijking tussen de verschillende reeksen onderling

Tabel 4-3 geeft de corrosiepotentiaal en corrosiestroomdichtheid weer van iedere balk, gemeten na 14 weken. Op basis van Tabel 3-4 en Tabel 3-5 wordt de waarschijnlijkheid op corrosie en de corrosie toestand vermeld. De corrosiepotentiaal volgens de GalvaPulse is wederom het gemiddelde van 7 meetpunten langsheen de balk. Vrijwel voor iedere balk wordt een kleinere waarschijnlijkheid op corrosie bekomen met het GalvaPulse toestel in vergelijking met de potentiostatische meting. De gemiddelde corrosiepotentiaal volgens de GalvaPulse is circa 60mV à 80mV groter t.o.v de corrosiepotentiaal, gemeten met de potentiostaat. Volgens de classificatie van Tabel 3-4 is de Ag/AgCl referentiepotentiaal, waarmee de GalvaPulse uitgerust is, 20mV groter in vergelijking met de kalomel referentiepotentiaal. Bijgevolg is er een significant verschil tussen beide meettechnieken. Aangezien de GalvaPulse eerder als doel heeft in situ metingen uit te voeren, wordt verwacht dat de referentie elektrode foutief gekalibreerd is. Niettegenstaande wordt, zoals ook reeds waarneembaar op de grafieken uit paragraaf 4.4.2, een vrij gelijklopende trend van de corrosiepotentiaal

waargenomen t.o.v. deze bepaald met de potentiostaat. Bijgevolg kan besloten worden dat de GalvaPulse correct werkt, echter met een foutief gekalibreerde referentie elektrode. De absolute waarden van de corrosiepotentiaal, gemeten met de GalvaPulse, zullen dus een verkeerde inschatting maken van de waarschijnlijkheid op corrosie. Anderzijds zal de opgemeten variatie langsheen de verschillende meetpunten op de balk, zoals bv. in Figuur 4-38, een correct kwalitatief beeld geven van de corrosietoestand.

Tabel 4-3 geeft op basis van  $i_{corr}$  eveneens aan dat vrijwel alle balken nog steeds in een laag actieve (<Actief) of passieve corrosietoestand verkeren. De wapening van twee van de drie ongescheurde balken is nog steeds gepassiveerd. Enkel 3 balken binnen de reeks MAN BASF en balk CAPS BASF 1 vertonen eenzelfde passieve wapeningstoestand.  $i_{corr}$  varieert tussen  $0,20\mu\text{A}/\text{cm}^2$  en  $0,30\mu\text{A}/\text{cm}^2$  voor alle balken van de reeksen MAN WRA, CAPS WRA en CAPS SLV, wat wijst op een laag actieve corrosietoestand. Het zou voortvarend zijn hieruit te besluiten dat deze helende agentia tot een mindere heling geleid hebben t.o.v. de reeks MAN BASF. De corrosiepotentiaal is immers het grootst voor deze reeksen. Bovendien bezit balk NT 1 eveneens een corrosiestroomdichtheid van  $0,23\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Het verschil in  $i_{corr}$  zal dus ongetwijfeld ook beïnvloed zijn door de begintoestand van de wapening, die ondanks het reinigen van de wapening toch nog sterk verschillend was. De balken MAN SLV 2, MAN SLV 3 en CAPS BASF 3 geven een verhoogde corrosietoestand weer t.o.v. de overige geheelde balken. Anderzijds kon uit het verloop van  $E_{corr}$  en  $i_{corr}$  in de tijd geen potentiaalval of piek in  $i_{corr}$  waargenomen worden. De chloriden zullen de wapening dus nog niet bereikt hebben. De balken REF 1, MAN SLV 1 en CAPS BASF 2 onderscheiden zich van de overige balken door zowel op basis van  $E_{corr}$  (potentiostaat) en  $i_{corr}$  een hoog tot zeer hoge corrosie activiteit te vertonen. De wapening van deze balken is dus reeds zeer actief aan het corroderen. Zoals reeds aangetoond, is de corrosie van de wapening van balk MAN SLV 1 veroorzaakt door een lekkend bakje.

De balk CONT NaCl vertoont na 14 weken nog steeds een corrosiestroomdichtheid van  $0,07\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , wat in dezelfde grootte order ligt als deze van de balken NT 2 en NT 3. Bijgevolg kan tot op heden nog geen uitspraak gedaan worden over de efficiëntie van de toegepaste nat – droog cycli om wapeningscorrosie te initiëren.

Tabel 4-3: Corrosietoestand op basis van Tabel 3-4 en Tabel 3-5 per balk na 14 weken. P[corrosie] stelt de waarschijnlijkheid op corrosie voor. Laag tot gemiddelde corrosie wordt voorgesteld door <Actief, Gemiddelde tot hoge corrosie door >Actief en Zeer actieve corrosie door >>Actief.

	$E_{corr}$ (mV) potentiostaat	P[corrosie] (potentiostaat)	$E_{corr}$ (mV) GalvaPulse	P[corrosie] (GalvaPulse)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Corrosie toestand
NT 1	-227	Gemiddeld	-162	Gemiddeld	0,23	<Actief
NT 2	-143	Gemiddeld	-69	Laag	0,09	Passief
NT 3	-235	Gemiddeld	-159	Gemiddeld	0,07	Passief
REF 1	-435	Ernstig	-379	Hoog	0,57	>Actief
REF 2	-158	Gemiddeld	-89	Laag	0,13	<Actief
REF 3	-133	Gemiddeld	-69	Laag	0,30	<Actief
MAN BASF 1	-172	Gemiddeld	-91	Laag	0,05	Passief
MAN BASF 2	-154	Gemiddeld	-79	Laag	0,11	<Actief
MAN BASF 3	-151	Gemiddeld	-76	Laag	0,10	Passief
MAN BASF 4	-147	Gemiddeld	-75	Laag	0,18	<Actief
CAPS BASF 1	-164	Gemiddeld	-86	Laag	0,09	Passief
CAPS BASF 2	-296	Hoog	-235	Gemiddeld	0,43	<Actief
CAPS BASF 3	-125	Gemiddeld	-59	Laag	0,36	<Actief
MAN SLV 1	-267	Gemiddeld	-207	Gemiddeld	0,54	>Actief
MAN SLV 2	-135	Gemiddeld	-73	Laag	0,40	<Actief
MAN SLV 3	-322	Hoog	-262	Hoog	0,36	<Actief
CAPS SLV 1	-149	Gemiddeld	-80	Laag	0,20	<Actief
CAPS SLV 2	-132	Gemiddeld	-68	Laag	0,28	<Actief
MAN WRA 1	-129	Gemiddeld	-63	Laag	0,27	<Actief
MAN WRA 2	-130	Gemiddeld	-61	Laag	0,29	<Actief
MAN WRA 3	-150	Gemiddeld	-82	Laag	0,29	<Actief
CAPS WRA 1	-135	Gemiddeld	-69	Laag	0,19	<Actief
CAPS WRA 2	-131	Gemiddeld	-64	Laag	0,21	<Actief
CAPS WRA 3	-134	Gemiddeld	-72	Laag	0,24	<Actief
CONT NaCl	-175	Gemiddeld	-101	Laag	0,07	Passief
OND H <sub>2</sub> O	-748	Ernstig	-667	Ernstig	0,57	>Actief
OND NaCl	-665	Ernstig	-611	Ernstig	3,90	>>Actief
KRUIP ZAAL	/	/	-74	Laag	/	/

#### **4.4.4 Conclusie corrosiemetingen**

Op basis van paragraaf 4.4.2 en 4.4.3 dient besloten te worden dat enkel de wapening van balken REF 1, CAPS BASF 2 en MAN SLV 1 actief aan het corroderen is. De corrosietoestand van balk MAN SLV 1 is echter te wijten aan een lek in het PVC bassin. Het uitblijven van de hoog actieve corrosietoestand bij de overige referentiebalken is waarschijnlijk te wijten aan de kleine scheurwijdte, waardoor na ontlasting de scheur grotendeels opnieuw dichtgedrukt is. Anderzijds toont balk REF 1 aan dat zelfs met een scheurwijdte van ongeveer 100µm actieve corrosie van de wapening zeer snel geïnitieerd wordt. De metingen dienen nog verder gezet te worden om de efficiëntie van de helende agentia te kunnen evalueren.

# Hoofdstuk 5

## Conclusie

De chloride diffusietesten hebben duidelijk aangetoond dat de indringing van chloriden tegengegaan kan worden door de inkapseling van helende agentia. De afgetekende chloride penetratiefronten werden uitgebreid bestudeerd, evenals het met PU bedekte oppervlak in het scheurvlak. Er kon worden vastgesteld dat het bekomen van een goede manuele heling minder evident was dan verwacht. Een eerste manueel met PU MEYCO MP geheelde proefreeks vertoonde een te geringe indringing in het scheurvlak. Er werd tevens geen homogeen gesloten PU structuur gevormd. Bijgevolg konden de chloride ionen langs de open zones tussen het PU diffunderen. Deze proefreeks voldeed bijgevolg niet om de chloride indringing tegen te gaan. De proefreeks werd echter nogmaals herhaald en ditmaal met succes. De indringing van het PU in het scheurvlak was nog steeds beperkt, maar er werd wel een zeer dichte barrière gevormd. Bijgevolg werd bij 80% van deze proefstukken een volledige heling waargenomen.

De manuele heling uitgevoerd met het PU flex SLV leidde tot een goede penetratie van het polyurethaan in het scheurvlak. Door de lagere viscositeit van dit PU kon het polyurethaan over het volledige scheurvlak doordringen. Anderzijds werd vastgesteld dat het PU niet in staat was om één continue gesloten barrière te vormen. Hierdoor was de performantie van de manuele heling minder goed i.v.m. het PU MEYCO MP.

Bij ongeveer de helft van de met PU MEYCO MP ingekapselde proefstukken werd een volledige heling bekomen. In tegenstelling tot de manuele heling, was het scheurvlak veel meer gevuld met PU. De betere vulling van de scheur is te verklaren doordat de capsules op twee lagen aangebracht waren. De inkapseling van PU flex SLV leidde tot ongeveer eenzelfde performantie als deze met PU MEYCO MP.

De titraties bevestigden de resultaten van de chloride penetratiefronten. Uit de berekening van de diffusiecoëfficiënt van de scheur kon voor de manueel met PU MEYCO MP geheelde proefstukken een nagenoeg volledige heling waargenomen worden voor één van de drie proefstukken. Ook indien het PU ingekapseld werd vertoonde één proefstuk een volledige heling. Gemiddeld genomen, werd een reductie van de diffusiecoëfficiënt bekomen van 60% t.o.v. de referentieproefstukken indien de scheur manueel geheeld werd met PU MEYCO MP. De met PU (zowel flex SLV als MEYCO MP) ingekapselde proefreeksen reduceerden de diffusiecoëfficiënt met ongeveer 40%. Anderzijds was de diffusiecoëfficiënt gemiddeld nog steeds een factor 2 groter t.o.v. de niet gescheurde proefstukken.

Het WRA bleek een reactie te veroorzaken met het zilvernitraat in combinatie met de mortel. Discontinu verdeelde paars gekleurde zones maakten het onmogelijk om het chloride penetratiefront af te tekenen. Het besprenkelen met  $\text{AgNO}_3$  is in de literatuur echter wel reeds succesvol uitgevoerd wanneer WRA als oppervlakte coating toegepast werd. De specifieke samenstelling van het geteste WRA zal dus wellicht ook een belangrijke rol spelen in deze reactie. Niettegenstaande dient toekomstig onderzoek de precieze oorzaak van de reactie uit te wijzen. Ook bij het uitvoeren van de titraties bleek het WRA de meting te verstoren. Om de efficiëntie van dit WRA te onderzoeken wordt daarom aangeraden om in de toekomst gebruik te maken van een electron probe microscope. Eventueel zou ook kunnen gepoogd worden om het WRA eerst te extraheren met een oplosmiddel, alvorens het proefstuk in contact te brengen met zilvernitraat.

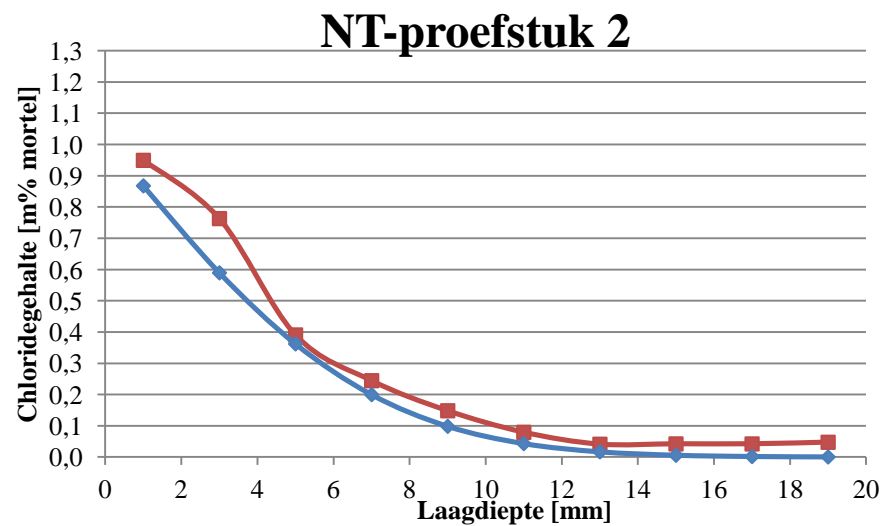
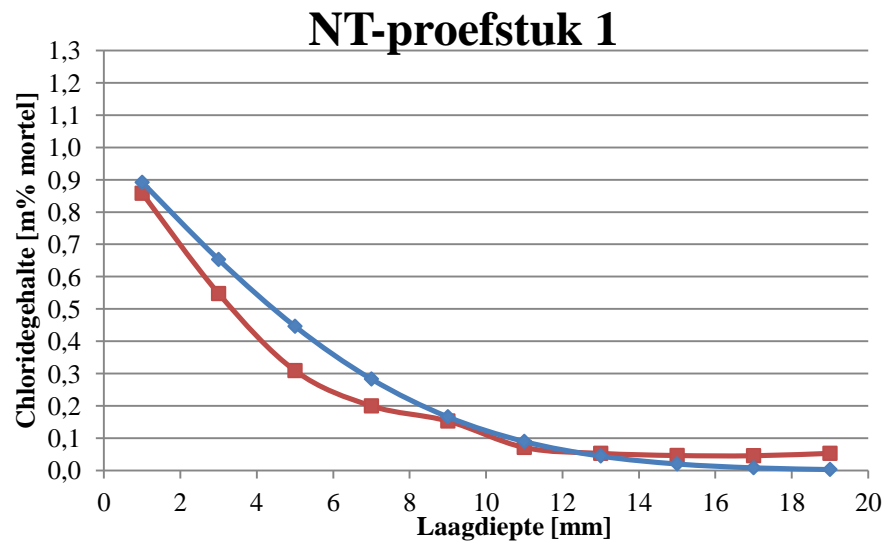
De  $\text{CO}_2$  diffusietesten toonden aan dat de indringing van het carbonatatiefront in de scheur tegengegaan kan worden door autonoom scheurherstel. Enkel het PU MEYCO MP werd als helend agens toegepast. Na 9 weken blootstelling aan 10%  $\text{CO}_2$  en 65% relatieve vochtigheid, werd nog geen indringing van  $\text{CO}_2$  in de scheur vastgesteld bij de manueel geheelde proefstukken. Door inkapseling kon de indringing verhinderd worden voor 2 van de 3 proefstukken. Deze resultaten zijn veelbelovend, maar dienen nog aangevuld te worden met meer proeven op langere termijn.

Binnen de uitvoeringstermijn van deze thesis kunnen nog geen algemene conclusies getrokken worden uit de corrosiemetingen. Eén referentiebalk en één balk, die door inkapseling van PU MEYCO MP geheeld was, vertoonden vrij snel initiatie van corrosie ter hoogte van de scheur. Bij de overige balken kon na 14 weken nog geen actieve corrosie toestand waargenomen worden. Het uitblijven van de corrosie initiatie bij de twee overige referentiebalken is wellicht te wijten aan de kleine scheurwijdte. Toch wordt verwacht dat deze balken in de zeer nabije toekomst actief zullen beginnen corroderen. De proef zal na het indienen van de masterscriptie nog verder gezet worden.

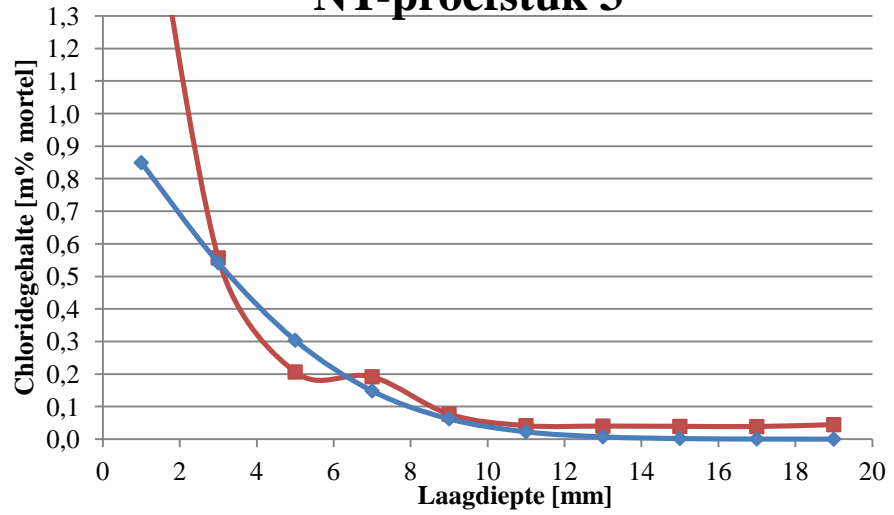
Algemeen kan besloten worden dat de initiatie van wapeningscorrosie zeker kan vertraagd worden door autonoom scheurherstel d.m.v. ingekapselde helende agentia. Een verbeterde performantie van PU als helend agens kan in de toekomst bekomen worden door de verdere ontwikkeling van de commerciële PU's. Een PU die de materiaaleigenschappen van PU MEYCO MP en PU flex SLV in een zekere mate combineert, kan de scheur nog beter opvullen. Indien de viscositeit van PU MEYCO MP verlaagd zou worden en de tijd vooraleer het begint op te schuimen kan verlengd worden, zal het PU nog beter in de scheur vloeien. Indien tezelfdertijd het PU nog steeds een continue barrière vormt, is een optimale heling bekomen.

# Bijlage A

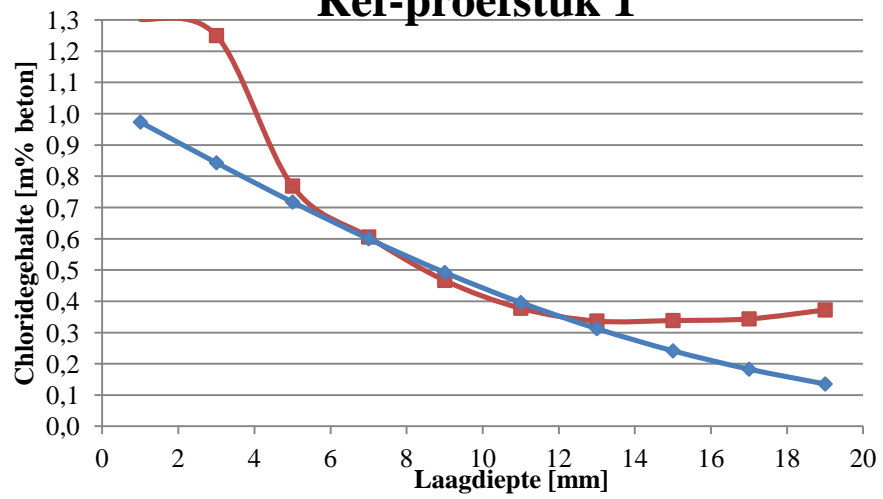
In deze bijlage wordt van elk proefstuk het chlorideprofiel op basis van de titratie weergegeven. Het desbetreffende proefstuk wordt in de titel van de grafiek vermeld. De rode lijn is het experimenteel bepaald chlorideprofiel, terwijl de blauwe lijn het theoretisch chlorideprofiel op basis van de tweede wet van Fick voorstelt.



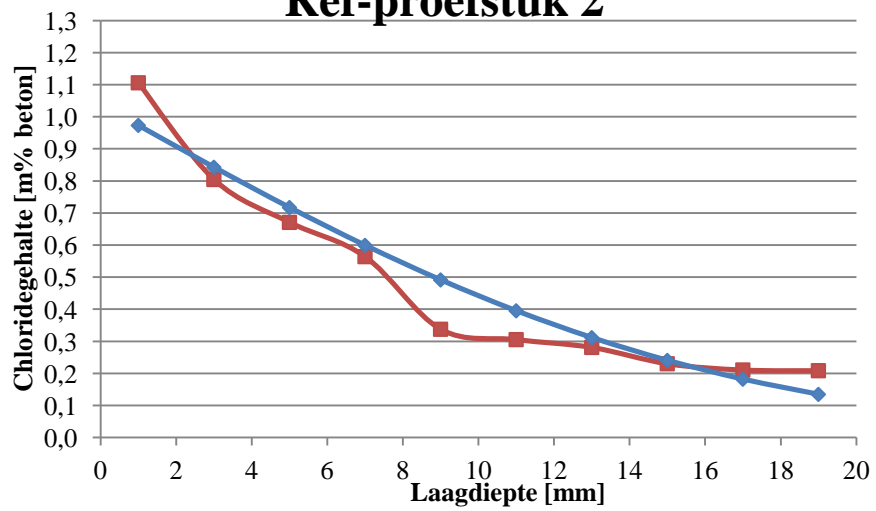
### NT-proefstuk 3



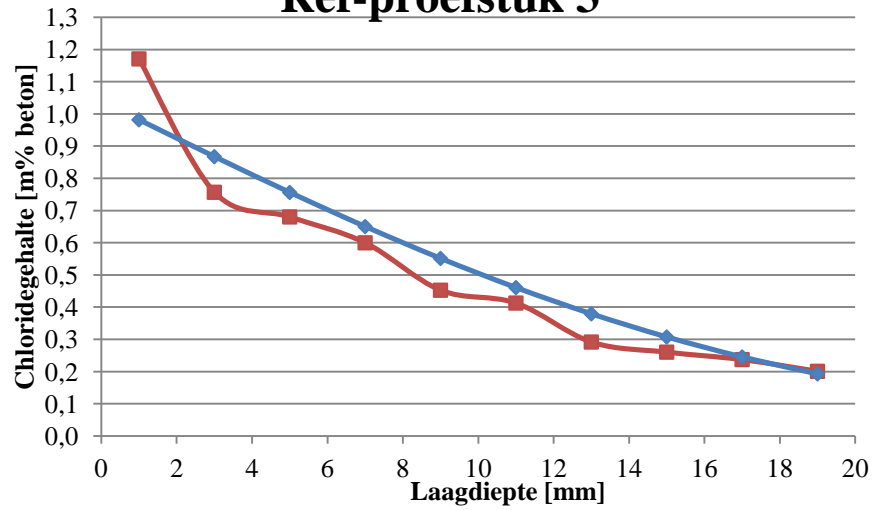
### Ref-proefstuk 1



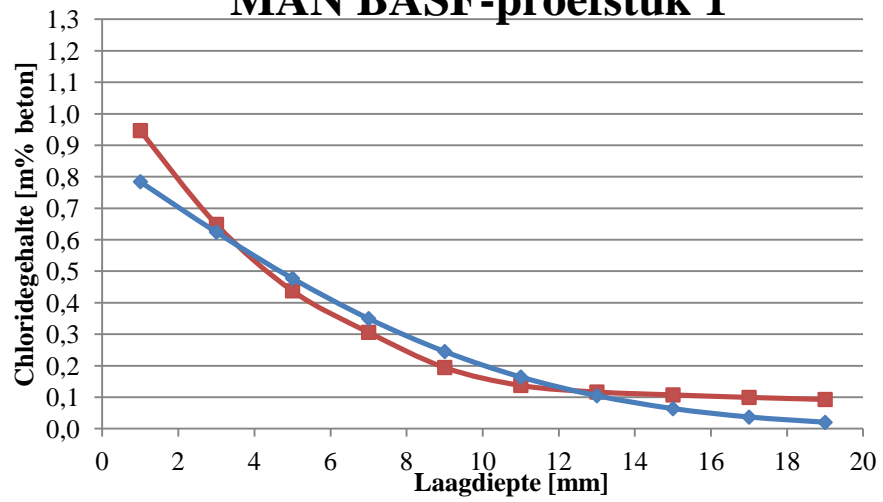
### Ref-proefstuk 2



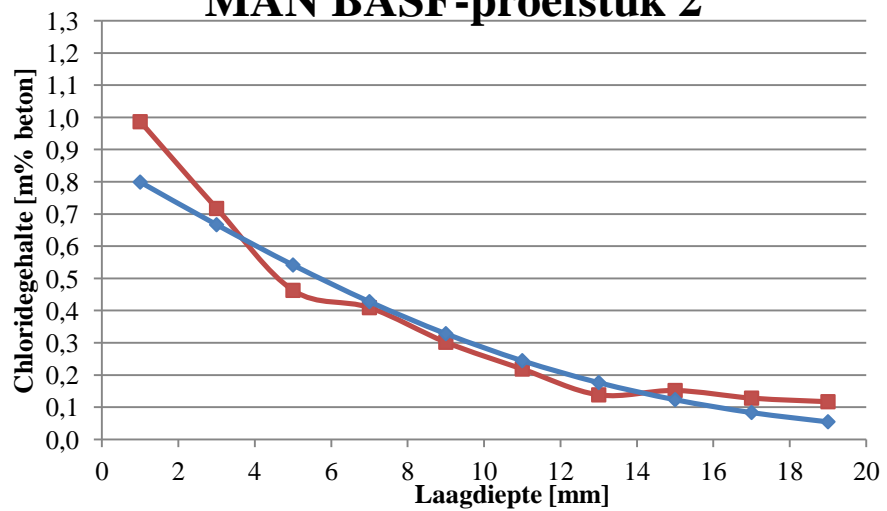
### Ref-proefstuk 3



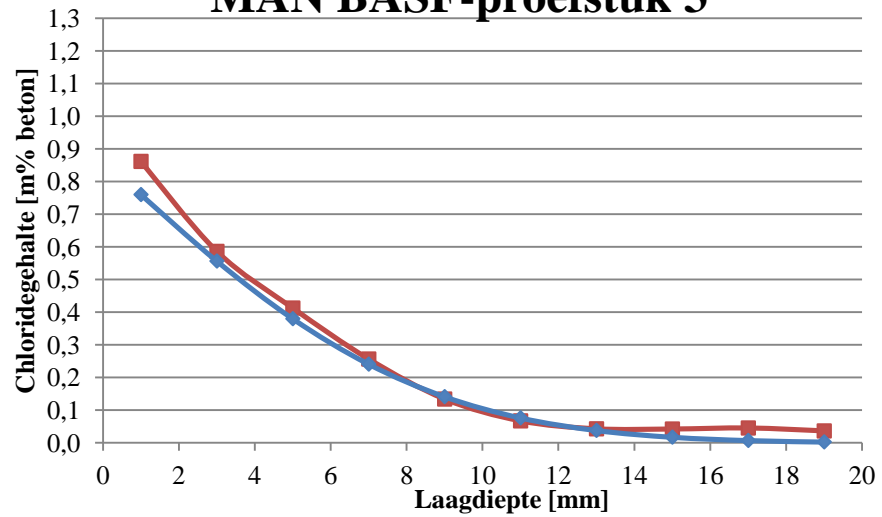
### MAN BASF-proefstuk 1



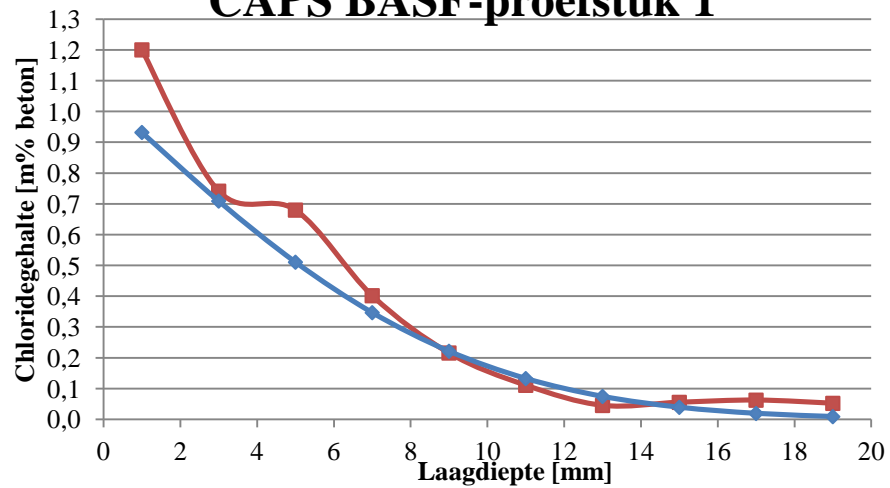
### MAN BASF-proefstuk 2



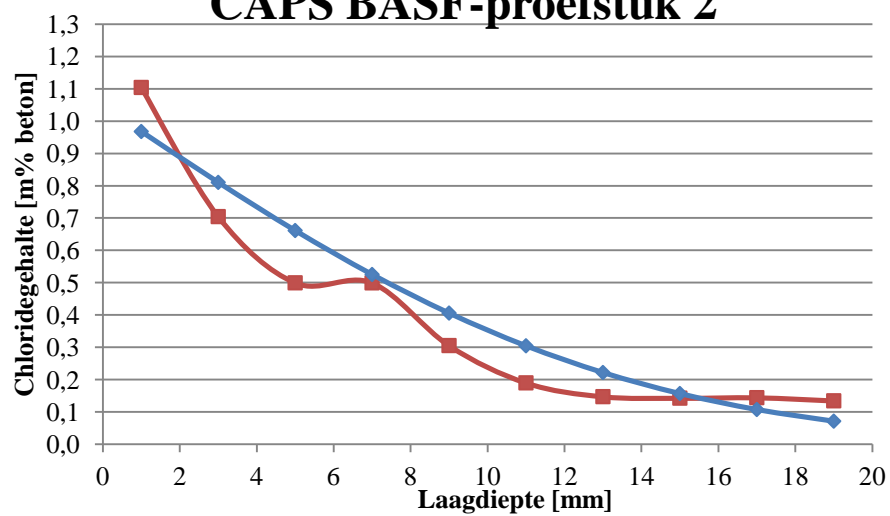
### MAN BASF-proefstuk 3



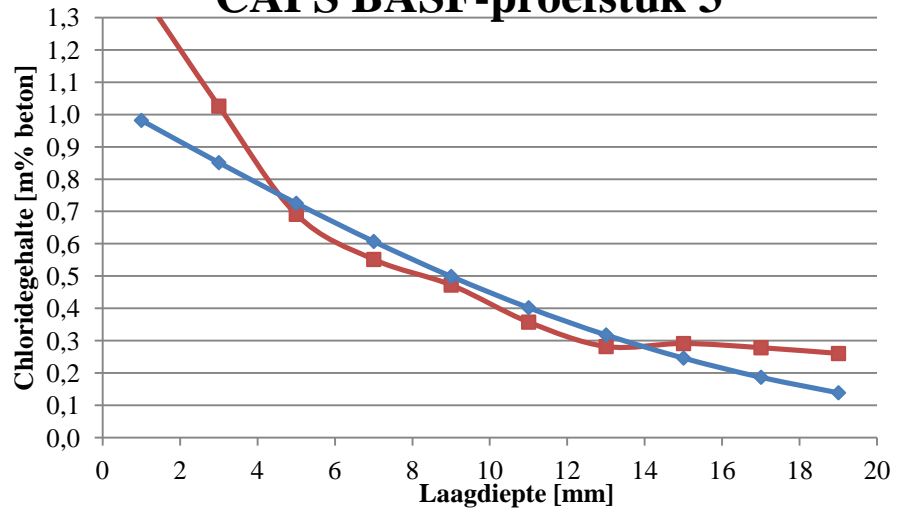
### CAPS BASF-proefstuk 1



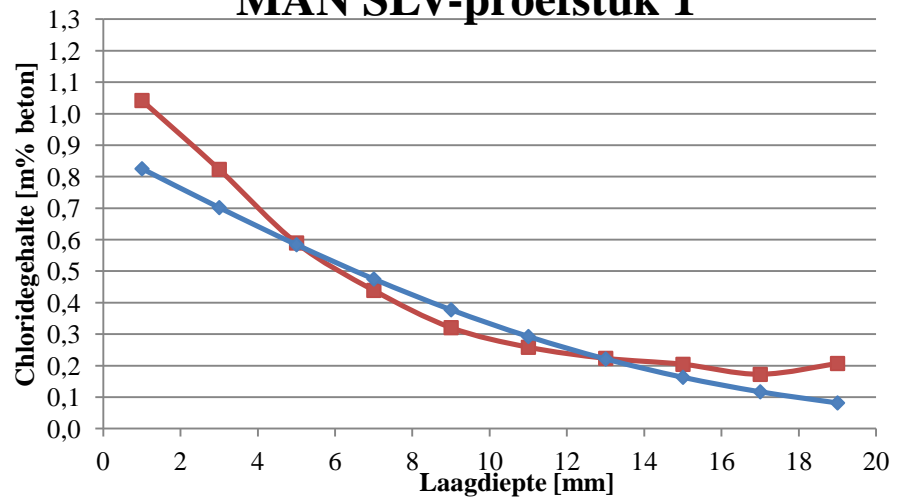
### CAPS BASF-proefstuk 2



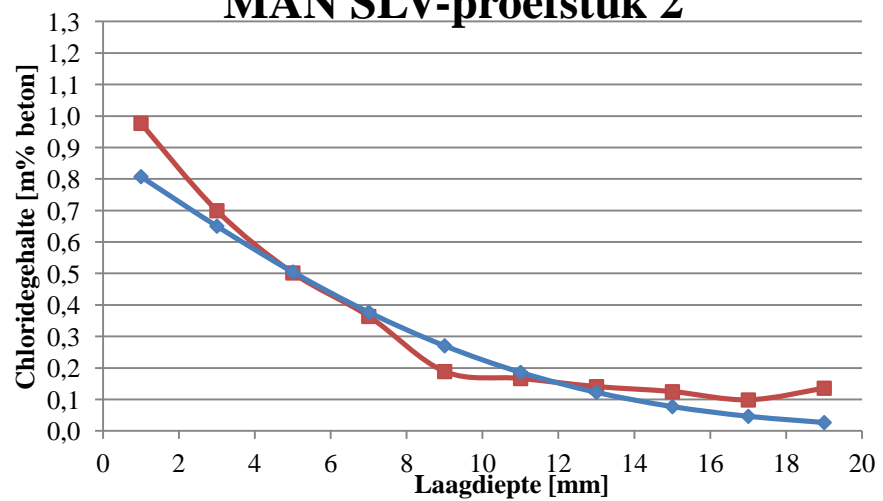
### CAPS BASF-proefstuk 3



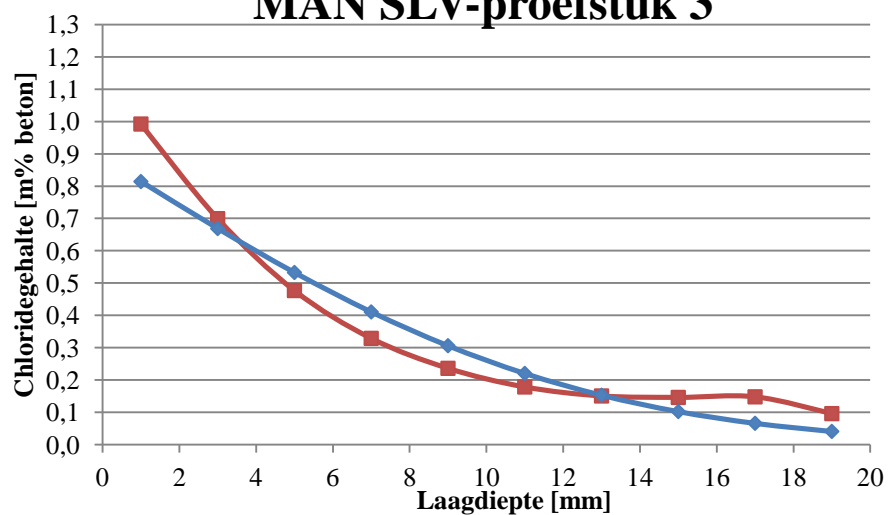
### MAN SLV-proefstuk 1



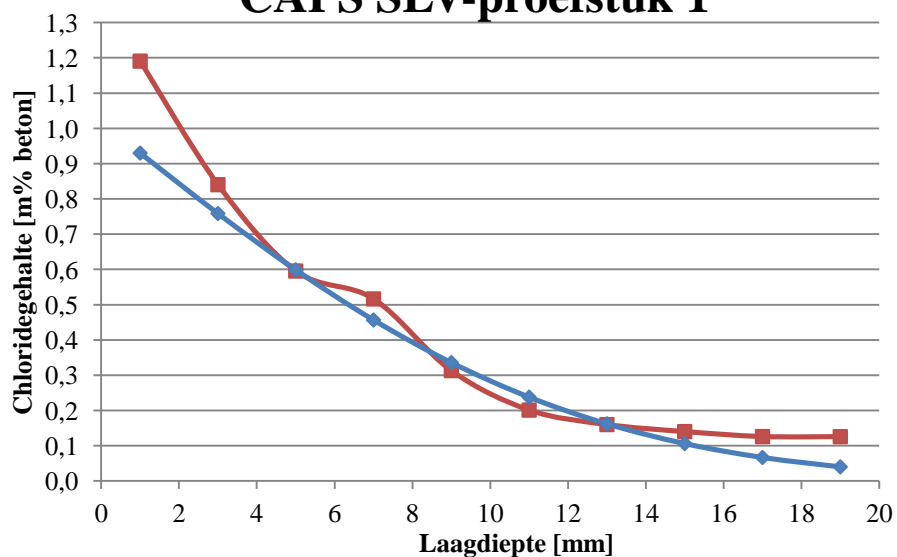
### MAN SLV-proefstuk 2



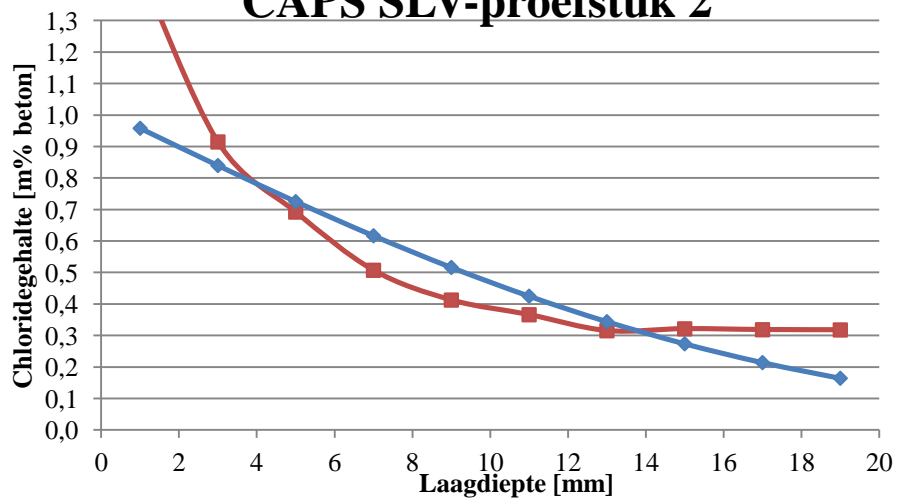
### MAN SLV-proefstuk 3



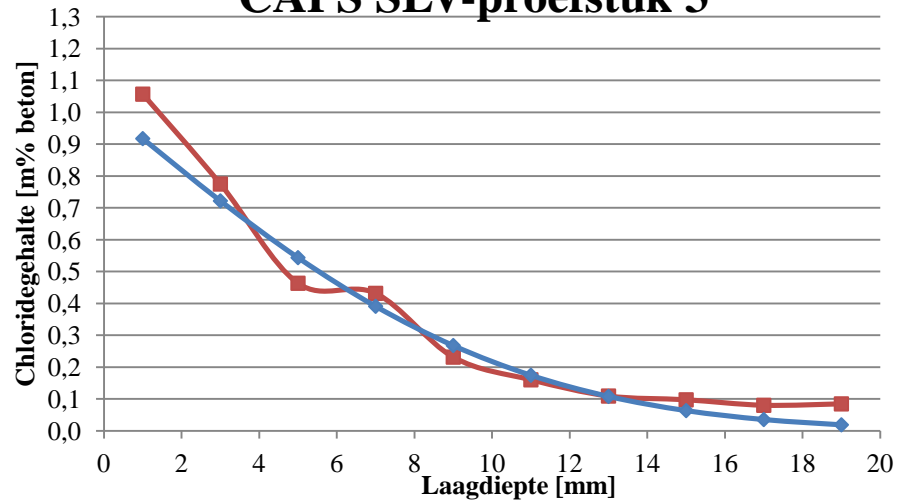
### CAPS SLV-proefstuk 1



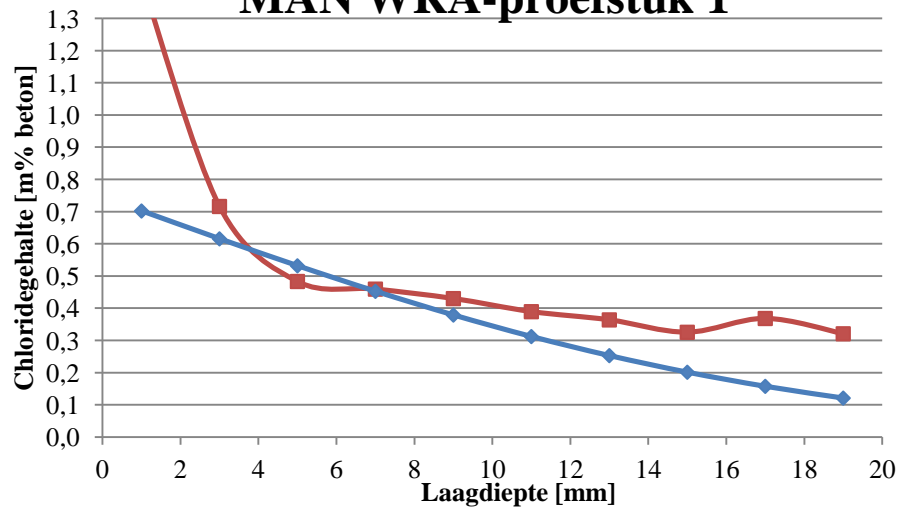
### CAPS SLV-proefstuk 2



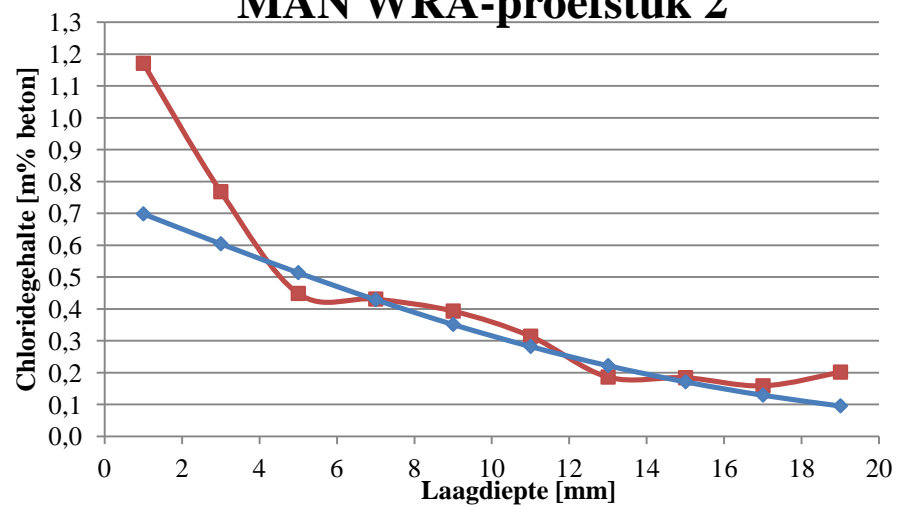
### CAPS SLV-proefstuk 3



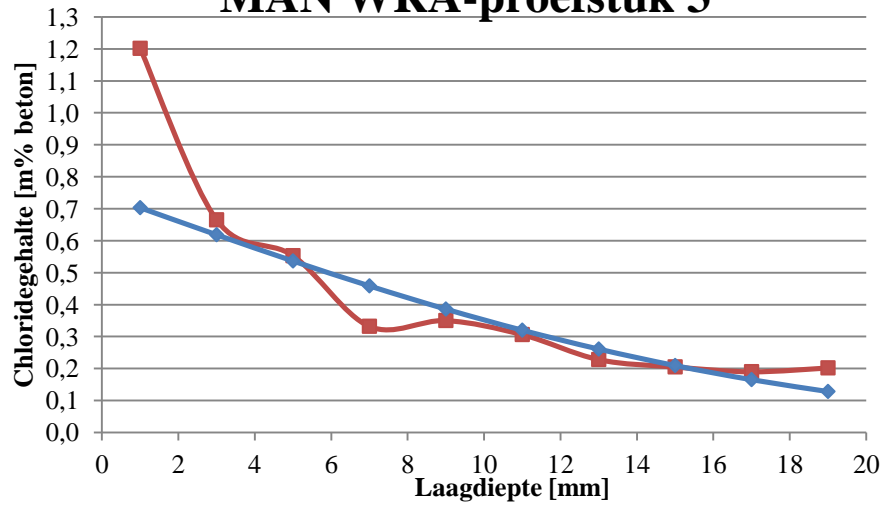
### MAN WRA-proefstuk 1



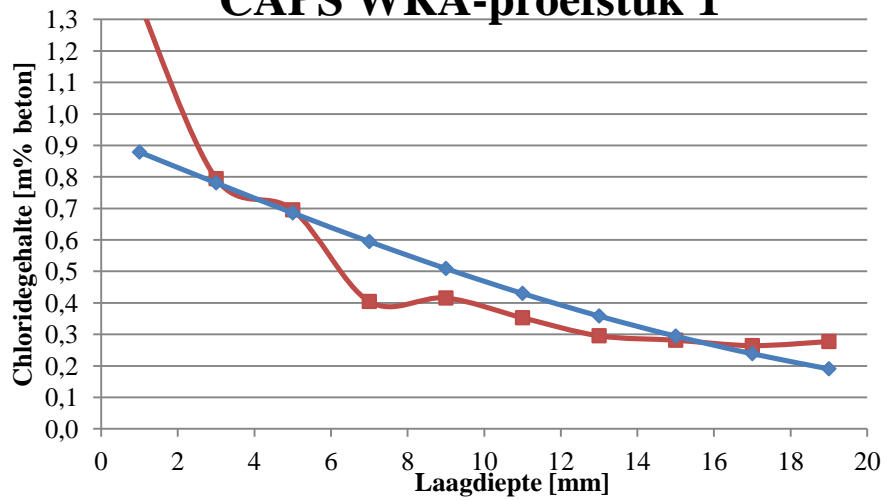
### MAN WRA-proefstuk 2



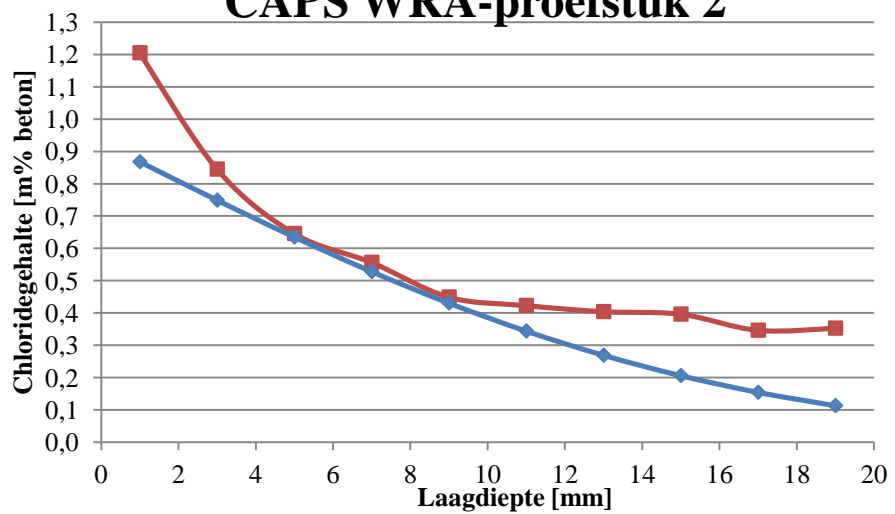
### MAN WRA-proefstuk 3



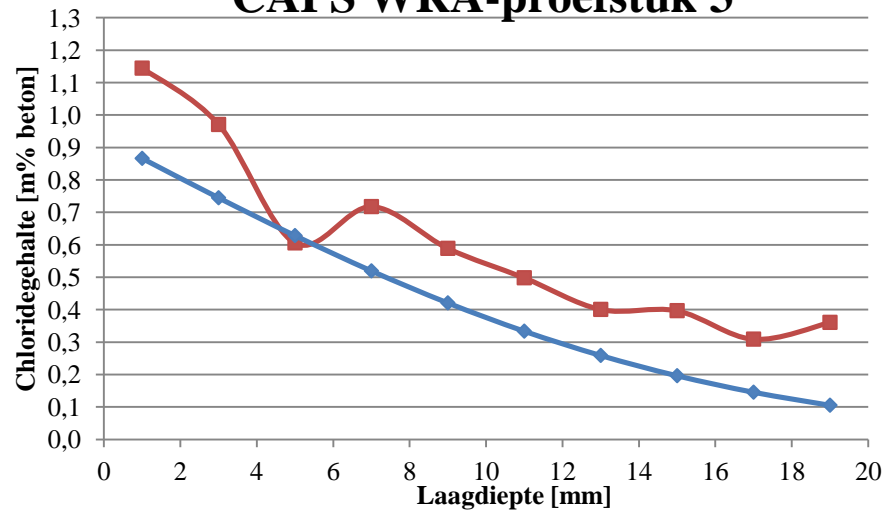
### CAPS WRA-proefstuk 1



### CAPS WRA-proefstuk 2



### CAPS WRA-proefstuk 3



# Literatuurlijst

- Aggarwal, L. K., Thapliyal, P. C., Karade, S. R. (2007). Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions. *Construction and building materials*, Vol. 21, 379-383.
- Alahmad, S., Toumi, A., Verdier, J., François, R. (2009). Effect of crack opening on carbon dioxide penetration in cracked mortar samples. *Materials and Structures*, Vol. 42, 559-566.
- Aldea, C. M., Shah, S. P., Karr, A. (1999). Effect of cracking on water and chloride permeability of concrete. *Journal of materials in civil engineering*, Vol. 11.
- Andrade, C., Alonso, C. (2004). Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*, Vol. 37, 623-643.
- Andrade, C., Alonso, C., González, J. A. (1990). An initial effort to use corrosion rate measurements for estimating rebar durability corrosion rates of steel in concrete. *ASTM STP*, Vol. 1065, 29-37.
- Andrade, C., Castellote, M., Alonso, C., González, C. (2000). Non steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests. Part I: Comparison between several methods of calculation. *Materials and Structures*, Vol. 33, 21-28.
- Andrade, C., Sanjuán, M. A., Recuero, A., Río, O. (1994). Calculation of chloride diffusivity in concrete from migration experiments, in non steady-state conditions. *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, 1214-1228.
- Ann, K. Y., Pack, S.-W., Hwang, J.-P., Song, H. -W., Kim, S. -H. (2010). Service life prediction of a concrete bridge structure subjected to carbonation. *Construction and building materials*, Vol. 24, 1494-1501.
- Audenaert, K., De Schutter, G., Marsavina, L. (2009). Influence of cracks and crack width on penetration depth of chlorides in concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 13, 561-572.
- Criado, M., Monticelli, C., Fajardo, S., Gelli, D., Grassi, V., Bastidas, J. M. (2012). Organic corrosion inhibitor mixtures for reinforcing steel embedded in carbonated alkali-activated fly ash mortar. *Construction and building materials*, Vol. 35, 30-37.
- De Schutter, G. (2012). *Damage to concrete structure*. Universiteit Gent. 162-179
- Delagrave, A., Pigeon, M., Marchand, J., Revertégat, E. (1996). Influence of chloride ions and pH level on the durability of high performance cement pastes (part II). *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, 749-760.
- Djerbi, A., Bonnet, S., Khelidj, A., Baroghel-bouny, V. (2008). Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, 877-883.
- Dry, C. M. (2000). Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 1969-1977.
- Dry, C. M., Corsaw, M. J. T. (1998). A time-release technique for corrosion prevention. *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, 1133-1140.
- Edvardsen, C. (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 96.
- Gowripalan, N., Sirivivatnanon, V., Lim, C. C. (2000). Chloride diffusivity of concrete cracked in flexure. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 725-730.
- Gruyaert, E., Van den Heede, P., De Belie, N. (2013). Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient – Effect of carbonation on the pore structure. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 35, 39-48.

- Gruyaert, E., Van den Heede, P., Maes, M., De Belie, N. (2010). A comparative study of the durability of ordinary portland cement concrete and concrete containing (high) percentages of blast-furnace slag. *International RILEM Conference on Material Science, Vol. 3*, 241-251.
- Hartt, W. H. (2009). Effect of concrete crack width on corrosion of embedded reinforcement.
- Heiyantuduwa, R., Alexander, M. G., Mackechnie, J. R. (2006). Performance of a penetrating corrosion inhibitor in concrete affected by carbonation-induced corrosion. *Journal of materials in civil engineering, Vol. 18*, 842-850.
- Houst, Y. F., Wittmann, F. H. (1994). Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> through hydrated cement paste. *Cement and Concrete Research, Vol. 24*, 1165-1176.
- Houst, Y. F., Wittmann, F. H. (2002). Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. *Cement and Concrete Research, Vol. 32*, 1923-1930.
- Huang, R., Yang, C. C. (1996). Condition assessment of reinforced concrete beams relative to reinforcement corrosion. *Cement and Concrete Composites, Vol. 19*, 131-137.
- Hussain, R. R., Ishida, T. (2009). Critical carbonation depth for initiation of steel corrosion in fully carbonated concrete and development of electrochemical carbonation induced corrosion model. *International Journal of electrochemical science, Vol. 4*, 1178-1195.
- Ismail, M., Toumi, A., François, R., Gagné, R. (2008). Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in cracked mortar samples. *Cement and Concrete Research, Vol. 38*, 1106-1111.
- Jacobson, S., Marchand, J., Boisvert, L. (1996). Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete. *Cement and Concrete Research, Vol. 26*, 869-881.
- Jang, S. Y., Kim, B. S., Oh, B. H. (2011). Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests. *Cement and Concrete Research, Vol. 41*, 9-19.
- Kulakowski, M. P., Pereira, F. M., C., Dal Molin D. C. (2009). Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. *Construction and building materials, Vol. 23*, 1189-1195.
- Lee, H. X. D., Wong, H. S., Buenfeld, N. R. (2010). Potential of superabsorbent polymer for self sealing cracks in concrete. *Advances in Applied Ceramics, Vol. 109*.
- Li, M., Li, V. C. (2011). Cracking and healing of engineered cementitious composites under chloride environment. *ACI Materials Journal, Vol. 108*.
- Marsavina, L., Audenaert, K., De Schutter, G., Faur, N., Marsavina, D. (2009). Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete. *Construction and building materials, Vol. 23*, 264-274.
- Medeiros, M. H. F., Helene, P. (2009). Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. *Construction and building materials, Vol. 23*, 1476-1784.
- Michel, A., Pease, B. J., Geiker, M. R., Stang, H., Olesen, J. F. (2011). Monitoring reinforcement corrosion and corrosion-induced cracking using non-destructive x-ray attenuation measurements. *Cement and Concrete Research, Vol. 41*, 1085-1094.
- Otieno, M. B., Alexander, M. G., Beushausen, H. D. (2010). Suitability of various measurement techniques for assessing corrosion in cracked concrete. *ACI Materials Journal, Vol. 107*, 481-489.
- Park, S. S., Kwon, S. J., Jung, S. H. (2012). Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation. *Construction and building materials, Vol. 29*, 183-192.
- Pelletier, M. M., Brown, R., Shukla, A., Bose, A. (2010). Self-healing concrete with a microencapsulated healing agent (D. o. M. Dynamic Photomechanics Laboratory, Industrial and Systems Engineering, Trans.). Kingston, USA: University of Rhode Island.
- Poursaee, A., Hansson, C. M. (2008). Galvanostatic pulse technique with the current confinement guard ring: The laboratory and finite element analysis. *Corrosion Science, Vol. 50*, 2739-2746.

- Ramm, W., Biscopig, M. (1998). Autogenous healing and reinforcement corrosion of water-penetrated separation cracks in reinforced concrete. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 179, 191-200.
- Reinhardt, H. W., Jooss, M. (2003). Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 981-985.
- Sahmaran, M. (2007). Effect of flexure induced transverse crack and self healing on chloride diffusivity of reinforced mortar. *J Mater Sci*, Vol. 42, 9131-9136.
- Sahmaran, M., Yaman, I. Ö. (2008). Influence of transverse crack width on reinforcement corrosion initiation and propagation in mortar beams. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 35, 236-245.
- Sanjuán, M. A., Andrade, C., Bentur, A. (1998). Effect of polypropylene fibre reinforced mortars on steel reinforcement corrosion induced by carbonation. *Materials and Structures*, Vol. 31, 343-349.
- Saraswathy, V., Song, H. W. (2007). Evaluation of corrosion resistance of Portland pozzolana cement and fly ash blended cements in pre-cracked reinforced concrete slabs under accelerated testing conditions. *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 104, 356-361.
- Schiessl, P., Raupach, M. (1997). Laboratory studies and calculations on the influence of crack width on chloride induced corrosion of steel in concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 94, 56.
- Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. -J., Park, C. -K. (2006). Predicting carbonation in early-aged cracked concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 979-989.
- Song, H. W., Saraswathy, V. (2007). Corrosion Monitoring of reinforced concrete structures-A review. *International Journal of electrochemical science*, Vol. 2, 1-28.
- Stern, M., Geary, A. L. (1957). Electrochemical Polarization I: Theoretical Analysis of Shape of Polarization Curves. *Journal of Electrochemistry Society*, Vol. 104, 56-63.
- Termkhajornkit, P., Nawa, T., Yamashiro, Y., Saito, T. (2009). Self-healing of fly ash-cement systems. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, 195-203.
- Tsukagoshi, Masayuki, Miyauchi, Hiroyuki, Tanaka, Kyoji. (2012). Protective performance of polyurethane waterproofing membrane against carbonation in cracked areas of mortar substrate. *Construction and building materials*, Vol. 36, 895-905.
- van Breugel, K. (2007). *Is there a market for self-healing cement-based materials*. Paper presented at the Proceedings of the first conference on self healing materials, Noordwijk aan Zee, Nederland.
- Van Tittelboom, K. (2012). *Zelfhelend beton door incorporatie van ingekapselde bacteriële of polymeergebaseerde helende agentia*. Universiteit Gent.
- Vedalaskshmi, R., Balamurugan, L., Saraswathy, V., Kim, S. -H., Ann, K. Y. (2010). Reliability of galvanostatic pulse technique in assessing the corrosion rate of rebar in concrete structures: Laboratory vs field studies. *KSCE Journal of civil engineering*, Vol. 14, 867-877.
- Wang, X., Xing, F., Zhang, M., Han, N., Qian, Z. (2013). Experimental study on cementitious composites embedded with organic microcapsules. *Materials*, Vol. 6, 4064-4081.
- Win, P. P., Watanabe, M., Machida, A. (2004). Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 1073-1079.
- Yoon, I. S., Schlangen, E., de Rooij, M. R., van Breugel, K. (2007). The effect of cracks on chloride penetration into concrete. *Key Engineering Materials*, Vol. 348-349, 769-772.
- Yuan, Q., Shi, C., De Schutter, G., Audenaert, K., Deng, D. (2009). Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment-A review. *Construction and building materials*, Vol. 23, 1-13.
- Zhang, P., Wittmann, F. H., Zhao, T. J., Lehmann, E. H., Tian, L., Vontobel, P. (2010). Observation and quantification of water penetration into Strain Hardening Cement-based Composites (SHCC) with multiple cracks by means of neutron radiography. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Vol. 620, 414-420.

Zivica, V. (2003). Corrosion of reinforcement induced by environment containing chloride and carbon dioxide. *Bulletin of Materials Science*, Vol. 26(6), 605-608.

# Lijst van figuren

Figuur 2-1: Vereenvoudigde schematische voorstelling van het corrosieproces in gewapend beton....	2
Figuur 2-2: A) Diffusiecoëfficiënt in de gescheurde ( $D_T$ ) en ongescheurde ( $D_1$ ) zone i.f.v. de scheurwijdte na ontlasting. B) Verschil in penetratiediepte tussen gescheurde ( $d_T$ ) en ongescheurde ( $d_1$ ) zone i.f.v. de scheurdiepte ( $d_2$ ). Yoon et al. (2007). ....	5
Figuur 2-3: A) Penetratiediepte $Cl^-$ loodrecht op de scheur i.f.v. de scheurwijdte volgens Audenaert et al. (2009). B) Scheurdiepte ( $d_2$ ) i.f.v. de scheurwijdte volgens Yoon et al. (2007). ....	6
Figuur 2-4: A) Totale diffusiecoëfficiënt ( $D_e$ ) i.f.v. de scheurwijdte. B) Diffusiecoëfficiënt doorheen de scheur ( $D_{cr}$ ) i.f.v. de scheurwijdte. Djerbi et al. (2008) .....	6
Figuur 2-5: $Cl^-$ penetratieprofiel loodrecht op de scheur volgens A) Ismail et al. En B) Sahmaran & Yaman. ....	9
Figuur 2-6: Diffusiecoëfficiënt i.f.v. de scheurwijdte door Sahmaran & Yaman (2008). ....	9
Figuur 2-7: Chloride penetratieprofiel, loodrecht op de scheur die werd vervaardigd na 2 jaar. (Ismail et al. (2008)) .....	14
Figuur 2-8: Doorstroomdebiet doorheen de scheur i.f.v. de tijd volgens A) Reinhardt (2003) en B) Edvardsen (1999). ....	15
Figuur 2-9: Meetopstelling gemodelleerde scheur Lee(2010). ....	18
Figuur 2-10: Diffusiecoëfficiënt i.f.v. de ongescheurde (original), belaste (after preloading) en geheelde (healed) proefstukken, Wang et al. (2013). ....	19
Figuur 2-11: A) Carbonatatiefront i.f.v. de scheurwijdte (experimenteel), B) Carbonatatiefront i.f.v. de blootstellingsduur (exp=experimenteel, Num= numerieke simulatie), Song et al. (2006). ....	21
Figuur 3-1: Cilindrische mortelproefstukken voor het storten van de mortel met A) PU MEYCO MP en B) Flex SLV. ....	26
Figuur 3-2: Inklemming van de mallen op de triltafel. ....	26
Figuur 3-3: Plaatsen van de wapening in het ultrasoon bad. ....	27
Figuur 3-4: Schetsmatige voorstelling prismatische mortelproefstukken. ....	28
Figuur 3-5: Proefopstelling scheurvorming cilindrische mortelproefstukken. ....	29
Figuur 3-6: Driepuntsbuigproef. ....	30
Figuur 3-7: Voorbeeld van het opmeten van een scheur met de software Leica. ....	31
Figuur 3-8: Bepaling van de oppervlakte waarin chloriden binnengedrongen zijn m.b.v. ImageJ. Het aantal pixels kan afgelezen worden boven de rode lijn. ....	33
Figuur 3-9: Schematische voorstelling van het opmeten van een proefstukhelft. ....	33
Figuur 3-10: Bepaling van de oppervlakte PU in de scheur: Het aantal pixels van de afbeelding kan boven de gele lijn afgelezen worden. ....	34
Figuur 3-11: Uitvoeringsprocedure bij het afmalen: A) Klemmen van het proefstuk, B) De <i>profile grinder</i> , C) Bevestigen van de geleidingsbalkjes. ....	35
Figuur 3-12: Voorbeeld van een mV-ml curve met bijhorende eerste afgeleide bekomen na een manuele titratie. ....	36

Figuur 3-13: Blootstelling van prismatische mortelproefstukken aan NaCl oplossing .....	39
Figuur 3-14: Meetopstelling tijdens het uitvoeren van een potentiostatische meting met het Metrohm Autolab toestel. ....	40
Figuur 3-15: v-vormige curve indien $\log I$ (A) uitgezet wordt i.f.v. $E$ (V).....	40
Figuur 3-16: Verloop $I$ in functie van de opgelegde potentiaal (blauw) en de toegepaste lineaire regressie (zwart).....	41
Figuur 3-17: Aanduiding van de locatie van de 7 meetpunten (blauwe lijnen) op een schematische voorstelling van het bovenaanzicht van de prismatische mortelproefstukken.....	43
Figuur 3-18: Schematische doorsnede GalvaPulse (Poursaee & Hansson, 2008). ....	43
Figuur 3-19: Illustratie van de gevolgen van de polarisatie na toepassen van de galvanostatische pulsmeting. ....	44
Figuur 3-20: Meetopstelling GalvaPulse tijdens het uitvoeren van een HCP meting.....	44
Figuur 4-1: Opgemeten scheurwijdtes van ieder proefstuk per proefreeks. ....	47
Figuur 4-2: Aftekening op een met WRA geheeld proefstuk na het besprenkelen met $AgNO_3$ .....	48
Figuur 4-3: Betonstukken ter verificatie van de reactie van het WRA met $AgNO_3$ . A) Oppervlak niet met WRA bevochtigd, B) Oppervlak volledig met WRA bevochtigd.....	48
Figuur 4-4: Verduidelijking van de classificatie der chlorideprofielen: A) gelijke indringing, B) lokaal diepere indringing aan de scheur, C) Chloride indringing over de ganse scheur, D) volledige indringing over de scheur en accumulatie van chloriden aan het gecoate vlak. De chloride indringing is mogelijk vanaf de bovenkant van de foto's. De groene lijnen bakenen het chloridefront af. In de donkerste zones zijn geen $Cl^-$ doorgedrongen. ....	50
Figuur 4-5: Gemiddelde procentuele verhouding van de oppervlakte waarin chloriden binnengedrongen zijn op de totale oppervlakte voor iedere proefreeks. ....	52
Figuur 4-6: Verdeling van het aantal meetpunten volgens de chloride indringing gemeten vanaf het blootgestelde vlak voor de proefreeksen REF, MAN BASF, MAN BASF 2, CAPS BASF en NT.....	53
Figuur 4-7: Verdeling van het aantal meetpunten volgens de chloride indringing gemeten vanaf het blootgestelde vlak voor de proefreeksen REF, MAN SLV, CAPS SLV en NT. ....	53
Figuur 4-8: Verduidelijking bepaling gemiddelde indringingsdiepte vanaf het afstrijkvlak en loodrecht op de scheur. ....	54
Figuur 4-9: Gemiddelde indringingsdiepte per proefreeks. ....	55
Figuur 4-10: Deel van de oppervlakte in de scheur die met PU bezet is, weergegeven voor ieder proefstuk. ....	56
Figuur 4-11: Illustratieve reconstructie van het PU in de scheur voor een proefstuk uit reeks MAN BASF 2. ....	57
Figuur 4-12: Illustratieve reconstructie van het PU in de scheur voor een proefstuk uit de reeks MAN SLV. ....	57
Figuur 4-13: Scheurwijdtes per proefstuk binnen elke reeks. ....	58
Figuur 4-14: Gemiddeld chlorideprofiel langsheen de scheur voor de reeksen REF, NT, MAN BASF en CAPS BASF. ....	58
Figuur 4-15: Gemiddeld chlorideprofiel in de scheur voor de reeksen REF, NT, MAN SLV en CAPS SLV.....	60
Figuur 4-16: Gemiddeld chlorideprofiel in de scheur voor de reeksen REF, NT, MAN SLV en CAPS SLV.....	60

Figuur 4-17: $D_{nssd}$ voor ieder proefstuk, per proefreeks. ....	61
Figuur 4-18: Flocculatie van het poeder tijdens de titraties van met WRA geheelde proefstukken.....	62
Figuur 4-19: Opgemeten scheurwijdte van de proefstukken. ....	63
Figuur 4-20: Typerende aftekening van het carbonatatiefront na 2 weken. ....	63
Figuur 4-21: Gemiddelde verhouding van de gecarbonateerde op totale oppervlakte bij de verschillende proefreeksen. ....	64
Figuur 4-22: Gemiddelde indringing van het carbonatatiefront bij de verschillende proefreeksen.....	64
Figuur 4-23: Oppervlakte PU in de scheur bij de verschillende proefstukken.....	65
Figuur 4-24: Aftekening van PU in de scheur bij een manueel geheeld proefstuk. ....	65
Figuur 4-25: Scheurwijdtes van de verschillende proefstukken. ....	66
Figuur 4-26: Classificatie van de afgetekende carbonatatieprofielen: A) Equidistante indringing CO <sub>2</sub> , B) Additionele CO <sub>2</sub> indringing aan de scheur. ....	66
Figuur 4-27: Gemiddelde verhouding van de gecarbonateerde op totale oppervlakte voor iedere proefreeks. ....	67
Figuur 4-28: Verdeling van de CO <sub>2</sub> indringing gemeten op vaste meetpunten.....	68
Figuur 4-29: Gemiddelde CO <sub>2</sub> indringingsdiepte gemeten vanaf het afstrijkvlak en loodrecht op de scheur. ....	69
Figuur 4-30: Verhouding van de oppervlakte bedekt met PU in de scheur voor de verschillende proefstukken. ....	69
Figuur 4-31: Scheurwijdte van ieder proefstuk per proefreeks.....	70
Figuur 4-32: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de ongescheurde proefstukken, gemeten met de potentiostaat. ....	71
Figuur 4-33: Verloop van $i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ ) i.f.v. de tijd (weken) voor de ongescheurde proefstukken. ....	71
Figuur 4-34: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de ongescheurde proefstukken, gemeten met de GalvaPulse.....	72
Figuur 4-35: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de referentie proefstukken, gemeten met de potentiostaat. ....	72
Figuur 4-36: Verloop van $i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ ) i.f.v. de tijd (weken) voor de referentieproefstukken. ....	73
Figuur 4-37: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de referentie proefstukken, gemeten met de GalvaPulse.....	73
Figuur 4-38: Variatie van $E_{corr}$ (mV) langsheen balk REF 1, gemeten in de 2 <sup>e</sup> week met de GalvaPulse.....	74
Figuur 4-39: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor manueel met PU MEYCO MP geheelde proefstukken, gemeten met de potentiostaat. ....	74
Figuur 4-40: Verloop van $i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ ) i.f.v. de tijd (weken) voor manueel met PU MEYCO MP geheelde proefstukken.....	74
Figuur 4-41: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor manueel met PU MEYCO MP geheelde proefstukken, gemeten met de GalvaPulse. ....	75
Figuur 4-42: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor met PU MEYCO MP ingekapselde proefstukken, gemeten met de potentiostaat.....	75
Figuur 4-43: Verloop van $i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ ) i.f.v. de tijd (weken) voor met PU MEYCO MP ingekapselde proefstukken. ....	76
Figuur 4-44: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor met PU MEYCO MP ingekapselde proefstukken, gemeten met de GalvaPulse. ....	76

Figuur 4-45: Variatie van $E_{corr}$ (mV) langsheen balk CAPS BASF 2, gemeten in de 3 <sup>e</sup> week met de GalvaPulse.....	76
Figuur 4-46: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de manueel met PU flex SLV geheelde proefstukken, gemeten met de potentiostaat.....	77
Figuur 4-47: Verloop van $i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) i.f.v. de tijd (weken) voor de manueel met PU flex SLV geheelde proefstukken.....	77
Figuur 4-48: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de manueel met PU flex SLV geheelde proefstukken, gemeten met de GalvaPulse.....	78
Figuur 4-49: Variatie van $E_{corr}$ (mV) langsheen balk MAN SLV 1, gemeten in de 7 <sup>e</sup> week met de GalvaPulse.....	78
Figuur 4-50: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor met PU flex SLV ingekapselde proefstukken, gemeten met de potentiostaat.....	79
Figuur 4-51: Verloop van $i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) i.f.v. de tijd (weken) voor met PU flex SLV ingekapselde proefstukken.....	79
Figuur 4-52: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor met PU flex SLV ingekapselde proefstukken, gemeten met de GalvaPulse.....	79
Figuur 4-53: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de manueel met WRA geheelde proefstukken, gemeten met de potentiostaat.....	80
Figuur 4-54: Verloop van $i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) i.f.v. de tijd (weken) voor de manueel met WRA geheelde proefstukken.....	80
Figuur 4-55: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de manueel met WRA geheelde proefstukken, gemeten met de GalvaPulse.....	80
Figuur 4-56: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor met WRA ingekapselde proefstukken, gemeten met de potentiostaat.....	81
Figuur 4-57: Verloop van $i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) i.f.v. de tijd (weken) voor met WRA ingekapselde proefstukken.....	81
Figuur 4-58: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor met WRA ingekapselde proefstukken, gemeten met de GalvaPulse.....	82
Figuur 4-59: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de proefstukken CONT NaCl, OND H <sub>2</sub> O en OND NaCl, gemeten met de potentiostaat.....	82
Figuur 4-60: Verloop van $i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) i.f.v. de tijd (weken) voor de proefstukken CONT NaCl, OND H <sub>2</sub> O en OND NaCl.....	83
Figuur 4-61: Verloop van $E_{corr}$ (mV) i.f.v. de tijd (weken) voor de proefstukken CONT NaCl, OND H <sub>2</sub> O en OND NaCl, gemeten met de GalvaPulse.....	83
Figuur 4-62: Variatie van $E_{corr}$ langsheen balk OND H <sub>2</sub> O in week 3 en 4.....	84
Figuur 4-63: Variatie in $E_{corr}$ langsheen balk OND NaCl tijdens week 3 en week 4.....	84

# Lijst van tabellen

Tabel 2-1: Bevindingen Otieno et al. (a)=LPR, (b)=conductiviteitstest, (c)=HCP, (d)=resistiviteitsmeting. ....	12
Tabel 2-2: Carbonatatiecoëfficiënt voor verschillende scheurwijdtes op beton met W/C = 0,45, Song et al. (2006). ....	21
Tabel 3-1: Mortelsamenstelling .....	24
Tabel 3-2: Beschrijving en afkorting testreeksen.....	31
Tabel 3-3: Aanduiding uitgevoerde proeven per proefreeks. ....	31
Tabel 3-4: Waarschijnlijkheid op corrosie gebaseerd op $E_{corr}$ volgens ASTM C876-91 (1999). ....	45
Tabel 3-5: Relatie tussen de toestand van de wapening en $i_{corr}$ volgens Andrade et Al. (1990). ....	45
Tabel 4-1: Procentueel aantal proefstukken die tot een bepaalde klasse horen per proefreeks. ....	51
Tabel 4-2: Procentuele verdeling van het aantal proefstukken over de verschillende klassen per proefreeks.....	67
Tabel 4-3: Corrosietoestand op basis van Tabel 3-4 en Tabel 3-5 per balk na 14 weken. P[corrosie] stelt de waarschijnlijkheid op corrosie voor. Laag tot gemiddelde corrosie wordt voorgesteld door <Actief, Gemiddelde tot hoge corrosie door >Actief en Zeer actieve corrosie door >>Actief. ....	86

