

Universiteit Gent
Faculteit Ingenieurswetenschappen
Vakgroep Bouwkundige constructies
Voorzitter: Prof. dr. ir. L. Taerwe

Dichten van scheuren in beton door biodepositie

door Tom Deloof

Promotor: prof. dr. ir. N. De Belie
Thesisbegeleider: ir. W. De Muynck

Afstudeerwerk ingediend tot het behalen van de graad van
BURGERLIJK BOUWKUNDIG INGENIEUR

Academiejaar 2006–2007

Toelating tot bruikleen

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

The author and promoter give the permission to use this thesis for consultation and to copy parts of it for personal use. Every other use is subject to the copyright laws, more specifically the source must be extensively specified when using results from this thesis.

Tom Deloof

Gent, juni 2006

Prof. dr. ir. N. De Belie

Dankwoord

Bij het begin van deze thesis wens ik graag mijn oprechte dank te betuigen aan alle personen die het mij mogelijk hebben gemaakt dit eindwerk te realiseren.

Eerst en vooral wil ik mijn oprechte dank betuigen aan mijn promotor, professor N. De Belie, voor de mogelijkheden die mij werden aangeboden voor de realisatie van een onderzoek naar de specifieke toepassingsmogelijkheden van bacteriën in de bouwkunde. Verder wil ik ook mijn begeleider, ir. W. De Muynck, bedanken voor de steun en het advies die hij mij tijdens de realisatie van dit eindwerk heeft gegeven.

Ook wil ik het personeel van het Laboratorium Magnel bedanken voor de assistentie bij het uitvoeren van mijn experimenteel onderzoek. In het bijzonder dank ik hierbij N. Coppieters voor zijn bereidwillige medewerking en nuttige aanwijzingen.

Tenslotte wil ik ook mijn ouders en mijn vriendin bedanken voor de steun die ze mij hebben geboden tijdens mijn studies.

Tom Deloof

Dichten van scheuren in beton door biodepositie

Deloof Tom

Universiteit Gent
Faculteit ingenieurswetenschappen
Vakgroep: Bouwkundige constructies
Laboratorium Magnel voor Betononderzoek
Voorzitter: Prof. dr. ir. L. Taerwe

Promotor: prof. dr. ir. N. De Belie
Scriptiebegeleider: ir. W. De Muynck

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van burgerlijk bouwkundig ingenieur

Academiejaar 2006-2007

Samenvatting

Degradatie van beton vormt wereldwijd een groot probleem. Vele structuren in gewapend beton zijn reeds beschadigd lang voor hun geschatte levensduur is bereikt. Scheuren in beton zijn vaak de oorzaak van een verminderde duurzaamheid. Deze scheuren zorgen er immers voor dat schadelijke stoffen, zoals chloride ionen, gemakkelijker het beton kunnen binnendringen. Hierbij ontstaat het gevaar dat de wapening gaat roesten zodat de draagkracht van de betonnen constructie drastisch kan verminderen. Er is een grote waaier aan reparatieproducten beschikbaar maar deze technieken zijn meestal schadelijk voor het milieu. Daarom wordt onderzoek verricht naar een biologisch middel dat meer ecologisch verantwoord is. In dit werk is een mogelijk alternatief bestudeerd dat gebaseerd is op de bacteriële carbonaat precipitatie (biodepositie) om scheuren in beton te dichten.

Het eerste luik van dit werk omvat een uitgebreide bespreking van de verschillende schade-mechanismen die aanleiding kunnen geven tot scheurvorming in beton. Daarnaast werden verschillende herstellmethoden met elkaar vergeleken en werd de theoretische achtergrond van bacteriële carbonaat precipitatie toegelicht. In het experimentele luik van dit werk werden eerst en vooral verschillende methodes geperfectioneerd om scheuren in beton te creëren. Daarna werd de efficiëntie van de biodepositie als scheurherstelmethode bepaald door het effect op de waterdoorlatendheid en de chloridenindringing te beproeven. De scheuropvulling door biodepositie werd bepaald door microscopisch en ultrasoon onderzoek. Daarnaast werd de toepassing van biodepositie als oppervlaktebehandeling getoetst aan de weerstand tegen vorst-dooicycli in combinatie met dooizouten.

Uit dit onderzoek blijkt dat het mogelijk is om scheuren te dichten door middel van biodepositie. Bepaalde biodepositiebehandelingen, gebruikt als scheurherstelmethode, gaven aanleiding tot een verminderde waterdoorlatendheid. Ook is het mogelijk de chloridenindringing in gescheurd beton te verminderen met behulp van deze behandeling.

Trefwoorden: $CaCO_3$, biodepositie, beton, scheuren

Reparation of cracks in concrete using biodeposition

Tom Deloof

Supervisor(s): N. De Belie & W. De Muynck

Abstract: Bacterially induced carbonate precipitation has been proposed as a novel and environmentally friendly method for the reparation of cracks in concrete. This paper reports the effects of this technique on the wave propagation, the water permeability and chloride migration of cracked concrete.

Keywords: concrete, cracks, biodeposition, CaCO_3

I. INTRODUCTION

Numerous reinforced concrete (RC) structures are deteriorating worldwide. Many RC structures deteriorate long before their estimated design service life. Ordinary concretes are quasi-brittle materials with low tensile strain capacity resulting in the formation of cracks in the RC structures either under mechanical service loads or climatic loads or both [6]. The cracks that form in such RC structures are wide enough to allow deteriorating substances, such as chloride ions, to reach the steel reinforcement resulting in corrosion initiation. The durability of RC structures is also affected by other factors, such as freezing and thawing in cold weather, shrinkage cracking, etc.

There is a wide variety of reparation techniques available. The method which is used depends on the consequences of the cracks. Epoxy and cement grout are most often used.

The porosity of the surface layer plays also an important role in the concrete durability. Reducing surface porosity has a positive effect on the durability [1].

Traditional repair systems like epoxy have a number of disadvantageous aspects, such as a different thermal expansion coefficient and their detrimental effect on the environment. Therefore bacterial induced carbonate mineralization has been proposed as an alternative and environmentally friendly crack repairing technique.

We have investigated the effect of this concrete reparation method on the wave propagation, water permeability and chloride migration of cracked specimens. Furthermore we've investigated the influence of this treatment on the salt frost resistance of uncracked mortar specimens.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Materials

The remediation of cracks with the aid of bacterial carbonate precipitation was investigated on concrete specimens. The composition of the concrete mixture is given in Table 1. The specimens were demolded after 24 h and then stored in an atmosphere of 20°C and 99% relative humidity.

Table 1 Composition of the concrete mixture

Material	Mass [kg/m ³]
sand 0/4	670
aggregates 8/16	790
aggregates 2/8	490
CEM I 52,5 N	300
Water	150

The effect of the carbonate precipitation on the salt frost resistance was investigated on mortar specimens with varying porosity ($w/c = 0.5, 0.6$ en 0.7). The composition of the mixture is given in Table 2. The specimens were cured in water for 28 days and stored in laboratory conditions until treatment.

Table 2 Composition of the mortar mixtures

w/c	Mass [kg/m ³]		
	Water	CEM I 52,5 N	Sand
0,5	256	512	256
0,6	292	487	292
0,7	325	464	325

The specimens used for the biodeposition treatment were placed in a container with a solution. The solution raised 1 cm above the treated surface, the rest of the sample was dry. The solution consisted out of 20 g/L ureum and a calcium source: 49 g/L $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ or 78 g/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

In total 4 treatments were examined:

- Pure bacterial cultures (1)
- Sol-gel immobilised bacteria (2)
- Pure sol-gel mixture (Levasil®) (3)
- Sol-gel + *Bacillus sphaericus* (4)

Bacteria were immobilized in a sol-gel to protect them from the adverse environment in concrete (high pH).

B. Methods

Standardized cracks were created by placing a small copper plate with a thickness of 0.3 mm in fresh concrete specimens. After 1 day the plates were removed. Splitting tests on fibre reinforced samples were used to induce non-standardized crack with a varying crackwidth. The reinforcement with epoxy and glass fibres was necessary in order not to break the specimen.

The filling of the crack by the used treatment was microscopically and ultrasonically tested.

Water permeability was evaluated by a low pressure water permeability test. The setup of the test was based on the research done by Aldea *et al* [2].

The resistance of the treated specimens to chloride penetration was evaluated with a chloride migration test. An external electrical potential was applied across the specimen and forced chloride ions outside to migrate into the specimen. The effect of the treatment is a function of the penetration depth [3].

An intensified frost treatment was obtained by conducting 28 frost-thaw cycles in combination with de-icing salt. The weight of the material that was loosened gave an indication of the resistance under this attack.

By measuring the amount of free and bounded chlorides by a Rapid Chloride Test (RCT) the effect of the treatment with bacteria and $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ on the chloride percentage in the specimen could be determined.

III. RESULTS AND DISCUSSION

The mean crack width of the non-standardized crack was 0.14 mm. The crack width showed a lot of variation. In order to control the crack width during the tensile test, the apparatus should be equipped with special loading brackets in order to sustain the prescribed crack mouth opening displacement (CMOD) [2].

The results of the microscopically investigation indicate that there is a total filling of the crack for treatments (2), (3) and (4).

The crack width had a big influence on the water permeability as was confirmed by the results of the low pressure water permeability test. Application of a repair method resulted in a lower water permeability of cracked concrete in comparison with an untreated cracked sample.

The reduction in transport properties as a result of application of a repair treatment was not confirmed by the chloride migration test. The penetration depth was higher for treatment (1), (2) and (4). Only the application of the pure sol-gel system resulted in a lower chloride penetration in the area where the crack was located.

The treatment of mortar specimens with bacteria had a negative effect on the frost-thaw in combination with de-icing salt attack. Treated specimens with w/c 0.5 and 0.6 showed a mass loss that was significant higher in comparison with untreated specimens. Specimens with w/c 0.7 experienced showed a significant lower mass loss. The mass loss increased with a higher w/c, this was confirmed by the research done by Basheer *et al* [4].

The results of the RCT showed that the percentage of free and bounded chlorides of specimens exposed to $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ were much higher than the percentages found in the non-treated specimens. The increase of chlorides was the highest in the specimens with w/c 0.7. This is explained by the higher porosity with an increase of the w/c [5].

IV. CONCLUSION

Cracks applied on concrete specimens with a splitting test show an important variation in the crack width. Controlling the CMOD should be considered in order to create cracks with a more constant crack width.

From the results of this research it appears that the biodeposition treatment has the ability to fill a crack and reduce the water permeability. Further research however is needed to investigate the influence of this treatment on the penetration of chlorides.

The bacterial treatment is expensive for the moment in comparison with epoxy and cement grout techniques, on the other hand it is a very ecological treatment.

Future research should investigate the behaviour of the carbonate layer in aggressive circumstances.

V. ACKNOWLEDGEMENTS

Tests were carried out within the framework of a master's thesis at the faculty of civil engineering of Ghent University.

VI. REFERENCES

REFERENCES

- [1] Dhir R.K., Jones M.R., Green J.W., *Protection of structural concrete*, Proceedings of the international conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 11-13 September 1990, Thomas Telford, pp. 331-345.
- [2] Aldea C.M., Shah S.P., Karr A., *Effect of cracking on Water and Chloride Permeability of concrete*, Materials in civil engineering, issue 3, 1999.
- [3] Nordest method NT build 192, *Concrete mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady state migration experiments*, 1999, pp1-8.
- [4] Basheer L. Cleland D.J., *Freeze-thaw resistance of concrete treated with pore liners*, Elsevier, Construction and Building Materials, 2005, pp1-9.
- [5] Claisse P., *Transport Properties of Concrete*, Concrete international, 2005, pp43-48.
- [6] CUR/Betonvereniging, *Duurzaamheid en schademechanismen van beton*, Handboek duurzaamheid en onderhoud van betonconstructies, 1994, pp. 53-89

Inhoudsopgave

I	Literatuurstudie	0
1	Inleiding	1
2	Oorzaken van scheuren in beton	2
2.1	Inleiding	2
2.2	Scheuren veroorzaakt door rechtstreekse belasting	4
2.3	Scheuren veroorzaakt door opgelegde vervormingen	4
2.3.1	Temperatuurgradiënt	4
2.3.2	Verhinderde krimp	4
2.3.3	Differentiële zettingen	5
2.4	Scheurvorming veroorzaakt door plastische krimp en plastische zetting . . .	5
2.5	Scheurvorming veroorzaakt door corrosie van de wapening	6
2.5.1	Corrosieproces	6
2.5.2	Invloed van de betondekking	7
2.5.3	Carbonatatiegeïnitieerde corrosie	9
2.5.4	Chloridegeïnitieerde corrosie	14
2.6	Scheurvorming door expansieve werkingen in het beton	18
2.6.1	Alkali-silica reactie (ASR)	18
2.6.2	Sulfaataantasting	19
2.6.3	Zuuraantasting	19
2.7	Scheurvorming door invloed van uitwendige oorzaken	20
2.7.1	Vorst	20
2.7.2	Vorst/dooicycli in combinatie met dooizouten	22
3	Herstellen van scheuren in beton	24
3.1	Inleiding	24
3.2	Traditionele herstellingsmethodes	25
3.3	Zelfheling	28
4	Biodepositie	30
4.1	Inleiding	30
4.2	Geschiedenis	30
4.3	Principe	31
4.4	Toepassing op beton	32
5	Doelstelling	34

II	Materialen en methodes	35
1	Materialen	36
1.1	Proefstukken	36
1.1.1	Betonproefstukken	36
1.1.2	Mortelproefstukken	37
2	Methodes	38
2.1	Biodepositie als middel om scheuren te dichten	38
2.1.1	Aanbrengen scheuren	38
2.1.2	Herstelmethodes	40
2.1.3	Microscopisch onderzoek	43
2.1.4	Ultrasoon onderzoek	45
2.1.5	Waterdoorlatendheid	47
2.1.6	Chloridenindringing	50
2.2	Biodepositie als oppervlaktebehandeling	52
2.2.1	Herstelmethode	52
2.2.2	Indringingsdiepte van de bacteriën	52
2.2.3	Chloridenindringing	56
2.2.4	Vorst in combinatie met dooizouten	58
III	Resultaten en discussie	61
1	Resultaten	62
1.1	Biodepositie als middel om scheuren te dichten	62
1.1.1	Microscopisch onderzoek	62
1.1.2	Ultrasoon onderzoek	66
1.1.3	Waterdoorlatendheid	71
1.1.4	Chloridenindringing	76
1.2	Biodepositie als oppervlaktebehandeling	83
1.2.1	Indringingsdiepte van de bacteriën	83
1.2.2	Chloridenindringing	84
1.2.3	Vorst in combinatie met dooizouten	86
2	Discussie	88
2.1	Inleiding	88
2.2	Biodepositie als middel om scheuren te dichten	89
2.3	Biodepositie als oppervlaktebehandeling.	90
IV	Besluiten en verder onderzoek	92
3	Besluiten	93
4	Verder onderzoek	95

AFKORTINGEN EN SYMBOLEN

AFKORTING - SYMBOOL	BETEKENIS	EENHEID
AF	Afstandsfactor	micrometer
ASR	Alkali silica reactie	-
(aq)	In waterige oplossing	-
BS	Bacillus sphaericus	-
CFU	Aantal kolonie vormende eenheden	aantal/g
D	Diffusiecoëfficiënt	[m ² /s]
J_{tot}	Totale ionenflux	[kg/(m ² s)]
k	Waterdoorlatendheidscoëfficiënt	[m/s]
PU-matrix	Poly-urethaan matrix	-
$q_{theoretisch}$	Theoretisch doorstroomdebiet	[m ³ /s]
RCT	Rapid chloride test	-
RV	Relatieve vochtigheid	[%]
(s)	Vaste toestand	-
T	Temperatuur	°C of K
w/c-factor	Water/cement factor	-
wcf	Water/cement factor	-
x	Carbonatatiediepte	[mm]

Deel I

Literatuurstudie

Hoofdstuk 1

Inleiding

De duurzaamheid van beton is een van de belangrijkste factoren bij het ontwerp van nieuwe structuren en bij het bepalen van de huidige toestand van bestaande structuren. Duurzaamheid van beton werd door het *American Concrete Institute* gedefinieerd als de weerstand tegen weersinvloeden, chemische aantasting, afbrokkeling en andere degradatie processen.

De stijgende kosten van reparatie en vervanging van betonnen elementen zorgen ervoor dat er steeds meer aandacht wordt geschonken aan de duurzaamheid van beton. In de Verenigde Staten alleen al heeft men geschat dat het \$1.8 biljoen zal kosten om in de loop van de volgende 20 jaar de huidige staat van bruggen en wegen te behouden. Om deze structuren, over dezelfde tijdspanne, naar een hoger duurzaamheidsniveau te upgraden zal er een bijkomende investering van \$ 627 miljard nodig zijn [1].

Ongeveer 30 jaar geleden werd het hoge sterktebeton geïntroduceerd, in de veronderstelling dat hiermee de ondermaatse duurzaamheid van beton voor altijd van de baan zou zijn. De druksterkte van dit beton was tweemaal zo hoog als voorheen en de waterpermeabiliteit van dit hoge sterkte beton lag een stuk lager dan bij traditioneel beton het geval was. Helaas is in de meeste gevallen het optreden van scheuren de belangrijkste oorzaak van degradatie van het beton.

Hoge sterkte beton vertoont echter een hoger niveau van thermische [2] en autogene krimp [3] in vergelijking met traditioneel beton. Dit geeft samen met de hoge elasticiteitsmodulus, een lage kruipcoëfficiënt en een hogere broosheid aanleiding tot scheurvorming in het jonge beton. Het optreden van scheuren is in de meeste gevallen de belangrijkste oorzaak van degradatie van het beton. Dit werd midden jaren '90 duidelijk bij een groot aantal brugdekken in de V.S. die op zeer jonge leeftijd scheuren gingen vertonen [4].

Ongeacht de oorzaak van scheuren zorgen deze barsten ervoor dat de transporteigenschappen van het beton drastisch veranderen. De veronderstelde duurzaamheidslevensduur, die gebaseerd is op de ongescheurde toestand, kan dus niet meer worden aangenomen. De resultaten van onderzoek naar de transporteigenschappen van water en gas in ongescheurd beton zijn dan ook niet meer toepasbaar op structuren in gescheurde toestand.

Hoofdstuk 2

Oorzaken van scheuren in beton

2.1 Inleiding

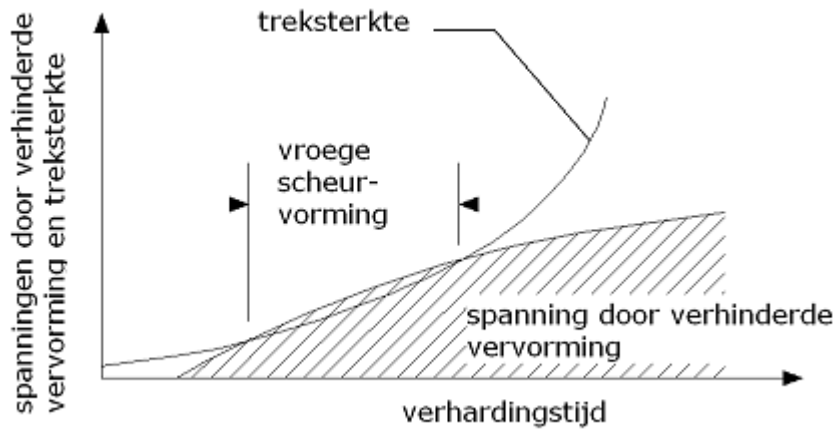
Scheuren in beton hebben een belangrijke invloed op de transportmechanismen die in het beton kunnen optreden. Scheuren vormen namelijk een gemakkelijke toegang voor vocht, gassen en ionen. Deze stoffen kunnen in interactie gaan met betonbestanddelen of met het poriënwater [5]. Ook zonder de aanwezigheid van scheuren kunnen schadelijke stoffen het beton binnendringen, hierbij is de permeabiliteit van het beton een belandrijke factor [6]. De permeabiliteit van het beton wordt voor een groot deel bepaald door de w/c-factor [7]. Een stijging van de w/c-factor heeft een stijging van de permeabiliteit van het beton tot gevolg.

Door de lage treksterkte van beton kunnen hoge trekspanningen aanleiding geven tot scheurvorming. De optredende trekspanningen kunnen veroorzaakt worden door [?]:

- rechtstreekse belastingen
- verhindering van de plastische krimp of plastische zetting van het vers beton
- verhindering van vervormingen ten gevolge van temperatuurschommelingen of krimp
- opgelegde vervormingen van het betonelement
- uitzetten van de wapening ten gevolge van roestvorming
- expansieprocessen ten gevolge van een volumetoename van elementen in het beton

Er zullen bijna steeds constructieve scheuren in het beton aanwezig zijn. De Belgische norm [8] stelt een maximale scheurwijdte voor naargelang de milieuklassen waarin de constructie zich bevindt.

Tijdens het verharden van beton bestaat er een kritische fase waarin het beton een zeer lage betontreksterkte en een zeer beperkte vervormingscapaciteit bezit. Deze kritische fase treedt op zijn vroegst 2 uur na het storten op en kan tot 4 - 16 u duren. Figuur 2.1 illustreert het overschrijden van de beschikbare treksterkte door verhinderde vervormingen van het jong beton in functie van de ouderdom.



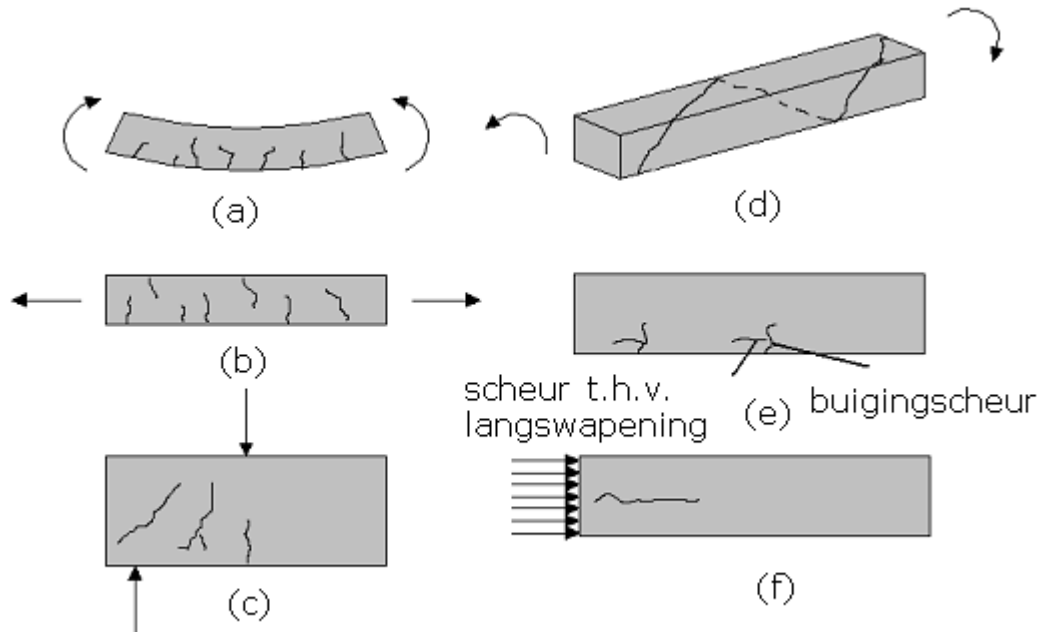
Figuur 2.1: Treksterkte en spanningen in jong beton [5]

Trekspanningen bij jong beton zijn het gevolg van:

- snelle daling van de temperatuur van het beton dat voorafgaand is opgewarmd door de hydratatiewarmte van de cementpasta
- snelle uitdroging van beton, vooral bij een hoog watergehalte
- vervormingen van de bekisting.

2.2 Scheuren veroorzaakt door rechtstreekse belasting

In Figuur 2.2 worden de verschillende typische vormen van scheurvorming ten gevolge van rechtstreekse acties (buiging, dwarskracht,...) voorgesteld.



Figuur 2.2: Scheuren ten gevolge van (a) buigend moment, (b) trekkracht, (c) dwarskracht, (d) wringing, (e) zwakke hechting beton/wapening, (f) geconcentreerde last [5]

2.3 Scheuren veroorzaakt door opgelegde vervormingen

2.3.1 Temperatuurgradiënt

Ten gevolge van de exotherme hydratatiereactie warmt het beton op en zet het uit. Het beton begint daarna terug af te koelen vanaf het betonoppervlak. Er ontstaat een temperatuurgradiënt tussen de kern van het beton en haar oppervlak. De buitenkant van het beton wil krimpen maar wordt hierin verhinderd door de warmere betonkern. Aangezien het jonge beton over weinig treksterkte bezit zullen er scheuren aan het oppervlak optreden.

De temperatuurgradiënt kan ook het gevolg zijn van een uitwendige oorzaak en kan dus ook optreden bij reeds verhard beton (vb. schouwen).

2.3.2 Verhinderde krimp

Dit fenomeen komt vaak voor bij platen die op een reeds bestaand massief worden gestort. Door de verhinderde verkorting van de wand ontstaat trek en kunnen scheuren ontstaan ter plaatse van de voeg tussen de wand en het reeds gestorte massief.

Bij reeds verhard beton kan krimp zich ook voordoen door een vermindering van de vochtigheidsgraad van de omgeving.

2.3.3 Differentiële zettingen

Als de differentiële zettingen beperkt blijven dan zal vooral schade optreden aan niet-dragende elementen. In het andere geval ontstaan scheuren zoals die veroorzaakt door rechtstreekse belastingen.

2.4 Scheurvorming veroorzaakt door plastische krimp en plastische zetting

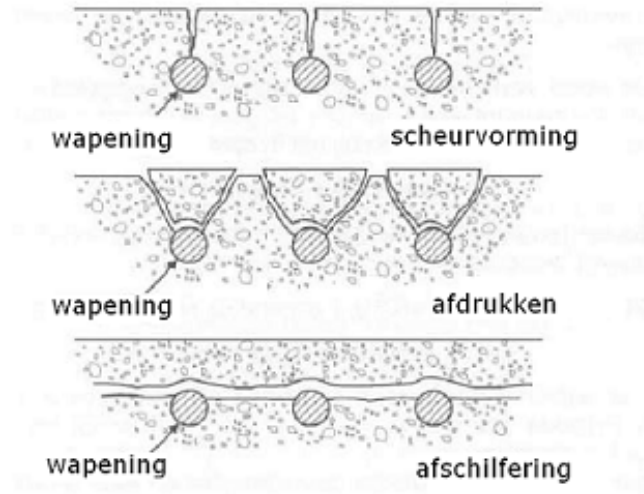
Plastische krimp wordt veroorzaakt door capillaire trekspanningen in de poriën en komt voor 2 - 4 u na het mengen. Indien de verdamping aan het oppervlak groter is dan het verlies van water door uitzweten ontstaan capillaire krachten in de poriën. Als de volumevermindering aan het oppervlak niet vrij kan optreden ontstaan trekspanningen en dus ook scheuren. Vooral betonelementen met een groot horizontaal oppervlak zijn gevoelig aan deze vorm van scheurvorming.

Bij plastische zetting zakken de zwaardere bestanddelen in het vloeibaar beton naar beneden onder invloed van de zwaartekracht en wordt de waterconcentratie bovenaan groter. Hierdoor zal het water dus sneller uitzweten. Scheurvorming ontstaat doordat de wapening of de bekisting de volumevermindering verhindert.

2.5 Scheurvorming veroorzaakt door corrosie van de wapening

2.5.1 Corrosieproces

Roestvorming is een expansief proces. Het volume van de corrosieproducten verdubbelen of verdrievoudigen tegenover hun oorspronkelijk volume. Figuur 2.3 toont de splijtwerking op het beton ten gevolge van het corrosieproces.



Figuur 2.3: Schade ten gevolge van corrosie[9]

Het elektrochemisch proces dat optreedt bij het roesten van staal wordt weergegeven door de reactie:

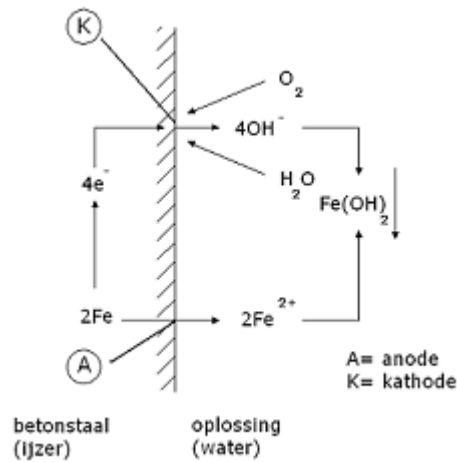


Deze reactie treedt op wanneer beton in een waterige oplossing wordt geplaatst. Een geringe hoeveelheid ijzeratomen zal dan als ijzerionen Fe^{2+} in oplossing gaan. De afgifte van elektronen in vergelijking 2.1 is een oxidatiereactie. De plaats waar de ijzeratomen in oplossing gaan is de anode. De vrijgekomen elektronen gaan naar de kathode van het staal en reageren daar met O_2 en H_2O moleculen tot hydroxylionen:



Afhankelijk van het aanbod van water en zuurstof worden verschillende roestproducten gevormd.

De stroomkring van het corrosieproces wordt in Figuur 2.4 voorgesteld:



Figuur 2.4: Stroomkring corrosieproces [10]

Er moet tegelijk aan volgende voorwaarden voldaan worden voordat corrosie kan optreden [5]:

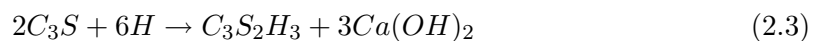
- aanwezigheid van potentiaalverschillen waardoor een stroomkring kan ontstaan
- de kathode en anode moeten zowel via het staal als elektrochemisch met elkaar verbonden zijn
- depassivering van het staal moet het in oplossing gaan van ijzeratomen mogelijk maken
- voldoende zuurstof beschikbaar bij de kathode.

2.5.2 Invloed van de betondekking

De betondekking wordt gedefinieerd als de afstand tussen het meest naar buiten gelegen oppervlak van de wapening (met inbegrip van elk stalen onderdeel zoals beugels,..) en het dichtsbijzijnde betonoppervlak.

Aangezien bepaalde betonmengsels poreuze en relatief doorlatende materialen zijn kunnen potentieel schadelijk stoffen het beton binnendringen. Een gevolg hiervan is dat in bepaalde gevallen de wapening in het beton omgeven zal zijn met water en zuurstof.

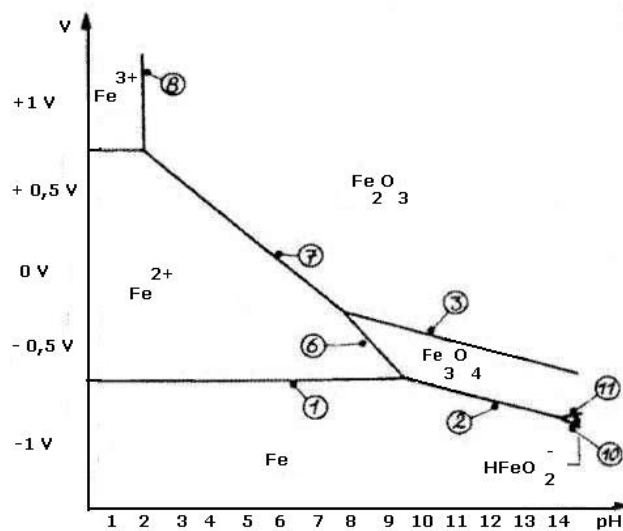
Onder normale omstandigheden corrodeert het wapeningsstaal niet omdat het waterig milieu (het poriënwater) dat het staal omringt een hogere pH heeft dan het vocht (regen/water) dat in andere gevallen tot corrosie leidt. De hogere pH-waarde is een gevolg van de hydratatie van C_2S en C_3S uit het cement. In aanwezigheid van water treden volgende hydratatiereacties op:



Het reactieproduct $Ca(OH)_2$ is goed oplosbaar in water:



waarbij (s) staat voor 'vaste toestand' en (aq) 'in waterige oplossing'. Door de stijging van het aantal hydroxylionen in het water zal ook de pH van de poriënvloeistof stijgen tijdens het verharden. Afhankelijk van de bron vindt men pH-waarden tussen 12.6 en 13.5 [9], meer dan 12.6 [11], tussen 13 en 15 [12] voor beton op basis van portlandcement. De aanwezigheid van hydroxylionen zal er ook voor zorgen dat het gevormde ijzerhydroxide neerslaat op het staal en zo het verder in oplossing gaan van nog meer ijzer bemoeilijkt of zelfs geheel verhindert. Dit wordt het passiveren van staal genoemd. Op volgende figuur is een vereenvoudigde versie van het Pourbaix diagram voor ijzer te zien.



Figuur 2.5: Pourbaix diagram voor ijzer [13]

De pH en de potentiaal van het ijzer worden tegenover elkaar uitgezet. Bepaalde combinaties van pH en potentiaal leiden tot corrosie (Fe_2^+ , Fe_3^+ , $HFeO_2^-$) terwijl andere leiden tot passivatie van het staal (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) of immunitet (Fe). Uit het diagram volgt dat voor een pH gelegen tussen 9 en 14 het staal gepassiveerd is.

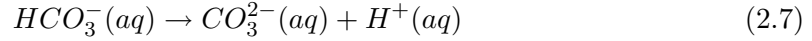
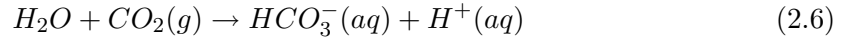
Corrosie kan toch nog optreden als de samenstelling van het poriënwater wordt gewijzigd door externe invloeden. Dit kan gebeuren door het binnendringen van CO_2 (uit de lucht) of chloriden (zeewater, dooizouten,...). Beiden hebben tot gevolg dat de passiveringslaag wordt aangetast. In het eerste geval spreekt men van carbonatatiegeïnitieerde corrosie, in het tweede geval van chloridegeïnitieerde corrosie.

2.5.3 Carbonatatiegeïnitieerde corrosie

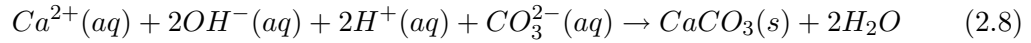
Deze vorm van corrosie wordt veroorzaakt door diffusie van CO_2 doorheen de capillaire poriën. In [14] vindt men een benaderende samenstelling van de lucht terug (in vol%):

- 78.09% N_2
- 20.95% O_2
- 0.93% Ar
- 0.03 % CO_2

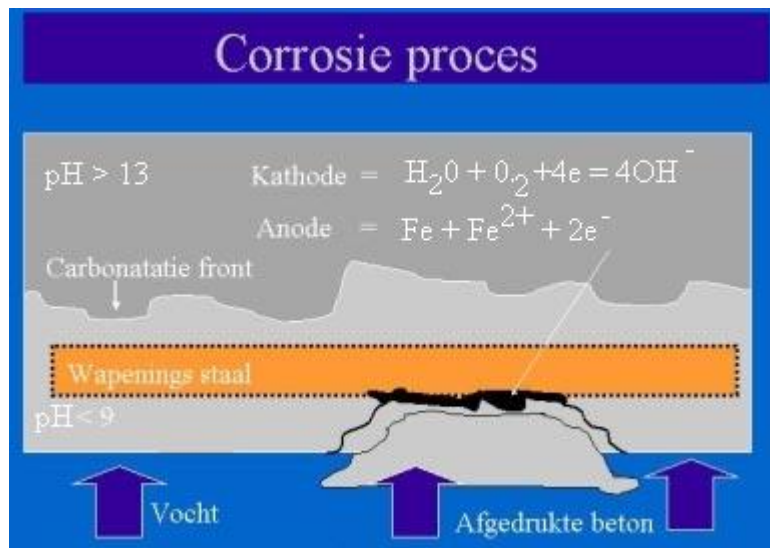
In grote steden kan het percentage CO_2 stijgen tot 0.3% of zelfs tot 1%. Het aanwezige CO_2 in de lucht diffundeert in het beton en lost daar op in de poriënvloeistof:



Daarna vindt een neutralisatiereactie plaats tussen de reactieproducten van vergelijking 2.5 en van vergelijking 2.6 en 2.7:



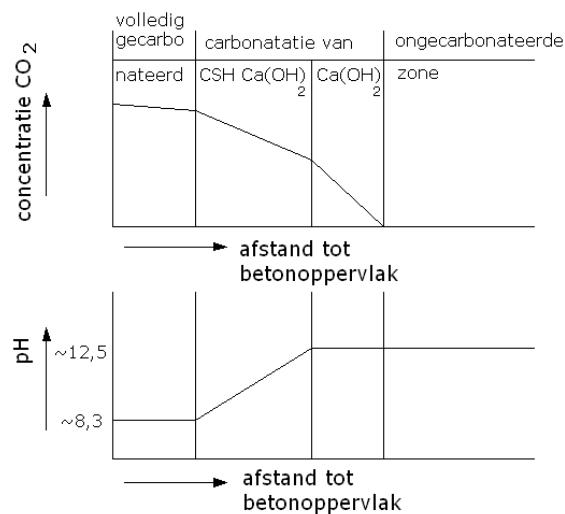
Door het opnemen van hydroxylionen uit de poriënvloeistof in voorgaande vergelijking zal de pH-waarde dalen. Zoals te zien in Figuur 2.4 zal het staal gedepasseerd worden als de pH waarde daalt onder 9. Door reactie 2.8 kan de pH-waarde dalen tot 8.3. Hierdoor kan corrosie van de wapening optreden, deze zal meestal gelijkmatig gespreid zijn over het gebied waar de wapening in gecarbonateerd gebied ligt. Dit is te verklaren omdat in het gecarbonateerde gebied voldoende CO_2 en dus ook voldoende O_2 kan binnendringen om corrosie te laten optreden. Volgende figuur toont het proces van carbonatatiegeïnitieerde corrosie.



Figuur 2.6: Carbonatatiegeïnitieerde corrosie [15]

Het gevormde CaCO_3 in reactie 2.8 is zeer weinig oplosbaar en zal neerslaan in de poriën en zo de kanaaltjes tussen de poriën verstoppen. Dit heeft als gevolg dat indringen van CO_2 wordt bemoeilijkt en de carbonatatiereactie dus vermindert.

De diepte waar de reactie reeds voltooid is wordt het carbonatatiefront genoemd. Ze schrijdt voort van buiten naar binnen zoals te zien in volgende figuur.



Figuur 2.7: Verloop van pH en CO_2 -concentratie in functie van de afstand tot het betonoppervlak [16]

De carbonatatediepte (x) is functie van de vierkantswortel van de tijd en een carbonatatiecoëfficiënt [17] zoals te zien in Formule 2.9

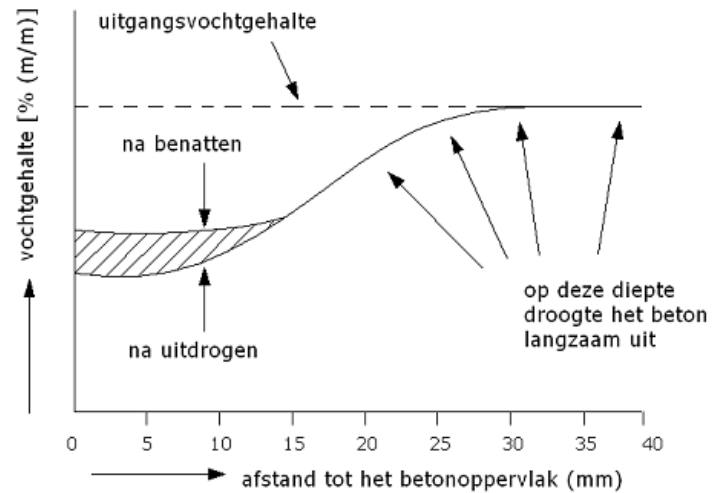
$$x = C \cdot \sqrt{t} \quad (2.9)$$

met:

- x = de carbonatatiediepte [mm]
- C = de carbonatatiecoëfficiënt [mm/dag]
- t = tijd [dag]

Het al dan niet aanwezig zijn van water in de poriën is een zeer belangrijke factor betreffende de indringsnelheid van CO_2 in het beton. Deze snelheid ligt namelijk 10000 maal hoger in lucht dan in water [18]. Dit heeft als gevolg dat beton dat permanent onder water staat nauwelijks zal carbonateren en het wapeningsstaal zal niet roesten ten gevolge van carbonatatie. Beton dat zich continu in droge omstandigheden bevindt zal zeer snel carbonateren. Toch zal geen corrosie optreden indien er een tekort aan water bestaat. Een relatieve vochtigheidsgraad tussen 50% en 70% levert de gevaarlijkste omstandigheden op [19]. Bij een lagere relatieve vochtigheid kan het binnengedrongen CO_2 niet volledig oplossen in de poriënvloeistof zodat de reactie niet plaatsvindt. Bij een relatieve vochtigheid boven 70% wordt de diffusie van CO_2 zeer sterk belemmerd waardoor ook de carbonatatie-reactie sterk vertraagt. De gevaarlijkste situatie in de praktijk doet zich voor in situaties waar het beton afwisselend nat en droog is.

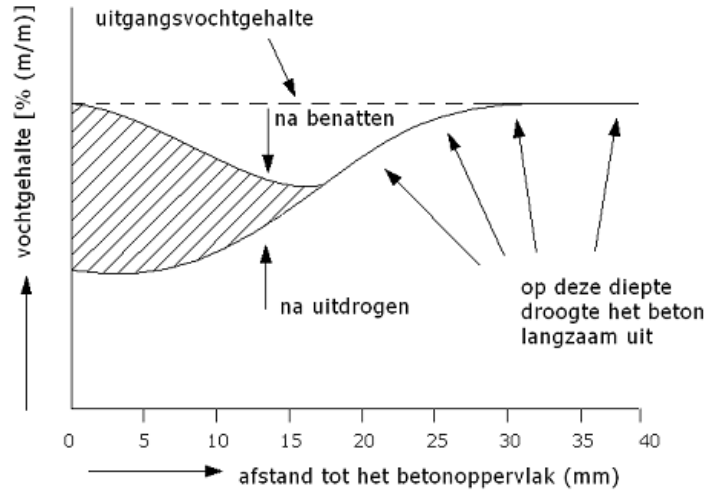
Volgende figuur toont het gebied waar het vochtgehalte varieert voor een mortel die afwisselend een week aan hoge relatieve vochtigheid en een week aan lage relatieve vochtigheid werd blootgesteld.



Figuur 2.8: Variatie vochtgehalte in de mortel door het proefstuk afwisselend een week aan hoge relatieve vochtigheid en een week aan lage relatieve vochtigheid bloot te stellen [5]

Uit de figuur volgt dat het gebied waar een wisselend vochtgehalte optreedt, gelegen is binnen 15 mm vanaf het betonoppervlak.

Volgende figuur toont het gebied waar het vochtgehalte varieert voor een mortel die afwisselend een uur onder water werd geplaatst en een week aan lage relatieve vochtigheid werd blootgesteld.



Figuur 2.9: Variatie vochtgehalte in de mortel door het proefstuk afwisselend een uur onder water te plaatsen en een week aan lage vochtigheid bloot te stellen [5]

Ook hier ligt het gebied waar een wisselend vochtgehalte optreedt binnen 15 mm vanaf het betonoppervlak. In het tweede geval werd er wel meer water opgenomen. De CO_2 moleculen moeten in het tweede geval dan ook een grotere vochtbarrière doordringen.

Invloed van aanwezige scheuren

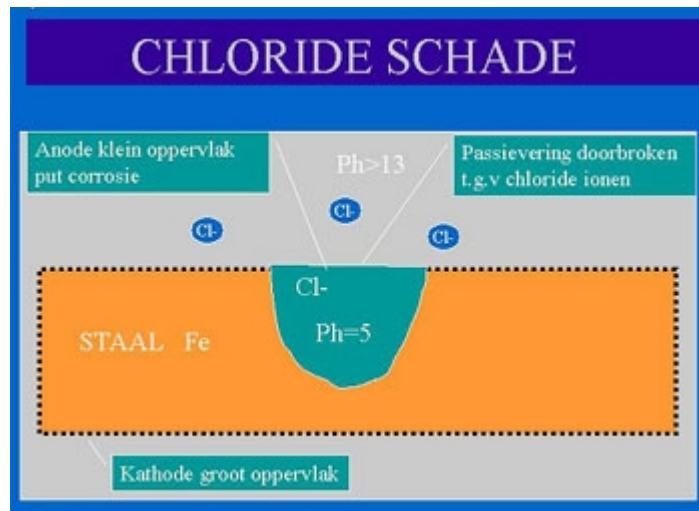
De aanwezigheid van scheuren in beton zal ervoor zorgen dat ter plaatse van die scheuren de CO_2 moleculen dieper in het beton kunnen doordringen. De carbonatatiediepte ter plaatse van een scheur zal dus hoger zijn dan in een ongescheurde doorsnede [20],[21].

2.5.4 Chloridegeïnitieerde corrosie

In het geval van chloridegeïnitieerde corrosie ontstaat de roestvorming door het binnendringen van chloriden in het beton. Het binnendringen van chloriden kan op de volgende manieren gebeuren:

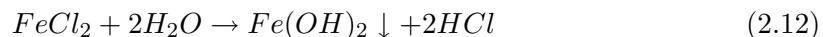
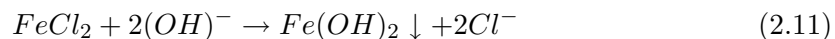
- capillaire opzuiging van chloridehoudende oplossingen (als het beton uitgedroogd is)
- diffusie vanuit een chloridehoudende oplossing (als het beton reeds verzadigd is met water)
- migratie onder invloed van een elektrisch veld of een hydrostatische gradiënt.

De vrije chloride-ionen kunnen dan ijzer-ionen uit de passiveringslaag losmaken met de vorming van zoutzuur (HCl) tot gevolg. Een gevolg van deze reactie is dat de pH-waarde van het poriënwater daalt waardoor nog meer ijzer-ionen in oplossing gaan. Er ontstaat zogenaamd putcorrosie omdat het staal zeer lokaal wordt aangetast (zie Figuur 2.10). Hierdoor kan de wapeningsdoorsnede lokaal zeer sterk afnemen. Bij eenzelfde hoeveelheid omgezet ijzer zijn de gevolgen dus ernstiger bij chloridegeïnitieerde corrosie dan bij carbonatatiegeïnitieerde corrosie.



Figuur 2.10: Chloridegeïnitieerde corrosie [15]

De opeenvolgende reacties verlopen als volgt:



De belangrijkste bronnen van chloriden zijn:

- grondstoffen: vroeger werden chloriden aan het betonmengsel toegevoegd om het beton sneller te laten verharderen. Dit gebeurde onder de vorm van calciumchloride. Tegenwoordig is dit niet meer toegelaten voor gewapend en voorgespannen beton. Ook de samenstellende materialen zoals zand en grind kunnen chloridehoudend zijn.

- Zeewater: het water van de oceanen bevat ongeveer 20 g/l chloriden (en ongeveer 35g/l zouten in het algemeen) [22]. In de Noordzee bedraagt de concentratie aan chloriden ongeveer 18.5 g/l [23].
- Dooizouten: als dooizout wordt meestal calciumchloride en natriumchloride gebruikt. Er ontstaat een chlorideoplossing samen met gesmolten sneeuw of ijs. Deze oplossing kan in het beton doordringen. Ze kan ook gewoon opdrogen zodat een hoeveelheid kristallijn zout op het betonoppervlak achterblijft. Regenwater kan dan later als transportmiddel dienen voor het zout om in het beton door te dringen.
- In het regenwater zelf is ook een kleine hoeveelheid chloriden aanwezig. De opgemeten waarden in Nederland [24] variëren tussen 1.7 en 19.2 mg/l. Ook grondwater en afvalwater kan als chloridebron functioneren.

Het gevaar voor aantasting door chloride-ionen is afhankelijk van [5]:

- Het cementtype: hoogovencement of toevoeging van vliegash zorgt ervoor dat de chloride bindingscapaciteit stijgt [23]. Hierdoor vermindert de penetratie van schadelijke vrije chloriden.
- Gehalte granulaten: granulaten hebben doorgaans een veel lagere diffusiviteit dan cementpasta. De verhouding van de effectieve diffusiviteit van beton tot de diffusiviteit van cementpasta neemt dus af bij toenemend gehalte granulaten.
- De w/c factor: een lagere w/c- factor heeft een fijner poriënnetwerk en dus een lagere permeabiliteit tot gevolg.
- De nabehandeling: een langere nabehandelingstijd (in vochtige omstandigheden) of hogere nabehandelingstemperatuur betekent:
 - hogere maturiteit van het beton
 - kleinere poriën en een groter aanhechtingsoppervlak op de poriënwanden
 - een grotere tortuositeit van het poriënsysteem.

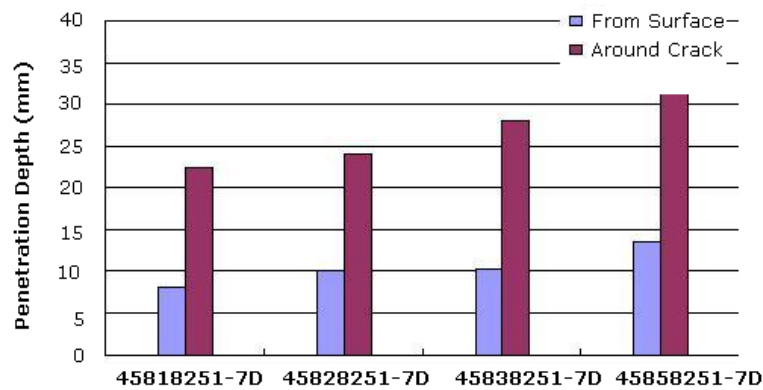
Volgens de meeste onderzoekers hebben deze laatste drie opgenoemde factoren meer chloridenbinding en minder chloridendiffusie tot gevolg [25]. Andere onderzoekers beweren het tegenovergestelde [24]. Volgens hen verloopt de chloridenpenetratie in verzadigd beton sneller als de initiële verharding in vochtige omstandigheden langer duurt. Zij wijten dit fenomeen aan 'uitlogingsabsorbtie'.

Bij de hydratatie van C_2S en C_3S wordt $Ca(OH)_2$ gevormd. Voor een deel lost deze stof op in de poriënvloeistof en voor een deel wordt ze als hexagonale kristallen afgezet in het beton. Wanneer de wanden van het beton in contact komen met een oplossing met $pH < 12,5$ (zoals water, al dan niet met chloriden in) wordt de $Ca(OH)_2$ in het poriënwater uitgeloozd onder invloed van een concentratiegradiënt. Om het evenwicht te herstellen gaan als gevolg van deze uitloging vaste $Ca(OH)_2$ -kristallen in oplossing waarbij telkens een kleine capillaire holte overblijft. Hierdoor ontstaat een kracht die bijkomend water met chloriden uit de omgeving zuigt. Bij toenemende duur van de curingperiode bestaat er een grotere concentratie $Ca(OH)_2$ in oplossing en een groter volume vaste $Ca(OH)_2$ kristallen. Hierdoor is de concentratiegradiënt groter en diffundeert $Ca(OH)_2$ sneller uit

het beton en gaan de $Ca(OH)_2$ kristallen dus sneller in oplossing. Dit heeft een grotere zuigkracht tot gevolg.

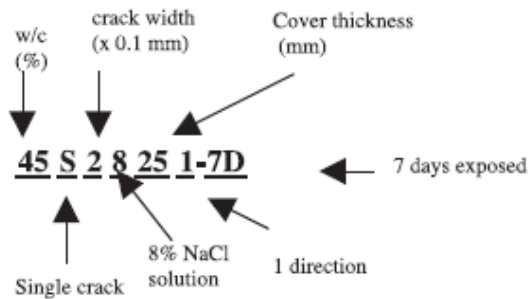
Invloed van aanwezige scheuren

In [22] werden betonproefstukken aan drie - en vierpuntsbuigproeven onderworpen om scheuren te creeëren. De geïnitieerde scheuren hadden een scheurwijdte van 0,1 of 0,2 mm. De niet gescheurde oppervlakken van de proefstukken werden met een coating behandeld en de de proefstukken werden voor 7 dagen of 1 maand in een NaCl-oplossing (8%) gedompeld. Figuur 2.11 toont de indringingsdiepte van de chloriden vanaf het oppervlak en loodrecht op de scheur.



Figuur 2.11: penetratiediepte [mm] t.o.v. de scheurbreedte

Figuur 2.12 verklaart de nomenclatuur van de gebruikte proefnummers in figuur 2.11.



Figuur 2.12: nomenclatuur proefnummers [22]

Uit dit onderzoek werd duidelijk dat de chloriden zeer snel de scheurtip bereiken. Vanuit de scheur zelf migreren de chloriden loodrecht op het scheuroppervlak. De indringing rond de scheur bleek ongeveer tweemaal zo diep te zijn als de penetratiediepte loodrecht op het betonoppervlak. Waarschijnlijk is dit een gevolg van kleine microscheurtjes langs de wand van de scheur.

Om de diffusiecoëfficiënt van gescheurd beton te bepalen werd in [26] een theoretisch model ontwikkeld. Er wordt aangenomen dat alle scheuren een gemiddelde scheurwijdte L_4 hebben. Ook de gemiddelde scheurafstand L wordt hier als een constante beschouwd. In de praktijk echter lopen scheuren meestal niet over de volledige dikte van het beton door en kent het scheurverloop een kronkelend karakter. Het model geeft dus een bovengrens aan voor de diffusiviteit van gescheurd beton.

Gescheurd beton wordt in het model beschouwd als een composietmateriaal. Het gescheurde beton wordt gesuperponeerd op het homogene en ongescheurde referentiebeton.

De totale ionenflux wordt gegeven door

$$J_{tot} = \frac{J_c \cdot A_c + J_m \cdot A_m}{A_c + A_m} \quad (2.13)$$

Hierin zijn:

- A_c en A_m het totale doorstroomoppervlak respectievelijk van het gescheurde en het ongescheurde materiaal;
- J_c en J_m de bijhorende ionaire fluxen.

De diffusiecoëfficiënt van gescheurd beton, D wordt als volgt uitgedrukt:

$$D = \frac{A_c \cdot D_1 + A_m \cdot D_0}{A_c + A_m} = D_0 \cdot \frac{\frac{D_1}{D_0} + S}{1 + S} \quad (2.14)$$

Hierin zijn:

- $S = A_m/A_c$
- D_1 = diffusiecoëfficiënt in vrije oplossing van het beschouwde ion.
- D_0 = diffusiecoëfficiënt voor ongescheurd beton

Voor een ééndimensionaal (=anisotroop) scheurpatroon geldt:

$$\frac{D}{D_0} = \frac{D_1}{D_0 \cdot f} + 1 \quad (2.15)$$

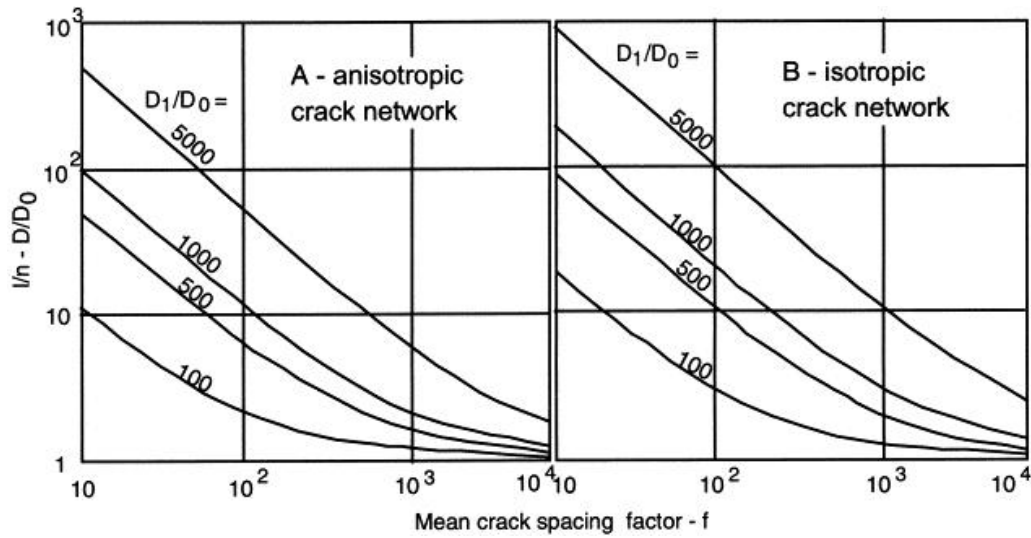
met $f = L_1/L_4$ (de verhouding van de gemiddelde scheurafstand tot de gemiddelde scheurwijdte).

Voor een tweedimensionaal (=isotroop) scheurpatroon geldt:

$$\frac{D}{D_0} = \frac{2 \cdot D}{D_0 \cdot f} + 1 \quad (2.16)$$

Figuur 2.13 stelt de voorgaande uitdrukkingen grafisch voor.

Uit de figuur blijkt dat de invloed van de scheurvorming toeneemt naarmate D_1/D_0 toeneemt. Dit toont aan dat de invloed van aanwezige scheuren groter wordt naarmate het beton dichter is. In de praktijk blijft de factor f (de verhouding van de gemiddelde scheurafstand tot de gemiddelde scheurwijdte) meestal kleiner dan 100 zodat de diffusiecoëfficiënt maximaal met een factor tien verhoogt ten gevolge van scheurvorming. Het model geeft een overschatting met een factor 2,5 in vergelijking met experimentele waarnemingen.



Figuur 2.13: theoretisch model

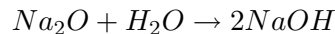
2.6 Scheurvorming door expansieve werkingen in het beton

2.6.1 Alkali-silica reactie (ASR)

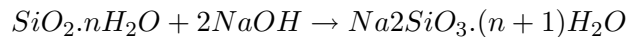
Bij een alkali-silicareactie vindt er een reactie plaats tussen alkaliën, water en reactief silica. In bepaalde toeslagmaterialen kan reactief silica teruggevonden worden. De alkaliën (natrium - en kaliumhydroxiden) kunnen voorkomen in het poriënwater van het beton. Als gevolg van de alkali-silica reactie ontstaan gelvormige reactieproducten die (poriën-) water kunnen absorberen. Hierdoor ontstaat een zwelling in het inwendige beton met trekspanning aan het betonoppervlak tot gevolg.

De ASR verloopt als volgt:

1. reactie van alkaliën en water tot alkalihydroxide:



2. reactie van het reactief silica met alkalihydroxide tot alkali-silicaathydraat, deze laatste kan zeer veel water aan zich binden



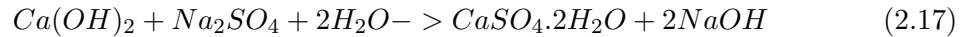
Schadelijke ASR kan alléén optreden als ten minste aan de volgende drie voorwaarden gelijktijdig wordt voldaan [27]:

- blijvend of periodiek voldoende vocht in het beton aanwezig
- voldoende alkaliën beschikbaar in het beton beschikbaar
- ASR-gevoelig toeslagmateriaal.

Als gevolg van schadelijke ASR ontstaat er een willekeurig scheurpatroon dat met zeer grote scheuropeningen kan gepaard gaan. De gevolgen zijn meestal pas na een aantal jaar zichtbaar omdat de reacties zo traag verlopen.

2.6.2 Sulfaataantasting

Sulfaten kunnen via diffusie of capillaire opzuiging in het beton binnendringen. De sulfaten kunnen afkomstig zijn vanuit de grond of het grondwater, waar ze soms natuurlijk aanwezig zijn. Ze kunnen daar ook terecht komen ten gevolge van het gebruik van meststoffen of industriële activiteit. Volgende chemische reactie doet zich voor:



Eén van de reactieproducten van dit proces is calciumsulfaat (secundaire gips). Het calciumsulfaat reageert enkel met gehydrateerde calciumaluminaten (voornamelijk C_3A) en daarbij wordt calciumsulfoalumaat (ettringiet) gevormd. Dit ettringiet zwelt sterk en daardoor kunnen de daaropvolgende inwendige spanningen tot scheurvorming leiden [5]. De sulfaataantasting is enkel schadelijk als volgende elementen voldoende aanwezig zijn:

- sulfaationen
- gehydrateerde calciumaluminaten
- portlandiet (afhankelijk van sulfaatsoort)
- water.

2.6.3 Zuuraantasting

Ten gevolge van het basisch karakter van beton zal het aangetast worden door zuren. De zuren reageren namelijk met de calciumverbindingen van de cementsteen (calciumhydroxide, calciumsilicaathydraten en calciumaluminaathydraten). Door deze reactie worden calciumzouten van het aantastende zuur en kiezelzuur (SiO_2) gevormd [5].

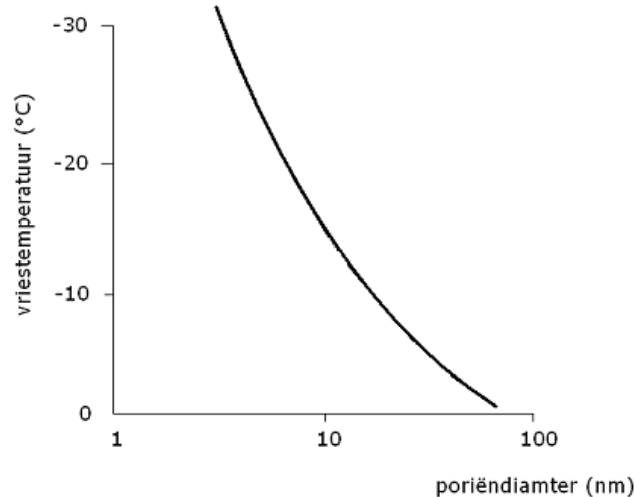
De aantastingsnelheid is functie van:

- de zuurtegraad (pH) van de zuurhoudende oplossing. Hierbij wordt een pH tussen 6,5 en 5,5 als zwak agressief beschouwd, een pH tussen 5,5 en 4,5 als matig agressief en een pH tussen 4,5 en 4 als sterk agressief
- een stromende of stilstaande oplossing
- de oplosbaarheid van het gevormde zout
- penetratiediepte: naarmate het zuur dieper in het beton doordringt zal de afstand tot nieuwe calciumverbindingen toenemen en zal de aantastingsnelheid vertragen.

2.7 Scheurvorming door invloed van uitwendige oorzaken

2.7.1 Vorst

Wanneer de buitentemperatuur onder 0°C daalt zal het poriënwater in de oppervlakte zone van het beton eerst bevriezen. In volgende figuur wordt het verband gegeven tussen de poriëndiameter en de vriestemperatuur. De vriestemperatuur is de temperatuur waarbij water in ijs wordt omgezet.



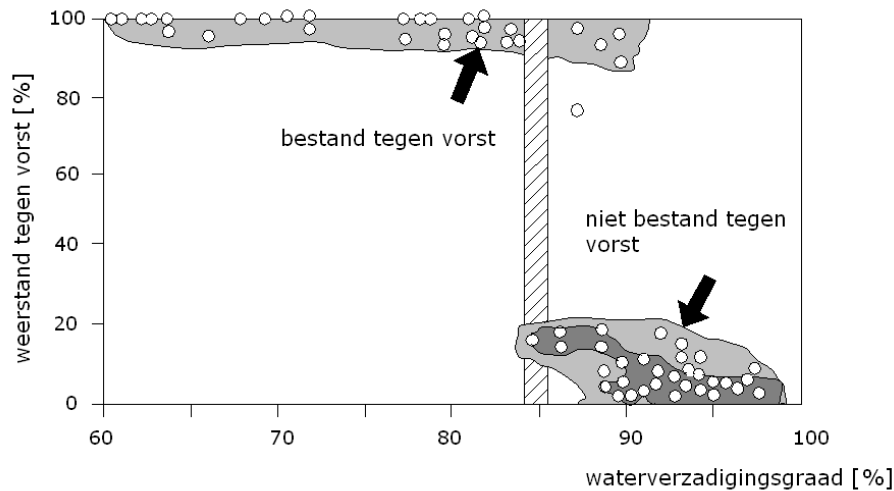
Figuur 2.14: Daling van het vriespunt tegenover de diameter van de porie [28]

Uit de figuur volgt dat naarmate de poriëndiameter afneemt de vriestemperatuur daalt. Zo bevriest water in poriën van ongeveer 10 nm bij een temperatuur van -15°C .

Doordat het vorstfront van buiten naar binnen voortbeweegt, wordt het nog niet bevroren water in de beton matrix van de omgeving afgesloten. Doordat ijs ongeveer 9% meer volume inneemt dan water komt het nog niet bevroren water onder druk te staan. Wanneer het beton verzadigd is met water heeft het vocht geen enkele uitwijkmogelijkheid. De waterdruk op de poriënwallen zal uiteindelijk zodanig hoog worden totdat de betontreksterkte wordt bereikt en het beton bezwijkt.

Indien het beton niet volledig is verzadigd, is er nog expansieruimte beschikbaar. Deze expansieruimte bestaat uit met lucht gevulde poriën. De omvang van de expansieruimte hangt af van de waterverzadigingsgraad, dit is de verhouding tussen de hoeveelheid vrij water dat werkelijk aanwezig is in de poriën en de hoeveelheid die maximaal mogelijk is.

Figuur 2.15 toont het verband tussen de waterverzadigingsgraad en de weerstand tegen vorst.

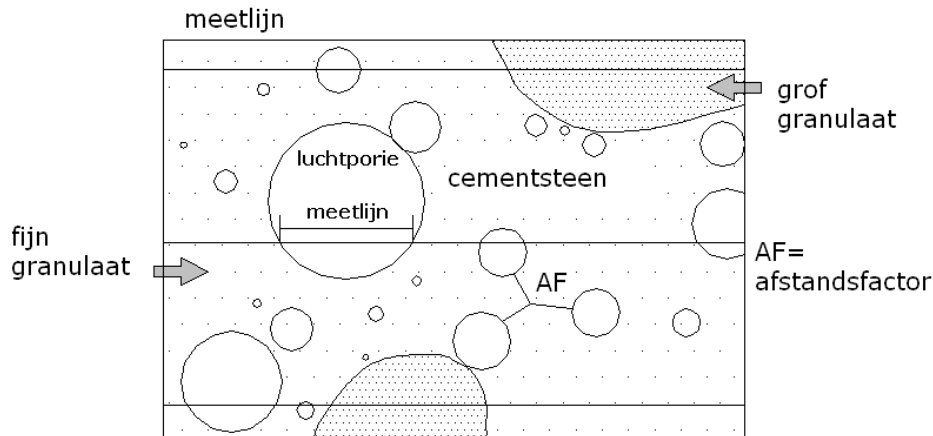


Figuur 2.15: Invloed van de waterverzadigingsgraad op de de vorstbestandheid van beton [29]

Het niet-verzadigd beton moet bovendien voldoende sterk zijn om de druk op te vangen die het stromende water uitoefend op de poriënwallen naar de dichtsbijzijnde expansieruimte. De hydraulische druk stijgt naarmate:

- de ijsvorming (en dus de temperatuursdaling) sneller verloopt
- de afstand dat het water aflegt tussen ijsfront en expansieruimte langer wordt. Er moet dus niet enkel voldoende expansieruimte beschikbaar zijn, ze moet ook goed verdeeld zijn. Hierbij moet rekening gehouden worden bij het toevoegen van luchtbelvormers. De afstand tussen een willekeurig gekozen punt tot de beschikbare expansieruimte (de luchtbel) mag niet groter zijn dan een bepaalde waarde. Meestal wordt hiervoor een waarde kleiner dan $200\mu m$ gekozen. Deze afstand noemt met de afstandsfactor. Figuur 2.16 toont hoe de afstandsfactor wordt bepaald.

Een belangrijke factor die de weerstand tegen deze belasting bepaalt is de w/c-factor. Bij een stijgende w/c-factor neemt de verweringsnelheid toe [30]. De vorstbestendigheid neemt af bij stijgende w/c-factoren [31].

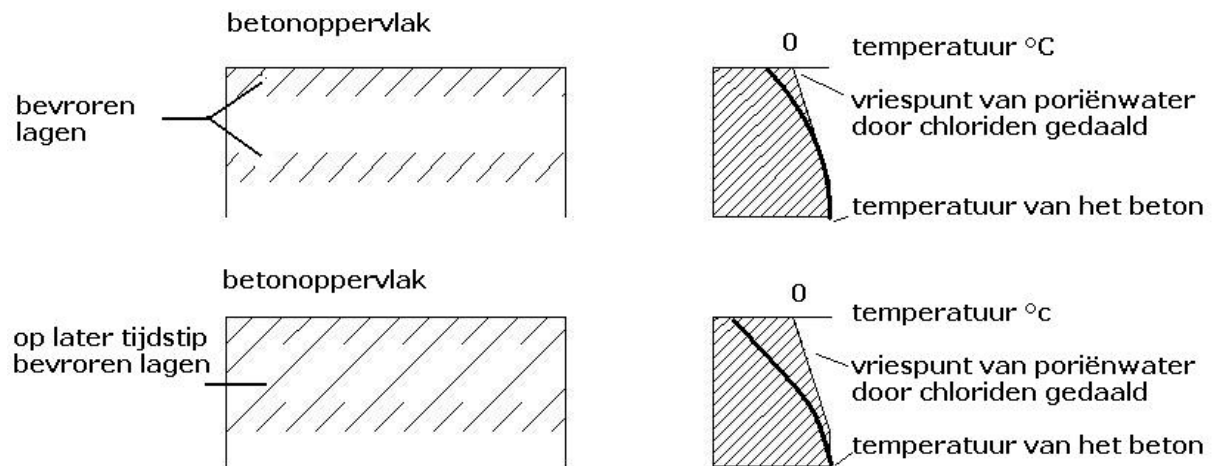


Figuur 2.16: Doorsnede van beton met luchtbelvormer [5]

2.7.2 Vorst/dooicycli in combinatie met dooizouten

Het gebruik van dooizouten op horizontale oppervlakken (wegen, bruggen,...) heeft volgende effect [32]:

- ijs en sneeuw smelten en dringen door in de betonmatrix. Gedurende een lange sneeuwperiode en herhaaldelijk gebruik van dooizouten bestaat de kans dat een dun laagje water op het betonoppervlak blijft staan en dat de kritische waterverzadigingsgraad wordt bereikt in de oppervlaktezone.
- Om ijs en sneeuw te laten ontdooien wordt warmte aan de oppervlaktelaag van het beton onttrokken. Dit veroorzaakt een temperatuurschok met inwendige spanningen en mogelijke scheurvorming in de oppervlaktezone tot gevolg.
- Gesmolten ijs en sneeuw vertonen een hoog chloridegehalte. Deze chloriden worden samen met het water door capillaire opzuiging in het beton opgezogen. De chloriden hebben een vriespuntsverlaging tot gevolg. Hoe hoger de chloridenconcentratie hoe groter de vriespuntsdaling, het vriespunt zal dus het laagst zijn in de toplaag. Naar onder toe vermindert de concentratie maar verhoogt de betontemperatuur. De combinatie van vriespuntsdaling en betontemperatuur kan ertoe leiden dat een nog niet bevroren laag wordt gescheiden door twee reeds bevroren lagen (zie figuur 2.17).



Figuur 2.17: Het bevroren van tussenlagen kan leiden tot afschilfering [5]

- Als bij verdere temperatuurdaling de niet bevroren laag uiteindelijk ook bevroert vindt het water geen expansieruimte meer en wordt de bovenste betonlaag afgedrukt. Dit verschijnsel noemt met 'scaling' of 'afschilfering'.

Het gebruik van dooizouten in combinatie met vorst-dooicycli intensificeert eigenlijk de vorstbelasting op het beton [33].

Hoofdstuk 3

Herstellen van scheuren in beton

3.1 Inleiding

Er bestaat een heel gamma aan verschillende producten om scheuren in beton te herstellen. In de eerste plaats is de aangewezen herstelmethode afhankelijk van de gevolgen van de beschadiging op de constructie. Volgens [34] kan de volgende indeling gemaakt worden:

- constructieve herstellingen: dit is het geval wanneer belangrijke dragende elementen van de constructie beschadigd zijn. Herstel is in dit geval nodig om het draagvermogen van de constructie te herstellen.
- duurzaamheidsherstellingen: hierbij worden beschadigingen hersteld die enkel invloed hebben op het draagvermogen van de constructie op lange termijn.
- esthetische herstellingen: bij deze vorm van herstelling wordt schade hersteld die als onesthetisch worden ervaren maar die geen invloed heeft op de draagkracht van de constructie.

Een belangrijke factor bij het herstellen van betonnen elementen is de hechting tussen het beton en het gebruikte herstel materiaal [35]. Een belangrijke rol is hierin weggelegd voor de thermische uitzettingscoëfficiënt van de gebruikte materialen. Een te groot verschil tussen de thermische uitzettingscoëfficiënt van het beton en het materiaal waarmee de herstelling is uitgevoerd zal immers aanleiding geven tot spanningen tussen beide in het geval van temperatuurschommelingen.

3.2 Traditionele herstellingsmethodes

In [34] wordt een overzicht gegeven van verschillende herstellmethodes:

- Traditionele zand-cementmortels: deze vorm van reparatie wordt gebruikt om kleine herstellingen uit te voeren. Er wordt een laagje met dikte 25-30 mm op het beton aangebracht. Het nadeel van deze oplossing is dat er een aantal regels moeten nagevolgd worden om een duurzame herstelling te bekomen. Het gevaar bestaat dus dat er een onvoldoende hechtsterkte is tussen het beton en de herstellmortel.
- polymeer gemodificeerde zand-cementmortel: het voordeel van deze oplossing tegenover de voorgaande is dat er een hogere hechtsterkte bereikt kan worden. De porositeit van deze mortels is ook lager dan bij de traditionele zand-cementmortels. Als polymeer worden meestal synthetische latexen gebruikt.
- kunstharsmortels: deze oplossing heeft als voordelen dat ze zeer goed bestand is tegen aanvallen van agressieve stoffen en dat ook bij dunne laagdiktes de doorlatendheid voor lucht en water zeer klein is. Bij kunstharsmortels worden als bindmiddel vooral epoxyharsen, acrylaten en polyurethanen gebruikt. Het nadeel van deze oplossing is het verschil in thermische uitzettingscoëfficiënt tussen de betonnen ondergrond en de kunstharsmortels.

In Tabel 3.1 worden verschillende eigenschappen van epoxymortel- en beton vergeleken met deze van mortel of beton op basis van cement.

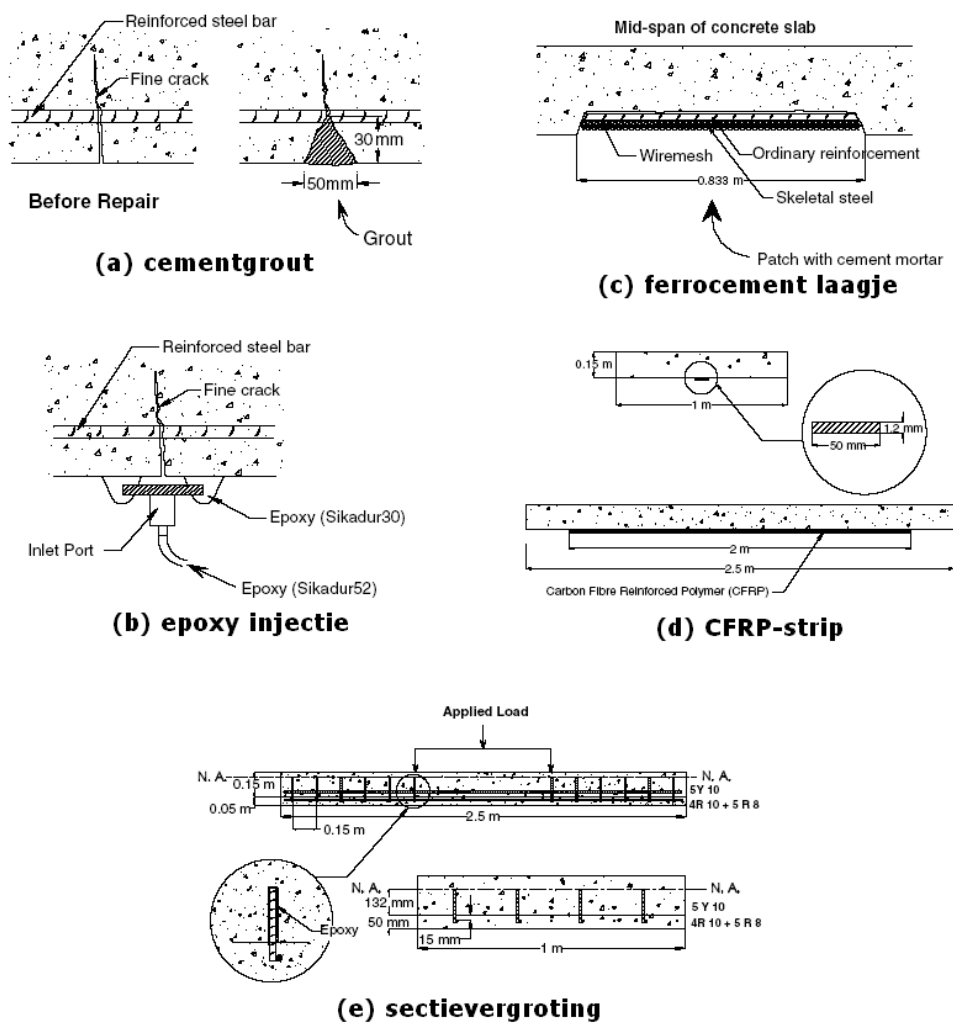
Tabel 3.1: Vergelijking van verschillende eigenschappen tussen epoxy en beton

Eigenschap		Epoxymortels- en betons	Mortel of beton op basis van cement
Druksterkte	[N/mm ²]	55 - 110	20 - 70
E-modulus	[kN/mm ²]	0,5 - 25	25 - 40
Buigtreksterkte	[N/mm ²]	25 - 50	2 - 5
Treksterkte	[N/mm ²]	9 - 20	1,5 - 4,5
Breukrek	[%]	0 - 15	verwaarloosbaar
Thermische uitzettingscoëfficiënt	[per K]	25 - 30	9 - 12
Volumemassa	[kg/m ³]	700 - 2100	2100 - 2400
Maximum omgevingstemperatuur waarbij verhardig optreedt [°C]		40 - 80	300 en meer af- hankelijk van de samenstelling
Tijdsduur om 80% van de uiteindelijke sterkte te ontwikkelen bij 20°C		48h	48h

n [36] werden vijf verschillende methodes om scheuren in een betonnen plaat te herstellen onderzocht:

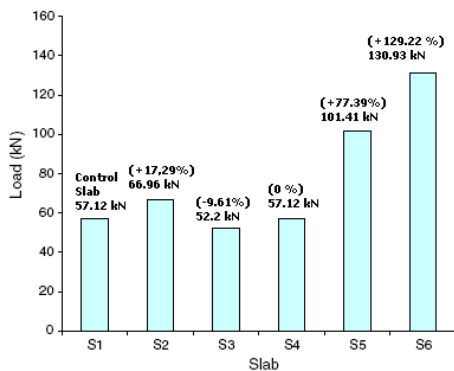
1. koolstofvezelversterkte polymeren
2. cementgrout: SikaGrout214
3. epoxy injectie: SikaDur52
4. laagje ferrocement
5. sectievergroting

Figuur 3.1 toont de verschillende herstelmethodes toegepast op een gescheurde betonnenplaat waarin wapening aanwezig is.



Figuur 3.1: Verschillende herstelmethodes

Het doel van de herstelling was om het draagvermogen van de originele doorsnede te herstellen en eventueel te verhogen. In Figuur 3.2 wordt de bezwijkbelasting van de plaat voorgesteld.



Figuur 3.2: Vergelijking van de bezwijkbelasting van de onbehandelde plaat (S1) met de herstellende plaat: grout (S2), epoxy (S3), ferrocementlaag (S4), CFRP-strip (S5), sectievergroting (S6).

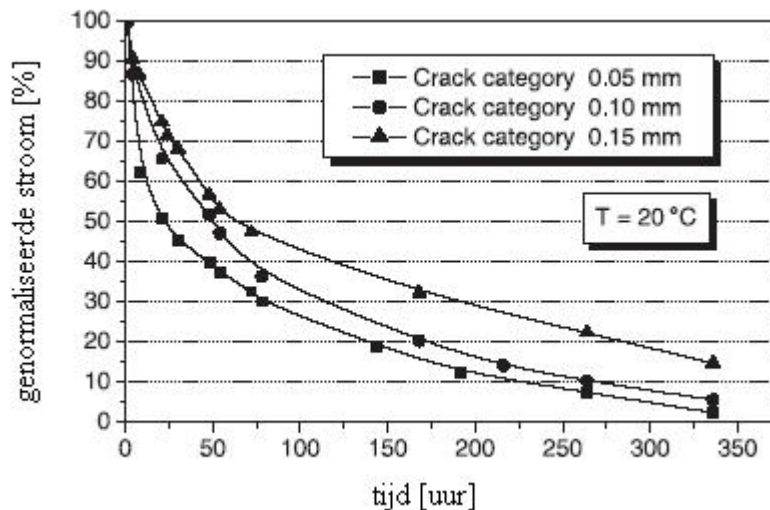
Uit Figuur 3.2 blijkt dat de bezwijkbelasting van de herstellende plaat bijna voor elke herstelling de bezwijkbelasting van de controle plaat overschrijdt. Enkel de herstelling door middel van epoxy injectie heeft een lagere bezwijkbelasting (9,61 %).

3.3 Zelfheling

Bij „autogenous healing” (of ”self-healing”) neemt de scheurwijdte geleidelijk af tot ze in sommige gevallen volledig verdwijnt ten gevolge van gecompliceerde fysische en chemische processen. Vooral ettringiet, bruciet ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) en calciëet (CaCO_3) blijken zich af te zetten op het scheuroppervlak [37].

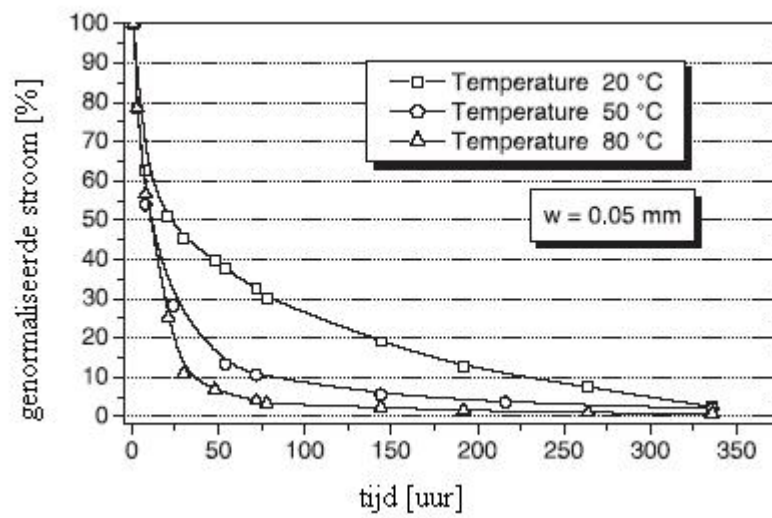
Het proces kan ook kunstmatig versneld worden door gebruik te maken van een elektrische stroom [38]. De anode wordt hierbij in een zoutoplossing geplaatst terwijl de wapening dienst doet als kathode. Als gevolg hiervan migreren Ca^{2+} en Mg^{2+} ionen naar het beton. Deze ionen precipiteren op het betonoppervlak als CaCO_3 en $\text{Mg}(\text{OH})_2$. De precipitatie vindt vooral plaats in de scheuren aangezien daar de stroomdichtheid hoger is omwille van de lagere elektrische weerstand. De adhesie van deze afzettingen en het betonoppervlak blijkt van dezelfde grootteorde te zijn als de treksterkte van beton.

De invloed van self-healing blijkt uit figuur [39]. Hierin is te zien dat de waterdoorlatendheid van gescheurd beton afneemt in functie van de tijd.



Figuur 3.3: Afname van de waterdoorlatendheid in de tijd t.g.v. self-healing [39].

De temperatuur speelt een belangrijke rol in dit proces, uit hetzelfde onderzoek blijkt dat het proces van selfhealing sneller verloopt bij een hogere temperatuur (Figuur 3.3).



Figuur 3.4: Invloed van de temperatuur op de afname van de waterdoorlatendheid t.g.v. self-healing [39].

Hoofdstuk 4

Biodepositie

4.1 Inleiding

Het proces waarbij micro-organismen calciumcarbonaat precipiteren wordt biodepositie genoemd. Er zijn 4 factoren die een belangrijke rol spelen bij calciumcarbonaatprecipitatie:

- de calciumionen (Ca^{2+}) concentratie
- de concentratie opgeloste anorganische koolstof
- de zuurtegraad (pH waarde)
- de aanwezigheid van mogelijke nucleatiekernen.

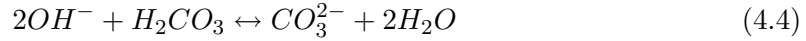
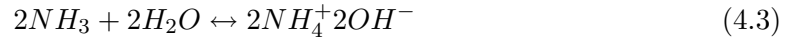
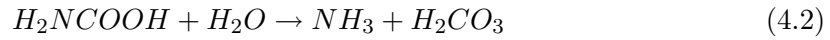
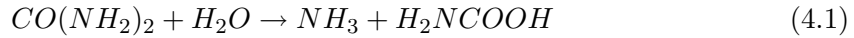
Het proces kan voorkomen in zeewater, zoetwater en in de bodem. De negatief geladen celwand van de bacteriën trekt de positieve calciumionen (Ca^{2+}) aan, de micro-organismen kunnen dus als kristalnucleatiekernen dienen en zijn in staat om de nodige energie voor nucleusvorming te verlagen [40]. De kristalnucleatie wordt ook beïnvloed door de micro-omgeving van de cel. De bacteriën worden omgeven door een dun waterig laagje dat fysisch een micro-omgeving vormt. De concentratie aan protonen (pH), opgeloste anorganische koolstof en Ca^{2+} -ionen kan verschillend zijn in de cel en in het milieu. Samen met de negatieve celwand vormt het waterlaagje een uniek precipitatie-milieu op microschaal [41].

4.2 Geschiedenis

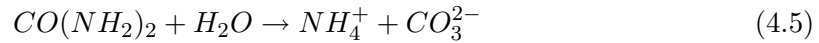
Op plaatsen waar steen wordt ontgonnen bemerkte men soms een beschermend laagje op het betonoppervlak. Het bleek om een calcielaagje te gaan dat ervoor zorgt dat de doorlatendheid aan het oppervlak afneemt en de oppervlaktehardheid toeneemt [42]. De tussenkomst van bacteriën bij het proces van biodepositie werd lange tijd onderkend. Men ging uit van de veronderstelling dat minerale zouten aan het steenoppervlak werden afgezet door evaporatie van water uit de onderliggende grond. Pas in 1912 werd door Drew de tussenkomst van bacteriën bij het proces opgemerkt [43]. Pas vanaf de jaren tachtig werd een verklaring gegeven voor het biologisch proces dat gekoppeld is aan het fysisch proces. Dit gebeurde door Castanier S. (1987). In 1989 werd een patent aangevraagd door de onderzoeksgroep rond J.P. Adolphe voor de productie van $CaCO_3$ in laboratoriumomstandigheden en met de hulp van specifieke bacteriën.

4.3 Principe

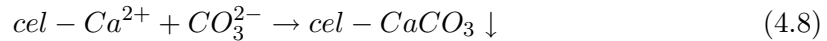
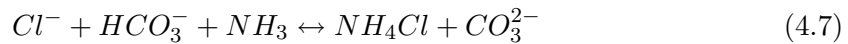
In het kader van dit eindwerk werden bacteriën behorend tot de *Bacillus sphaericus* stammen gebruikt. Deze heterotrofe organismen maken gebruik van het urease enzym als energiebron om ureum te hydrolyseren. Het ureum ($CO(NH_2)_2$) wordt afgebroken tot CO_2 en NH_3 . Deze producten komen vrij in het milieu waar ook de bacteriën zich bevinden. Het gevormde CO_2 reageert vervolgens met de OH^- -ionen met de vorming van carbonaat- en bicarbonaationen tot gevolg. Het NH_3 reageert met water waardoor ammonium wordt gevormd zodat een alkalisch micro-milieu rond de cel gecreeërd kan worden. Dit wordt voorgesteld in vergelijkingen 4.1 tot en met 4.4



Combinatie van voorgaande vier vergelijkingen heeft:



Ten gevolge van de negatieve celoppervlaktelading worden kationen waaronder Ca^{2+} vanuit de omgeving aangetrokken waarna de kationen op het celoppervlak worden vastgehouden. Bij het gebruik van een ureum- $CaCl_2$ medium kunnen biochemische reacties volgens vergelijkingen 4.6 t.e.m. 4.8 optreden. Tijdens deze reacties wordt $CaCO_3$ neergeslaan op het celoppervlak



Zowel door de hydrolyse van ureum als door de celrespiratie van de bacteriën wordt CO_2 gevormd. Het opgeloste CO_2 , onder de vorm van CO_3^{2-} of HCO_3^- , slaat deels neer als component van $CaCO_3$. Ze dient echter ook als buffer om de stijging van de pH ten gevolge van ammonium productie te vertragen [44].

Het gebruik van $CaCl_2$ als medium heeft als nadeel de aanwezigheid van chloride-ionen die aanleiding geven tot chloridegeïnduceerde corrosie.

4.4 Toepassing op beton

De technologie van biodepositie wordt reeds gebruikt om zandkolommen en graniet [45] te verdichten. De grootste hindernis die moet worden overwonnen om deze techniek ook op beton toe te passen is het beperken van de pH-waarde in het beton. De optimale pH-waarde voor de groei van de bacteriën ligt rond 9 terwijl het beton sterker basisch is. Een oplossing voor dit probleem is het immobiliseren van de bacteriën in een poly-urethaan (PU) matrix [46].

Inorganische structuren waarin biologische elementen zijn ingebed komen vaak in de natuur voor. De structuur kan bestaan uit macromoleculen en ook volledige bacteriële cellen kunnen ingebed worden in de inorganische matrices.

Het kan zeer voordelig zijn om de eigenschappen van een synthetische inorganische matrix te combineren met de eigenschappen van een biocomponent. De ontstane materialen worden biocers genoemd. Het zijn nanocomposieten die bestaan uit een keramische matrix waarin biologische elementen zijn ingebed. De biologische elementen kunnen zowel enzymen als bacteriën zijn. De bacteriën kunnen zowel onder de vorm van sporen als actieve cellen in de biocer bestaan.

De biologische componenten in de matrix zijn gevoelig aan extreme pH- en temperatuurwaarden. Bij de bereiding van biocers dient extra aandacht besteed te worden aan: lage temperaturen, neutrale waterige oplossingen, zachte verhardings- en drogingsprocessen. Silicaat- en metaal-oxide nanosols voldoen aan deze voorwaarden. Mengsels van deze nanosols met bacteriën verharden door een gel te vormen bij kamertemperatuur. Ze leveren een zeer goede mechanische, thermische en fotochemische stabiliteit. Deze nanosols zijn toxicologisch en biologisch inert en vormen geen voedingsbron voor de micro-organismen.

De porositeit van de biocers vormt een zeer belangrijke eigenschap met betrekking tot het groeien en overleven van de bacteriën in de matrix. Microbiële cellen worden vaak irreversibel geïmmobiliseerd in de silica-gel waardoor ze slechts gedurende een beperkte tijd kunnen groeien en overleven (behalve sporen). Een voldoende hoeveelheid macroscopische poriën is dus noodzakelijk om de germinatie van sporen en de kolonisatie van de biocer toe te laten. De verdeling en de grootte van de macroscopische poriën bepaalt de snelheid van het transport van nutriënten en reagentia.

Day et al. (2002) deden onderzoek naar het dichten van scheuren in beton door middel van biomortels. Uit de resultaten blijkt dat er goede CaCO_3 precipitatie is dicht bij het oppervlak van de behandelde scheuren. Volgens de auteur is de vermindering van CaCO_3 precipitatie in de diepte te wijten aan een gebrek aan zuurstof. *S. pasteurii* is facultatief anaeroob en groeit beter in aanwezigheid van zuurstof (Sneath, 1986). De beste resultaten werden bekomen met bacteriën die geïmmobiliseerd werden in polyurethaanschuim.

Er is geen merkbare toename van de treksterkte en de elasticiteitsmodulus van het PU schuim. Dit wijst er mogelijk op dat er vooral een opvulling van de poriënruimte heeft plaatsgevonden zonder een chemische binding van CaCO_3 met het PU schuim. Om de negatieve effecten van het urea- CaCl_2 medium op het beton te verminderen werd gedu-

rende de behandelingstijd van 28 dagen om de twee dagen vers medium aangebracht in plaats van het proefstuk onder te dompelen in het medium gedurende 28 dagen.

Hoofdstuk 5

Doelstelling

Om scheuren in beton te herstellen is er een hele reeks van traditionele herstelproducten op de markt. Elk product heeft zijn voor- en nadelen. Een vaak voorkomend negatief effect is de ecologische impact. Daarom wordt er tegenwoordig ook gezocht naar meer duurzame herstelmethodes. Een mogelijk alternatief is het aanwenden van bacteriële calciumcarbonaat precipitatie (biodepositie).

In het eerste luik van dit eindwerk werd deze biodepositie methode aangewend om scheuren in beton te dichten. Uit preliminair onderzoek naar de mogelijkheid om biodepositie op beton toe te passen bleek dat de hoge pH-waarde van het poriënwater een belangrijke hindernis was. Hierdoor was het zeer moeilijk voor de bacteriën om in deze omgeving te overleven. Om dit probleem te omzeilen werd in dit eindwerk gebruik gemaakt van een immobilisatietechniek op basis van sol-gel. In een vergelijkende studie werd de efficiëntie van de scheurdichting door biodepositie en traditionele methoden onderzocht aan de hand van waterdoorlatendheids- en chloridenindringing proeven.

In het tweede luik van dit eindwerk werd het gebruik van de biodepositie als oppervlaktebehandeling onderzocht. Om het gebruik van biodepositie als oppervlaktebehandeling te beoordelen werd de vorstweerstand van de behandelde proefstukken onderzocht.

Uit preliminair onderzoek bleek dat positieve resultaten behaald werden met een behandeling die calciumchloride als calciumbron bevatte. Het gebruik van $CaCl_2$ kan echter door de aanwezigheid van chloride-ionen een negatieve invloed hebben op de aanwezige betonwapening. Dit werd onderzocht door de indringingsdiepte van de chloriden na de behandeling met $CaCl_2$ te bepalen. In het kader van dit onderzoek werd het gebruik van $Ca(NO_3)_2$ als alternatieve calciumbron onderzocht.

Deel II

Materialen en methodes

Hoofdstuk 1

Materialen

1.1 Proefstukken

1.1.1 Betonproefstukken

In het kader van dit eindwerk rond scheurherstel werd gebruik gemaakt van betonproefstukken. Er werden in totaal vier mengsels met dezelfde samenstelling aangemaakt. Er werd gebruik gemaakt van een portlandcement (CEM I 52,5 N) dat conform was aan de norm NBN B12-001 (1993). De samenstelling van het beton is in Tabel 1.1 vermeld.

Tabel 1.1: Overzicht samenstelling betonproefstukken

Materialen	Volume [kg/m ³]
Zand 0/4	670
Granulaten 8/16	790
Granulaten 2/8	490
CEM I 52,5 N	300
Water	150

De druksterkte werd bepaald op 12 betonkubussen (3 proefstukken uit elk mengsel) met een zijde van 150 mm en bedroeg gemiddeld 55,2 N/mm². De standaard afwijking op dit gemiddelde bedroeg 2,19 N/mm².

De mengelingen werden aangemaakt op volgende manier: eerst werden alle droge materialen in de mixer gegoten en gedurende 1 minuut gemengd. Daarna werd water toegevoegd en werd het geheel gedurende 4 minuten gemengd. Vervolgens werd het beton in de bekistingen (150 mm x 150 mm x 150 mm, 150 mm x 150 mm x 600 mm en 160 mm x 160 mm x 70 mm) aangebracht en door middel van een trilnaald verdicht. Daarna werden de proefstukken in een geklimatiseerde ruimte ($90 \pm 10\%$ R.V. en $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$) geplaatst voor een periode van 24 ± 1 uur. Na het ontkisten werden de elementen gedurende minstens 27 dagen in dezelfde geklimatiseerde ruimte bewaard.

1.1.2 Mortelproefstukken

In het luik van dit eindwerk rond oppervlaktebehandelingen werd gebruik gemaakt van mortelproefstukken met verschillende w/c-factoren: 0,5; 0,6 en 0,7. Een lage w/c-factor heeft een lage porositeit van de mortel en dus een duurzame mortel tot gevolg.

Tabel 1.2 toont de mortelsamenstellingen, de gemiddelde druksterkte en de standaardafwijking op de gemiddelde druksterkte na 28 dagen. De gemiddelde druksterkte werd per w/c-factor bepaald volgens de norm NBN B15-220 (1990) op 3 mortelkubussen met een zijde van 100 mm.

Tabel 1.2: Overzicht samenstelling en druksterkte mortelproefstukken

w/c-factor	Bestanddelen [kg/m ³]			Druksterkte na 28 dagen [N/mm ²]
	Water	Cement	Zand	
0,5	256	512	256	50,3 ± 3,96
0,6	292	487	292	48,5 ± 3,40
0,7	325	464	325	41,6 ± 3,91

Er werd gebruik gemaakt van een portlandcement (CEM I 52,5 N) die conform was aan de norm NBN B12-001 (1993). Dit cement was samengesteld uit 95 - 100 % klinker en daarnaast 0 - 5 % andere door de fabrikant gekozen bestanddelen.

De mortel werd aangemaakt in een tegenstroommenger van 50 l. Eerst werden het zand en het cement gedurende 1 minuut gemengd. Daarna werd het water toegevoegd en werd het geheel gedurende 3 minuten gemengd. De mortel werd in de bekistingen (1200 mm x 700 mm x 50 mm) aangebracht en gedurende 2 minuten op de triltafel geplaatst. Vervolgens werden de proefstukken in een geklimatiseerde ruimte ($90 \pm 10\%$ R.V. en $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$) geplaatst voor een periode van 24 ± 1 uur. Na het ontkisten werden de elementen gedurende 27 dagen onder water bewaard. Voor de behandeling werden de elementen nog 2 weken in een geklimatiseerde ruimte ($RV = 60 \pm 10\%$ en $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$) bewaard.

Hoofdstuk 2

Methodes

2.1 Biodepositie als middel om scheuren te dichten

2.1.1 Aanbrengen scheuren

In het kader van dit eindwerk werden betonproefstukken met 2 verschillende soorten scheuren vervaardigd: gestandaardiseerde en niet-gestandaardiseerde scheuren.

Gestandaardiseerde scheuren

Voor het aanbrengen van gestandaardiseerde scheuren werd gebruik gemaakt van de methode die ontwikkeld werd door prof. dr. ir. Geert De Schutter (Labo Magnel). Bij dit type van scheuren werd gebruik gemaakt van proefstukken met volgende afmetingen: 160 mm x 160 mm x 70 mm. Met behulp van een koperen plaatje met een dikte van 0,3 mm werd een 1 of 2 cm diepe scheur in het vers beton gemaakt. Na 24 uur werd het plaatje tijdens het ontkisten uit het beton gehaald.

Niet-gestandaardiseerde scheuren

Voor het aanbrengen van niet-gestandaardiseerde scheuren werd gebruik gemaakt van de methode die ontwikkeld werd door dr. ir. Katrien Audenaert (Labo Magnel). Deze methode maakt gebruik van splijtproeven op met glasvezel omwikkelde cilinders.

Hiervoor werden uit betonkubussen met zijde 150 mm cilinders met een diameter van 100 mm geboord. Deze cilinders werden vervolgens bedekt met plakband. Nadien werd het glasvezel wapeningsnet met behulp van epoxy (2-componentenhars PC 5800) op de met plakband bedekte betoncilinders aangebracht. Dit plakband had tot doel contact tussen de epoxy en het beton te vermijden, zodat na verwijdering van de wapening, 'gave' proefstukken werden bekomen. Op de behandelde cilinders werd uiteindelijk een splijtproef (proefmachine: Amsler 100 D66/45 met een veer van 200 kN) uitgevoerd tot een scheur met het blote oog zichtbaar was (Figuur 2.1). Dit ging steeds gepaard met een terugval van de belasting. De gescheurde cilinder werd vervolgens in drie cilinders met hoogte 50 mm verzaagd. Nadien werd de wapening en de plakband verwijderd.

Deze methode had echter als nadeel dat een groot gedeelte van de aldus bekomen cilinders (hoogte 50 mm) geen zichtbare scheur(en) vertoonden.

Om dit te omzeilen werden de cilinders na het aanbrengen van de glasvezelwapening verzaagd tot 3 cilinders met hoogte 50 mm. Vervolgens werd de splijtproef op deze kleinere cilinders uitgevoerd. Deze proefmethode resulteerde echter in proefstukken met scheuren van heel uiteenlopende breedte.

Bij de voorbereiding van de proefstukken voor de waterdoorlatendheidstesten werd een bijkomende optimalisatie uitgevoerd. De proefstukken voor deze test dienden volgende afmetingen te hebben: hoogte 20 mm en diameter 80 mm. Om de scheurbreedte binnen 3 proefstukken van een reeks zo gelijkaardig mogelijk te hebben, werden cilinders (diameter 80 mm) uit de betonkubussen van 150 mm geboord. Deze werden vervolgens in 2 cilinders met hoogte 75 mm verzaagd. Deze werden dan omwikkeld met glasvezel zoals hierboven beschreven. Vervolgens werden de cilinders aan een splijtproef onderworpen. De beperkte hoogte van het proefstuk zou normalerwijze moeten resulteren in een scheur met een gestandaardiseerde lengte over het ganse proefstuk. Na de splijtproef werden uit deze cilinders 3 proefstukken met hoogte 20 mm gezaagd.



Figuur 2.1: Splijtproef op een cilinder uit beton om een niet-gestandaardiseerde scheur te verkrijgen

Voor beide diameters werden uiteindelijk enkel proefstukken met een zichtbare scheur op het zaagvlak behouden.

2.1.2 Herstelmethodes

Om het effect van de biodepositie op de scheurdichting te kunnen beoordelen, werd een vergelijkende studie uitgevoerd waarbij biodepositie en traditionele herstellmethoden werden gebruikt.

In Tabel 2.1 wordt een overzicht gegeven van de gebruikte traditionele herstellmaterialen en biodepositiebehandelingen. In de rechterkolom wordt de naam die in het vervolg van dit werk wordt gebruikt weergegeven.

Tabel 2.1: Overzicht van de samenstelling van de gebruikte herstellmaterialen en hun bijhorende naam

Type	Samenstelling herstellmateriaal	Naam
Traditioneel	sikadur-52 sikadur-111	epoxy grout
Niet-traditioneel	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$ + ureum <i>Bacillus sphaericus</i> + $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ + ureum <i>Bacillus sphaericus</i> geïmmobiliseerd in sol-gel + $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ + ureum <i>Bacillus sphaericus</i> geïmmobiliseerd in sol-gel + $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ + ureum sol-gel sol-gel met na verharding toevoeging van <i>Bacillus sphaericus</i> + $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ + ureum	medium BS + $CaCl_2$ BS in sol-gel + $CaCl_2$ BS in sol-gel + $Ca(NO_3)_2$ sol-gel sol-gel + BS + $CaCl_2$

2.1.2.1 Traditionele methodes

Twee traditionele herstellmaterialen werden in het kader van deze thesis gebruikt.

- Sikadur-52, dit is een 2-componenten epoxy injectiehars zonder oplosmiddelen.
- SikaTop-111, dit is een 2-componenten cementgebonden mortel.

De proefstukken werden telkens behandeld volgens de technische fiche van het product. De voorbereiding van de proefstukken bestond eruit de ondergrond stofvrij en voldoende droog te maken met behulp van een zachte borstel. De epoxy werd aangebracht door middel van een injectiespuit nadat aan weerszijden van de scheur op een afstand van ongeveer 0,5 cm plakband werd aangebracht. De grout werd aangebracht met behulp van een spatel. Ook hier werd naast de scheur, op een afstand van ongeveer 0,5 cm, plakband aangebracht.

2.1.2.2 Biodepositiebehandelingen

De cultuurcollectie van het Laboratorium voor Microbiële Ecologie en Technologie (Lab-Met) van de Universiteit Gent beschikt over een aantal *Bacillus sphaericus* stammen. Deze

stammen werden geïsoleerd uit bodemstalen (tuin en stortplaats in de omgeving van Gent) en uit slib afkomstig van een 'ureolytische calcificatie reactor'. Op basis van hun morfologie werden 6 unieke stammen onderscheiden. De gezuiverde isolaten werden opgenomen in het BCCM in Gent, met volgnummer LMG 222 55 tot en met LMG 222 60. Aan de hand van een aantal parameters (snelheid van ureumafbraak, EPS productie, ...) werd stam LMG 222 57 geselecteerd voor de behandeling van de proefstukken.

In een groot gedeelte van het onderzoek naar bacteriële CaCO_3 precipitatie werd gebruik gemaakt van $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ als calciumbron. Het nadeel van deze bron is de aanwezigheid van Cl^- -ionen die het wapeningsstaal kunnen aantasten. Daarom werd in het kader van dit eindwerk het gebruik van $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ als alternatieve calciumbron onderzocht.

Om de bacteriën te beschermen tegen de hoge pH-waarden van het beton werd gebruik gemaakt van een immobilisatietechniek op basis van silica sol-gel. In het kader van dit eindwerk werd gebruik gemaakt van Levasil®200/30% (HCStarck) sol-gel.

De proefstukken werden al naar gelang hun afmetingen in afzonderlijke containers geplaatst. Er werd gebruik gemaakt van plastic staafjes, die parallel ten opzichte van de scheur werden geplaatst zodat de onderzijde van het proefstuk geen contact had met de container zelf. De onderzijde van het proefstuk werd behandeld door het vloeistofniveau in de container 1 cm hoger dan de onderzijde van het monster te brengen.

BS + CaCl_2 of medium

Bij deze behandeling werden de proefstukken gedurende 24 u in een overnacht gegroeide *Bacillus sphaericus* cultuur (groeimedium: 20 g/L yeast extract en 20 g/L ureum) geplaatst. Daarna werd het proefstuk voorzichtig afgedept met absorberend papier zodat de ureolytische activiteit hoofdzakelijk afkomstig was van de cellen in de scheur. Vervolgens werd het proefstuk gedurende drie dagen in een oplossing met equimolaire concentraties aan ureum en $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ geplaatst (20 g/L ureum, 49 g/L $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ of 78 g/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Bij de behandeling met medium werd enkel deze tweede stap toegepast.

BS in sol-gel + CaCl_2 of BS in sol-gel + $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

Voor de sol-gel immobilisatie van bacteriën werd 50 mL van een overnacht gegroeide cultuur gecentrifugeerd bij 4°C en 7000 rpm. Vervolgens werd de resulterende pellet gesuspenseerd in een oplossing bestaande uit 10 ml gedemineraliseerd water en 40 ml sol-gel (Levasil 200/30%). Na toevoeging van 1,2 g NaCl werd de oplossing gedurende 30 sec geschud met behulp van een vortex toestel. De op deze manier verkregen suspensie werd vervolgens met behulp van een 50 ml spuit aangebracht in de scheuren van de betonnen proefstukken. Na een 5-tal minuten drogen werd een nieuwe suspensielaag aangebracht. Dit proces werd herhaald tot de volledige scheur gedicht was. Nadat de aangebrachte suspensie een gel gevormd had, werden de behandelde proefstukken ondergedompeld in een calciumhoudend medium zoals beschreven in voorgaande paragraaf.

Sol-gel

De proefstukken werden gedurende 20 minuten ondergedompeld in de silica sol (Levasil 200/30%), waarna ze gedurende 24 uren gedroogd werden bij kamertemperatuur. Deze procedure werd 3 maal herhaald.

Sol-gel + BS + CaCl_2

De proefstukken werden eerst behandeld volgens de procedure beschreven in voorgaande paragraaf (Sol-gel). Nadien werden de proefstukken behandeld volgens de procedure beschreven in de paragraaf over de bacteriële reinculturen (BS + CaCl_2).

2.1.3 Microscopisch onderzoek

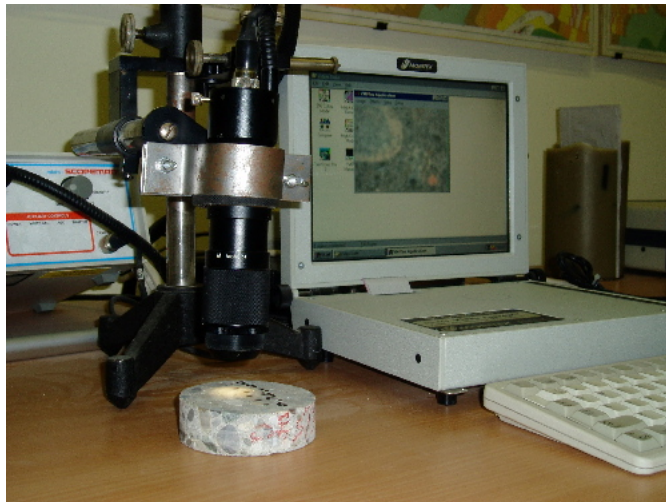
Om de scheurbreedte van de niet-gestandaardiseerde scheuren te begroten werd gebruik gemaakt van een scheurmicroscoop (Figuur 2.2). De scheurbreedte kon zo op 0,02 mm nauwkeurig bepaald worden.



Figuur 2.2: Gebruik van de scheurmicroscoop om de scheurbreedte van de niet gestandaardiseerde scheur op te meten

De scheurbreedte van de proefstukken met een diameter van 100 mm en 80 mm werd respectievelijk op 5 en 6 verschillende plaatsen, gelijkmatig verdeeld over de scheurlengte, opgemeten.

Om het effect van de herstelmethode visueel vast te stellen werd gebruik gemaakt van een microscoop (Moritex MS-500B) gekoppeld aan een computer (Figuur 2.3). Hiermee was het mogelijk digitale opnames van de scheurdichting te maken.



Figuur 2.3: Microscoop (Moritex MS-500B) gekoppeld aan een pc om de scheurdichting visueel vast te stellen

2.1.4 Ultrasoon onderzoek

Proefmethode

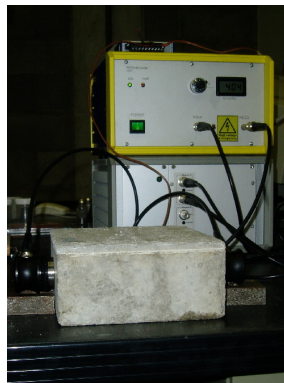
Deze proef had tot doel het effect van de scheurdiepte en van de behandeling van de scheur op de voortplanting van golven door het beton te bepalen. Dit zou een idee over de mate van opvulling van de scheur moeten geven. Deze methode steunt op het feit dat de golfsnelheid afhankelijk is van het medium waardoor de golven zich verplaatsen [47]. De golfsnelheid is ook afhankelijk van het watergehalte in het beton en de verdeling van het aanwezige water over het proefstuk [47]. Er werd gebruik gemaakt van de *Freshcon* 2.40, dit toestel werd ontwikkeld aan de Universiteit van Stuttgart.

Proefstukken

De elementen die werden gebruikt waren betonprisma's met volgende afmetingen: 160 mm x 160 mm x 70 mm. In alle proefstukken werd een standaardscheur van 1 of 2 cm diep over de volledige breedte van het proefstuk aangebracht (zoals beschreven in Paragraaf 2.1.1.). Per behandeling en per scheurdiepte werden telkens drie monsters beproefd.

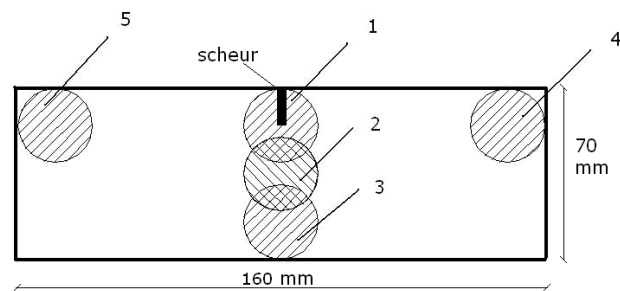
Proefopstelling

Op een zijde evenwijdig met de scheur werd de zender geplaatst (Piezomechanik HVP 1000-50). Deze zender genereerde de pulsen. Op de tegenoverliggende zijde, recht tegenover de zender, werd de ontvanger geplaatst (Panametrics V 601). De opstelling gebruikt in het kader van dit eindwerk wordt getoond in Figuur 2.4.



Figuur 2.4: Opstelling van de ultrasoon meting met aan de ene zijde van het proefstuk de zender en aan de andere zijde de ontvanger

Per monster werden 5 metingen uitgevoerd (Figuur 2.5).



Figuur 2.5: Vijf verschillende meetpunten op het betonprisma waar de ultrasoonmeting werd uitgevoerd

Resultaat

Door de tijd op te meten die de golven nodig hadden om zich door het beton te verplaatsen berekende de *Freshcon* software de golfsnelheid. Door de opgemeten golfsnelheden voor en na de behandeling op te meten kon het effect van de behandeling worden nagegaan. Door de golfsnelheden te vergelijken met onbehandelde proefstukken met een verschillende scheurdiepte kon het effect van de scheurdiepte bepaald worden.

2.1.5 Waterdoorlatendheid

In eerste instantie werd de efficiëntie van de scheurherstmethode onderzocht door middel van waterdoorlatendheidstesten op behandelde en onbehandelde proefstukken.

Proefmethode

Door aan de bovenzijde van het proefstuk een waterdruk te genereren door middel van een waterkolom en de daling van deze waterkolom te volgen in de tijd kon de waterdoorlatendheidscoëfficiënt bepaald worden.

Proefstukken

De gebruikte proefstukken waren cilindervormig met een diameter van 80 mm en een hoogte van 20 mm. In de monsters werd een niet gestandaardiseerde scheur aangebracht (zoals beschreven in Paragraaf 2.1.1). Per behandeling werden drie proefstukken onderzocht.

Vorbereiding proefstuk

De schijfjes werden aan de boven- en onderkant afgedicht met behulp van plakband, op de zijkanten werd aan de boven- en onderkant over een hoogte van ongeveer 0,5 cm plakband aangebracht. Daarna werden de elementen in een PVC-ring gekleefd met behulp van epoxyhars.

De tape voorkwam dat er epoxyhars op het boven- of ondervlak van het proefstuk terecht zou komen. Voor de aanvang van de proef werd de plakband aan de boven- en onderzijde verwijderd. Figuur 2.6 toont een ingekleefd proefstuk.

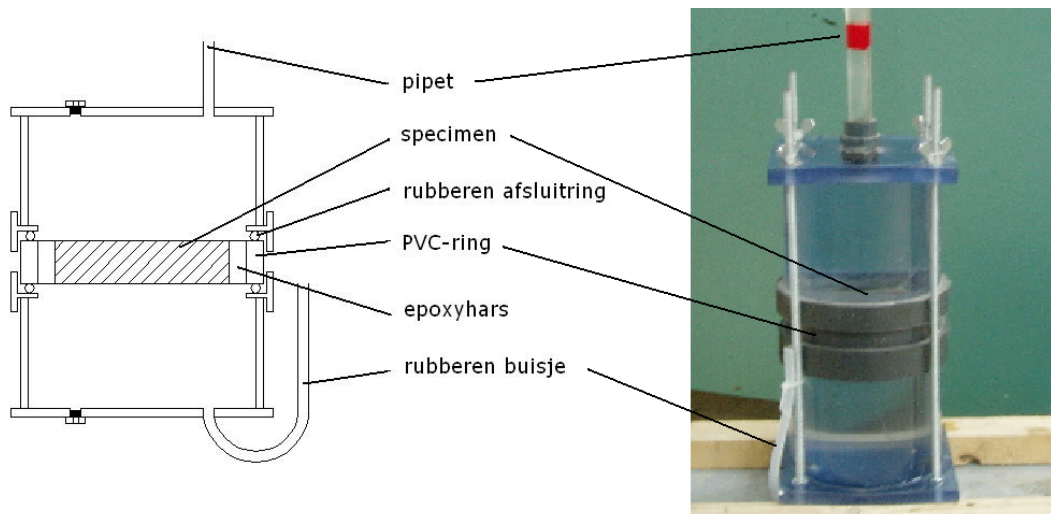


Figuur 2.6: Proefstuk met behulp van epoxyhars ingekleefd in een PVC-ring

Net voor het opstarten van de proef werden de proefstukken vacuüm verzadigd in gedemineraliseerd water volgens NBN B05-202 [48].

Proefopstelling

Figuur 2.7 toont het waterdoorlatendheidstoestel dat in het kader van dit eindwerk werd gebruikt. De opstelling is gebaseerd op het onderzoek van Aldea [49].



Figuur 2.7: Opstelling waterdoorlatendheidsproef

Het proefstuk werd boven en onder ingesloten door een cilindervormig compartiment. Om een waterdichte afdichting te verkrijgen werd tussen de buis uit plexiglas en het proefstuk een rubberen afdichtingsring geplaatst. Aan de andere uiteinden van de buis werden vierkante afdekplaten geplaatst. Op de hoekpunten van deze afdekplaten werden draadstangen met vleugelmoeren geplaatst om het geheel samen te drukken. Elke afsluitplaat bevatte twee geboorde openingen die afgesloten kunnen worden met een afsluitdop.

De waterdoorlatendheid van het proefstuk werd bepaald door 1 dop aan de onderkant en 1 dop aan de bovenkant te verwijderen. In de opening in de bovenste afsluitplaat werd een glazen pipet met een binnendiameter van 10 mm geplaatst. Er werd een strook millimeter papier aangebracht om de waterdaling in de tijd op te volgen. De bovenkant van het pipet werd afgedekt om verdamping tegen te gaan.

In de opening in de onderste afsluitplaat werd een rubberen buisje geplaatst. Dit buisje werd ter hoogte van de onderkant van het proefstuk afgeknipt. Het onderste compartiment en het buisje werden met water gevuld. Dit werd gedaan om uitdroging van het beton aan de onderkant van het proefstuk tegen te gaan. Het water zou anders niet enkel door waterdoorlatendheid maar ook door capillaire opzuiging het proefstuk binnendringen.

Resultaat

De waterdoorlatendheidscoëfficiënt kon door middel van volgende formule worden bepaald [49]:

$$k = \frac{a}{A} \frac{T}{t} \ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right) \quad (2.1)$$

met

- k: de waterdoorlatendheidscoëfficiënt [m/s]

- a: dwarsdoorsnede buis [m²]
- A: dwarsdoorsnede proefstuk [m²]
- T: dikte van het proefstuk in de stroomrichting [m]
- t: duur van de proef
- h₀ en h_f: respectievelijk de initiële en finale waterhoogte in de buis [m]

Het opgemeten doorstromingsdebiet door een niet-gestandaardiseerde scheur met gemiddelde scheurbreedte w werd vergeleken met het theoretisch debiet door een uniforme scheur met scheurbreedte w [49]:

$$q_{theoretisch} = \frac{gl}{12\nu t} w^3 \quad (2.2)$$

met

- $q_{theoretisch}$: theoretisch doorstromingsdebiet door een uniforme scheur [m³/s]
- g: gravitaire versnelling [m/s²]
- l: scheurlengte loodrecht op de stroomrichting (in dit geval diameter van het proefstuk) [m]
- ν : kinematische viscositeit [m²/s]
- Δh : verandering in waterhoogte [m]
- w: scheurbreedte (in dit geval gemiddelde scheurbreedte van de niet-gestandaardiseerde scheur) [m]

2.1.6 Chloridenindringing

De efficiëntie van de scheurherstelmehtode werd in tweede instantie onderzocht door de weerstand ten opzichte van chloridenindringing van behandelde en onbehandelde proefstukken te vergelijken.

Proefmethode

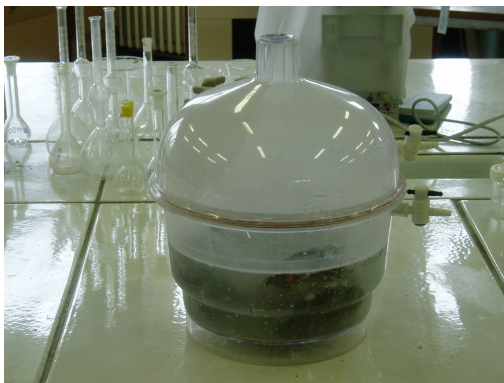
Er werd gebruik gemaakt van de migratietest van Tang ook wel *CTH Rapid Test* genoemd. Als resultaat werd een maat voor de weerstand tegen cloridenindringing gevonden.

Proefstukken

Er werd gebruik gemaakt van cilindervormige monsters met een diameter van 150 mm en een hoogte van ongeveer 50 mm. In de proefstukken werd ofwel een gestandaardiseerde ofwel een niet-gestandaardiseerde scheur aangebracht (zoals beschreven in Paragraaf 2.1.1). Daarnaast werden ook monsters zonder scheur beproefd.

Voorbereiding proefstuk

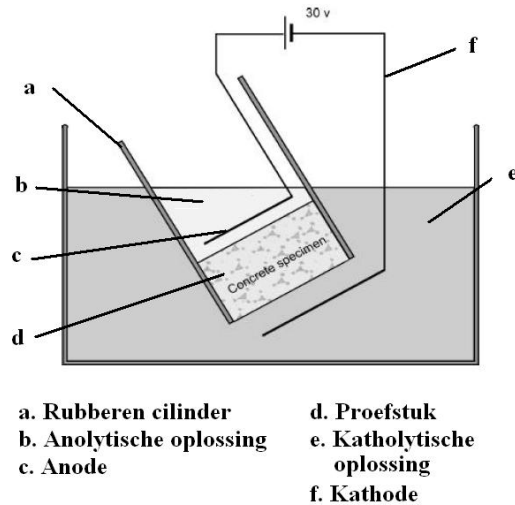
Voor de aanvang van de proef werden de proefstukken gedurende 3 uur vacuüm verzadigd met een verzadigde $Ca(OH)_2$ oplossing. Dit gebeurde door de absolute druk in een vacuüm klok te reduceren tot 1 - 5 kPa. Na deze behandeling van drie uur werd de atmosferische druk hersteld en bleven de monsters nog 18 uur in de oplossing ondergedompeld. Figuur 2.8 toont 3 ondergedompelde proefstukken in de vacuüm klok.



Figuur 2.8: Vacuüm klok met drie proefstukken ondergedompeld in een verzadigde $Ca(OH)_2$ oplossing

Proefopstelling

Figuur 2.9 toont de proefopstelling van de CTH Rapid Test.



Figuur 2.9: Proefopstelling CTH test

De onderkant van het proefstuk werd in contact gebracht met een katholytische oplossing, 100 g NaCl op 900 ml leidingwater. De bovenkant van het proefstuk stond in contact met de anolytische oplossing, een NaOH oplossing (12 g NaOH in 1 liter gedestilleerd water). Er werd een elektrisch veld over het proefstuk aangelegd volgens de bepaling in NT BUILD 492 (1999).

Na 2 uren werden de proefstukken uit het toestel genomen en axiaal gespleten en met een 0,1 M zilvernitraat oplossing besprenkeld. Na ongeveer 15 minuten werd een witte zilverchlorideneerslag zichtbaar en kon de chloridenindringingsdiepte bepaald worden.

Resultaat

De chloridenpenetratie loodrecht op het oppervlak en loodrecht op de scheur werd opgemeten. Uitgaande van deze metingen werd het effect van de behandeling op de chloridenindringing bepaald.

2.2 Biodepositie als oppervlaktebehandeling

2.2.1 Herstelmethode

Het gebruik van biodepositie als oppervlaktebehandeling werd beproefd op ongescheurde mortelproefstukken die behandeld waren met $BS + CaCl_2$. (zie paragraaf 2.1.2).

2.2.2 Indringingsdiepte van de bacteriën

Deze proef had tot doel het overleven en de indringingsdiepte van *Bacillus sphaericus* in mortelproefstukken te onderzoeken.

Proefmethode

Om de indringingsdiepte van de bacteriën in mortelproefstukken te bepalen werden boringen tot op verschillende dieptes uitgevoerd. De boringen werden uitgevoerd met behulp van de Profile Grinder (Germann instruments). Volgens de fabrikant wordt per kwartdraai van de boorkop 0,5 mm materiaal verwijderd. Om de nauwkeurigheid van de boring te verifiëren werd gebruik gemaakt van een optoNCDT 18000 laser gemonteerd op een automatisch lasersysteem (ALM). Het boorstof werd opgevangen en het aantal sporen in oplossing werd bepaald door uitplaten op platen met Bacillus-agar.

Proefstukken

Voor deze proef werden mortelcilinders met een diameter van 100 mm en een hoogte van 50 mm gebruikt. De monsters hadden een w/c-factor van 0,5 of 0,7. De proefstukken werden behandeld met $BS + CaCl_2$ (zie paragraaf 2.1.2.2).

Vorbereiding proefstuk

Het proefstuk werd op een PVC-plaatje gelijmd met behulp van 2 componentenlijm (Demotec).

Proefopstelling

Het proefstuk werd vastgeklemd in de Profile Grinder PF-1100 (Figuur 2.10).



Figuur 2.10: Inklemming van het proefstuk in de Profile Grinder PF-1000

Daarna werd het mortelproefstuk over een cirkelvormig oppervlak met een diameter van 80 mm tot op verschillende dieptes uitgeboord. Tabel 2.2 toont de verschillende ingestelde boordieptes voor elke boring.

Tabel 2.2: Ingestelde begin - en einddiepte van de verschillende boringen

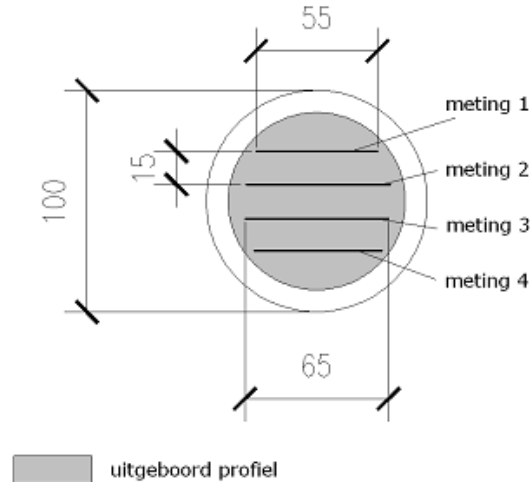
boring	diepte [mm]
1	0 - 0,5
2	0,5 - 1
3	1 - 1,5
4	1,5 - 2
5	2 - 3
6	3 - 5
7	5 - 10

Alle losgekomen materiaal werd uit het proefstuk gehaald en gewogen. Figuur 2.11 toont een proefstuk waarbij geboord werd tot een diepte van 10 mm.



Figuur 2.11: Proefstuk uitgeboord tot op een diepte van 10 mm

Om nauwkeurig de diepte van de boring te bepalen werd de hoogte van het proefstuk met een optoNCDT 1800 laser opgemeten. Per boring werd het profiel langsheen 4 lijnstukken bepaald. Figuur 2.12 toont de ligging van deze lijnstukken.



Figuur 2.12: Ligging van de lijnstukken waarlangs het profiel werd opgemeten

Eerst werd het oorspronkelijke oppervlak van het proefstuk opgemeten. Doorheen elke meting die op deze manier werd bekomen, werd een rechte trendlijn getekend. Per rechte werd voor 90 gelijkmatig verdeelde punten de hoogte bepaald gebruikmakend van de functie van de rechte. De op deze manier berekende hoogtes dienden als referentiehoogte voor de boringen. Per boring werd opnieuw een trendlijn door elk van de 4 lijnstukken getekend en de hoogte werd ook hier op 90 gelijkmatig verdeelde punten berekend met behulp van de functie van de trendlijn. De diepte per boring voor een welbepaalde lijnstuk werd bepaald door de gemiddelde afstand tussen de 90 berekende hoogtes van de boring en de 90 referentiehoogtes van het oppervlak. De diepte per boring werd berekend door het gemiddelde te nemen van de 4 berekende dieptes per lijnstuk.

Om de indringingsdiepte van de bacteriën te bepalen werd van elke uitgeboorde fractie ongeveer 1 gram opgelost in 10 ml fysiologische oplossing waaraan 50 mM L-alanine werd toegevoegd om de germinatie van de sporen te stimuleren. Dezelfde handelingen werden eveneens uitgevoerd met fysiologische oplossing waaraan naast L-alanine eveneens 10 mg/l Tween 80 werd toegevoegd om het scheiden van de sporen van de mortelpartikels te bevorderen. Vervolgens werd elk staal grondig geschud op een vortex toestel om de bacteriën in oplossing te brengen. Alle resterende (contaminante) levende cellen werden afgedood door de stalen 15 min tot 80°C te verhitten. Het aantal sporen in oplossing werd bepaald door uitplaten op platen met Bacillus-agar, indien nodig na het opstellen van een verdunningsreeks.

Resultaat

Per w/c-factor en per behandeling (BS + $CaCl_2$ of geen behandeling) werd 1 monster beproefd. Zo kon de diepte van het uitgeboorde materiaal op een nauwkeurige manier worden bepaald. De indringingsdiepte van de bacteriën in de op verschillende manieren behandelde proefstukken werd met elkaar vergeleken.

2.2.3 Chloridenindringing

Het doel van deze proef was na te gaan of de biodepositie behandeling met calciumchloride nefast kan zijn voor de wapening.

Proefmethode

Om de hoeveelheid vrije en gebonden chloriden te bepalen nadat het ongescheurde mortelproefstuk zich gedurende drie dagen tot een hoogte van 1 cm in een oplossing met equimolaire concentraties aan ureum en $CaCl_2$ had bevonden, werd gebruik gemaakt van de *Rapid Chloride Test* (RCT).

Proefstuk

Er werd gebruik van mortelcilinders met een diameter van 100 mm en een hoogte van 50 mm. De proefstukken hadden een w/c-factor van 0,5 en 0,7. Per w/c-factor werd 1 onbehandeld en 1 behandeld proefstuk met BS + $CaCl_2$ gebruikt.

Vorbereiding proefstuk

De proefstukken werden tot op verschillende dieptes uitgeboord zoals beschreven in Paragraaf 2.2.2. Het uitgeboorde stof werd verzameld in kleine containers. Het gewicht van elk monster werd nauwkeurig opgemeten. Elke container bevatte ongeveer 1,5 gram stof. Daarna werd het stof gemengd met 10 ml vloeistof in een ampule. De ampule werd gedurende ongeveer 5 minuten geschud.

Proefopstelling

Er werd gebruik gemaakt van een elektrode en een voltmeter (zie Figuur 2.13) om de chloridenconcentratie op te meten.



Figuur 2.13: Voltmeter en elektrode gebruikt om de chloridenconcentratie op te meten

Uitgaande van 4 kalibratievloeistoffen met een gekende concentratie aan opgeloste Cl^- -ionen kon een lineair verband tussen het chloridenpercentage en de opgemeten mV-waarde worden opgesteld. Daarna vond de eerste meting plaats, hierbij werd per container de

mV-waarde bepaald. Uitgaande van de opgestelde kalibratierechte en de opgemeten mV-waarde kon de concentratie vrije en gebonden chloriden in de testvloei sof bepaald worden. Om de chloridenhoeveelheid uit te drukken in een percentage van het cementgewicht diende de opgemeten waarde voor mortels met een w/c-factor van 0,5 en 0,7 vermenigvuldigd te worden met respectievelijk een factor 4,5 en 4,7. Dit is de verhouding van het cementgewicht tot het totale mortelgewicht.

Resultaat

De bekomen chloridenpercentages werden voor de verschillende w/c-factoren vergeleken voor onbehandelde mortelproefstukken en proefstukken behandeld met BS + $CaCl_2$.

2.2.4 Vorst in combinatie met dooizouten

In het kader van het eindwerk van Dieter Debrouwer [50] werd het effect van de biodepositie als oppervlakte behandeling op verschillende schadeprocessen bekeken. Hierbij werd aangetoond dat de biodepositie resulteerde in een verhoogde weerstand tegen schade. Bij de proefresultaten met vorst in combinatie met dooizouten werden echter geen consistente resultaten behaald. Deze proef had tot doel na te gaan of de biodepositie methode daadwerkelijk negatieve gevolgen heeft naar vorst in combinatie met dooizouten toe.

Proefmethode

Om de weerstand tegen vorst-dooicycli in combinatie met dooizouten te bepalen werden de behandelde ongescheurde mortelproefstukken volgens norm NTN 018 beproefd [51]. Hierbij werd het proefstuk aan een reeks van 28 vorst-dooicycli onderworpen. Tijdens deze proef werd een oplossing van 3 % NaCl op het bovenvlak van het proefstuk aangebracht zodat het bovenvlak van het proefstuk volledig bedekt werd door een laagje van deze oplossing. Het materiaal dat afgeschilferde gedurende de proef werd opgevangen en daarna gedroogd en gewogen.

Proefstuk

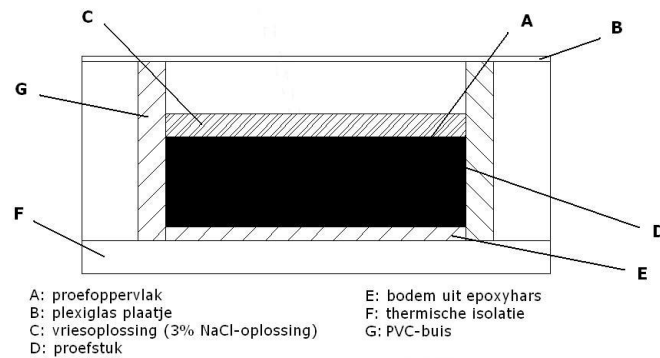
Mortelcilinders met een diameter van 100 mm en een hoogte van 50 mm werden voor deze proef gebruikt. De proefstukken hadden een w/c-factor van 0,5; 0,6 en 0,7. Per w/c-factor werden 3 onbehandelde en 3 behandelde proefstukken met BS + $CaCl_2$ gebruikt.

Voorbereiding proefstuk

De proefstukken werden gedurende minstens 168 uur in een geklimatiseerde ruimte ($RV = 60 \pm 10\%$ en $20 \pm 20^\circ C$) bewaard. De proefstukken werden door middel van epoxyhars in een PVC-buis gekleefd. De hoogte van de buis werd zodanig bepaald dat de bovenrand ervan zich 20 ± 2 mm boven het morteloppervlak bevond. Enkel de bovenkant van het proefstuk staat op deze manier nog in contact met de buitenlucht, de onderkant en de zijkant van het monster werden door epoxy afgedekt.

Om de waterdichtheid van het geheel te controleren werd vooraf een waterlaag op het oppervlak aangebracht. Na drie dagen werd gecontroleerd of het waterpeil niet was gezakt. Daarna werd de waterlaag terug verwijderd.

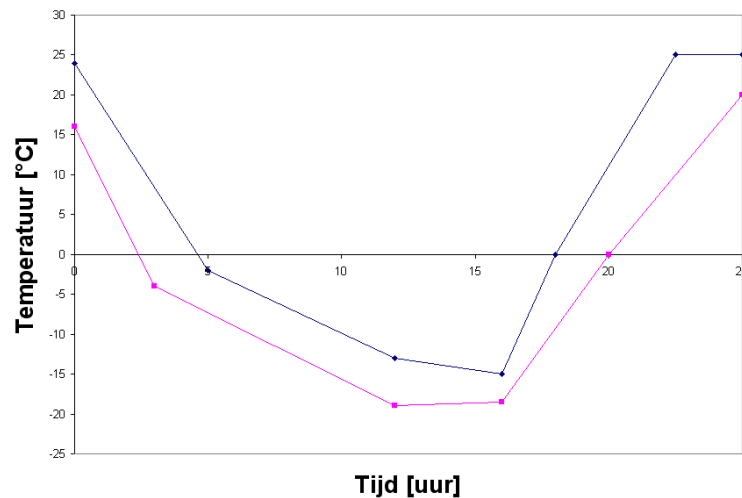
De elementen werden, met uitzondering van het behandelde oppervlak, thermisch geïsoleerd vooraleer ze in de klimaatkast werden geplaatst. Er werd een laag van 5 ± 2 mm 3% NaCl-oplossing op het behandelde oppervlak aangebracht. Daarna werd een plexiglazen plaatje met daarop een klein gewicht op het bovenvlak van de PVC-buis gelegd om verdamping tegen te gaan. Figuur 2.14 toont een dwarsdoorsnede van een proefstuk.



Figuur 2.14: Dwarsdoorsnede van een proefstuk [51]

Proefopstelling

De vorst-dooicycli werden in een klimaatkast ontwikkeld.. De temperatuursverandering kon in de tijd worden aangepast. Een thermokoppel werd op het controleproefstuk geplaatst zodat het temperatuursverloop van de NaCl-oplossing kon worden opgevolgd. De tijd-temperatuurcyclus van de zoutoplossing van het proefstuk moest zich gedurende de vorst-dooicycli binnen de lijnen van Figuur 2.15 bevinden.



Figuur 2.15: Tijd-temperatuurcyclus [51]

De temperatuur van de NaCl-oplossing was gedurende minstens 7 en niet meer dan 9 uur per cyclus hoger dan 0°C .

Na 14, 21 en 28 cycli werd het afgeschilferde materiaal van het oppervlak met een zachte borstel verwijderd. Het oppervlak werd met water gespoeld tot geen materiaal meer loskwam. Het op deze manier verzamelde materiaal werd daarna gedurende 24 uur bij $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ gedroogd. Het drooggewicht van het afgeschilferde materiaal werd op $\pm 0,2$ g nauwkeurig bepaald.

Resultaat

Voor iedere behandeling en w/c-factor werd een gemiddelde totale hoeveelheid afgeschilferd materiaal berekend uitgaande van het individueel massaverlies van 3 afzonderlijk proefstukken. De bekomen waarden werden vergeleken met het gemiddelde massaverlies van 3 onbehandelde proefstukken.

Deel III

Resultaten en discussie

Hoofdstuk 1

Resultaten

1.1 Biodepositie als middel om scheuren te dichten

1.1.1 Microscopisch onderzoek

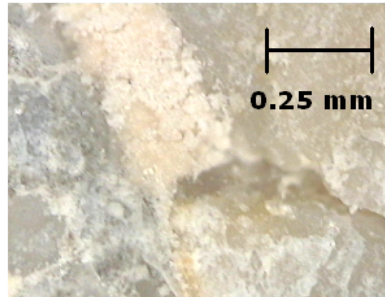
Om de scheurbreedte van de niet-gestandaardiseerde scheuren in beton te begroten werd gebruik gemaakt van een scheurmicroscoop (vergroting 10x). De scheurbreedte kon zo op 0,02 mm nauwkeurig bepaald worden. De gemiddelde scheurbreedte en de bijhorende standaardafwijking voor een niet-gestandaardiseerde scheur werd voor proefstukken met een diameter van 10 en 8 cm op respectievelijk 50 (250 meetpunten) en 20 (120 meetpunten) proefstukken bepaald. De gemiddelde scheurbreedte en bijhorende standaardafwijking van niet-gestandaardiseerde scheuren in betonnen cilinders met een diameter van 10 en 8 cm bedroeg respectievelijk $0,14 \pm 0,09$ mm en $0,13 \pm 0,12$ mm. De scheur liep in de meeste gevallen over de volledige diameter van het proefstuk door.

De gemiddelde scheurbreedte en bijhorende standaardafwijking van de gestandaardiseerde scheur werd op drie proefstukken (15 meetpunten) bepaald en bedroeg $0,5 \pm 0,05$ mm. De scheurdiepte werd bepaald door aan de zijkant van de proefstukken, waar de scheur zichtbaar was, de scheurdiepte op te meten. Per theoretische scheurdiepte werd de scheurdiepte langs beide zijden van 3 proefstukken bepaald. Tabel 1.1 toont de gewenste scheurdiepte met daarnaast de gemiddelde bekomen scheurdiepte en de bijhorende standaard afwijking.

Tabel 1.1: Theoretische en werkelijke scheurdieptes van de gestandaardiseerde scheuren met de standaardafwijking

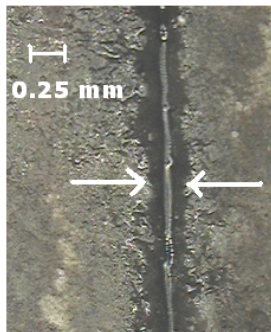
Gewenste scheurdiepte [mm]	Bekomen scheurdiepte [mm]
10	10 ± 1
20	19 ± 2

Volgende figuur toont de afzetting van wit materiaal in de scheur van een proefstuk dat enkel met medium behandeld was. De afzetting was enkel zichtbaar in de scheur langs de onbehandelde zijde van het proefstuk. De breedte van de scheur bedroeg ongeveer 0,25 mm.

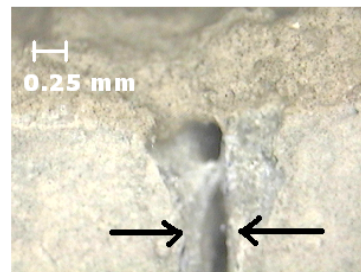


(a)

Figuur 1.1: Witte afzetting in de scheur langs de onbehandelde zijde van het proefstuk nadat het gedurende 3 dagen aan medium was blootgesteld. Vergroting 50x.



(a)

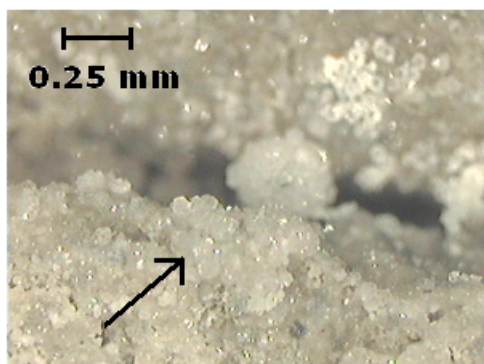


(b)

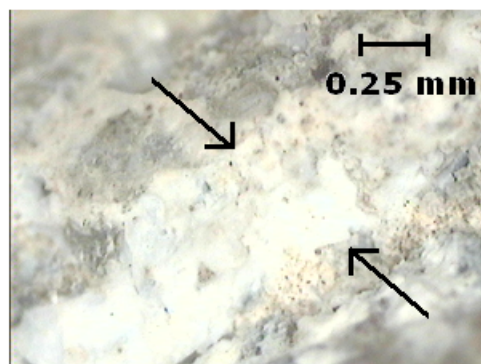
Figuur 1.2: Reparatie van een gestandaardiseerde scheur door: (a) epoxy, (b) grout. Vergroting 50x.

Uit Figuur 1.2 a blijkt dat de behandeling met epoxy resulteert in een volledige opvulling van de scheur. Figuur 1.2 b toont de behandeling met grout. De donker gekleurde laag bovenaan is de groutlaag. De scheur werd duidelijk niet opgevuld.

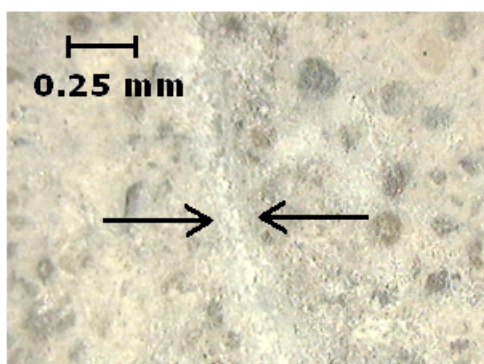
In Figuur 1.3 wordt de opvulling van een gestandaardiseerde scheur door niet-traditionele herstelmethodes getoond. In de figuur wordt telkens een bovenaanzicht van de scheur getoond. De zwarte pijl in Figuur 1.3 a toont de afzetting van materiaal op de scheurrand. In Figuur 1.3 b, c, d, en e duiden de zwarte pijlen de scheurrand van de gestandaardiseerde scheur aan.



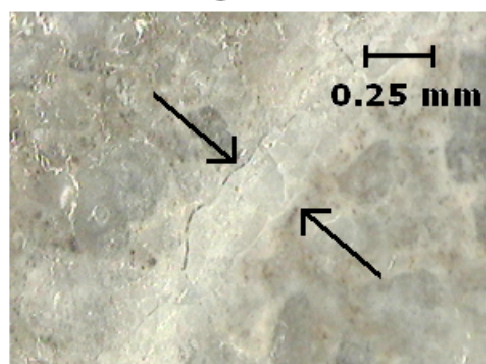
(a) BS + CaCl_2



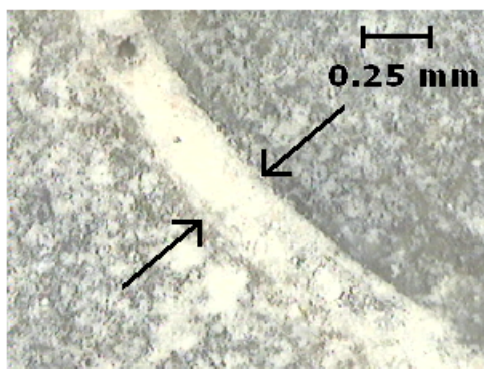
(b) BS in sol-gel + CaCl_2



(c) sol-gel



(d) BS in sol-gel + $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

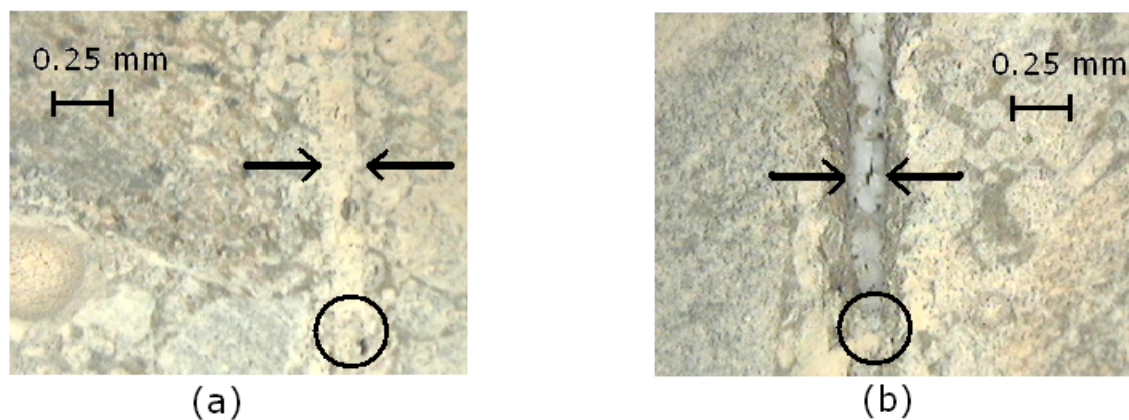


(e) sol-gel + BS + CaCl_2

Figuur 1.3: Bovenaanzicht van de opvulling van een gestandaardiseerde scheur door middel van niet-traditionele herstelmethoden: (a) BS + CaCl_2 , (b) BS in sol-gel + CaCl_2 , (c) sol-gel, (d) BS in sol-gel + $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, (e) sol-gel + BS + CaCl_2 . Vergroting 50x.

Uit Figuur 1.3 blijkt dat bijna alle niet-traditionele herstelmethodes in staat zijn om een scheurbreedte van 0,3 mm te overbruggen. Enkel de behandeling met $BS + CaCl_2$ was niet in staat om de volledige scheurbreedte te dichten, er was wel afzetting van materiaal zichtbaar op de scheurranden en het oppervlak van het proefstuk.

Om na te gaan of de scheurdichting over de volledige scheurdiepte gebeurde werd een snede loodrecht op een behandelde standaardscheur van 1 cm diep gemaakt. Figuur 1.4 toont aan dat een behandeling met BS in sol-gel + $CaCl_2$ en een behandeling met BS in sol-gel + $Ca(NO_3)_2$ een volledige scheurdichting tot gevolg hadden. De onderkant van de scheur is omcirkeld, de zwarte pijlen duiden de scheurrand aan.



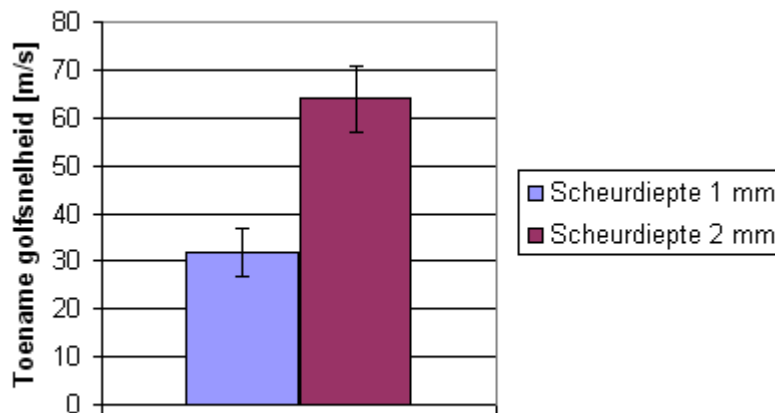
Figuur 1.4: Dwarsdoorsnede loodrecht op een gestandaardiseerde scheur van 1 cm diep behandeld met: (a) BS in sol-gel + $CaCl_2$, (b) BS in sol-gel + $Ca(NO_3)_2$. Vergroting 50x.

1.1.2 Ultrasoon onderzoek

In het kader van dit eindwerk werd gebruik gemaakt van ultrasoonmetingen om aan de hand van de verandering in de golfsnelheid door het beton het effect van de scheurdiepte en van de opvulling van de scheur te bepalen.

Effect van de scheurdiepte

De verandering van de golfsnelheid ten gevolge van een gestandaardiseerde scheur van 1 of 2 cm diep en 0,3 mm breed in een betonnen proefstuk werd bepaald. Per scheurdiepte werden telkens drie monsters beproefd. Figuur 1.5 toont de gemiddelde golfsnelheidstoename tussen de meetpunten ter hoogte van de scheur (meetpunten 1,4 en 5) en de meetpunten verwijderd van de scheur (meetpunten 2 en 3).



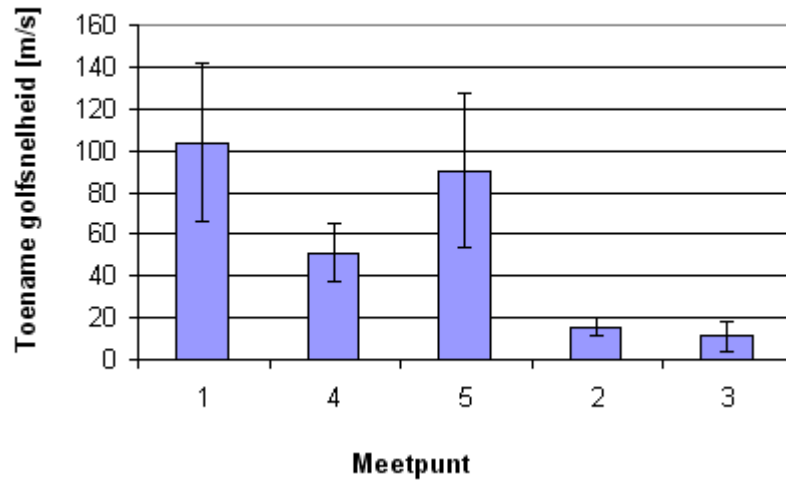
Figuur 1.5: Toename van de golfsnelheid tussen meetpunten ter hoogte van de scheur en meetpunten verwijderd van de scheur. Foutenvlaggen geven de standaardafwijking op het gemiddelde weer met $n = 3$.

Uit de figuur blijkt dat de snelheidstoename bij een scheurdiepte van 2 cm ongeveer twee keer groter was in vergelijking met een scheurdiepte van 1 cm.

Herstellen van een scheur door middel van epoxy

Er werd gebruik gemaakt van drie betonnen proefstukken waarin een gestandaardiseerde scheur was aangebracht met een diepte van 1 cm en een breedte van 0,3 mm.

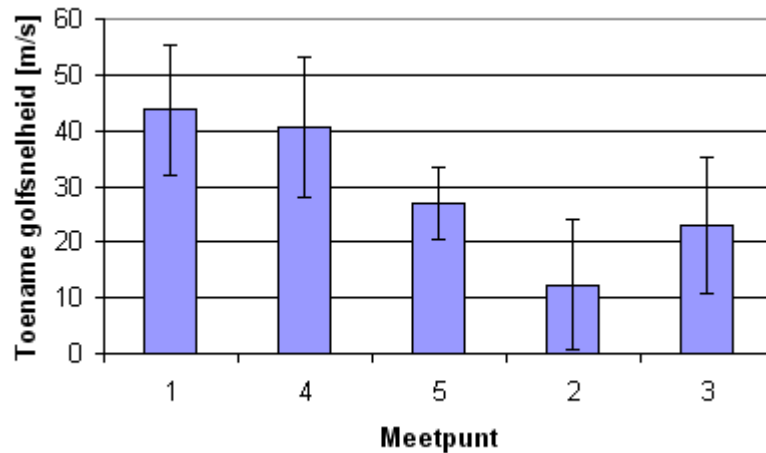
In Figuur 1.6 wordt een overzicht gegeven van de gemiddelde toename van de golfsnelheid door het beton ten gevolge van een behandeling met epoxy. Daarnaast wordt ook de standaardafwijking op het gemiddelde weergegeven.



Figuur 1.6: Toename van de golfsnelheid in betonproefstukken met een gestandaardiseerde scheur met een diepte van 1 cm en een breedte van 0,3 mm; de scheur werd behandeld met epoxyhars. Foutenvlaggen geven de standaardafwijking op het gemiddelde weer met $n = 3$.

Figuur 1.7 toont een overzicht van de gemiddelde toename van de golfsnelheid, en de bijhorende standaardafwijking, door het beton ten gevolge van een behandeling met epoxy op proefstukken met een gestandaardiseerde scheur met een diepte van 2 cm en een breedte van 0,3 mm. Opnieuw werd het gemiddelde over drie proefstukken genomen.

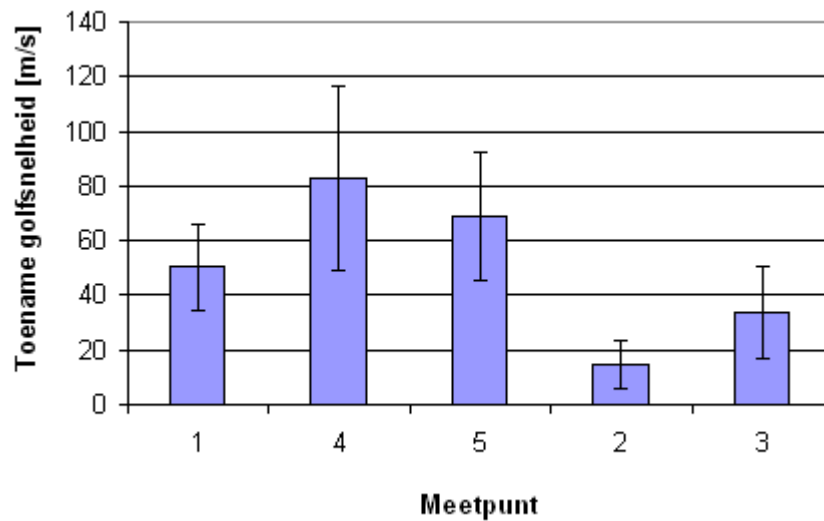
Uit Figuur 1.6 en 1.7 blijkt dat de snelheid op elk meetpunt toeneemt. De toename was wel telkens hoger ter hoogte van de herstelde scheur (meetpunt 1, 4 en 5). Bij een scheurdiepte van 1 cm kon een gemiddelde snelheidstoename van 81,6 m/s worden opgemerkt ter plaatse van de herstelde scheur (meetpunten 1, 4 en 5), de snelheidstoename in de andere meetpunten (meetpunten 2 en 3) bedroeg gemiddeld slechts 13,4 m/s. (Figuur 1.6). De herstelling van een scheur met scheurdiepte 2 cm resulteerde in een gemiddelde snelheidstoename van 37,0 m/s ter plaatse van de scheur (meetpunt 1, 4 en 5). In de meetpunten 2 en 3 bedroeg de snelheidstoename slechts 15,2 m/s (Figuur 1.7).



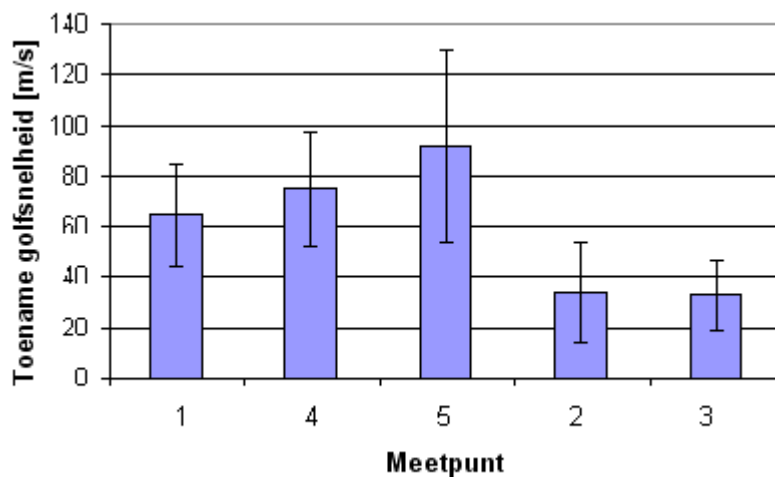
Figuur 1.7: Toename van de golfsnelheid in betonproefstukken met een gestandaardiseerde scheur met een diepte van 2 cm en een breedte van 0,3 mm; de scheur werd behandeld met epoxyhars. Foutenvlaggen geven de standaardafwijking op het gemiddelde weer met $n = 3$.

Herstellen van een scheur door middel van sol-gel

Figuur 1.8 en 1.9 geven een overzicht van de toename van de golfsnelheid door het beton ten gevolge van een behandeling met sol-gel, de proefstukken hadden een scheur met een breedte van 0,3 mm en een respectievelijke diepte van 1 en 2 cm. Opnieuw werden per scheurdiepte 3 monsters beproefd.



Figuur 1.8: Toename van de golfsnelheid in betonproefstukken met een gestandaardiseerde scheur met een diepte van 1 cm en een breedte van 0,3 mm; de scheur werd behandeld met sol-gel. Foutenvlaggen geven de standaardafwijking op het gemiddelde weer met $n = 3$.



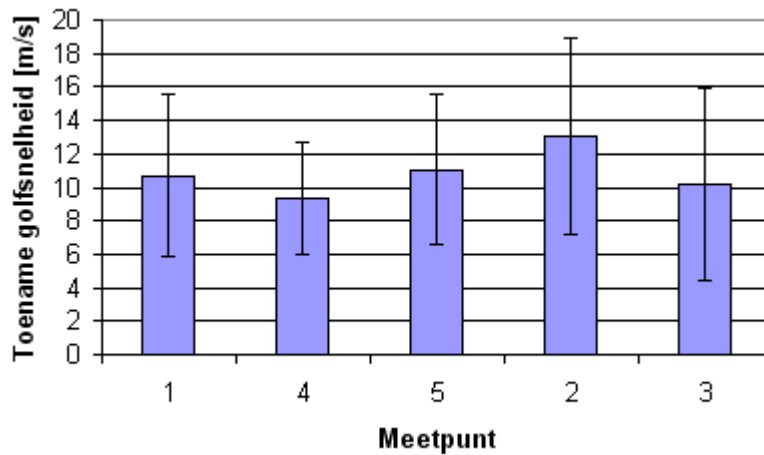
Figuur 1.9: Toename van de golfsnelheid in betonproefstukken met een gestandaardiseerde scheur met een diepte van 2 cm en een breedte van 0,3 mm; de scheur werd behandeld met sol-gel. Foutenvlaggen geven de standaardafwijking op het gemiddelde weer met $n = 3$.

De herstelling met sol-gel resulteerde in een grotere snelheidstoename ter hoogte van de herstellde scheur (Figuur 1.8 en 1.9). Bij een scheurdiepte van 1 cm kon een gemiddelde snelheidstoename van 67,3 m/s worden opgemerkt ter plaatse van de herstellde scheur (meetpunt 1, 4 en 5), de snelheidstoename in de twee overige meetpunten (meetpunten 2 en 3) bedroeg gemiddeld slechts 24,3 m/s (Figuur 1.8). Deze snelheidstoename was kleiner

dan de snelheidstoename na de herstelling met epoxy. In het geval van een scheurdiepte van 2 cm was de snelheidstoename hoger in vergelijking met een herstelling met epoxy, namelijk 69,6 m/s ter hoogte van de scheur (Figuur 1.9).

Herstellen van een scheur door middel van BS + CaCl_2

In Figuur 1.10 wordt een overzicht gegeven van de toename van de golfsnelheid door het beton ten gevolge van een behandeling met bacteriën (BS + CaCl_2). De monsters bezaten een gestandaardiseerde scheur met een diepte van 2 cm en een breedte van 0,3 mm. Er werden 3 proefstukken getest.



Figuur 1.10: Toename van de golfsnelheid in betonproefstukken met een gestandaardiseerde scheur met een diepte van 2 cm en een breedte van 0,3 mm; de scheur werd behandeld met BS + CaCl_2 . Foutenvlaggen geven de standaardafwijking op het gemiddelde weer met $n = 3$.

Opnieuw lag de golfsnelheid overal hoger nadat de herstelling van de scheur was uitgevoerd (Figuur 1.10). Er kon echter geen significant verschil worden vastgesteld tussen de metingen ter plaatse van de scheur (meetpunten 1, 4 en 5) en de overige metingen (meetpunten 2 en 3).

1.1.3 Waterdoorlatendheid

In eerste instantie werd de efficiëntie van de gebruikte scheurherstmethode onderzocht door middel van waterdoorlatendheidsproeven.

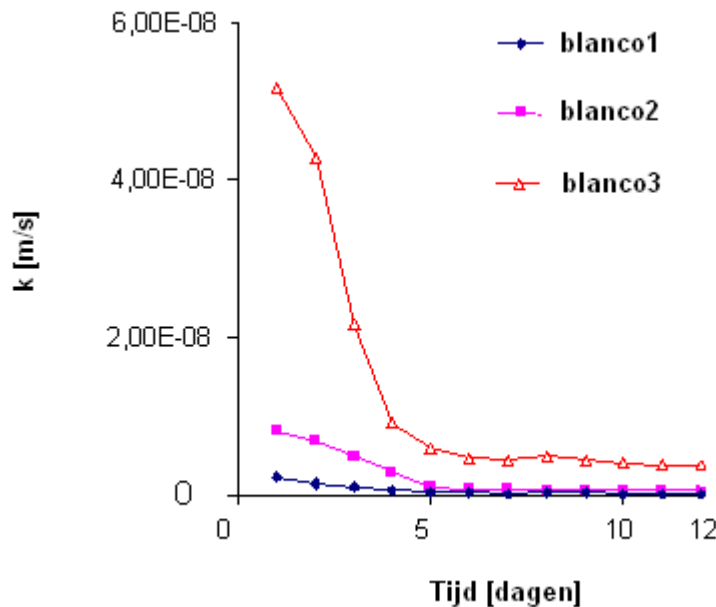
Onbehandelde proefstukken

Tabel 1.2 toont de gemiddelde scheurbreedte en de bijhorende standaardafwijking van de niet-gestandaardiseerde scheuren in de onbehandelde betonproefstukken. De niet-gestandaardiseerde scheur werd aangebracht volgens de methode beschreven in Deel II, paragraaf 2.1.1. De gemiddelde scheurbreedte werd per proefstuk op 6 gelijkmatig verdeelde punten over de scheurlengte opgemeten met een scheurmicroscoop (vergroting 10x).

Tabel 1.2: Gemiddelde scheurbreedte en bijhorende standaardafwijking van de niet-gestandaardiseerde scheur in de onbehandelde proefstukken

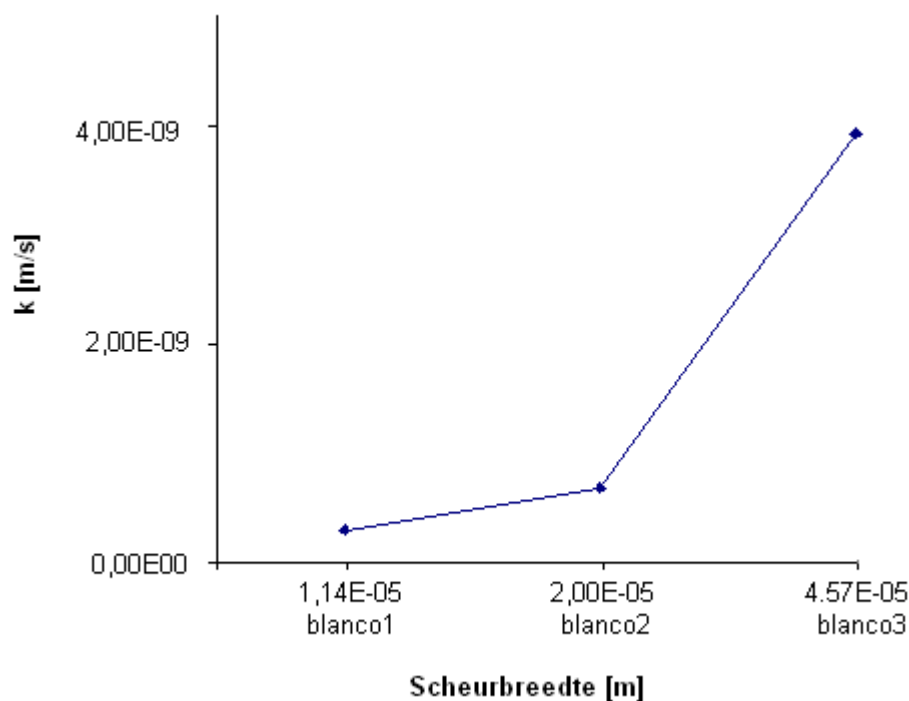
Naam	Scheurbreedte [mm]
blanco1	$0,011 \pm 0,0057$
blanco2	$0,02 \pm 0,0084$
blanco3	$0,046 \pm 0,019$

De opgemeten waterdoorlatendheid was niet onmiddellijk constant maar nam geleidelijk af om tenslotte stabiel te worden, dit proces duurde meestal enkele dagen. Volgende figuur toont de afname van de waterdoorlatendheidscoëfficiënt k [m/s] in de tijd gedurende de eerste 12 dagen van de proef.



Figuur 1.11: Daling van de waterdoorlatendheid in functie van de tijd gedurende de eerste 12 dagen van de proef

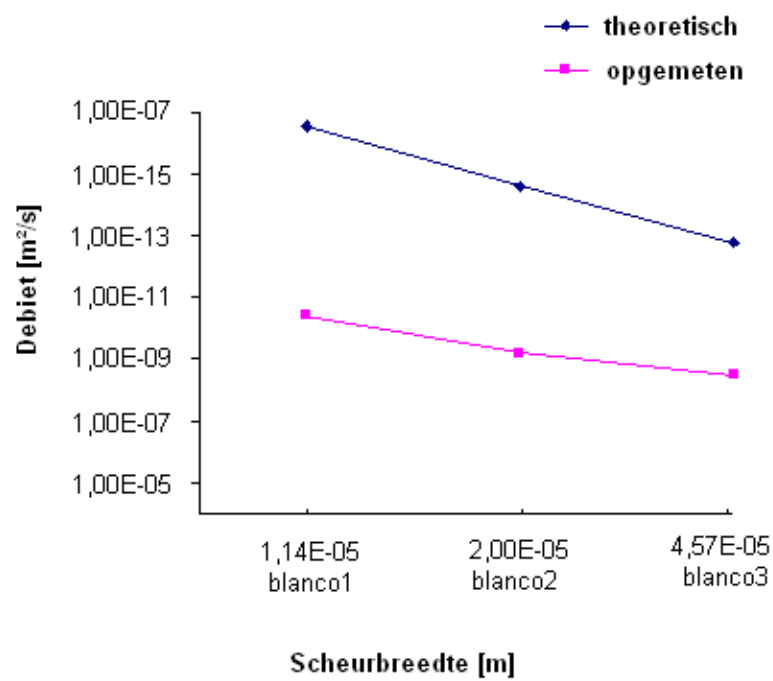
In Figuur 1.12 wordt de waterdoorlatendheidscoëfficiënt k [m/s] in functie van de scheurbreedte weergegeven. De waterdoorlatendheidscoëfficiënt werd hier berekend uitgaande van een constante stroom. De stroom werd als constant beschouwd als de metingen gedurende 5 opeenvolgende dagen stabiel waren.



Figuur 1.12: Verhoging van de waterdoorlatendheid k in functie van een toenemende scheurbreedte

Figuur 1.13 toont het verband tussen de opgemeten waarde en de theoretisch berekende waarde van het debiet na 24u. Het theoretische debiet werd berekend aan de hand van de formule besproken in Deel II, Paragraaf 2.1.5

De theoretische waarde lag voor elke scheurbreedte hoger dan de opgemeten waarde (Figuur 1.13).



Figuur 1.13: Verband tussen de opgemeten waarde van het debiet na de eerste 24 uur en de theoretische waarde.

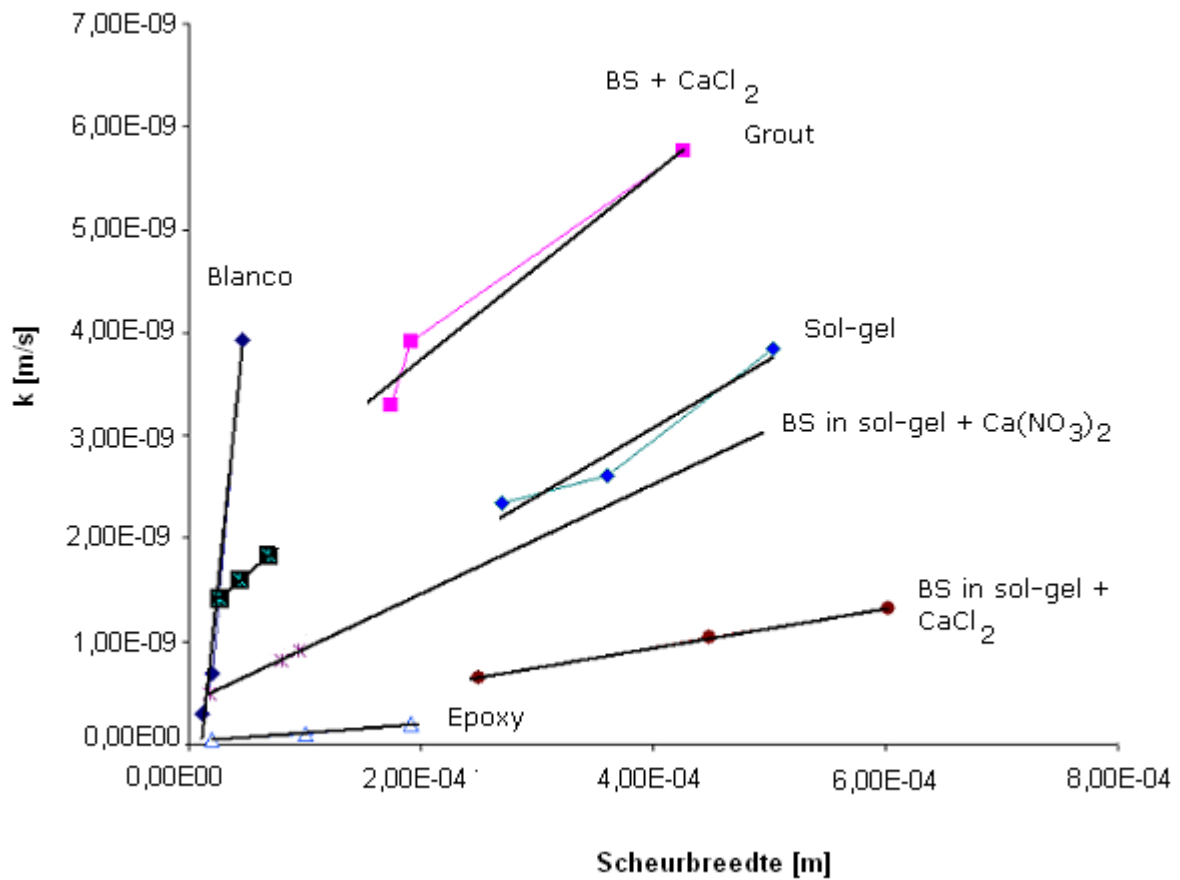
Behandelde proefstukken

Per behandeling werden 3 proefstukken onderzocht. Tabel 1.3 toont de gebruikte behandeling en de gemiddelde scheurbreedte met bijhorende standaardafwijking. De scheurbreedte werd op dezelfde manier bepaald als bij de onbehandelde monsters.

Tabel 1.3: Overzicht van de scheurbreedtes en de standaardafwijking van de proefstukken en de toegepaste behandelingen

Behandeling	Scheurbreedte [mm]
Blanco	0,011 $\pm$ 0,0057
	0,020 $\pm$ 0,0084
	0,046 $\pm$ 0,019
Epoxy	0,020 $\pm$ 0,010
	0,10 $\pm$ 0,060
	0,19 $\pm$ 0,08
Grout	0,026 $\pm$ 0,010
	0,043 $\pm$ 0,030
	0,069 $\pm$ 0,040
BS + $CaCl_2$	0,17 $\pm$ 0,090
	0,19 $\pm$ 0,11
	0,43 $\pm$ 0,26
BS in sol-gel + $CaCl_2$	0,25 $\pm$ 0,13
	0,45 $\pm$ 0,26
	0,60 $\pm$ 0,31
BS in sol-gel + $Ca(NO_3)_2$	0,017 $\pm$ 0,011
	0,080 $\pm$ 0,030
	0,094 $\pm$ 0,060
Sol-gel	0,26 $\pm$ 0,13
	0,32 $\pm$ 0,18
	0,52 $\pm$ 0,22

De invloed van de verschillende scheurherstelmethoden op de waterdoorlatendheid werd met elkaar vergeleken in Figuur 1.14.



Figuur 1.14: Invloed van de verschillende methodes om de scheur te dichten op de waterdoorlatendheid

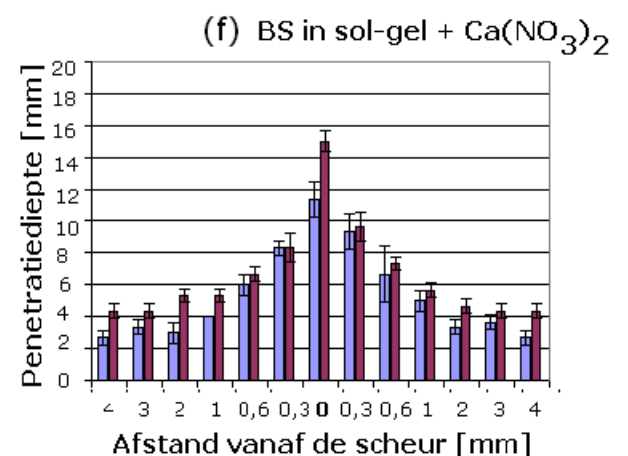
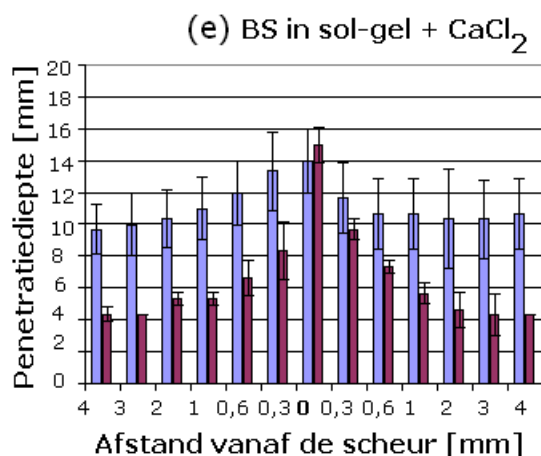
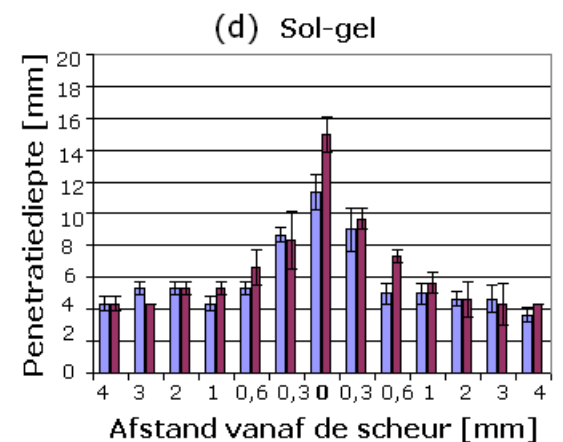
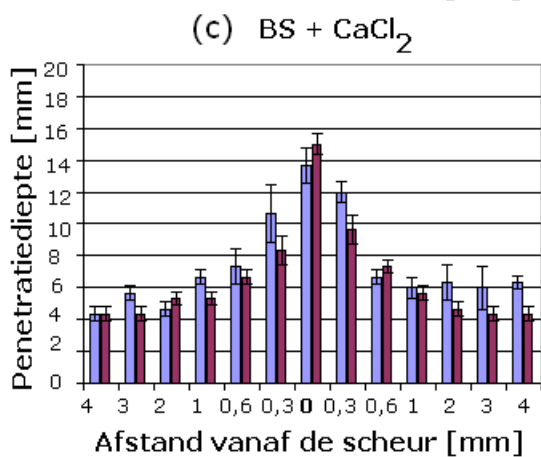
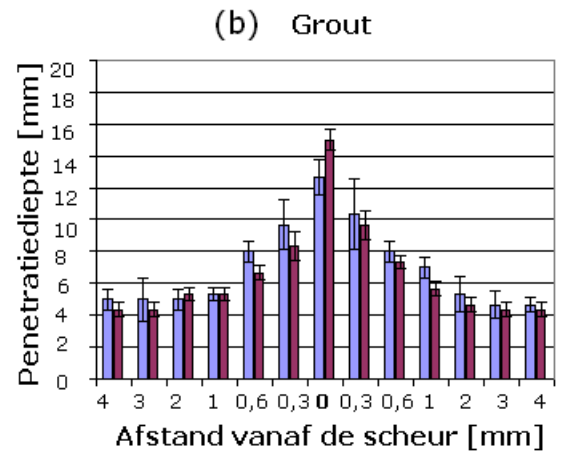
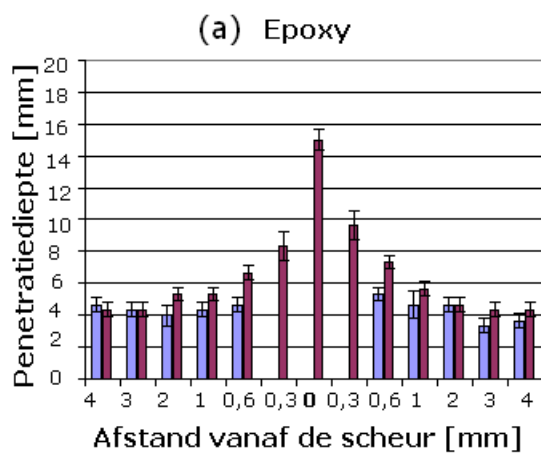
Overall werd een lagere waterdoorlatendheidscoëfficiënt opgemerkt bij de behandelde proefstukken in vergelijking met de onbehandelde proefstukken (Figuur 1.14). De behandeling met epoxy vertoonde de laagste waterdoorlatendheid. De behandeling met BS in sol-gel + $CaCl_2$ vertoonde ook sterk verlaagde waarden voor de waterdoorlatendheidscoëfficiënt.

1.1.4 Chloridenindringing

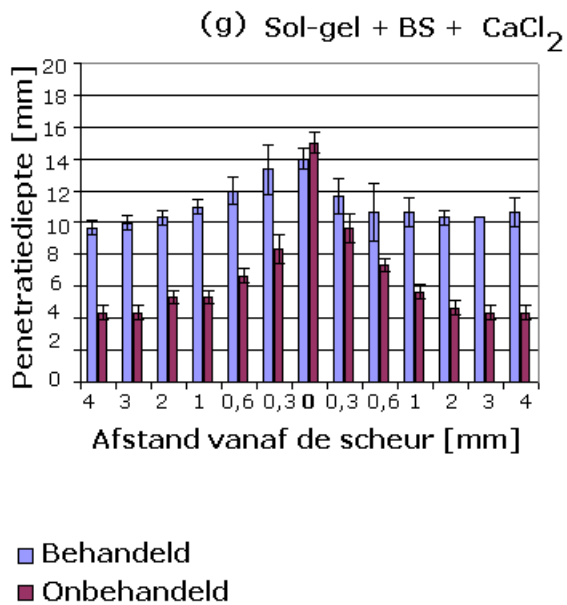
In tweede instantie werd de efficiëntie van de herstelmethode onderzocht onder de vorm van de weerstand tegenover chloridenindringing. Hiervoor werd gebruik gemaakt van de *CTH Rapid Test* .

Gestandaardiseerde scheur

Volgende figuur toont de penetratiediepte van de chloriden, loodrecht op het oppervlak gemeten. In de proefstukken was een gestandaardiseerde scheur van 1 cm diep aangebracht zoals beschreven in Hoofdstuk 2, Deel II paragraaf 2.1.1. De opgemeten indringingsdiepte is telkens een gemiddelde van 3 metingen.



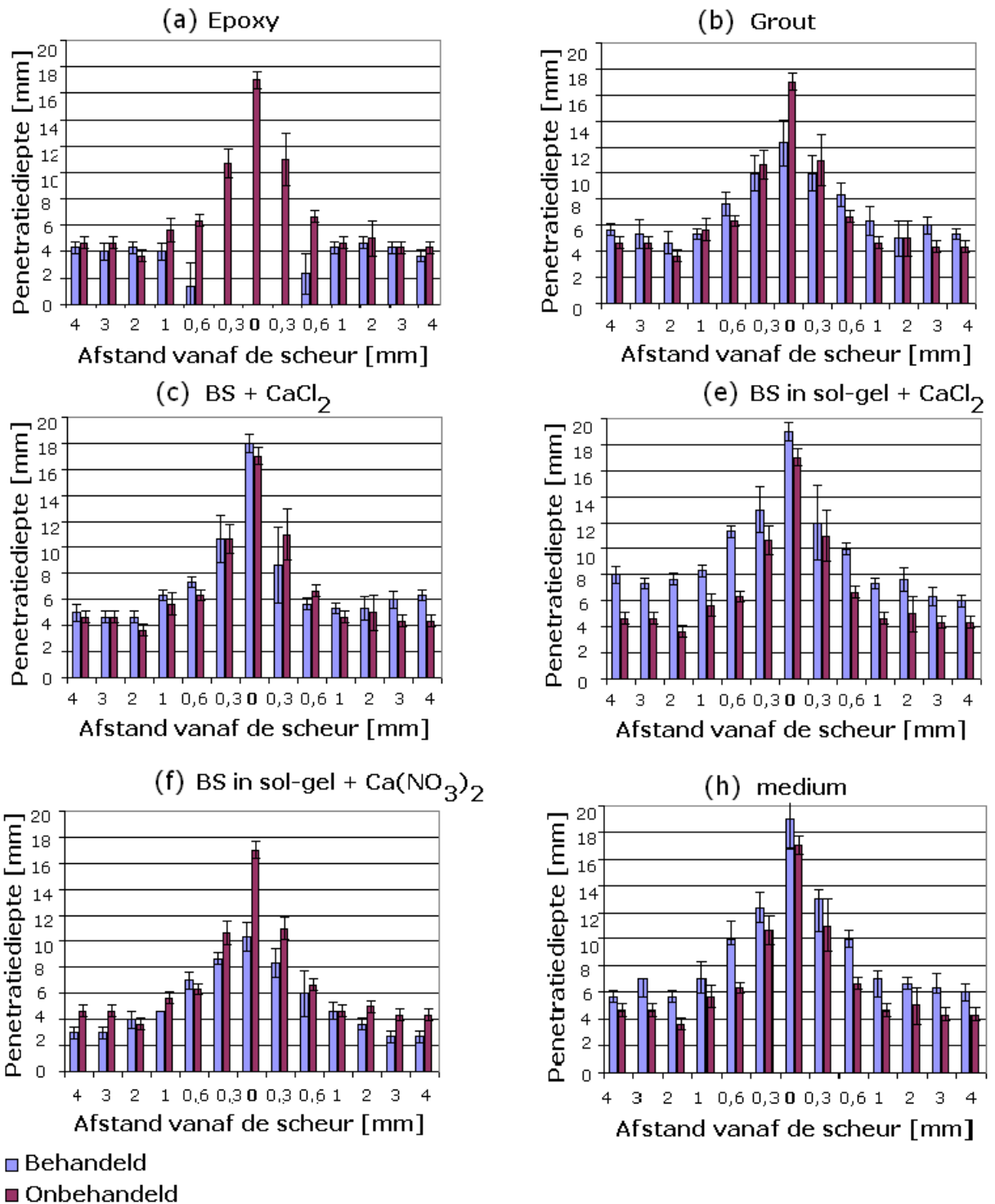
■ Behandeld
■ Onbehandeld



Figuur 1.15: Penetratiediepte van de chloriden gemeten loodrecht op het oppervlak van proefstukken met een gestandaardiseerde scheur van 1 cm diep. De monsters werden behandeld met: (a) epoxy, (b) grout, (c) BS + CaCl_2 , (d) sol-gel (d), (e) BS in sol-gel + CaCl_2 , (f) BS in sol-gel + $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, (g) sol-gel + BS + CaCl_2

Niet-gestandaardiseerde scheur

Volgende figuur toont de penetratiediepte van de chloriden loodrecht gemeten op het oppervlak. In de proefstukken was een niet-gestandaardiseerde scheur aangebracht zoals beschreven in Hoofdstuk 2, paragraaf 2.1.1.



Figuur 1.16: Penetratiediepte van de chloriden gemeten loodrecht op het oppervlak van proefstukken met een gestandaardiseerde scheur van 2 cm diep.. De monsters werden behandeld met: (a) epoxy, (b) grout, (c) BS+ CaCl_2 , (e) BS in sol-gel + CaCl_2 , (f) BS in sol-gel + $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, (h) medium.

De behandeling met epoxyhars gaf aanleiding tot een volledige afdichting van het behandelde oppervlak zodat onder de behandelde zone geen enkele chloridenpenetratie zichtbaar was, buiten de behandelde zone was de chloridenpenetratie vergelijkbaar met de indringing zichtbaar bij een onbehandeld proefstuk (Figuur 1.15a, 1.16a).

De behandeling van de scheur met cementgrout zorgde voor een vermindering van de chloridenpenetratie in de scheur zelf, de chloridenpenetratie in het onbehandelde oppervlak ondervond weinig invloed van de behandeling (Figuur 1.15b, 1.16b).

De behandeling van de scheur met BS + $CaCl_2$ resulteerde op de meeste plaatsen niet tot een significante verhoging van de chloridenpenetratie (Figuur 1.15c, 1.16c).

Het gebruik van sol-gel om de scheur te dichten zorgde ter hoogte van de scheurtip voor een vermindering van de chloridenpenetratie, verder verwijderd van de scheur was de situatie vergelijkbaar met die van een onbehandeld proefstuk (Figuur 1.15d).

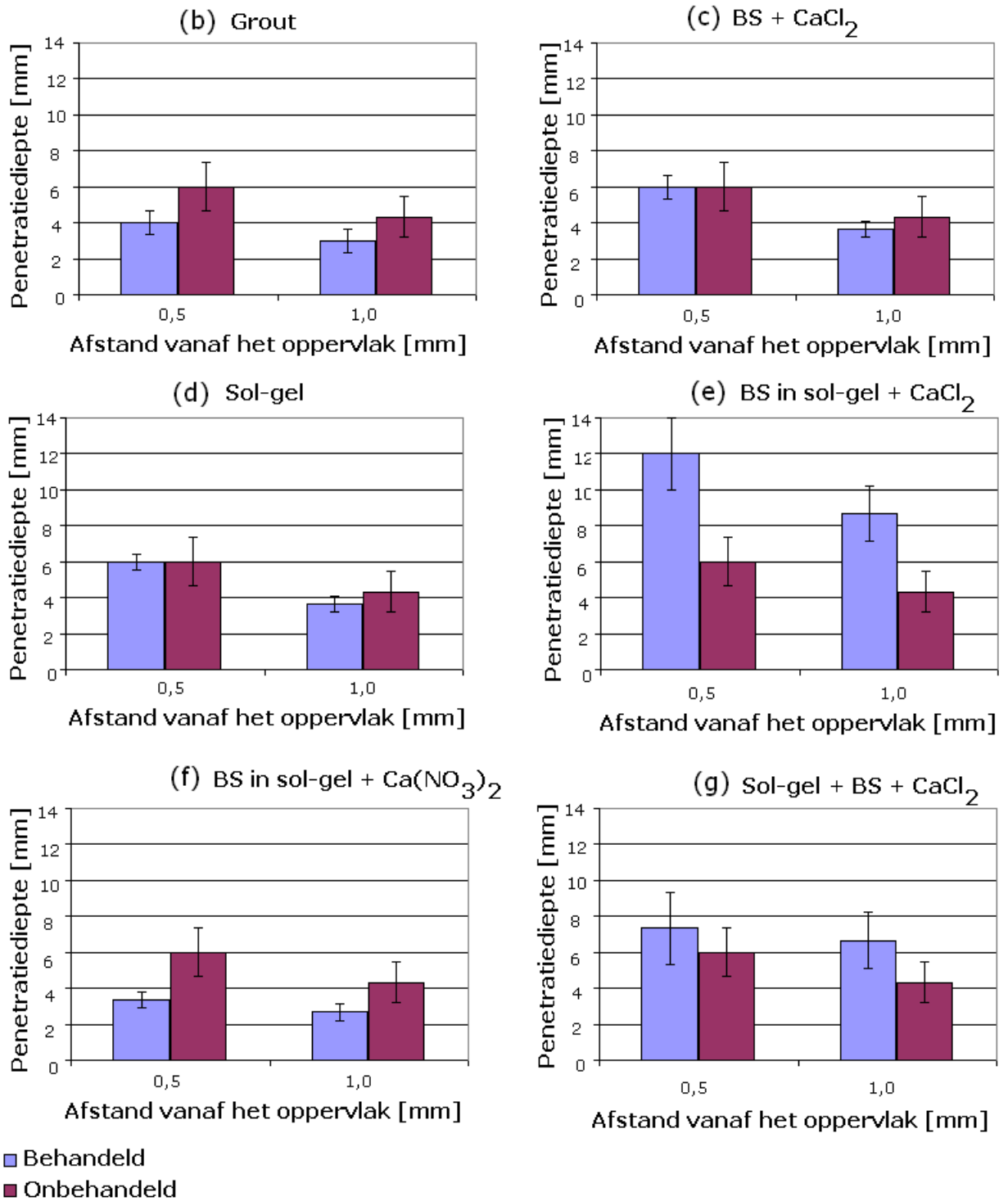
De behandeling van de scheur met BS in sol-gel + $CaCl_2$ zorgde overal voor een significante verhoging van de chloridenpenetratie, behalve ter hoogte van de scheurtip, daar kon een vermindering van de penetratiediepte worden opgemerkt (Figuur 1.15e, 1.16e).

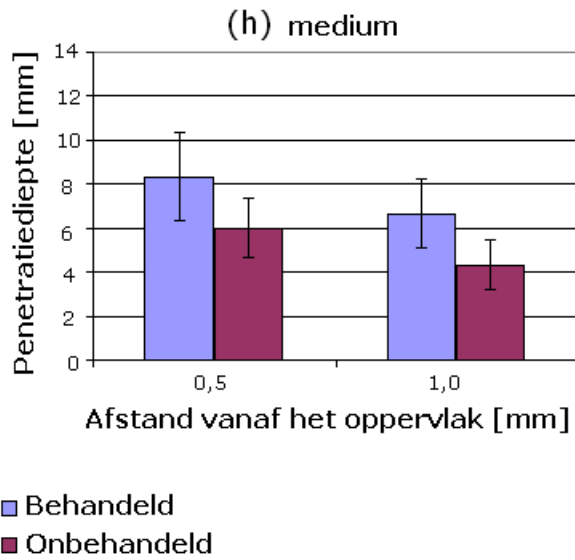
Het behandelen van de monsters met BS in sol-gel + $Ca(NO_3)_2$ resulteerde in de scheurtip tot een significante een vermindering van de penetratiediepte. (Figuur 1.15f, 1.16f).

De behandeling van de scheur met sol-gel + BS + $CaCl_2$ zorgde overal voor een verhoging van de chloridenpenetratie, er kon enkel een vermindering van de penetratiediepte worden vastgesteld ter hoogte van de scheurtip van de niet-gestandaardiseerde scheur (Figuur 1.15g).

Het gebruik van medium om de scheuren te dichten resulteerde bijna overal tot een significante verhoging van de chloridenpenetratie (Figuur 1.16h).

Voor de gestandaardiseerde scheuren werd het effect van de behandeling op de chloridenpenetratie loodrecht op scheur bepaald (Figuur 1.17).





Figuur 1.17: Penetratiediepte van de chloriden gemeten loodrecht op de scheur. De monsters werden behandeld met: grout (b), BS + $CaCl_2$ (c), sol-gel (d), BS in sol-gel + $CaCl_2$ (e), BS in sol-gel + NO_3 (f), sol-gel + BS + $CaCl_2$ (g), medium (h)

De penetratiediepte loodrecht op de scheur verhoogde enkel significant bij de behandeling met BS in sol-gel + $CaCl_2$

1.2 Biodepositie als oppervlaktebehandeling

1.2.1 Indringingsdiepte van de bacteriën

De indringingsdiepte van de bacteriën in het ongescheurde mortelproefstuk werd bepaald door het beton tot op verschillende dieptes uit te boren en daarna het aantal sporen in oplossing te bepalen.

Tabel 1.4 toont de gewenste boordiepte naast de bekomen boordiepte. De dieptes zijn telkens een gemiddelde van 6 ALM-metingen. Daarnaast wordt ook de standaardafwijking op het bekomen gemiddelde bepaald.

Tabel 1.4: Vergelijking van de verwachte boordiepte met de bekomen gemiddelde boordiepte. Daarnaast wordt de standaardafwijking voor iedere boordiepte gegeven.

Boring	Gewenste diepte [mm]	Bekomen diepte [mm]
1	0,5	0,51 + 0,10
2	1	0,98 + 0,11
3	1,5	1,35 + 0,09
4	2	1,79 + 0,08
5	3	2,74 + 0,11
6	5	4,48 + 0,12
7	10	8,88 + 0,17

Zoals blijkt uit Tabel 1.4 is de bekomen waarde steeds kleiner dan de gewenste waarde. Het verschil nam toe naarmate de boordiepte groter wordt. Uiteindelijk bekwam men voor een gewenste diepte van 10 mm slechts een diepte van 8,88 mm, een tekort van 1,12 mm.

In Tabel 1.5 wordt voor de behandeling met BS + $CaCl_2$ het aantal kolonie vormende eenheden (CFU) op bepaalde dieptes weergegeven. Per w/c-factor werd 1 ongescheurd mortelproefstuk beproefd.

Tabel 1.5: Aantal kolonie vormende eenheden (CFU) op verschillende dieptes in het ongescheurde mortelproefstuk na behandeling met BS + $CaCl_2$

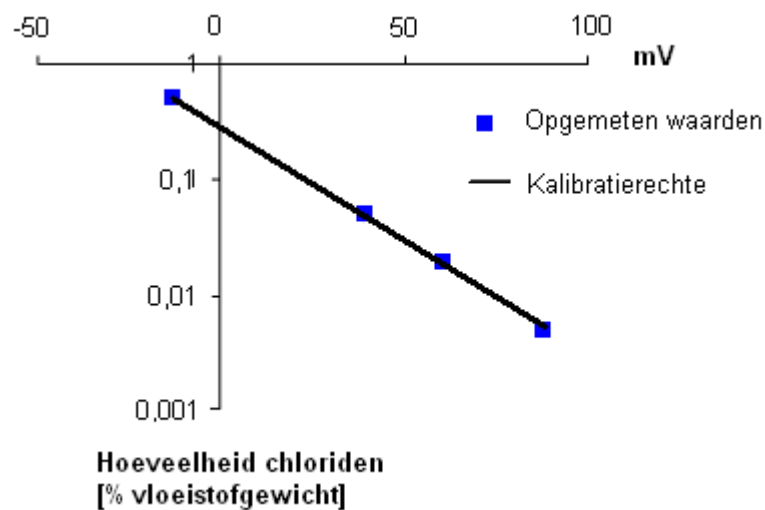
w/c-factor	Aantal CFU ($\times 10^3$) op diepte [mm]						
	0 - 0,5	0,5 - 1	1 - 1,5	1,5 - 2	2- 3	3 - 5	5 - 10
0,5	9,48	<1	3,16	<1	<1	<1	14
0,7	7,07	1	8,36	1	10	<1	/

Uit de gegevens in Tabel 1.5 kan geen duidelijke verband afgeleid worden tussen het aantal CFU / g en de indringingsdiepte. Er werden CFU teruggevonden doorheen de matrix tot op een diepte van 10 mm, op grotere diepte werd de CFU niet bepaald. Bij het mortelproefstuk met w/c-factor 0,7 werd de CFU op een diepte van 5 - 10 mm niet bepaald.

1.2.2 Chloridenindringing

Om mogelijke negatieve gevolgen door het gebruik van CaCl_2 als calciumbron te onderzoeken werd de hoeveelheid vrije en gebonden chloriden bepaald nadat het ongescheurde mortelproefstuk zich gedurende drie dagen tot een hoogte van 1 cm boven de onderzijde van het monster in medium had bevonden. Hiervoor werd gebruik gemaakt van de *Rapid Chloride Test* (RCT). In totaal werden 4 monsters beproefd: 2 onbehandelde mortelproefstukken met w/c-factor 0,5 en 0,7 met daarnaast 2 met BS + CaCl_2 behandelde mortelproefstukken met w/c-factor 0,5 en 0,7.

Nadat de mV-waarde voor vier gekende chloridenconcentraties was bepaald kon de vergelijking van de kalibratierechte doorheen deze vier punten bepaald worden (Figuur 1.18)



Figuur 1.18: Opgemeten mV-waarden van 4 gekende chloridenconcentraties met bijhorende kalibratierechte

De berekende chloridenpercentages voor een mortel met w/c-factor 0,5 en 0,7 worden weergegeven in Tabel 1.6.

Tabel 1.6: Effect van de behandeling met BS + $CaCl_2$ in vergelijking met een onbehandeld mortelmonster op het chloridengehalte in de mortel.

Behandeling	Diepte [mm]	Chloriden in de mortel	Chloriden in de mortel
		[% van het cementgehalte] Geen	[% van het cementgehalte] BS + $CaCl_2$
w/c-factor 0,5	0 - 0,5	0,14	1,44
	0,5 - 1	0,14	0,68
	1 - 1,5	0,18	0,72
	1,5 - 2	0,14	0,72
	2 - 3	0,14	0,81
	3 - 5	0,14	0,68
	5 - 10	0,14	0,27
w/c-factor 0,7	0 - 0,5	0,19	1,18
	0,5 - 1	0,14	1,55
	1 - 1,5	0,14	1,41
	1,5 - 2	0,14	1,55
	2 - 3	0,14	1,46
	3 - 5	0,14	1,36
	5 - 10	0,14	0,14

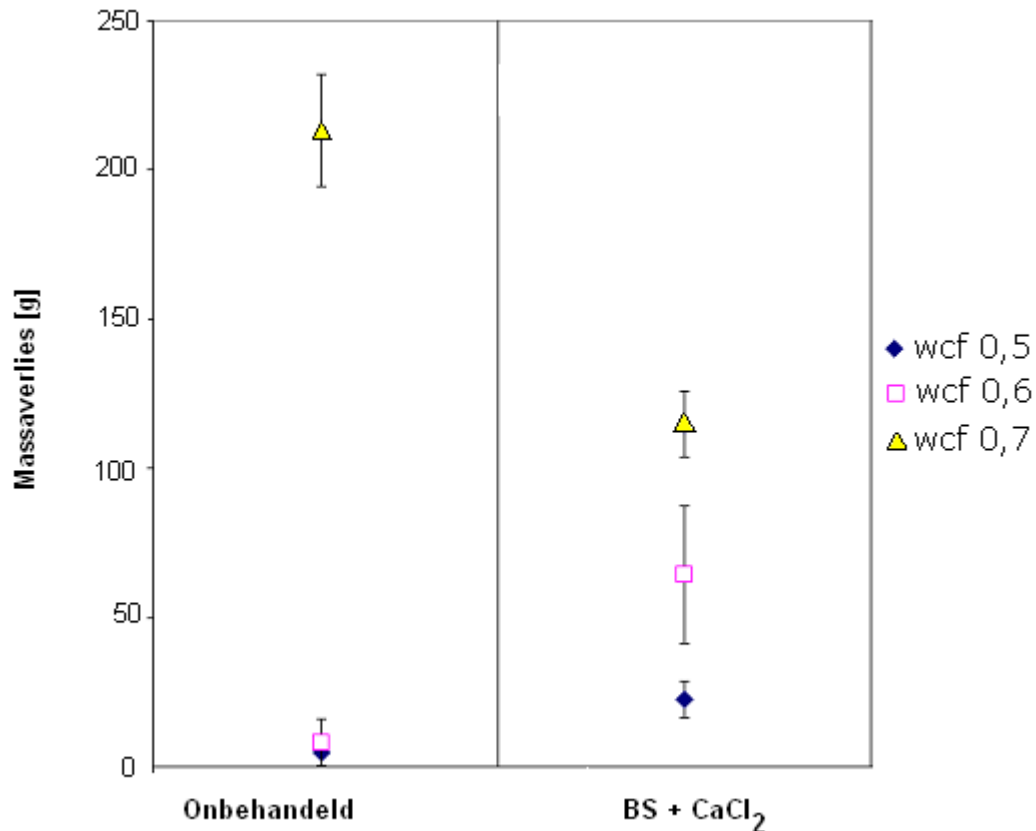
De hoeveelheid vrije en gebonden chloriden in procent van het cementgewicht was bij de behandelde proefstukken ongeveer constant in de zone 0-5 mm, enkel de concentratie tussen 0 en 0,5 mm bij een w/c-factor van 0,5 was beduidend hoger in vergelijking met de rest van het proefstuk. In de zone 5 - 10 mm was voor beide gevallen een sterke terugval zichtbaar. De chloriden concentratie bleek in het geval van w/c-factor 0,7 in de zone 0,5 - 5 mm overal groter te zijn in vergelijking met een w/c-factor van 0,5.

Bij de onbehandelde proefstukken was de chloridenconcentratie over een diepte van 0-5 mm bijna overal gelijk aan 0,14 %. Het verschil in chloridenconcentratie voor een behandeld en een onbehandeld proefstuk met w/c-factor 0,7 over een diepte van 0 - 5 mm was 1,3 % . Het verschil in chloridenconcentratie voor een behandeld en een onbehandeld proefstuk met w/c-factor 0,5 over een diepte van 0,5 - 5 mm bedroeg 0,78 % .

1.2.3 Vorst in combinatie met dooizouten

Om de weerstand tegen vorst-dooicycli in combinatie met dooizouten te bepalen werden ongescheurde mortelproefstukken aan 28 vorst-dooicycli in combinatie met dooizouten onderworpen. De hoeveelheid massaverlies voor onbehandelde monsters en monsters behandeld met BS + CaCl₂ werd met elkaar vergeleken.

In Figuur 1.19 wordt een overzicht gegeven van het massaverlies van de onbehandelde en de met BS + CaCl₂ behandelde proefstukken. Per w/c-factor werd het gemiddelde massaverlies van 3 monsters en de bijhorende standaardafwijking berekend.



Figuur 1.19: Overzicht van het gemiddelde massaverlies na 28 vorst-dooicycli in combinatie met dooizouten bij onbehandelde proefstukken en proefstukken behandeld met BS + CaCl₂ voor drie verschillende w/c-factoren: 0,5; 0,6 en 0,7. Foutenvlaggen geven de standaardafwijking op de gemiddelde waarde weer met $n = 3$.

Zowel voor de behandelde als voor de onbehandelde oppervlakken kon het meeste massaverlies worden opgemerkt bij de proefstukken met een w/c-factor van 0,7.

De proefstukken behandeld met BS + CaCl₂ vertoonden voor w/c-factoren gelijk aan 0,5 en 0,6 hogere massaverliezen in vergelijking met de onbehandelde proefstukken. Het massaverlies bij een w/c-factor van 0,5 en 0,6 lag respectievelijk 5,6 en 8,7 keer hoger.

Bij proefstukken met een w/c-factor van 0,7 behandeld met BS + CaCl₂ lag het massaverlies 44,6 % lager in vergelijking met de onbehandelde elementen.

Hoofdstuk 2

Discussie

2.1 Inleiding

Eén van de belangrijkste factoren waarmee men rekening moet houden tijdens het ontwerp van nieuwe structuren of tijdens het bepalen van de huidige toestand van bestaande structuren is de duurzaamheid van het gebruikte beton. Scheuren in beton hebben een grote invloed op de transporteigenschappen en duurzaamheid van het materiaal. De levensduur die voor de constructie werd voorop gesteld kan drastisch verminderen indien ontoelaatbare scheuren in het beton ontstaan.

Tegenwoordig bestaat er een uitgebreid gamma aan producten om scheuren te herstellen en eventueel verdere scheurgroei te vermijden [34]. Een innovatieve manier bestaat eruit gebruik te maken van bacteriële carbonaat precipitatie [46]. Scheuren in graniet konden met behulp van deze methode hersteld worden [45]. In tegenstelling tot graniet heeft het poriënwater van beton een zeer hoge pH-waarde (>12). Om de bacteriën tegen dit sterk basische milieu te beschermen kunnen ze geïmmobiliseerd worden in een polyurethaan (PU) matrix [46].

Het herstellen van scheuren in beton heeft meestal als doel de transporteigenschappen te beïnvloeden. In het kader van deze thesis werd de invloed van de verschillende behandelingen op de waterdoorlatendheid en de chloridenindringing bepaald. Daarnaast werd er microscopisch en ultrasoon onderzoek uitgevoerd om de mate waarin de scheur door het gebruikte herstelmateriaal werd opgevuld, te onderzoeken.

Niet enkel scheuren beïnvloeden de transporteigenschappen van het beton ook de porositeit van de oppervlaktelaag speelt een belangrijke rol. Door de porositeit van de oppervlaktelaag te reduceren kan immers de duurzaamheid van het beton verhoogd worden [6], [44]. Om de invloed van de behandelingen op de porositeit van de oppervlaktelaag te bepalen werd de weerstand van de behandelde proefstukken tegen vorst-dooi cycli in combinatie met dooizouten onderzocht. Daarnaast werd ook de chloridenpenetratie ten gevolge van de behandeling onderzocht.

Om een indicatie te verkrijgen van hoe diep de herstelmethode door middel van biodepositie in het beton doordringt werden het aantal sporen van bacteriën op verschillende dieptes bepaald.

2.2 Biodepositie als middel om scheuren te dichten

Methode om scheuren aan te brengen

De gebruikte methode om niet-gestandaardiseerde scheuren in het beton aan te brengen was gebaseerd op de methode voorgesteld door dr. ir. K. Audenaert. De oorspronkelijke methode bestond eruit een cilinder met een hoogte van 150 mm te wapenen met behulp van epoxyhars en glasvezel. De volledige cilinder werd daarna aan een splijtproef onderworpen. Het nadeel van deze methode was dat de scheur zelden doorheen de volledige cilinder liep. Nadat de cilinder in drie cilinders met een hoogte van 50 mm werd verzaagd ontstonden dus heel wat proefstukken zonder zichtbare scheur. De aangebrachte verbetering bestond eruit het gewapende proefstuk eerst te verzagen tot cilinders met een hoogte van 50 mm en pas daarna de splijtproef uit te voeren. Op deze manier werden veel meer proefstukken met een zichtbare scheur verkregen. De gemiddelde afwijking van de scheurbreedte bij niet-gestandaardiseerde scheuren was relatief groot, dit kan verklaard worden doordat de scheur in bepaalde gevallen niet over de volledige diameter van het proefstuk doorliep.

Microscopisch onderzoek

Uit de resultaten van het microscopisch onderzoek blijkt dat de scheurdichting met behulp van materialen gebaseerd op sol-gel zeer effectief was. Ook na het vacuüm verzadigen van deze proefstukken was de scheur nog steeds opgevuld. Bij het gebruik van bacteriën en medium alleen was op bepaalde plaatsen wel kristallijne afzetting microscopisch zichtbaar maar de hoeveelheid volstond niet om de scheur te overbruggen.

Ultrasoonmetingen

Uit de ultrasoonmetingen kon de invloed van de scheurdiepte op de golfsnelheid door het beton duidelijk opgemerkt worden. De methode was wel niet erg precies aangezien de diameter van de zender en de ontvanger groter waren dan de scheurdiepte. De resultaten van de ultrasoonmetingen toonden verder aan dat de golfsnelheid toenam tengevolge van de scheurdichting met epoxy en silicagel. De behandeling met bacteriën en medium alleen had weinig effect op de golfsnelheid doorheen het beton. Een toename van de geluidssnelheid kan erop wijzen dat de porositeit is afgenomen. De toename van de geluidssnelheid werd echter niet enkel ter hoogte van de scheur opgemeten maar ook op meetpunten waar de golven in principe de scheur niet passeren. De toename van de geluidssnelheid was wel het grootst bij de meetpunten waar de golven de scheur passeerden. Volgens Popovics *et al* [47] is dit verschil mogelijk te wijten aan het feit dat de golfsnelheid doorheen het beton afhankelijk is van het watergehalte in het beton. Niet enkel het gemiddelde watergehalte maar ook de verdeling van het water doorheen het beton is hierbij van belang [47]. Er werd ook geprobeerd de ligging van de scheurtip te bepalen aan de hand van de methode voorgesteld door Liu *et al* [52]. Hierbij werden de zender en ontvanger op de bovenzijde van het proefstuk geplaatst, elk aan een kant van de scheur. Uitgaande van de tijd die de golf nodig heeft om vanuit de zender de ontvanger te bereiken kan de ligging van de scheurtip worden bepaald. Om deze methode te kunnen toepassen moest de positie van zender en ontvanger zeer nauwkeurig kunnen worden bepaald en moest de tijd tussen het

uitzenden van de eerste golf en het ontvangen van deze golf zeer precies kunnen worden opgemeten. Aan beide voorwaarden kon niet worden voldaan met de gebruikte proefopstelling in het kader van deze thesis.

Waterdoorlatendheid

Bij de waterdoorlatendheid is de scheurbreedte een zeer belangrijke factor. Volgens onderzoek uitgevoerd door Aldea *et al* [49] stijgt de waterpermeabiliteit voor proefstukken met een scheur van ongeveer 100 micrometer met een factor 3 in vergelijking met niet gescheurd beton. Het verband tussen een breder wordende scheur en een stijgende waterpermeabiliteit werd tijdens het hier besproken onderzoek bevestigd. Het belang van de scheurbreedte komt ook voor in het theoretisch model volgens Aldea *et al* [53], hierin wordt de derde macht van de scheurbreedte gebruikt om het theoretisch debiet doorheen een scheur te berekenen. Uit dit onderzoek bleek dat de theoretische waarden voor de waterpermeabiliteit hoger lagen dan de theoretische waarden, dit werd door de onderzoekers verklaard door het feit dat het theoretisch model uitgaat van perfect rechte en gladde scheurwanden waardoor er minder wrijvingsverliezen optreden tijdens de stroming van water door de scheur. Dit werd bevestigd tijdens dit onderzoek.

De vergelijking van het effect van de verschillende behandelingen op de waterpermeabiliteit was moeilijk omdat de gemiddelde scheurbreedte van de proefstukken sterk varieerde. Het was wel duidelijk dat alle gebruikte behandelingen een daling van de waterpermeabiliteit tot gevolg hadden. De behandeling met *Bacillus sphaericus* in sol-gel met $CaCl_2$ kwam als de beste alternatieve herstmethode naar voren tijdens deze proef. De bekomen resultaten zouden wel beter met elkaar kunnen vergeleken worden indien de methode om scheuren aan te maken een gewenste scheurbreedte zou kunnen opleveren. Door Aldea *et al* [49] werd een methode voorgesteld om een vooropgestelde scheurwijdte te verkrijgen. Het was in ieder geval beter geweest de proefstukken in drie verschillende groepen, afhankelijk van de scheurbreedte, op te delen. Per groep zou dan telkens een proefstuk aan een bepaalde behandeling worden onderworpen. Uiteindelijk zou dan per behandeling een groter bereik van scheurbreedtes onderzocht kunnen worden.

Chloridenindringing

De behandeling met *Bacillus sphaericus* in sol-gel met $Ca(NO_3)_2$ resulteerde in een vermindering van de chloridenindringing. Wanneer gebruik werd gemaakt van $CaCl_2$ als calciumbron werd een duidelijke verhoging van de chloridenpenetratie vastgesteld. Dit wordt waarschijnlijk verklaard door de Cl^- -ionen aanwezig in $CaCl_2$. Om dit te bevestigen werd gebruikt gemaakt van een *Rapid Chloride Test* (zie verder).

2.3 Biodepositie als oppervlaktebehandeling.

De doorlatendheid van beton en mortel wordt voor een belangrijk deel bepaald door de w/c-factor [7]. Indien het watergehalte laag wordt gehouden bij het aanmaken van de mortel zullen het aantal capillaire poriën die water bevatten dalen. Ook de grootte van de capillairen en de interconnectie tussen de capillairen neemt af. Een daling van de w/c-

factor resulteert dus in een daling van de porositeit en de permeabiliteit [6].

Indringingsdiepte van de bacterin in de mortel

Tijdens dit onderzoek werden sporen van *Bacillus sphaericus* tot op een diepte van 10 mm teruggevonden. Misschien zijn de bacteriën nog dieper in het beton doorgedrongen maar dit werd niet onderzocht tijdens dit onderzoek.

Chloridenindringing ten gevolge van het gebruik van CaCl_2 als calciumbron

Ten gevolge van het voedingsmedium, ureum en CaCl_2 , waaraan de proefstukken telkens gedurende 3 dagen werden blootgesteld is er een zekere opname van chloriden gebeurd. Het vloeistof niveau bevond zich ongeveer 1 centimeter boven het te behandelen oppervlak. Ten gevolge van de doorlatendheid van de mortel is er een indringing van de oplossing en dus ook van chloriden opgetreden. Dit bleek uit de *Rapid Chloride Test*. De hogere waarden van de opgemeten chloridenpercentage bij de proefstukken met w/c-factor 0,7 kunnen waarschijnlijk verklaard worden doordat de permeabiliteit van beton met een hoge w/c-factor groter is in vergelijking met mortel met een lagere w/c- factor.

Vorst in combinatie met dooizouten

Bij een stijgende w/c-factor neemt tevens de verwerkingssnelheid toe [30]. Uit onderzoek door Basheer et al [31] blijkt dat de vorstbestendigheid bij stijgende w/c-factoren afneemt. Dit werd bevestigd door het hier besproken onderzoek. Bij de proefstukken met een w/c-factor van 0,5 en 0,6 behandeld met bacteriën werd een groter massaverlies vastgesteld in vergelijking met de onbehandelde elementen. Bij een w/c-factor van 0,7 deed het omgekeerde zich voor. Dit komt misschien door het feit dat er initieel chloriden in het beton aanwezig waren tengevolge het medium waarin de proefstukken werden geplaatst. Dit medium bevatte namelijk naast ureum ook CaCl_2 . Tijdens de *Rapid Chloride Test* werd effectief een stijging van het chloridgehalte bij mortelproefstukken behandeld met medium opgemerkt. Anderzijds zorgden de bacteriën en het gevormde calciumcarbonaat ervoor dat er minder expansieruimte aanwezig was voor de NaCl-oplossing tijdens het bevriezen. Bij de behandelde proefstukken met w/c-factor 0,7 was het massaverlies kleiner in vergelijking met de niet behandelde proefstukken. Mogelijks was hier nog voldoende expansieruimte aanwezig.

Deel IV

Besluiten en verder onderzoek

Hoofdstuk 3

Besluiten

De duurzaamheid van beton wordt voor een groot deel bepaald door de aanwezigheid van scheuren in beton. Schadelijke stoffen voor het beton zoals chloriden, CO_2 en water kunnen tengevolge van deze scheuren makkelijker het beton binnendringen [20], [21], [49]. Om corrosie van de wapening tegen te gaan en de duurzaamheid van het beton op peil te houden moet de scheurbreedte beperkt worden. Om de scheuren te dichten wordt gebruik gemaakt van traditionele zandcementmortels, polymeer gemodificeerde zandcementmortels en kunstharsmortels [34]. De gebruikte herstelmethode is in de eerste plaats afhankelijk van de gevolgen van de beschadiging op de constructie. Om verdere scheurgroei te verhinderen zijn meestal constructieve oplossingen nodig zoals: een extra uitwendige wapening die bestaat uit koolstofvezelversterkte polymeren, een laag ferrocement op de gescheurde zone of een vergroting van de betonsectie [36]. In dit onderzoek werd een mogelijk alternatief bestudeerd dat gebaseerd is op bacteriële carbonaat precipitatie. De invloed van deze behandeling op de scheurdichting en de weerstand tegen vorst-dooicycli in combinatie met dooizouten werd in het kader van dit eindwerk onderzocht.

Tijdens dit onderzoek werd gebruik gemaakt van ureolytische bacteriële culturen. De bacteriën behoren tot de *Bacillus sphaericus* stammen en zijn in staat om $CaCO_3$ te precipiteren door de hydrolyse van ureum. Door naast ureum een calciumbron te voorzien in het voedingsmedium zal het gevormde $CaCO_3$ neerslaan op het betonoppervlak met een porositeitsdaling tot gevolg [44]. Als calciumbron werd gebruik gemaakt van $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ of $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$. De eerste calciumbron heeft als nadeel dat de chloride-ionen de wapening kunnen aantasten.

Om deze techniek ook op beton te kunnen toepassen is de grootste moeilijkheid de hoge pH-waarde in het beton. Een oplossing voor dit probleem is het immobiliseren van de bacteriën in een poly-urethaan (PU) matrix [46]. In het kader van deze thesis werden de bacteriën in sol-gel geïmmobiliseerd. In het totaal werden zes types van behandelingen bestudeerd:

1. $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ + ureum
2. *Bacillus sphaericus* + $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ + ureum
3. *Bacillus sphaericus* geïmmobiliseerd in sol-gel + $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ + ureum
4. *Bacillus sphaericus* geïmmobiliseerd in sol-gel + $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ + ureum

5. Sol-gel

6. Sol-gel met na verharding toevoeging van *Bacillus sphaericus* + $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + ureum

Het effect van deze behandelingen op de scheurdichting werd vergeleken met twee traditionele herstelmethodes:

1. Epoxy (Sikadur-52).
2. Cementgrout (Sikatop-111)

Om onderzoek uit te voeren op gescheurd beton werden twee methodes om gescheurde proefstukken aan te maken gebruikt. Dit resulteerde in twee scheurtypes. Enerzijds een gestandaardiseerde scheur met constante breedte en diepte anderzijds een niet-gestandaardiseerde scheur met variërende breedte en diepte

Om een efficiënte herstelling van de scheur te verkrijgen moet de toegepaste behandeling de scheur voldoende opvullen. Uit microscopisch onderzoek bleek dat de behandelingen op basis van Sol-gel een volledige opvulling van de scheur tot gevolg hadden. Ook bij de traditionele behandeling met epoxy werd de scheur volledig opgevuld. De opvulling van de scheur werd ook door middel van ultrasoon onderzoek onderzocht. Hieruit bleek dat de behandeling met Levasil en epoxy een zekere opvulling van de scheur opleverde.

Om de invloed van de herstelmethode op de transporteigenschappen van gescheurd beton te onderzoeken werd de waterdoorlatendheid en de weerstand tegen chloridenpenetratie beproefd. De resultaten van de waterdoorlatendheidsproeven toonden aan dat alle gebruikte herstelmethoden een verlaging van de waterpermeabiliteit tot gevolg hadden. Bij de traditionele behandelingen had de herstelling met epoxy de laagste waterdoorlatendheid tot gevolg. De behandeling met Levasil + CaCl_2 vertoonde de laagste waterpermeabiliteit bij de niet-traditionele herstelmethodes.

De chloriden penetratie werd bij een behandeling met epoxyhars volledig verhinderd onder de behandelde zone. Ook de behandeling met cementgrout had een verlaging van de chloridenpenetratie in de scheur tot gevolg. Bij de niet-traditionele behandelingen gaf enkel de behandeling met *Bacillus sphaericus* geïmmobiliseerd in sol-gel + $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ bevredigende resultaten. Alle andere methodes zorgden voor een verhoogde chloridenpenetratie in het behandelde oppervlak, enkel de penetratiediepte ter hoogte van de scheurtip werd in bepaalde gevallen gereduceerd.

Het dient ook gezegd dat door de toevoeging van $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ als calciumbron de chloridenpercentage in mortel verhoogde. Deze verhoging was het hoogst in geval van mortel met een w/c-factor van 0,7.

Het gebruik van dooizouten in combinatie met vorst-dooicycli zorgt voor een intensievere 'vorstbelasting' [33]. De behandeling met *Bacillus sphaericus* + CaCl_2 resulteerde voor een w/c-factor van 0,5 en 0,6 tot een groter massaverlies in vergelijking met onbehandelde proefstukken. Enkel voor een w/c-factor van 0,7 viel een vermindering van het massaverlies op te merken.

Hoofdstuk 4

Verder onderzoek

Vooraleer de biodepositiebehandeling op grote schaal kan worden toegepast is het aangeraden volgende aspecten nader te onderzoeken.

Bij het aanbrengen van scheuren in proefstukken zou naar methodes gezocht moeten worden waarbij scheuren met ongeveer constante scheurbreedtes over de volledige hoogte en diameter van het proefstuk ontstaan. De methode die werd toegepast in het onderzoek uitgevoerd door Aldea *et al* [49] kan hiervoor zeker in aanmerking komen

De invloed van chloriden in de calciumbron op de chloridenpenetratie moet verder onderzocht worden.

De duurzaamheid van de biodepositiebehandeling zou nagegaan moeten worden. Meer specifiek wordt gedacht aan de invloed van zuren en basen. Ook de hechtsterkte tussen het beton en het materiaal waarmee de scheur is opgevuld zou in verder onderzoek bestudeerd kunnen worden

Om de biodepositiebehandeling economisch te kunnen toepassen moet er nagedacht worden over een eenvoudige en snelle methode om de bacteriën aan te brengen.

Tenslotte kan ook nagegaan worden of het mogelijk is om bacteriën, in een dormante fase, tijdens de productie van beton aan de mortel toe te voegen. Op het moment dat een scheur ontstaat zouden de bacteriën onder invloed van water en zuurstof uit hun dormante fase kunnen gehaald worden en daarna door biodepositie de ontstane scheur terug dichtend. Op deze manier zou een zelf-helend beton geproduceerd kunnen worden.

Deel V

Literatuurstudie

Bibliografie

- [1] American association of state highway and transportation officials. The bottom line. *AASHTO*, pp. 1-5, 2002.
- [2] Mehta P.K. Durability-critical issues for the future. *Concrete international*, vol. 19, pp. 27-33, 1997.
- [3] Wittmann F.H. 5th international conference on fracture mechanics of concrete structures. pp. 3-10, 2004.
- [4] McDonald D.B. Rogalla E.A., Krauss P.D. Reducing transverse cracking in new concrete bridge decks. *Concrete Construction*, vol. 89, pp. 348-361, 1992.
- [5] CUR rapport 172. Duurzaamheid en onderhoud van betonconstructies. *Stichting CUR*, pp. 505, 1998.
- [6] Claisse P. Transport properties of concrete. *Concrete international*, pp. 43-48, 2005.
- [7] Dechamps Y. De duurzaamheid van beton. *Betontechnologie*, pp. 325-332, 1994.
- [8] NBN EN 1992-1-1. Ontwerp en berekening van betonconstructies-deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen. 2005.
- [9] NEVILLE A.M. Properties of concrete (fourth and finale edition). pp. 844, 1995.
- [10] HENS H. Bouwfysica 1 - warmte - en massatransport. *Acco*, pp. 214, 1992.
- [11] Schubert P. Carbonatation behaviour of mortars and concretes made with fly ash. *Katharine and Bryant Mather International conference on Concrete Durability*, pp. 1945-1962, 1987.
- [12] Rodriguez P. Ramirez E. Alonso C. Andrade C. Gonzalez J., Feliu S. Some questions on the corrosion of steel in concrete-part i: when,how and how much steel corrodes. *Materials and Structures*, vol. 29, pp. 64-72, 1996.
- [13] Defranq J. Constructie van chemische apparatuur. *cursustekst Universiteit Gent*.
- [14] Grade K. Vinkeloe R. Roth R. Schröder F., Smolczyk H. Einfluss von luftkohlensäure und feuchtigkeit auf die beschaffenheit des betons als korrosionschutz für stahleinlagen. *DAfStb*, 1967.
- [15] www.ervas.nl. Schadeoorzaken beton.
- [16] Ceb 148. Durability of concrete structures. *State-of-the-art report*, pp. 329, 1982.

- [17] Northwood D.O. Roy S.K., Poh K.B. Durability of concrete-accelerated carbonatation and weathering studies. *Pergamon, Building and Environment*, nr. 4, pp. 597-606, 1997.
- [18] Englefired R. Preventive protection by low permeability coatings, papers for the one day conference. *Concrete Society*, pp. 107-117, 1985.
- [19] Johannesson B. Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. *Cement and concrete research*, vol. 32, pp. 925-931, 1997.
- [20] De Schutter G. Quantification of the influence of cracks in concrete structures on carbonation and chloride penetration. *Magazine of Concrete Research*, vol. 51, nr. 6, pp. 427-435, 1999.
- [21] Van Damme N. Numerieke simulatie van de invloed van scheuren in betonconstructies op carbonatatie en chloride penetratie. *scriptie Universiteit Gent*, pp. 136, 2000.
- [22] Machida A. Win P.P., Watanabe M. Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 1073-1079, 2004.
- [23] Gopalan M.K. Haque M.N., Kayyali O.A. Fly ash reduces harmful chloride ions in concrete. *ACI Materials Journal*, vol. 89, pp. 238-241, 1992.
- [24] Plunkett B.A. Walden P.J. Hillier S.R., Sangha C.M. Effect of concrete curing on chloride ions ingress. *Magazine of concrete research*, vol. 52, pp. 321-327, 2000.
- [25] Bazant Z.P. Xi Y. Modeling chloride penetration in saturated concrete. *Journal of materials in civil engineering*, pp. 58-65, 1999.
- [26] Marchand J. Gérard B. Influence of cracking on the diffusion properties of cement-based materials. part-i: influence of continuous cracks on the steady-state regime. *Cement and concrete research*, vol. 30, pp. 37-43, 2000.
- [27] Huberty J.M. Cement en beton. *Febelcem*, pp. 53-89, 2004.
- [28] CEB. Durable concrete structures-design guide. *Bulletin d'information*, nr. 183, pp. 112.
- [29] NBN B 12-109. Cement-cement met begrenst alkali-gehalte. *Belgisch instituut voor normalisatie*.
- [30] Cleland D.J. Basheer L., Kropp J. Assessment of durability of concrete from its permeation properties: a review. *Construction and Building Materials*, nr. 15, pp. 93-103, 2001.
- [31] Cleland D.J. Basheer L. Freeze-thaw resistance of concrete treated with pore liners. *Construction and Building Materials*, pp. 1-9, 2005.
- [32] Pigion M Carles-Gibergues A. *La durabilit des bttons en ambiance hivernale rigoureuse*. Presses Ponts et Chaussées, 1992.
- [33] www.enci.nl. Bestandheid van beton tegen vorst, al dan niet in combinatie met dooizouten.

- [34] Taerwe L. Algemene principes en werkwijzen voor de herstelling en bescherming van betonoppervlakken. *curus tekst Universiteit Gent*.
- [35] Malhotra V.M. *Advances in concrete technology*. Natural Resources Canada.
- [36] Jaafar M. Razali A. Kadir J. Noorzaei A. Waleed A. Thanoon, M.S. Repair and structural performance of initially cracked reinforced concrete slabs. *Construction and Building Materials*, pp. 595-603, 2005.
- [37] Hamada H. Mohammed T.U., Otsuki N. Corrosion of steel bars in cracked concrete under marine environment. *Journal of materials in civil engineering*, pp. 460-469, 2003.
- [38] Ryu J.S. Influence of crack width, cover depth, water-cement ratio and temperature on the formation of electrodeposits on the concrete surface. *Magazine of concrete research*, nr. 1n pp. 35-40, 2003.
- [39] Proceedings of the international rilem workshop-chloride penetration into concrete. pp. 243-249, 1995.
- [40] Vangheel T. Herremans T. Biologisch herstel van schade aan gebouwen: biomineralisatie. *Eindwerk Katholieke Universiteit Leuven*, pp. 1-128, 2002-2003.
- [41] Verstraete W. Hammes F. Key roles of ph and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation". *Re/Vieus in Environmental Science and Bio/Technology*, nr. 1, pp. 3-7, 2002.
- [42] Oriol G. La biominralisation applique la conservation du patrimoine: bilan de dix ans d'expérimentation. *Restaurar la memoria, Valladolid (Spanje)*, 2000.
- [43] Mastromei G. Tiano P., Biagiotti L. Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation. *Journal of Microbiological Methods*, nr. 36, pp. 139-145, 1999.
- [44] Bang S.S. Stock-Fisher R. S., Galinat J.K. Microbiological precipitation of CaCO_3 . *Soil biology and biochemistry*, nr. 31, pp. 1563-1571, 1999.
- [45] Bang S.S. Islam M.R. Gollapudi U.K., Knutson C.L. A new method for controlling leaching through permeable channels. *Chemosphere*, nr. 31, pp. 695-705, 1995.
- [46] Bang S.S. Ramachandran S.K., Ramachandran V. Remediation of concrete using micro-organisms. *ACI Material journal*, pp. 3-9, 2001.
- [47] Popovics S. Effects of uneven moisture distribution on the strength of and wave velocity in concrete ultrasonics. *Concrete international*, vol. 43, pp. 429-434, 2005.
- [48] NBN B05-202. Proeven op bouwmaterialen - vorstbestendigheid - porometrie. 1976.
- [49] Karr A. ALDEA C.-M., Shah S.P. Water permeability of cracked high strength concrete. *Technical Report*, nr. 77, 1998.

- [50] Debrouwer D. Restauratie van betonoppervlakken: Het effect van bacteriële carbonaat precipitatie op de duurzaamheid van beton. *eindwerk Universiteit Gent*, pp. 106-108, 2005-2006.
- [51] NTN 018. Proeven op beton: bestandheid tegen dooizouten. pp. 1-10, 1999.
- [52] Tsung-Tsong Wu Pei-Ling Liu, Chong-Dao Tsai. Effects of surface-breaking concrete cracks using transient elastic waves. *NDTE International*, vol. 29, pp. 323-331, 1996.
- [53] Shah S.P.-Karr A. Aldea C.-M., Ghandehar M. Combined effect of cracking and water permeability of concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 2000.
- [54] CUR rapport 90-3. Duurzaamheid van maritieme constructies. *Stichting CUR*, pp. 47, 1981.
- [55] Vitaliani R. Saetta A., Scotta R. Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete. *ACI Materials Journal*, vol. 90, nr. 5, pp. 120, 1984.
- [56] CUR rapport 84-6. Agressiviteit milieu en duurzaamheid betonconstructies. *Stichting CUR*, pp. 47, 1981.
- [57] HUBERTY J.M. Cement en beton. *Handboek duurzaamheid en onderhoud van betonconstructies*, pp. 53-89, 1994.
- [58] Rilem 25 Pem. Waterwerende oppervlaktebehandeling. *TV 224, WTCB*, pp. 1-49, 2002.
- [59] DIN 52615. Bestimmung der wasserdampfdurchlässigkeit von bau - und dämmstoffen. pp. 1-6, 1973.
- [60] Najjar L. Bazant Z. Drying of concrete as a non-linear diffusion problem. *Cement and Concrete Research*, vol. 1, pp. 461-473, 1971.
- [61] Beeldens A.-Vincke E. Van Gemert D. Verstraete W. De Belie N., Monteny J. Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulfuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes. *Cement and concrete Research*, vol. 34, pp. 2223-2236, 2004.