

Duurzaamheidsaspecten van ultra hogesterktebeton

Emmanuel Craenen

Promotoren: prof. dr. ir. Geert De Schutter, prof. dr. ir. Nele De Belie
Begeleiders: Jeroen Dils, Mathias Maes

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

Vakgroep Bouwkundige Constructies
Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2013-2014



Duurzaamheidsaspecten van ultra hogesterktebeton

Emmanuel Craenen

Promotoren: prof. dr. ir. Geert De Schutter, prof. dr. ir. Nele De Belie
Begeleiders: Jeroen Dils, Mathias Maes

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

Vakgroep Bouwkundige Constructies
Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2013-2014



Toelating tot bruikleen

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

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

Zwijnaarde, juni 2014

Emmanuel Craenen

Woord vooraf

Naarmate het einde van deze thesis nadert, heb ik de neiging terug te grijpen naar hoe het allemaal begon. Ik zie namelijk verschillende parallellen tussen deze thesis en het academisch parcours dat ik heb doorlopen, alsook tussen de lessen die ik uit beiden onthoud. Als naïeve en onwetende eerstejaarsstudent, kreeg ik al bij het eerste examen een les in nederigheid te verwerken. Naarmate de ervaring toenam, en ik mij doorheen de cursussen worstelde, won ik aan zelfzekerheid, om uiteindelijk aan een thesis aan te belanden. Bij het einde van mijn thesis moet ik opnieuw besluiten dat ik een les in nederigheid te slikken krijg. Hoe meer ik namelijk heb gezien en gelezen, hoe meer ik inzie hoeveel meer er nog te lezen en te zien is, hoeveel mensen mij reeds vooraf gingen in onderzoek, en hoe bescheiden mijn bijdrage aan de wetenschap maar is. Mijn academisch parcours was een ongelooflijk avontuur, een mooi hoofdstuk uit mijn leven. Deze thesis is daarbij niet zozeer het einde van dat hoofdstuk maar eerder het begin van het volgende. Eentje waarin ik de wereld met meer diepgang en nieuwsgierigheid zal kunnen ontdekken als ooit tevoren.

In de loop van mijn studies heb ik meer dan eens gehoord: “Hoe kan je nu zoveel vakken hebben over beton? Beton is toch gewoon beton, en daarmee uit?”. Welnee, beton is meer dan gewoon beton, en het boeit mij meer dan ooit tevoren. Passie voor beton had ik al langer, maar is niet in onbelangrijke mate toegenomen tijdens de introductie cursus “Betontechnologie”, in het tweede jaar burgerlijk ingenieur.

In deze thesis wordt ultra hogesterktebeton behandeld, een bijzondere soort beton. Omdat het altijd iets sterker, hoger, langer en slanker kan en mag. De technologie van ultra hogesterktebeton draait rond ambitie, en dat sprak mij wel aan. Ambitie om het altijd beter te doen dan de vorige keer. Ambitie om steeds een hogere druksterkte te halen dan bij het vorige mengsel, een lagere porositeit, betere eigenschappen. Al deze aspecten komen dan ook uitvoerig aan bod in dit onderzoek. Duurzaamheid is dan weer de hype van het laatste decennium, en kon niet ontbreken als fundamenteel onderwerp van dit werk. Een materiaal onderwerpen aan een zogenaamde *Life Cycle Analysis*, waarbij de volledige levenscyclus van de materialen onder de loep wordt genomen is tegenwoordig steeds meer een evidentie. Als men een materiaal ontwikkelt en gebruikt dat tegen allerhande aantastingen bestendig is, wordt alvast een hele stap vooruit gezet.

Het onderwerp van onderhavige thesis stond aanvankelijk in geen enkele onderwerpenlijst. Ik wens dan ook graag uitdrukkelijk prof. dr. ir. De Schutter en prof. dr. ir. De Belie te bedanken om open te staan voor mijn “creatieve illuminatie” toen ik op de proppen kwam met een zelf uitgevonden thesisonderwerp. Beiden zagen potentieel in het koppelen van duurzaamheid aan ultra hogesterktebeton, zodat het onderwerp “Duurzaamheidsaspecten van ultra hogesterktebeton” na een korte brainstormsessie prompt wél op de onderwerpenlijst verscheen. Met mijn naam erachter.

Het onderwerp van mijn thesis lag dan wel vast, het avontuur moest dan natuurlijk nog beginnen. Ik wil dan ook graag mijn begeleiders ir. M. Maes en ir. J. Dils bedanken voor de dagdagelijkse begeleiding en het geduld bij mijn eindeloze vragen.

I would also like to thank in particular Dr. Ir. Anya Vollpracht and Ir. Johannes Haufe, associated to the RWTH Aachen. Thank you for your warm welcome, your expertise related to sulphate attacks, for your patient coaching and feedback. Thank you as well for making me discover Aachen during lunch breaks. Thank you to Prof. Dr. Ir. De Belie for introducing me, and making this collaboration possible.

Bijzondere dank aan Ir. Pieterjan Criel, voor je geniaal brein en uitmuntende kennis van Matlab en Python. Jouw Python-codes waren onontbeerlijk voor de visualisatie van mijn resultaten omtrent zuuraantasting. Bedankt voor de lange brainstorm-uren, zowel tijdens je uren als op officiële verlofdagen. Weer gerust, binnen een paar maand kijken we daar ongetwijfeld met een glimlach naar terug.

Zoals ik al aanhaalde, deze thesis is een scharnierpunt tussen twee grote hoofdstukken. Hoewel ik het volgend hoofdstuk grotendeels zelf in handen heb, was vorige hoofdstuk nooit mogelijk geweest zonder een aantal mensen. Velen onder hen heb ik nooit echt bedankt, of toch zeker niet voldoende. Hoog tijd om daar verandering in te brengen dunkt me.

Allereerst, dank je wel Papa en Mama om mij deze springplank naar de toekomst geboden te hebben. Ik weet welke inspanningen dit voor jullie betekent en zal jullie hier nooit genoeg voor kunnen bedanken. Ondanks al mijn “hetlukttochnooit-momenten”, zijn jullie elke dag in mij blijven geloven, en zijn jullie mij altijd blijven steunen. Jullie hebben mij de voorbije jaren bovendien steeds vaker mijn eigen weg laten gaan, mij de vrijheid gegund mijn eigen keuzes te maken. Daar ben ik jullie heel dankbaar voor. Ik zie jullie graag!

Dank jullie wel ook Papy en Mamy voor de onvoorwaardelijke steun. Dank jullie wel dat ik mij vijf jaar lang drie maand per jaar bij jullie mocht opsluiten om te blokken. Dank jullie wel voor al het lekker eten, de wandelingen, en natuurlijk voor de ettelijke kilo’s smurfen (toch ook een beetje dank aan Haribo daarvoor). Dank jullie wel ook voor het zoeken naar de ontbrekende komma’s en andere foutjes in deze thesis.

Speciale dank gaat ook uit naar Jolien Dewaele, zonder wie ik waarschijnlijk nooit verder was geraakt dan de vakken der Wiskundige Analyse. Jouw deskundige en pedagogisch uitleg is goud waard geweest!

Speciale dank ook aan Thibault De Jaeger, met wie ik mijn eerste stappen zette in het Gentse nachtleven. Dank je wel voor de Alex-burgers na het squashen, waarmee we drie keer meer calorieën binnenkregen als dat we zo pijnlijk kwijt waren geraakt bij het sporten... Dank je wel voor al de wijze momenten samen, dat er nog velen mogen volgen.

Jonas Bernaert, Brecht Devolder en Christophe Cassaert, dank jullie wel voor de vrolijke bende Pummels die wij mogen zijn. Dank jullie wel voor het geduld bij de groepswerken, voor de practica Topografie die we nooit zullen vergeten, voor de topreis naar Corsica, voor de eindeloze Pummels-gesprekken op Facebook, en voor zoveel meer! Ik sta alvast te springen voor Pummels IV. Christophe, voor jou een kleine extra dank u. Dank u voor de vele uren in het labo samen, en voor de organisatie van de China-reis waar we samen voor geknukt hebben, en waar we nog lang over zullen napraten.

Twintig maand geleden werd mijn leven helemaal omgegooid door een heel speciaal iemand. Dank je wel Stephanie Bracke voor je liefde en tederheid, voor je geduld met mijn onmogelijk karakter, je luisterend oor, je knuffels, je steun, en voor al die andere dingen, waar ik niet meer zonder kan!

Ten slotte verdient een zeer speciaal iemand een laatste bedanking. Dank je wel DJ Hardwell voor je On-Air setjes. Jouw talent heeft meer dan één verslag helpen afwerken, meer dan één nacht helpen doortrekken, meer dan één belonend-feestje-achteraf onvergetelijk gemaakt. Ik kan zonder overdrijven stellen dat 80% van deze thesis geschreven is tijdens het luisteren naar jouw topmuziek.

Emmanuel Craenen
Gent 2014

Duurzaamheidsaspecten van ultra hogesterktebeton

door

Emmanuel Craenen

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

Promotoren: prof. dr. ir. Geert De Schutter, prof. dr. ir. Nele De Belie
Begeleiders: Jeroen Dils, Mathias Maes

Vakgroep Bouwkundige Constructies
Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Universiteit Gent
Academiejaar 2013-2014

Samenvatting

Ultra hogesterktebeton is een relatief recent materiaal, waarbij de kwaliteit van traditioneel beton, uitgedrukt door middel van druksterkte, met een factor drie of meer verbeterd wordt. Dit wordt mogelijk gemaakt door middel van een zorgvuldige materiaalselectie, granulometrische optimalisatie en mengprocedure onder vacuüm. Thermische en/of mechanische nabehandeling laten toe de performanties nog bijkomend op te drijven.

Omdat duurzaamheid een ruim begrip is, werd in het kader van deze experimentele thesis bewust gekozen om zich toe te spitsen op een aantal concrete deelaspecten die passen in het volledige duurzaamheidsplaatje. Daar (open) porositeit, luchtgehalte en interconnectiviteit van de microstructuur van groot belang zijn in de kwaliteit van het beton en de prestaties ervan in schadelijke omgeving, krijgt dit ruime belangstelling in dit onderzoek. Een lage porositeit en interconnectiviteit van deze poriën blijkt namelijk bij te dragen tot een hoge duurzaamheid van het materiaal. In het bijzonder worden bestendigheid tegen chloride-aantasting, zuuraantasting en sulfaataantasting bestudeerd, waarbij uitzonderlijke prestaties worden opgetekend voor de geteste kwartszandbeton en ultra hogesterktebeton.

Trefwoorden

Ultra hogesterktebeton, kwartszandbeton, vacuüm mengen, duurzaamheid, kwikporosimetrie, luchtholtenanalyse, wateropslorping, sulfaataantasting, zwavelzuuraantasting, chloride-aantasting

Duurzaamheidsaspecten van ultra hogesterktebeton

Emmanuel Craenen

Supervisors: Prof. Dr. Ir. G. De Schutter and Prof. Dr. Ir. N. De Belie

Abstract

Ultra high performance concrete (UHPC) has known an increased popularity the last decade, as skyscrapers and other mega structures arise all around the globe. The need for state of the art materials with extraordinary features and performances has seldom been greater, as human ambition in construction grows larger every day.

In this work the concrete strength is however not the main topic. Rather some features related to durability get our full attention. From experimental tests in a laboratory environment UHPC appears to perform extraordinary well regarding sulphate, acid and chloride attacks. This can be related to a low porosity and low interconnectivity of the microstructure. This statement is supported by porosity enquiries performed with Air Void Analysis (AVA), water absorption tests and Mercury Intrusion Porosimetry (MIP), which all show indeed a very low porosity of the tested concretes.

Key Words

Ultra high performance concrete, reactive powder concrete, vacuum mixing, durability, Mercury Intrusion Porosimetry, Air Void Analysis, water absorption, sulphate degradation, sulphuric acid degradation, chloride degradation

1. Introduction

The concrete samples for this master dissertation were produced by two different mixers. A first set of samples was produced by the mixer R08 – Vac by Eirich. The other samples were produced by a smaller mixer, the R02 – Vac, also by Eirich. All samples were produced under vacuum, as this has a favourable influence on the strength and air void ratio of the concrete.

Four different types of concrete were tested throughout this experimental program: an ultra high performance concrete (UHPC), a high performance concrete (HPC), a reactive powder concrete (RPC) and a traditional concrete (TC). The traditional concrete is meant as a reference. The four concretes mentioned, are characterized by decreasing compression strength and

increasing porosity. For all concrete mixes a cement of the type CEM I 52,5 N HSR was used. One should keep in mind that, due to the use of this type of high quality cement, the traditional concrete is already one of a rather good quality.

All the performed tests were executed on several samples, allowing the comparison of mean values, rather than the comparison of individual results.

2. Ultra High Performance Concrete

A concrete fits in the category “high performance concrete” when a compressive strength of 60 MPa is exceeded, and fits in the category “ultra high performance concrete” when a compressive strength of at least 150 MPa is observed. This can be obtained by a careful selection of the mixture components, adopting an

adapted production process under vacuum and applying thermal and/or mechanical treatment after demolding.

In this work the ultra high performance concrete mixture and high performance concrete mixture have exactly the same composition. A difference of approximately 20 MPa is obtained by applying a thermal treatment of 48 hours in a warm water bath of 90°C right after demolding.

With a compressive strength of ± 160 MPa, the ultra high performance concrete reaches the predetermined strength of 150 MPa. The high performance concrete, with the same composition as the ultra high performance concrete mixture but without thermal treatment, has a compressive strength of about 140 MPa. This is almost the value required to have an ultra high performance concrete. The reactive powder concrete has a similar compressive strength as the high performance concrete. The traditional concrete finally, has a compressive strength of about 60 MPa. This means the traditional concrete could in fact be considered as a high performance concrete, but as there is still a factor 2,5 difference in compressive strength, it still makes sense to consider this concrete as a reference compared to the other three concretes.

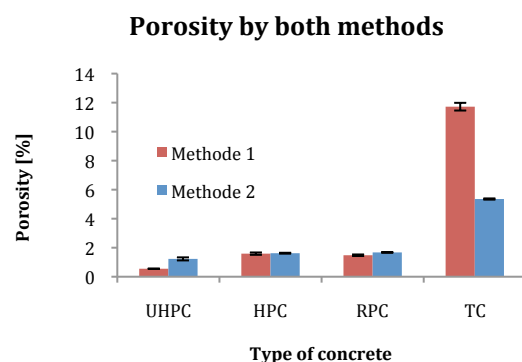
For the high and ultra high performance concrete an 0/4 porphyry fraction is used as coarse element. For traditional concrete a traditional granulate is used. For the reactive powder concrete however, quartz is the coarsest element.

3. Porosity and air content

The porosity of the concrete mixtures was investigated by both Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) and water

absorption. The air content was estimated by an Air Void Analysis (AVA).

The water absorption was executed by two methods, to estimate the influence of drying the samples before (*Method 1*) rather than after (*Method 2*) performing the water absorption. In both cases the water absorption was performed under vacuum. From Picture 1 can be concluded that drying the samples before performing water absorption only matters for traditional concrete.



Picture 1: Porosity for each concrete, by two methods: drying before water absorption (red) and after water absorption (blue)

This difference in results for traditional concrete can be explained by a disturbed microstructure due to the thermal shock during drying, and the formation of microcracks. These increases the interconnectivity of the pores, and obviously increases the water absorption capacity.

The MIP delivers slightly higher values for the porosity, as a larger range of pores can be reached with this method. The lower porosity of UHPC, HPC and RPC, compared to TC, are however confirmed.

The results of the air void analysis show smaller discrepancies between the different mixtures. However, possible difficulties, that can be encountered with the processability of fresh UHPC, due to extreme viscosity, come to light. Indeed,

despite the vacuum mixing procedure, larger air content is observed for UHPC.

4. Acid attacks

To investigate the concrete samples on acid resistance, sulphuric acid was used. This choice is motivated by the practical relevance, as this acid can be found for example in sewer pipes and several branches of industry.

The acid degradation is generated dynamically, by using the TAP installation, developed by De Belie (2001). This dynamic approach consists of an alternating wetting and drying of the samples, as the samples are partially submerged in a 0,5 m% SO_4^{2-} -solution and continuously turn around a rotating axis.

Sulphuric acid degradation is characterized by mass loss as well as swelling of the material. It's important to consider both degradation phenomena separately. The evolution of the surface roughness of the samples also gives an indication of the degradation of the concrete. The degradation is accelerated by brushing the samples on regular basis.

After almost six months of exposure of the samples to the acid solution, very little degradation is observed on all samples. The ultra high performance concrete shows the best results, but all concretes have in fact similar results. The increased surface roughness of the samples, gives the best visualisation of the damage increasing in time.

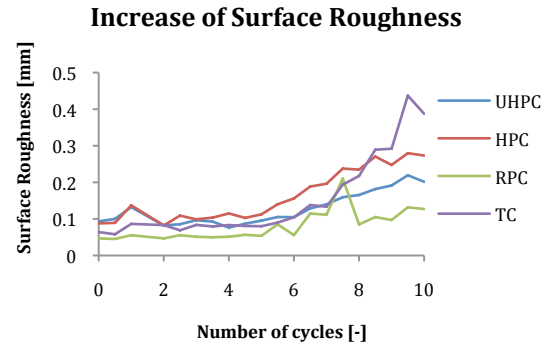


Figure 2: Increase of surface roughness due to acid degradation

The surface roughness is defined as follows,

$$R_a = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L |y(x)| dx$$

and is displayed on Figure 2 in function of the number of cycles. The first 4 cycles lasted for one week, the last 5 cycles lasted for three weeks.

5. Chloride Attacks

Resistance against chlorides is measured by determining the chloride migration. This was assessed by performing rapid chloride migration tests (RCM) at three different ages. This way, not only the sensitiveness of the concrete against chlorides is known, but also it's evolution in time. The results of these tests are shown in Figure 3.

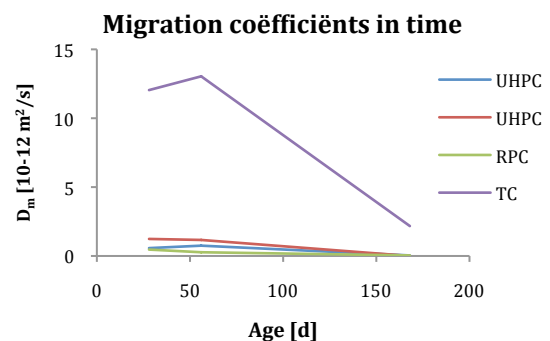


Figure 3: The evolution of the non steady state chloride migration coefficients in time

The RCM performed after 28 days shows a clear difference between the performances of traditional concrete and the other tested concrete. The

performances of RPC, HPC and UHPC are similar for chloride resistance. At the age of 168 days, the traditional concrete behaves much better, as the microstructure has grown denser. The three other concretes however show almost no chloride migration at all. Possibly, this is not only due to the extraordinary performance of the concrete, but also to the limits of the testing procedure, that was designed empirically for traditional concrete. Adapting the testing procedure can be an interesting topic for further research.

6. Sulphate Attacks

The tests performed to investigate sulphate resistance were performed in close collaboration with the RWTH Aachen. Sulphates can cause Delayed Ettringite Formation (DEF) and in some cases also gypsum formation. This causes swelling of the samples, and in the worst case crack formation. The degradation due to sulphate attacks is investigated on samples with dimensions $150 \times 40 \times 10 \text{ mm}^3$. These samples were stored in sulphate solutions of 3000 mg/l and 30.000 mg/l, both stored at 5° C. The degradation is typically investigated by measuring the elongation as well as the densification (expressed with the dynamic modulus of Young).

The elongation was measured with the Millitast apparatus. The dynamic modulus of Young was measured by sending ultrasonic waves through the samples. To be sure to take in consideration only the changes due to ettringite formation, and not to aging of the concrete, all results were compared to reference samples, stored in $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

As no significant degradation was noticed, XRD was performed on the samples stored in 30.000 mg/l, to investigate if any ettringite or gypsum was formed at all. In some samples, small amounts of ettringite were found, but never in larger amounts than those in the reference samples. This means that the ettringite present in the samples is early formed ettringite, formed during the hydration process, and was not formed by the exposure to sulphates.

7. Conclusions

In general one can conclude that HPC, RPC and UHPC show a better behaviour in aggressive environment compared to TC. As a large difference in porosity is proven to exist between the good performing concretes and the less good performing concretes, this can be considered to be the main cause. A low interconnectivity also avoids that absorbed pollutants find their way deep into the material.

8. References

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

DEEL 1

1	ULTRA HOGESTERKTEBETON	1
1.1	SITUERING.....	1
1.2	DEFINITIES.....	1
1.3	SAMENSTELLING VAN UHPC.....	2
1.3.1	<i>Water</i>	2
1.3.2	<i>Cement</i>	2
1.3.3	<i>Granulaten</i>	3
1.3.4	<i>Additieven</i>	3
1.3.5	<i>Superplastificeerders</i>	4
1.3.6	<i>Microvezels</i>	4
1.3.7	<i>Reacties met Portlandcement</i>	5
1.4	EIGENSCHAPPEN VAN UHPC.....	6
1.4.1	<i>Eigenschappen van het vers beton</i>	6
1.4.2	<i>Uitzonderlijk hoge dichtheid</i>	7
1.4.3	<i>Hoge tot extreme sterkte</i>	9
1.4.4	<i>Krimp- en kruipgedrag</i>	9
1.5	INVLOEDSFACTOREN OP DE KWALITEIT VAN UHPC.....	10
1.5.1	<i>Pakkingdichtheid van fijne elementen</i>	10
1.5.2	<i>Gebruik van additieven</i>	11
1.5.3	<i>Thermische nabehandeling</i>	11
1.5.4	<i>Mechanische nabehandeling</i>	12
1.5.5	<i>Gebruik van vezels</i>	13
2	ALGEMENE DUURZAAMHEIDSASPECTEN VAN UHPC	15
2.1	INTRODUCTIE	15
2.2	DUURZAAMHEID VAN UHPC.....	15
2.3	INVLOED VAN POROSITEIT EN CONNECTIVITEIT OP DUURZAAMHEID.....	16
2.3.1	<i>Invloed van porositeit op carbonatatie</i>	16
2.3.2	<i>Invloed van porositeit op vries-dooischade</i>	17
2.3.3	<i>Invloed van porositeit op aantasting door zuren en zuren</i>	17
2.4	ASR-SCHADE.....	17
2.5	ZUURAANTASTING.....	18
2.5.1	<i>Oorsprong van zuren</i>	18
2.5.2	<i>Schademechanismes</i>	18
2.5.3	<i>Testmethodes</i>	19
2.5.4	<i>Testen met melkzuur en zwavelzuur</i>	20
2.6	CHLORIDE-AANTASTING.....	21
2.6.1	<i>Oorsprong van chloriden</i>	21
2.6.2	<i>Schademechanismes</i>	21
2.6.3	<i>Testmethodes</i>	21
2.7	SULFAATAANTASTING.....	23
2.7.1	<i>Oorsprong van sulfaten</i>	23
2.7.2	<i>Schademechanismes</i>	23
2.7.3	<i>Chemische analyse van de schademechanismes</i>	24
2.7.4	<i>Testmethodes</i>	26

DEEL 2

3	ALGEMENE BESCHRIJVING EN MOTIVERING EXPERIMENTEEL PROGRAMMA	29
4	BESCHRIJVING GEBRUIKTE MENGSELS EN MOTIVERING MATERIAALKEUZES	30
4.1	KEUZE VAN DE BETONTYPES	30
4.2	KEUZE VAN DE GRANULATEN	30
4.3	EXACTE SAMENSTELLING MENGSELS	32
4.4	MENGPROCEDURE MET GROTE VACUÛMMENGER	36
4.5	MENGPROCEDURE MET DE KLEINE VACUÛMMENGER.....	36
4.6	STERKTE-EIGENSCHAPPEN BETONMENGSELS.....	38
5	ZUURAANTASTING	39
5.1	SITUERING.....	39
5.2	PROEFSTUKKEN	39
5.3	PROEFOPSTELLING EN METHODE	40
5.4	VERWERKING RESULTATEN.....	41
5.5	RESULTATEN	44
5.5.1	<i>Materiaalverlies.....</i>	<i>44</i>
5.5.2	<i>Ruwheidsgetal.....</i>	<i>51</i>
5.5.3	<i>Vergelijking met eerder onderzoek.....</i>	<i>51</i>
5.6	KRITISCHE CONCLUSIE.....	52
6	CHLORIDE-AANTASTING	54
6.1	SITUERING.....	54
6.2	PROEFSTUKKEN	54
6.3	PROEFOPSTELLING EN METHODE	54
6.4	VERWERKING RESULTATEN.....	58
6.5	RESULTATEN	59
6.6	KRITISCHE CONCLUSIE.....	61
7	SULFAATAANTASTING	64
7.1	SITUERING.....	64
7.2	PROEFSTUKKEN	64
7.3	PROEFOPSTELLING EN METHODE	65
7.3.1	<i>Opmeting lengteverandering.....</i>	<i>66</i>
7.3.2	<i>Opmeting verandering in dynamische E-modulus</i>	<i>67</i>
7.4	VERWERKING RESULTATEN.....	68
7.4.1	<i>Lengteverandering.....</i>	<i>68</i>
7.4.2	<i>Verandering in dynamische E-modulus</i>	<i>69</i>
7.5	RESULTATEN	69
7.5.1	<i>Lengteverandering.....</i>	<i>69</i>
7.5.2	<i>Verandering in dynamische E-modulus</i>	<i>69</i>
7.6	BIJKOMEND ONDERZOEK.....	70
7.6.1	<i>Motivering.....</i>	<i>70</i>
7.6.2	<i>Analyse van de proefstukken met X-stralen diffractie (XRD)</i>	<i>70</i>
7.7	KRITISCHE CONCLUSIE.....	73
8	INTRODUCTIE TOT HET PORIËNONDERZOEK	75
9	LUCHTHOLTENANALYSE	76
9.1	PROEFSTUKKEN	76
9.2	LUCHTHOLTENANALYSE.....	77
9.3	RESULTATEN	77

10 VACUÛMVERZADIGING	79
10.1 METHODE 1, VOLGENS NBN B24-213	79
10.1.1 <i>Testprocedure</i>	79
10.1.2 <i>Resultaten</i>	80
10.2 METHODE 2, VOLGENS NBN B15-215	80
10.2.1 <i>Testprocedure</i>	80
10.2.2 <i>Resultaten</i>	82
11 KWIKPOROSIMETRIE	83
11.1 PROEFSTUKKEN	83
11.2 MIP-ANALYSE	83
11.3 RESULTATEN	84
12 VERGELIJKING VERSCHILLENDE POROSITEITSONDERZOEKEN	86
13 ALGEMENE CONCLUSIES	87

DEEL 3

BIJLAGE A: GRAFIEKEN LENGTEVERANDERING (SULFAATAANTASTING)	91
BIJLAGE B: GRAFIEKEN DYNAMISCHE E-MODULUS (SULFAATAANTASTING)	94
BIJLAGE C: XRD-SPECTRA (SULFAATAANTASTING)	97
REFERENTIES	99

Nomenclatuur

TM:	Traditionele mortel
TB:	Traditioneel beton
HSB:	Hogesterktebeton
UHSB:	Ultra Hogesterktebeton
TC:	Traditional Concrete
HPC:	High Performance Concrete
UHPC:	Ultra High Performance Concrete
RPC:	Reactive Powder Concrete
SCC:	Self-Compacting Concrete
W/C-factor	Water/Cement factor
W/B-factor	Water/Binder factor
W/P-factor	Water/Poeder factor
ITZ:	Inter Transition Zone
PCE:	Polycarboxilaat Ethers
Vol.-%:	Volumepercent
m%:	Massapercent
ASR:	Alkali-Silica Reaction
DEF:	Delayed Ettringite Formation
CH:	Calciumhydroxide
CSH:	Calciumsilicaathydraat
HSR:	High Sulphate Resistance
SEM:	Scanning Elektrone Microscope
XRD:	X-Ray Diffraction
AVA:	Air Void Analysis
MIP:	Mercury Intrusion Porosimetry
RCM:	Rapid Chloride Migration Test
ASTM:	American Society for Testing and Materials
NBN:	Norme Belg(e)(ische) Norm
NT:	NordTest

DEEL 1: LITERATUURONDERZOEK

1 Ultra Hogesterktebeton

1.1 Situering

Hoewel bouwmethoden en bouwmaterialen over de hele wereld en doorheen de eeuwen reeds vele evoluties en revoluties hebben doorgemaakt, moet men erkennen dat in de laatste eeuw en in de laatste decennia in het bijzonder een spectaculaire vooruitgang is gemaakt in de bouwwereld. Naarmate duurzaamheid een grotere rol speelt, wordt veel vaker kennis uit de scheikunde aangesproken, om materialen en hun performantie te verbeteren. Naarmate men de grenzen van de fysica tart en steeds hoger en slanker wilt bouwen, wordt het uiterste uit materiaaleigenschappen gehaald en moet men op zoek naar nieuwe materialen of materiaalsamenstellingen. In sommige gevallen volstaat een wijziging in het productieproces om de kwaliteit van materiaal op te drijven.

Naast innovaties als zelfhelend beton en het gebruik van polymeren in betonmengsels zijn hoge-sterkte beton en ultra hogesterktebeton een tegemoetkoming aan de strengere eisen van de bouwheren en creatieve verlangens van architecten. De eigenschappen van beide betonsoorten overtreffen die van traditioneel beton en maken een efficiënter gebruik van de beton mogelijk. Door een hogere sterkte kan eenzelfde constructie met kleinere betondoorsnedes van de verschillende elementen verwezenlijkt worden, wat tot een materiaalvermindering leidt. Dit verlaagt de belasting op de funderingen, maar heeft ook een positieve weerslag op de traagheidskrachten, hetgeen positief is in seismisch actievere regio's. Andersom kan men met gelijke afmetingen als ervoor, veel robuustere en resistentere constructies verwezenlijken door de grotere sterktes van het beton.

1.2 Definities

Zoals blijkt uit de naamgeving worden hoge en ultra hogesterktebeton getypeerd door een hogere sterkte dan traditioneel beton. De ondergrens die moet overschreden worden om van een volgende categorie te spreken varieert van auteur tot auteur. In [1] wordt een ondergrens van 60 MPa voor hogesterktebeton (HSB) (Engels: HPC: *High Performance Concrete*) vooropgesteld, 130 – 150 MPa voor ultra hogesterktebeton (UHSB) (Engels: UHPC: *Ultra High Performance Concrete*). Dit wordt bevestigd in [2] en [3]. Ook hogere minimumwaarden worden echter vernoemd in [4]. Deze sterktes worden gemeten door middel van een klassieke drukproef. De hogere waarden voor de sterkte worden vooral bereikt door wijzigingen aan de samenstelling van het beton. Indien ook het productieproces wordt geoptimaliseerd en een zorgvuldige nabehandeling wordt uitgestippeld, kan de kwaliteit nog aanzienlijk worden verbeterd.

Men kan nog een derde categorie beton definiëren, naast HPC en UHPC, in het Engels *Reactive Powder Concrete (RPC)*, waarbij men d.m.v. doorgedreven granulometrische optimalisatie en intensieve (thermische en mechanische) nabehandeling druksterktes tot 800 MPa kan bereiken volgens onderzoek in [5]. Hoewel dergelijke resultaten reeds in laboratoriumomgeving werden bereikt, zijn dergelijke betonsoorten echter voorlopig niet vanzelfsprekend voor praktisch gebruik, laat staan bij productie op de werf.

In [5] wordt de definitie van HPC en UHPC gekoppeld aan de grootte van de gebruikte granulaten, hoewel granulaatgrootte en sterkte onlosmakelijk aan elkaar verbonden zijn, zoals verder zal blijken. Volgens [5] kan men pas van UHPC spreken indien de afmetingen van de granulaten begrensd is tot 8 mm.

Het begrip ultra hogesterktebeton geeft in feite geen totale weergave van de materiaaleigenschappen. Het Engels begrip *ultra high performance concrete* doet dit wel. Ultra hogesterktebeton heeft namelijk veel meer gunstige eigenschappen dan enkel een hogere sterkte. Veel eigenschappen van UHPC dragen echter bij tot de hogere sterkte. Zo hebben een hogere verwerkbaarheid en hoge dichtheid een rechtstreekse weerslag op de kwaliteit en sterkte van het beton.

Typisch wordt, relatief ten opzichte van traditioneel beton, een grotere hoeveelheid cement gebruikt. De warmte die vrijkomt bij het hydratatieproces is dus ook aanzienlijk groter, alsook de autogene krimp. Vaak worden betonnen elementen uit UHPC in de praktijk geprefabriceerd, om het hydratatieproces en de eerste uren van het verhardingsproces in optimale omstandigheden te laten verlopen.

1.3 Samenstelling van UHPC

De hogere sterkte van UHPC hangt in belangrijke mate af van de materialen die worden gebruikt en de exacte dosering hiervan ter samenstelling van het mengsel. De twee grote sleutelaspecten voor het bereiken van een grotere sterkte bij beton is de hoeveelheid water die aan het mengsel wordt toegevoegd in verhouding tot de hoeveelheid binder, en de pakking van de gebruikte materialen. De materiaalkeuzes moeten leiden tot een optimalisatie van beide factoren. Waarom beide factoren een dermate invloed hebben op de betonkwaliteit, en welke andere factoren een invloed hebben op de betonkwaliteit, wordt verder in dit verslag uitvoerig besproken.

1.3.1 Water

Het is algemeen bekend dat water een nefaste invloed heeft op de kwaliteit van beton. Net zoals men bij traditioneel beton een hogere kwaliteit bekomt bij een lagere W/C-factor (Water/Cement – factor), streeft men bij het maken van UHPC naar een zo klein mogelijk volume water. Water is uiteraard onontbeerlijk voor het hydratatieproces van het cement, en voor het bevochtigen van de andere materialen. De kunst bestaat er echter in bij UHPC om materialen zodanig te selecteren dat men een betere hydratatie kan bereiken met minder water, of dus een lagere W/C-factor. Indien buiten cement ook andere binders worden gebruikt, wordt gebruik gemaakt van de W/B-factor. Dit wordt onder paragraaf 1.3.4 *Additieven* toegelicht.

1.3.2 Cement

Niet alleen wordt meer cement gebruikt dan voor traditioneel beton, ook de kwaliteit van het cement is hoger. Typisch wordt cement aangewend van sterkteklasse 42,5 of 52,5, en worden hoeveelheden van 600 tot 1000 kg/m³ gebruikt, volgens [5]. Ook is Portlandcement aangewezen met lage hoeveelheid C₃A¹, omdat dit cement een lagere hoeveelheid water vereist.

¹ De juiste betekenis van C₃A, de oorsprong en het nut ervan, worden verder in dit verslag toegelicht.

1.3.3 Granulaten

Om de sterkte van een betonmengsel te vergroten door in te grijpen op vlak van de granulaten, bestaan twee aanpakken. Ofwel wordt ingespeeld op de geometrie van de granulaten, ofwel op de sterkte van de granulaten.

Door fijnere granulaten te gebruiken, ofwel door kleinere fracties te selecteren, ofwel door fijne granulaten zoals kwartszand te gebruiken, ontstaat automatisch een grotere materiaaldichtheid bij de opeenstapeling van de afzonderlijke deeltjes. Dit wordt nog verbeterd door de granulometrische kromme te idealiseren, zodat de geometrische interactie van de verschillende componenten van het beton optimaal is. Het beperken van de afmetingen van de granulaten steunt op het principe dat de kans op een zwakke plek in het granulaat toeneemt naarmate het granulaat groter wordt. De vorm van de granulaten, alsook de ruwheid, bepaalt eveneens in grote mate de interactie met de andere componenten in het mengsel, en de mate waarin de ITZ (*Inter Transition Zone*) tussen de verschillende componenten van het beton de zwakke link wordt in de structuur, bijvoorbeeld bij zeer gladde oppervlak van de granulaten. De strategie om met fijnere materialen te werken komt vooral tot uiting bij kwartzandbeton, waar kwartszand het grofste granulaat is.

Anderzijds kan kwaliteit van het mengsel verbeterd worden door met sterkere granulaten te werken, zoals basalt, porfier en bauxiet. Deze strategie komt vooral tot uiting bij ultra hogesterktebeton. In [5] en [6] wordt een $d_{\max} = 8 \text{ mm}$ aangehaald als bovengrens voor de granulaten, wat deze trend om met kleine granulaten te werken bevestigt, ook bij (ultra) hogesterktebeton.

Voor op vlak van duurzaamheid moeten de granulaten met grote zorg worden uitgekozen. Een ongelukkige keuze van de granulaten kan in sommige (agressieve) omgevingen dramatische gevolgen hebben en de intrinsiek betere duurzaamheidseigenschappen van UHPC teniet doen. Hier wordt verder in dit verslag dieper op in gegaan.

1.3.4 Additieven

Om het poriëngehalte bijkomend te verlagen en de dichtheid drastisch te verhogen wordt in UHPC, veel meer dan bij traditioneel beton, gebruik gemaakt van additieven.

Typisch wordt als voornaamste materiaal hiervoor silica fume, ook microsilica genaamd, aangewend. Silica fume is een amorf, ultra fijnpoederig bijproduct van de productie van silicium. De gemiddelde diameter van de microsilicadeeltjes bedraagt 150 nm. Hiermee is microsilica een factor 10 kleiner dan een typische Portlandcement, en uitermate geschikt als vulmiddel om de dichtheid te vergroten. Volgens [5] is zo'n 10 tot 30 m% van het cement nodig voor een optimaal resultaat. Dit optimaal aandeel wordt in [1] bijvoorbeeld zelfs nog hoger ingeschat, namelijk tot 25 – 30 m% van de cementmassa.

Een andere interessante eigenschap van silica fume, naast de opgedreven betondichtheid die het in de hand werkt, is de puzzolane reactie die het aangaat met het calciumhydroxide in het beton. Dit bijproduct te wijten aan het hydratatieproces van het cement, reageert grotendeels met het siliciumoxide van de silica fume met als gevolg de vorming van calciumsilicaathydraat. Deze stof vertoont aanzienlijk betere sterkte-eigenschappen dan calciumhydroxide, hetgeen dus de kwaliteit van het uiteindelijk

beton ten goede komt. Het concept van puzzolanen wordt toegelicht in paragraaf 1.3.7. *Reacties met het Portlandcement*.

Met name in [4] werden in verschillende mengsels, waarin microsilica gebruikt werden, het calciumhydroxidegehalte bepaald door middel van differentiële thermische en thermografische analyse. Na het toepassen van warmtebehandeling op de UHPC-mengsels werd in deze mengsels, zoals verwacht door de invloed van microsilica, geen calciumhydroxide gevonden, terwijl in de referentiemortel 19 m% van de totale massa bestond uit calciumhydroxide. De exacte samenstellingen van de verschillende mengsels zijn terug te vinden in [4].

Omwille van de aanwezigheid van deze additieven krijgen de water/binder-verhouding (W/B-factor) en water/poeder-verhouding (W/P-factor) naast de water/cement-verhouding (W/C-factor) eveneens een groter belang. Volgens [5] moet een W/B-factor van 0.15 tot 0.25 het streefdoel zijn om optimale resultaten te kunnen garanderen en een goed evenwicht te bereiken tussen een degelijke verwerkbaarheid bij het storten en voldoende hoge sterkte-eigenschappen van het verhard beton.

1.3.5 Superplastificeers

De Schutter definieert (super-)plastificeers in [7] als volgt. Het zijn waterreducerende middelen die toelaten voor eenzelfde verwerkbaarheid het watergehalte van het beton te verminderen (en aldus de sterkte te verhogen), bij eenzelfde watergehalte de verwerkbaarheid te verhogen, of beide effecten te combineren. Het gaat typisch om tensio-actieve stoffen die geadsorbeerd worden door de cementdeeltjes en deze voorzien van een negatieve lading. Dit heeft als gevolg dat de cementdeeltjes elkaar afstoten en dat een dunne waterfilm gevormd wordt rond de cementdeeltjes, wat in beide gevallen de verwerkbaarheid bevordert omdat het water langer beschikbaar blijft om de verwerkbaarheid te verzekeren, eerder dan de reactie aan te gaan met de cementdeeltjes. Superplastificeers hebben dezelfde eigenschappen als gewone plastificeers, doch uitvergroot. Zo zal de negatieve lading sterker zijn, en zijn de moleculen die geadsorbeerd worden door de cementdeeltjes langer en zwaarder.

Omwille van de fijnere fractie van de gebruikte materialen ten opzichte van traditioneel beton, en de grotere relatieve hoeveelheden cement en (fijne) additieven (ten opzichte van de gebruikte hoeveelheid water), is men verplicht grote hoeveelheden superplastificeers aan te wenden om een voldoende grote verwerkbaarheid te bereiken. Zeker bij RPC, waar gemiddeld over de hele samenstelling van het beton met fijne tot extreem fijne materialen wordt gewerkt en aldus een erg grote specifieke oppervlakte voorhanden is, in combinatie met een extreem lage watergehalte, wordt men geconfronteerd met een zo goed als onbestaande verwerkbaarheid. De verwerkbaarheid bepaalt echter in grote mate de kwaliteit van het gestorte beton, vooral met betrekking tot de dichtheid en het poriëngehalte. Tegenwoordig maakt men bij UHPC-mengsels gebruik van een derde generatie plastificeers, met name polycarboxilaat ethers (PCE). Volgens [5] kan men al gauw 5 m% van het cementgewicht nodig hebben om een voldoende hoge verwerkbaarheid te verkrijgen.

1.3.6 Microvezels

Door het groter aandeel aan cement en silica fume vertoont UHPC een minder elastisch en bros gedrag dan traditioneel beton, zoals staat in [1] en [5]. Door de grotere autogene

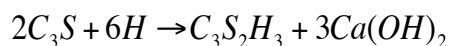
krimp is er een groter risico op microscheuren in de structuur. Microvezels kunnen hier in zekere mate een mouw aan passen, door de ductiliteit van het beton op te drijven.

De gebruikte vezels kunnen zowel staalvezels als organische vezels zijn. In geval van staalvezels wordt in [5] een aangewezen hoeveelheid vezels van 2,5 Vol.-% vooropgesteld, met een l/d - verhouding (lengte van de vezel over diameter van de vezel) van 40 tot 60. In [2] wordt een aangewezen hoeveelheid vezels van 2 Vol.-% vooropgesteld. In [3] wordt zelfs maar 1 Vol.-% vezels gebruikt. Men kan ook een combinatie van korte en lange vezels gebruiken, zoals in [1]. Hierbij zijn de korte vezels vooral van belang in vroege spanningsstadia, terwijl de langere vezels voornamelijk in latere spanningsstadia werkzaam worden door (micro-) scheuren te overbruggen. Aan het gebruik van staalvezels zijn, vooral op vlak van duurzaamheid, ook nadelen verbonden. Hier wordt verder in dit verslag aandacht aan geschonken.

1.3.7 Reacties met Portlandcement

Net als bij traditioneel beton wordt in UHPC Portlandcement gebruikt. Portlandcement wordt geproduceerd uit portlandklinker, waarvan de voornaamste componenten volgens [7] calciumoxyde (CaO , typisch 65%), siliciumoxyde (SiO_2 , typisch 22%) en in mindere mate aluminiumoxide (Al_2O_3) en ijzeroxide (Fe_2O_3). In het uiteindelijke cement komen deze stoffen niet zelfstandig voor, maar is CaO steeds gebonden aan een ander oxide. De verhoudingen hangen af van het gehalte van de respectievelijke componenten. De drie belangrijkste bestanddelen van het gebruikte Portlandcement zijn tricalciumsilicaat (kortweg C_3S), dicalciumsilicaat (kortweg C_2S) en tricalciumaluminaat (kortweg C_3A).

De belangrijkste bestanddelen van Portlandcement zijn de silicaten C_3S en C_2S . Zij dragen het meeste bij tot de uiteindelijke sterkte van het gehydrateerde cement, en van het verhard beton. Het zijn op zich geen stabiele chemische verbindingen en streven bij contact met water naar verbindingen die wel stabiel zijn op lange termijn. Bij contact met water reageren beide silicaten tot calciumsilicaathydraat, kortweg CSH genoemd, en calciumhydroxide, kortweg CH genoemd. Volgende vergelijkingen illustreren de hydratatiereacties die voor de vorming van CSH zorgen.



CSH maakt ongeveer 50-60% uit van het volume van het gehydrateerd cement, en is daarmee het belangrijkste element. CH vloeit voornamelijk voort uit de hydratatie van C_3S , en maakt ongeveer 20-25% uit van het totaal volume gehydrateerd cement. Deze percentages voor CSH en CH worden bevestigd in [8]. Het calciumhydroxide is één van de oorzaken van het sterk alkalisch karakter van het poriënvloeistof in verhard beton, daar dit deels opgelost achterblijft in het poriewater. Dit zorgt voor een bescherming van het wapeningsstaal tegen corrosie, maar speelt ook een rol bij een aantal schademechanismen. Door veroorzaken van een hogere alkaligehalte draagt CH bij tot een verhoogde gevoeligheid voor ASR-degradatie (degradatie ten gevolge van alkali - silica reacties). Het calciumhydroxide zal ook gemakkelijk reageren met het koolzuur uit de lucht, wat leidt tot carbonatatie. Verder is CH minder sterk dan CSH. In UHPC kan het omzetten van CH in CSH een mogelijke piste zijn om de sterkte te verhogen. Microsilica kunnen dit onder andere bewerkstelligen, zoals reeds werd aangehaald.

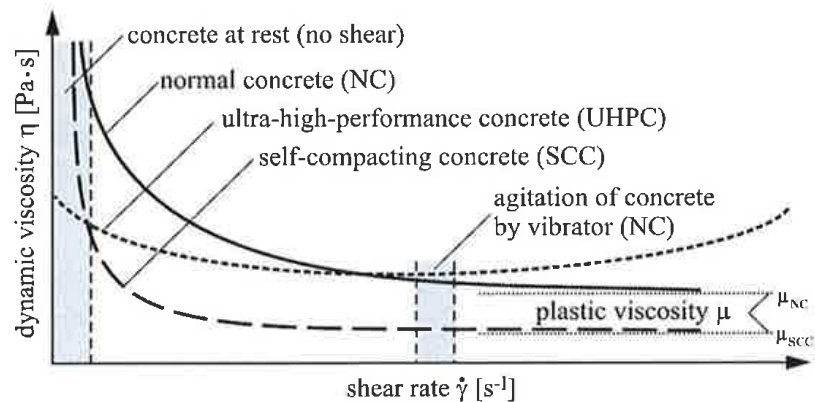
Hoewel C_3A een noodzakelijk bestanddeel is in het cement, omdat het in een vroeg hydratatiestadium van het beton reeds een eerste mate van sterkte bezorgt aan het vers beton, is dit product niet erg gewenst. C_3A reageert immers nogal hevig met water, hetgeen een grote hydratatiewarmte met zich meebrengt, wat uiteindelijk op lange termijn resulteert in lagere betonsterktes. Dit euvel kan verholpen worden door toevoegen van kleine hoeveelheden calciumsulfaat, meestal toegevoegd onder de vorm van gips, waardoor de hydratatie van C_3A enigszins in toom wordt gehouden. De aanwezigheid van gips veroorzaakt echter de vorming van ettringiet, hetgeen een erg expansieve reactie is. Dit is geen probleem op vroege betonleeftijd, wanneer dit expansief proces nog vrij kan gebeuren, maar kan wel tot ernstige schade van het beton leiden bij verhard beton. Dit verschijnsel, secundaire ettringietvorming genoemd, gebeurt typisch onder sulfaataantasting. Dit aspect van betonduurzaamheid wordt verder uitvoerig besproken.

In [8] wordt beschreven hoe men onder meer d.m.v. X-stralendiffractie en thermogravimetrie de samenstelling van beton, en in het bijzonder RPC, kan onderzoeken. Door het systematisch opwarmen van een proefstuk kan men bij thermogravimetrisch onderzoek geleidelijk aan de samenstelling van het proefstuk laten wijzigen. Eerst en vooral verdampt het niet-chemisch gebonden water, waarna ook gebonden water verdampt. De temperatuurgrens waarmee men vrij water van gebonden water onderscheidt dient conventioneel te worden vastgelegd. Bij hoge temperatuur (420-500°C) vindt dehydroxilatie van portlandiet plaats. Op nog hogere temperatuur (750-800°C) vindt decarbonatie van calciet plaats. Men kan nu voor het getest proefstuk de totale waterhoeveelheid bepalen door de totale gewichtswijziging te meten, en hiervan het gewichtsverlies af te trekken te wijten aan de dehydroxilatie van portlandiet en de decarbonatie van calciet.

1.4 Eigenschappen van UHPC

1.4.1 Eigenschappen van het vers beton

De combinatie van een lage W/P- factor, door hoge hoeveelheden cement en additieven, met een aanzienlijke hoeveelheid superplastificeerder geven UHPC in verse toestand vergelijkbare eigenschappen met zelfverdichtend beton (Engels: SCC, *Self-Compacting Concrete*) van het poedertype [5]. De verwerkbaarheid van UHPC wordt om deze reden typisch gemeten met dezelfde technieken als SCC. De vloeibaarheid wordt gekarakteriseerd door het opmeten van de slump flow. Het gebruik van superplastificeerders vermindert in hoge mate de vloe weerstand van UHPC. Dit is absoluut noodzakelijk om het beton in verse toestand te kunnen verwerken (denk voornamelijk aan verpompen van het vers beton over aanzienlijke afstanden (hoogbouw) en de moeilijke doorgang voor het vers beton in bekistingsconstructies met aanwezigheid van zeer hoge wapeningsdichtheid). Op Afbeelding 1 kan men het vloeigedrag van verschillende betonsoorten vergelijken voor toenemende vervormingssnelheid $\dot{\gamma}$.

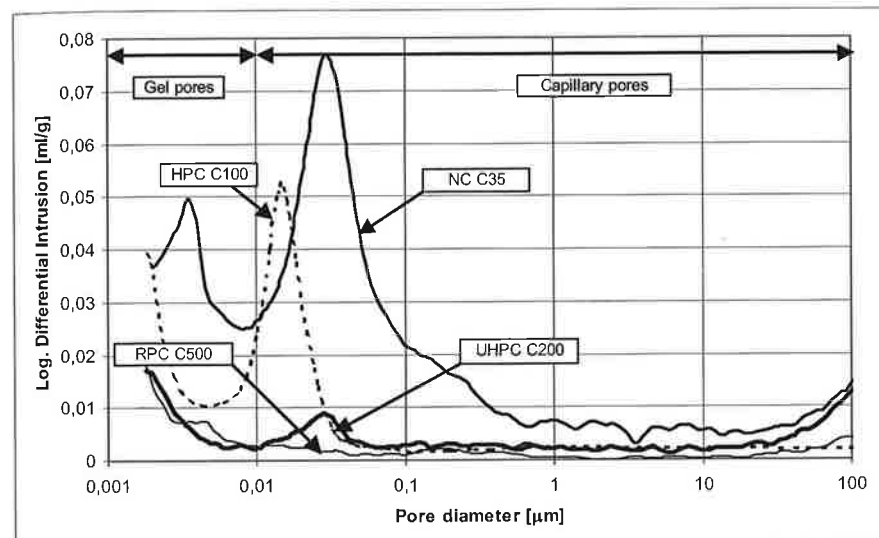


Afbeelding 1: Dynamische viscositeit voor verschillende betonsoorten [5]

In de grijze zone tegen de y-as ziet men het gedrag van beton in rust, in de tweede grijze zone het gedrag van beton wanneer deze getrild wordt door een conventionele trilnaald. Volgende trends zijn waarneembaar. Traditioneel beton heeft een hoge dynamische viscositeit in rust, wat betekent dat het weinig neiging zal ondervinden vanzelf te vloeien. Wel ziet men dat de viscositeit aanzienlijk kan verlaagd worden door het te trillen. Vervolgens ziet men dat zelfverdichtend beton slechts een heel kleine verstoring nodig heeft om zeer lage dynamische viscositeit te krijgen. De verstoring, veroorzaakt door het storten zelf, is reeds voldoende om het beton goed verwerkbaar te maken. Bij UHPC daarentegen ziet men zelfs in rust een erg beperkte dynamische viscositeit. Bovendien lijkt het bij UHPC weinig nuttig het materiaal bijkomend te trillen, omdat de dynamische viscositeit vrij constant blijft.

1.4.2 Uitzonderlijk hoge dichtheid

De uitzonderlijk hoge dichtheid van UHPC is een cruciale factor in het bereiken van de ultra hoge sterkte. Hoe meer lucht in het materiaal aanwezig is, hoe minder materiaal effectief kracht kan opnemen. Typisch heeft UHPC een lager aantal poriën en hebben de aanwezige poriën bovendien een kleiner volume. Dit wordt voornamelijk verwezenlijkt door de lage W/C-factor en W/P-factor in het algemeen, alsook door de granulometrische optimalisatie.



Afbeelding 2: Porositeit van verschillende betonsoorten [9]

Op Afbeelding 2 ziet men de distributie van porie-afmetingen van verschillende mengsels: traditioneel beton (Engels: TC, *Traditional Concrete*), hogesterktebeton (HPC, *High Performance Concrete*), ultra hogesterktebeton (UHPC, *Ultra High Performance Concrete*) en RPC (*Reactive Powder Concrete*). De samenstelling van de respectievelijke mengsels staan beschreven in [9]. Op basis van de distributiegrafiek kan men zeer duidelijk een aantal trends herkennen.

Allereerst valt het op dat elk mengsel twee pieken vertoont. Men onderscheidt inderdaad, zoals aangeduid op de figuur, capillaire poriën (met een diameter groter dan 0,01 micrometer) van gelporiën (diameter kleiner dan 0,01 micrometer). Men merkt op dat traditioneel beton in beide categorieën niet alleen grotere poriën heeft, maar ook een groter aantal. RPC heeft zo goed als geen capillaire poriën, gezien de extreme dichtheid. Dit laat toe een beton te verkrijgen met een totaal porievolume van 2 Vol.-%, hetgeen extreem laag is. Hoewel bij HPC eveneens nog een aanzienlijke piek verschijnt bij beide porie-categorieën, ziet men daarentegen dat het verschil in algemene poriëngehalte tussen traditioneel en hogesterktebeton enerzijds, en ultra hogesterktebeton en RPC anderzijds vanzelfsprekend is. Het verschil is in het bijzonder flagrant in het domein van de capillaire poriën. Men stelt vast dat, specifiek op vlak van capillaire poriën, UHPC en RPC vrij gelijkaardig presteren, met respectievelijk 1,5 en 0,8 Vol.-%. Dit is zeer gunstig met betrekking tot gebruik in wegen- en bruggenbouw, aangezien de aanzuiging van water met schadelijke stoffen zoals dooizouten, veel beperkter zal zijn.

Deze trend in poriëngehalte wordt bevestigd door [4]. In Tabel 1 staat een overzicht van de verschillende types poriën voor drie betontypes: een traditionele mortel (TM) enerzijds, en twee types UHPC (M2Q 90 en B4Q 90) anderzijds. De samenstelling van de verschillende mengsels staat beschreven in [4].

Tabel 1: Overzicht porositeitsresultaten van verschillende betonmengsels

Porositeit	Unit	TM	M2Q 90	B4Q 90
Totale porositeit	Vol.-%	17,4	13,1	8,9
Gelporiën	Vol.-%	7,3	12,1	8,3
Capillaire poriën	Vol.-%	9,9	0,9	0,4
Oppervlakteporiën	Vol.-%	0,2	0,1	0,2
Kwikporositeit	Vol.-%	14,8	6,7	2,5

Een eerste bemerking met betrekking tot Tabel 1 is dat de bekomen resultaten erg verschillen al naargelang de gebruikte meetmethode. Bijvoorbeeld voor mengsel M2Q 90, bekomt men met de directe methode, waarbij het volume poriën wordt berekend als $\text{volume poriën} = \text{totale volume} - \text{volume materiaal}$, een totale porositeit die bijna tweemaal zo groot is als die bepaald met kwikporosimetrie. Dit moet men steeds in het achterhoofd houden bij vergelijking van resultaten.

Wel worden een aantal reeds vermelde trends en eigenschappen bevestigd. Hoewel het verschil minder opvallend is bij deze mengsels, ziet men allereerst dat de UHPC-mengsels beter presteren dan de traditionele mortel, en dat dit voor het overgrote deel te danken is aan de verbetering op het gebied van capillaire poriën.

In [10] wordt een porositeit van 5,8 Vol.-% gemeten met kwikporosimetrie op het UHPC-mengsel M1Q, waarvan de exacte samenstelling wordt gegeven in [10]. Dit ligt in de lijn van eerder vermelde waarden.

Door de sterke beperking van capillaire poriën, presteren UHPC en RPC beter in een agressieve omgeving, net omdat de schadelijke stoffen in mindere mate door het materiaal worden opgenomen, en bovendien minder diep worden getransporteerd in het inwendige van het materiaal, en zo minder schade aanrichten. Op deze duurzaamheidsaspecten wordt verder in dit verslag uitvoerig in gegaan.

1.4.3 Hoge tot extreme sterkte

Zoals reeds inleidend gezegd, is de voornaamste karakteristiek van UHPC de hoge tot extreme sterkte die kan bereikt worden. Druk- en treksterkte hangen af van verschillende factoren. De keuze aan materialen, de pakkingsdichtheid van de ingrediënten, de bereikte porositeit, de toegepaste nabehandeling,... Al deze factoren worden besproken in volgend paragraaf.

Volgens [5] kunnen in functie van de thermische en mechanische nabehandeling uiteenlopende resultaten verkregen worden. Wanneer geen specifieke nabehandeling wordt uitgevoerd in een omgeving bij kamertemperatuur, wordt over het algemeen geen betonsterkte gehaald boven de 200 MPa. Indien men het beton laat uitharden in een omgevingstemperatuur van 100°, kan men de druksterkte opdrijven tot 250 MPa. Uitharden in een omgeving van 250° maakt druksterktes mogelijk tot 400 MPa. Indien bovendien op mechanische wijze druk wordt uitgeoefend tijdens het uitharden, kunnen, indien ook andere invloedsfactoren optimaal uitgebuit worden, sterktes bereikt worden tot 800 MPa. De positieve invloed van (staal-) vezels werd reeds eerder vermeld. Hoewel over het algemeen een verbetering van de druksterkte wordt vastgesteld bij het gebruik van staalvezels, kan dit aanzienlijke gevolgen hebben voor de rekbaarheid en elasticiteit. Dit wordt verder behandeld.

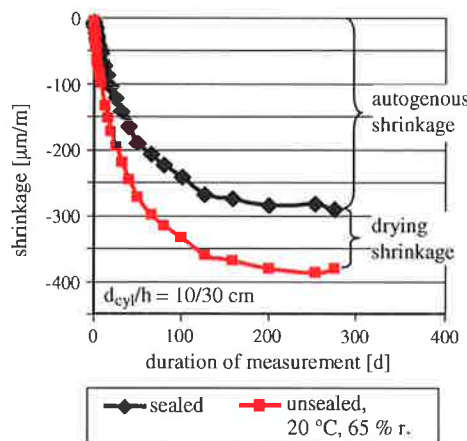
De treksterkte heeft, zoals gebruikelijk voor beton in het algemeen, aanzienlijk lagere waarden dan de druksterkte. Volgens [5] kunnen waarden bereikt worden tot 150 MPa indien speciale bindingsadditieven worden gebruikt en specifieke nabehandelingstechnieken. Meer courante waarden voor treksterkte van UHPC zijn echter gelegen tussen 10 en 60 MPa. Het effect van staalvezels op de treksterkte is aanzienlijker dan op de druksterkte. Uiteraard is dit te danken aan het feit dat staalvezels het bros gedrag van het beton vermindert, alsook microscheuren overbrugt. Zonder staalvezels is zelfs explosief falen van de structuur te vrezen onder trekbelasting. In dit opzicht kan het gebruik van vezels ook van aanzienlijk belang zijn naar veiligheid toe.

De elasticiteitsmodulus van UHPC is evenredig met de druksterkte van het beton. Voor druksterktes rond 200 MPa is een E-modulus van 50-60 GPa te verwachten. Bij RPC, met sterktes tot 800 MPa, is een E-modulus tot 75 GPa realistisch volgens [5].

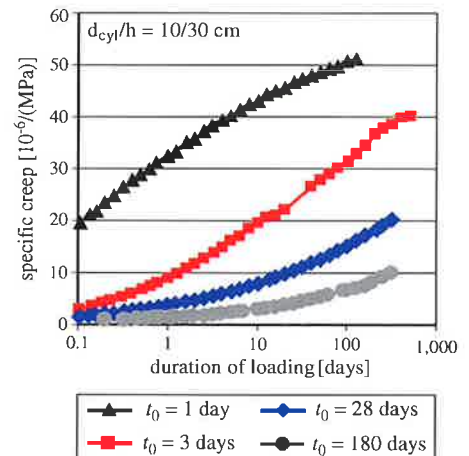
1.4.4 Krimp- en kruipgedrag

Hoewel in verschillende naslagwerken naar verwezen wordt, wordt in [5] bijzondere aandacht besteed aan de uitgesproken krimpverschijnselen van UHPC. Net zoals bij het meten van porositeit, zijn ook bij krimpverschijnselen de resultaten erg afhankelijk van de aangewende methode en omstandigheden (zoals de ouderdom van het beton) waarin de metingen worden uitgevoerd, van essentieel belang. Op Afbeelding 3 kan men zien

dat het grootste aandeel aan krimp te wijten is aan autogene krimp, ongeveer 75 van de totale krimp. Krimpwaarden tot 0,0012 (1,2 $\mu\text{m}/\text{mm}$) en hoger worden vastgesteld.



Afbeelding 3: Vergelijking autogene en uitdrogingskrimp [5]



Afbeelding 4: Kruip i.f.v. de belastingsduur [5]

Uitdrogingskrimp is minder uitgesproken dan autogene krimp. Dit kan mogelijk te danken zijn aan de lage (oppervlakte-) porositeit.

Het kruipgedrag bij UHPC is meer dan bij HPC en traditioneel beton afhankelijk van de ouderdom. Op Afbeelding 4 is duidelijk te zien hoe de specifieke kruip (kruip per eenheid aangebrachte spanning) toeneemt naarmate de spanningstoestand langer wordt aangehouden en afneemt naarmate het beton ouder is bij aanvang van de spanningssituatie.

Bij berekening van kruipcoëfficiënten voor belasting bij verschillende ouderdom verkrijgt men echter slechts langzaam afnemende kruipcoëfficiënten. De uitgesproken afname van de kruipcapaciteit van het beton bij toenemende sterkte van het uitgehard beton is dus niet langer waar voor UHPC.

1.5 Invloedsfactoren op de kwaliteit van UHPC

1.5.1 Pakkingdichtheid van fijne elementen

Een hoge pakkingdichtheid van de bestanddelen van het beton zorgt voor grotere sterkte, aangezien er minder holtes in het materiaal zijn, en dus per oppervlakte-eenheid meer materiaal is om kracht op te nemen. Een grotere dichtheid zorgt ook onrechtstreeks voor een betere kwaliteit, aangezien schadelijke stoffen, zowel opgelost in vloeistof als gasvormig, moeilijker naar het inwendige van het materiaal kunnen migreren. Eventuele degradatie blijft zo vooral oppervlakkig.

De pakkingdichtheid van de elementen kan op verscheidene manieren opgedreven worden. Enerzijds kan een granulometrische optimalisatie de pakking verbeteren door holtes tussen elementen op te vullen met kleinere deeltjes. Daar waar bij HPC silica fume voornamelijk wordt gebruikt om de sterkte en verwerkbaarheid te verbeteren, worden de eigenschappen van silica fume veel meer uitgebuit bij UHPC. Naast de puzzolane werking en gunstige invloed op verwerkbaarheid heeft silica fume, zoals eerder reeds aangestipt, een veel kleiner diameter dan cementdeeltjes. Het materiaal is dus uitermate

geschikt als filler. Bovendien kan men de benodigde waterhoeveelheid verminderen bij een zelfde verwerkbaarheid, wat bijkomend bijdraagt aan de hogere sterkte.

Anderzijds kan men m.b.v. een aangepast productieproces de resultaten eveneens verbeteren. In plaats van een traditionele betonmixer te gebruiken, kan men het mengen van het betonmengsel onder vacuüm laten plaatsvinden. Door het wegzuigen van alle lucht in de menger gaat men rechtstreeks een dichter mengsel verkrijgen.

Na het mengen kan men het beton mechanisch nabehandelen, door het beton aan een hoge druk te onderwerpen. Hierdoor wordt in de microstructuur de deeltjes optimaal gestapeld. Volgens [9] kan een pakkingdichtheid bereikt worden van 0,87 (in het bijzonder bereikt voor RPC C500). Mechanische nabehandeling wordt verder uitvoeriger toegelicht.

1.5.2 Gebruik van additieven

In [7] worden puzzolanen als volgt gedefinieerd: een puzzolaan is een product dat hoofdzakelijk bestaat uit SiO_2 of uit SiO_2 en Al_2O_3 . Het heeft op zich geen hydraulische eigenschappen, maar in fijnverdeelde vorm en in aanwezigheid van vocht zal het met $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reageren tot stoffen die wel hydraulische eigenschappen bezitten.

Zo ziet men dat een puzzolaan met calciumhydroxide en water (traag) reageert tot calciumsilicaathydraat (CSH). Dit is een erg gunstige reactie, aangezien CSH een grotere sterkte levert aan het beton dan CH. Dit komt omdat de bekomen reactieproducten (grote) capillaire holtes opvullen, wat de porositeit verlaagt en de sterkte verhoogt. Door de verlaagde porositeit neemt bovendien de weerstand tegen waterindringing en chemische aantasting toe. Bovendien neemt door de verminderde aanwezigheid aan CH de gevoeligheid voor sulfaataantasting af, aangezien voor de vorming van ettringiet zekere hoeveelheden CH vereist zijn.

De meest gebruikte puzzolanen zijn vliegas en silica fume. Silica fume bezit een efficiëntiefactor van 2 tot 3. Dit betekent dat 1 kg silica fume een even grote sterktebijdrage heeft als 2-3 kg cement. De sterktebijdrage van silica fume gebeurt typisch vroeger dan die van vliegas, waardoor men er sneller voordeel aan heeft. Het grootste verschil tussen silica fume en vliegas is de deeltjesgrootte. Vliegas heeft vergelijkbare afmetingen als cement, terwijl silica fume gemiddeld een diameter heeft die honderd maal kleiner is dan die van vliegas en cement. Hierdoor is silica fume sterk poriëndichtend. Dit heeft bijzonder goede gevolgen voor de duurzaamheid, door een verlaagde permeabiliteit en weerstand tegen chemische indringing.

1.5.3 Thermische nabehandeling

Eerder werd reeds aangehaald dat thermische nabehandeling een erg positieve invloed heeft op de uiteindelijke sterkte van UHPC. In [8] wordt dit verklaard door de vaststelling dat hoge temperaturen leiden tot een hoger aandeel chemisch gebonden water, wat tevens wijst op een kleinere hoeveelheid niet - gehydrateerd cement. Vanaf 400°C is al het vrij water geëlimineerd. Dit is bovendien zeer gunstig voor de duurzaamheid van het beton, daar chemische verontreiniging vrij water behoeft als migratiemiddel in het beton, zodat men kan stellen dat warmtebehandeling meer voordelen heeft dan enkel grotere sterkte. Bij temperaturen hoger dan 250° zal alle portlandiet gereageerd hebben dankzij puzzolane reacties, hetgeen eveneens de betere sterkte-eigenschappen verklaart.

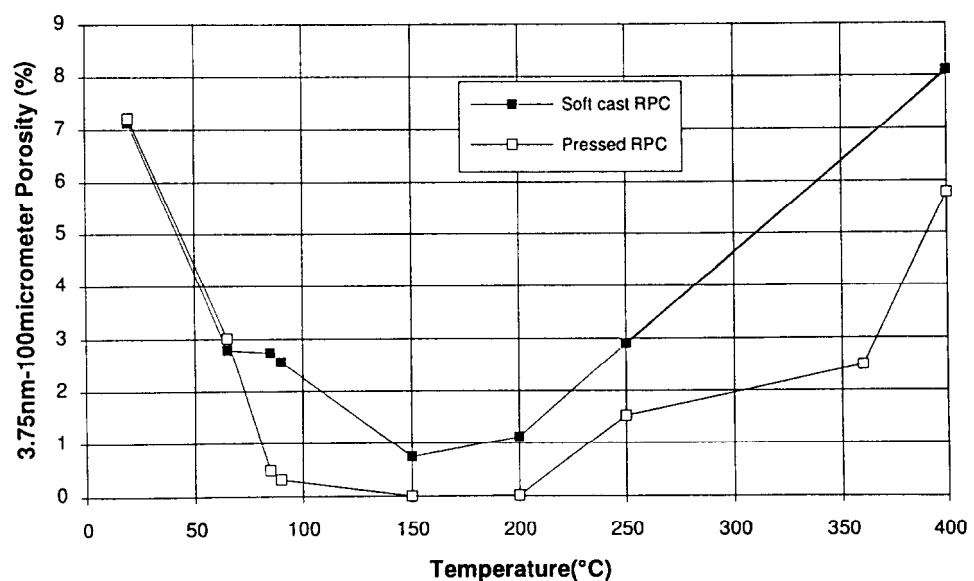
Specifiek voor RPC leiden thermogravimetrisch onderzoek en XRD spectra in [8] tot de conclusie dat een groot aandeel cement niet gehydrateerd wordt. Dit betekent natuurlijk een onderbenutting van de gebruikte materialen. Een thermische nabehandeling op maat verhoogt de verhouding (chemisch) gebonden water tot de totale hoeveelheid water in het beton, alsook de puzzolane activiteit van de additieven.

1.5.4 Mechanische nabehandeling

Mechanische nabehandeling bestaat uit het aanbrengen van een externe belasting op betonnen proefstukken in verse toestand. Deze heeft een aantal gevolgen. Enerzijds wordt een deel van het vrij water in het beton uitgedreven, en anderzijds wordt een deel van de lucht in de poriën uit het beton geperst. Bovendien worden de deeltjes gedwongen een gunstigere pakking aan te nemen, doordat de structuur wordt samengedrukt.

De vereiste belasting om voldoende resultaten te bereiken varieert volgens de bron. In [9] wordt met een belasting van 50 N/mm² een W/C-factorreductie bereikt van 0,17 tot 0,14. Dit verschil wordt gemeten aan de hand van het uitgedreven water. De belasting op het proefstuk werd in dit specifiek geval 4 uur aangehouden.

Vaak worden thermische en mechanische nabehandeling gecombineerd. In [8] wordt de gecombineerde werking van beide technieken onderzocht. Op Afbeelding 5 is de invloed van zowel thermische als mechanische nabehandeling weergegeven op de fractie van de porositeit tussen 3,75 nm tot 100 µm.



Afbeelding 5: Invloed van thermische en mechanische nabehandeling op de porositeit van RPC [8]

Men kan op Afbeelding 5 vaststellen dat het aanbrengen van een belasting op het beton weinig of geen toegevoegde waarde heeft bij een temperatuur van 20 tot 65°C. Daarentegen ziet men een zeer duidelijke bijkomende bijdrage van de mechanische nabehandeling bovenop de thermische nabehandeling bij hogere temperaturen. Een optimaal resultaat wordt verkregen in combinatie met een thermische nabehandeling van 100-200°C. Men mag echter niet concluderen dat bij deze gecombineerde nabehandeling een porositeit van 0% kan bereikt worden. Men kijkt hier namelijk

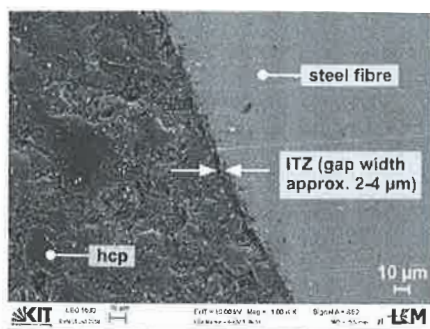
niet het volledige porositeitsspectrum. Mogelijks zijn wel nog poriën kleiner dan 3,75 nm of groter dan 0,1 mm aanwezig.

1.5.5 Gebruik van vezels

Zoals reeds gezegd hebben staalvezels een positieve invloed op sterkte en ductiliteit van het anders vrij brosse UHPC. Dit komt onder meer omdat het risico op microcracking ten gevolge van de grotere krimp wordt teruggedrongen.

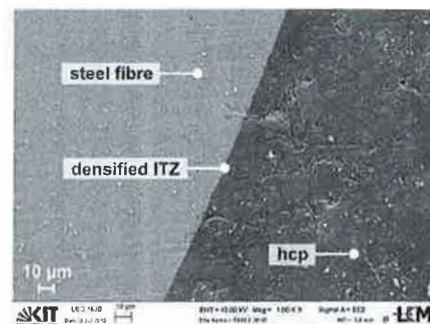
In [1] wordt vastgesteld dat de eigenschappen van het vers beton, zoals de slump flow, niet beïnvloed wordt door het gebruik van staalvezels. Dit is niet vanzelfsprekend, daar de staalvezels ook een oppervlakte hebben, dat moet bevochtigd worden en omgeven door waterdeeltjes of superplastdeeltjes. In geval wel een verschil wordt vastgesteld in verwerkbaarheid, kan dit opgelost worden door het lichtjes verhogen van het watergehalte.

Naast de eigenschappen van vers beton werden in [1] ook de eigenschappen van zogenaamd “jong beton” onderzocht, op een leeftijd van 6 dagen. Er wordt door het toevoegen van 2,55 Vol.-% hybride staalvezels, een toename vastgesteld van 14 - 16% voor de druksterkte op 6 dagen, onafhankelijk van de afmetingen van het getest proefstuk. Ook wordt nogmaals bevestigd dat bij gebruik van staalvezels een ductiele(re) breuk wordt vastgesteld, terwijl bij UHPC zonder staalvezels een brosse tot zelfs explosieve breuk te vrezen is. De slijttreksterkte wordt door toevoegen van staalvezels aanzienlijk vergroot, met een toename van 71 tot 174%. Deze waarde dient wel in zijn context bekeken worden, door in herinnering te brengen dat de slijtsterkte bij ongewapend en onversterkt beton zo goed als nihil is. De grotere relatieve toename van deze sterkte, ten opzichte van de bescheiden toename in druksterkte is te verklaren door dat het aandeel van staalvezels zich vooral laat voelen wanneer het beton op trek



Afbeelding 6: Porositeit rond een staalvezel in niet-warmte behandeld beton [6]

wordt belast. Dit wordt bijkomend in de verf gezet bij de vergelijking van de buigtreksterkte van het beton, waar een toename van meer dan 140% wordt opgetekend ten gevolge van het toevoegen van staalvezels. Bij langwerpige proefstukken speelt een bijkomend voordeel een invloed op de toename van de sterkte. Staalvezels lijken de neiging te hebben zich parallel met de bekistingswand te oriënteren, zodanig dat ze in de lengterichting van het proefstuk liggen, en optimaal hun bijdrage kunnen leveren tot de treksterkte van het beton.



Afbeelding 7: Wegwerking van de ruimte tussen de staalvezel en het beton door warmtebehandeling [6]

Naast een invloed op de verschillende sterktes van het beton, zorgt de aanwezigheid van staalvezels voor een bijkomende mengenergie, wat een positieve invloed heeft op het gehalte aan gelporiën volgens [6]. Daarentegen kan de aanwezigheid van staalvezels ook een negatieve invloed hebben op de porositeit.

Aan de hand van SEM-beelden (*Scanning Electron Microscope*) kan men duidelijk op beeld vastleggen dat in verhard beton ruimte (ITZ: *Interfacial*

Transition Zone op Afbeelding 6 en 7) blijft tussen de staalvezels en het beton, zoals zichtbaar is op Afbeelding 6.

Dit kan bijvoorbeeld verholpen worden door thermische nabehandeling, waarbij de transitiezone aanzienlijk verdicht wordt. Dit is zichtbaar op Afbeelding 7. Het verhelpen van dit fenomeen is van cruciaal belang voor de duurzaamheid. Deze poriën in de buurt van de staalvezels laten namelijk toe dat eventuele migratie van schadelijke chemische stoffen hun weg gemakkelijk vinden naar de staalvezels, waardoor sneller degradatie van de vezels, zoals corrosie, gevreesd moet worden. Daar waar de aanwezigheid van staalvezels geen invloed lijkt te hebben op de penetratiediepte van schadelijke stoffen, zoals chloriden, is het wel duidelijk dat de concentratie schadelijke stoffen hoger ligt in proefstukken met staalvezels. Dit is te verklaren door het groter gemak waarmee de schadelijke stoffen zich lokaal kunnen verspreiden in de transitiezone tussen staalvezels en beton, rond staalvezels dicht bij de oppervlakte. De aanwezigheid van staalvezels bevordert ook het carbonatatieproces in de zone dicht bij de oppervlakte.

2 Algemene Duurzaamheidsaspecten van UHPC

2.1 Introductie

Het begrip duurzaamheid vergt enige situering en omkadering alvorens men het in een bepaalde context naar behoren kan bespreken en onderzoeken. Hoewel het begrip duurzaamheid vaak te pas en te onpas wordt gebruikt in het kader van milieuaspecten, onder meer wanneer men het heeft over *duurzame energie*, is in het kader van onderhavige studie in het begrip duurzaamheid veeleer een andere betekenis vervat. Met de duurzaamheid van een materiaal tracht men te beschrijven in welke mate het beschouwde materiaal in staat is om op lange termijn zijn eigenschappen en goede werking te behouden onder invloed van (destructieve) invloeden van buitenaf. Onder andere het belang van slijtage door gebruik is hierin vervat.

Typisch voor beton, kan duurzaamheid gelinkt worden aan de mate waarin het bestand is tegen de invloeden van het milieu waarin het zich bevindt, waarbij mechanische maar vooral chemische belasting worden beschouwd. In de Belgische Norm (NBN B 15-001) vindt men de gangbare onderverdeling van mogelijke omgevingen in omgevingsklassen. Elke omgevingsklasse brengt een aantal mogelijke externe invloeden met zich mee, die onderverdeeld worden in milieuklassen. Meerdere milieuklassen zijn dus mogelijk bij één bepaalde toepassing. Bij de keuze van het beton dat aangewend wordt voor een bepaalde toepassing moeten deze milieuklassen in beschouwing worden genomen, daar zij vertaald worden in bepaalde vereisten en/of beperkingen. Zo kan een agressieve omgeving vertaald worden in maximale waarden voor scheuropeningen bij gescheurd beton, of een minimale betondekking.

De milieuklassen onderscheiden volgende hoofdoorzaken voor betonaantasting: mechanische aantasting, chemische aantasting, aantasting door chloriden, aantasting door vries-dooi cycli en aantasting door carbonatatie. Bij aantasting door chloriden onderscheidt men chloriden afkomstig van zeewater en chloriden afkomstig van dooizouten. Bij chemische aantasting kan een zeer uiteenlopend aantal zuren aan de basis liggen van de aantasting. Er wordt daarom een bijkomende classificatie gemaakt in subcategorieën al naargelang de agressiviteit van het beschouwde zuur. Al naargelang de omgevingsklasse kunnen verschillende milieuklassen gecombineerd worden, bij gelijktijdig optreden van verschillende aantastingen.

Bij onderzoek naar duurzaamheid van een materiaal lijken dus twee belangrijke parameters van belang: het aangetast materiaal, en het agressief agens. Beiden dienen bestudeerd te worden om een duidelijk beeld te krijgen van een aantastingmechanisme. Men kan de concentratie van een agressief agens laten variëren, maar ook de weerstand van het beproefde materiaal beïnvloeden en verschillende materialen testen. In het kader van dit werk wordt aan duurzaamheidsaspecten met betrekking tot mechanische belasting minder aandacht geschonken, en wordt de aandacht meer toegespitst op de aantastingen van chemische aard.

2.2 Duurzaamheid van UHPC

In dit verslag werd reeds aangehaald dat UHPC een aantal eigenschappen bezit die een gunstige invloed kunnen hebben op de duurzaamheid van het materiaal. Intuïtief kan

men verwachten dat schadelijke stoffen minder gemakkelijk en minder diep indringen in het materiaal, daar de porositeit en connectiviteit in sterke mate lager is dan bij traditioneel beton, hetgeen gunstige gevolgen heeft voor de permeabiliteit van zowel gassen als vloeistoffen.

Mogelijks hebben andere parameters echter een minder gunstige invloed op de duurzaamheid van UHPC. Men kan zich zo afvragen of bepaalde gebruikte materialen, zoals bepaalde granulaten of (hydraulische) toevoegsels gevoeliger zijn aan chemische interactie met de omgeving. Men kan namelijk niet verwachten dat de gebruikte materialen inert zullen zijn ten opzichte van zuren of zouten. Sommige bestanddelen kunnen namelijk opgelost worden door chemische agentia. Ook moet men een eventuele invloed onderzoeken van (vaak gebruikte) staalvezels, net als ook de invloed van thermische en/of mechanische nabehandeling op de duurzaamheid van het beton.

Onderzoek op duurzaamheidsperformanties wordt vaak door versnelde aantasting onderzocht. Omwille van de goede prestaties bij UHPC zal dit des te meer noodzakelijk blijken. Dit laat toe om in een aanvaardbare tijdsduur reeds resultaten te zien en conclusies te kunnen trekken, daar waar bij aantasting uit praktische omstandigheden het jaren zo niet decennia zou duren voor men conclusies kan trekken. Zeker bij materialen die in principe beter bestand zijn tegen de onderzochte vorm van aantasting, is een versnelde aanpak noodzakelijk. Dit kan typisch door het gebruik van hogere concentraties aantastingsmateriaal, cyclische belasting aan hoger tempo, of gedwongen aantasting (door elektrische stroom, concentratiegradiënt, of andere dwingende maatregelen). Hoewel men bepaalde degradatieprocessen kan versnellen, zal men in vele gevallen bij onderzoek op UHPC toch de duur van de proeven moeten verlengen ten opzichte van dezelfde proeven op traditioneel beton. Men dient evenwel uiterst kritisch om te gaan met resultaten uit versnelde aantastingproeven. Een verhoogde concentratie aan aantastingsmateriaal kan een heel ander schademechanisme veroorzaken dan datgene men aanvankelijk beoogd had te onderzoeken. Schade op zich is ook een subjectief begrip, en kan op verschillende wijzen gekarakteriseerd worden.

2.3 Invloed van porositeit en connectiviteit op duurzaamheid

De intuïtie dat de porositeit en connectiviteit een aanzienlijke weerslag hebben op de duurzaamheid wordt bevestigd in [2], [3], [4] en [5]. Vooral het hogere poedergehalte en lagere W/C-factor zijn bepalende factoren voor de grotere dichtheid. Deze hogere dichtheid heeft een belangrijke weerslag op de absorptie- en diffusie-eigenschappen. In [4], wordt de capillaire waterindringing gemeten m.b.v. gravimetrische weging. Proeven op verschillende betonkubussen tonen een veel lagere absorptie aan bij UHPC dan bij traditioneel beton (factor 3) en zelfs HPC (factor 2). Een ander bewijs van de grotere dichtheid volgt uit de diffusieweerstand, die kan opgemeten worden onder invloed van een elektrisch veld. In [4] wordt gesteld voor UHPC een diffusieweerstand die tot 60 keer groter is dan deze van traditioneel beton. In volgende paragrafen wordt per type aantasting aangetoond hoe de gevolgen van desbetreffende aantasting in verhouding staan met de porositeit.

2.3.1 Invloed van porositeit op carbonatatie

De indringing van CO₂ en de diepte van het carbonatatiefront, indien carbonatatie effectief optreedt, zal in grote mate afhangen van de eigenschappen van de poriën en de mate waarin deze verbonden zijn. Weerstand tegen carbonatatie wordt typisch in

versnelde aantasting getest. In [3] worden testen van een jaar (i.p.v. 56 dagen) uitgevoerd bij een CO₂-concentratie van 1%. In plaats van een langere testperiode zou een toename van de CO₂-concentratie een andere piste kunnen zijn om de duur van de proef sterk te reduceren. Het carbonatatiefront wordt aan de hand van fenolftaleïnekleuring bepaald. Specifiek voor carbonatatie wordt een kwaliteitsverbetering met een factor 15 vastgesteld voor UHPC t.o.v. TC in [3]. Het praktisch voordeel hiervan komt tot uiting bij de dimensionering van de betondekking die voorzien dient te worden voor een levensduur van 100 jaar. Daar waar voor TB een minimale betondekking van 65 mm moet voorzien worden, is bij UHPC een betondekking van slechts 5 mm vereist, of is dus een reductie van meer dan 90% mogelijk. Dit is uiteraard interessant met oog op materiaalbesparing of verwezenlijking van slanke(re) constructies.

2.3.2 Invloed van porositeit op vries-dooischade

De indringing van zoutoplossing bij het gebruik van dooizouten is eveneens afhankelijk van de open porositeit en de connectiviteit van de poriën. De mate waarin schade optreedt wordt ook mee bepaald door de eigenschappen (onder andere geometrie en afmetingen) van de poriën. De vries-dooi cycli veroorzaken immers een drukontwikkeling in de poriën waardoor betondelen afspatten. De mate waarin het bevroerende water kan expanderen is de grootste bepalende factor voor de hoeveelheid schade. Deze schade wordt uitgedrukt als massa afgespat materiaal per oppervlakte proefstuk. Opnieuw kan men een aantal maatregelen treffen om de testmethode aan te passen aan de grotere weerstand van het materiaal. Dit wordt gedaan in [2] en [3]. In onderzoek in [3] wordt het aantal cycli verdubbeld van 56 naar 112, en dan nog ziet men goede resultaten. Het massaverlies beperkt zich na 112 cycli tot 0,3 kg/m², daar waar men bij traditioneel beton massaverliezen aanvaardt tot 2 kg/m² na 30 cycli. In [2] wordt het aantal cycli zelfs opgedreven tot 690, een nog aanzienlijkere toename. Ook hier wordt aangetoond dat UHPC een hogere weerstand biedt ten opzichte van TC tegen schade, tengevolge van vries-dooi belasting.

2.3.3 Invloed van porositeit op aantasting door zuren en zuren

Zowel de indringing van zouten als van zuuroplossingen zal groter zijn en grotere gevolgen hebben bij een grotere porositeit en open microstructuur. Deze milieuklassen, alsook de beproevingsmethoden en schademeting ten gevolge van zuren en sulfaten worden in volgende paragrafen apart behandeld.

2.4 ASR-schade

Ondermeer omwille van het hoog silica-gehalte in UHPC, te wijten aan de grotere hoeveelheden cement en silica fume, kan men in eerste instantie schade t.g.v. ASR vrezen. De eenvoudigste manier om ASR-aantasting te meten, is door het beschouwen van de expansie van de proefstukken. Typisch worden de proefstukken ook onderworpen aan een warmtebehandeling, ter simulatie van stoombehandeling die UHPC in de praktijk zal ondergaan. Dit deel van het proces is van groot belang aangezien dit zorgt voor een zeer vochtige omgeving, waarin ASR bevorderd wordt.

In zowel [2] als [3] worden echter geruststellende resultaten bekomen. In geen van de uitgevoerde proeven wordt ASR vastgesteld. In [11] wordt ook vermeld dat het gebruik van staalvezels in UHPC geen negatieve invloed heeft op de resistentie tegen ASR. Zoals geweten is voor ASR, naast een voldoende gehalte aan alkali en silica, voldoende water

nodig, waarin de reactie kan plaatsvinden. In UHPC worden, door het hoge gehalte aan silica fume, alle aanwezige alkalihoudende stoffen omgezet in CSH tijdens het oorspronkelijke reactiemechanisme volgens [11]. Door de hoge dichtheid van UHPC wordt gedurende de levensduur van het beton minder water in het beton toegelaten, en al zeker niet op grote diepte in het beton. Water is, naast een hoog alkali-gehalte en silica-gehalte, een onontbeerlijk element om met ASR-schade geconfronteerd te worden, waardoor het risico op ASR zo goed als onbestaande is bij UHPC.

Het risico bestaat er wel in dat het mengproces niet optimaal gebeurt, waardoor de silica fume niet of slecht gedispergeerd wordt. Door samenklitten van de silica fume kunnen lokaal clusters voorkomen, wat wel kan leiden tot lokaal optreden van ASR. Hier moet men behoedzaam voor zijn.

2.5 Zuuraantasting

2.5.1 Oorsprong van zuren

Zuren kunnen zeer uiteenlopende oorsprongen hebben, al naar gelang het toepassingsgebied. In de landbouwsector kunnen zuren afkomstig zijn uit pesticiden of andere agressieve chemische stoffen. Ook urine van vee kan zuurhoudend zijn en agressief voor bijvoorbeeld betonnen vloeren in stallen. In een heel andere context kan in een industriële omgeving, beton al dan niet accidenteel in aanraking komen met (agressieve) zuren.

De typische zuren die gebruikt worden in duurzaamheidproeven van beton zijn azijnzuur als vertegenwoordiger van de zwakkere zuren, melkzuur en zwavelzuur als vertegenwoordiger van de sterkere zuren.

2.5.2 Schademechanismes

Hoewel men opnieuw een betere prestatie verwacht van UHPC t.o.v. zuuraantasting, dienen er specifiek voor zuuraantasting ook andere factoren in acht te worden genomen dan bij andere aantastingen. Een extreem dichte pakking van de microstructuur maakt de indringing van schadelijke stoffen dan wel moeilijker, het maakt de bestanddelen daarom niet inert voor de zuren. Het is perfect mogelijk dat het beton bestaat uit (in zuur) oplosbare componenten, of voor zuren gevoelige granulaten.

In [12] wordt uiteengezet dat cementhoudende materialen, zoals cementpasta's, gevoelig zijn voor zuren. De zuren hebben immers de neiging om zowel gehydrateerde als niet-gehydrateerde producten te ontbinden. Daar deze in de meeste gevallen oplosbaar zijn, lopen ze gemakkelijk uit het materiaal. Dit brengt logischerwijze een verzwakking van het materiaal teweeg. Niet-oplosbare materialen vormen een zachte, poreuze gecorrodeerde bruine laag aan de buitenkant van het niet-gecorrodeerde proefstuk.

Het kan interessant zijn om een al dan niet sterke basische buffer te voorzien in het mengsel, zodanig dat de weerstand tegen zuuraantasting vergroot kan worden zonder noodzakelijk de porositeit bijkomend te moeten reduceren. Algemeen kan men volgens [13] drie bepalende invloedsfactoren identificeren voor de weerstand van een materiaal tegen zuuraantasting: de permeabiliteit, de alkaliniteit en de chemische samenstelling van de bestanddelen. Het kan in dat opzicht interessant zijn om bepaalde hoeveelheden silica fume, vlieg-as of andere minerale toevoegsels aan te wenden, omdat hierdoor een lagere CH-gehalte wordt bekomen, evenals lagere Ca/Si-verhouding in de calciumsilicaat

hydraten. Uit testen in [13] blijkt namelijk dat hoge hoeveelheden SiO_2 , Fe_2O_3 , en lage hoeveelheden CaO leiden tot een betere resistentie tegen zuuraanvallen.

2.5.3 Testmethodes

Typisch kan men ervoor kiezen om realistische zuurconcentraties te gebruiken, om praktische toepassingen te benaderen, of eerder verhoogde concentraties gebruiken, om de testduur (drastisch) te reduceren. In geval van UHPC is het gebruik van realistische concentraties weinig zinvol, omdat de weerstand te groot is om binnen een aanvaardbare testperiode conclusies te kunnen trekken. In [14] wordt bij testopstellingen van meerdere jaren nog steeds geen degradatie vastgesteld. Naast een hogere concentratie kan men ook een hogere temperatuur hanteren, een groter contactoppervlak voorzien, of cyclische belasting aanwenden.

Men kan schade ten gevolge van zuuraantasting uitdrukken als wijzigingen van afmetingen, massa en sterkte, maar even goed kan men enkel visueel een gradatie definiëren in schadehoeveelheid. Men kan anderzijds ook zeer nauwkeurig een proefstuk onderzoeken en a.h.v. SEM/XRD een inwendig profiel opstellen om aan te tonen in welke mate de schadelijke stof in het materiaal is binnengedrongen. Bij vergelijking van resultaten is het van bijzonder groot belang de testparameters en evaluatiecriteria mee te nemen in de vergelijking en besluitvorming.

Er bestaan verschillende praktische testmethodes voor zuuraantasting. Men kan kiezen voor permanente onderdompeling in een zuur van bepaalde concentratie (statische testopstelling), of eerder kiezen voor een cyclische zuurbelasting a.h.v. de TAP-installatie (dynamische testopstelling), beschreven in [15]. Ongeacht welke methode men gebruikt, moet men een aantal parameters goed onder controle houden. Allereerst is een constante concentratie aan agressief materiaal nodig om juiste conclusies te trekken. Men kan dit bereiken door een dynamisch titratiesysteem of, hoewel minder accuraat, door regelmatig verversen van de oplossing. De frequentie van verversing hangt af van opstelling tot opstelling, in functie van het geteste beton, het gebruikte zuur, en omgevingsfactoren zoals de verdampingssnelheid van de oplossing... Het verversen van de oplossing is eveneens van belang om de invloed van oplosingsvreemde ionen te beperken. Naast de constante concentratie, gekarakteriseerd door een constante pH-waarde, moet men ook trachten een constante temperatuur te voorzien. Indien met een dynamisch titratiesysteem werkt is een constante menging van de oplossing van belang, zodat overal dezelfde concentratie voor handen is.

Het TAP-systeem, ontwikkeld aan de UGent, en volledig beschreven in [15], is specifiek ontwikkeld om proefstukken te testen door middel van versnelde aantasting. Bovendien is de cyclische belasting een goede benadering van bepaalde realistische situaties, zoals invloed van tijdingen, stroming in pijpleidingen,... Er is, naast een meetsysteem a.h.v. laserstralen, ook een semi-automatisch borstelsysteem voorzien, waarbij op geregelde tijdstippen los materiaal kan verwijderd worden van de cilindrische proefstukken. De laserstralen meten de lengte tot aan het proefstuk, zodat met conclusies kan trekken over de diameter (evolutie) van de proefstukken, alsook over de ruwheid van de proefstukken. Hierbij is het belangrijk een onderscheid te maken tussen de schade t.g.v. de chemische aantasting en deze t.g.v. het borstelen, om interferentie (superpositie) van beiden te vermijden. Eveneens van belang is dat de proefstukken en de oplossing van schadelijke stof tijdens het beproeven gescheiden zijn. Dit is nodig om te vermijden dat

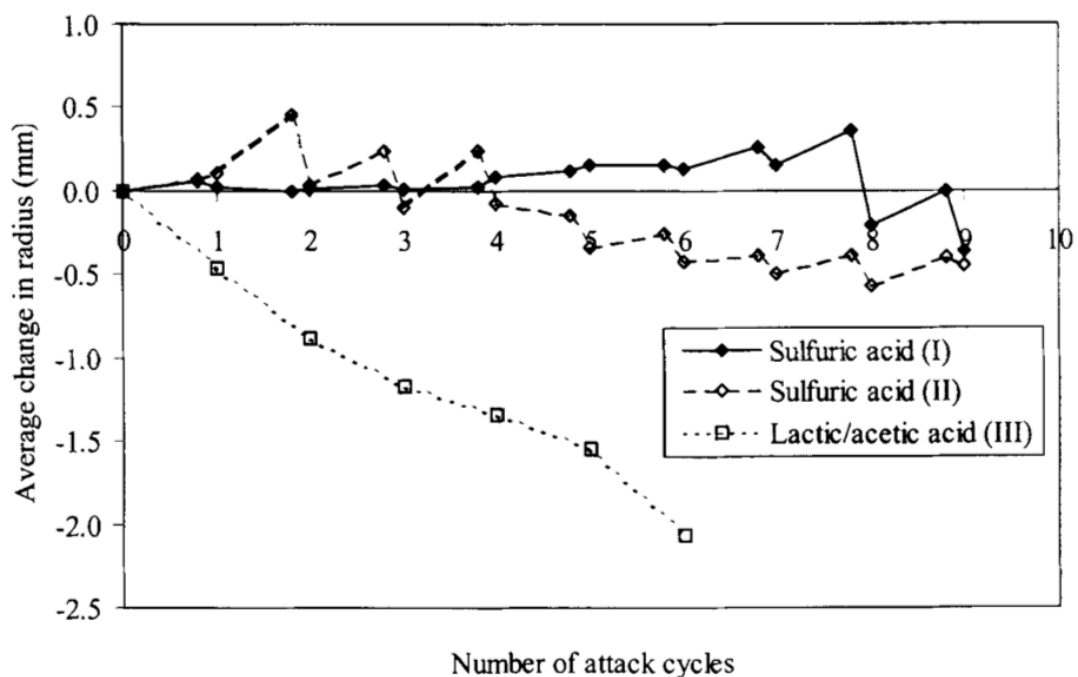
er eventueel een basische buffer van het ene proefstuk een bescherming voorziet voor de andere proefstukken, vooral bij proefstukken van verschillende samenstelling.

2.5.4 Testen met melkzuur en zwavelzuur

Zowel in [3] als in [4] worden goede tot uitstekende resultaten opgetekend voor de weerstand van UHPC t.o.v. zuuraanvallen. Er werden zowel proeven uitgevoerd met melkzuur als met zwavelzuur. Beide zuren zijn sterke zuren. In de milieuklassen ziet men dat een onderscheid wordt gemaakt in zwakke, gemiddelde en sterke zuren. Men zou dus voor de volledigheid naar één zuur van elke categorie moeten kijken, maar aangezien men hier het effect op UHPC onderzoekt, kan men verwachten dat de interactie tussen het beton en de zwakke zuren verwaarloosbaar is.

In [3] zijn testen uitgevoerd met zwavelzuur, m.b.v. de TAP-installatie. Er werd een zuurconcentratie van 0,5 m% aangewend, en elk punt op het proefstuk was 1/3 van de tijd ondergedompeld in de zuuroplossing. Opmerkelijk genoeg werden bij deze proef slechtere resultaten opgetekend voor het UHPC dan voor de referentiemortel, een traditioneel beton met hoogovenslak, na 12 weken aantasting. De schade was een grootteorde 10 keer groter dan de schade bij het referentiebeton (een beton met hoogovenslak cement). Het UHPC vertoonde een grotere expansie door de chemische interactie, alsook een veel groter materiaalverlies door het borstelen.

Typisch voor zwavelzuur is de uitgesproken zwelling van het aangetaste materiaal. Hierdoor bekomt men voor de evolutie van de proefstukstraal in de tijd een zaagpatroon, door het continu toenemen van de straal door chemische aantasting, en vervolgens afnemen van de straal door borstelen. Dit in tegenstelling tot aantasting door melkzuur, waar geen zwelling wordt waargenomen. Op Afbeelding 8 uit [15] wordt dit verschil in schadepatroon geïllustreerd, waarbij voor de drie types beton een CEM I 42.5 HSR/ LA werd gebruikt, met een W/C-factor van 0,40. Voor type II, werd 30 kg/m³ silica fume toegevoegd.



Afbeelding 8: Diameterverandering van proefstukken blootgesteld aan zuuraantasting, i.f.v. het aantal aantastingscycli, voor en na borstelen [15]

2.6 Chloride-aantasting

2.6.1 Oorsprong van chloriden

Chloride-aantasting kan voorkomen in verschillende omgevingen. In een mariene omgeving worden de chlorides aangevoerd door het zeewater. Hierbij wordt in sommige gevallen de chlooraantasting nog versterkt door getijdenwerking, waardoor een cyclische belasting van het beton ontstaat. De nefaste invloed van deze cyclische belasting wordt ondermeer benadrukt in [14]. Een andere bron van chlorides vloeit voort uit het gebruik van dooizouten op wegen. Hier wordt de chlorideaantasting gesuperponeerd met het schadelijke effect van cyclische vries-dooi cycli.

2.6.2 Schademechanismes

De reden waarom chloride-indringing schadelijke gevolgen heeft is tweeledig. Enerzijds is de aanwezigheid van chloriden in het beton één van de voornaamste redenen voor vroegtijdige corrosie van de betonwapening, zoals bevestigd in [16]. De chloride-ionen vallen immers de passieve buffer rond de wapening aan, zodat de natuurlijke bescherming van het staal verdwijnt. Het falen van de staalwapening kan om evidente redenen dramatische gevolgen hebben, zeker voor dragende elementen. Indien de wapening in die mate gecorrodeerd is dat het geen krachten meer kan opnemen, heeft dit namelijk als gevolg dat het betonnen element als geheel ook geen trekkrachten meer kan opnemen. Anderzijds, kan bij ernstige corrosie van de wapening het corrosieproces expansief worden, waardoor het beton zelf ook schade oploopt.

Schade ten gevolge van chloride indringing wordt typisch gemeten en uitgedrukt via massaverlies van de proefstukken. Ook het visueel vaststellen van barstvorming, of het wijder worden van bestaande barsten, is een manier om schade vast te stellen en te beschrijven.

2.6.3 Testmethodes

Verschillende testmethodes en procedures zijn voor handen om chloride-indringing te bepalen. Het doel, namelijk het vastleggen van een chlorideprofiel, is wel telkens hetzelfde. In eerste instantie wordt op natuurlijke, dan wel op gedwongen wijze, chloriden door een proefstuk gedreven. Vervolgens wordt het profiel opengespleten en besprenkeld met zilvernitraat. De chloride-indringing kan dan ofwel visueel, ofwel door middel van titraties, ofwel onder microscoop geanalyseerd worden.

In [16] worden zowel de passieve/natuurlijke methode als de gedwongen methode uitgelegd en toegepast. Bij de natuurlijke methode vindt chloride-indringing plaats door gewone diffusie van de chloride-ionen onder invloed van het concentratiegradiënt. Dit wordt beschreven door de wetten van Fick. Een bepaald volume NaCl-oplossing wordt in een reservoir boven een op één zijde na met epoxy bekleed proefstuk geplaatst. De concentratie van deze oplossing wordt constant gehouden. Op basis van het concentratieprofiel kan men vervolgens de schijnbare diffusiecoëfficiënt bepalen.

Vaker, en zeker in geval van UHPC, is het echter nuttiger en praktisch haalbaarder (met oog op uitvoeringstermijn) om met gedwongen migratie van de chloride-ionen te werken. Deze gedwongen migratie wordt in de hand gewerkt door het voorzien van een spanningsverschil over het proefstuk en het voorzien van verschillende oplossingen aan beide kant van het proefstuk die respectievelijk dienst doen als kathodische en

anodische oplossing. Aan de hand van deze methode wordt de migratiecoëfficiënt bepaald.

Beide methoden leveren coëfficiënten die veel lager zijn voor RPC en UHPC dan voor traditioneel beton, of de indringing voor deze beide betonsoorten is dus veel lager dan voor traditioneel beton. Zo is de migratiecoëfficiënt van een (mechanisch nabehandelde) RPC een factor 50 lager dan een traditionele C30 beton.

In [2] wordt UHPC beproefd op chloride-indringing volgens ASTM richtlijnen (ASTM C 1202-05), en UHPC blijkt, opnieuw erg goed te scoren op vlak van resistentie tegen chloride-indringing. Monsters van verschillende dieptes in de op chloriden belaste proefstukken werden geanalyseerd. De gemeten waarden voor het chloridegehalte in het materiaal waren telkens lager dan de meetfout, hetgeen er op wijst dat de chloride-indringing zeer laag is. Nabehandeling, ongeacht de soort, had op de in [2] geteste mengsels een positieve invloed op de weerstand tegen chloride-indringing. Door mechanische/thermische nabehandeling wordt immers de microstructuur dichter gemaakt, waardoor indringing en diffusie moeilijk zijn.

In [3] wordt UHPC beproefd op chloride-indringing volgens de Nordtest (NT Build 443) methode (Scandinavische standaarden). Deze methode maakt gebruik van het reeds vermelde spanningsverschil ter bevordering van de chloride-indringing. Deze testmethode laat toe verschillende parameters te laten variëren, naarmate de betonkwaliteit. Door de parameters tijd en spanning aan te passen, kan ervoor gezorgd worden dat het migratiefront mooi meetbaar is. Hierbij moet men in gedachten houden dat indringingsdieptes van verschillende proefstukken niet rechtstreeks vergeleken kunnen worden. Vergelijking van de prestaties kan enkel door de migratiecoëfficiënten naast elkaar te leggen. De uitvoeringsmethode en te hanteren norm worden toegelicht in de praktische gedeelte van dit thesisverslag. Bij de uitgevoerde testen in [3], wordt voor UHPC een diffusiecoëfficiënt gevonden die een factor 50 tot 500 kleiner is dan voor traditioneel beton.

2.7 Sulfaataantasting

2.7.1 Oorsprong van sulfaten

Hoewel betonaantasting door zouten verschillende praktische invullingen kan krijgen, en verschillende zouten in aanmerking komen, wordt vaak in de eerste plaats naar sulfaten gekeken. Dit omwille van een aantal specifieke schademechanismen die in werking treden enerzijds, maar vooral ook omwille van de praktische relevantie anderzijds. Sulfataantasting is een veelvoorkomend fenomeen in een mariene omgeving, in een industriële omgeving of in rioleringsnetwerken.

In sommige regio's treft men hoge sulfaatconcentraties aan in de bodem, in het grondwater. In Europa is de concentratie van de sulfaten slechts zelden van die omvang dat het beton er last van ondervindt. In Duitsland wordt volgens [17] in sommige rivieren sulfaatconcentraties gevonden tussen de 1500 en 3000 mg/l. Typisch is dit het geval in (voormalige) mijngebieden, waar een sterke bodem- en grondwaterverontreiniging is opgetreden. Dit kan zelfs jaren na het opgeven van de mijnen nog het geval zijn.

Typisch wordt bij proefopstellingen en bij onderzoek naar sulfaataantasting gewerkt met twee sulfaatconcentraties. Een concentratie die dicht aanleunt bij de werkelijkheid, 1500 of 3000 mg/l, en een overdreven concentratie om de degradatie te versnellen en de effecten ervan uit te vergroten. In de uitvoeringsprocedure die in de RWTH Aachen wordt gebruikt (AA 11.1.88) wordt als sterke concentratie 30.000 mg/l voorgeschreven. Nu is deze concentratie wel overdreven naar Europese normen, omdat men hier dergelijke concentraties in de praktijk niet tegenkomt, maar de concentraties waar de bouwindustrie elders mee wordt geconfronteerd, brengen deze waarden wel in een ander perspectief. In [18] bijvoorbeeld, waar uitgebreid onderzoek wordt gedaan naar sulfaataantasting door sulfaatvervuiling in de bodem, leest men dat in China (Xinjiang), waarden tot boven de 21.000 mg/l worden opgemeten. Dit betekent een waarde met factor 7 hoger dan wat in Duitsland wordt gevonden. Beton dat goed presteert bij sulfaataantastingsproeven, zelfs bij concentraties van 30.000 mg/l, is in deze omstandigheden een absolute noodzaak.

Een belangrijke toepassing van sulfaataantasting door verontreinigd grondwater is de aantasting van tunnels [18]. Eveneens in China, in de Baijialing tunnel, een schakel in de spoorlijn tussen Chengdu en Kunming, worden in het drainagesysteem van de tunnel SO_4^{2-} – concentraties tot 32.475 mg/l waargenomen. Indien in deze omstandigheden geen maatregelen worden getroffen om het beton hier tegen te wapenen, zal de levensduur van het beton dat met deze concentraties in aanraking komt van korte duur zijn.

2.7.2 Schademechanismes

De typische schademechanismen ten gevolge van sulfaataantasting zijn barsten, loskomen van betonschalen van de betonoppervlak, of algemeen sterkteverlies door ontwikkelen van een grovere porositeit. De chemische reactie die de sulfaten aangaan met hydratatieproducten van het cement zorgt voor de productie van een aantal schadelijke en zelfs destructieve stoffen. Naast gipsvorming, een expansief proces dat barstvorming veroorzaakt, en de vorming van een aantal gelproducten, is voornamelijk

de productie van ettringiet te vrezen. Dit proces is meer nog dan gipsvorming een expansief proces.

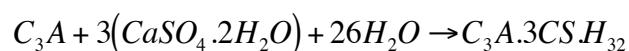
Evenals bij zuuraantasting, wordt in [13] vastgesteld dat de concentratie van het agressief agens een invloed heeft op het optredend schademechanisme. Zo is bij lage concentraties natriumsulfaat de vorming van ettringiet overwegend, terwijl bij hogere concentraties natriumsulfaat eerder gipsvorming te vrezen is. Aangezien beide reactieproducten een andere mate van expansiegedrag hebben, is dit onderscheid wel van belang bij het trekken van conclusies. Dit moet men dus in gedachten houden bij de keuze van de beproevingsmethode. Andere manieren om de reactiesnelheid te beïnvloeden zonder de concentratie aan te passen, volgens [19], is de afmetingen van het geteste proefstuk verkleinen, of de W/C-factor laten toenemen.

Naast deze chemische schademechanisme treedt er eveneens kristallisatie op van zoutbestanddelen in de poriën van de gehydrateerde cementpasta [13]. Er treedt echter geen druk op ten gevolge van dit fysisch proces, zodat dit geen destructieve gevolgen heeft.

Een belangrijk onderscheid dat dient te worden gemaakt in sulfaataantasting is of de oorzaak inwendig, dan wel uitwendig is [20]. Bij inwendige sulfaataantasting is de sulfaatbron door een ongelukkige materiaalkeuze reeds van bij het mengen in het beton verwerkt. Bij chemische reacties in het hart van het beton, zullen de destructieve gevolgen des te dramatischer zijn. Mogelijks zal de schade bij UHPC groter zijn dan bij traditioneel beton bij inwendige sulfaataantasting, daar de expansiemogelijkheden in de dichte microstructuur van UHPC minder voor de hand liggen. De hogere treksterkte van ultra hogesterktebeton, ten opzichte van traditioneel beton, blijkt alsnog ontoereikend om deze interne krachtswerking op te vangen. In geval van externe sulfaataantasting is de oorzaak volledig uitwendig. De lage permeabiliteit van UHPC kan hierbij wel een interessant voordeel bieden ten opzichte van traditioneel beton.

2.7.3 Chemische analyse van de schademechanismes

Reactie tussen sulfaten en de bestanddelen van beton is niets uitzonderlijks. Er worden zelfs opzettelijk sulfaten toegevoegd aan het betonrecept, bijvoorbeeld onder de vorm gips of anhydriet, om de onstuimige reactie van calciumtrialuminaat (C_3A) met water te temperen. Het C_3A reageert met het sulfaathoudend product tot ettringiet, volgens volgende reactie:

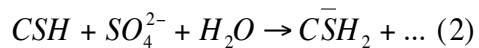
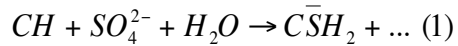


Deze primaire of normale ettringietvorming (EEF: Early Ettringite Formation) vormt in de plastische fase van het beton (dormante periode) geen gevaar voor de betonsterkte, daar het beton nog vrij kan uitzetten. Het ettringiet legt een coating rondom de cementdeeltjes, zodat het hydratatieproces vertraagt wordt. Het sulfaathoudend product wordt daarom ook gebruikt als een bindtijdregelende toeslag.

Uitgestelde ettringietvorming (DEF: Delayed Ettringite Formation) is het ergste schademechanisme ten gevolge van sulfaataantasting. Deze vindt namelijk plaats wanneer het beton al (grotendeels) verhard is, en dus een zeer lage E-modulus bezit. Aangezien er geen ruimte is voor de reactieproducten, en het beton niet meer kan uitzetten, veroorzaakt het expansief reactieproces aldus scheurvorming. De exacte

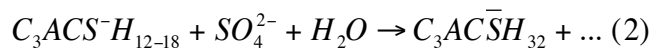
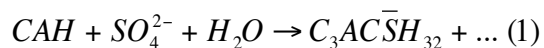
gevolgen van DEF zijn volgens [20] afhankelijk van de specifieke chemische reactie die plaats vindt. In volgende reacties worden telkens de voornaamste reactieproducten in de reactievergelijking opgenomen, om het overzicht te bewaren. De overstreepte S staat in de vergelijkingen voor de sulfaatgroep, om verwarring met de silica-groep te vermijden.

- Vorming van gips uit CH (1) en CSH (2):



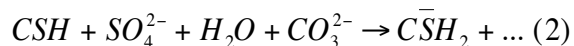
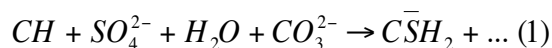
Dit proces veroorzaakt losbarsten van schalen beton aan de oppervlakte van het beton, en algemene verzwakking van de cementpasta, door decalcificatie van de CSH die net verantwoordelijk is voor de bindingcapaciteit.

- Vorming van ettringiet uit de calciumaluminaathydraten (1) en monosulfaathydraten (2):



Dit proces veroorzaakt eveneens wegspatten van betonschalen, door het expansief karakter. Dit expansief karakter wordt veroorzaakt door het opnemen van water, hetgeen duidelijk zichtbaar is in de formules, door de toename in aantal H-moleculen.

- De derde reactie van belang ten slotte is de vorming van thaumasiet uit CH (1) en CSH (2) in geval van carbonaationen:



De vorming van thaumasiet veroorzaakt de meest dramatische krachtsverlies, daar een groot deel CSH aan de hand van beschreven reactie kan herleid worden tot een papperige toestand, zonder enige residuele kracht.

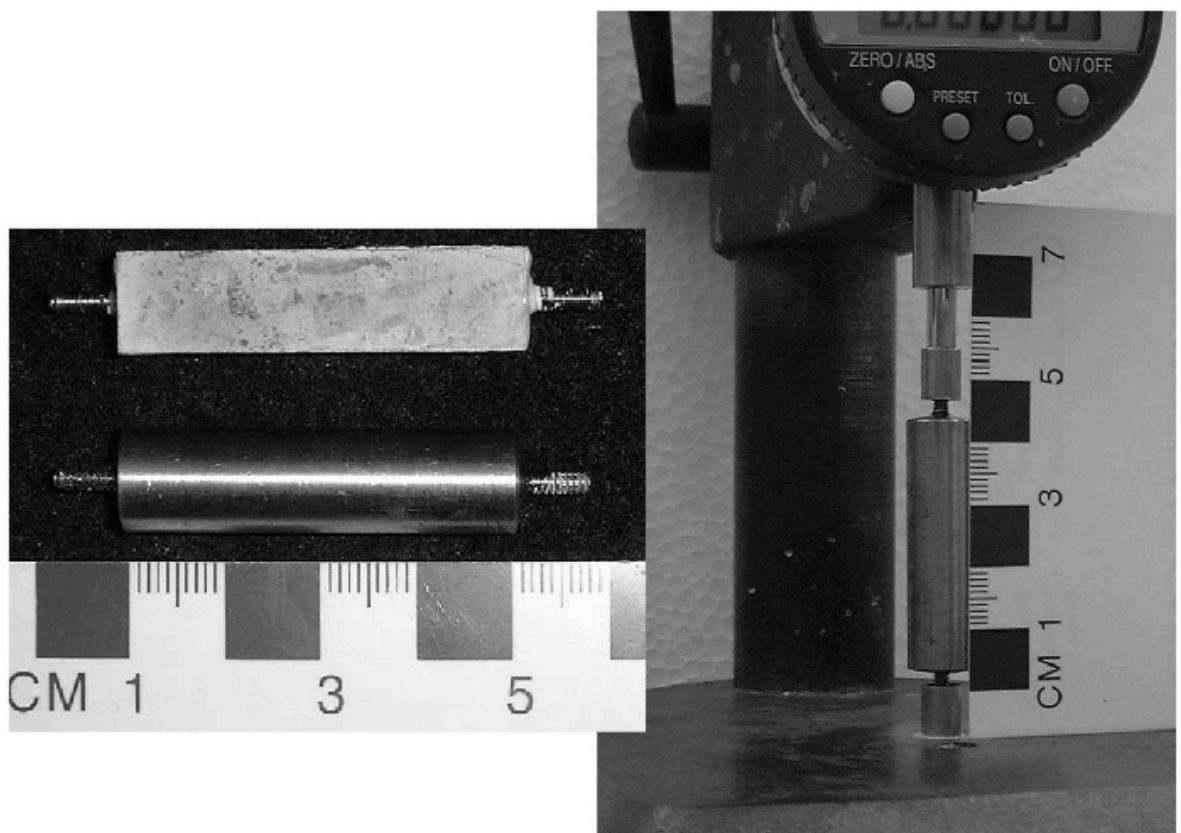
In [21] wordt een chemische analyse uitgevoerd van de door sulfaten belaste proefstukken. Men kan klaarblijkelijk drie zones onderscheiden in de propagatie van de aantasting van het proefstuk. De uitwendige zone blijkt poreuzer te worden dan oorspronkelijk, voornamelijk omdat de reactieproducten weggevoerd zijn uit het beton en omdat de microstructuur beschadigd wordt door het expansief proces. In een dieperliggende zone ziet men dat een deel van het CaOH vervangen worden door gips, en dat het monosulfaat vervangen wordt door ettringiet. In nog dieper gelegen zones worden hoge concentraties sulfaten teruggevonden, wat wijst op de aanwezigheid van monosulfaten en/of ettringiet. In het algemeen worden de grootste hoeveelheden gips dus meer in de buitenste lagen van het proefstuk teruggevonden. In eerste instantie

zorgen de chemische reacties voor een verdichting van de microstructuur. Holtes worden namelijk opgevuld ten gevolge van expansieve reacties. Onder andere wordt ook een verdichting van het CSH waargenomen op microscoopbeelden. Beide effecten zorgen in eerste instantie voor een versteviging van het materiaal. Uiteraard stoppen de chemische reacties niet wanneer de optimale situatie is bereikt, en bij een toenemende expansie door een verdere vorming van ettringiet en gips wordt het beton op inwendige trek belast, met scheurvorming tot gevolg.

2.7.4 Testmethodes

Indien UHPC wordt beproefd op zijn weerstand tegen sulfaten is opnieuw een versneld schademechanisme aan te bevelen. Naast de keuze voor een verhoogde concentratie aan schadelijke stoffen, kan men net als bij zuuraantasting kiezen voor een cyclische belasting.

De schade bij sulfaataantasting wordt meestal opgemeten als een massaverlies, door het wegvallen van materiaal na barstvorming. Door het expansief karakter van de optredende chemische reacties kan schade ook opgemeten worden door verandering in afmetingen van het proefstuk te evalueren. De hiervoor gebruikte apparatuur staat op Afbeelding 9. Aangezien verschillende sulfaten verschillende schademechanismen veroorzaken, kan het gebruik van één enkele parameter mogelijk geen correct beeld geven van de optredende schade. Alleszins mogen de schadeparameters van schadegevallen ten gevolge van verschillende sulfaten niet zonder meer vergeleken worden, en dient men voor elk geval apart de meest representatieve parameter te bepalen.



Afbeelding 9: Meetapparatuur ter opmeting van lengteverandering door sulfaataantasting [21]

De in [13] toegelichte testresultaten zijn erg verschillend al naargelang een permanente onderdompeling dan wel een cyclische onderdompeling. Bij permanente onderdompeling lijkt de aanwezigheid van hoogovenslak in het beton een gunstige invloed te hebben op de schade ten gevolge van sulfaataantasting (zowel voor natriumsulfaat, als voor magnesiumsulfaat). Bij cyclische belasting presteert traditioneel beton dan weer beter. De slechte weerstand van hoogovenslakbeton bij cyclische belasting wordt geweten aan de opbouw van kristallisatiedruk.

Het opmeten en kwantificeren van schade gebeurt meestal door het opmeten van expansie. Hiervoor wordt een “lengteveranderingvergelijker”, beschreven in [21], aangewend. Deze is ontworpen om een proefstuk op te meten, waarbij het proefstuk aan weerszijden beschikt over een metalen pin. Deze laten toe het proefstuk steeds op exact dezelfde manier op te meten, met een roestvrij stalen cilinder als referentie.

In [21] wordt gewezen op moeilijkheden om kwalitatieve proefstukken te maken, en des te meer om bij verschillende testreeksen een vergelijkbare kwaliteit te verkrijgen. Door de specifieke (en eerder kleine) afmetingen van de proefstukken, en moeilijkheden bij het kwalitatief inwerken van de metalen pinnen, is het erg moeilijk om telkens dezelfde kwaliteit te garanderen. Een slechte verdichting van het materiaal rond de pinnen kan echter aanzienlijke (in beschouwing genomen de grote nauwkeurigheid van de meettechniek) gevolgen hebben op het expansiegedrag van het materiaal rond deze pinnen. Er worden dan ook door de auteurs van [21] vraagtekens geplaatst bij de accuraatheid en herhaalbaarheid van deze meetmethodiek, hetgeen wordt bijgetreden door de auteur van onderhavig verslag.

DEEL 2: EXPERIMENTEEL ONDERZOEK

3 Algemene beschrijving en motivering experimenteel programma

Zoals in de literatuurstudie wordt toegelicht, wordt chemische aantasting onderverdeeld in verschillende hoofdcategorieën: carbonatatie, vries-dooiaantasting, chloride-aantasting, zuuraantasting en aantasting door sulfaten. In het kader van dit onderzoekswerk wordt de focus op drie aantastingsmechanismen gelegd: chloride-aantasting, zuuraantasting en aantasting door zouten. De voornaamste reden hiervoor, is dat door deze keuze optimaal wordt aangesloten bij eerder uitgevoerd onderzoek, handelend over vries-dooi aantasting [22].

Aangezien chloriden zowel voorkomen in zout (zee-) water als in dooizouten, is onderzoek naar weerstand van UHPC tegen chloride-aantasting zeer nuttig met oog op het gebruik van UHPC voor infrastructuurwerken in mariene omgeving of voor wegeninfrastructuur. Ook in industriële omgeving kan UHPC in contact komen met chloriden. Chloride-aantasting wordt getypeerd door een migratiecoëfficiënt, die wordt bepaald aan de hand van RCM-proeven (Engels: *Rapid Chloride Migration*, ook bekend als *CTH-test*). Deze RCM-proeven zullen op drie leeftijden uitgevoerd worden.

Zuuraantasting is een zeer ruim begrip. Zuren kunnen een uiteenlopende zuursterkte hebben en ook de aantastingsmechanismen kunnen erg verschillen. In dit onderzoek wordt gekozen voor een cyclische chemische belasting van het beton, door gebruik te maken het TAP-toestel, ontworpen door Prof. De Belie et al. [15]. Omwille van de verwachte hoge resistentie van het materiaal, wordt ervoor gekozen om een sterk zuur te gebruiken, namelijk zwavelzuur. Het nut van het onderzoek naar zuurresistentie situeert zich voornamelijk in de industriële sector, in rioleringspijpen (biochemische processen) en in de landbouwsector.

Sulfaataantasting kan verregaande en destructieve gevolgen hebben door het gevaar op uitgestelde ettringietvorming. Sulfaataantasting wordt typisch gemeten aan de hand van de lengteverandering van proefstukken, en door evoluerende dichtheid in kaart te brengen aan de hand van ultrasoon onderzoek.

Het onderzoek op sulfaataantasting binnen deze thesis wordt uitgevoerd in samenwerking met de faculteit ingenieurswetenschappen van de RWTH Aachen, onder toezicht van Dr. Ir. A. Volpracht en Ir. J. Haufe. Deze samenwerking laat toe verschillende apparatuur te gebruiken en reeds in het verleden verzamelde data uit te wisselen. Onderzoek naar sulfaatresistentie is vooral nuttig voor beton dat gebruikt wordt in riolerings toepassingen, industriële toepassingen, mariene toepassingen en beton dat in zwaar verontreinigde grond wordt gebruikt.

Uit de literatuurstudie, en later ook uit de uitgevoerde proeven van alle aard, blijkt dat porositeit en de interconnectiviteit van deze poriën en het luchtgehalte van het beton belangrijke eigenschappen zijn in het duurzaamheidsplaatje. Daarom worden in het onderzoeksprogramma van deze thesis verschillende proeven opgenomen die toelaten deze eigenschappen in kaart te brengen. Ondermeer wordt wateropsorping onder vacuüm toegepast, evenals een luchtholtenanalyse en kwikporosimetrie.

4 Beschrijving gebruikte mengsels en motivering materiaalkeuzes

4.1 Keuze van de betontypes

In de lijn met de literatuur die omtrent ultra hogesterktebeton bestaat, en om het onderzoek in het kader van deze thesis zo breed mogelijk te houden, wordt bewust gekozen om alle testen uit te voeren op verschillende betonmengsels. Er wordt voor gekozen een hogesterktebeton, een ultra hogesterktebeton en een RPC beton te beproeven. Bovendien wordt ook een mengsel traditioneel beton voorzien, dat dienst doet als referentiemateriaal. De samenstelling van het betonmengsel voor het hogesterktebeton en voor het ultra hogesterktebeton is dezelfde. De extra druksterkte wordt bekomen door warmtenabehandeling. Deze bestaat uit het onderdompelen van de betonproefstukken in een warmwaterbad van 90°C, gedurende 48 uur. Dit is de enige nabehandeling die wordt uitgevoerd op deze proefstukken. Op de andere proefstukken wordt helemaal geen nabehandeling uitgevoerd. Deze proefstukken worden bewaard in een vochtige omgeving (natte kast) waar een regime in stand wordt gehouden van 20°C en $90 \pm 5\%$ relatieve vochtigheid.

4.2 Keuze van de granulaten

Bij de keuze van de betonsamenstelling is de keuze van de granulaten een belangrijke invloedsfactor met oog op de sterkte van het beton. Bij (ultra) hogesterktebeton is de matrix van een zodanige kwaliteit dat de granulaten in veel gevallen de zwakke schakel worden. Men kan dit duidelijk zien bij sterkteproeven, wanneer bij hogesterktebeton niet langer intergranulaire scheurvorming plaatsvindt, doorheen de matrix, maar eerder granulaire breuken optreedt. De granulaten breken dan eerder, of gelijktijdig met de cementmatrix.

Om uit te maken welke granulaten geschikt zijn voor het maken van (ultra) hogesterktebeton dat onderworpen wordt aan chemische aantasting, worden de granulaten voorafgaandelijk afzonderlijk getest op hun gedrag in chemische omgeving. Het chemisch agens dat hiervoor wordt aangewend is HCl (waterstofchloride), daar dit een sterk zuur is, en aldus een indicatie geeft van hoe een betonmengsel waarin deze granulaten verwerkt zijn zich zal gedragen in een zure omgeving.

De verschillende granulaten die getest worden in HCl zijn porfier, basalt, gebroken steenslag, rolgrind, korund, bauxiet en kwartszand. De uitvoeringsprocedure is als volgt, volgens norm NBN 589-209:

- In eerste instantie wordt 100 gram van elk granulaat in de oven gedroogd aan een temperatuur van 105° C, tot de geregistreeerde massaverandering op dagbasis kleiner is dan 0,01%. De massaverandering wordt dagelijks opgemeten op een weegschaal met 0,1 gram. Na vier dagen drogen is aan deze eis voldaan.
- Vervolgens werden de monsters in een maatbeker ondergedompeld met een HCl-oplossing van 30%. Deze maatbeker wordt in een warmwaterbad geplaatst, op een temperatuur van 60° C. Aangezien de te hanteren temperatuur niet vermeld wordt in de norm, wordt de temperatuur zodanig ingesteld dat de verdampingstemperatuur van de HCl-oplossing niet overschreden wordt. Indien een reactie wordt waargenomen, wordt bijkomende oplossing in de maatbeker

aangebracht, om zeker te zijn dat de HCl in voldoende mate aanwezig is, om de volledige reactie tussen het granulaat en de zuurhoudende oplossing te laten doorgaan.

- Na blootstelling aan het zuur wordt het overblijvende materiaal van de granulaten gespoeld met gedistilleerd water, om zoveel mogelijk HCl te verwijderen. Hierbij wordt filterpapier gebruikt om geen materiaal te verliezen. Het resterend materiaal wordt opnieuw in de oven geplaatst om te drogen naar de initiële toestand. Eens opnieuw een constante massa bereikt is, met minder dan 0,01% massavariatie op dagbasis, worden de monsters opnieuw gewogen. De hoeveelheid massaverlies geeft een kwalitatieve indicatie van reactie die is plaatsgevonden met het HCl, en aldus de gevoeligheid tegenover een zure omgeving. In Tabel 2 wordt een samenvatting van de resultaten gegeven. In de eerste kolom staat het geteste granulaat, in de tweede kolom de kleurverandering die werd waargenomen tijdens de reactie, en tenslotte de procentuele massa-afname die achteraf wordt vastgesteld.

Het kwartzand blijkt, zoals verwacht, volledig inert aan het zuur. Helemaal geen reactie wordt waargenomen. Korund vertoont eveneens zo goed als geen reactie, maar een kleurverandering van de oplossing wordt evenwel waargenomen. Porfier, basalt en bauxiet vertonen elk een zeer lichte reactie, in combinatie met een intensere kleurverandering dan korund. Tenslotte vertonen zowel de steenslag (Afbeelding 10) als het rolgrind (Afbeelding 11) een hevige reactie met het zuur. De oplossing met de rolgrind borrelt op gedurende een tiental minuten en verkleurt naar geel. De oplossing met de gebroken steenslag borrelt op gedurende ruim een halfuur, waarbij grote bellen worden gevormd en een zwarte verkleuring optreedt. Meerdere keren wordt de HCl-oplossing toegevoegd, met een intensifiëring van de reactie tot gevolg. Deze sterkere reactie van het rolgrind en de steenslag zijn te wijten aan een hoge concentratie kalk.



Afbeelding 10: Hevige reactie tussen steenslag en HCl



Afbeelding 11: Reactie tussen rolgrind en HCl

Tabel 2: Massaverlies granulaten bij reactie met HCl

<i>Granulaat</i>	<i>Kleurverandering</i>	<i>Massa-afname [%]</i>
Kwarts	Geen	0,03
Korund	Geel	0,07
Bauxiet	Lichtgroen	0,23
Profier	Lichtgroen	0,24
Basalt	Oranje-bruin	1,57
Rolgrind	Oranje	20,60
Steenslag	Zwart	87,11

4.3 Exacte samenstelling mengsels

Omwille van praktische redenen gerelateerd tot planning en betonvolumes werden de proefstukken in verschillende keren gemaakt. In volgend paragraaf wordt een overzicht gegeven van de verschillende mengsels en de verschillende reeksen proefstukken alsook de verschillende proeven waarvoor ze gebruikt werden. In de loop van dit verslag zal naar betonmengsels gerefereerd worden volgens een naam met volgende structuur:

X TYPE Y,

In deze naam staat X voor de gebruikte samenstelling, TYPE voor het type beton dat hiermee overeenstemt, en Y voor de reeks waarin het beton werd gestort. **X** kan een waarde hebben van 1 tot 5. Er bestaan 4 **TYPES**: HPC (hogesterktebeton, Engels: *High Performance Concrete*), UHPC (ultra hogesterktebeton, Engels: *Ultra High Performance Concrete*), RPC (Engels: *Reactive Powder Concrete*) en TC (traditioneel beton, Engels: *Traditional Concrete*). **Y** kan waarden aannemen van 1 tot 3, daar in drie reeksen gestort is.

In het FWO - project "Fundamental study of the influence of vacuum mixing on the properties of cementitious materials", toegewezen aan ir. Jeroen Dils. Werde het gebruik van basalt gekozen. Uit praktische overwegingen werd in dit onderzoek gekozen om porfier 2/4 of porfier 0/4 te gebruiken voor de UHPC - mengsels. Naast de keuze voor een ander granulaat, is de samenstelling van de mengsels ongewijzigd aan deze gebruikt in genoemd FWO - project. Voor het RPC-mengsel wordt kwarts-zand gebruikt.

In Tabel 3 wordt een gedetailleerd overzicht gegeven van de verschillende mengsels van de eerste reeks. Het mengsel voor UHPC werd twee keer gemaakt, één keer om HSB te verkrijgen, en één keer om aan een warmtebehandeling te onderwerpen om UHPC te verkrijgen. Hoewel men twee keer principieel hetzelfde mengsel heeft aangewend, worden beide betonsoorten apart beschouwd.

Na een eerste mengsel werd immers een vrij lage verwerkbaarheid vastgesteld. Aangezien elk mengsel slecht voldoende materiaal oplevert voor één reeks proefstukken, werd voor de tweede reeks geopteerd om de hoeveelheid superplastificeerder lichtjes te laten toenemen. Om de iets minder goede verwerkbaarheid van het mengsel 1UHPC1 te compenseren, werd geopteerd dit

mengsel aan warmtebehandeling te onderwerpen. Dit kan het sterkteverlies van het beton ten gevolge van de mindere verwerkbaarheid mogelijks gedeeltelijk compenseren.

De lage verwerkbaarheid die wordt vastgesteld is te verklaren door de lage fractie niet afgezeefd porfier die gebruikt is. De hoeveelheden water en superplastificeerder zijn in deze mengsels berekend op een afgezeefde porfierfractie 2/4. Het fijn stof vereist namelijk een grotere hoeveelheid water, terwijl de hoeveelheden water of superplastificeerder niet werden aangepast.

Tabel 3: Samenstelling betonmengsels Reeks 1

	1UHPC1 (WB)	2HPC1 (NWB)	3RPC1	4TC1
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
CEM I 52,5 N HSR	632	632	733	350
Silica fume (UD)	198	198	230	0
Zand M31	434	434	1008	0
Zand 0/4	0	0	0	781
Porfier 0/4	870	870	0	0
Rolgrind 2/8	0	0	0	619
Rolgrind 8/16	0	0	0	480
Meel M400	158	158	183	0
Glenium 51 con 35%	27	27	29	0,3
Water	150	150	178	158
Water Glenium	17	17	19	0,2
Water extra	133	133	160	157,8
Slumpflow [cm]	38,3	47,5	67,8	
Slump [mm]				35,0
Luchtgehalte [%]	4,0	3,0	1,3	2,4
W/C-factor	0,237	0,237	0,243	0,45
W/B-factor	0,181	0,181	0,185	0,45
Volumemassa	2400	2412,5	2412,5	2375

In Tabel 3 staat “HSR” voor “High Sulfate Resistance”, en “UD” bij silica fume voor “undensified”. De totale hoeveelheid water (bij de post “water”) die wordt toegevoegd wordt vervolgens ter verduidelijking opgesplitst in twee delen. Men maakt hierbij onderscheid tussen het water dat afkomstig is van de superplastificeerder (“Water Glenium”), en het zuiver water dat daar bijkomend aan wordt toegevoegd (“Water extra”).

In een tweede reeks werden proefstukken vervaardigd op een mortelmenger van het merk Eirich, van het type R 02 VAC. Deze reeks proefstukken is bestemd voor de proeven met betrekking tot sulfaataantasting in Aachen. Om deze proeven af te stemmen op het lopend onderzoek aan de RWTH Aachen werden de betonmengsels enigszins bijgestuurd voor deze proeven. Naast een niet-warmtebehandeld UHPC en een RPC-beton volgens dezelfde samenstelling als de eerste reeks, werd ook een RPC-beton voorzien met W/B-factor 0,5, in plaats van 0,185. Omwille van de kleinere proefstukken (zie verder) wordt gewerkt met porfier 0/2, nog steeds niet afgezeefd. De exacte samenstelling en eigenschappen van het vers beton worden in Tabel 4 weergegeven. Omwille van het gebruik van de kleine mortelmenger wordt een betere verwerkbaarheid bekomen dan de mengsels van de eerste reeks. Dit leidt onder andere tot een lager luchtgehalte bij het vers beton. De betere verwerkbaarheid is te verklaren door het groter effect van het vacuüm mengen bij de kleine menger, daar het volume dat moet worden vacuüm getrokken kleiner is. Bij mengen met de kleine menger werd de verwerkbaarheid tevens ook verbeterd door kleine hoeveelheden PCE (PolyCarboxylate Ether) toe te voegen aan het mengsel. Dit is bij de kleine menger mogelijk, door een gemakkelijkere inschatting van deze hoeveelheden. De kleine extra hoeveelheden zijn tevens ook opgenomen in Tabel 4.

Tabel 4: Samenstelling betonmengsels Reeks 2

	1UHPC2	3RPC2	5UHPC2
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
CEM I 52,5 N HSR CBR	632	733	496
Silica fume (UD)	198	230	155
Zand M31	434	1008	341
Zand 0/4	0	0	0
Porfier 0/2	870	0	683
Meel M400	158	183	124
Glenium 51 con 35%	27 + 3	29	14 + 3
Water	150	178	327
Water glenium	17	19	9
Water extra	133	160	318
Luchtgehalte	2,5	1,5	0,6
W/C-factor	0,237	0,243	0,66
W/B-factor	0,181	0,185	0,503
Volumemassa	2468	2443	2393

Tenslotte werd nog een derde reeks proefstukken gemaakt, opnieuw met de kleine mortelmenger. Deze proefstukken werden gebruikt om een bepaalde proef uitgevoerd op proefstukken van de eerste reeks te verifiëren. De exacte samenstelling wordt weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5: Overzicht betonsamenstellingen Reeks 3

	1UHPC3	2HPC3	3RPC3	4TC3
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
CEM I 52,5 N HSR	632	632	733	350
Silica fume (UD)	198	198	230	0
Zand M31	434	434	1008	0
Zand 0/4	0	0	0	781
Porfier 2/4	870	870	0	0
Rolgrind 2/8	0	0	0	619
Rolgrind 8/16	0	0	0	480
Meel M400	158	158	183	0
Glenium 51 con 35%	27 + 3	27 + 3	29	1,5
Water	150	150	178	160
Water glenium	17	17	18	0
Water extra	133	133	160	160
Luchtgehalte [%]	1,7	2,0	1,4	3,2
W/C-factor	0,237	0,237	0,243	0,45
W/B-factor	0,181	0,181	0,185	0,45
Volumemassa	2478,0	2441,0	2419,4	2420,9

In Tabel 6 wordt samenvattend een overzicht gegeven van het gebruik van de verschillende reeksen mengsels voor de verschillende proeven.

Tabel 6: Overzicht van het gebruik van de verschillende proefstukreeksen voor verschillende proeven

	RCM	TAP	Sulfaten	Methode 1	Methode 2	MIP*	AVA**
Reeks 1	X	X			X	X	X
Reeks 2			X				
Reeks 3				X			

*Mercury Intrusion Porosimetry

**Air Void Analysis

4.4 Mengprocedure met grote vacuümmenger

De 4 mengsels werden telkens vacuüm gemengd in een vacuümmixer type R08 - Vac van het merk Eirich, zie Afbeelding 12. Het mengen onder vacuüm is absoluut noodzakelijk om een de porositeit te verlagen, en aldus de sterkte te vergroten. In [3], waar men in het vers beton een luchtgehalte van om en bij de 2% vaststelt, hetgeen lager ligt dan bij de mengsels uit reeks 1 (met de grote menger geproduceerd). Men moet echter voorzichtig omgaan met deze vergelijkingen, daar niet dezelfde mengsels gebruikt worden.

De mengprocedure die herhaald wordt voor elk mengsel ziet er als volgt uit:

- 1) De gewogen ingrediënten worden verzameld in een grote weegschaal, en vervolgens allen samen in de menger overgebracht.
- 2) Het mengsel wordt droog gemengd, gedurende 15 sec, waarbij de mengbak draait een rotatie van 83 rpm en de menger aan 89 rpm.
- 3) Er wordt water wordt automatisch toegevoegd.
- 4) De superplastificeerder wordt automatisch toegevoegd.
- 5) Het mengsel wordt intensief gemengd, gedurende 2 min 30 sec, waarbij de snelheid van de menger wordt opgedreven naar 325 rpm.
- 6) Tenslotte wordt het mengsel nog traag gemengd, aan hetzelfde regime als bij punt 2), gedurende 6 min.

Van zodra de mengprocedure is doorlopen, worden de volumemassa en het luchtgehalte van het vers beton bepaald, alsook de slump flow. Vervolgens worden de mallen gevuld met beton, en op de trilplaat geplaatst gedurende ± 30 seconden.



Afbeelding 12: Eirich vacuümmenger R08/VC

4.5 Mengprocedure met de kleine vacuümmenger

De kleine menger die gebruikt wordt is een menger van het merk Eirich, type R02 - Vac, zie Afbeelding 13. Men stelt vast dat het luchtgehalte van de betonmengsels uit de kleine menger lager ligt dan de mengsels uit de grote menger, en meer in de lijn liggen met de vooropgestelde waarden in de literatuur. Dit is te verklaren door het kleiner volume dat vacuüm getrokken dient te worden, zoals reeds eerder werd aangehaald.

De mengprocedure die herhaald wordt ziet er als volgt uit:

- 1) De ingrediënten worden samen één voor één afgewogen en in de menger gebracht.
- 2) Het mengsel wordt gedurende 15 sec droog gemengd. Als na visuele inspectie blijkt dat het droog mengsel niet homogeen genoeg is, wordt wat langer gemengd. De rotatiesnelheid van de mengbak is 83 rpm, die van de menger 250 rpm.
- 3) Het water wordt langzaam manueel toegevoegd via een toegangklep in het deksel van de menger.
- 4) De superplastificeerder wordt langzaam manueel toegevoegd via een toegangklep in het deksel van de menger.
- 5) Het kijkgat van de menger wordt afgesloten en de menger wordt vacuüm gezogen. De druk in de menger kan tot 50-70 Pa gereduceerd worden, al naargelang het mengsel. Er wordt 2 min en 30 sec intensief gemengd, door de snelheid van de menger op te drijven naar 910 rpm
- 6) Nog steeds onder vacuüm wordt vervolgens nog twee minuten traag gemengd, op hetzelfde regime als bij 2).

Van zodra het mengproces afgerond is, worden de volumemassa en het luchtgehalte van het vers beton bepaald. Bij de mengsels die met de kleine menger worden geproduceerd wordt geen slump flow bepaald. De verwerkbaarheid van de mengsels is namelijk van die aard dat bij het opheffen van de conus, het beton als een pudding blijft staan, zodat weinig conclusies kunnen getrokken worden. Vervolgens worden de mallen met beton gevuld, en op de trilplaat geplaatst.



Afbeelding 13: Eirich vacuümmenger R02/VC

4.6 Sterkte-eigenschappen betonmengsels

Om na te gaan of de betonmengsels voldoen aan de sterkte-eisen van respectievelijk hoge- en ultra hogesterktebeton, die werden vernoemd in het begin van de literatuurstudie van deze thesis, werden een aantal drukproeven uitgevoerd op kubussen van 100 x 100 x 100 mm³. In Tabel 7 staat een overzicht van de behaalde resultaten, alsook het aantal proefstukken waaruit de gemiddelde drukkracht is bepaald, en de standaardafwijking.

Tabel 7: Resultaten sterkteproeven

<i>Betonreeks</i>	<i># Proefstukken</i>	<i>Gemiddelde druksterkte [MPa]</i>	<i>Standaardafwijking [MPa]</i>
1UHPC1	5	160,4	11,16
2HPC1	5	141,1	5,89
3RPC1	4	143,2	2,10
4TC1	6	62,8	0,50
1UHPC2	1	148,1	/
3RPC2	1	149,5	/
5UHPC2	1	66,5	/

Zoals kan afgeleid worden uit de waarden in Tabel 7, ligt de druksterkte voor de ultra hogesterktebetonmengsels (1UHPC1, en dus ook 1UHPC2) rond de vooropgestelde grens van 150 MPa, hetgeen het nut van de warmtebehandeling aantoonst. Het mengsel 1UHPC1 had namelijk een mindere verwerkbaarheid dan 2UHPC2 (beiden hebben wel dezelfde samenstelling). Dit is echter volledig weggewerkt door de thermische nabehandeling. Men stelt verder vast dat de gekozen mengsels voor traditioneel beton en hogesterktebeton bijzonder goed presteren, gezien de gehaalde druksterktes.

Een andere interessante vaststelling is dat het mengsel 5UHPC2 een vergelijkbare druksterkte heeft als het traditionele betonmengsel 4TC1. Hoewel dezelfde ingrediënten gebruikt zijn voor 5UHPC2 als voor het andere UHPC-mengsel, wordt een druksterkte bereikt die meer dan de helft lager ligt. Dit illustreert wederom het belang aan van de W/B-factor, in de strijd om een hogere betonsterkte te bereiken..

Aan de standaarddeviatie ziet men wel dat er vrij veel spreiding op de sterkteresultaten is. Dit mag niet uit het oog verloren worden bij het analyseren van de resultaten van de duurzaamheidsproeven, daar de sterkte in verband staat met de kwaliteit van de microstructuur en porositeit. Bovendien ziet men dat de standaarddeviatie toeneemt naarmate de sterkte toeneemt. Dit is te verklaren door het feit dat bij hogere sterktes de minste onnauwkeurigheid of zwakke schakel een grotere impact heeft dan bij lagere sterktes.

5 Zuuraantasting

5.1 Situering

De TAP-proeven ter cyclische onderdompeling van de proefstukken in een zuuroplossing werden uitgevoerd met het TAP-systeem, beschreven in [12], en gebruikt in [3] en [23]. De testmethode werd echter ad hoc bepaald, daar nog maar weinig ervaring is met het gebruik van TAP-systeem om UHPC te testen. Voor de TAP-testen zijn proefstukken gebruikt uit reeks 1.

Door de lagere (oppervlakte-)porositeit van UHPC en RPC, verwacht men een betere prestatie ten opzichte van traditioneel beton. Bovendien zijn granulaten gekozen (porfier en kwartszand) die zich zo goed als inert gedragen in een zure omgeving, hetgeen bijkomend bijdraagt tot een goeie prestatie van het beton. In het bijzonder wordt verwacht dat RPC, met de fijnste porositeit (dit wordt verder aangetoond), het best zal presteren op vlak van resistentie tegen zuuraantasting. Door de verwachte hogere weerstand van UHPC tegen zuuraantasting werd van bij het begin geopteerd voor een langere uitvoeringsperiode. In plaats van een testperiode van 12 weken zoals in [3], werden de proefstukken getest gedurende 24 weken.

5.2 Proefstukken

De proefstukken voor de TAP-proeven bestaan uit cilinders met een cilindrische holte in het centrum, zoals afgebeeld op Afbeelding 14. De proefstukken hebben een buitendiameter van 230 mm, een binnendiameter van 40 mm en een hoogte van 70 mm. Per betontype worden 3 proefstukken voorzien, zodat gemiddelde waarden kunnen bepaald worden per betontype. Opnieuw moeten de proefstukken niet allemaal identiek zijn om ze met elkaar te kunnen vergelijken. Na het monteren van de proefstukken op de TAP-installatie, wordt in eerste instantie namelijk een referentiemeting uitgevoerd, die vervolgens telkens van de volgende metingen wordt afgetrokken. Zodoende kan men een juiste vergelijking van de proefstukken maken, ongeacht eventuele excentriciteiten of onvolmaaktheden van de proefstukken of proefopstelling.

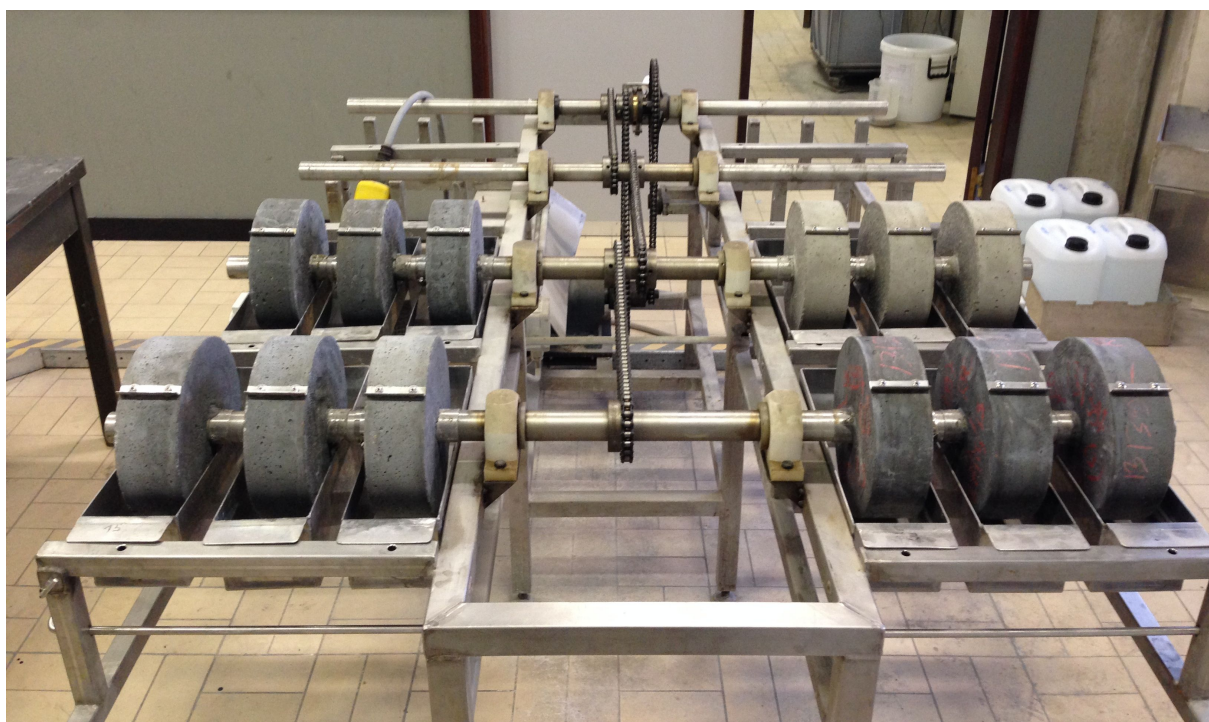
Op de betonnen proefstukken wordt een hoekprofiel bevestigd bestaande uit roestvrij staal, noodzakelijk voor de meetprocedure. Verder behoeven de proefstukken geen extra voorbereiding. In afwachting van de beproeving, worden de proefstukken in een natte kast bewaard, bij een temperatuur van $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, en bij een relatieve vochtigheidsgraad van $90 \pm 5\%$.



Afbeelding 14: Proefstuk en bekisting voor TAP-toestel

5.3 Proefopstelling en methode

De TAP-opstelling wordt opgesteld in overeenstemming met de opstelling beschreven in [15]. Aangezien drie cilinders worden getest van vier betontypes, worden vier assen van de TAP volledig ingenomen met proefstukken, zoals zichtbaar is op Afbeelding 15. Van belang is te vermelden dat de zuuroplossing in aparte recipiënten zit per proefstuk. Contaminatie van het ene proefstuk naar de andere is hierdoor dus uitgesloten. Dit is van belang indien de ene proefstuk sneller achteruit gaat dan het andere, of als er door een bepaalde reactie tussen de zuuroplossing en het proefstuk nieuwe elementen in de oplossing terechtkomen.

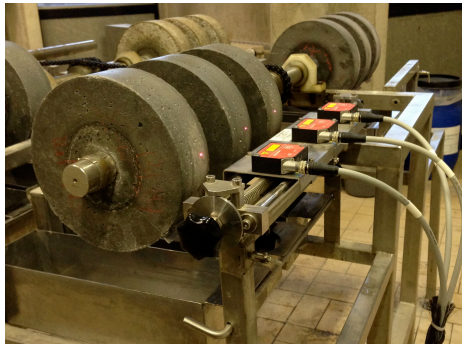


Afbeelding 15: TAP-toestel, met opgestelde proefstukken
(linksonder: 1UHPC1, linksboven: 2HPC1, rechtsonder: 3RPC1, rechtsboven 4TC1)

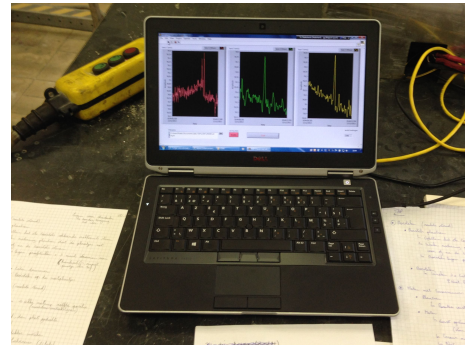
De proefstukken draaien aan een constante snelheid van 1,04 omwenteling per uur in trage modus, bij aantasting, en 24,41 omwentelingen per uur in snelle modus, bij het opmeten van de proefstukken. Het gebruikte volume zuuroplossing in de recipiënten zorgt ervoor dat de proefstukken $\pm 1/3$ van de tijd ondergedompeld zijn in een zuuroplossing van 0,5 m% H_2SO_4 , en $2/3$ van de tijd blootgesteld aan lucht, waarbij het proefstuk kan drogen. Er is overwogen om de concentratie te verhogen, met oog op het versnellen van het degradatieproces van het UHPC, maar uit een bezorgdheid om de resultaten te kunnen vergelijken met eerdere resultaten is hiervan afgezien. De enige maatregel die getroffen is tengevolge van de hogere betonkwaliteit is het langer laten lopen van de proef.

De aantasting van de proefstukken kan enerzijds kwalitatief visueel waargenomen worden, en anderzijds kwantitatief worden opgemeten met laserstralen. Voor dit onderzoek is gekozen om per cilinder 4 profielen op te meten, telkens op een halve centimeter van elkaar verwijderd, om een gemiddelde diameterwijziging te kunnen berekenen per cilinder. De nauwkeurigheid van de lasermeting bedraagt 50 μm (huidige

laserapparatuur in gebruik genomen in januari 2013). De lasers (Afbeelding 16) zijn tijdens de opmeting verbonden met een computer (Afbeelding 17), die de data bijhoudt van zodra de laserstralen het hoekprofiel op de proefstukken registreert, en vervolgens 3300 metingen uitvoert, aan een ratio van 5 metingen per millimeter. Zodoende wordt nooit de volledige omtrek wordt opgemeten, om eventuele overlap van data te vermijden.



Afbeelding 16: Laserapparatuur in werking, ter opmeting proefstukprofiel



Afbeelding 17: Output lasermetingen in computersoftware: één profiel per laser

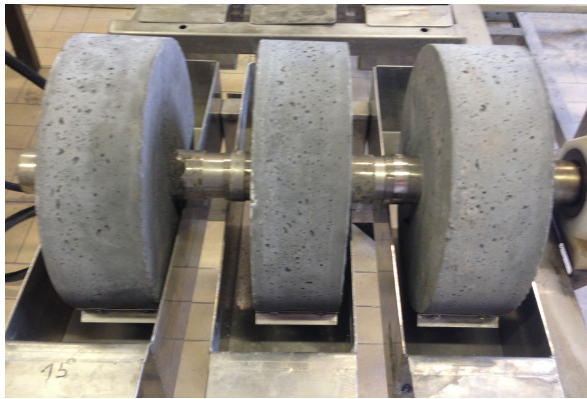
Om de aantasting nog te versnellen worden de proefstukken na elke meting semi-automatisch geborsteld [15]. Hierdoor worden loszittende deeltjes verwijderd, en kan de schadelijke oplossing niet-aangetast beton bereiken. Een bijzonderheid aan de aantasting door zwavelzuur is dat opzwellen van de proefstukken optreedt. Om dit in kaart te brengen worden de proefstukken na het borstelen opnieuw opgemeten met de laserapparatuur. Zo kan men de twee oorzaken van diameterwijziging apart bekijken.

De eerste zes weken van het proefprogramma werden de proefstukken wekelijks opgemeten, vervolgens werden de proefstukken driewekelijks opgemeten. Over de gehele proefperiode werd de zuuroplossing wel wekelijks verversd. Dit is van belang om een zo constant mogelijke aantasting te hebben van de proefstukken. Wekelijkse opmeting van de pH-waarde toont aan dat er tussen twee verversingen slecht een beperkte fluctuatie optreedt van de zuurtegraad van de oplossing.

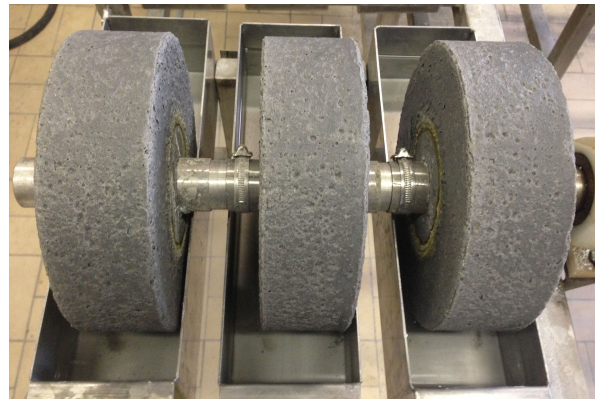
5.4 Verwerking resultaten

Visueel duurt het enige tijd voor schade waarneembaar is ten gevolge van de zwavelzuuraantasting. Opvallend is dat het traditioneel beton niet merkbaar slechter reageert dan de andere betonsoorten. Wel moet in gedachten worden gehouden dat een traditioneel beton van goede kwaliteit is gebruikt, door de keuze voor HSR-cement. Het enig zichtbaar bewijs van schade stelt zich bij het borstelen. Men kan het stof zien weggezogen worden door het afzuigstelsel, wat duidt op materiaalverlies. Wanneer de proefstukken worden geborsteld terwijl ze nog vochtig zijn, wordt een papvorming waargenomen ter hoogte van de borstels, wat naast schadevorming bovendien wijst op het zachter worden van het materiaal aan de oppervlakte.

Afbeeldingen 18 tot 25 tonen het verschil tussen de proefstukken bij aanvang van de proef, en bij stopzetten van de proef, na 20 weken.



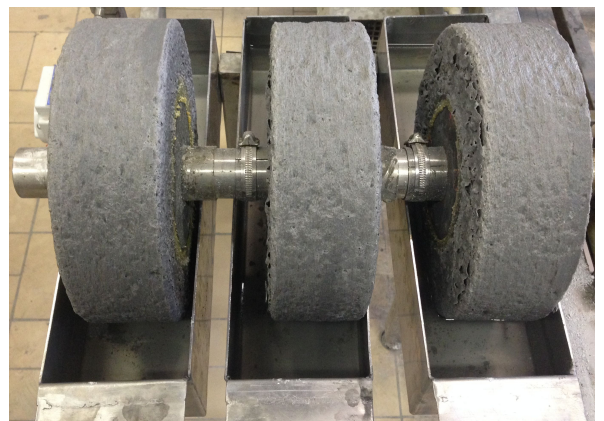
Afbeelding 18: 1UHPC1, voor aantasting



Afbeelding 19: 1UHPC1, na 20 weken aantasting



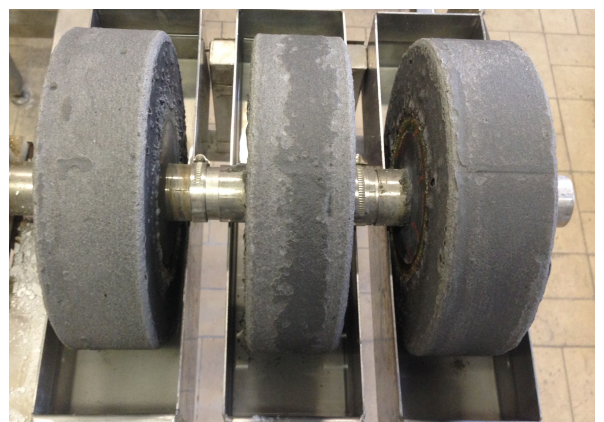
Afbeelding 20: 2HPC1, voor aantasting



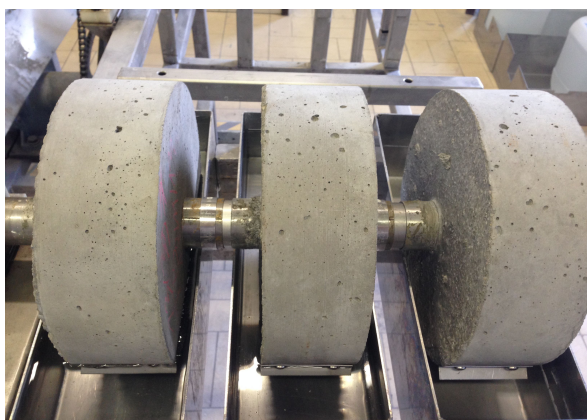
Afbeelding 21: 2HPC1, na 20 weken aantasting



Afbeelding 22: 3RPC1, voor aantasting



Afbeelding 23: 3RPC1, na 20 weken aantasting



Afbeelding 24: 4TC1, voor aantasting



Afbeelding 25: 4TC1, na 20 weken aantasting

Na 12 weken chemische aantasting, kan men visueel een toename van de ruwheid vaststellen bij de proefstukken uit traditioneel beton en UHPC. Bij de proefstukken van RPC echter doet zich een andere schadefenomeen voor. Dit fenomeen wordt op Afbeeldingen 26 tot 28 van dichtbij bekeken. De hele buitenste laag (van een dikte van ± 1 mm) komt, als een schil, los van het proefstuk. Na verloop van tijd gebeurt dit bij alle proefstukken uit RPC. Dit fenomeen is ook duidelijk zichtbaar in de lasermetingen. Visueel lijkt het warmtebehandeld UHPC als beste materiaal uit de proef te komen.



Afbeelding 26: 3RPC1 voor aantasting



Afbeelding 27: Loskomen buitenste laag op een 3RPC1 proefstuk



Afbeelding 28: 3RPC1-proefstuk na afborstelen van de losgekomen laag

De visuele waarnemingen dienen uiteraard bevestigd te worden door de laserdata. De lasers meten de afstand van de laser tot het beton, en geven dus het reliëf weer van het cilinderoppervlak. Bij het begin van de proef wordt een referentiemeting uitgevoerd. Door telkens deze referentieafstand van een nieuwe meting af te trekken, wordt het verschil met de oorspronkelijke situatie verkregen. Om de verwerking van de meetdata te vergemakkelijken werd een berekeningscript geschreven in de programmeertaal python, in samenwerking met ir. P. Criel, PhD aan de UGent, verbonden aan Labo Magnel voor Betononderzoek. Naast het visualiseren van de meetdata volgens verschillende parameters, kan van elk opgemeten profiel een gemiddelde diametertoename of -afname berekend. Vervolgens wordt een gemiddelde toename of afname berekend per cilinder, op basis van de vier opgemeten profielen. Tenslotte wordt een gemiddeld gedrag per betonsoort bepaald over de drie cilinders, ter vergelijking tussen de verschillende betontypes.

Op basis van de literatuurstudie wordt een zaagpatroon verwacht van de diameterevolutie, door een afwisselende zwelling van het proefstuk door de zuuraantasting en een materiaalverlies door borstelen.

De schade wordt niet enkel getypeerd door de diameterverandering, doch ook door een ruwheidsevolutie van het oppervlak. Deze wordt berekend door volgende formule:

$$R_a = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L |y(x)| dx$$

Deze waarde wordt eveneens automatisch berekend door het nieuwe script. Voor het ruwheidsverloop wordt eveneens een zaagpatroon verwacht, door een afwisselende

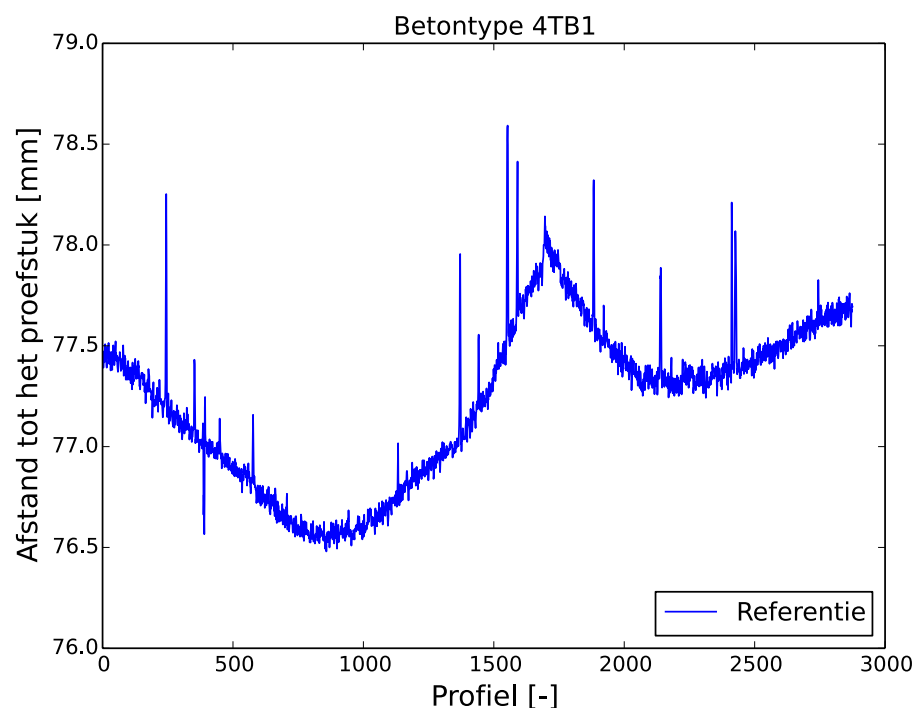
toenemende schade door de zuuraantasting, en het verminderen van de ruwheid door borstelen. Het borstelen verwijdert namelijk loszittende, uitstekende deeltjes, en vult anderzijds poriën gedeeltelijk op met stof of losgekomen materie.

Om een zo volledig mogelijk beeld te geven van de verzamelde data, is gekozen om de data visueel weer te geven aan de hand van boxplots, eerder dan aan de hand van individuele punten. Enkel een gemiddelde waarde laat immers niet toe om de variatie op de data in te schatten. Aan de hand van de boxplots wordt ook visueel duidelijk weergegeven hoe de variatie op de data toeneemt in de tijd, naarmate het oppervlak van de proefstukken ruwer wordt. Een bijkomend voordeel van het gebruik van boxplots is dat uitschieters (gedefinieerd als een waarde die buiten het interval “gemiddelde $\pm$ drie keer de standaardafwijking”) niet worden beschouwd. Zodoende wordt het gemiddelde niet beïnvloed door enkele extreme waarden.

5.5 Resultaten

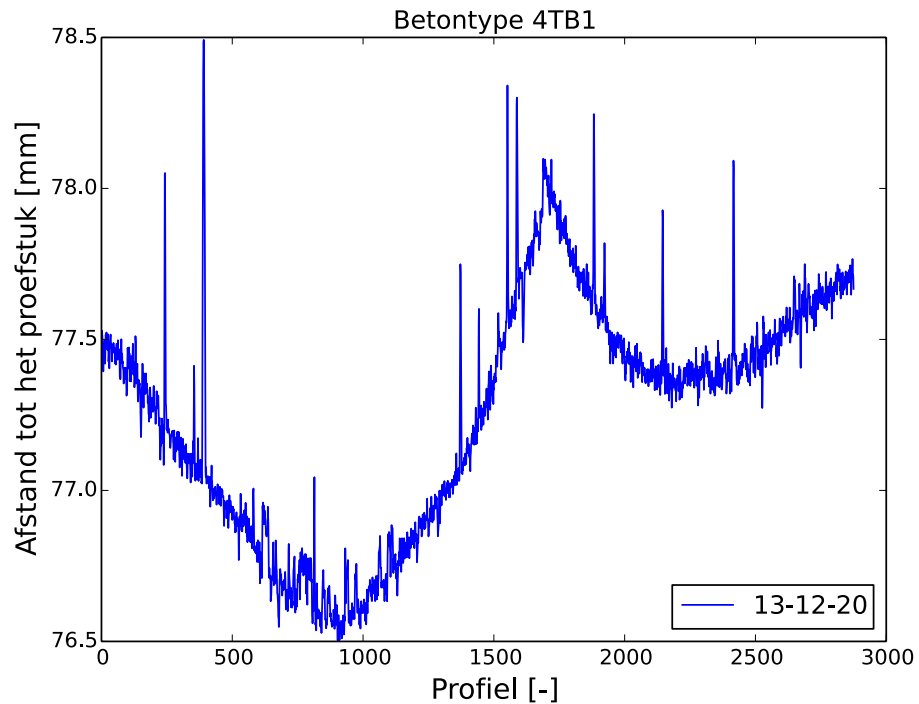
5.5.1 Materiaalverlies

De eerste meting die wordt uitgevoerd met de laserstralen fungeert als referentiemeting voor de rest van het verloop van de proef. Afbeelding 29 geeft de opgemeten data weer voor het betontype 4TC1. Het kronkelend verloop van de data is te wijten aan excentriciteiten van het proefstuk en een niet perfecte centrale ligging van de as van het TAP-toestel.



Afbeelding 29: Referentiemeting: afstand laser tot proefstukprofiel (4TC1)

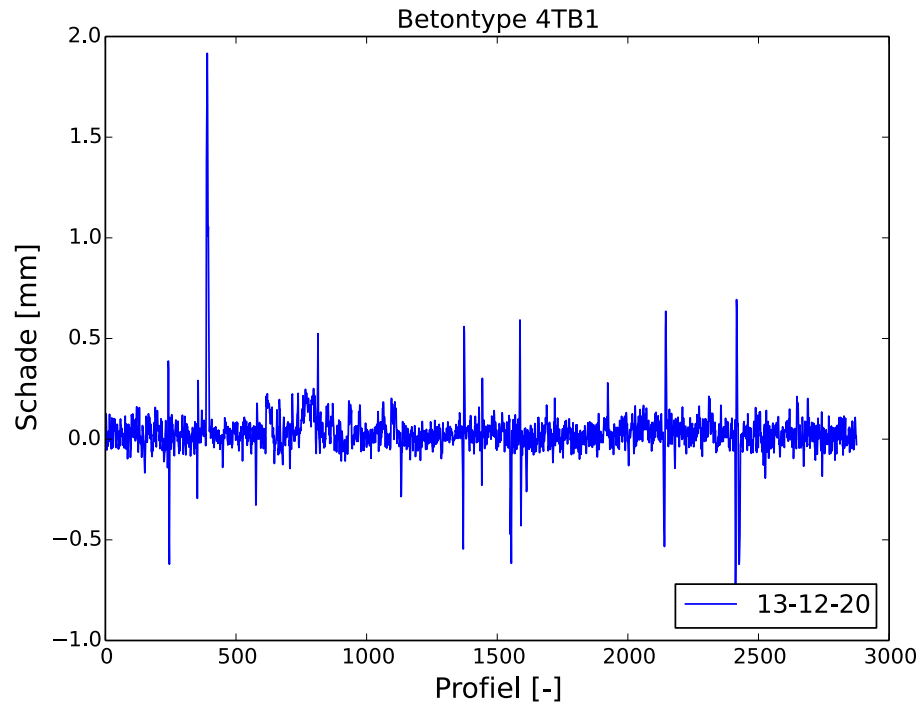
Afbeelding 30 geeft een weergave van hetzelfde profiel, een week later. Omwille van programmatieredenen worden data in de vorm *jj_mm_dd* weergegeven



Afbeelding 30: Opmeting afstand laser tot proefstukoppervlak (4TC1)

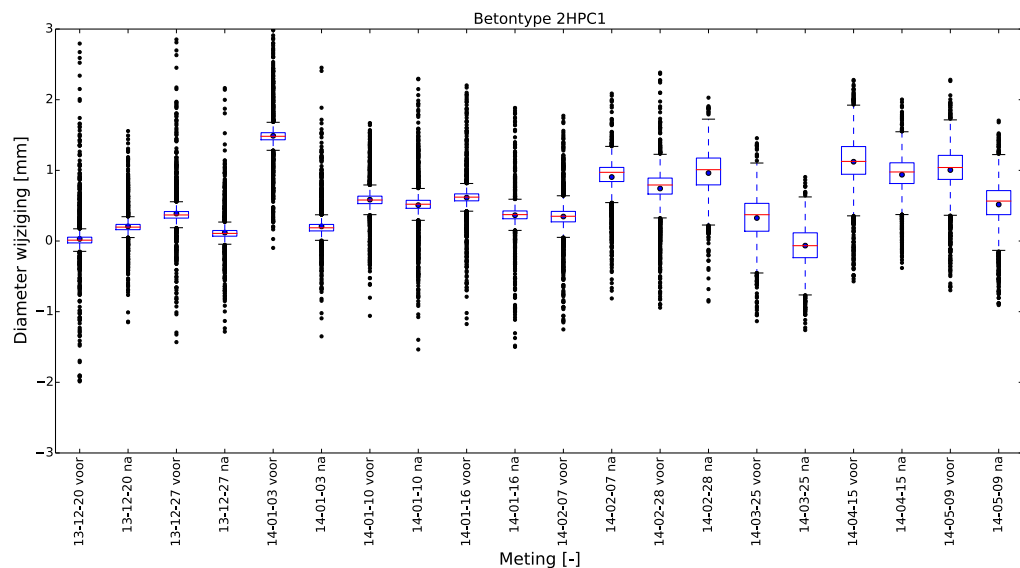
Als beide grafieken tenslotte van elkaar worden afgetrokken, wordt de evolutie verkregen van de nieuwe meting ten opzichte van de oorspronkelijke meting. De lasers meten de evolutie van de afstand tussen de laser en het proefstuk. Door de verkregen grafiek te vermenigvuldigen met een negatieve eenheidsfactor, wordt een toename of afname van de afstand tussen de laser en het proefstuk omgezet naar een toename of afname van de proefstukdiameter. Het resultaat wordt op Afbeelding 31 weergegeven.

Eventuele pieken zijn te wijten aan het feit dat niet perfect hetzelfde profiel wordt opgemeten bij de nieuwe meting als bij de referentiemeting. Dit kan door een positionering van de lasers zijn die niet perfect overeenstemt met de positionering voor de referentiemeting, of door het niet perfect op hetzelfde moment starten van de dataregistratie. Door het gebruik van boxplots (en het achterwege laten van extreme waarden) wordt de invloed van dergelijke pieken op het beschreven schadefenomeen beperkt.



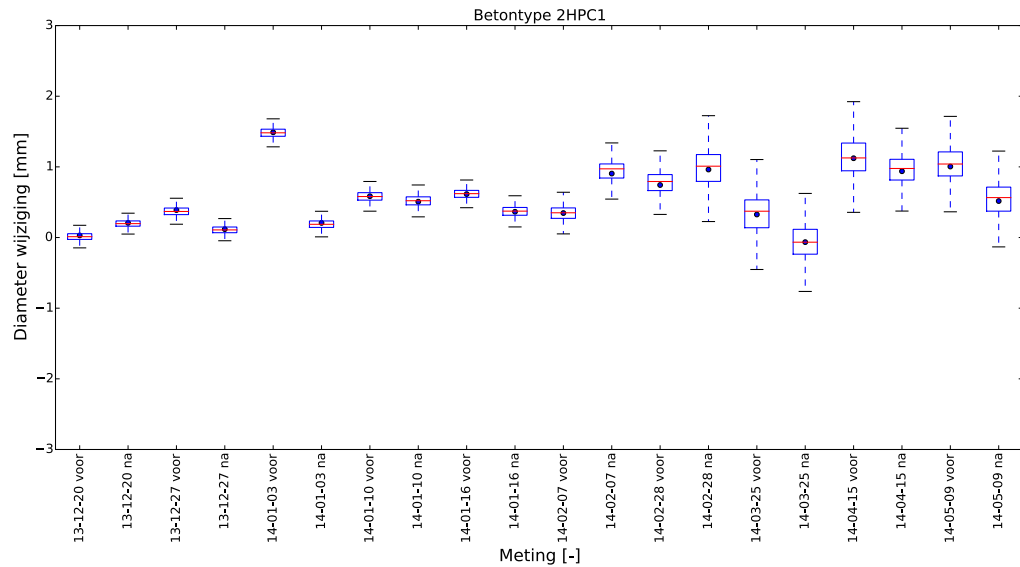
Afbeelding 31: Verschil in afstand tussen laser en proefstuk (4TC1)

Indien alle metingen voor een bepaald profiel en voor een bepaalde cilinder worden uitgezet per meetdag, telkens voor en na borstelen van de proefstukken, door gebruik te maken van de boxplotvisualisatie, krijgt men een weergave zoals op Afbeelding 32. Hierop is het specifiek geval van een cilinder weergegeven van het type 2HPC1.



Afbeelding 32: Meetresultaten van betontype 2HPC1

Het weglaten van de uiterste waarden, die niet opgenomen worden in de boxplots zelf, maakt de grafiek iets minder overladen. Dit leidt tot de weergave in Afbeelding 33.



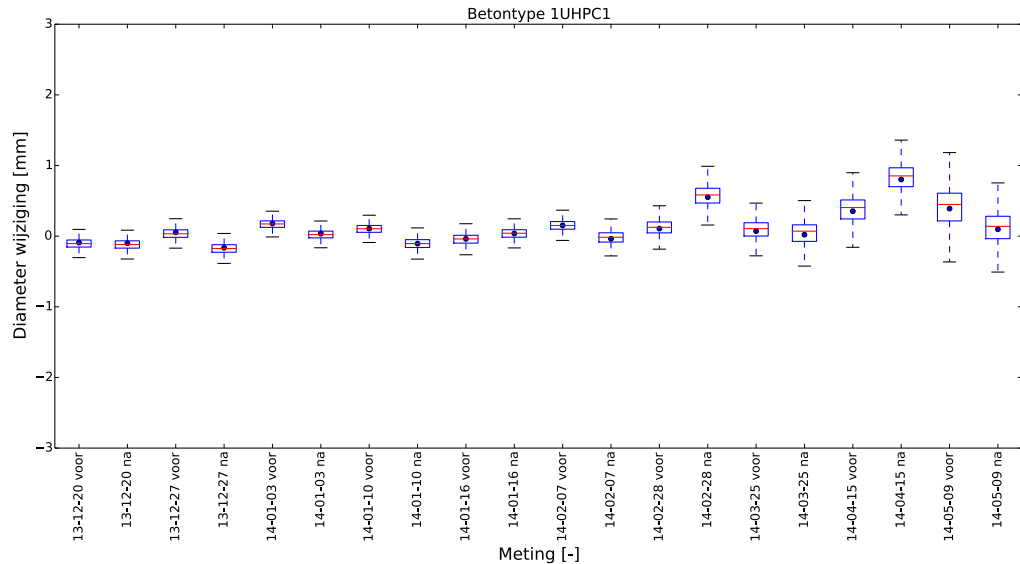
Afbeelding 33: Meetresultaten zonder weergave van extreme waarden, voor een cilinder van het betontype 2HPC1. Resultaten verkregen door het nemen van een gemiddelde over 12 profielen

Afbeelding 33 is representatief voor de verschillende betontypes, zodat op basis van deze grafiek een aantal algemene vaststellingen kunnen worden gedaan.

- De spreiding op de data wordt groter naarmate de proef loopt, en de aantasting van de proefstukken toeneemt. Dit wijst op een toenemende onregelmaat van het oppervlak van het proefstuk. Dit zou ook moeten blijken uit een toenemende ruwheid, hetgeen verder aan bod komt.
- Op een aantal meetdagen na, is het verwachte zaagprofiel herkenbaar door de invloed van het borstelen van de proefstukken. Er doet zich een toename van de proefstukdiameter voor door zwellen van het beton ten gevolge van de zuuraantasting, en vervolgens materiaalverlies ten gevolge van het borstelen. Het omgekeerde fenomeen, waarbij zich klaarblijkelijk een diametertoename voordoet ten gevolge van borstelen, kan eenvoudig verklaard worden. Wanneer het proefstuk aanzienlijk materiaalverlies vertoont, wordt een deel van het loskomend materiaal in de poriën gebracht door de borstelprocedure. Dit kan zowel onder de vorm van stof zijn, als onder de vorm van een mortelpap. Indien het proefstuk namelijk niet lang genoeg gedroogd heeft voor de borstelprocedure, kan het ook gebeuren dat, door het zachter worden van het materiaal, een papvorming optreedt. Door de kleine afmetingen van de poriën blijft het materiaal gemakkelijk achter in de poriën, waardoor de diepte van de poriën ogenschijnlijk afneemt. Aangezien hierdoor een toename van de proefstukdiameter wordt gesimuleerd op die bewuste plaatsen, kan het zijn dat de gemiddelde diameter van het proefstuk groter wordt, ondanks het wegborstelen van een bepaalde hoeveelheid materiaal.
- Algemeen is een zachte opwaartse trend waarneembaar. Dit betekent dat de swelling van het proefstuk een doorslaggevende invloed heeft ten aanzien van het materiaalverlies. Door de spreiding van de data naar het einde van de

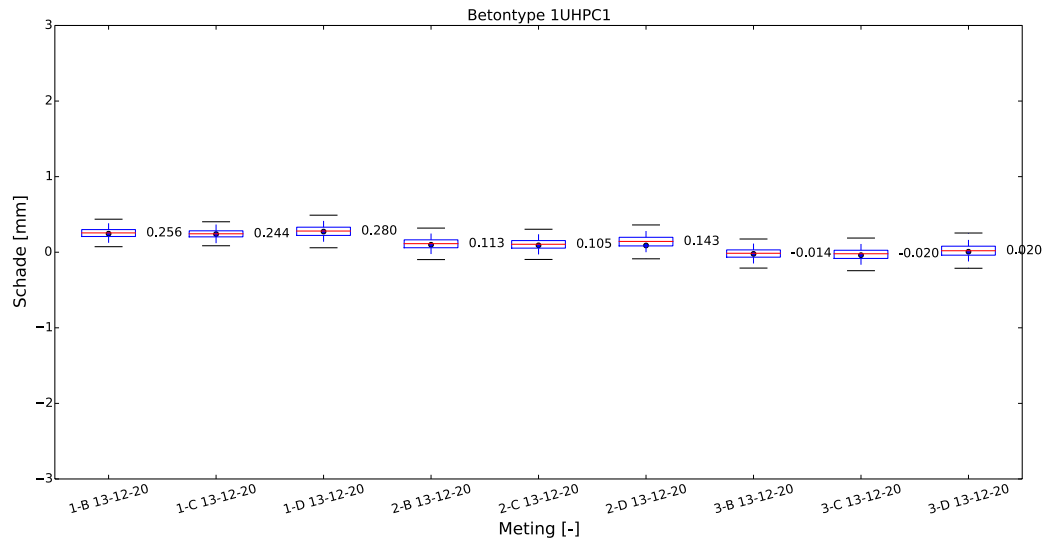
metingen toe, en de kleine evolutie van de diameter, is het echter niet relevant om van een toename of afname van de diameter te spreken.

Op Afbeelding 34 wordt dezelfde dataset weergegeven, nu voor het ultra hogesterktebeton, met gelijkaardig verloop.



Afbeelding 34: Meetresultaten zonder weergave van extreme waarden, voor een cilinder van het betontype 1UHPC1. Resultaten verkregen door het nemen van een gemiddelde over 12 profielen

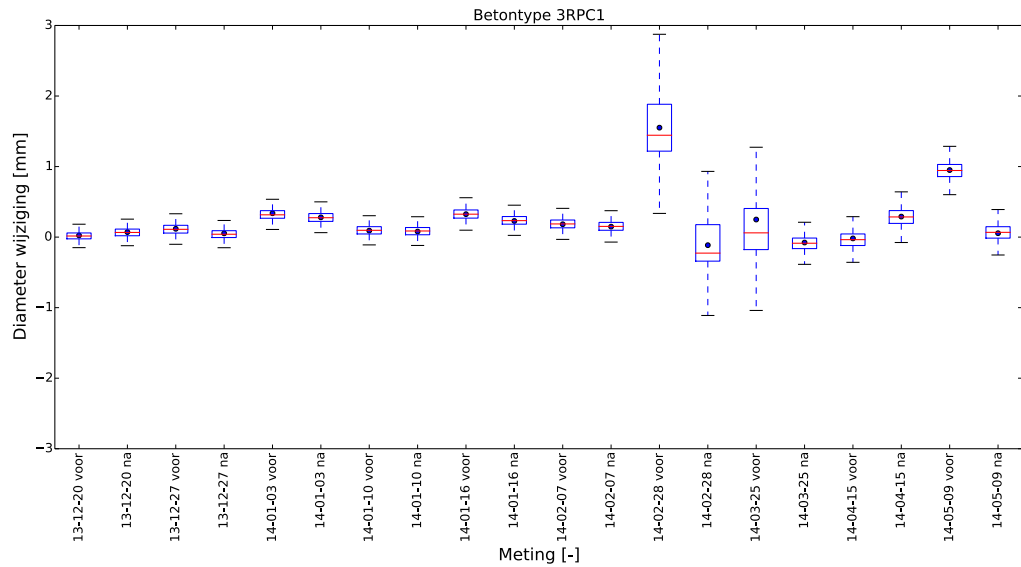
Het script biedt talrijke visualisatiemogelijkheden voor de meetdata. Data van verschillende profielen, cilinders en betonsoorten op verschillende meetdata kunnen gecombineerd worden, om verschillende fenomenen te visualiseren. Wanneer bijvoorbeeld de waarden van verschillende opeenvolgende profielen van opeenvolgende cilinders, opgemeten op eenzelfde dag, onder de vorm van een boxplot naast elkaar worden weergegeven zoals op Afbeelding 35, kan worden vastgesteld dat de staaf waarop de betonnen proefstukken gemonteerd zijn lichtjes onder helling staat ten opzichte van het statief voor de laserapparatuur. Aangezien die bij elke meting aanwezig is, wordt dit echter volledig weggewerkt door telkens de waarden te corrigeren met de referentiemeting. In het algemeen worden onnauwkeurigheden in de proefopstelling, voor zover ze van bij het begin aanwezig zijn (bij het uitvoeren van de referentiemeting), gecorrigeerd door de referentiewaarden af te trekken van de nieuwe waarden.



Afbeelding 35: Scheefstand van de opstellingsstaven, door visualisatie van telkens drie profielen, van drie naast elkaar gepositioneerde cilinders op een opstellingsstaaf

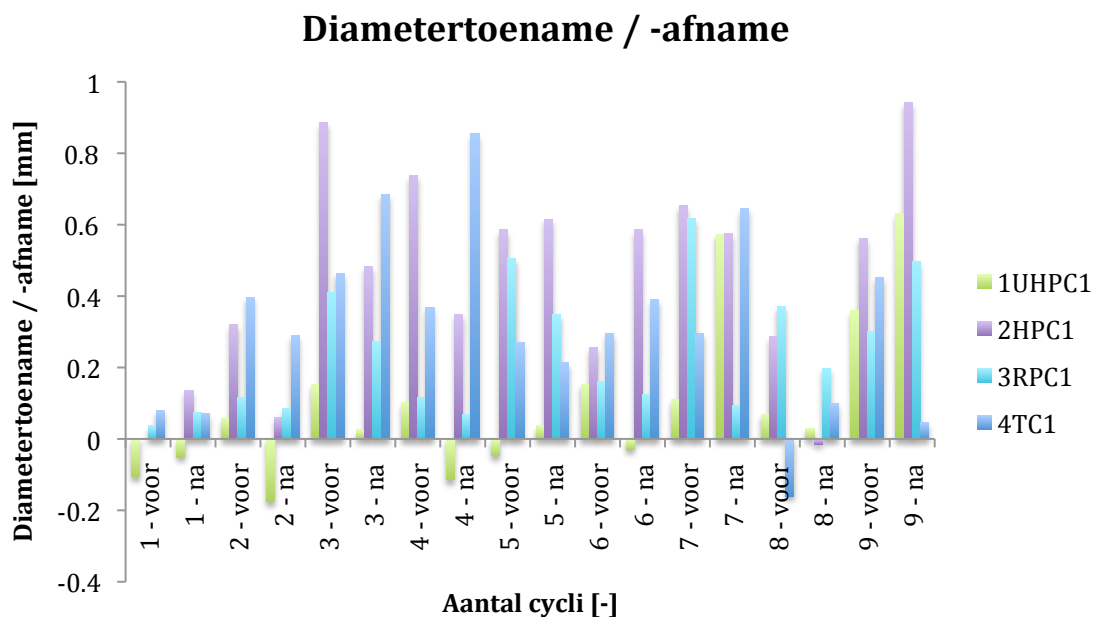
In de visuele, kwalitatieve bespreking van de waargenomen schade is reeds aangehaald dat de traditionele beton, hogesterktebeton en ultra hogesterktebeton een gelijkaardige schadepatroon vertonen. Er wordt een toenemende ruwheid vastgesteld, putvorming en blootligging van de granulaten. Dit kan men terugvinden in de toenemende spreiding van de opgemeten data. Het schadefenomeen dat zich bij de RPC voordoet kan men echter ook herkennen in de meetdata.

De dataset op Afbeelding 36 is afkomstig van een profiel op cilinder 1 van het RPC type. De meting op 28 februari toont aan dat er zich op drie weken tijd een aanzienlijke diametertoeename heeft voorgedaan, door het loskomen van de buitenste betonlaag op een groot deel van de cilinder. Aangezien dit niet het geval is over de gehele omtrek, zorgt dit voor een aanzienlijke spreiding in de meetdata, in vergelijking met de eerder opgemeten spreiding. Na borstelen is een groot deel van de buitenste laag verwijderd, maar de spreiding blijft, aangezien op sommige plaatsen de buitenste laag nog intact gebleven is. De meetdata van de volgende meetdatum tonen aan dat dit fenomeen zich herhaald heeft tijdens de daaropvolgende aantastingsperiode, maar dat op 25 maart het grootste deel van de buitenste laag is verwijderd. Dit blijkt uit de afgenomen spreiding op de diameter van de cilinder.



Afbeelding 36: Meetresultaten van een RPC proefstuk, met zichtbaar loskomende buitenlaag

Omdat een boxplotvisualisatie, zoals tot nu toe gebruikt werd, weinig overzichtelijk is om alle data in één keer te vergelijken, moet teruggerepen worden naar een klassiek balkjesgrafiek, zoals op Afbeelding 37. Hierop zit men dat weinig trends waarneembaar zijn.

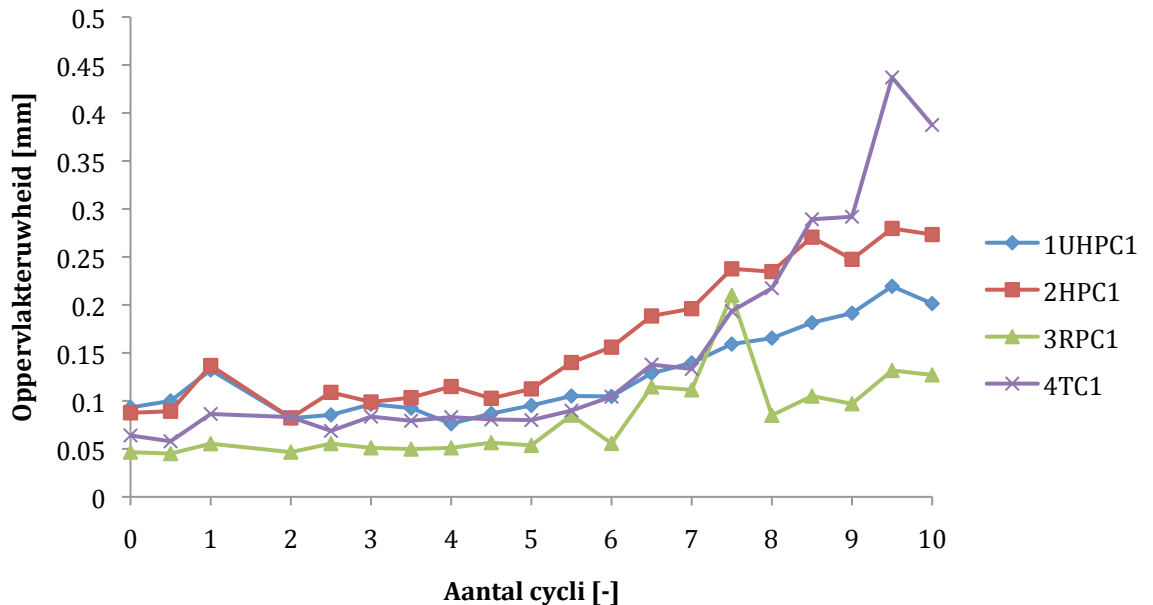


Afbeelding 37: Overzicht van de gemiddelde diametertoenames/ -afnames over alle proefstukken (3 cilinders per betontype, 4 profielen per cilinder)

5.5.2 Ruwheidsgetal

Naast de toename of afname van de diameter van het proefstuk, kan ook de evolutie van de ruwheid van het proefstuk een indicatie verschaffen van de (toenemende) schade van het proefstuk. De opeenvolgende waarden voor en na borstelen worden op Afbeelding 38 naast elkaar weergegeven, als volgt: op de eenheid wordt de waarde voor borstelen weergegeven, op de halve eenheid de waarde na borstelen (bijvoorbeeld: 3 = ruwheid voor borstelen na drie cycli; 3,5 = ruwheid na borstelen na drie cycli).

Evolutie ruwheidsgetal



Afbeelding 38: Evolutie van de ruwheid van de proefstukken in de tijd

De minste ruwheid wordt waargenomen bij het betontype 3RPC1, omdat dit het beton met de fijnste korrel is. De piek bij de 15^e meting is te wijten aan de loskomende buitenlaag. Beton type 4TC1 lijkt lang goed te weerstaan aan de aantasting, maar vertoont nadien de steilste ruwheidstoename. Dit kan verklaard worden door het loskomen van de cementpasta op de plaatsen waar de granulaten dicht bij het oppervlakte liggen. Betonmengsels 1UHPC1 en 2HPC1 vertonen dezelfde evolutie. Het hogesterktebeton, dat geen warmtebehandeling onderging, wordt aan de oppervlakte zachter, waardoor het borstelen groeven veroorzaakt in het betonoppervlak. In het algemeen kan gesteld worden dat het borstelen bijdraagt tot de ruwheidstoename.

5.5.3 Vergelijking met eerder onderzoek

In [3] werden UHPC en traditioneel beton met hoogovenslak getest met dezelfde proefopstelling. De proef werd slechts 12 weken lang uitgevoerd, in plaats van 20 in dit onderzoek. De geteste proefstukken vertonen betere weerstand ten opzichte van de proefstukken uit [3], zowel de expansie als het materiaalverlies blijven immers binnen de grens van 0,8 mm, zie Afbeelding 37.

Op het verloop van de ruwheid, kan vastgesteld worden dat het traditioneel beton in de eerste 12 weken inderdaad beter presteert dan de (ultra) hogesterktebetonmengsels, zoals in [3] wordt vastgesteld. Nadien wordt een versnelling van de degradatie

waargenomen, te wijten aan het bloot komen liggen van de granulaten die dicht onder het oppervlak van het proefstuk gelegen zijn.

Het fenomeen waarbij de diameterevolutie van de proefstukken door zwavelzuuraantasting minder uitgesproken is dan voor melkzuur en azijnzuur, door het voortdurend afwisselen van swelling en materiaalverlies door borstelen, kan teruggevonden worden in [15]. In genoemd onderzoek worden betontypes getest met een cement CEM I 42,5 HSR en een W/C-factor van 0,4, waarvan verwacht kan worden dat deze slechter presteert dan een traditioneel beton op basis van een CEM I 52,5, zelfs met een iets hoger W/C-factor van 0,45. Zowel de geteste betontypes in [15], als het traditioneel beton in dit onderzoek vertonen een vergelijkbare toename en afname van de proefstukdiameters na 15 weken (9 cycli van 12 dagen in [15]).

Ook de ruwheidstoename van de proefstukken in [15] vertoont een gelijkaardig verloop als de proefstukken van het betontype 4TC1 in dit onderzoek, namelijk een vrij stabiel verloop dat onder de 0,1 blijft, tot een proefduur van 9 weken en vervolgens een toename tot 0,3 bij 15 weken.

5.6 Kritische conclusie

Omwille van de kleine diametervariatie en materiaalverlies in combinatie met een beperkte ruwheidstoename van het oppervlak van de proefstukken, kan gesteld worden dat de geteste betontypes een goede bestendigheid vertonen tegen sulfaataantasting. De geteste UHPC, HPC en RPC presteren beter dan de geteste TC in die zin dat de ruwheid kleiner blijft door de aantasting. Door het loskomen van de cementpasta ter hoogte van de granulaten, die grotere afmetingen hebben dan bij de drie andere betontypes, wordt de deur opengezet voor de schadelijke stoffen om het beton gemakkelijker binnen te dringen.

Een interessante onderzoekspiste voor de toekomst is om in één van deze betontypes de gebruikte granulaten te vervangen door een zuurgevoelig granulaat. Het kan perfect gebeuren dat een betonmengsel dat op zich goed presteert op vlak van sterkte, zuurgevoelige granulaten bevat. Het slechte granulaat kan bijvoorbeeld omwille van een productiefout in het beton terechtkomen. Als dit een kwalitatief granulaat is, zal dit niet gemerkt worden bij sterkteproeven, doch wel gevolgen hebben in het kader van duurzaamheid. Eens de cementpasta aan de oppervlakte van het beton bezwijkt onder de zuuraantasting bestaat de kans dat het beton alsnog in hoogtempo degradeert door het bloot komen te liggen van de gevoelige(re) granulaten, ongeacht de uitzonderlijke kwaliteit van de cementmatrix.

Een aantal aandachtspunten met betrekking tot de opmeting van de profielen zou in gedachten moeten gehouden worden bij volgend onderzoek. Hoewel het TAP-toestel reeds haar doeltreffendheid heeft bewezen in het verleden, blijken voor deze specifieke combinatie van zuur en beton (zwavelzuur en (ultra) hogesterktebeton) een aantal pijnpunten de kop op te steken.

- Het is zeer belangrijk gebleken om de proefstukken voldoende te laten drogen voor het meten, en zeker voor het borstelen ervan. Bij het borstelproces wordt namelijk gemerkt dat een cementpap in de poriën geduwd wordt, wat de diepte van de poriën verandert. Na drogen bestaat het risico dat nog steeds stof in de

poriën terechtkomt. Dit euvel kan eventueel verholpen worden door na borstelen de poriën opnieuw vrij te maken met perslucht, om het gevaar op verkrijgen van een vertekend beeld te verminderen.

- Om een (ultra) hoogperformant materiaal te testen, zou misschien overwogen moeten worden om over te schakelen op sterkere concentraties aantastende oplossing. Nu een referentie voor handen is voor een langere termijnproef, door de TAP-proef langer te hebben laten lopen, kan men een andere variabele spelen dan de looptijd van de proef, zoals de zuurconcentratie. Men kan nu immers vergelijken met deze proef. De proefduur verlengen tot een jaar of langer is echter ook interessant.
- Een aanzienlijke denkoefening werd reeds uitgevoerd, in het kader van dit onderzoek, met betrekking tot het verwerken van de resultaten, om deze zo objectief mogelijk te visualiseren en interpreteren. Het blijft echter vooralsnog een uitdaging om op een anschouwelijke manier het volledig plaatje, in dit geval bestaande uit 12.000 meetresultaten per cilinder (4 profielen x ± 3000 metingen), weer te geven. Het gevaar schuilt namelijk in het verlies van kostbare informatie door het sterk uitmiddelen van de meetdata.

6 Chloride-aantasting

6.1 Situering

De RCM-proeven ter bepaling van de migratiecoëfficiënten voor chloride-indringing worden uitgevoerd in overeenstemming van de Scandinavische Norm NT Build 492. Voor de RCM-proeven is de eerste reeks proefstukken gebruikt. Dit betekent dat de RCM-proeven zijn uitgevoerd op 4 betontypes. Bovendien werden de RCM-proeven voor elke betonsoort op drie verschillende leeftijden uitgevoerd. Zodoende wordt niet enkel de resistentie van de proefstukken tegen chloride-indringing in kaart gebracht, doch ook de evolutie hiervan in de tijd.

Met deze proef beoogt men aan te tonen dat UHPC resistenter is dan TC tegen chloride-indringing. Door een dichtere structuur en lagere connectiviteit, verwacht men dat de indringing minder gemakkelijk zal zijn. Door bovendien de proefstukken op voorhand te verzadigen met een verzadigde calciumhydroxideoplossing, wordt de invloed van capillaire opzuiging teniet gedaan.

6.2 Proefstukken

De proefstukken voor de RCM-proeven worden als volgt gemaakt:

- Er wordt vertrokken van kubussen met afmetingen 150 mm x 150 mm.
- Hieruit wordt een cilinder geboord, met een diameter van ongeveer 100 mm.
- Deze cilinder wordt vervolgens in drie gelijke cilinders gezaagd, wat dus een dikte geeft van ongeveer 50 mm. De nauwkeurigheid van deze dikte is niet van groot belang, aangezien dit een parameter is die in rekening wordt genomen bij de verwerking van de resultaten. Zodoende kan men perfect de performanties van proefstukken die niet exact dezelfde dikte hebben met elkaar vergelijken.
- Deze drie cilinders worden telkens gebruikt voor een proef op éénzelfde leeftijd.
- In totaal worden per betonsoort aldus 3 RCM-proeven uitgevoerd op 3 verschillende leeftijden. Hieruit kan men zo een gemiddelde resistentie tegen chloride-indringing bepalen.

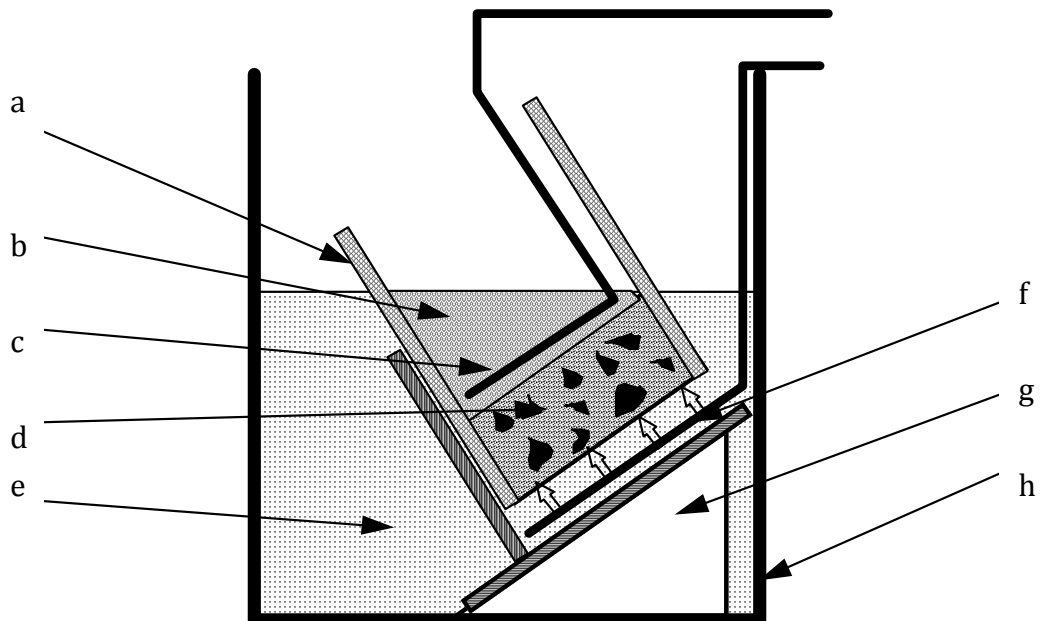
In afwachting van de beproeving, worden de proefstukken in een natte kast bewaard, bij een temperatuur van $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, en bij een relatieve vochtigheidsgraad van $90 \pm 5\%$.

6.3 Proefopstelling en methode

Het principe van de RCM-proef is om met behulp van een elektrisch potentiaalverschil een gedwongen migratie van chloride-ionen axiaal door de betonnen proefstukken te laten plaatsvinden. Men heeft hiervoor een gesloten elektrisch circuit, een kathode, een anode, een kathodische oplossing en een anodische oplossing. Al naargelang de betonsamenstelling, en inherente eigenschappen, kan men spanningsverschil en duur van de proef laten variëren. Twee indringingsdieptes bij twee verschillende proefstukken kunnen dus meestal niet rechtstreeks met elkaar vergeleken worden. Men kan slechts de prestaties van twee betonmengsels vergelijken op basis van de migratiecoëfficiënten, die bepaald worden met een formule die alle randvoorwaarden en parameters in rekening brengt. De formule en verwerking van de resultaten wordt verder in deze thesis besproken.

Alvorens de RCM-proef van start kan gaan, worden de proefstukken in een glazen vacuüm klok geplaatst. Deze wordt op een aantal minuten vacuümgezogen, tot een onderdruk van 10-50 mbar. Deze toestand wordt gedurende 3 uur aangehouden. Vervolgens wordt, nog steeds in vacuümtoestand, de klok gevuld met een gesatureerde $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -oplossing, zodat de proefstukken volledig ondergedompeld zijn. Na een uur wordt de vacuüm klok opnieuw bij omgevingsdruk gebracht, maar worden de proefstukken vervolgens nog 18u in ondergedompelde toestand bewaard in de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -oplossing.

De proefopstelling voor de feitelijke RCM-proef is betrekkelijk eenvoudig, zoals blijkt uit Afbeelding 39. In een kunststoffen bak wordt een NaCl-oplossing bereid, met een concentratie van 100 gram NaCl per 900 gram water (10 m% NaCl). In de bak wordt 12 liter oplossing voorzien. Deze oplossing doet dienst als kathodische oplossing in de proefopstelling. De cilindrische proefstukken worden in cilindrische rubberen hulzen geplaatst, gelijk met de onderrand, en door middel van aanspanningen vastgezet. Vervolgens worden de hulzen samen met de proefstukken in de NaCl-oplossing geplaatst, op een onder helling geplaatste steun. In de rubberen huls dient 300 ml van een 1,2 m% NaOH-oplossing te worden gegoten boven het proefstuk. Deze oplossing doet dienst als anodische oplossing. Om het elektrisch circuit te sluiten, worden in de verschillende rubber hulzen geleiders geplaatst, die in contact staan met het hele oppervlak van het proefstuk. Langs de onderkant wordt er contact gemaakt met geleiders in de steun waarop de proefstukken staan, om zo het elektrisch circuit te sluiten. Afbeelding 39 geeft een schets weer van de gehele proefopstelling.



Afbeelding 39: Proefopstelling RCM-proef (NT Build 492 (1999))

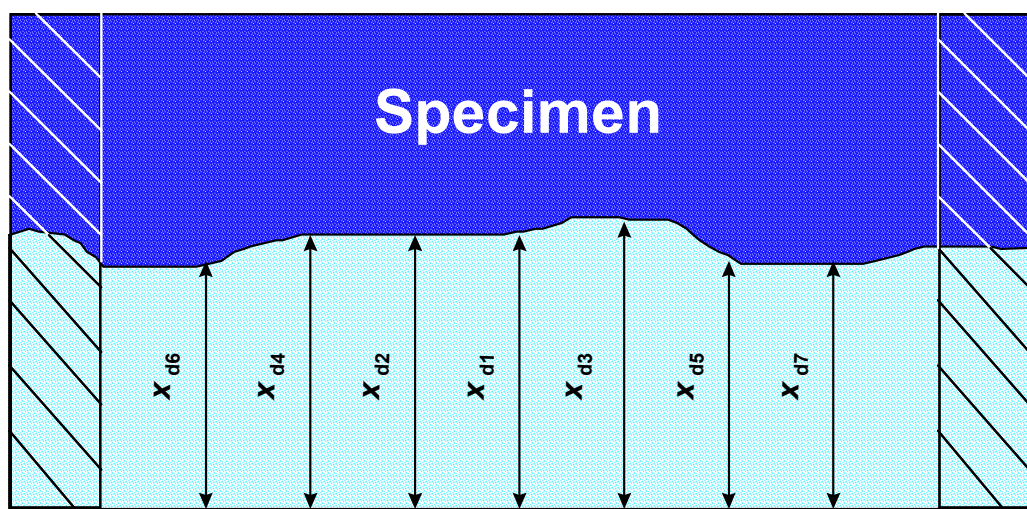
a: Rubberen huls
b: Anolytische oplossing
c: Anode
d: Betonnen proefstuk

e: Kathodische oplossing
f: Kathode
g: Kunststof steun
h: Kunststof bak

Wanneer de volledige opstelling nagekeken is, kan de spanningsbron aangezet worden. Initieel wordt twee maal een spanningsverschil van 15V aangebracht over de proefstukken. Deze veroorzaakt een stroomsterkte door de betonnen proefstukken. De stroomsterkte wordt vergeleken met vooropgestelde grenswaarden (zie NT Build 492, 1999) waaruit besloten wordt het spanningsverschil te vergroten, dan wel te verkleinen. Bovendien bepaalt de stroomsterkte eveneens de tijdsduur van het experiment. Deze werkwijze laat toe het experiment optimaal af te stemmen op de elektrische weerstand van het getest materiaal, en meteen ook op de weerstand van het materiaal tegen de migratie van de chloride-ionen door het materiaal. Het is immers van belang dat het migratiefront van de chloride-ionen zich nog in het proefstuk bevindt, en dat duur van de proef en spanningsterkte op voorhand goed worden ingeschat. Van belang hierbij is in gedachten te houden dat de stroomsterktes en proeflooptijden vastgelegd zijn voor traditioneel beton. Bij de analyse van de resultaten moet met de nodige omzichtigheid te werk worden gegaan, en niet overhaast conclusies trekken, daar misschien zal blijken dat de richtlijnen voor traditioneel beton niet zonder meer mogen geëxtrapoleerd worden naar (ultra) hogesterkebeton.

Na de vooraf bepaalde tijd worden de betonnen proefstukken vrijgemaakt uit de rubberen hulzen. De proefstukken worden vervolgens door middel van een splijtpers, volgens de diameter van de cilinder gespleten, om twee halve cilinders te bekomen. Het breukoppervlak wordt vervolgens besprenkeld met 0,1 M AgNO_3 , om de progressie van het chloridefront zichtbaar te maken. Afhankelijk van het betontype duurt het verschijnen van het migratiefront enkele minuten tot een kwartier.

Aan de hand van een doorschijnend millimetteraaster wordt op zeven discrete punten, uniform verdeeld over het proefstuk, de indringingsdiepte van de chloriden in het proefstuk opgemeten. De metingen beginnen pas op twee centimeter van de rand van het proefstuk. Vaak wordt immers langs de rand een grotere indringingsdiepte opgetekend, te wijten aan insijpeling van chloride-oplossing tussen het proefstuk en de rubberen huls, ondanks stevig aanspannen met de sluitringen. De opmeting van de chloride-indringing wordt geïllustreerd op Afbeelding 40.



Afbeelding 40: Werkwijze opmeting chloride-indringing (NT Build 942 (1999))

De verschillende data en resultaten worden achteraf verwerkt in onderstaande formule:

$$D_m = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right)$$

met:

- D_m : de gezochte migratiecoëfficiënt [$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]
- T : het gemiddelde van de initiële en finale temperatuur van de analytische oplossing [$^{\circ}\text{C}$]
- U : de absolute waarde van het aangelegde spanningsverschil [V]
- t : de proefduur [h]
- L : de gemiddelde dikte van het proefstuk [mm]
- x_d : de gemiddelde indringingsdiepte [mm]

In bovenstaande formule is duidelijk dat verschillende parameters worden in rekening gebracht, om een zo volledig beeld te krijgen van het gedrag van de migratie. Bovendien wordt met veel afwijkingen rekening gehouden, zodat eventuele fouten (afwijkende proefstukdikte, verkeerde instellingen,...) kunnen opgevangen worden.

In Tabel 8 wordt een overzicht gegeven van de verschillende instellingen voor de verschillende RCM-proeven die werden uitgevoerd, op de drie leeftijden. Het potentiaalverschil, uitgedrukt in Volt (V), is het totale potentiaalverschil dat over de proefstukken wordt gebracht. Deze wordt opgewekt door twee in serie geplaatste stroombronnen, zodat de twee potentiaalverschillen dienen opgeteld te worden. De tijd tenslotte geeft weer hoe lang de proef gelopen heeft. Deze wordt vastgelegd op basis van het potentiaalverschil en initiële stroomsterkte, volgens vermelde norm.

Uit het potentiaalverschil in Tabel 8 kan reeds afgeleid worden dat een grotere weerstand is tegen chloride-indringing bij UHPC dan bij TC. Men moet namelijk zowel het hoogst mogelijke spanningverschil aanleggen, als ook de proef 96 uur laten lopen, wat de langst mogelijke proefduur is.

Bij de RCM-proef op TC op 56 dagen werd de stroombron verkeerdelijk ingesteld op 60 V in plaats van 40 V, door een menselijke fout. Dit werd gecompenseerd door de proef slechts 6 uur te laten lopen, in plaats van 24 uur. Zodoende lag het migratiefront alsnog mooi binnen het proefstuk. Door de verwerking van de parameters in de algemene formule, zijn de resultaten van deze proef alsnog bruikbaar. Bij de RCM-proef op TC op 168 dagen ziet men dat men toch een spanningsverschil van 60 V moet gebruiken, net als bij de andere betontypes. Dit wijst op een verbetering van de chloridebestendigheid in de tijd, nog voor de verschillende parameters te verwerken in de berekening van het migratiecoëfficiënt. Dit kan men voor UHPC en RPC niet op voorhand besluiten, daar reeds van op de eerste leeftijd de maximale instellingen vereist zijn.

Tabel 8: Instellingen RCM-proef

<i>Betontype</i>	<i>Potentiaalverschil [V]</i>	<i>Tijd [h]</i>
RCM op 28 dagen		
1UHPC (WB)	60	96
2UHPC (NWB)	60	96
3RPC	60	96
4TC	37	24
RCM op 56 dagen		
1UHPC (WB)	60	96
2UHPC (NWB)	60	96
3RPC	60	96
4TC	60(*)	6(*)
RCM op 168 dagen		
1UHPC (WB)	60	96
2UHPC (NWB)	60	96
3RPC	60	96
4TC	60	24

(*)60 V i.p.v. 40 V, 6 uur i.p.v. 24 uur

6.4 Verwerking resultaten

Afbeeldingen 41 tot 44 geven een aantal voorbeelden van het waargenomen migratiefront weer. Opvallend is dat bij de warmtebehandelde proefstukken interne scheurvorming is opgetreden, waarschijnlijk door een thermische schok. Langs de scheur is een uitgesproken chloride-indringing opgetreden. Dit toont aan dat scheurvorming een nefaste invloed heeft op de duurzaamheid van een betonnen element, daar de schadelijke stoffen gemakkelijk hun weg vinden naar diepe zones in het materiaal. Voor de bepaling van de gemiddelde indringingsdiepte wordt de indringing rond deze scheur niet in beschouwing genomen, daar dit niet representatief is voor de materiaalkwaliteit van het (niet-gescheurd) beton. Het risico op deze scheurvorming dient uiteraard wel in het achterhoofd worden gehouden te worden bij toepassen van warmtebehandeling. Het risico op gevoeligheid ten aanzien van chloride-indringing wordt immers aanzienlijk verhoogd door deze scheurvorming (die bovendien mogelijks niet zichtbaar is langs de buitenkant van het beton).



Afbeelding 41: Chloride-indringing in UHPC, met scheurvorming door warmtebehandeling



Afbeelding 42: Chloride-indringing in HPC



Afbeelding 43: Chloride-indringing in RPC



Afbeelding 44: Chloride-indringing in TC

Eens de gemiddelde indringingsdiepte bepaald is, kan men alle parameters en resultaten verwerken tot een migratiecoëfficiënt. Bij de berekening is gekozen om de indringingsdiepte van de chloriden uit te middelen per betonsoort, en per betonsoort één migratiecoëfficiënt te berekenen. Deze migratiecoëfficiënten worden onder volgend paragraaf besproken.

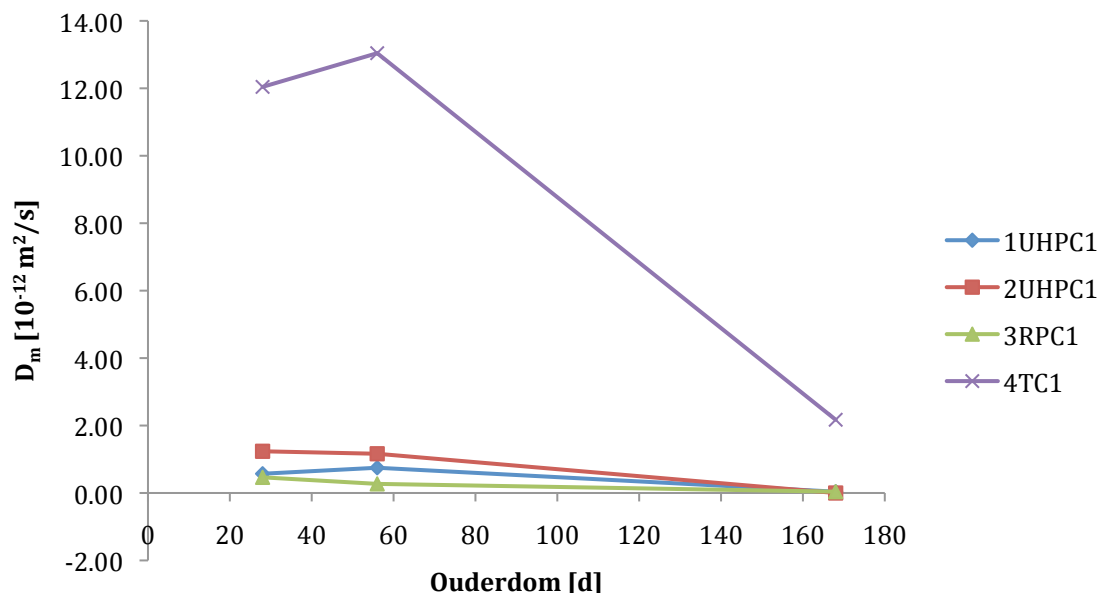
6.5 Resultaten

In Tabel 9 wordt een overzicht gegeven van de resultaten van de verschillende betontypes op de verschillende leeftijden.

Tabel 9: Overzicht migratiecoëfficiënten

$[\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$	<i>1UHPC1</i>	<i>2UHPC1</i>	<i>3RPC1</i>	<i>4TC1</i>
28 dagen	0,57	1,24	0,46	12,04
56 dagen	0,75	1,16	0,27	13,04
168 dagen	0,04	0,04	0,04	2,17

Evolutie migratiecoëfficiënten



Afbeelding 45: Grafische weergave migratiecoëfficiënten uit Tabel 9

Het uitzetten van bovenvermelde resultaten in grafieken helpt bij de besluitvorming, zie Afbeelding 45. Men kan besluiten dat RPC de beste performanties levert, gevolgd door warmtebehandeld UHPC (1UHPC1) en niet-warmtebehandeld HPC (2HPC1). De

prestaties van HPC, UHPC en RPC zijn een factor 10 tot een factor 20 beter ten opzicht van TC na 28 dagen en een factor 10 tot 40 ten opzichte van TC na 56 dagen. Na 168 dagen maakt het traditioneel beton een inhaalbeweging, en presteert ± 6 keer beter dan na 28 dagen. Dit is te wijten aan de verdere verdichting van de microstructuur door veroudering van het beton.

De waarden voor de migratiecoëfficiënten van 1UHPC1, 2UHPC1 en 3RPC1 na 168 dagen zijn allemaal gelijk, niet omdat ze dezelfde resistentie hebben tegen chloride-indringing, doch omdat de proefstukken van deze betonmengsels dezelfde chloride-indringing vertonen, namelijk geen. Omdat een nul-indringing in de formule een migratiecoëfficiënt veroorzaakt van nul, en dat een oneindige impermeabiliteit onmogelijk is, wordt een indringing van 1 mm gebruikt. Dat resulteert in een migratiecoëfficiënt van $4^E-14 \text{ m}^2/\text{s}$. Dit zou als een uitzonderlijke resistentie tegen chloride-indringing kunnen geïnterpreteerd kunnen worden, maar hier moet omzichtig mee worden omgesprongen. Hier wordt verder dieper op ingegaan.

Volgens [24] kan men volgende grenswaarden vooropstellen ter evaluatie van de chloridebestendigheid, in functie van de migratiecoëfficiënten:

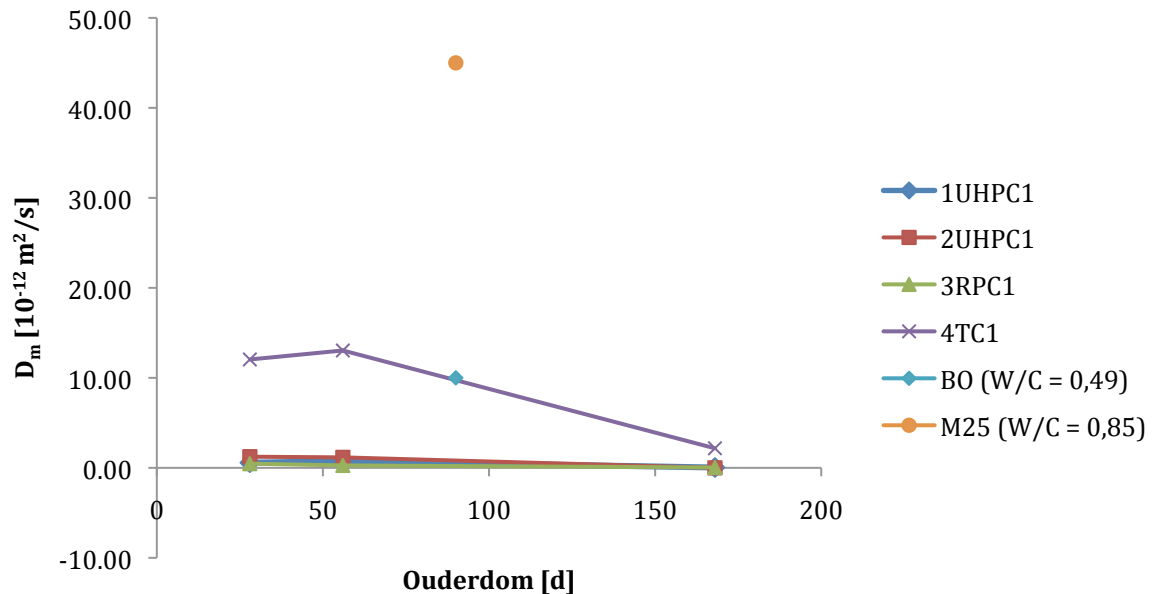
- | | |
|--|--|
| • $D_m < 2^E-12 \text{ m}^2/\text{s}$ | Hoge resistentie tegen chloride-indringing |
| • $D_m < 8^E-12 \text{ m}^2/\text{s}$ | Aanvaardbare resistentie tegen chloride-indringing |
| • $D_m < 16^E-12 \text{ m}^2/\text{s}$ | Slechte resistentie tegen chloride-aantasting |
| • $D_m > 16^E-12 \text{ m}^2/\text{s}$ | Niet geschikt voor blootstelling aan chloride-aantasting |

Men kan aldus besluiten dat alle betontypes van hogere sterkte dan TC uit deze thesis uitzonderlijk presteren, al van bij jonge leeftijd. Traditioneel beton daarentegen, met een migratiecoëfficiënt $D_m < 16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, presteert zwak op jonge leeftijd, maar wel nog steeds mag gebruikt worden in een schadelijke omgeving zonder al te erge gevolgen te moeten vrezen. Naarmate de ouderdom toeneemt maakt TC een inhaalbeweging en ontwikkelt toch een hoge resistentie tegen chloride-indringing.

De migratiecoëfficiënten van de mengsels 1UHPC1 en 4TC1 vertonen op 56 dagen een opwaartse beweging op de grafiek. Dit kan te wijten zijn aan meetfouten bij het aflezen van de indringing op de proefstukken.

In [25] werden verschillende betonsoorten getest d.m.v. dezelfde methode als hierboven beschreven. Betontypes M25 (W/C-factor 0,84) en BO (W/C-factor 0,49), waarvan de exacte samenstelling beschreven is in [25], werden met elkaar vergeleken op een ouderdom van 90 dagen, en de resultaten zijn opgenomen in Afbeelding 46.

Evolutie migratiecoëfficiënten



Afbeelding 46: Vergelijking migratiecoëfficiënten met eerder onderzoek

Betonmengsel BO blijkt, met een migratiecoëfficiënt van $10 \pm 1 \text{ m}^2/\text{s}$, gelijkaardig te presteren als 4TC1. Beide betonmengsels hebben een vergelijkbare W/B-factor. Betonmengsel M25 daarentegen, met een veel hogere W/B-factor, heeft een veel hogere migratiecoëfficiënt. Deze vaststelling ondersteunt het eerder geformuleerd vermoeden dat de W/C-factor (of W/B-factor) niet enkel een belangrijke rol speelt in het verkrijgen van goede sterkte-eigenschappen, maar eveneens voor het verkrijgen van goede duurzaamheidseigenschappen, mede door de dichtere structuur die ermee gepaard gaat. De migratie van chloriden doorheen de microstructuur steunt immers op migratie aan de hand van water, via intergeconnecteerde poriën. De lagere W/B-factor zorgt voor een reductie van beiden.

6.6 Kritische conclusie

Uit de verkregen resultaten kunnen een aantal conclusies getrokken worden, zowel met betrekking tot de betonmengsels, als met betrekking tot de toegepaste testmethode.

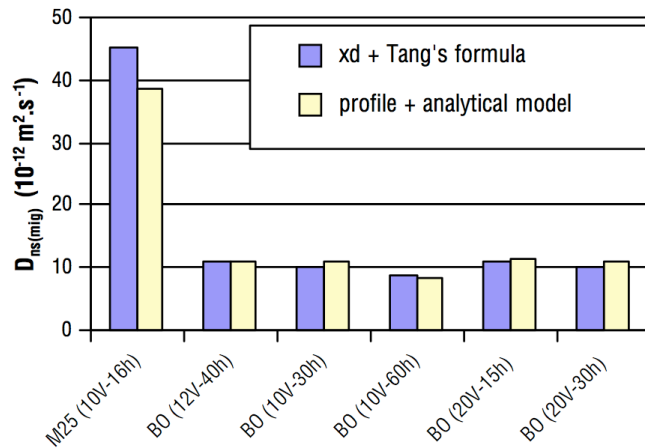
- De HPC, UHPC en RPC mengsels presteren beduidend beter dan het TC-mengsel. Op oudere leeftijd wordt het verschil wel kleiner. De resultaten van HPC, UHPC en RPC onderling, zijn wel vergelijkbaar.
- De W/B-factor, en de daarmee samenhangende dichtheid van het beton, blijkt een duidelijke invloed te hebben op de weerstand tegen chloride-indringing.
- Op oudere leeftijd blijkt de gebruikte methode niet aangewezen voor de beproeving van (U)HPC, daar de indringing onvoldoende is om goed kwantificeerbaar te zijn. Dat de mengsels beter presteren dan TC staat buiten kijf, doch zondermeer uit de quasi onbestaande indringing besluiten dat de geteste

mengsels uitzonderlijk presteren, lijkt wat overhaast. Aanpassing van de methode en ontwikkeling van nieuwe richtlijnen en standaarden voor ultra performante betonmengsels zullen de hier bekomen resultaten mogelijks relativeren. Bovendien is het ook nuttig om binnen de ultraperformante mengsels eveneens een gradatie te voorzien in de mogelijke prestaties. Het verhogen praktisch nut van het verhogen van de testomstandigheden is misschien niet voor de hand liggend, doch de visie moet zich verruimen tot het kwalitatieve onderscheid van ultra performante betontypes onderling, en het opzoeken van de grenzen van dergelijke betonmengsels.

Twee voornaamste mogelijke pistes liggen voor de hand, daar voornamelijk met twee variabelen in de formule gespeeld kan worden.

- De tijdsduur waarover de proef loopt kan verlengd worden. Zodoende krijgen de ionen meer tijd om in het beton te dringen, en mogelijks zal het migratiefront dan verder in het beton liggen.
- Het spanningsverschil over het proefstuk kan vergroot worden. Indien de drijvende kracht achter de chloride-migratie wordt vergroot, zal de migratie mogelijks eveneens sneller en/of dieper gebeuren.

De redenering waarbij ingezet wordt op de verlenging van de proef, wordt in de literatuur ontkracht. Op Afbeelding 47 staan de resultaten van de RCM-testen op de mengsels BO en M25, waar eerder werd naar verwezen. Op het betonmengsel BO werden verschillende RCM-testen uitgevoerd, waarbij net met de variabelen tijd en spanningsverschil wordt gespeeld (om herhaalbaarheid en consistentie van verschillende testmethoden voor chloride-indringing aan te tonen). Voor deze uiteenzetting zijn enkel de paarse balkjes in de grafiek van belang. Op de grafiek is duidelijk dat variatie van de tijdsduur bij constante spanningsterkte nagenoeg geen invloed heeft op de migratiecoëfficiënt. Dit blijkt zowel bij een spanningsverschil van 10 V, als bij een spanningsverschil van 20 V. De grootste migratie blijkt plaats te hebben in de eerste uren van de proef.



Afbeelding 47: Resultaten van RCM-proeven uit [29]

Eveneens in deze grafiek ziet men dat de proef onder andere werd uitgevoerd gedurende 30 uur, zowel bij een spanningsverschil van 10 V, als bij een spanningsverschil van 20 V. Er blijkt geen merkbaar verschil tussen de resultaten bekomen met beide methoden, waardoor ook de tweede piste, waarbij het spanningsverschil zou verhoogd worden, een doodlopend spoor blijkt. Het is echter gevaarlijk om dit te besluiten uit dit enig voorbeeld. Bovendien liggen de gehanteerde spanningsverschillen (10 V en 20 V) respectievelijk 6 en 3 keer lager dan deze die gebruikt werden voor het testen van de (ultra) hogesterktebetonmengsels in dit onderzoek.

Beide pistes kunnen alleszins in verder onderzoek onder de loep worden genomen.

7 Sulfaataantasting

7.1 Situering

Dit deel van het onderzoek werd in nauwe samenwerking uitgevoerd met RWTH Aachen. De proefstukken werden geproduceerd in Labo Magnel voor Betononderzoek in Gent, en getest in de laboratoria in Aachen, waar zowel lengteverandering als dichtheidsverandering (door middel van ultrasoon onderzoek) werden bijgehouden. Op verzoek van de onderzoekers te Aachen, is voor deze proeven gebruik gemaakt van proefstukken uit reeks 2.

Omwille van de lage permeabiliteit van UHPC en RPC, verwacht men een erg lage invloed van de sulfaten op het beton. Het referentiemengsel is voor deze proeven geen traditioneel beton, maar een UHPC-mengsel met een hogere W/B-factor: $W/B = 0,5$. Dit veroorzaakt een grotere porositeit, wat het materiaal verzwakt en gevoeliger maakt voor sulfaataantasting. Uit de sterkte-eigenschappen van mengsel 5UHPC2, blijkt dat dit beton vergelijkbaar is aan 4TC1.

7.2 Proefstukken

Voor de proeven op sulfaataantasting werden balkvormige proefstukken gemaakt met afmetingen 150 mm x 40 mm x 10 mm. De kleinere afmetingen in twee van de drie dimensies bevorderen de verlenging ten gevolge van een eventuele sulfaataantasting in de lengterichting van het proefstuk. Voor het maken van deze proefstukken werd een nieuwe kunststoffen bekisting ontwikkeld door het technisch personeel aan Labo Magnel voor Betononderzoek. Per bekisting kunnen zes proefstukken worden vervaardigd. De bekisting is volledig demonteerbaar in individuele balkvormige elementen, zodat het reinigen na ontkisten vergemakkelijkt wordt. Bovendien is hierdoor fijnregeling van de afzonderlijke elementen mogelijk. Alle proefstukken dienen namelijk zo gelijk mogelijk te zijn, om vergelijking van de resultaten mogelijk en zinvol te maken, zie ook [21].

Per betonmengsel worden 18 proefstukken gemaakt. De helft wordt gebruikt voor ultrasoonmetingen, ter bepaling van de dynamische E-modulus. De andere helft van de proefstukken wordt gebruikt om een eventuele lengteverandering op te meten. De 9 proefstukken per proef worden telkens in drie verschillende oplossingen bewaard, zodat er per combinatie betontype – proef – oplossing telkens drie proefstukken getest worden, om een gemiddelde te kunnen berekenen.

De proefstukken bestemd voor het opmeten van lengteverandering worden aan de uiteinden, in de lengterichting, voorzien van een stalen bolvormig uitstekend element. Deze wordt ingebetonneerd op halve hoogte en halve breedte van de kopse zijde. Dit laat toe het proefstuk altijd op dezelfde manier in het meettoestel te plaatsen en de accurateheid van de meting te verhogen. De proefstukken bestemd voor ultrasoon onderzoek behoeven geen extra voorbereidingen.

7.3 Proefopstelling en methode

Sulfaataantasting wordt, in tegenstelling tot bijvoorbeeld zuuraantasting, niet onderzocht door een dynamisch proces. De proefstukken worden continu in een sulfaatoplossing ondergedompeld, en op discrete momenten wordt de evolutie nagegaan. De testprocedure is gebaseerd op uitvoeringsprocedure AA 11.1.88 voor sulfaatbestendigheid, een interne procedure van de RWTH. Deze schrijft voor dat de sulfaataantasting voor één betonsoort best getest wordt in zes situaties, namelijk in drie concentraties en bij twee temperaturen. De drie voorgeschreven sulfaatconcentraties in de SO_4^{2-} - oplossingen bedragen 1500 mg/l, 3000 mg/l en 30.000 mg/l. Bovendien zou de aantasting moeten worden opgemeten bij 5°C en 20°C.

Aangezien men in het kader van dit onderzoek vooral geïnteresseerd is om verschillende betonsoorten te onderzoeken, en niet van één enkele betonsoort het volledig gedrag in kaart te brengen, wordt gekozen om enkel de sulfaatconcentraties 3000 mg/L en 30.000 mg/L te gebruiken. Bovendien wordt enkel het gedrag bij 5°C onderzocht, daar uit persoonlijke ervaring van het personeel in Aachen een grotere schade wordt verwacht bij deze temperatuur. Een mogelijke verklaring voor deze vaststelling is de vorming van thaumasiet, die voornamelijk bij lage temperatuur wordt gevormd. Professor P. Brown stelt dat de optimale temperatuur voor de vorming van Thaumasiet rond de 4°C ligt.²

Naast het registreren van de schade ten gevolge van sulfaataantasting, wordt ook de evolutie van proefstukken geregistreerd in een continue onderdompeling in een $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -oplossing. Deze proefstukken dienen als referentiemateriaal. Door van elke meting de referentiemeting af te trekken voor desbetreffend betonmengsel, kan men de lengteverandering in kaart brengen specifiek ten gevolge van de sulfaataantasting, en niet ten gevolge van andere invloeden, zoals krimpverschijnselen. Evenzo heeft deze referentiemeting een voordeel met betrekking tot de E-modulusmeting, daar men nu enkel de verandering in E-modulus vastlegt ten gevolge van de sulfaataantasting, en niet deze te wijten aan de veroudering van het beton, die eveneens een verdichting van de microstructuur veroorzaakt.

Na het storten van de proefstukken, werden deze opgeslagen in een natte kamer, bij een temperatuur van $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ en een vochtigheid van $90 \pm 5\%$. Op een leeftijd van 28 dagen werden de proefstukken overgebracht naar de laboratoria van de RWTH Aachen. Hier werden de proefstukken per zes in afzonderlijke oplossingen bewaard, namelijk drie om de lengteverandering op te meten en drie voor de dynamische E-modulusbepaling.

In Tabel 10 wordt ter verduidelijking een overzicht gegeven van de verschillende aantallen proefstukken, in welke omstandigheden ze worden bewaard en waar ze voor gebruikt worden.

² Paul Brown, Professor at Penn State University, Course on cement chemistry, Toronto, Canada, Hooton Doug

Tabel 10: Overzicht gebruik proefstukken sulfaataantasting

	1UHPC2		3RPC2		5UHPC2	
	ΔL	ΔE	ΔL	ΔE	ΔL	ΔE
Ca(OH) ₂	3	3	3	3	3	3
3.000 mg/l SO ₄ ²⁻	3	3	3	3	3	3
30.000 mg/l SO ₄ ²⁻	3	3	3	3	3	3

7.3.1 Opmeting lengteverandering

Bij elke meting wordt dezelfde procedure gevolgd.

- De proefstukken worden oppervlaktegedroogd.
- Vervolgens wordt elk proefstuk gewogen.
- Dan pas wordt de lengte van het proefstuk opgemeten.

De lengtemetingen gebeuren met behulp van het Millitast meettoestel van het merk Mahr, met een nauwkeurigheid van 0,001 mm. Dit toestel is boven en onder de voor het proefstuk voorziene plaats uigerust met twee holle houders, waarin de metalen elementen passen, die in het proefstuk voorzien waren bij het storten. Zodoende wordt de lengte van het proefstuk altijd op dezelfde locatie gemeten. Door de metalen bol in de holle houder te laten passen worden lengteverschillen tengevolge van excentriciteiten zoveel mogelijk gereduceerd. Dit wordt getoond op Afbeeldingen 48 tot 50.



Afbeelding 48: Kalibratie



Afbeelding 49: Meting proefstuk



Afbeelding 50: Metalen element ter verbinding met meettoestel

Voor het uitvoeren van de metingen moet het toestel gekalibreerd worden. Dit wordt gedaan door een referentietaaf op te meten en de machine bij deze lengte op nul te zetten. Door telkens met dezelfde referentie te werken, kan men consequente metingen uitvoeren, en deze metingen vergelijken. Bij het gebruik van het toestel, trad regelmatig een technisch probleem op tussen het kalibreren en het feitelijk opmeten van de proefstukken. Hierbij werd na het meten van een proefstuk vastgesteld dat het toestel niet meer gekalibreerd was, en bij het herhalen van de meting voor hetzelfde proefstuk werd een andere waarde bekomen. Om dit mankement te omzeilen, daar er geen verklaring voor werd gevonden, noch bij de begeleiders, noch bij de techniekers, werden

de proefstukken steevast tweemaal gemeten, telkens voorafgegaan door een kalibratieprocedure. De meetwaarde werd pas aanvaard wanneer deze waarde werd bevestigd door een tweede meting.

7.3.2 Opmeting verandering in dynamische E-modulus

Voor de bepaling van de dynamische E-modulus werden proefstukken gebruikt met dezelfde karakteristieken als voor de bepaling van de lengteverandering. Enkel de metalen elementen aan de uiteinden van het proefstuk worden voor deze proefstukken achterwege gelaten.



Afbeelding 51: Apparatuur voor ultrasone metingen

De proefstukken voor deze meting worden eveneens oppervlaktegedroogd en gewogen voor de meetprocedure. De bepaling van de dynamische E-modulus gebeurt door middel van ultrasoon onderzoek, aan de hand van opstelling op Afbeelding 51. Het proefstuk wordt tussen twee metalen kegels geplaatst, die stevig tegen het proefstuk dienen gedrukt te worden. De opstelling kan in drie dimensies worden bijgesteld, zodat de metalen kegels, die de ultrasoongolven in het proefstuk geleiden, optimaal gepositioneerd kunnen worden ten opzichte van het proefstuk, zoals getoond wordt op Afbeelding 52. De golven moeten zo centraal mogelijk in het proefstuk gestuurd worden, om een zo correct mogelijk repetitief beeld te verkrijgen.



Afbeelding 52: In drie dimensies verstelbare opstelling



Afbeelding 53: Instellingsapparatuur ultrasoongolven

Het doel van de meetprocedure is het bepalen van de golffrequentie waarbij het maximaal signaal door het proefstuk wordt gestuurd door de zender, en ontvangen door de ontvanger. Het bepalen van deze frequentie, de resonantiefrequentie genoemd, gebeurt volgens volgend iteratief proces.

- Door het aanpassen van de golffrequentie, af te lezen op het schermje uiterst rechts op Afbeelding 53, door middel van draaien aan de grote draaiknop uiterst rechts wordt de signaalsterkte gewijzigd.
- Indien nodig moeten de gevoeligheid van de zender en ontvanger gewijzigd worden, aan de hand van de twee kleine draaiknoppen in het midden van het toestel (Afbeelding 53). Een signaalsterkte tussen de 30 en 70 μA , af te lezen op de wijzer in het midden van het toestel, geeft de meest betrouwbare resultaten.
- Tenslotte moet bij elke proefstuk geverifieerd worden of het toestel op het juiste bereik is ingesteld. Dit is af te lezen door het rode punt op het scherm met de golffrequentie (Afbeelding 53).

Door een iteratief proces van frequentie en gevoeligheid aan te passen zoals hierboven beschreven, bekomt men uiteindelijk een maximale stroomsterkte.

7.4 Verwerking resultaten

7.4.1 Lengteverandering

De meetresultaten die bekomen worden aan de hand van de millitast meetapparatuur ondergaan achtereenvolgens volgende bewerkingen.

- De lengteverandering wordt voor het eerst opgemeten na één dag onderdompeling. Deze meetwaarde, die niets anders dan het verschil opmeet tussen het gemeten proefstuk en de kalibratiestaaf, zal als referentie dienen bij de volgende metingen van hetzelfde proefstuk.
- Naast een absolute lengteverandering is men ook geïnteresseerd in de relatieve lengteverandering. De lengteverandering ten opzichte van de meting op dag 1 wordt hiervoor gedeeld door de oorspronkelijke lengte van het proefstuk (0,15 m), zodat men een waarde uitkomt in mm/m. Dit is interessant voor vergelijkingsdoeleinden, vooral met proefstukken met andere afmetingen.
- Op elke meetdatum wordt een gemiddelde berekend van de lengteverandering van de drie proefstukken.
- De gemiddelde lengteverandering van de proefstukken die in Ca(OH)_2 bewaard zijn, wordt afgetrokken van de gemiddelde lengteverandering van de in sulfaten bewaarde proefstukken.
- Van de verschillende gemiddelde waarden wordt ook telkens de standaardafwijking bepaald.

Zowel de absolute als de relatieve lengteveranderingen kunnen vervolgens uitgezet worden in grafieken. Telkens worden de foutbalken mee uitgezet, zodat een inschatting kan gemaakt worden van de significantie van een eventuele trend in de gemiddelde evolutie.

7.4.2 Verandering in dynamische E-modulus

De meetresultaten die bekomen worden met de ultrasoonmetingen ondergaan achtereenvolgens volgende bewerkingen.

- Uit de afmetingen van het proefstuk en de gewogen massa (oppervlaktedroog) wordt de massadichtheid bepaald, uitgedrukt in kg/dm³.
- Vervolgens wordt de dynamische E-modulus bepaald, aan de hand van volgende formule:

$$E_{dyn} = \frac{4 \left(\frac{L}{100} \right)^2 \rho \cdot f^2}{100000}$$

met:

E_{dyn} : dynamische E-modulus van het materiaal [N/mm²]

L: lengte van het proefstuk [mm]

ρ : massadichtheid van het materiaal [kg/dm³]

f: resonantiefrequentie van het materiaal [Hz]

In tegenstelling tot de lengteverandering door de sulfaataantasting, wordt voor de evolutie van de dynamische E-modulus voor gekozen om de bekomen resultaten apart in kaart te brengen.

7.5 Resultaten

7.5.1 Lengteverandering

Op de grafieken in Bijlage A, worden de resultaten voor de lengteverandering bij de verschillende betonmengsels weergegeven. Het gaat telkens om relatieve lengteverandering, dus ten opzichte van de referentie in de Ca(OH)₂, zodat enkel de invloed van de sulfaataantasting in rekening wordt gebracht.

Door de aanwezigheid van de foutbalken wordt elke trend of evolutie erg relatief. Aan de hand van de bekomen resultaten is het onmogelijk om een duidelijke trend waar te nemen.

7.5.2 Verandering in dynamische E-modulus

Op de grafieken in Bijlage B worden de resultaten voor de toename van de dynamische E-modulus bij de verschillende betonmengsels weergegeven. Op de grafieken is de toenemende trend duidelijk zichtbaar, doch deze is niet significant verschillend voor de aangetaste proefstukken ten opzichte van de referentieproefstukken. De foutbalken van de meetpunten van beide grafieken lopen immers in elkaar over, zodat een eenduidige uitspraak niet mogelijk is. Door de moeilijke visuele weergave van de in elkaar overlopende foutbalken, worden deze niet weergegeven op de afbeeldingen in bijlage. De toenemende trend is zoals verwacht kan worden van een verouderend beton, wat

blijkt uit het parallel verloop met de referentieproefstukken. De microstructuur verdicht immers nog door de langzame hydratatie op lange termijn.

7.6 Bijkomend onderzoek

7.6.1 Motivering

Aan de hand van deze metingen alleen mag men niet besluiten dat geen sulfaataantasting plaatsvindt, of dat geen ettringiet- en/of gipsvorming optreedt. Het is namelijk perfect mogelijk dat er in kleine mate ettringiet en/of gips gevormd wordt, maar dat de hoeveelheden in die mate klein zijn dat er voldoende porositeit voor handen is om de reactieproducten op te slagen zonder dat schade wordt berokkend aan de microstructuur. In dit scenario is de reactie met sulfaten zelfs gunstig voor het beton, daar een verdichting van de microstructuur optreedt.

7.6.2 Analyse van de proefstukken met X-stralen diffractie (XRD)

Op basis van bovenstaande motivering wordt besloten om een eventuele sulfaataantasting op een iets doordringendere wijze te onderzoeken. Men kan namelijk uitsluitsel krijgen over een eventuele aanwezigheid van ettringiet of gips door kleine hoeveelheden beton te onderwerpen aan X-stralendiffractie. Er werd met een steekproef gewerkt, m.a.w. niet elk proefstuk is aan X-stralendiffractie onderworpen. Enkel de reeksen proefstukken onderworpen aan een sulfatenconcentratie van 30.000 mg/l, alsook de referentieproefstukken van elk beton worden aan een tweede onderzoek onderworpen. Van elke reeks wordt één proefstuk uitgekozen.

Door middel van een automatisch freesproces worden van de proefstukken verschillende laagjes beton afgefreesd. Er wordt aanvankelijk gekozen om laagjes van 0,5 mm te onderzoeken, om bovendien een sulfaatprofiel te kunnen opstellen volgens de diepte van het proefstuk. Het frezen van het proefstuk levert kleine hoeveelheden betonpoeder op, waarmee een monster kan bereid worden voor verder onderzoek. Het poeder wordt tot een dun schijfje herleid, in een metalen vorm. Deze wordt vervolgens onderworpen aan X-stralendiffractie.

Het XRD-onderzoek (Engels: *X-Ray Diffraction*) levert per monster een XRD-spectrum, waarop de pieken van de verschillende stoffen voorkomen. De verkregen pieken worden vergeleken met een database aan eerder uitgevoerde XRD-analyses, om elke piek aan een juiste stof te associëren. De XRD-spectra van de onderzochte betonmengsels zijn hieronder weergegeven.

In Bijlage C kunnen de XRD-spectra bezichtigd worden van de geteste proefstukken. In eerste instantie is enkel de oppervlaktelaag onderzocht. Zonder in te gaan op de volledige interpretatie van de XRD-spectra, daar dit niet de kernzaak is van deze thesis, kunnen een aantal vaststellingen worden gemaakt.

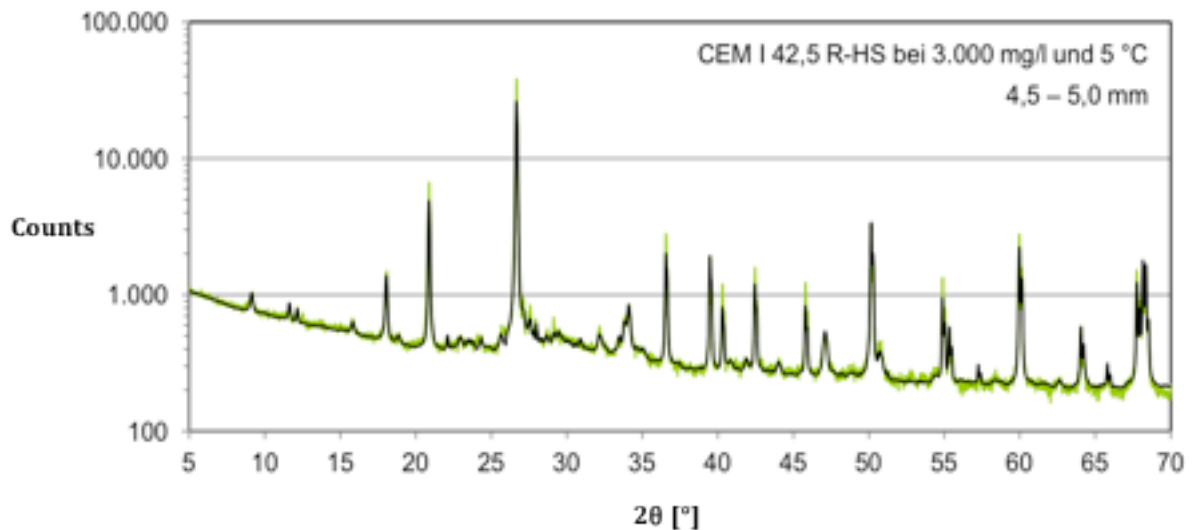
- Bij superpositie van XRD-spectra van proefstukken die blootgesteld zijn aan sulfaten, en deze van de proefstukken die in Ca(OH)_2 zijn bewaard, zijn beide spectra amper van elkaar te onderscheiden, wat aantoont dat beiden zich gelijkaardig gedragen.

- In geen enkel XRD-spectrum wordt een noemenswaardige hoeveelheid gips teruggevonden. Mogelijks verschuilen verwaarloosbare hoeveelheden gips zich achter de pieken te wijten aan kwarts. Dit is moeilijk met zekerheid te zeggen.
- De pieken te wijten aan ettringietvorming situeren zich typisch voor $2\theta = 25^\circ$ (Niet alle pieken voor deze grens worden geassocieerd met ettringietvorming). Dit laat toe te concluderen dat geen ettringiet gevormd is in de proefstukken van 3RPC2.
- In de proefstukken van het betonmengsel 1UHPC2 worden kleine hoeveelheden ettringiet waargenomen in de oppervlaktelaag van de proefstukken. Deze ettringietvorming echter is eveneens aanwezig bij de referentieproefstukken, zodat dit niet eenduidig kan toegekend worden aan de sulfaataantasting, maar eerder aan de ettringietvorming gevormd tijdens de jonge fase van het beton.
- Mogelijks wordt bij de proefstukken van betonmengsel 5UHPC2 kleine hoeveelheden ettringiet teruggevonden in de aan de sulfaatoplossing blootgestelde proefstukken, die niet worden waargenomen bij de referentieproefstukken. Door de kleine hoeveelheden is het moeilijk hier uitsluitel te geven. Indien echt DEF plaats gevonden heeft, is dit in zodanig kleine hoeveelheden, en pas na een aanzienlijke testperiode, zodanig dat nog steeds kan geponeerd worden dat ook dit mengsel zeer goed presteert.

Op basis van bovenstaande vaststellingen wordt besloten de proefstukken niet dieper te gaan analyseren. Er kan immers met grote zekerheid aangenomen worden dat, indien aan de oppervlakte geen schadelijke reactiestoffen worden gevormd, deze ook niet in diepere lagen zullen aangetroffen worden. Deze stelling kan onderbouwd worden a.h.v. volgend onderzoek³, uitgevoerd aan de RWTH Aachen, waar wel ettringietvorming werd waargenomen ten gevolge van sulfaataantasting.

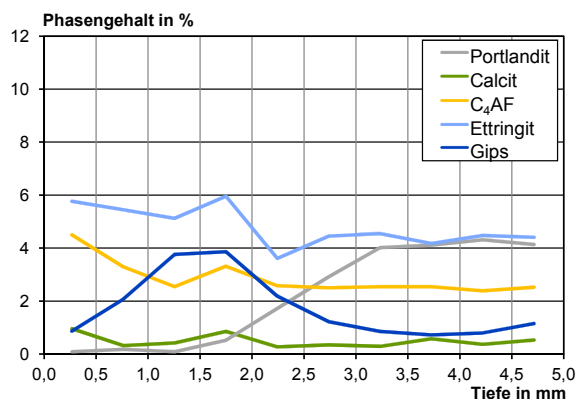
Voor een mortel met W/C-factor 0,45 en een cement CEM I 42,5 R-HS, werd volgend XRD-spectrum vastgelegd (Afbeelding 54). Het komt voort uit een XRD-analyse van een cementmonster afkomstig uit de middelste laag van een proefstuk zoals de proefstukken beschreven en gebruikt voor de proeven in dit onderzoek. De proefstukken werden bewaard in een sulfaatoplossing van 3000 mg/l. De eerste en vierde piek, op respectievelijk $2\theta = 9,1$ en $15,8$ kunnen gelinkt worden aan ettringiet.

³ Resultaten van dit onderzoek werden verkregen via Haufe, J.; Brameshuber, W.: Flugasche und Sulfatwiderstand. In: 47. Aachener Baustofftag (2014), Aachen, 9.4.2014

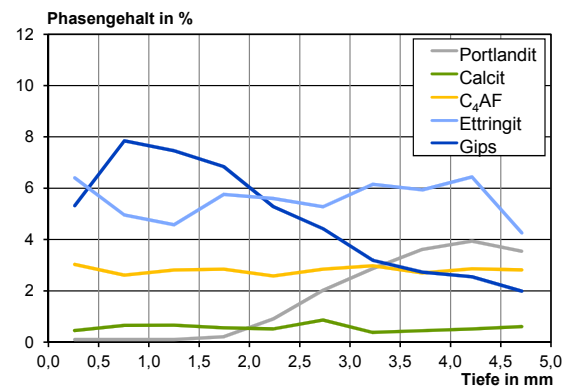


Afbeelding 54: XRD-spectrum van mortel met ettringietvorming

Volgende diepteprofielen werden opgesteld voor de desbetreffende proefstukken, na bewaring in sulfaatoplossingen met concentratie van respectievelijk 3.000 mg/l (bij 5°C) (Afbeelding 55) en 30.000 mg/l (bij 20°C) (Afbeelding 56), na analyse van de samenstelling op verschillende dieptes.



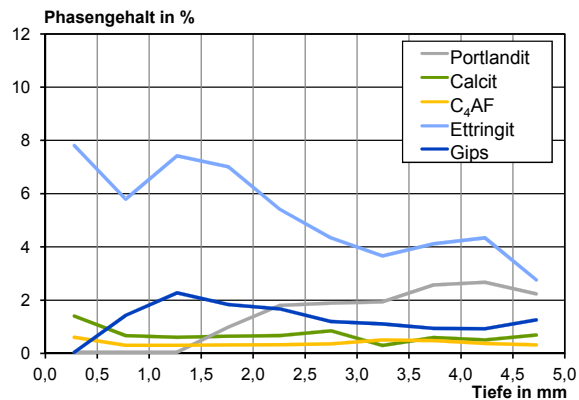
Afbeelding 55: Diepteprofiel proefstuk bij bewaring sulfaatconcentratie met concentratie van 3.000 mg/l



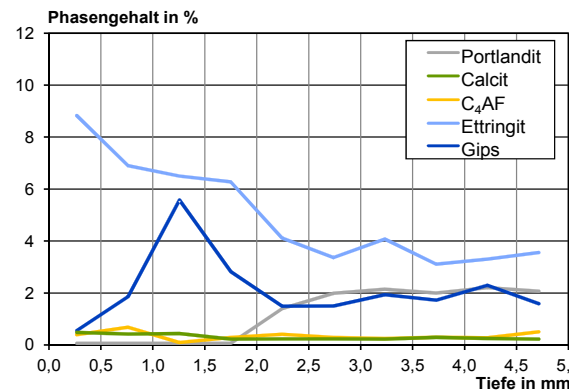
Afbeelding 56: Diepteprofiel proefstuk bij bewaring sulfaatconcentratie met concentratie van 30.000 mg/l

In deze profielen kan vastgesteld worden dat de hoeveelheid ettringiet in beide proefstukken ongeveer stabiel is in de diepte van het proefstuk, daar waar de hoeveelheid gips meer uitgesproken is in de buitenste helft van het proefstuk. Een ander fenomeen dat zichtbaar is, is dat de concentratietoename een grotere invloed heeft op de gipsvorming dan op de ettringietvorming. Locaal overschrijdt het aandeel gips zelfs dat van ettringiet, bij bewaring in 30.000 mg/l sulfaatoplossing.

Proefstukken bestaande uit een mortel met W/C-factor 0,45 op basis van cement CEM I 52,5 N, waar 30 % of het cement vervangen is door vliegash, werden blootgesteld aan dezelfde sulfaataantasting. Opnieuw verraden XRD-scans de aanwezigheid van ettringiet en gips. Volgende diepteprofielen werden opgesteld voor bewaring in sulfaatoplossingen met concentratie van respectievelijk 3.000 mg/l (bij 5°C) (Afbeelding 57) en 30.000 mg/l (bij 20°C) (Afbeelding 58).



Afbeelding 57: Diepteprofiel proefstuk bij bewaring sulfaatconcentratie met concentratie van 3.000 mg/l



Afbeelding 58: Diepteprofiel proefstuk bij bewaring sulfaatconcentratie met concentratie van 30.000 mg/l

Zoals verwacht kan worden ten gevolge van een dichtere microstructuur, vertoont deze mortel een verschillend gedrag onder sulfaataantasting ten opzichte van de eerste mortel. Twee verschijnselen zijn van bijzonder belang voor dit onderzoek.

- In de eerste plaats, is de hoeveelheid gips lager dan bij de vorige mortel. Wanneer het aanwezig is echter, bij blootstelling aan een hoge concentratie sulfaten, blijft het zich nog steeds veel sterker manifesteren in de buitenste helft van het proefstuk.
- Ondanks de lagere equivalente W/B-factor, te wijten aan het gebruik van vlieg-as, dat leidt tot een dichtere microstructuur, wordt nog steeds ettringiet gevormd. Deze is echter niet langer gelijk verdeeld over de diepte van het proefstuk. Door de moeilijkere indringing van de sulfaatoplossing in de proefstukken, lijkt de ettringietvorming meer uitgesproken in de buitenste laag van het proefstuk.
- De ettringietvorming wordt in deze proefstukken bevorderd door de hogere aanwezigheid van C_3A , te wijten aan de vlieg-as die gebruikt werd in de proefstukken.

Hoewel beschreven vaststellingen werden gemaakt na een jaar bewaring in sulfaatoplossing, is het vastgesteld gedrag van de proefstukken wel extrapol eerbaar naar de proefstukken uit deze thesis. Het lijkt namelijk aannemelijk dat wanneer geen ettringiet en gips wordt vastgesteld aan de oppervlakte van de proefstukken blootgesteld aan hoge sulfaatconcentraties, in het bijzonder proefstukken bestaande uit een materiaal van een hoge dichtheid, geen ettringiet zal gevormd worden dieper in het proefstuk. Verder onderzoeken van de proefstukken in diepere lagen heeft dus geen toegevoegde waarde.

7.7 Kritische conclusie

Men kan besluiten dat verschillende proeven die uitgevoerd werden ter onderzoek van sulfaataantasting consequente resultaten opleveren, en dat de geteste betonmengsels een uitzonderlijke resistentie hebben ten opzichte van sulfaataantasting.

Bij het gebruik van de proefopstelling voor ultrasone meting rezen een aantal bedenkingen bij de accuraatheid van de gevolgde procedure. Er zijn namelijk geen markeringen, of andere herkenningspunten voorzien op de proefstukken. Het is dan ook

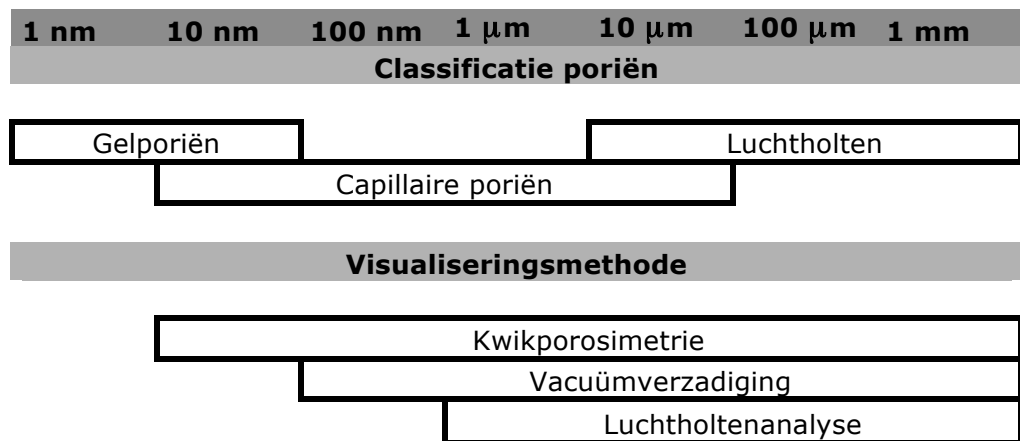
onmogelijk te garanderen dat de opeenvolgende metingen op hetzelfde proefstuk (exact) op dezelfde plaats worden uitgevoerd. Bovendien, voornamelijk te wijten aan de moeilijke verwerkbaarheid van het vers beton, gebeurt het dat er open poriën gelegen zijn in de kleine zijde. Of de metingen dan worden uitgevoerd boven of onder de bewuste porie, hangt af van meting tot meting, zeker omdat de metingen door verschillende operatoren worden uitgevoerd doorheen het proefprogramma. Gezien de hoge gevoeligheid van de apparatuur, kan men zich dus vragen stellen bij de consequentie van deze proefmethode. De invloed van deze fout wordt wel gedeeltelijk teniet gedaan door het nemen van gemiddelden over verschillende proefstukken. Een mogelijke verbetering zou erin bestaan met een alcoholstift een markering aan te brengen voor de eerste meting.

Opnieuw wordt men geconfronteerd met de grenzen van de testmethode, bij het testen van zeer resistent beton. Naast het langer lopen van de proeven, lijkt het een interessante piste om de sulfaatconcentraties te verhogen van de bewaringsoplossingen. Deze piste wordt mede ondersteund door de vaststelling dat op sommige locaties in de wereld veel hogere concentraties worden waargenomen (zie literatuuronderzoek), waar het beton mee geconfronteerd wordt in gebruikstoestand. Als men weet dat de concentratie van 30.000 mg/l gebruikt wordt in een land waar deze concentratie een factor 10 groter is dan de maximale concentratie waar beton in gebruikstoestand wordt mee geconfronteerd, lijkt het niet zo ver gezocht om ook proeven uit te voeren met concentraties die een zekere factor hoger ligt dan deze concentraties. Zeker voor UHPC, en andere sulfaatresistente betontypes lijkt dit een meerwaarde. Los van de praktische relevantie van strengere testomstandigheden, laat dit toe de prestaties van het beton beter in te schatten.

8 Introductie tot het poriënonderzoek

Uit voorgaande proeven, alsook uit het literatuuronderzoek, is gebleken dat porositeit en interconnectiviteit een belangrijk gegeven is in het duurzaamheidsplaatje van beton. Poriën bestaan er echter in een grote verscheidenheid, al naargelang de afmetingen, de oorsprong en de inhoud ervan. De beschikbare methoden om deze verscheidenheid aan poriën te onderzoeken is al even uitgebreid. Een duidelijk overzicht van de verschillende poriën en visualiseringstechnieken wordt gegeven in Boel [26].

In overzicht in Afbeelding 59, is een samenvatting gedistilleerd uit dat overzicht, gegeven in [26], waarbij enkel de visualiseringsmethoden zijn opgenomen die in deze thesis worden gehanteerd. De verschillende methoden moeten in geen geval beschouwd worden als alternatieven, ook al bestaat er duidelijke overlap in het bereik van de methoden, doch eerder als complementaire technieken, die samen toelaten een zo volledig mogelijk beeld te schetsen van de microstructuur van een bepaalde betontype.



Afbeelding 59: Classificatie poriën en visualiseringstechnieken

9 Luchtholtenanalyse

9.1 Proefstukken

De voorbereiding van de gebruikte proefstukken is een cruciale stap bij de luchtholtenanalyse. Het resultaat hangt immers in grote mate af van de nauwkeurigheid waarmee de meetapparatuur de luchtholten kan herkennen op het proefstuk.

Voor de AVA (luchtholtenanalyse, Engels: *Air Void Analysis*) worden proefstukken gebruikt uit reeks 1. De proefstukken voor de AVA bestaan uit vierkante betonplaatjes met zijde 100 mm en dikte 10 ± 2 mm. Deze worden uit kubussen met zijde 100 mm gezaagd. Er wordt telkens één betonplaatje gezaagd uit het midden van één kubus, zodat men beschikt over één proefstuk per betontype. Vervolgens wordt telkens één van de grote zijden van de proefstukken manueel gepolijst, om een perfect glad oppervlak te bekomen. Bij het uitzagen van de proefstukken uit de kubussen kan best wat meer dan 10 mm dikte worden voorzien, om na het polijsten zeker 10 mm dikte over te houden. Deze dikte is niet zozeer van belang voor de kwaliteit van de resultaten zelf, doch garandeert wel een minimale sterkte van het proefstuk.

Om nauwkeurigheid van de resultaten te bevorderen wordt het contrast tussen de holten en het vast materiaal versterkt op het oppervlak dat onderzocht zal worden. Dit wordt gedaan door het volledig oppervlak eerst zo uniform mogelijk zwart te kleuren, bijvoorbeeld met een alcoholstift, waarbij bijzondere zorg wordt besteed aan het vermijden van streepvorming. De holten worden nadien gevuld met wit BaSO_4 -poeder. Indien nodig wordt nadien lokaal de zwarte kleur bijgewerkt, daar waar wit poeder tot verkeerde resultaten zou kunnen leiden, bijvoorbeeld ter hoogte van holten in de granulaten. Het resultaat is te bezichtigen op Afbeelding 60.



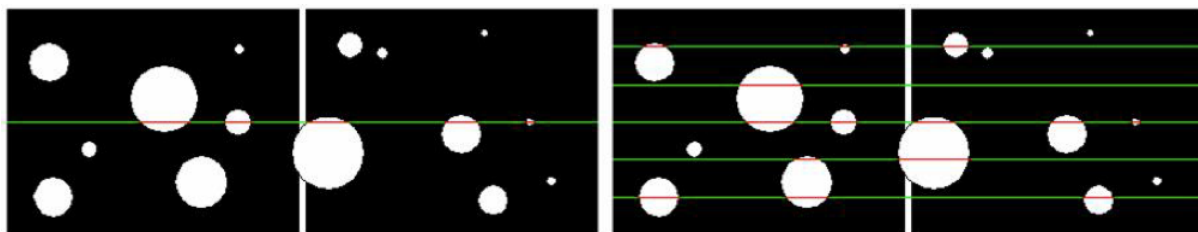
Afbeelding 60: Creatie van contrast op de proefstukken voor luchtholtenanalyse, d.m.v. zwarte inkt en BaSO_4 -poeder

9.2 Luchtholtenanalyse

Voor het uitvoeren van de luchtholtenanalyse wordt gebruik gemaakt van het toestel RapidAir 457, in overeenstemming met ASTM C 457. Dit is een toestel dat een automatische analyse van het luchtholtensysteem toelaat. Het proefstuk wordt op een mobiele statief bevestigd, onder een microscoop. Vooraf wordt vastgelegd op welk gebied van het proefstuk de analyse wordt uitgevoerd, en hoeveel beelden van het proefstuk moeten gemaakt worden. Er wordt telkens een gebied van 50 mm op 50 mm bestudeerd, waarbij de ligging van dit gebied op het proefstuk op voldoende afstand van de proefstukrand wordt genomen.

Van zodra de verschillende parameters zijn ingevoerd, wordt het proefstuk op systematische wijze verplaatst volgens een grid-patroon, en worden op regelmatige afstanden afbeeldingen gemaakt van het proefstuk, waarbij telkens voor enige overlap wordt gezorgd. Deze analyse wordt vier keer uitgevoerd, waarbij het proefstuk na elke analyse 90° gedraaid wordt op het statief en een ander gebied wordt bestudeerd. Zodoende kan men alsnog van elk betontype een gemiddelde waarde berekenen, hoewel slechts met één proefstuk gewerkt is.

Op basis van lijnen die getrokken worden over het proefstuk, wordt softwarematig berekend wat de procentuele verhouding is lijnlengte op witte achtergrond, ten opzichte van lijnlengte op zwarte achtergrond, of dus de verhouding tussen de luchtholten en het vast materiaal. Dit wordt mogelijk verduidelijkt op Afbeelding 61, ontleend aan [26]. Omwille van de specifieke werking van dit systeem, wordt geen rekening gehouden met luchtholten kleiner dan 8 μm . Uitgaande van de classificatie op Afbeelding 59, wordt door deze methode dus effectief enkel rekening gehouden met luchtholten.



Afbeelding 61: Principe van opmeting van luchtholten: de verhouding van de lengte rode lijnen tot de lengte groene lijnen wordt softwarematig opgemeten [26]

9.3 Resultaten

Bij de AVA worden verschillende eigenschappen van het holtensysteem onderzocht en bijgehouden. Een volledig overzicht, met uitleg van de verschillende parameters, is terug te vinden in Boel [26]. In dit werk ligt de interesse vooral bij het feitelijke luchtgehalte, maar voor de volledigheid worden ook de specifieke oppervlakte α_a en de afstandsfactor L . De specifieke oppervlakte van de poriën geeft een indicatie van de grootte van de poriën: hoe kleiner de waarde van α_a , hoe groter de poriën. De afstandsfactor is een maat voor de afstand tussen de poriën. Hoe groter de afstandsfactor, hoe meer cementpasta zich rond de poriën bevindt. Dit is ondermeer van groot belang in de studie naar de vries-dooi weerstand van het beton.

De vernoemde parameters worden in Tabel 11 opgenomen voor de vier onderzochte betontypes. Voor de AVA dient op voorhand ook het pastagehalte p van het beton

ingegeven te worden. Deze wordt ook in de overzichtstabel opgenomen. Het pastagehalte is logischerwijze het hoogst voor RPC en het laagst voor TC, omwille van de grootte en hoeveelheden gebruikte granulaten. Het pastagehalte voor UHPC en HPC is gelijk, daar hetzelfde mengsel is gebruikt voor beiden.

Tabel 11: Overzicht resultaten Luchtgeholtenonderzoek

	p	A_a	σ_A	α_a	σ_a	L	σ_L
	[%]	[%]		[mm ⁻¹]		[mm]	
1UHPC1	54,62	4,52	0,30	12,70	0,65	0,55	0,01
2HPC1	54,62	2,30	0,03	21,00	0,80	0,44	0,02
3RPC1	62,62	2,10	0,09	27,33	0,70	0,37	0,01
4TC1	27,70	2,60	0,20	28,96	3,24	0,23	0,02

Uit bovenstaande resultaten lijkt het grootste luchtgehalte zich voor te doen bij UHPC. Dit kan verklaard worden door de slechte verwerkbaarheid waarmee men geconfronteerd was bij het storten. Het luchtgehalte bij de andere mengsels lijkt van vergelijkbare grootteorde. Uit de andere parameters kan geconcludeerd worden dat de grootste luchtbellens zich voordoen bij UHPC, en dat de luchtbellens dan ook verder uit elkaar liggen. Men is er blijkbaar, ondanks het mengen onder vacuüm, niet in geslaagd de grote luchtbellens te verwijderen uit het UHPC-mengsel. Dit is te wijten aan de hogere viscositeit van het mengsel. Bij TC en RPC liggen de luchtbellens dichter bij elkaar, en zijn de te verwachten afmetingen ook kleiner.

Vergelijking van deze resultaten met deze vermeld in [26] leert dat het luchtgehalte eerder aan de hoge kant ligt voor het beton (TC). In een uitgebreide studie [27] worden verschillende betonmengsels achtereenvolgens getest in verschillende laboratoria. Bij deze test wordt vastgesteld dat de resultaten voor het luchtgehalte kunnen variëren al naargelang het proefstuk van eenzelfde betonmengsel. In Tabel 12 wordt een overzicht gegeven van de gemeten luchtgehaltes voor verschillende pastagehaltes. In vergelijking met deze resultaten presteren de proefstukken onderzocht in deze thesis vrij goed.

Tabel 12: Overzicht resultaten literatuur [27]

<i>Pastagehalte</i>	<i>Luchtgehalte</i>
29,1	3,2
29	5,71
28,7	7,63

Uit deze resultaten mag niet zonder meer besloten worden dat er een omgekeerd evenredig verband bestaat tussen het pastagehalte en het luchtgehalte, daar het luchtgehalte van meer afhankelijk is dan van het pastagehalte alleen. In vergelijking met deze resultaten presteert de in deze thesis gebruikte traditionele beton, met gelijkaardige pastagehalte, vrij goed.

10 Vacuümverzadiging

Het wateropslorpend vermogen van een betonnen proefstuk is een interessant gegeven, daar het, naast het in kaart brengen van een bepaald gamma aan poriën, ook weergeeft hoe snel en hoe veel water zal opgeslorpt worden wanneer het beton in een natte en mogelijks agressieve omgeving gebruikt wordt. Indien veel water wordt opgenomen, betekent dit in extensio ook dat het risico bestaat dat veel schadelijke stoffen worden opgenomen. Twee procedures werden gevolgd om het wateropslorpend vermogen te bepalen, en meten aldus de open porositeit.

10.1 Methode 1, volgens NBN B24-213

10.1.1 Testprocedure

In eerste instantie wordt het wateropslorpend vermogen bepaald volgens NBN B24-213 (SB06). Deze proef wordt uitgevoerd met proefstukken afkomstig uit reeks 3. Telkens een weging wordt uitgevoerd, gebeurt dit op een weegschaal met meetfout 0,1 gram. De proefstukken doorlopen volgend parcours na storten, in overeenstemming met de norm:

- Bewaring gedurende 28 dagen in een natte kamer, bij $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ en $90 \pm 5\%$ relatieve vochtigheid. Enkel de proefstukken van 1UHPC3 worden eerst onderworpen aan een warmtebehandeling van 48 uur in een warmwaterbad bij 90°C .
- De proefstukken worden gedroogd bij $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, tot constante massa. Deze constante massa wordt bereikt wanneer bij twee opeenvolgende metingen, uitgevoerd met een tussentijd van minstens 24 uur, een massavermindering van minder dan 0,1 % van het proefstuk wordt geregistreerd. In dit geval werd dit bereikt na 5 dagen. Deze massa wordt bijgehouden.
- De proefstukken worden in een drukvat geplaatst en het drukvat wordt vacuüm gezogen.
- Na $2,5 \text{ uur} \pm 15 \text{ min}$ wordt het water in het drukvat gelaten, terwijl de vacuümtoestand gehandhaafd blijft, derwijze dat het waterniveau maximaal 5 cm/uur stijgt.
- Vervolgens wordt de luchtdruk hersteld naar de atmosferedruk, maar blijven de proefstukken nog 24 ± 2 uur in het water ondergedompeld.
- De wegingsprocedure verloopt vervolgens als volgt.
 - De proefstukken worden in suspensie gewogen.
 - De proefstukken worden oppervlaktegedroogd en opnieuw gewogen.

Aan de hand van de drie verkregen massa's wordt vervolgens de waterporositeit bepaald aan de hand van volgende formule:

$$P = \frac{m_{od} - m_d}{m_{od} - m_{susp}} \cdot 100$$

met:

- m_{od} : oppervlaktegedroogde massa
- m_d : oven gedroogde massa
- m_{susp} : in suspensie gewogen massa

10.1.2 Resultaten

Per betonsoort werden telkens drie proefstukken beproefd. Zodoende kan er per betonsoort een gemiddelde porositeit en standaarddeviatie bepaald worden. De resultaten worden samenvattend voorgesteld in Tabel 13.

Tabel 13: Overzicht resultaten Methode 1

	P [%]	St. Dev.	P Lit. [%]
UHPC	0,55	0,01	
HPC	1,59	0,08	5-6
RPC	1,48	0,05	
TC	11,72	0,26	12-16

Een opvallende trend in de resultaten is dat de variatie op de porositeit toeneemt met de porositeit zelf. Hoe groter de gemiddelde porositeit, hoe groter de variatie tussen de verschillende proefstukken.

In Tabel 13 zijn eveneens waarden uit [3], [28] en [29] opgenomen ter vergelijking. Hierin werd namelijk dezelfde proef uitgevoerd, en werd de porositeit met dezelfde formule berekend. De prestatie van het traditioneel beton ligt dicht bij de ondergrens van het interval dat in de literatuur wordt aangehaald, de (ultra) hogesterktebetonmengsels presteren beduidend beter dan deze in de literatuur. Nochtans betreft het betonmengsels met een vergelijkbare druksterkte, tussen 140 en 160 MPa. Een mogelijke verklaring is terug te vinden in het verschil in W/C-factor. De betonmengsels die gebruikt werden in de aangehaalde literatuur hebben een W/C-factor van om en bij 0,23 en een W/B-factor van 0,20 (W/B: water/binder, waarbij binder = cement + silica fume). Dit is enigszins meer dan de verhoudingen in de in deze thesis gebruikte betonmengsels (W/C = 0,23 en W/B = 0,18).

10.2 Methode 2, volgens NBN B15-215

10.2.1 Testprocedure

De beproevingsprocedure beschreven onder *Methode 1* roept enigszins vragen op. Het feit dat de proefstukken eerst worden gedroogd in de oven, bij een temperatuur die de 100°C overschrijdt, kan mogelijks een invloed hebben op de microstructuur. Hierdoor ontstaat een vertekend beeld van de porositeitseigenschappen van het beton, die pas achteraf, na het drogen, worden bepaald.

Om de resultaten die verkregen zijn aan de hand van *Methode 1* te valideren, en om de eventuele invloed van het drogen op hoge temperatuur te onderzoeken, is het interessant om de volgorde om te keren. Het wateropslopend vermogen wordt daarom

nogmaals bepaald, nu volgens NBN B15-215. Deze proef wordt uitgevoerd met proefstukken afkomstig uit reeks 1.

Deze proef wordt niet geheel uitgevoerd in overeenstemming met de norm. De norm schrijft onderdompeling voor tot constante massa, waarbij hetzelfde criterium geldt voor het begrip “constante massa” als bij drogen. Om de resultaten van beide methoden te kunnen vergelijken wordt echter gekozen om de wateropslorping door de proefstukken bij deze proef ook vacuüm te laten verlopen. De wateropslorping onder vacuüm gebeurt volgens dezelfde richtlijnen als deze beschreven in NBN B24-213 (SB06). Telkens een weging wordt uitgevoerd, gebeurt dit op een weegschaal met meetfout 0,1 gram.

De proefstukken doorlopen volgend parcours na storten:

- Bewaring gedurende 28 dagen in een natte kamer, bij $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ en $90 \pm 5\%$ relatieve vochtigheid. Enkel de proefstukken van 1UHPC1 worden eerst onderworpen aan een warmtebehandeling van 48 uur in een warmwaterbad bij 90°C .
- De proefstukken worden in een drukvat geplaatst en het drukvat wordt vacuüm gezogen. Dit is niet in overeenstemming met de norm, waar opslorping tot constante massa wordt voorgeschreven.
- Na $2,5 \text{ uur} \pm 15 \text{ min}$ wordt het water in het drukvat gelaten, terwijl de vacuümtoestand gehandhaafd blijft, derwijze dat het waterniveau maximaal 5 cm/uur stijgt.
- Vervolgens wordt de luchtdruk hersteld naar de atmosferedruk, maar blijven de proefstukken nog 24 ± 2 uur in het water ondergedompeld.
- De proefstukken worden oppervlaktegedroogd en gewogen.
- De proefstukken worden tenslotte gedroogd bij $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, tot constante massa. Deze constante massa wordt bereikt wanneer bij twee opeenvolgende metingen, uitgevoerd met een tussentijd van minstens 24 uur, een massavermindering van minder dan 0,1 % van het proefstuk wordt geregistreerd.

Het drogen duurt bij deze proefstukken langer dan bij *Methode 1*. De proefstukken uit UHPC, HPC en RPC worden als droog beschouwd na een week, de proefstukken uit TC zijn pas droog na 10 dagen. Dit is te verklaren door het feit dat er meer water aanwezig is in de proefstukken die gedroogd worden nadat ze de wateropslorplingsprocedure hebben meegemaakt, dan in de proefstukken die gedroogd worden rechtstreeks nadat ze uit de natte kast worden gehaald.

Het wateropslorpend vermogen wordt bepaald als volgt:

$$W = \frac{M_{\text{verz}} - M_{\text{droog}}}{M_{\text{droog}}} \cdot 100$$

met:

- M_{verz} : Verzadigde massa van het proefstuk
- M_{droog} : Constante massa na drogen in de oven

10.2.2 Resultaten

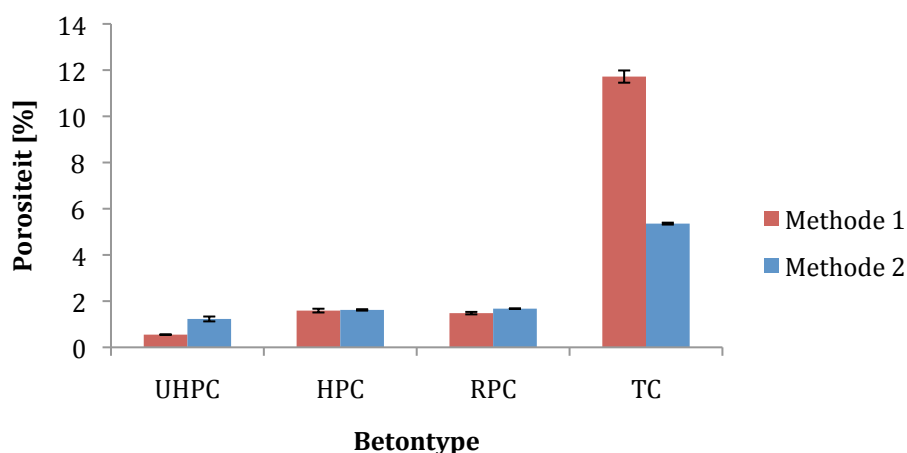
Per betonsoort werden opnieuw telkens drie proefstukken beproefd. Zodoende kan er per betonsoort een gemiddelde porositeit en standaarddeviatie bepaald worden. De resultaten worden samenvattend voorgesteld in Tabel 14. In de laatste kolom worden de resultaten die bekomen waren met *Methode 1* nog eens in herinnering gebracht.

Tabel 14: Overzicht resultaten Methode 2

	<i>P [%]</i>	<i>St. Dev.</i>	<i>Methode 1</i>
UHPC	1,23	0,03	0,55
HPC	1,62	0,11	1,59
RPC	1,67	0,01	1,48
TC	5,36	0,04	11,72

Visueel uitzetten van deze resultaten maakt de vergelijking iets eenvoudiger (zie Afbeelding 62). De foutbalken zijn meegenomen in de visualisatie. Deze zijn bepaald op basis van de standaardafwijking. Het verschil in porositeit tussen beide methoden is verwaarloosbaar voor de HPC en RPC. Doch ziet men een verschil met factor 2-3 voor UHPC, en een factor ± 2 voor TC. Bij TC heeft de warmtebehandeling een nefaste invloed. Het beton heeft niet voldoende sterkte, zodat er door de thermische schok scheurvorming optreedt en de interconnectiviteit van de poriën toeneemt. Hierdoor neemt het wateropslopend vermogen toe, daar meer poriën toegankelijk zijn voor het water, eens het proefstuk vacuüm wordt gezogen. De porositeit op zich neemt echter niet toe, aangezien er tijdens de thermische behandeling geen materie verdwijnt of porositeit wordt gecreëerd. Deze verklaring is echter puur hypothetisch en verder (microscopisch) onderzoek van de microstructuur zou het verschil in deze resultaten kunnen uitklaren. Het verschil tussen beide methoden bij UHPC is van die grootteorde dat deze gewoon te verklaren valt door de verschillende productiereeks.

Porositeit volgens twee methodes



Afbeelding 62: Vergelijking resultaten beide toegepaste methodes

11 Kwikporosimetrie

11.1 Proefstukken

Om kwikporosimetrie toe te passen op beton zijn slechts kleine proefstukken nodig. Deze worden verkregen uit cilinders, geboord uit de betonwielen van de TAP-opstelling. De boringen worden uitgevoerd tegen de kern van het proefstuk, zodanig dat deze ingreep geen invloed heeft op de TAP-proefstukken, of dat de proefstukken voor de kwikporosimetrie geen invloed hebben ondervonden van de zuuraantasting. De boringen worden uitgevoerd met een boor van 25 mm, tot een diepte van 50 mm. Zodoende kan materiaal uit het binnenste van de TAP-wielen aangewend worden. Aan de hand van hamer en beitels worden kleine brokstukken gekapt van de uitgeboorde cilinders. Deze brokstukken dienen maximale afmetingen te hebben van ± 5 mm, om in het proefbuisje te passen van de testapparatuur. Kleinere afmetingen leveren minder accurate resultaten.

Na de proefstukken ondergedompeld te hebben in vloeibare stikstof gedurende 5 min, worden de proefstukken gedurende drie weken in vacuümomgeving gevriesdroogd. Bij het afkoelen van de proefstukken in vloeibare stikstof, bij -196°C , worden ijskristallen gevormd op basis van het vocht in de proefstukken. Door deze vervolgens in de vacuümomgeving van de vriesdroger te bewaren, weliswaar nog steeds bij een negatieve temperatuur, sublimeert het ijs zonder via een vloeibaar stadium te passeren, door de thermische schok die de proefstukken ondergaan.

11.2 MIP-analyse

De kwikporosimetrie of MIP-analyse (Engels: *Mercury Intrusion Porosimetry*), alsook de voorbereiding van de proefstukken, wordt uitgevoerd in overeenstemming met de methode toegepast in [30]. Voor de MIP-analyse worden toestellen Pascal Series 140 en Series 440 gebruikt van het merk Thermo Scientific, zie Afbeelding 63.



Afbeelding 63: Apparatuur voor MIP-analyse

Het werkingsprincipe van kwikporosimetrie is als volgt:

- Het recipiënt waar de proefstukken in bevat zijn wordt vacuüm getrokken, en er wordt kwik in het recipiënt ingelaten, totdat de proefstukken volledig door kwik omgeven zijn.
- De druk op het kwik wordt stapsgewijs opgedreven, zodat het kwik in de poriën wordt gedreven. Naarmate de druk wordt opgedreven worden steeds kleinere poriën gevuld.

Op basis van het totaal volume ingedrongen kwik kan een totale porositeit (binnen het bereik van de proef) worden berekend van de geteste proefstukken. Bovendien kan op basis van de ingedrongen hoeveelheid kwik bij elke drukverhoging ook een poriëndistributie opgesteld worden.

11.3 Resultaten

Uit de resultaten die met de MIP-analyse worden verkregen kan opnieuw een porositeitsgehalte berekend worden. Deze worden voor de verschillende betontypes samengevat in Tabel 15. Zoals verwacht kan worden heeft het traditioneel beton 4TC1 een aanzienlijk hogere porositeit.

Tabel 15: Overzicht resultaten porositeitsonderzoek

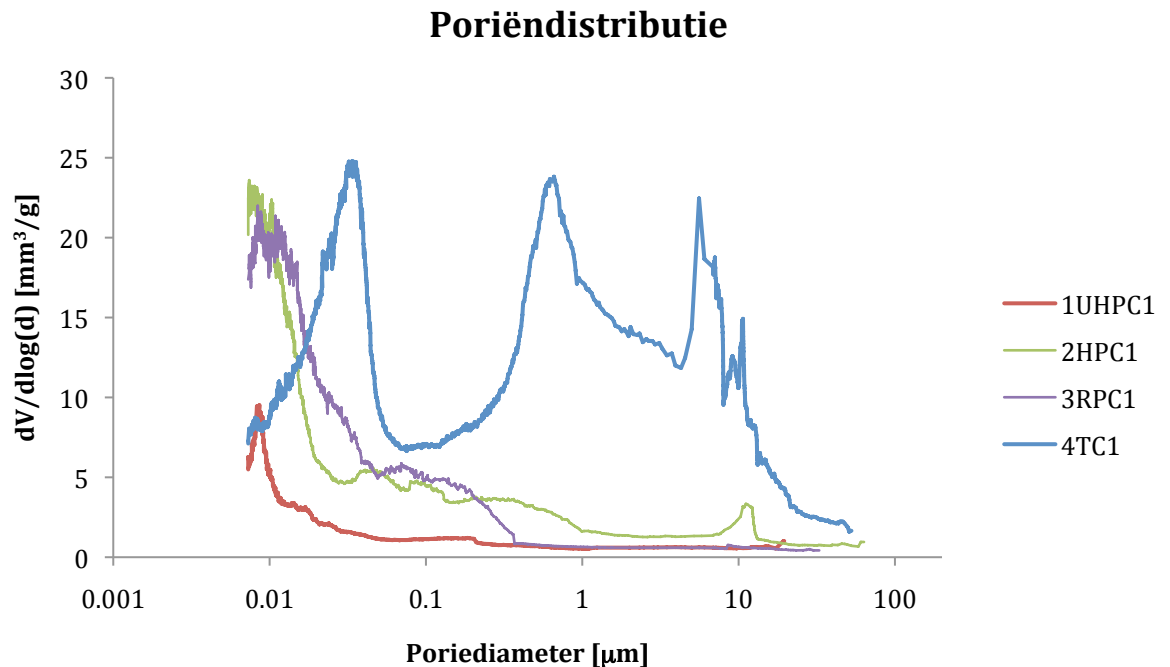
<i>Betontype</i>	<i>Porositeit (MIP) [%]</i>	<i>MIP-Resultaten uit [9] [%]</i>
1UHPC1	1,89	6,0
2HPC1	3,98	8,3
3RPC	4,00	2
4TC1	10,41	15

Op Afbeelding 64 worden, ter vergelijking van de verschillende betontypes, de verschillende poriëndistributies voorgesteld. Deze worden typisch uitgezet op een logaritmische schaal, teneinde de kleinste fractie poriën op een overzichtelijke manier te kunnen voorstellen.

De eerste vaststelling die kan gemaakt worden is dat de porositeit van het traditioneel beton 4TC1 ook visueel duidelijk groter is dan bij de drie andere betontypes. De poriën zijn niet alleen groter, de pieken zijn ook hoger dan deze bij de andere betontypes. Net zoals in paragraaf 1.4.2 van de literatuurstudie van deze thesis, ziet men bij traditioneel zowel de piek van gelporiën, als die van capillaire poriën. Vooral bij de poriën met afmetingen tussen 0,1 en 10 μm (de capillaire poriën) vertoont het traditioneel beton een groot volume poriën, daar waar de drie andere betontypes zo goed als geen porositeit vertonen.

Ultra hogesterktebeton (1UHPC1) en kwartszandbeton (3RPC1) vertonen beiden een bijzonder lage porositeit boven een poriediameter van 0,8 μm , of dus een zeer lage hoeveelheid capillaire poriën. Het RPC-mengsel vertoont vervolgens wel sterker toenemende porositeit met afnemende poriediameter. Op de grafiek is duidelijk te zien dat UHPC veruit het best presteert op vlak van capillaire porositeit. Dit is te danken aan

de warmtebehandeling, die ervoor gezorgd heeft dat de silica fume nagenoeg volledig heeft gereageerd met water met de vorming van CSH en CH tot gevolg. Dit zorgt voor de opvulling van de capillaire poriën, wat terug te vinden is in Afbeelding 64. De porositeit van de hogesterktebeton (2HPC1) leunt aan bij deze van de kwartszandbeton.



Afbeelding 64: Poriëndistributies voor de verschillende betontypes

In [9] worden enigszins andere resultaten bekomen bij een MIP-analyse van HPC, UHPC en RPC. De veel lagere liggende totale porositeit van het RPC-mengsel (gehalveerd ten opzichte van 4TC1) kan mogelijks verklaard worden aan de hand van de veel hogere sterkte van het beton (487 MPa op 28 dagen). Op deze proefstukken werd een mechanische nabehandeling toegepast, met als voornaamste gevolg dat de capillaire poriën worden samengedrukt. Het is dan ook logisch dat resultaten beter zijn dan die behaald in dit werk. De betere resultaten van HPC en UHPC uit dit werk, zijn mogelijk te verklaren door het mixen van het beton onder vacuüm.

12 Vergelijking verschillende porositeitsonderzoeken

Bij het vergelijken van de resultaten van de verschillende toegepaste technieken om de porositeit te bepalen, krijgt men volgende vaststellingen maken.

Tabel 16: Overzicht verschillende porositeitsonderzoeken

<i>Betontype</i>	<i>Porositeit (MIP) [%]</i>	<i>Wateropslorping methode 1 [%]</i>	<i>Wateropslorping methode 2 [%]</i>
1UHPC1	1,89	0,55	1,23
2HPC1	3,98	1,59	1,62
3RPC	4,00	1,48	1,67
4TC1	10,41	11,72	5,36

- De porositeit voor UHPC, HPC en RPC is telkens (beduidend) groter wanneer het a.h.v. kwikporosimetrie bepaald is (MIP), dan wanneer het door wateropslorping bepaald is. Dit is eenvoudig te verklaren als volgt: het bereik van de bepaling van porositeit door wateropslorping gaat slechts tot 100 nm (0,1 μm). Op de poriëndistributie die aangeleverd wordt door de MIP-analyse ziet men dat de porositeit pas rond die grens aanzienlijk begint toe te nemen. Het mag dan ook niet verbazen dat het toegenomen bereik van de MIP-techniek aanzienlijk bijdraagt tot de toegenomen porositeitswaarde.
- Vergelijking van de resultaten van het traditioneel beton vraagt bijzondere aandacht. Beweren dat de resultaten van de MIP en de wateropslorping volgens *Methode 1* dicht bij elkaar leunen is verleidelijk, doch niet correct. Er wordt dan namelijk intact beton vergeleken met beton waarin scheurvorming is opgetreden door de bewaring in de oven voor het bepalen van de wateropslorping. Juister is om de resultaten van de MIP en de wateropslorping volgens *Methode 2* te vergelijken, daar men dan twee soorten proefstukken vergelijkt met een vergelijkbare microstructuur. De grotere waarde van de porositeit volgens de MIP is eenvoudig te verklaren door het groter meetbereik van de MIP, waarbij in het bijzonder de lage fractie wordt me in beschouwing genomen, die erg belangrijk is bij TC.

Hieruit kan besloten worden dat de MIP bijzonder geschikt is om de porositeit te bepalen van (U)HPC en RPC, eerder dan door het wateropslorpend vermogen te bepalen. De proeven ter bepalen van het wateropslorpend vermogen hebben desalniettemin zeker een waarde, zeker in het kader van duurzaamheidsaspecten.

13 Algemene conclusies

Bij het einde van deze experimentele thesis kan een poging ondernomen worden de verzamelde data en bevindingen samen te vatten in een paar krachtige samenvattende stellingen.

1. Dat ultra hogesterktebeton (UHPC), kwartszandbeton (RPC), en in zekere mate ook hogesterktebeton (HPC) meer te bieden hebben dan enkel een hogere sterkte staat buiten kijf. Doorheen deze thesis zijn voldoende buitengewone resultaten geboekt, om te kunnen stellen dat UHPC, RPC en HPC, omwille van hun lage porositeit, lage interconnectiviteit en lage permeabiliteit meer dan traditioneel beton bestand zijn tegen chemische aantasting van buitenaf.
2. De behaalde resultaten, zowel op vlak van porositeit als van luchtgehalte, als op vlak van duurzaamheid, liggen in de lijn met de resultaten die eerder werden geboekt met UHPC, of zijn beter tot veel beter dan de resultaten die werden behaald met dezelfde of gelijkaardige proeven voor traditioneel beton. Dit valideert enerzijds de eerder behaalde resultaten, en bevestigt anderzijds ook de waarde van het geteste materiaal.
3. Anderzijds is men ook verplicht vast te stellen dat sommige beproevingstechnieken onder hun huidige vorm of opvatting tegen hun limiet aanzitten, wanneer ze aangesproken worden om uiterst performante betontypes te testen. Deze methodes zijn daarom niet onbruikbaar, maar vergen misschien enige aanpassing, zodanig dat men ook bij een (zeer) lage gevoeligheid of respons van de materialen toch heldere resultaten kan verkrijgen. Het verbeteren van de proefmethodes dient niet noodzakelijk te gebeuren door het langer laten lopen van de proef, of het verhogen van de concentraties aan schadelijke stoffen. Mogelijks brengt dit reeds een eerste soelaas, maar men mag niet terugdeinzen ook meer creatieve, *out of the box* maatregelen uit te proberen, waardoor de aantasting sneller gebeurt of uitvergroot wordt.
4. Indien per type aantasting kort wordt gerecapituleerd, kunnen volgende besluiten gevormd worden.
 - Op vlak van zuuraantasting, waarbij in het bijzonder zwavelzuur wordt beschouwd, kan men besluiten dat de geteste betonmengsels bijzonder goed presteren. Ondanks een aantastingsperiode die 20 weken werd aangehouden, vertonen de proefstukken weinig materiaalverlies. Een toename van de oppervlakteruwheid is het enig visueel waarneembare bewijs van enige schade, en dan nog is deze uitermate beperkt voor UHPC. Vooral HPC en TC blijken gevoeliger voor oppervlakteverruwing. Bij TC wordt vastgesteld dat de granulaten bloot komen te liggen. In geval van zuurgevoelige granulaten, zoals kalkhoudende granulaten, kan dit het begin zijn van ernstige tot desastreuze schade. Bij RPC wordt een lamellair falen van het beton vastgesteld, waarbij de buitenste betonlaag de neiging vertoont los te komen van het proefstuk.

De diameterwijziging van de proefstukken blijkt moeilijk op te meten met lasermetingen. De diameterwijziging ten gevolge van zwellen en borstelen van de proefstukken lijken mekaar in redelijk evenwicht te houden, zodat trends moeilijk waarneembaar zijn.

Een mogelijke verbetering van de onderzoeksmethode met betrekking tot zuuraantasting is het beter reinigen van de proefstukken. Door loskomende deeltjes intensiever van het proefstuk te verwijderen, door spoelen of met perslucht, kunnen mogelijks meer accurate metingen worden uitgevoerd. Het proefstuk wordt er ook zwakker en poreuzer door, wat mogelijks de aantasting zal bevorderen. De verwerking van de data kan mogelijk ook worden verbeterd, door verder te bouwen de reeds geschreven scripts. Een interessante onderzoekspiste kan mogelijk zijn om te onderzoeken hoe een UHPC van uitstekende sterktekwiteit zich gedraagt in een zure omgeving wanneer zuurgevoelige granulaten bloot komen te liggen aan de oppervlakte.

- Op vlak van chloride-indringing blijken zowel UHPC, HPC als RPC zeer goed te presteren, van bij jonge leeftijd (28 dagen). Na 91 dagen lijkt geen indringing waarneembaar ten gevolge van een RCM-test. In het bijzonder in deze proef lijkt een bijsturing van de proef op zijn plaats. Traditioneel beton presteert op jonge leeftijd beduidend minder goed dan de andere geteste betontypes. Op latere leeftijd wordt echter een inhaalbeweging vastgesteld, zodat traditioneel beton (weliswaar van goede kwaliteit, onder andere door een goede keuze van het cement) op latere leeftijd ook zeker goede resultaten neerlegt ten aanzien van chloride-aantasting.

Het langer laten lopen van de RCM-proeven of het verhogen van de aangebrachte spanningen over de proefstukken brengt mogelijk geen oplossing voor het opdrijven van de capaciteit van de RCM-proef voor resistente betontypes. Een interessante piste kan mogelijks zijn om beschadigde en versleten materialen van uitzonderlijke kwaliteit te onderzoeken. Wat gebeurt er als beschadigde of versleten materiaal in de weginfrastructuur wordt aangetast met dooizouten, ook al beschikt het materiaal in nieuwe staat een uitstekende weerstand tegen chloriden?

- Op vlak van sulfaataantasting wordt geen of amper (uitgestelde) ettringietvorming vastgesteld ten gevolge van sulfaataantasting. De XRD-spectra van de proefstukken verraden wel de aanwezigheid van enig ettringiet in de proefstukken, doch deze wordt ook waargenomen bij de referentieproefstukken die in Ca(OH)_2 worden bewaard. Deze ettringiet dient dus toegeschreven te worden aan het hydratatieproces van het cement, en niet aan de aantasting van het beton.

Aangezien in sommige delen van de wereld (China, Canada) veel hogere waarden worden vastgesteld voor sulfaatconcentraties in een

natuurlijke omgeving (mogelijks wel te wijten aan menselijke activiteit, maar waar het beton wel degelijk in gebruikstoestand kan geconfronteerd worden), lijkt het niet zo ver gezocht om ultra performant beton te onderwerpen aan aantastingsproeven van een aanzienlijk hoger kaliber dan nu gangbaar is in West-Europa. De praktische relevantie van strengere aantastingsproeven is in eerste instantie beperkt, doch het laat mogelijks toe de schadefenomenen uit te vergroten en beter te begrijpen. Er moet enkel op toegezien worden dat geen andere schademechanismen in gang treden bij andere randvoorwaarden.

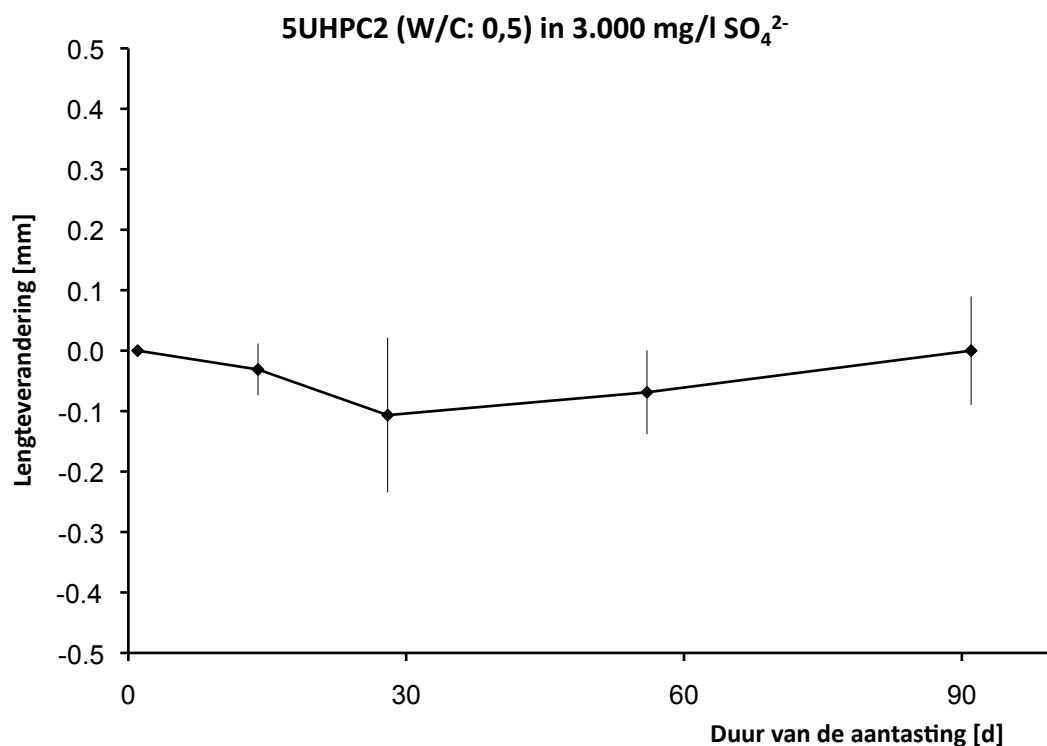
- De porositeitsproeven lijken in staat goede resultaten op te leveren voor (ultra) hogesterktebeton, net als ze doen voor traditioneel beton.

Samenvattend kan gesteld worden dat ultra hogesterktebeton uitstekend presteert in agressieve omgevingen. Er wordt weinig schade vastgesteld, wat zich vertaalt in een laag materiaalverlies. Mogelijks is echter niet alle schade zichtbaar voor het blote oog. Het uitvoeren van bijkomende proeven op aangetast materiaal kan daarom nuttige bijkomende informatie opleveren. Door sterkteproeven uit te voeren op proefstukken die aangetast zijn door zuur- of sulfaatoplossingen, kan nagegaan worden of de residuele sterkte na een min of meer lange aantastingsperiode nog toereikend is om een structurele rol te vervullen.

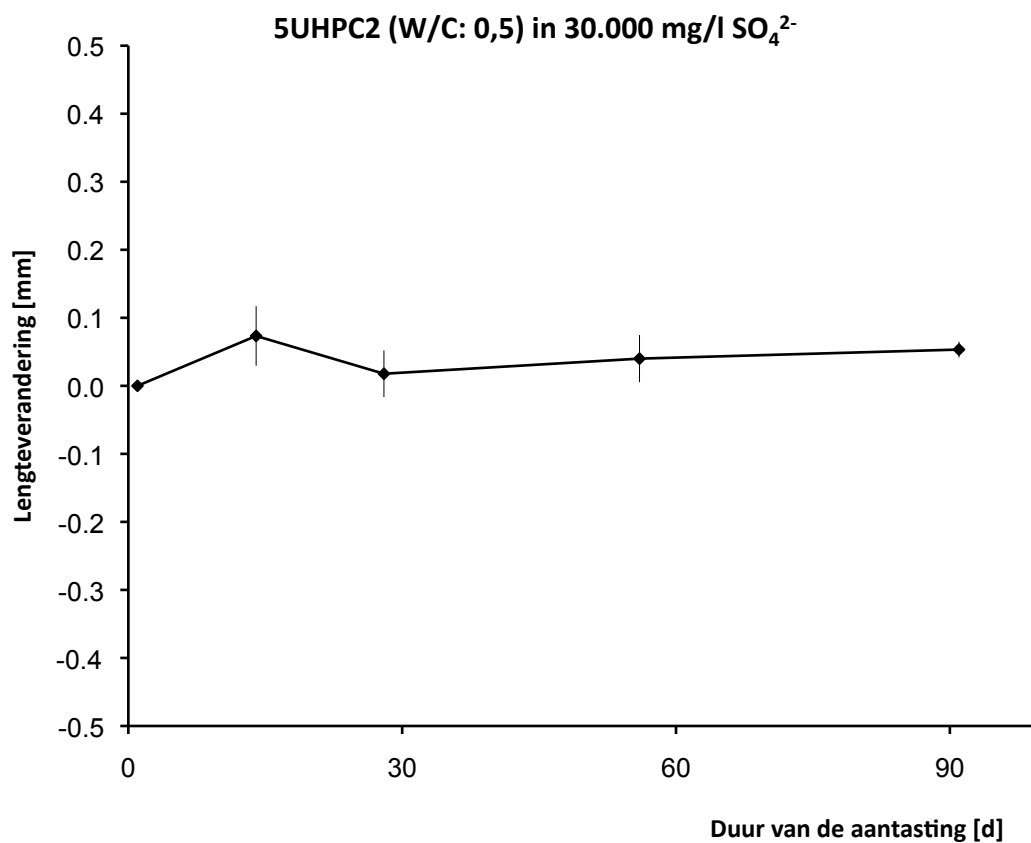
Het gebruik van UHPC in industriële, mariene, of in chemisch verontreinigde omstandigheden lijkt op eerste zicht aangemoedigd te kunnen worden. Verder onderzoek, al dan niet met aangepaste beproevingsmethoden zal moeten uitwijzen of dit materiaal het traditioneel beton zal verdringen, eens het voldoende kwalitatief en goedkoop kan geproduceerd worden op grote schaal.

DEEL 3: BIJLAGEN

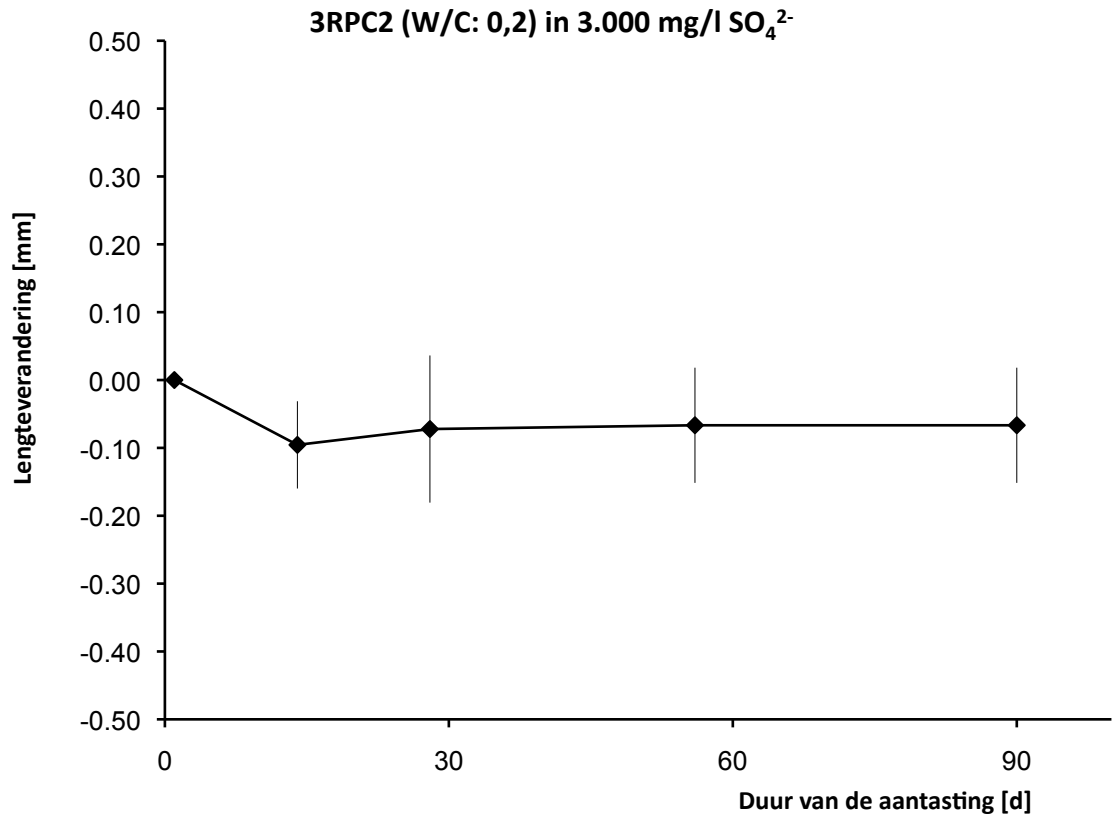
Bijlage A: Grafieken lengteverandering (sulfaataantasting)



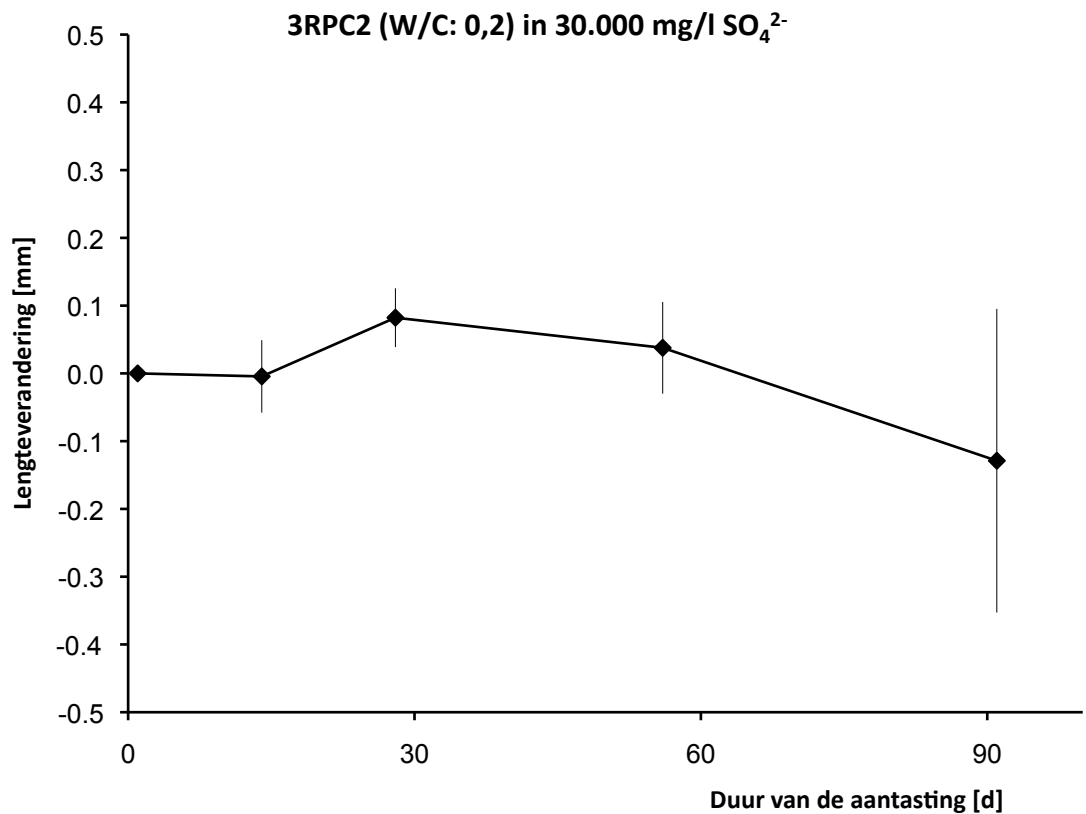
Afbeelding 65: Gemiddelde lengteverandering van de proefstukken van het betontype 5UHPC2, te wijten aan de sulfaataantasting in een sulfaatoplossing van 3000 mg/l



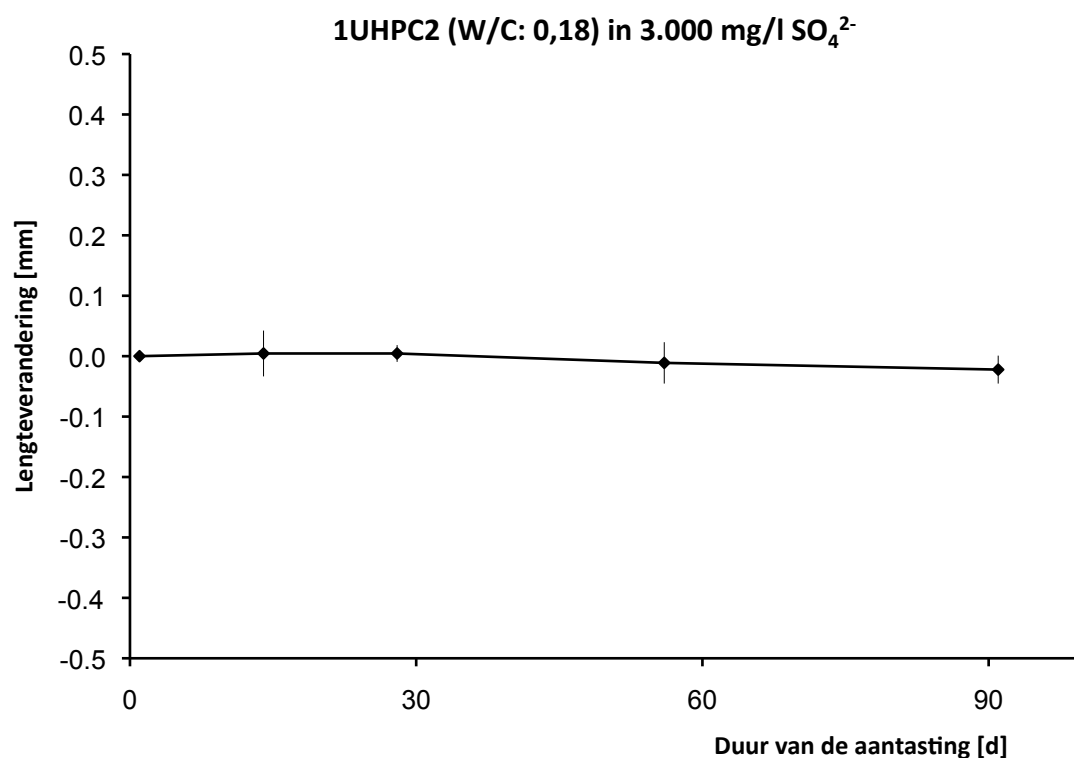
Afbeelding 66: Gemiddelde lengteverandering van de proefstukken van het betontype 5UHPC2, te wijten aan de sulfaataantasting in een sulfaatoplossing van 30.000 mg/l



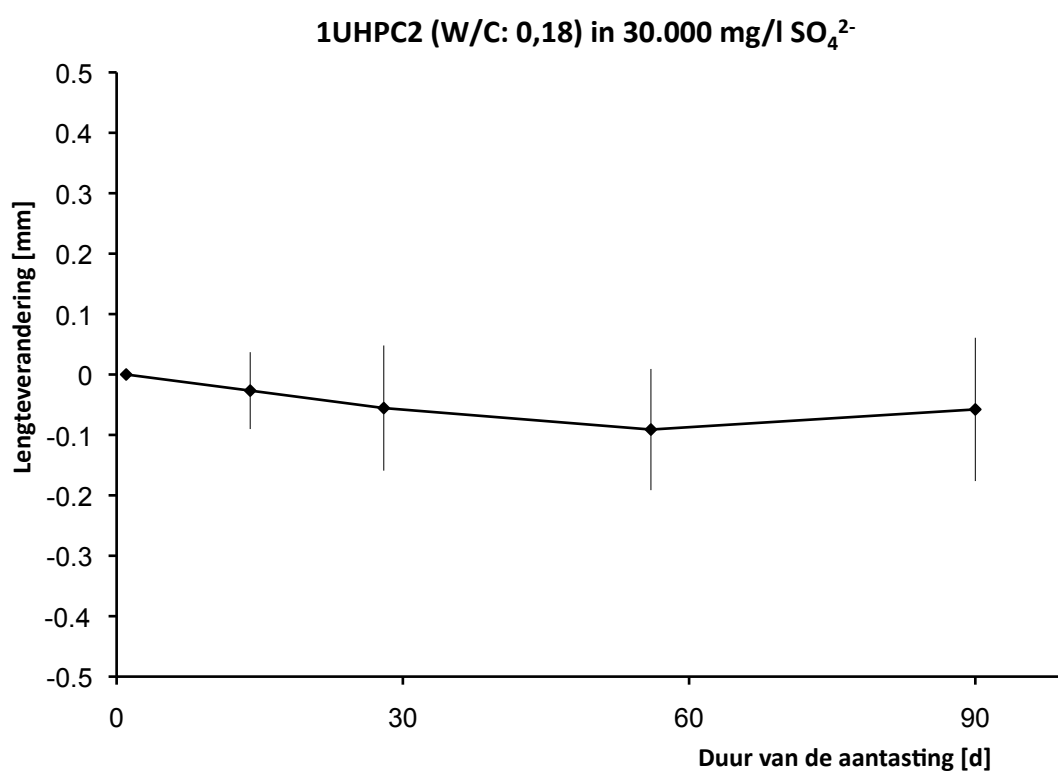
Afbeelding 67: Gemiddelde lengteverandering van de proefstukken van het betontype 3RPC2, te wijten aan de sulfaataantasting in een sulfaatoplossing van 3000 mg/l



Afbeelding 68: Gemiddelde lengteverandering van de proefstukken van het betontype 5UHPC2, te wijten aan de sulfaataantasting in een sulfaatoplossing van 30.000 mg/l



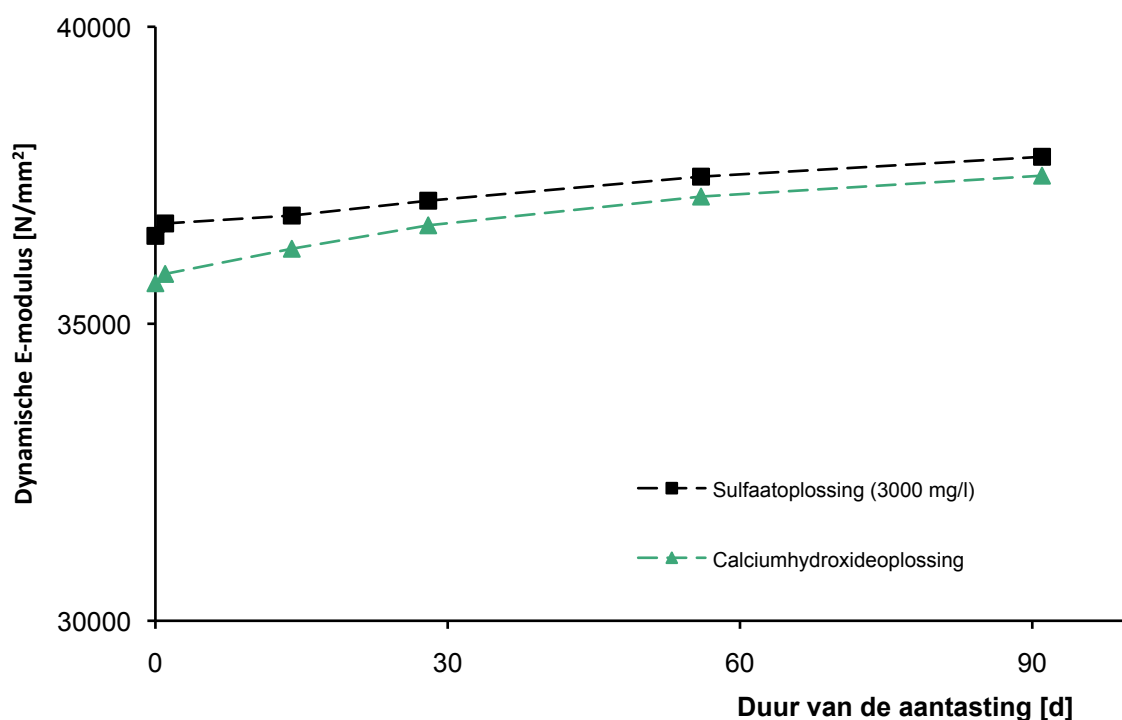
Afbeelding 69: Gemiddelde lengteverandering van de proefstukken van het betontype 1UHPC2, te wijten aan de sulfaataantasting in een sulfaatoplossing van 3000 mg/l



Afbeelding 70: Gemiddelde lengteverandering van de proefstukken van het betontype 1UHPC2, te wijten aan de sulfaataantasting in een sulfaatoplossing van 30.000 mg/l

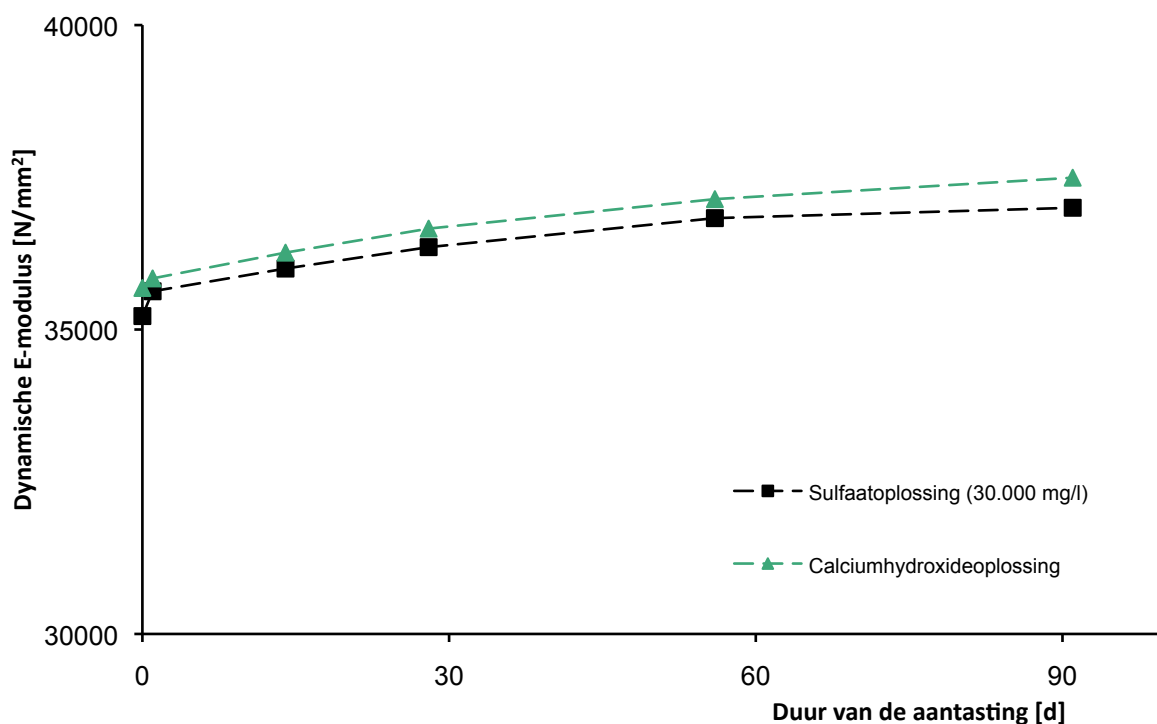
Bijlage B: Grafieken dynamische E-modulus (sulfaataantasting)

5UHPC2 (W/C: 0,5) in 3000 mg/l SO_4^{2-}

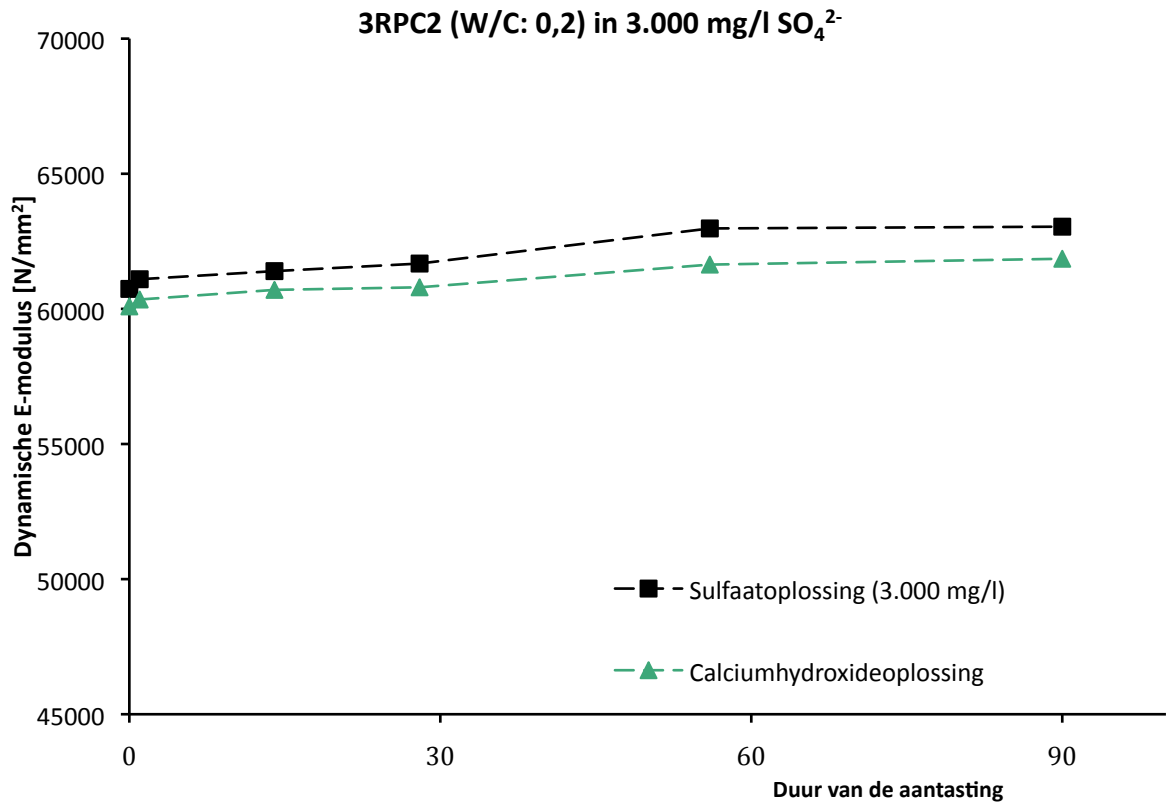


Afbeelding 71: Evolutie van de dynamische E-modulus voor de proefstukken van het type 5UHPC2 in een sulfaatoplossing van 3000 mg/l

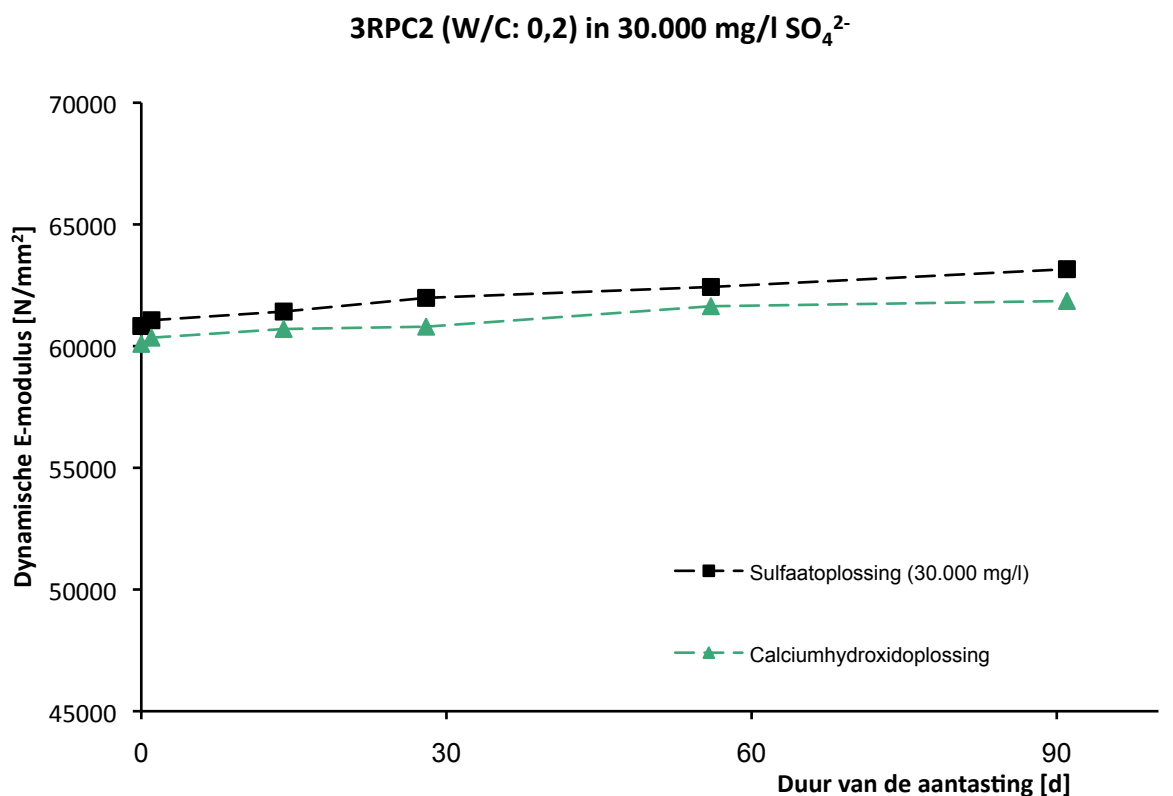
5UHPC2 (W/C: 0,5) in 30.000 mg/l SO_4^{2-}



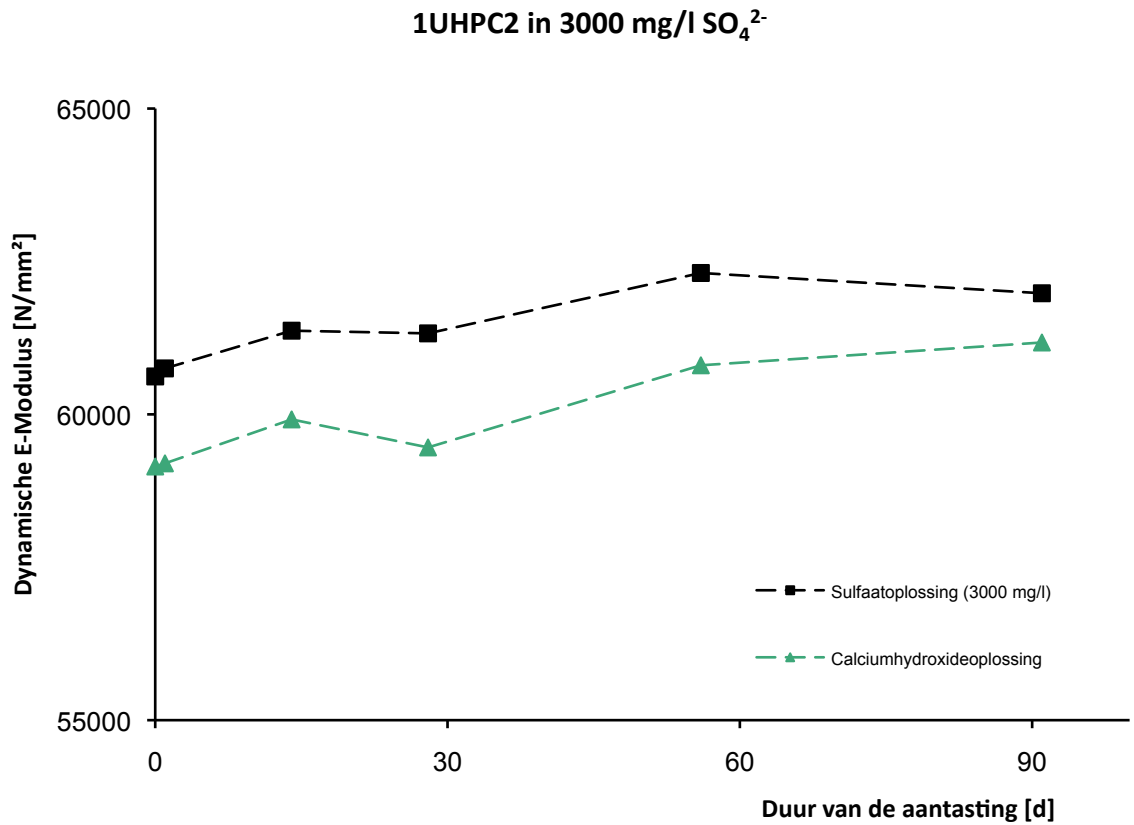
Afbeelding 72: Evolutie van de dynamische E-modulus voor de proefstukken van het type 5UHPC2 in een sulfaatoplossing van 30.000 mg/l



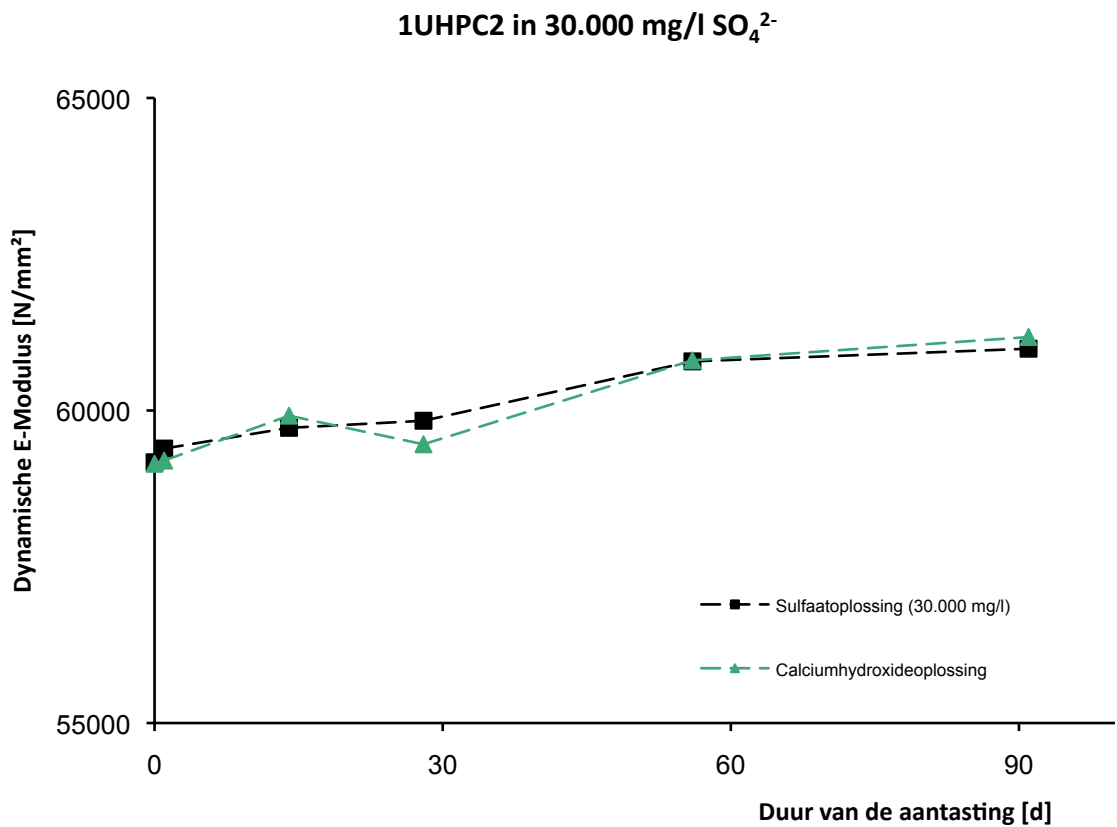
Afbeelding 73: Evolutie van de dynamische E-modulus voor de proefstukken van het type 3RPC2 in een sulfaatoplossing van 3000 mg/l



Afbeelding 74: Evolutie van de dynamische E-modulus voor de proefstukken van het type 3RPC2 in een sulfaatoplossing van 30.000 mg/l

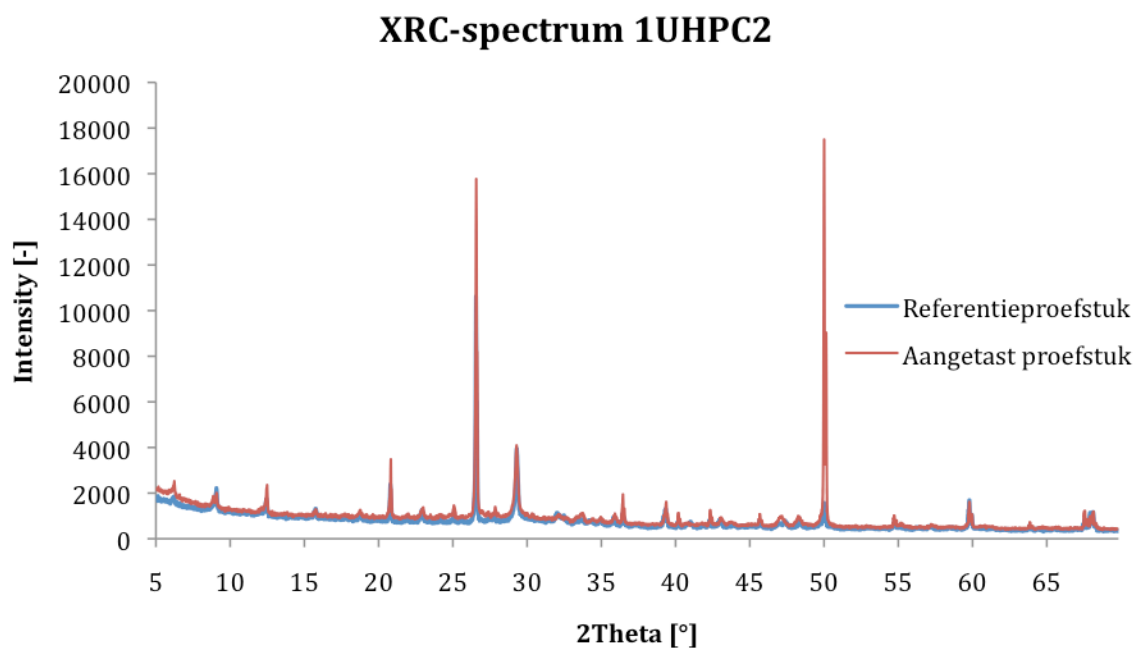


Afbeelding 75: Evolutie van de dynamische E-modulus voor de proefstukken van het type 1UHPC2 in een sulfaatoplossing van 3000 mg/l

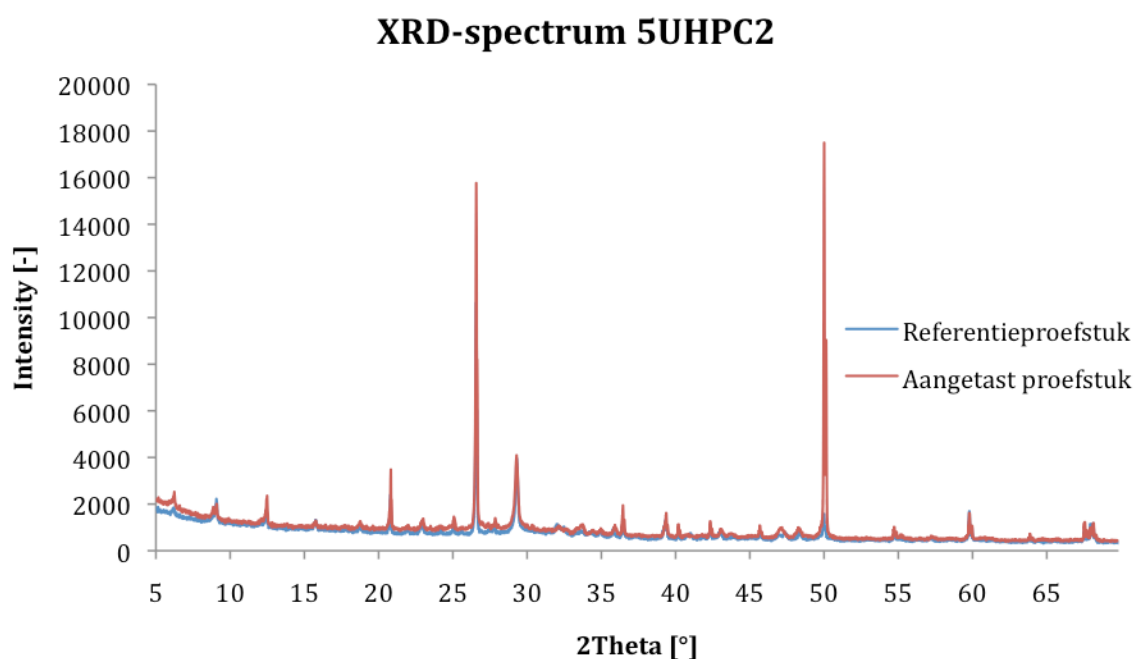


Afbeelding 76: Evolutie van de dynamische E-modulus voor de proefstukken van het type 1UHPC2 in een sulfaatoplossing van 30.000 mg/l

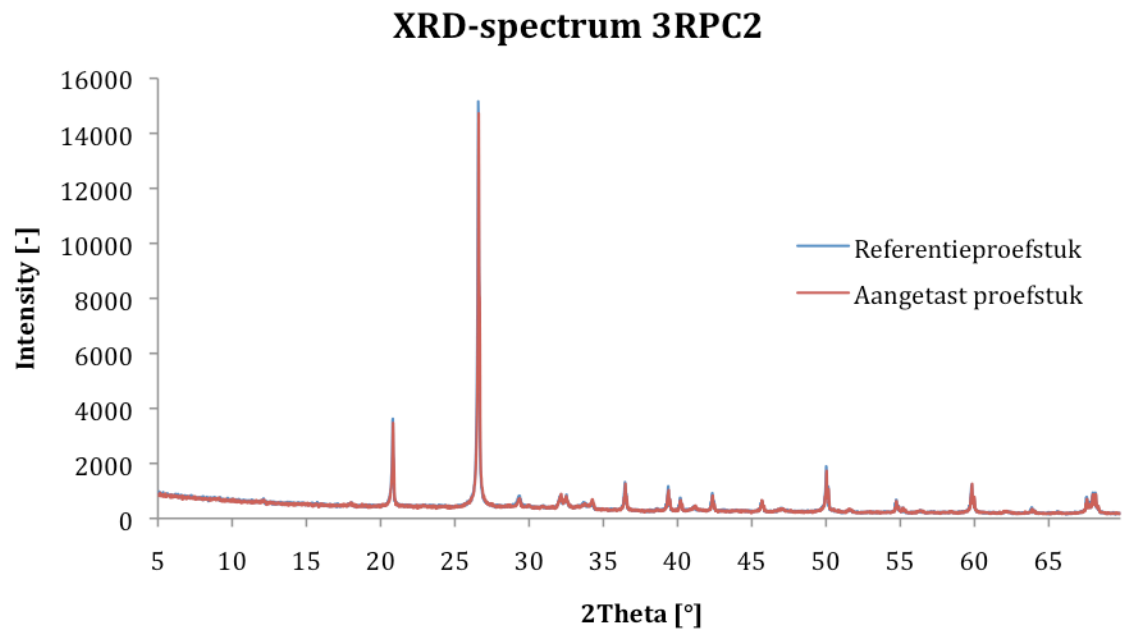
Bijlage C: XRD-spectra (sulfaataantasting)



Afbeelding 77: XRD-spectrum van een 1UHPC2-proefstuk, blootgesteld aan een sulfaatconcentratie van 30.000 mg/l, bij 5°C



Afbeelding 78: XRD-spectrum van een 5UHPC2-proefstuk, blootgesteld aan een sulfaatconcentratie van 30.000 mg/l, bij 5°C



Afbeelding 79: XRD-spectrum van een 3RPC2-proefstuk, blootgesteld aan een sulfaatconcentratie van 30.000 mg/l, bij 5°C

Referenties

- [1], Magureanu, C., Sosa, I., Negrutiu, C., Bogdan Heghes. Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete, *ACI Materials Journal*, 109-M18, 2012, pp177-184
- [2], Graybeal, B., Tanesi, J. Durability of an Ultrahigh-Performance Concrete, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, No. 10, 2007, pp 848-854
- [3], Piérard, J., Dooms, B., Cauberg, N. Durability Evaluation of Different Types of UHPC. In *RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, Marseille, France, 2013
- [4], Franke, L., Deckelmann, G., Schmidt, H. Behaviour of ultra high-performance concrete with respect to chemical attack. In *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 2008, pp 453-460
- [5], Muller, H.S., Haist, M., (1997). New Types of High Performance Concretes. In Fardis, M. N., *Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction* (pp 49-58), Springer
- [6], C. Scheydt, J. C., Müller, H.S., Microstructure of Ultra High Performance Concrete and it's Impact on Durability. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel, Germany, 2012, pp 349 – 356
- [7], De Schutter, G., *Betontechnologie*, Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, 2010
- [8], Cheyrezy, M., Maret, Frouin, L., Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete), *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7., 1995, pp. 1491-1500
- [9], Teichmann, T., Schmidt, M., Influence of the packing density of fine particles on structure, strength and durability of UHPC. In *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 2004, pp 313-323
- [10], Adolphs, J., Schreiber, A., Microstructural Characterisation of Ultra-High Performance Concrete. In *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 2004, pp 265-271
- [11], Vernet, C., UHPC Microstructure and Related Durability Performance Laboratory Assessment and Field Experience Examples. *PCI / FHWA 3rd International Symposium on HPC*, Orlando, USA, 2003
- [12], Pavlik, V.,: Corrosion of hardened cement paste by acetic and nitric acids PART II Formation and chemical composition of the corrosion product layer. *Cem. Concr. Res.*, Vol. 24, 1994, pp 1495-1508

- [13], Gruyaert, E., Van den Heede, P., Maes, M., De Belie, N., Investigation of the influence of blast-furnace slag on the resistance of concrete against organic acid or sulphate attack by means of accelerated degradation tests, *Cem. Concr. Res.*, Vol 42, 2012, pp 173-185
- [14], Thomas, M., Green, B., O'Neal, E., Perry, V., Hayman, S., Hossack, A., Marine Performance of UHPC at Treat Island. 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, Germany, 2012, p. 365-370
- [15], De Belie, N., Monteny, J., Taerwe, L. Apparatus for accelerated degradation testing of concrete specimen, *Materials and Structures*, Vol. 35, 2002, pp 427-433
- [16], Roux, N., Andrade, C., Sanjuan, M.A. Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 8, No. 1, 1996, pp 1-6
- [17], Bellmann, F., Erfurt, W., Ludwig, H.-M., Field performance of concrete exposed to sulphate and low pH conditions from natural and industrial sources. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, 2012, pp 86-93
- [18], Zhanqun Liu (2010), Study of the Basic Mechanisms of Sulfate Attack on Cementitious Materials, Doctoraatsthesis Universiteit Gent, 181p
- [19], Van Tittelboom, K., De Belie, N., A critical review on test methods for evaluating the resistance of concrete against sulfate attack. International RILEM TC211-PAE final conference on Concrete in Aggressive Aqueous Environments: performance, testing and modeling, Toulouse, France, 2009, pp 298-306
- [20], Collepardi, M. Ettringite Formation and Sulfate Attack on Concrete, ACI Special Publication, 2001, 200p
- [21], C. Ferraris, C., Stutzman, P., Peltz, M., Winpigler, J. Developing a more rapid test to assess sulfate resistance of hydraulic cements. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 110, No. 5, 2005, pp 529-540
- [22], Bourgois, T., Vermeersch, D. (2013) Invloed van vacuüm mengen op de vorst-dooi weerstand van cementgebonden materialen, Masterproef Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, 170p
- [23], Gruyaert, E. (2011) Effect of Blast-Furnace Slag as Cement Replacement on Hydration, Microstructure, Strength and Durability of Concrete, Doctoraatsthesis Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, 345p
- [24], Jepsen, M.T., Edvarsen, C., (2002) Chloride Migration Coefficients from Non-Steady-State Migration Experiments at Environment-Friendly "Green" Concrete. Retrieved from:
<http://www.gronbeton.dk/artikler/Chloride%20migration%20coefficients.PDF>

[25], Baroghel-Bouny, V., Belin, P., Maultzsch, M., Henry, D., AgNO₃ spray tests: advantages, weaknesses, and various applications to quantify chloride ingress into concrete. Part 2: Non-steady-state migration tests and chloride diffusion coefficients. Journal of Materials and Structures, 2007, Vol. 40, pp 783-799

[26], Boel, V. (2006) Microstructure of self-compacting concrete in relation with gas permeability and durability aspects, Doctoraatsthesis, Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, 320p

[27], Jakobsen, U.H., Pade, C., Thaulow, N., Brown, D., Sahu, S., Magnusson, O., De Buck, S., De Schutter, G., Automated air void analysis of hardened concrete - a Round Robin study. Cement and Concrete Research, Vol. 36, 2006, pp 1444-1452

[28], Baroghel-Bouny, V. Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction – Etat de l'Art et Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, Association Française de Génie Civil (AFGC), France, 2004, 252p.

[29], 'Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concretes: Interim Recommendations', AFGC/SETRA, France, January 2002, 98p.

[30], YE, G., (2003) Experimental Study and Numerical Simulation of the development of the Microstructure and Permeability of Cementitious Materials, Doctoraatsthesis, TU Delft, 208p

ASTM C 1202-05 (1986), Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration

NT Build 443 (1995), Concrete, Hardened, Accelerated penetration

NBN B 15-001 (2012), Beton - Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit - Nationale aanvulling bij NBN EN 206-1:2001

NBN B 589-209 (1969), Chloorwaterstofproef

AA 11.1.88 (2012), Interne uitvoeringsprocedure van RWTH Aachen, ter beproeving van de sulfaatbestendigheid

NT Build 492 (1999), Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments

ASTM C 457 (1990), Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete

NBN B24-213 (1976), Wateropslorping onder vacuüm

NBN B15-215 (1989), Wateropslorping door onderdompeling