

Zelfhelend beton door combinatie van microvezels met reactieve stoffen

Didier Snoeck

Promotoren: prof. dr. ir. Nele De Belie, prof. dr. ir. Lieva Van Langenhove
Begeleiders: ing. Pieter Dejonghe, ing. Kim Van Tittelboom

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

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

Vakgroep Textielkunde
Voorzitter: prof. dr. Paul Kiekens

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2010-2011



Zelfhelend beton door combinatie van microvezels met reactieve stoffen

Didier Snoeck

Promotoren: prof. dr. ir. Nele De Belie, prof. dr. ir. Lieva Van Langenhove
Begeleiders: ing. Pieter Dejonghe, ing. Kim Van Tittelboom

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

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

Vakgroep Textielkunde
Voorzitter: prof. dr. Paul Kiekens

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2010-2011



Voorwoord

In deze paragraaf wil ik allereerst alle mensen bedanken die van mij de persoon gemaakt hebben wie ik nu ben. In het kader van deze thesis zijn er enkele personen die een extra invloed hadden.

In het bijzonder wens ik mijn promotoren prof. dr. ir. Nele De Belie en prof. dr. ir. Lieva Van Langenhove te bedanken voor het mogelijk maken van deze thesis. Prof. dr. ir. Nele De Belie wil ik extra bedanken voor het vele werk en voor het in goede banen leiden van mijn masterproef.

Ook, en niet in het minst, mijn begeleiders ing. Pieter Dejonghe en ing. Kim Van Tittelboom. Dankzij hen kreeg ik een goed beeld van het wetenschappelijke onderzoeksgebied en hiervoor wil ik hen danken. Ze waren ook steeds bereid te antwoorden op alle vragen, ook met hun drukke werkschema. Bedankt voor alle adviezen en suggesties voor deze thesis.

De heer Stijn Steuperaert wil ik danken voor het vervaardigen van het nieuw absorberend polymeer, dr. ir. Elke Gruyaert voor haar assistentie. Mevrouw Veerle Boterberg wens ik te bedanken voor het uitvoeren van de DVS- en TGA-metingen.

Een speciale dank gaat naar het personeel van het Laboratorium Magnel voor de hulp en assistentie bij het experimenteel onderzoek. De heer Marc Scheerlinck wordt bedankt voor het verzagen van de talrijke proefstukken.

Bovendien wil ik mijn ouders en broer bedanken, en dat op verscheidene vlakken. Allereerst omdat mijn ouders mijn studie mogelijk maakten. Ten tweede waren hun constante steun en motivering een drijfveer tijdens mijn studies en thesiswerk.

In het bijzonder wil ik mijn vriendin Nathalie bedanken voor haar onvoorwaardelijke steun, hulp en toeverlaat. Dank je om steeds naar mij te luisteren, mij bij te staan op chemisch vlak en voor mij te zorgen.

De toelating tot bruikleen

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

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

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

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

Gent, juni 2011
Didier Snoeck

Zelfhelend beton door combinatie van microvezels met reactieve stoffen

Didier Snoeck

Promotoren: prof. dr. ir. Nele De Belie, prof. dr. ir. Lieva Van Langenhove

Begeleiders: ing. Pieter Dejonghe, ing. Kim Van Tittelboom

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van

Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Vakgroep Bouwkundige constructies

Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Vakgroep Textielkunde

Voorzitter: prof. dr. Paul Kiekens

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2010-2011

Samenvatting

Deze masterproef handelt over de invloed van microvezels en reactieve stoffen op het zelfhelend effect van beton. Na toevoeging van beide componenten werd hun invloed op de eigenschappen van het vers en verhard beton, in het bijzonder de verwerkbaarheid, sterkte, ductiliteit en permeabiliteit, onderzocht. Hierbij werden scheuren van enkele tientallen micrometer gecreëerd door scheuropening gecontroleerde vierpuntsbuigproeven. De mate van zelfheling werd getest door middel van mechanische testen en microscopische analyses. De absorptie van superabsorberende polymeren (SAP) werd kwantitatief onderzocht door filtratie en microscopisch onderzoek.

Meervoudige scheurvorming trad frequent op en werd bovendien gepromoot door de aanwezigheid van SAP. Heling treedt op door de precipitatie van calciumcarbonaat, de interne curing via SAP, de puzzolane activiteit en de aanwezigheid van ongehydrateerd cement. Er trad steeds zelfheling op bij nat/droog cycli. Zelfheling uitte zich in visuele dichting aan het scheurvlak, de vorming van nieuwe scheuren bij herbelasting en herwonnen mechanische eigenschappen. Bij curing onder een relatieve vochtigheid van 90 % trad er zelfheling op bij proefstukken met SAP. SAP houden vocht vast en geven dit gradueel af aan de cementmatrix. SAP zorgen ook voor zelfdichting van de scheur bij permeabiliteitstesten en stimuleren de vorming van calciumcarbonaat onder de vorm van stalactieten.

Trefwoorden

Zelfheling, beton, microvezels, meervoudige scheurvorming, superabsorberende polymeren.

Self healing concrete by the combination of microfibres and reactive substances

Didier Snoeck

Supervisors: prof. dr. ir. Nele De Belie, prof. dr. ir. Lieva Van Langenhove, ing. Pieter Dejonghe, ing. Kim Van Tittelboom

Abstract— Concrete cracks due to its low tensile strength. Without a proper treatment, maintenance costs will rise. It would be more beneficial if the material could heal autonomously. The autonomous healing process can be stimulated by the use of microfibres and superabsorbent polymers (SAP). Microfibres provoke matrix multiple cracking and thus several small healable cracks will appear, instead of one single large crack. SAP particles take moisture out of the environment and provide it to the cementitious matrix. Due to this, small cracks will heal as a result of hydration of un-hydrated cement particles, precipitation of calcium carbonate or activation of the pozzolanic reaction of fly ash. Cracks were healed completely when stored using wet/dry cycles. Mortar samples containing SAP particles even showed healing when stored under a relative humidity of 90 %. As can be concluded, the combination of microfibres and SAP eases the self-healing ability of concrete.

Keywords— Autogenous healing, cementitious materials, microfibres, multiple cracking, superabsorbent polymers.

I. INTRODUCTION

Cracking in concrete occurs commonly due to the relatively low tensile strength. However, concrete has a passive healing capacity of its own as cracks can close in time due to ongoing hydration. Un-hydrated cement particles always remain present in a hardened concrete matrix. As water flows into the cracks, the latter will close due to continued hydration. Another mechanism of autogenous crack healing is the precipitation of calcium carbonate (CaCO_3) which also blocks the crack. These forms of crack healing are studied in great detail by Edvardsen (1999) and she saw a decrease in water permeability in cracked specimens due to autogenous healing. Passive healing, however, can only heal small cracks.

A dedicated material design can promote the self-healing capacity. Two possible mechanisms and their combined effect are investigated in this study.

The first mechanism is the use of a high amount of microfibres which results in concrete with a high tensile ductility (Yang & Li, 2008). These composites exhibit tensile strain-hardening behaviour achieved by sequential development of matrix multiple cracking. The crack width is limited to 20-80 μm which gives the best opportunity for self healing. The main purpose of the fibres is to provide a controlled way of cracking and to increase the fracture toughness of the brittle cementitious matrix through bridging during both micro- and macro-cracking of the matrix.

The second healing mechanism is the use of reactive substances. Hydrogels, or superabsorbent polymers (SAP), have the ability to absorb a significant amount of liquid from the surrounding environment and to retain the liquid within

their structure without dissolving. Dennis Lee et al. (2010) investigated the incorporation of SAP in concrete in order to obtain self sealing properties. When liquids enter a crack, SAP particles will swell and promote self sealing.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Materials

The studied mortar mixtures were composed of OPC (571 kg/m^3), fly ash (685 kg/m^3), silica sand 0/2 (456 kg/m^3), water (332 kg/m^3), a polycarboxylate superplasticizer (Glenium 51, conc. 35 %), 2 vol.% of fibres and SAP. Three types of SAP were used. These include: SAP A being a copolymer of acrylamide and sodium acrylate; SAP B, a crosslinked potassium salt polyacrylate and SAP C, a new synthetic polymer with cross-linkable vinyl groups.

B. Methods

Different mortar compositions were used to investigate the influence on the self healing efficiency. Three curing conditions were investigated: wet/dry cycles, exposure to a relative humidity $> 90\%$ and $= 60\%$.

By means of a displacement-controlled four-point-bending test, multiple cracks were created. After crack healing, the specimens were tested again in four-point-bending and the mechanical properties were compared. The investigated parameter was the stress at the point of first cracking, further called σ_{fc} . The measurement for the self-healing capacity was the regain of σ_{fc} shown in Equation (1). The preloading was manually stopped at the release stress which was smaller than σ_{fc} to ensure a maximum use of matrix multiple cracking.

$$\frac{\sigma_{fc, \text{reloading}} - \sigma_{\text{release}}}{\sigma_{fc, \text{preloading}} - \sigma_{\text{release}}} \quad (1)$$

In the mean time, crack healing was also evaluated by means of a stereo microscope.

Permeability tests were carried out after cracking cylindrical specimens with a splitting test, following the method described by Aldea et al. (1999). Self sealing was measured through a decrease in water permeability over time.

III. RESULTS AND DISCUSSION

When 2 vol.% PVA-fibres of Kuraray were mixed in, the amount of multiple cracking and the ductility were noteworthy (Figure 1a). A maximum of 9 mm vertical displacement was manageable and the corresponding crack width varied between 6-104 μm . It was also shown that it was possible to heal crack widths within this range. After the maximum use of matrix multiple cracking, one previously formed crack widens.

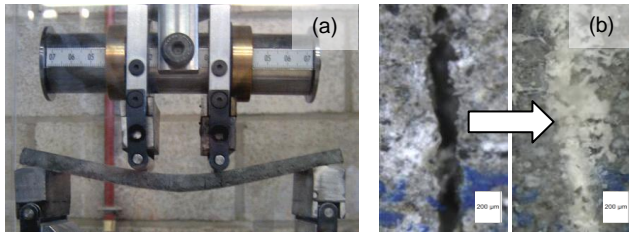


Figure 1 Four point bending test on a specimen containing 2 vol.% of 8 mm PVA-fibres of Kuraray showing a vertical displacement of 9 mm (a) and a total healing of a 138 μm crack (b).

SAP particles form macropores due to desorption of the entrapped liquid. Such a system of voids facilitates multiple cracking.

Cracks $< 30 \mu\text{m}$ exposed to wet/dry cycles healed completely both with and without SAP. Cracks $< 150 \mu\text{m}$ healed partly, but sometimes, even cracks within this range closed completely (Figure 1b). Storage in an environment with a relative humidity $> 90\%$ only showed visual closure of cracks for samples containing SAP. SAP particles manage to take moisture out of a humid environment and provide it to the cementitious matrix for self healing. This is reflected in a regained first-cracking-strength on samples with 2 vol.% of 6 mm PVA-fibres of Redco in Figure 2.

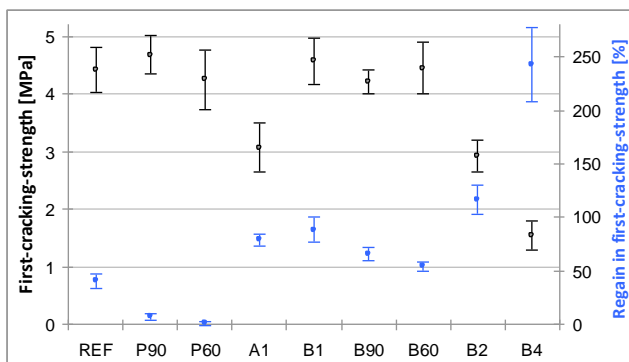


Figure 2 Mean regain in first-cracking-strength with the standard deviation. REF; A1; B1; B2; B4 = wet/dry cycles, P90; B90 = RH $>90\%$, P60; B60 = RH=60%. REF; P90; P60 containing no SAP, A1 containing 1% of cement weight SAP A, B1; B90; B60 containing 1 m% SAP B and B2; B4 containing 2 m%; 4 m% SAP B.

Samples containing SAP particles showed more healing due to internal curing. SAP A showed a lower first-cracking-strength due to lowering of the active cross-section of the matrix by the formation of macropores. This effect is larger with SAP A than SAP B due to a smaller particle size in comparison with SAP B. Increasing the m% of SAP B gives more healing due to more internal curing. The first-cracking-strength however decreases with increasing m% due to the reduced active cross-section. A mixture containing 1 m% SAP B gives the best result.

The self healing and sealing efficiency was also expressed as the water permeability over the third power of the crack width, according to the formula of Tsukamoto (Edvardsen, 1999). A decrease in water permeability is observed in Figure 3 for specimens containing SAP. SAP A gives less decrease due to the smaller particle size. The new polymer also resulted in a low decrease due to the coarser particle size. Samples containing 1 m% of SAP B provided the highest decrease in permeability over time. A mixture with 4 m% SAP B had a coarser matrix and lower strength and thus more pathways for water to migrate.

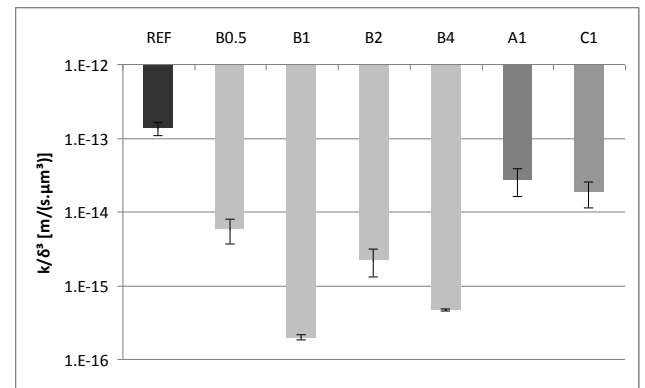


Figure 3 Mean water permeability k over the third power of the crack width δ and standard deviation. REF = reference, B0.5; B1; B2; B4 = SAP B at 0.5; 1; 2; 4 m% of cement weight, A1 = 1 m% SAP A and C1 = 1 m% of new polymer.

At the bottom of the specimens, the crack showed a large quantity of stalactites (Figure 4). Thermogravimetric analysis showed that these stalactites consisted of CaCO_3 and washed out hydration products.



Figure 4 Formation of stalactites at the bottom of the specimens after the permeability test.

CONCLUSIONS

Fibre reinforced cementitious materials are durable and provide reliable tensile ductility and crack-controlling capability to prevent the localized cracking failure often observed in concrete structures. SAP promote the self healing ability by internal curing and this leads to regain of mechanical properties. When not completely submerged in water, only samples containing SAP show self healing properties due to moisture uptake.

When cracking occurs and SAP particles are exposed to a humid environment, the particles swell and close the crack. The water permeability diminishes in time and the cracks are sealed. Introducing 1 m% of SAP B gives the best results.

It might be concluded that the combination of microfibres and superabsorbent polymers leads to self healing of cracks.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of a MSc dissertation at the Faculty of Civil Engineering and Architecture of Ghent University.

REFERENCES

- [1]Aldea, C., Shah, S. & Karr, A., "Effect of Cracking on Water and Chloride Permeability of Concrete," *Materials in Civil Engineering*, vol.11, no.3, pp.181-187, 1999.
- [2]Dennis Lee, H.X., Wong, H.S. & Buenfeld, N., "Self-sealing cement-based materials using superabsorbent polymers," *International RILEM Conference, PRO 74*, 2010, Denmark.
- [3]Edvardsen, C., "Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete," *ACI Materials J.*, vol.96, pp448-445, 1999.
- [4]Yang, E-H., *Designing added functions in Engineered Cementitious Composites*, PhD Dissertation, The Michigan University, 2008.

Inhoudsopgave

1.	Inleiding.....	1
2.	Literatuurstudie	2
2.1.	Scheurvorming in beton.....	2
2.2.	Meervoudige scheurvorming.....	3
2.2.1.	Natuurlijke vezels.....	4
2.2.1.1.	Vlas.....	5
2.2.2.	Kunstmatige vezels.....	6
2.2.2.1.	Polypropyleenvezels	7
2.2.2.2.	Polyvinylalcoholvezels	8
2.2.3.	Vezelversterkte composieten	9
2.2.3.1.	Inleiding	9
2.2.3.2.	De eerste-scheur-sterkte en meervoudige scheurvorming	9
2.2.3.3.	Voorwaarden voor versteviging.....	12
2.2.3.4.	Steady-state scheurvorming.....	13
2.2.3.5.	Spanningsscheurwijdte diagram.....	13
2.2.3.6.	Vezeluittrekproeven	14
2.2.3.7.	Vezeluittrekking.....	15
2.2.3.8.	Enkele effecten op de vezeluittrekking	16
2.2.3.9.	Optimalisatie	17
2.2.3.10.	Micromechanische karakteristieken: polyvinylalcohol vezels	17
2.2.3.11.	Micromechanische karakteristieken: polypropyleen vezels.....	18
2.2.3.12.	Hybride systemen	19
2.3.	Autogene heling.....	20
2.3.1.	Criteria voor zelfheling	21
2.3.1.1.	Aanwezigheid van chemische bestanddelen	21
2.3.1.2.	Blootstelling aan verschillende omgevingscondities	21
2.3.1.3.	Kleine scheuropeningen.....	22
2.3.2.	Onderzoeksmethoden.....	22
2.3.2.1.	Resonantiefrequentie	22
2.3.2.2.	Trek- en buigproeven	23
2.3.2.3.	Waterpermeabiliteitstest.....	24
2.3.3.	Invloed van en op de nodige chemische bestanddelen	26
2.3.3.1.	Precipitatie van calciumcarbonaat.....	26
2.3.3.2.	Watertransport	26
2.3.3.3.	Ouderdom van het beton, cementgehalte	28
2.3.3.4.	Water/cement factor.....	28
2.3.3.5.	Puzzolane toevoegingen.....	29
2.3.3.6.	Kalksteenmeel	29
2.3.4.	Invloed van en op de omgevingscondities.....	30
2.3.4.1.	Verschillende cycli.....	30
2.3.4.2.	Temperatuur	32
2.3.4.3.	Relatieve vochtigheid	33

2.3.4.4.	Chloriden	33
2.3.5.	Invloed van en op de kleine scheurvorming	34
2.3.5.1.	Scheurwijdte	34
2.3.5.2.	Opgelegde rek bij het belasten.....	35
2.3.5.3.	Volumepercentage aan vezels	36
2.3.5.4.	Drukkracht tijdens heling.....	36
2.3.6.	Scheurvorming bij herbelasting.....	36
2.4.	Zelfheling door middel van reactieve stoffen.....	37
2.4.1.	Overzicht superabsorberende polymeren	37
2.4.1.1.	Polymeren.....	37
2.4.1.2.	Hydrogelen	38
2.4.1.3.	Principes van zwellings.....	39
2.4.2.	Huidige toepassingen in beton.....	40
2.4.2.1.	Algemeen.....	40
2.4.2.2.	Absorptiekenmerken.....	41
2.4.2.3.	Mechanische eigenschappen.....	43
2.4.2.4.	Krimp	44
2.4.2.5.	Dichten van scheuren	46
2.4.2.6.	Zelfheling	47
2.4.2.7.	Verschillende wijzen van toevoegen van SAP.....	47
2.4.2.8.	Verdeling en visualisatie van SAP.....	48
2.4.3.	Modificatie SAP	48
3.	Materialen en methoden.....	49
3.1.	Materialen.....	49
3.1.1.	Algemeen en vezeltypen	49
3.1.2.	Superabsorberende partikels	50
3.1.3.	Mengsels, proefstukken en afmetingen.....	52
3.1.3.1.	Mengsels ter bepaling van verwerkbaarheid en verdichting	52
3.1.3.2.	Mengsels ter bepaling van absorptie op het scheurvlak	53
3.1.3.3.	Mengsels ter bepaling van de invloed van SAP op de sterkte	53
3.1.3.4.	Mengsels ter bepaling van de vierpuntsbuigproef-eigenschappen	53
3.1.3.5.	Mengsels ter bepaling van de permeabiliteit.....	54
3.2.	Methoden	55
3.2.1.	Absorptiekenmerken.....	55
3.2.1.1.	Vacuüm drogen van SAP met silica-korrels.....	55
3.2.1.2.	Eerste methode: filtratie	55
3.2.1.3.	Tweede methode: microscopische analyse.....	57
3.2.1.4.	Derde methode: dynamische damp sorptie test (DVS).....	58
3.2.1.5.	Zwelling in functie van de tijd	59
3.2.2.	Zoeken naar goede mengprocedure en verdichting	59
3.2.3.	Mengprocedure.....	60
3.2.4.	Opmeten en afwegen van de mortelprisma's	61
3.2.5.	Mechanische eigenschappen: buigtreksterkte en druksterkte	61
3.2.6.	Mechanische eigenschappen via de vierpuntsbuigproef	62
3.2.6.1.	Opstelling en theoretische beschouwingen	62
3.2.6.2.	Experimenteel programma.....	65

3.2.7.	Vezelkarakteristieken.....	69
3.2.8.	Visualisatie scheuren en opmeten scheuren.....	69
3.2.9.	Onderzoek scheurvlak	70
3.2.10.	Waterdoorlatendheidseigenschappen.....	70
3.2.10.1.	Splijtsterkte	70
3.2.10.2.	Permeabiliteitsproef.....	72
3.2.11.	Thermogravimetrische analyse (TGA).....	74
3.2.12.	Statistische verwerking	74
4.	Resultaten en bespreking.....	75
4.1.	Onderzoek naar verwerkbaarheid en verdichting.....	75
4.2.	Absorptie SAP	77
4.2.1.	Filtratie.....	77
4.2.2.	Zweltijd	80
4.2.3.	Microscopisch onderzoek.....	82
4.2.4.	DVS	85
4.2.5.	Buigtrek- en druksterkte prisma's met SAP	88
4.2.6.	Bestudering van het scheurvlak	89
4.3.	Meervoudige scheurvorming.....	91
4.3.1.	Onderzoek van de scheuren	91
4.3.2.	Spanning-rek diagrammen.....	93
4.3.2.1.	Mengsels met PVA-vezels	93
4.3.2.2.	Mengsels met vlasvezels	101
4.3.2.3.	Mengsels met PP-vezels.....	103
4.3.2.4.	Mengsels met PVA-vezels en SAP	106
4.3.2.5.	Lange dunne PVK 2 en PPM 2 proefstukken	109
4.3.3.	Vergelijking van de verschillende reeksen	110
4.3.3.1.	Stijfheid.....	110
4.3.3.2.	Herwonnen stijfheid.....	111
4.3.3.3.	Piekwaarde	113
4.3.3.4.	Herwonnen piekwaarde	114
4.3.3.5.	Meervoudige scheurvorming, maximale rek en totale arbeid W.....	115
4.3.3.6.	Herwonnen meervoudige scheurvorming	117
4.3.3.7.	Eerste-scheur-sterkte en scheurtip breuktaaiheid J_{tip}	119
4.3.3.8.	Herwonnen eerste-scheur-sterkte	121
4.3.3.9.	Herwonnen sterkte.....	123
4.3.4.	Scheuronderzoek: zelfheling.....	124
4.3.5.	Scheuronderzoek: verbetering van de eigenschappen.....	130
4.3.6.	Variant ter bepaling van de vezeleigenschappen	132
4.3.7.	Heling aan het scheuroppervlak per individuele scheur.....	135
4.4.	Permeabiliteitsproeven	140
4.4.1.	Splijtkracht	140
4.4.2.	Doorlatendheid in functie van de scheurwijde ³	141
4.4.3.	Heling aan de inlaatzijde	144
4.4.4.	Heling aan de uitlaatzijde	145
4.4.5.	Identificatie zelfhelend materiaal, TGA.....	153
4.4.5.1.	Visuele waarneming en inleiding.....	153

4.4.5.2.	TGA van zuiver SAP	153
4.4.5.3.	TGA van de onderzochte proefreeksen.....	155
5.	Discussies en connecties	159
5.1.	Superabsorberende polymeren	159
5.2.	Mechanische eigenschappen	160
5.3.	Meervoudige scheurvorming.....	160
5.4.	Bepaling van de hecht karakteristieken	162
5.5.	Zelfheling.....	162
5.6.	Zelfdichting.....	163
6.	Conclusies.....	164

Tabel van afkortingen en symbolen

Afktoring/Symbool	Betekenis/Verklaring	Dimensie/Eenheid
α	Hydratatiegraad	[%]
α_0	Performantiedrempel	[%]
α_{cg}	Cook-Gordon verlenging	[m]
α_u	Ultieme hydratatiegraad	[%]
a	Dwarsdoorsnede waterkolom	[m ²]
a_0	Aanwezige defectafmeting	[m]
a_g	Stromingscoëfficiënt – gladheid scheurvlak	[-]
A	Dwarsdoorsnede onder stroming	[m ²]
A_f	Dwarsdoorsnede van de vezel	[m ²]
$AlCl_3$	Aluminiumchloride	-
ANOVA	Analysis of variance	-
ASTM	American Society for Testing & Materials	-
β	Slip-verstevigingscoëfficiënt	[-]
b	Breedte prisma	[m]
BSE	Backscattered electron micrographs	-
c	Straal vlakke scheur	[m]
C	Cement	-
C_3A	Ongehydrateerd cement	-
$CaCO_3$	Calciumcarbonaat	-
CaO	Ongebluste kalk	-
$Ca(OH)_2$	Portlandietkristallen – Calciumhydroxide	-
CO_2	Koolstofdioxide	-
CO_3^-	Carbonaationen	-
CR1	Water/lucht cyclus	-
CR2	Water/hete lucht cyclus	-
CR3	90 % RV/lucht cyclus	-
CR4	Onderdompeling in water	-
CR5	Bewaring in lucht	-
C-S-H	Calcium-Silicaat-Hydraat	-
δ	Scheurwijdte	[m]
δ^*	Scheurwijdte bij totale onthechting	[m]
δ_a	Scheuropeningsparameter	[m]
δ_0	Scheurwijdte bij σ_0	[m]
δ_{cg}	Cook-Gordon scheuropening	[m]
δ_{ss}	Steady-state scheurwijdte	[m]
Δh	hoogteverschil	[m]
$\Delta V(t)$	Absorptiehoeveelheid	[l]
ΔV	Volumeverschil	[l]
d_f	Vezeldiameter	[m]
d_s	Scheurlengte in stromingsrichting	[m]

D	Diffusiecoëfficiënt	[m ² /s]
DVS	Dynamic Vapour Sorption	-
ε	Vervorming of rek	[-]
ε_{cu}	Rek bij σ_{cu}	[-]
ε_{fc}	Rek bij σ_{fc}	[-]
ε_{max}	Maximale rek bij scheuraanbreng	[-]
E	Elasticiteitsmodulus	[N/m ²] of [Pa]
E_c	E-modulus van het composiet	[N/m ²] of [Pa]
E_f	E-modulus van de vezel	[N/m ²] of [Pa]
E_m	E-modulus van de matrix	[N/m ²] of [Pa]
ECC	Engineered Cementitious Composite	-
EDS	Energy-dispersive X-ray spectroscopy	-
EDX	Energy-dispersive X-ray analysis	-
ESEM	Environmental SEM	-
η	Effectiviteit	[-]
θ	Relatieve hoek vierpuntsbuigproef	[rad]
f	Snubbing coëfficiënt	[-]
f'	Sterktereductiefactor	[-]
f_c	Druksterkte	[N/m ²] of [Pa]
f_{ct}	Treksterkte	[N/m ²] of [Pa]
f_{ctfl}	Buigtrekspanning	[N/m ²] of [Pa]
F	Vliegass	-
F_{max}	Maximale kracht	[N]
g	Graviteitsconstante	[m/s ²]
g	Snubbingfactor	[-]
G_d	Interface chemische hechtsterkte	[J/m ²]
h	Hoogte stalactiet – vloeistofkolom – prisma	[m]
h_0	Initiële waterstand	[m]
h_f	Uiteindelijke waterstand	[m]
H ₂ O	Water	-
HCl	Zoutzuur	-
HCO ₃ ⁻	Bicarbonaationen	-
HTPP	High Tenacity Polypropylene	-
I	Drukgradiënt – Verhang	[-]
J'_b	Complementaire energie	[J/m ²]
J_{tip}	Scheurtip breuktaaiheid	[J/m ²]
k	Permeabiliteitsconstante	[m/s]
K_B	Vezelbrugfactor	[J/m ²] of [MPa \sqrt{m}]
K_L	Spanningsintensiteitsfactor	[J/m ²] of [MPa \sqrt{m}]
K_m	Matrixbreuktaaiheid	[J/m ²] of [MPa \sqrt{m}]
K_p	Wateropname SAP	[g/g]
KOH	Kaliumhydroxide	-
l	Lengte tussensteunen buigproef	[m]
l^*	Gemiddelde uitpuilende lengte	[m]
l_s	Scheurlengte normaal op stromingsrichting	[m]
L	Dikte specimen in stromingsrichting	[m]

L_c	Kritische Lengte	[m]
L_e	Inbedlengte	[m]
L_f	Vezellengte	[m]
LVDT	Linear Variable Differential Transformer	-
μ CT	Microfocus X-ray computed tomography	-
m	Massa	[kg]
m_{SAP}	Massa van het SAP	[kg]
m%	Massaprocent tov. het cementgehalte	[%]
MIP	Mercury intrusion porosimetry	-
ν	Kinematische viscositeit	[m/s ²]
NaCl	Natriumchloride	-
NaOH	Natriumhydroxide	-
Φ	Hellingshoek	[rad]
Φ_p	Diameter SAP	[m]
P	Last en brugsterkte	[N]
PE	Polyethyleen	-
pH	Potentiel Hydrogène – zuurtegraad	[-]
PP	Polypropyleen	-
PPb	Polypropyleen bicore	-
PPm	Polypropyleen monofilament	-
Q	Debiet op tijdstip t	[m ³ /s]
Q_{max}	Debiet op tijdstip t_{∞}	[m ³ /s]
PVA	Polyvinylalcohol	-
PVK	PVA-vezel van Kuraray	-
ρ	Massadichtheid	[kg/m ³]
ρ_{SAP}	Massadichtheid van het SAP	[kg/m ³]
R	Straal doorbuigingscirkel	[m]
RV	Relatieve vochtigheid	[%]
s	afsplinteringafmeting	[m]
SiO ₂	Siliciumoxide	-
SAP	Superabsorberend polyme(e)r(en)	-
SAP A	Copolymeer acrylamide/natriumacrylaat	-
SAP B	Gecrosslinkt kaliumzout polyacrylaat	-
SAP C	Een nieuw synthetisch polymeer	-
SC	Staalvezel	-
SEM	Scanning electron microscope	-
Spl / S	Superplastificeerder	-
σ	Spanning	[N/m ²] of [Pa]
σ_0	Vezelbrugsterkte – Onthechtsterkte	[N/m ²] of [Pa]
σ_o	Piekbrugspanning met snubbingfactor=1	[N/m ²] of [Pa]
σ_c	Trekweerstand van de matrix	[N/m ²] of [Pa]
σ_{cu}	Piekspanning bij vierpuntsbuigproef	[N/m ²] of [Pa]
σ_{fc}	Eerste-scheur sterkte	[N/m ²] of [Pa]
σ_{fu}	Vezelbreuksterkte	[N/m ²] of [Pa]
σ_p	Piekspanning	[N/m ²] of [Pa]
τ	Hechtsterkte	[N/m ²] of [Pa]

τ_0	Interface wrijvingskracht	[N/m ²] of [Pa]
t	Tijd	[s]
t/min	Toeren per minuut	[t/min]
t_f	Testduur	[s]
T	Temperatuur – Totaal	[°C]
TGA	Thermogravimetrische analyse	-
u	Verplaatsing van de vezel	[m]
u[mm]	Doorbuiging vierpuntsbuigproef	[mm]
V	Volume water – Vezels	[m ³]
V(t_0)	Volume op tijdstip 0	[m ³]
V(t)	Volume op tijdstip t	[m ³]
V_f	Volumefractie vezels	[vol.%]
V_m	Volumefractie matrix	[vol.%]
w	Scheurwijdte	[m]
W	Arbeid – Water	[J]=[N·m]=[kN·mm]
W/C-factor	Water/Cement-factor	[-]
(W/C) _e	Meegevoerd extra water in SAP	[-]
W/P-factor	Water/Poeder-factor	[-]
Z	Zand	-

1. Inleiding

Beton kan de dag van vandaag niet zomaar weggecijferd worden uit het dagelijkse leven. Denk maar aan woongebouwen, tunnels, bruggen, e.a. Beton is robuust en geeft een gevoel van zekerheid, maar beton kan ook falen door aardbevingen of in het algemeen door hoge belastingen. Door overmatige scheurvorming kan het ook zijn dat ongewenste deeltjes of vloeistoffen via de scheuren naar binnen treden en zo zorgen voor aantasting van het beton van binnenuit.

Hoe kan het beton na falen haar vroegere sterkte en eigenschappen zelfstandig herwinnen?

Er dient niet zo ver gezocht te worden. Eén van de nuttige eigenschappen van de mens is dat het weefsel zich autonoom kan herstellen. Deze eigenschap bestaat ook in beton wat van nature uit een zelfhelend materiaal is. Door de aanwezigheid van ongehydrateerde cementdeeltjes, zal het beton steeds verdergaand hydrateren als het in contact komt met water. Dit water kan bijvoorbeeld via scheurtjes naar binnen treden. Ook zorgt de precipitatie van calciumcarbonaat ervoor dat de ontstane scheuren verder hersteld worden. Deze twee passieve vormen van zelfheling zijn al langer gekend. Beton is echter bros. Dat heeft als gevolg dat passieve zelfheling slechts een inferieure rol speelt in het herstellend proces. Vandaar het idee om actieve zelfheling op te wekken of de passieve zelfheling te helpen.

Deze thesis gaat door de combinatie van zowel microvezels als reactieve stoffen na hoe de zelfhelende eigenschappen van beton kunnen gestimuleerd worden. Het effect van de toevoeging van beiden op de eigenschappen van het vers en verhard beton, in het bijzonder de verwerkbaarheid, druk- en treksterkte, ductiliteit en permeabiliteit, wordt nagegaan. Hierbij worden scheuren van enkele tientallen micrometer gecreëerd door scheuropening gecontroleerde vierpuntsbuigproeven. De zelfhelende eigenschappen zullen dan getest worden door middel van mechanische testen, waterdoorlatendheidsproeven en microscopische analyses. Er werd al veel onderzoek verricht naar de heling van cementgebonden materialen onder gecontroleerde scheurvorming en deze thesis tracht een aantal hiaten op te vullen.

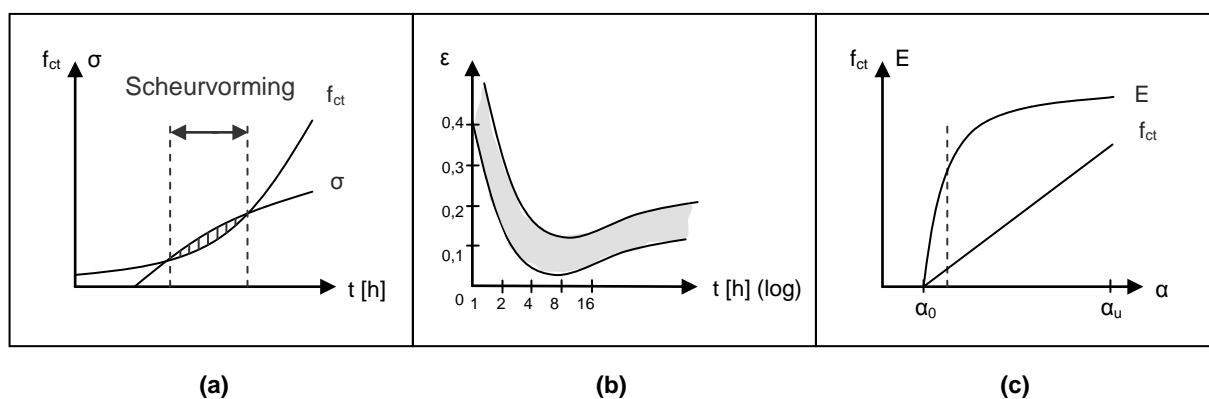
2. Literatuurstudie

Dit hoofdstuk geeft een algemeen beeld van wat er tot nu toe gekend is over zelfheling van beton door incorporatie van microvezels en/of reactieve stoffen. Allereerst wordt scheurvorming op zich uit de doeken gedaan. Hierna komen de microvezels aan bod, en dan is het de beurt aan het effect van autogene heling. Vervolgens worden de reactieve stoffen besproken, al dan niet in combinatie met microvezels. Uit de verworven informatie werden de basisgegevens voor het experimentele proeftraject gedestilleerd, waarbij er zoveel mogelijk hiaten uit de literatuur opgevuld werden.

2.1. Scheurvorming in beton

Door de lage treksterkte van beton, is scheurvorming legio. De treksterkte wordt bereikt door ofwel een rechtstreekse belasting, de verhinderd van plastische krimp, differentiële zettingen, temperatuursveranderingen, roestvorming van de wapening, vorming van expansieve alkali-silica-gel, ofwel door een combinatie van voorgaande.^[1] Deze scheurvorming is een functie van de aanwezige microscheuren en holtes. Om dit brosgedrag aan te pakken wordt er ingespeeld op de ductiliteit van het beton.

Voor jong beton is gevoelig voor scheurvorming. Er bestaat namelijk een kritische fase waarbij het beton een zeer lage treksterkte heeft samen met een beperkte vervormingscapaciteit (Figuur 1a). De beschikbare treksterkte wordt door verhinderde vervormingen overschreden wanneer de rekcapaciteit van het beton in functie van de ouderdom minimaal wordt, zoals weergegeven in Figuur 1b.^[1]



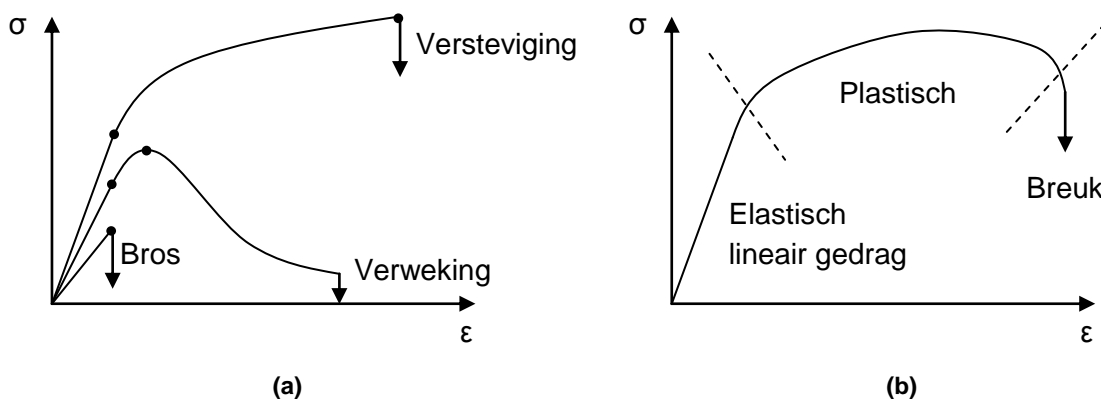
Figuur 1: Treksterkte en spanningen, breukrek^[1] & E-modulus in jong beton

Dit komt doordat bij een hydratatiegraad α hoger dan de performantiedrempel α_0 , de elasticiteitsmodulus E beduidend grotere waarden aanneemt dan de treksterkte f_{ct} (stippellijn Figuur 1c). Zo zullen belastingen, door opgelegde vervormingen zoals thermische krimp via de wet van Hooke (Formule (1)), grotere waarden opleveren dan f_{ct} . Een kleine vervorming ϵ geeft snel grote spanningen σ , zoals blijkt uit de keuze van de stippellijn. Om geen vroege scheurvorming te krijgen, moet de treksterkte hoger zijn dan de spanning via Hooke.

Geen vroege scheurvorming: $f_{ct} > \sigma = E \cdot \varepsilon$ (1)

De fase van lage rekapaciteit begint ongeveer twee uur na het storten en duurt vier tot zestien uur.^[1] In deze fase zijn voornamelijk een snelle daling van de hydratatiewarmte van de cementpasta, een te snelle uitdroging van het beton en vervormingen van de bekistingen belangrijke oorzaken van te grote trekspanningen.

Er kunnen zich drie bezwijkmechanismes manifesteren (Figuur 2a). Een eerste is het bros gedrag dat door een lineaire wet beschreven wordt en zal leiden tot falen als de treksterkte is bereikt. In het geval van niet-lineair plastisch gedrag is er verweking (strain-softening of quasibros) indien de helling daalt en versterking (strain-hardening) indien de helling stijgt na het lineair gedrag. Deze laatste heeft nog steeds een mogelijkheid tot verhoging van de spanning terwijl het materiaal een grote vervorming ondergaat.^[2] Eerst is er een elastisch lineair gedrag tot het bereiken van de elastische trekspanning. Vervolgens is er het plastische gedrag en dit tot breuk (Figuur 2b).



Figuur 2: Verschillende falingsmechanismen

2.2. Meervoudige scheurvorming

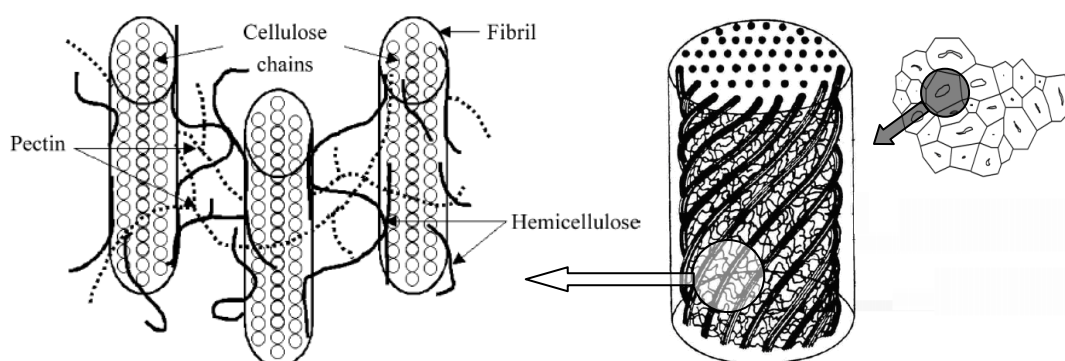
Vezels worden al van oudsher gebruikt om brossen of korrelige materialen te versterken. Taaie rijstvezels bevinden zich in Oud-Chinese structuren, hennep en stro werden dan weer gebruikt in het Midden-Oosten. Tijdens de Middeleeuwen werden stro en dierenharen vermengd met klei.

Mogelijke vezels zijn natuurlijke vezels, zoals basalt, vlas, Spanish broom, netel, of kunstmatig geproduceerde vezels, zoals polyamides, celluloseacetaat, e.a. Deze laatste soort kan geproduceerd worden door elektrospinnen. De belangrijkste kenmerken zijn de hernieuwbaarheid en goede mechanische eigenschappen.^[3]

2.2.1. Natuurlijke vezels

Natuurlijke 'groene' vezels hebben een lage milieu-impact bij de productie ervan. Ze zijn ook hernieuwbaar en biologisch afbreekbaar met goede mechanische eigenschappen. Sommige plantensoorten zoals vlas gedijen in het Westers klimaat en zijn dus makkelijk te telen.

De polymeren die in natuurlijke vezels voorkomen zijn cellulose, hemicellulose, lignine en pectine, waarbij lignine en pectine als binding fungeren (Figuur 3).^[4] Hemicellulose is verantwoordelijk voor de biodegradatie, de vochtopname en de thermische degradatie van de vezel. De vezels zijn celluloseketens bijeengehouden door microfibrillen met een polygonale vezeldoorsnede. In het midden loopt een centraal kanaal, het lumen.^[5]



Figuur 3: Voorstelling van de natuurlijke vezels^{[4][5]} met polygonale vezeldoorsnede^[4]

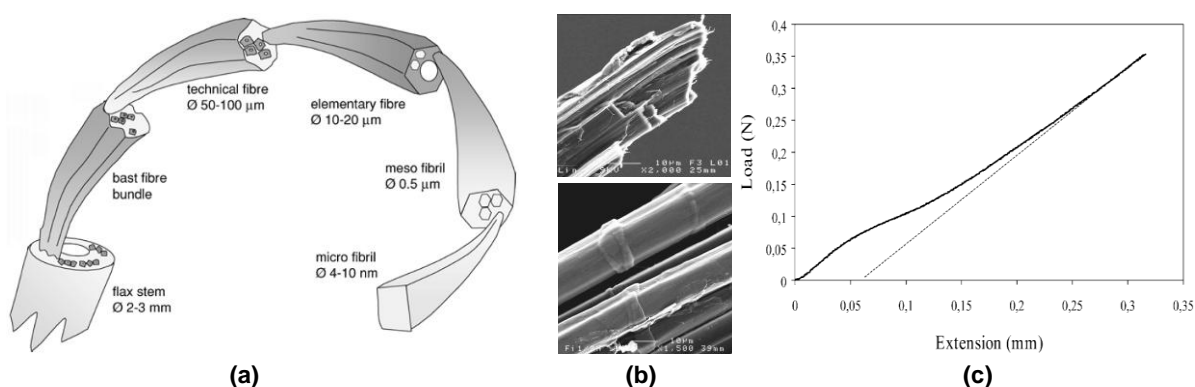
De mechanische eigenschappen zijn afhankelijk van de kristalstructuur, het type cellulose, de graad van kristallisatie en polymerisatie, de hoek van de fibrillen, de porositeit en de grootte van het lumen. De vezelsterkte vermindert met vochtgehalte en de stijfheidsmodulus met toenemende absorptie in de vezelporiën aangezien deze de cohesie van de fibrillen verlaagt. Het lumen is wel deels verantwoordelijk voor de vochtopname.^[4] De breukspanning en de elasticiteitsmodulus van de vezels dalen als de vezeldiameter toeneemt. De waarden zijn heel verspreid en dat is een nadeel van natuurlijke vezels. Ze zijn namelijk geen perfecte cilinders en de dimensies van het lumen zijn moeilijk te becijferen.^[6]

De aanwezigheid van blokkades in het beton, zoals ondoordringbare vezels, zorgen voor een waterfilm aangezien het water tegengehouden wordt. Dit is het wandeffect.^[7] Hierdoor bevindt er zich een hogere Water/Cement-factor W/C rondom de vezels ten opzichte van de matrix er rond. Calcium, sulfaten, hydroxiden en aluminaten zijn beschikbaar door de oplossing van calciumsulfaten en calciumaluminaten, en vormen samen ettringiet (gehydrateerde calcium trisulfoaluminaten) en calciumhydroxide. Door de hogere W/C -factor bevatten deze kristallijne producten grotere kristallen en vormen deze dus een poreuzer netwerk rond de vezels.^[8] Dit verklaart de grotere porositeit, de concentratie van portlandietkristallen ($Ca(OH)_2$) en van ettringiet bij de interface in de zogenaamde transitiezone. Voor natuurlijke vezel composieten is de transitiezone poreus, gescheurd en rijk aan $Ca(OH)_2$ macrokristallen.^[7] Soms kan er petrificatie of verstening van de vezels voorkomen. Dit komt door carbonatatie bij de opvulling van het lumen met hydratatieproducten. Zo zal de treksterkte en ductiliteit dalen met verloop van tijd en zal uiteindelijk gedomineerd worden door vezelbreuk.^[7]

2.2.1.1. Vlas

De bestudeerde vezel in deze thesis is de vlasvezel. Vlas wordt primair geteeld voor haar zaden waaruit olie gehaald wordt. De stengels worden maar al te vaak beschouwd als afvalmateriaal en dat is onterecht. Vlas kan gebruikt worden als vezel met goede mechanische eigenschappen. De vezel is één van de meest duurzame en sterke natuurlijke vezels, wat de vezel een uitstekende kandidaat maakt als vezelversterking in beton. Vlasvezels zijn zelfs effectiever om de plastische krimp scheuren op te nemen dan polypropyleenvezels, die later besproken worden. Het verschil met een synthetische vezel is dat een vlasvezel water kan absorberen. Dit hydrofiel karakter van de vezel zal zorgen voor een betere binding van de vezel met de matrix.^[9]

De 1 m lange technische vezel bestaat uit elementaire vezels die bij elkaar gehouden worden door pectine en hemicellulose (Figuur 4a). Door het bundeleffect is een technische vezel 57 % sterker dan een elementaire vezel.^[10] De vezels hebben ook defecten, zoals knikken in de vezel, zoals te zien is in Figuur 4b.^[4] Het diagram op Figuur 4c bevat een initieel niet-lineair elastisch gedrag. Dit wordt toegeschreven aan de oriëntatie en het glijden van de fibrillen (10-11 °) met de as waarbij de rek optreedt.^[4]



Figuur 4: Samenstelling(a)^[10], natuurlijke defecten(b)^[4] en een typisch F(u)-diagram(c)^{[4][6][10]}

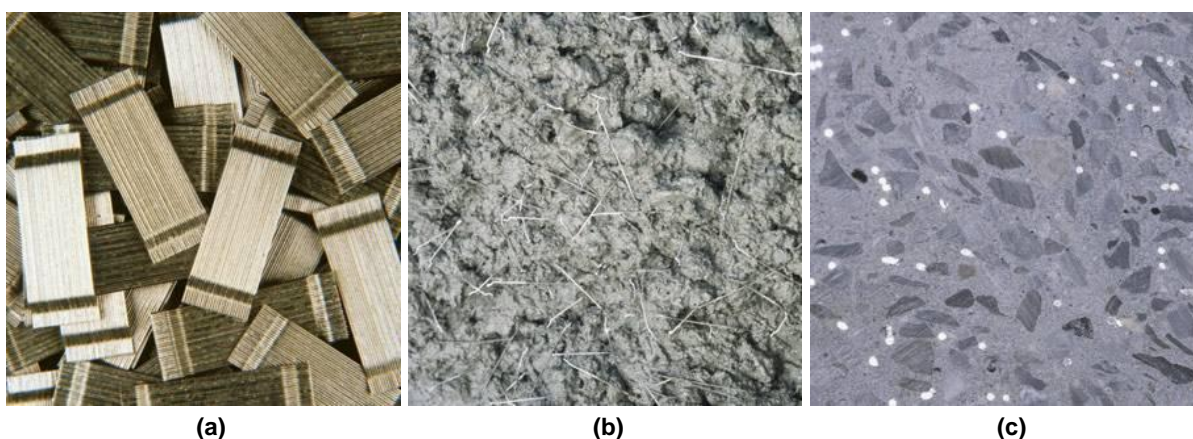
Wat betreft de mechanische eigenschappen, worden uiteenlopende gegevens weergegeven in de literatuur.^{[4][6][9][10]} Dit duidt op een grote spreiding van de onderzoeksresultaten, net door het natuurlijk karakter van de vezel. Algemeen daalt de elasticiteitsmodulus met de diameter. Dit komt doordat de afmetingen van het lumen stijgen met de diameter. Enkele gegevens van de elementaire vlasvezel zijn opgenomen in Tabel 1.

Tabel 1: Gemiddelde mechanische eigenschappen van elementair vlas^{[4][6][9][10]}

Diameter	10-60 µm
Lengte	10, 19 en 38 mm
Treksterkte	840-1800 MPa
Stijfheidsmodulus	50-100 GPa
Maximale rek	1,8-3,2 %
Vochtabsorptie	95 %
Densiteit	1,52 g/cm ³

2.2.2. Kunstmatige vezels

Kunstmatige vezels omvatten metalen vezels uit staal, minerale vezels zoals glasvezels en kunststofvezels zoals polypropyleen en polyvinylalcohol. Een voorbeeld van een metalen vezel is Dramix®.^{[11][12][13][14]} Deze vezels hebben gehaakte uiteinden en een recht deel met hoge treksterkte (Figuur 5a). Ook het gegolfde type bestaat. Op die manier wordt een wapening bekomen die een betere beheersing van de scheurvorming biedt. Het product is een equivalent van een standaard wapeningsnet in gewapend beton (Figuur 5b). Aangezien deze vezels kriskras door elkaar lopen zorgen ze voor een homogeen driedimensionaal maaswerk dat extra veiligheid inbouwt in het ontwerp (Figuur 5c).



Figuur 5: Het gebruik van staalvezels in beton^[11]

Er kan een synthetische vezel bijgemengd worden, zoals in de samenstelling Dramix® Duo 100. De synthetische vezels nemen de krimp op in de plastische fase van het beton. Deze vezels absorberen het water, wat zorgt voor minder uitdroging, wat op zijn beurt zorgt voor minder krimp. Door een lage E-modulus zijn polypropyleenvezels enkel efficiënt in de gietfase van het beton. Na enkele uren zal de E-modulus van het beton merkbaar hoger worden dan deze van de vezels. De vezels zorgen er dus voor dat microscheurtjes ten gevolge van plastische krimp gevoelig verminderen wat de kans op macroscheuren in een latere fase terugschroeft. Ze dragen echter niet bij tot een hogere treksterkte juist door deze lage E-modulus. In het omgekeerde geval, als de E-modulus van de vezel beduidend groter is dan deze van het beton, zal deze bijdragen tot een verhoging van de treksterkte.

Het toevoegen van vezels aan het beton verhoogt de structurele integriteit. Dit hangt af van het soort vezel, de samenstelling van het beton, de materiële eigenschappen, de geometrie, de onderlinge distributie, oriëntatie en densiteit. De meeste types vezelbeton resulteren in een verbeterd postpiek versteviging gedrag. Deze verbeterde taaiheid, door brugvorming van de vezels, vermijdt scheurpropagaties en heeft een hogere energieabsorptie tot gevolg.

Enkele positieve eigenschappen in verband met inmenging in beton zijn:^{[15][16][17]}

- hogere treksterkte;
- daling van het poriënvolume en de porositeit;
- betere duurzaamheid;
- statisch en dynamisch betere krachtswerking;

- verhoging van de impactweerstand;
- verminderde gevoeligheid aan slijtage of verbrijzeling;
- verbetering van brandweerstand.

Enkele negatieve eigenschappen in verband met inmenging in beton zijn:^{[15][16]}

- reductie in verwerkbaarheid;
- moeilijkheden om de vezels uniform te verspreiden in de matrix.

De hoeveelheid vezels in een betonmengsel wordt uitgedrukt aan de hand van de volumefractie V_f . Dit is het percentage van het totale volume en reikt meestal van 0,1-3 %.^[15] Bij hogere percentages klitten de vezels samen met een lagere verwerkbaarheid tot gevolg.

De vezels kunnen in lage volumefractie (<1 vol.%) gebruikt worden, waarbij het hoofddoel van de vezels de controle van krimp-scheuren is. Ze hebben geen structurele invloed. Matige vezelfracties (1-2 vol.%) worden gebruikt in de prefab-industrie. Ze worden gezien als secundaire wapening in samenwerking met het primair staal. Grote hoeveelheden (5-20 vol.%) worden gebruikt in balken, kolommen en connecties als de primaire 3D wapening. Ze hebben wel een speciale verwerking nodig door hun hoge volumefractie en kunnen enkel in prefab goed gecontroleerd verwerkt worden om zo goede mechanische eigenschappen te verkrijgen. Aangezien het hoger volume aan vezels en dito grotere kost, is het gebruik gelimiteerd tot staalvezels. Het kan ook zijn dat de productiemethode de vezels niet genoeg driedimensionaal verspreidt en zo anisotrope zwakke schakels introduceert.^[16]

2.2.2.1. Polypropyleenvezels

Polypropeen of polypropyleen PP is een kunstmatige stof die bestand is tegen chemische oplosmiddelen, basen en zuren.^[15] Polypropyleenvezels kunnen verkregen worden in de monofilament vorm en de gefibrilleerde vorm. De gebogen monofilamenten hebben een lagere specifieke oppervlakte waardoor de rechte gefibrilleerde vezels een betere hechting vertonen indien ze ingemengd worden in het beton.^[9] De gemiddelde mechanische eigenschappen worden weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2: Gemiddelde mechanische eigenschappen van polypropyleenvezels^{[9][17][18]}

Diameter	10-16,6 μm
Lengte	6 & 8 mm
Treksterkte	620-928 MPa
Stijfheidsmodulus	4-11,6 GPa
Maximale rek	8-10 %
Densiteit	0,91 g/cm ³

Een PP-vezel is hydrofoob en heeft een lage oppervlakteruwheid.^[17] Door het hydrofobe karakter is de binding met de matrix zwak en praktisch nul. Dit wordt ook in 2.2.3.11 besproken. Er zal dus geen sterke chemische binding met de matrix optreden.

Wegens de lage treksterkte werd 'High Tenacity PP' ontwikkeld, oftewel HTPP. Hierbij worden verschillende lagen gebruikt waarbij de buitenste laag de ruwheid verzorgt. De vezel wordt in België geproduceerd door Redco nv.^[19] De vezels bereiken een hoge sterkte van 800-850 MPa met een lengte van 6 mm.^[18]

De PP-vezels te Redco werden gemaakt met spinning, zoals te zien is op Figuur 6. Met deze machine kunnen PP-vezels gesponnen worden met verschillende lagen. Zo kan de buitenste laag specifiek gericht worden op de gewenste eigenschappen in het beton zonder in te boeten op gebied van sterkte. De kern kan de sterkte op zich nemen.^{[18][20]} Het procedé is dat van smeltspinning. Het gesmolten polymeer vloeit door een spinkop en zo worden vloeistofstralen geëxtrudeerd. Het polymeer aligneert zich tot een filament, een vezel van een oneindige lengte. Het polymeer wordt gestrekt, waarbij de vloeistofstraal wordt uitgerekt. De polymeermoleculen aligneren zich in één richting en zo wordt de sterkte verkregen.^[21] Als laatste stap wordt de vezel geappreteerd.



Figuur 6: Spinopstelling te Redco voor de productie van PP-vezels^[18]

2.2.2.2. Polyvinylalcoholvezels

Polyvinylalcohol PVA kan niet door oplosmiddelen aangetast worden. PVA-vezels hebben een uitgesproken verstevigingsgedrag, en dat is niet het geval bij een PP-vezel. PVA wordt meestal met olie gecoat om het hydrofiele karakter deels teniet te doen. Het hydrofiele karakter uit zich in de sterke chemische hechtsterkte met cementproducten door een hydroxylgroep in de moleculaire keten. Bij een hogere luchtvochtigheid echter neemt de hydrofiele vezel meer water op wat zorgt voor een verlaging van de treksterkte.^[22] Tabel 3 geeft de mechanische eigenschappen van de PVA-vezel.

Tabel 3: Gemiddelde mechanische eigenschappen van polyvinylalcoholvezels^{[17][23][24][25]}

Diameter	39 μm
Lengte	6 & 8 mm
Treksterkte	806-1620 MPa
Stijfheidsmodulus	21,8-60 GPa
Maximale rek	6 %
Densiteit	1,3 g/cm ³

PVA-vezels dienen op een andere manier gemaakt te worden dan PP-vezels aangezien het polymeer niet thermoplastisch bewerkt kan worden. Deze methode heet natte spinning. Het hars om de vezel te maken wordt hierbij in water opgelost en vervolgens gesponnen in een bad met zouten waarbij het polymeer coaguleert. Vervolgens komt er een ingewikkelde procedure van verstreking en warmtebehandeling om de benodigde treksterkte te bekomen.^[20] De warmtebehandeling is nodig aangezien de polymeren geforceerd zitten en de filamenten een beperkte oriëntatie vertonen. Dit is thermodynamisch ongunstig. Een hittebehandeling zorgt ervoor dat de individuele polymeermoleculen energie krijgen om zich geforceerd uit te zetten en om de vertrekking vast te zetten. Dit geeft een beter evenwicht in de vezel. Het resultaat is een stabiele vezel met georiënteerde polymeermoleculen en een sterke structuur. Achteraf kan er nog een oppervlaktebehandeling komen om de vezel extra karakteristieken mee te geven.^[21]

2.2.3. Vezelversterkte composieten

2.2.3.1. Inleiding

ECC[®] of Engineered Cementitious Composite(s) hebben een hoge trekductiliteit met een laag volumepercentage aan gecoate PVA-vezels, typisch 2 vol.%. ECC is capabel om te vervormen met hoge ductiliteit, meestal over de 3-4 %, terwijl het een scheurwijdte behoudt van 60-100 μm tot falen (Figuur 7).^[26] Deze scheurwijdte is onafhankelijk van het wapeningspercentage en van de structurele dimensies zodat de scheuren in laboratoria en in daadwerkelijke structuren dezelfde zijn. ECC heeft een druksterkte van 50-80 MPa afhankelijk van de samenstelling, waardoor het bij hoge sterkte beton hoort, maar zonder de bijhorende brosheid. De werkwijze die gevolgd wordt is gebaseerd op de interactie tussen de vezel, de matrix en de interface. Hierbij worden de microscopische eigenschappen zo aangepast dat de gewenste macroscopische eigenschappen worden bereikt.^{[17][27][28][29]}

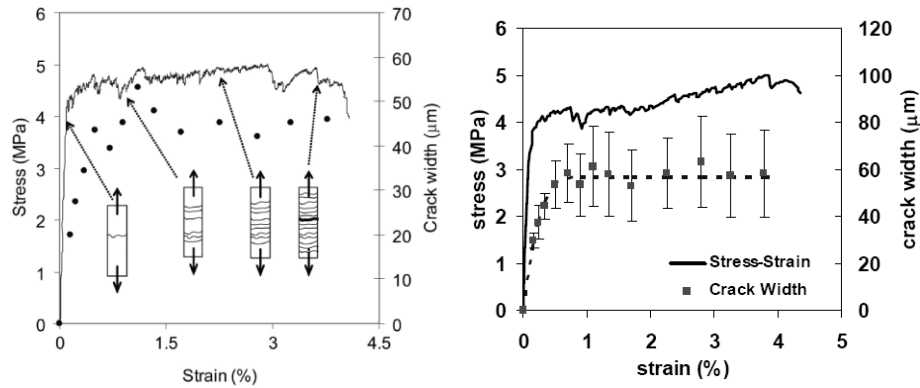


Figuur 7: Voorbeeld van de ductiliteit van ECC^[30]

2.2.3.2. De eerste-scheur-sterkte en meervoudige scheurvorming

De eerste-scheur-sterkte σ_{fc} is de treksterkte waarbij er een eerste scheur dwars door het proefstuk gaat. Ze wordt bepaald door de matrixtaaiheid en de brugvorming van de vezels. De vezels nemen de spanning op en overbruggen de scheur. Door deze brugvorming zal de sterkte beduidend groter zijn dan de matrixtaaiheid op zich indien de vezels sterker zijn.^[31]

Meervoudige scheurvorming wordt uitgelegd aan de hand van Figuur 8. Er vormt zich een eerste scheur bij het bereiken van de treksterkte van de matrix. De krachten worden lokaal opgenomen door de vezels die de scheur overbruggen. Aangezien de sterkte van de matrix kleiner is dan de spanning in de vezels, ontstaat er een nieuwe scheur. Dit zorgt voor de grote ductiliteit. Dit herhaalt zich totdat een scheur zal vergroten door een verhoging van de last en dito spanning in de vezel. De vezel zal breken ofwel uitgetrokken worden.



Figuur 8: Meervoudige scheurvorming bij ECC^{[29][32]} en typisch diagram^{[17][29]}

Doordat de vezels random georiënteerd zijn en een relatieve hoek kunnen maken met het scheurvlak, zijn deze onderworpen aan extra wrijvingskrachten met de matrix. Volgende empirische formule (2) werd voorgesteld^[33] om deze hellingshoek Φ (rad) in rekening te brengen, waarbij $f > 0$ de snubbing coëfficiënt is en P de brugsterkte.^[17]

$$P(\phi) = P(0) \cdot \exp(f \cdot \phi) \quad (2)$$

Voor een PVA-vezel gaat f van 0,2 tot 0,8.^[17] De coëfficiënt verhoogt de brugsterkte voor geïnclineerde vezels zoals bij een touw over een wrijvingskatrol. Polypropyleenvezels hebben een f van ongeveer 0,7.^[16]

Uit het evenwicht van de scheurtip breuktaaiheid J_{tip} (zie ook 2.2.3.3) en de som van de spanningsintensiteitsfactor K_L en de vezelbrugspanning K_B , wordt de eerste-scheur-sterkte σ_{fc} in formule (3):^{[27][34]}

$$\sigma_{fc} = \frac{J_{tip}}{2} \sqrt{\frac{\pi}{c}} - \frac{1}{2} \cdot g \cdot \sigma_o \left[-\frac{8}{3} (c)^{1/4} \sqrt{\frac{\delta_a}{\delta^*}} + \frac{\delta_a}{\delta^*} \sqrt{c} \right] \quad (3)$$

met de scheuropening δ^* corresponderend met de totale onthechting van alle vezels waarbij de vezels in de uittrekkingfase zijn (met τ de hechtsterkte, η de effectiviteit, V_m de matrix volumefractie, E_f de elasticiteitsmodulus, L_f de lengte en d_f de diameter van de vezel),

$$\delta^* = \frac{\tau}{E_f} \frac{L_f}{d_f} \frac{L_f}{1 + \eta} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{V_f E_f}{V_m E_m} \quad (5)$$

$$V_m = 1 - V_f \quad (6)$$

de snubbingfactor g , gedefinieerd aan de hand van de snubbingcoëfficiënt f ,

$$g = \frac{2}{4 + f^2} [1 + e^{f\pi/2}] \quad (7)$$

de spanning σ_o de piekbrugsterkte met $g=1$ en $f=0$ die de maximale brugsterkte uitdrukt als het snubbingmechanisme inactief is,

$$\sigma_o = \frac{V_f \cdot \tau L_f}{2 d_f} \quad (8)$$

de scheurtip breuktaaiheid J_{tip} ,

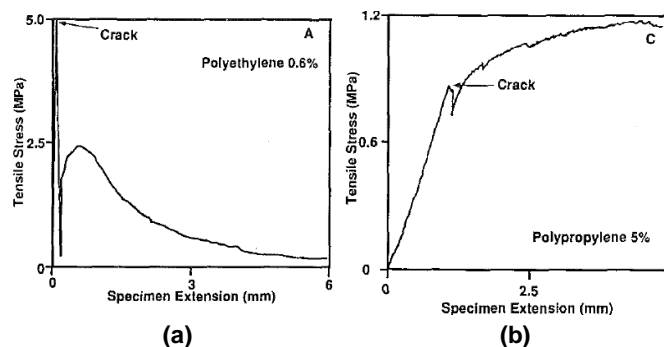
$$J_{tip} = \frac{E_c}{E_m} K_m \quad (9)$$

δ_a de scheuropeningparameter en c de straal van de vlakke scheur (lange as).

$$\delta_a = \frac{4K_m(1-\nu^2)}{E_m\sqrt{\pi}} \quad (10)$$

Hierbij is ν de kinematische viscositeit, E_m en E_c de E-modulus van respectievelijk de matrix en het composiet en K_m de matrixbreuktaaiheid.

Het model overschat de eerste-scheur-sterkte met ongeveer 21 % maar de theoretische piekbrugsterkte blijkt in het juiste gebied te liggen. De overschatting komt door de simplificatie van de scheuropening als een parabolische scheur.^[34] Enkele weergaven van de eerste-scheur-sterkte worden gegeven in Figuur 9. (a) toont een scheur en verweking, (b) daarentegen een versteviging. σ_{fc} is de eerste relatieve knik in het diagram.



Figuur 9: Enkele voorbeelden van de eerste-scheur-vorming^[27]

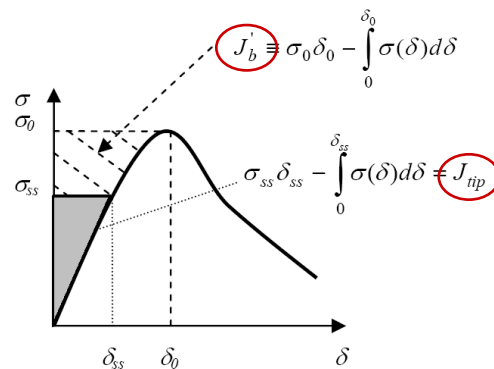
2.2.3.3. Voorwaarden voor versteviging

Om tot versteviging te komen moet er zich meervoudige scheurvorming voordoen. De matrix scheurt en de vezels nemen de lasten op zich waardoor de last dient te stijgen om de matrix op een volgende locatie te scheuren. Het criterium is de steady-state scheurvorming onder trek. Hierbij moet J_{tip} kleiner zijn dan de complementaire energie J'_b uit het $\sigma(\delta)$ -diagram (formule (11)).^[17] De definities van J_{tip} en J'_b worden weergegeven in Figuur 10.

Eerste voorwaarde:^[17]

$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_m} \leq \sigma_0 \cdot \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \equiv J'_b \quad (11)$$

σ_0 is de maximale treksterkte corresponderend met de scheuropening δ_0 . J_{tip} wordt gelijkgesteld aan 5 J/m² bij trekproeven.^[17]



Figuur 10: Het $\sigma(\delta)$ -diagram^[17] met de definitie van J_{tip} & J'_b

De vergelijking van J_{tip} kan als volgt gezien worden. Eerst is er een netto input van externe arbeid verminderd met de geabsorbeerde energie door de brugvorming van de vezels van 0 tot de steady-state scheurwijdte δ_{ss} . De absorptie gebeurt door de taaheid van de matrix aan de uiteinden van de scheuren, absorptie door ontbinding en slip tussen de matrix en de vezel aan de vlakken van de scheur. Voor scheurvorming dient de netto energie groter te zijn dan J_{tip} en deze is invariant met de scheurlengte. Dit is de definitie van steady-state scheurvorming.

Experimenteel werd aangetoond dat voor een PVA-vezel σ_0/σ_{fc} groter dient te zijn dan 1,45 opdat het een gesatureerd verstevigingsgedrag vertoont.^[28] Dit komt door een hoge neiging tot breuk, lage vezelsterkte en hoge hechtsterkte tussen twee vlakken. Dit zorgt voor een grotere variatie in de brugvormingscapaciteit. Een analoog argument geldt voor de PP-vezel. De vezelsterkte van de PP-vezel is lager en $\sigma_0/\sigma_{fc} > 2$ wordt voorgesteld.^{[17][35]}

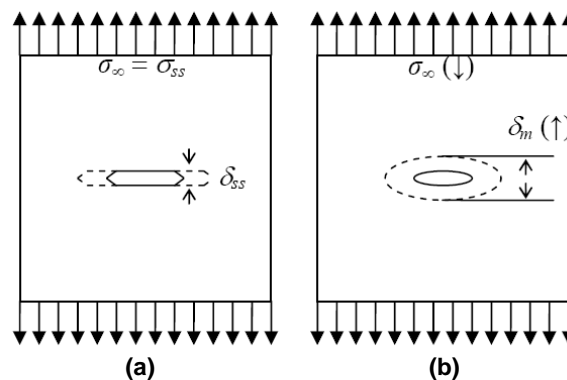
Ten tweede moet de trekweerstand van de matrix σ_c onder de maximum vezelbrugsterkte σ_0 blijven (formule (12)). De scheur zal zich vormen in de matrix en de vezels nemen de grotere last op.^[17]

Tweede voorwaarde:

$$\sigma_c \leq \sigma_0 \quad (12)$$

2.2.3.4. Steady-state scheurvorming

Als de voorwaarden voldaan zijn, zal er zich vanaf een defect in de matrix een platte scheur vormen die theoretisch oneindig door de matrix loopt. De scheuropening en de last blijven hierbij constant. De overbrugging van de vezel tussen de twee vlakken van de matrix neemt nu de last op zonder breken en afname van de kracht. Dit is een steady-state scheur (Figuur 11a). Verhogen van de last zal opnieuw een scheur tot gevolg hebben vanuit een ander defect in de matrix (cf. meervoudige scheurvorming). De vlakke scheuren zorgen voor een gecontroleerde scheurvorming met kleine scheurwijdtes. Bij belasting zullen de vezels de krachten trachten te overwinnen en zullen microscheurtjes gevormd worden wat uiteindelijk zal zorgen voor de meervoudige scheurvorming.^[17]



Figuur 11: Een steady-state vlakke scheur (links) & een Griffith scheur (rechts)^[17]

Het tegengestelde geval is een Griffith scheur (Figuur 11b), waarbij de spanning afneemt en een verwijding van de scheuropening zich voordoet. Enkel in de uiteindes is er wrijving met de matrix en lichte brugvorming die vermindert met opening van de scheur.^[17]

2.2.3.5. Spanningsscheurwijdte diagram

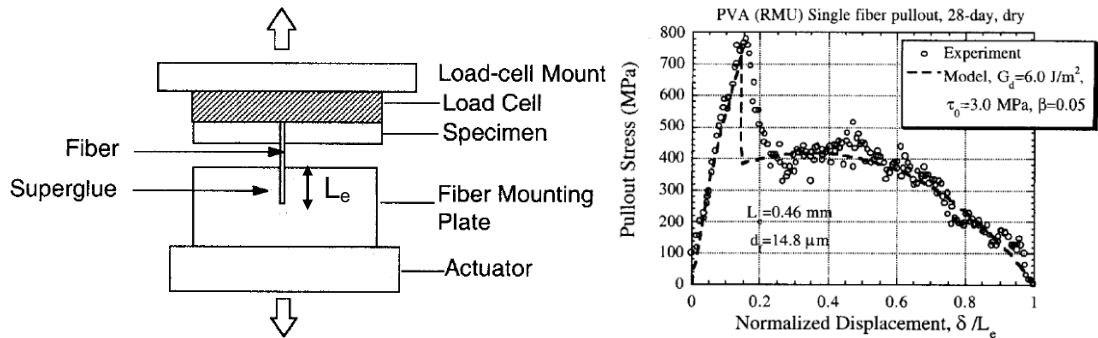
De $\sigma(\delta)$ -relatie beschrijft de overdracht van de kracht tussen een vezelbrug en diens scheuropening. De microstructuur wordt zo aan de macroschaal gelinkt. De $\sigma(\delta)$ -relatie komt rechtstreeks tussen in de formules (11) & (12) onder de vorm van σ_0 en het algemene verband $\sigma(\delta)$. De relatie oefent dus een belangrijke invloed uit op het verstevigingseffect. De relatie $\sigma(\delta)$ wordt bepaald uit proeven, de breukmechanica (loslaten van vezels) en kansrekening (random vezellocatie en vezeloriëntatie).^[17]

$$\sigma(\delta) = f(G_d, \tau_0, \beta, f, f', E_m, V_f, d_f, L_f, E_f) \quad (13)$$

De grootheden E_f , L_f en d_f kunnen met goede nauwkeurigheid berekend worden. De vezelbreuksterkte σ_{fu} , de sterkereductiefactor f' , de interface wrijvingskracht τ_0 , de chemische hechtsterkte G_d & de slip verstevigingcoëfficiënt β worden met een enkele uittrekking bepaald.^{[22][35][36]}

2.2.3.6. Vezeluittrekproeven

De vezeleigenschappen worden veelal bepaald door een enkele uittrekproef (Figuur 12). Met een rechtstreekse uittrekking van de vezel is het echter moeilijk om de vezels perfect recht in de matrix te plaatsen en deze plaatsing te behouden zonder de vezel te scheuren. Het is ook moeilijk de vezel zonder breuk vast te grijpen omdat er een grote spanningsconcentratie optreedt nabij deze grip. Een nieuwe techniek^[38] maakt gebruik van een analytische vergelijking die de gemiddelde lengte van uitpuilende vezels l^* relateert aan de hechteigenschappen.

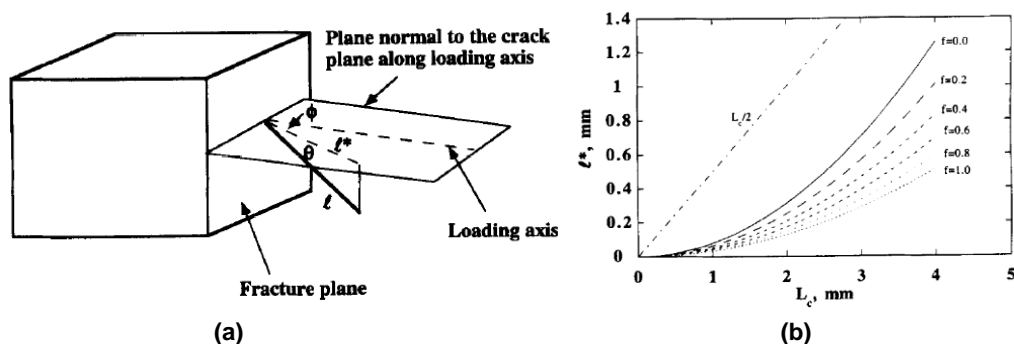


Figuur 12: Enkele uittrekproef en typische bekomen data^[37]

Vezels die breken hebben een uitpuilende lengte gelijk aan nul. Dit komt doordat de maximale vezelspanning zich ter hoogte van de scheur voordoet en er zo vezelbreuk is. Vezels die een ingebedde lengte L_e hebben kleiner dan de kritische lengte L_c (13) zullen uitgetrokken worden.^{[34][38]}

$$L_c = \frac{d_f \cdot \sigma_{fu}}{4 \cdot \tau} \tag{14}$$

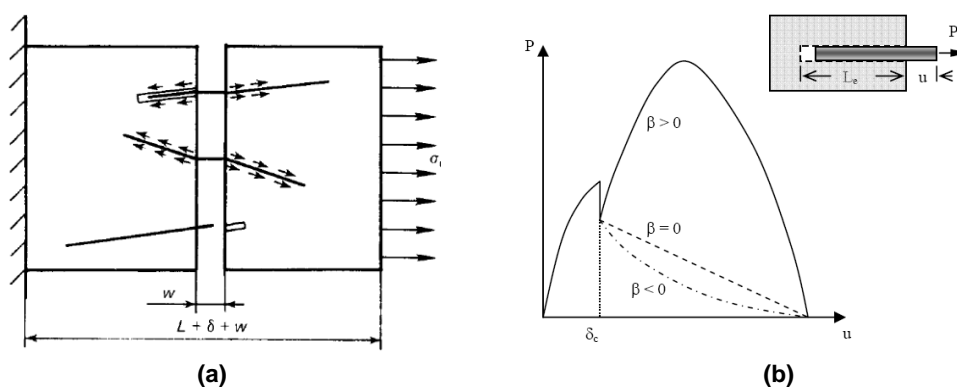
Bij random verspreide vezels zal de uitpuilende lengte variëren tussen 0 en L_c . Deze verdeling wordt uniform verondersteld zodat het mogelijk is een gemiddelde uitpuilende vezellengte te voorspellen met een gegeven hechtsterkte. Gehelde vezels hebben echter een hogere brugspanning en zo een kortere uitpuilende lengte (Figuur 13a). De uitpuilende lengte wordt bepaald aan de hand van 2D beeldvorming en de werkelijke lengte is dus groter. Dit verband wordt grafisch weergegeven in Figuur 13b. Hieruit kunnen via de bepaling van de gemiddelde uitpuilende lengte l^* de hecht karakteristieken bepaald worden.^[38]



Figuur 13: Uitpuilende lengte en grafische omzettingmethode^[38]

2.2.3.7. Vezeluittrekking

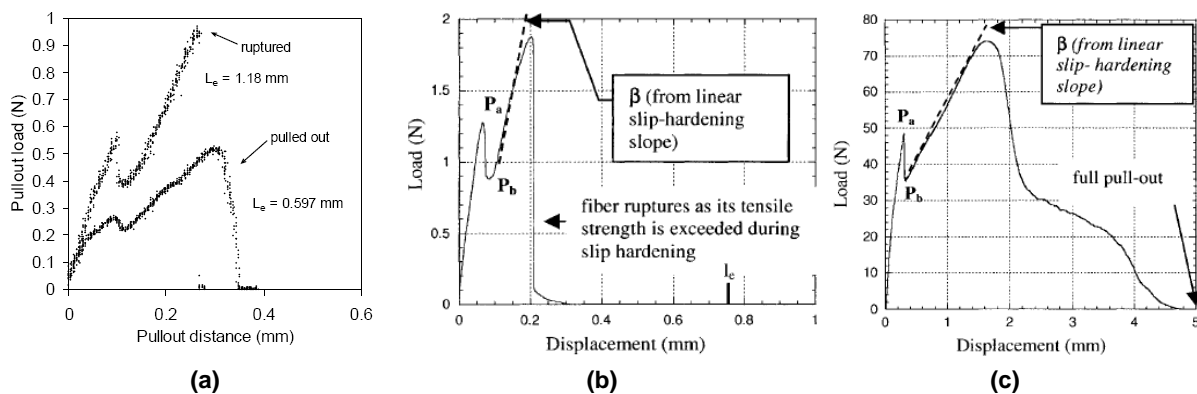
Zoals in Figuur 14a te zien is, kunnen vezels deels onthecht zijn in de matrix (boven), geheel dienst doen (midden) en volledig uitgetrokken worden en uitpuilen (onderaan). De volledige theorie wordt beschreven in Yang & Li (2008).^[17] Er wordt vertrokken van een enkele vezeluittrekking ten opzichte van de matrix met verschillende inbedlengte L_e en oriëntatie over het scheurvlak. Aan het einde van het onthechten is er sprake van een val in het Kracht/verplaatsings-diagram door een onstabele extensie van de tunnelscheur. Tijdens het onthechten kan de vezel breken als de last P de vezel treksterkte overschrijdt, wat vaak het geval is met PVA door de chemische binding tussen matrix en vezel.^[36] $\beta > 0$ beschrijft versteviging, $\beta = 0$ wrijving onafhankelijk van de slipafstand en $\beta < 0$ verweking (Figuur 14b).^[17]



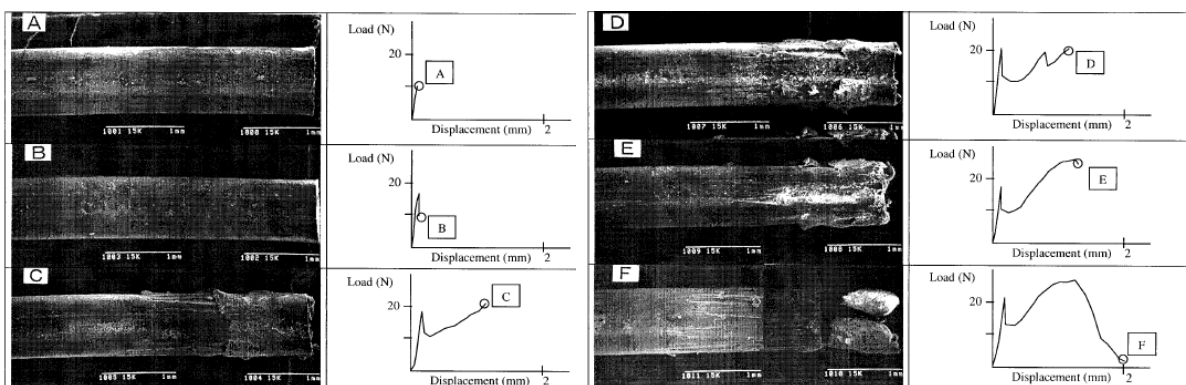
Figuur 14: Verschillende mogelijkheden bij trek (a)^[33] en $P(u)$ -diagram (b)^[17]

PP-vezels hebben geen uitgesproken verstevigingsgedrag, en dus $\beta \leq 0$. Na het onthechten van de kleinste inbedlengte zal de langste blijven zitten aangezien de belasting daalt. De vergroting van de scheuropening zal een uittrekking veroorzaken van de kleinste inbedlengte en de elastische verlenging van de langste inbedlengte is verwaarloosbaar. Bij een PVA-vezel is dat niet het geval en is er sprake van tweezijdige uittrekking. Zo kan bij een PVA-vezel de lange inbedlengte toch onthechten en zo een uittrekking veroorzaken langs beide zijden. Het verstevigingseffect is het gevolg van een schuur- en blokkeringseffect tijdens de slip in de matrixtunnel. De vezels worden namelijk ruw tijdens belasten.^[36] Als de inbedlengte klein is, wordt de vezel uitgetrokken, maar wanneer die groter wordt is er sprake van breuk (zie formule (14)).^[39]

Figuur 15 geeft enkele grafieken met de spanningsopbouw. Er vindt een onthechting van de vezel plaats (punt P_b) en 'Scanning Electron Microscope' SEM-observaties bevestigen dit. Er is geen vormverandering van de vezel. Na dit punt (opbouw naar de tweede piek) schuurt de vezel tegen de matrixtunnel en de vezel schilfert af (laagsgewijs of per fibril). De schilfers krullen in de tegengestelde richting van de krachtsas (blokkering) en dit gaat door tot de maximale waarde in het diagram bereikt wordt. De sectie verdunt over de inbedlengte en de vezel krijgt een conusvorm op het uiteinde. Daardoor verkleinen de inbedlengte en de wrijving tussen matrix en vezel. Zolang de inbedlengte groter is dan de kritische waarde, zal de vezel nog een lagere last kunnen opnemen en is er een analoog proces.^[36] Figuur 16 geeft de SEM-observaties en de opeenvolgende stappen in het proces.



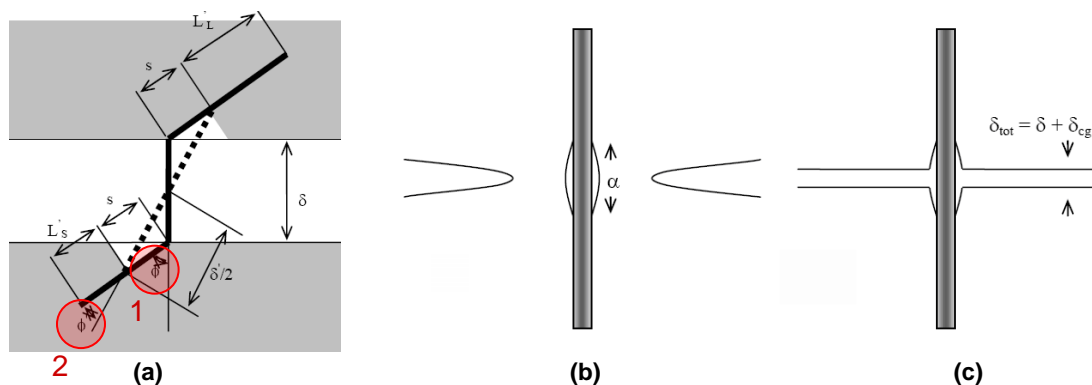
Figuur 15: Eenzijdige vezeluitrekking (a)^[39]; 0,749 mm (b)^[36] & 5 mm (c)^[36]



Figuur 16: Opeenvolgende stappen tijdens het onthechten^[36]

2.2.3.8. Enkele effecten op de vezeluitrekking

Indien er sprake is van een hellingshoek kan de matrix lokaal scheuren nabij het ondersteunend uiteinde, wat micro-afsplintering *s* genoemd wordt. De voorgestelde waarden voor *s* met PVA-vezels bevinden zich in het bereik van 0-28 μm . Steeds is deze gelimiteerd door de vezeldiameter d_f . De hellingshoek verkleint door de afsplintering waardoor de spanningsconcentratie verdwijnt. In Figuur 17a zal de hoek gevormd tussen de dikke lijnen, Φ (1), verminderen tot deze tussen de stippellijn en de dikke lijn (2). Hierdoor wordt de vezelbreuk uitgesteld en vergroot de scheuropening en verhoogt de piekbrugsterkte. De elastische verlenging van de vezel door afsplintering bedraagt slechts 2 μm en is verwaarloosbaar ten opzichte van de steady-state scheurvorming.^[17]



Figuur 17: Micro-afsplintering (a) en het Cook-Gordon effect (b & c)^[17]

Een ander mechanisme is het Cook-Gordon effect (Figuur 17b&c). Dit beschrijft een voortijdige onthechting van de vezel en matrix normaal op de as van de vezel door trekspanningen van een naderende scheurpropagatie. Dit zorgt voor een verlenging van de vezel over een afstand α_{cg} en een extra scheuropening δ_{cg} .^[40]

2.2.3.9. Optimalisatie

Synthetische vezels kunnen gemakkelijk aangepast worden in hun lengte, diameter, mechanische karakteristieken, oppervlaktebehandeling,... zodat de optimale performantie bereikt wordt met een zo laag mogelijke kost. Een zo groot mogelijke ductiliteit met een zo laag mogelijk volumepercentage aan vezels is gewenst. Ook kan de matrix aangepast worden door in te spelen op de afmetingen van de aanwezige defecten (start van de scheur) en hun distributie, alsook van de matrixbreuksterkte. De matrixtaaiheid kan aangepast worden door de W/C-factor, het volume, de grootte, het type granulaten, het gehalte aan vliegias,... te modifieren.^[16] Een hoog volume aan vliegias zorgt voor een lagere binding en lagere matrixtaaiheid.^[41]

2.2.3.10. Micromechanische karakteristieken: polyvinylalcohol vezels

Er dient 4-6 vol.% aan PVA-vezels ingemengd te worden om versteviging te manifesteren. Dit kan niet ingemengd worden omwille van de verwerkbaarheid. Om dit gehalte te verlagen kunnen de wrijvingskrachten verminderd worden door oppervlaktebehandeling. Dit kan bijvoorbeeld door de vezels te coaten met olie. 1,2 % olie gecoate vezel blijkt een optimaal ontwerp te zijn voor 2 vol.% PVA-vezels. PVA wordt met olie gecoat om het hydrofiele karakter deels teniet te doen.^[22] Anders zal de PVA-vezel scheuren in plaats van uitgetrokken te worden uit de matrix. Het hydrofiele karakter uit zich in de sterke chemische hechtsterkte met cementproducten door een hydroxylgroep in de moleculaire keten. Door de chemische hechtsterkte G_d zal het $\sigma(\delta)$ -diagram niet in de oorsprong starten maar naar boven geschoven zijn doordat er initieel meer binding overwonnen dient te worden. Door G_d zal de complementaire energie J'_b verminderen. Een uittrekproef voor een enkele vezel toont aan dat G_d een waarde heeft van 3-5 J/m².^[37] G_d daalt algemeen met verhoging van het aantal vezels per volume. Dit komt door een lossere poriënstructuur en dito lager te overwinnen sterkte. τ_0 bedraagt 2,93 MPa voor een onbewerkte PVA-vezel en 1,11 MPa voor een gecoate vezel.^[17]

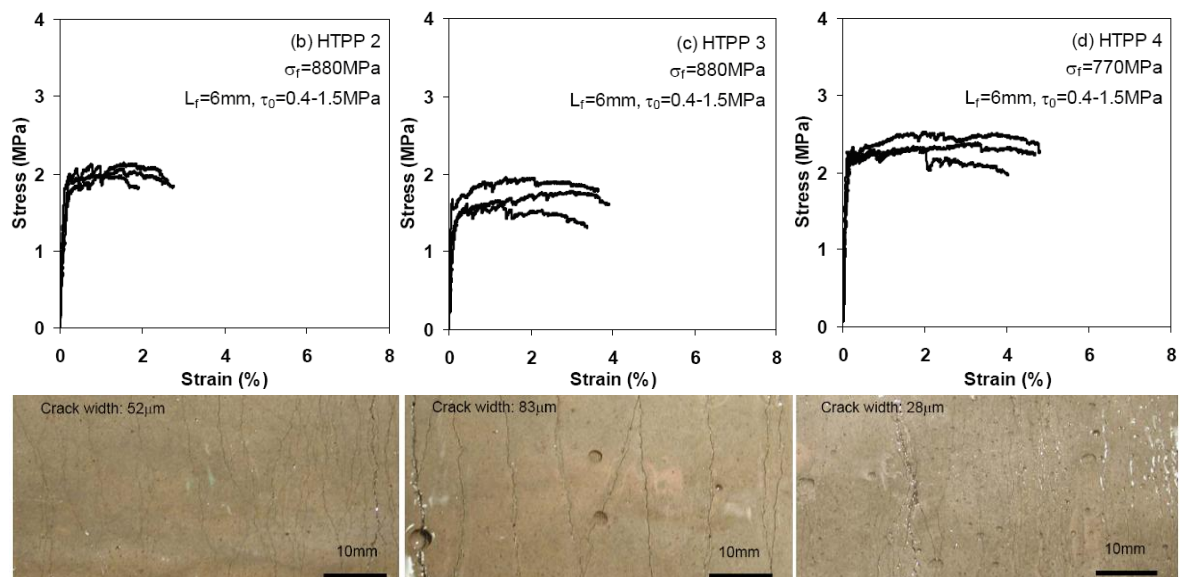
De experimentele waarden per testproefstuk zullen onderling verschillen door heterogeniteit van het mengsel en variatie van de brugvorming. De spanning zal ietwat variëren, maar de scheuropening blijft nagenoeg constant. Figuur 8 geeft typische waarden voor de $\sigma(\epsilon)$ & $\delta(\epsilon)$ relaties voor ECC en Tabel 4 de samenstelling van een typisch mengsel met PVA-vezels.^[17]

Tabel 4: Samenstelling PVA-ECC M45 [kg/m³]^[17]

V_f vol.%	Cement kg/m ³	Vliegias kg/m ³	Zand kg/m ³	Water kg/m ³	Spl kg/m ³	PVA kg/m ³	Totaal kg/m ³
2	571	685	456	332	6,8	26	2076,8

2.2.3.11. Micromechanische karakteristieken: polypropyleen vezels

Door het hydrofoob karakter en lage oppervlakteruwheid van een PP-vezel is G_d nagenoeg 0 J/m^2 en τ_0 gaat van $0,2\text{-}0,34 \text{ MPa}$.^{[36][42]} Wegens de lage treksterkte werd 'High Tenacity PP' ontwikkeld, oftewel HTPP. De vezel is opgebouwd uit verschillende lagen waarbij de buitenste laag de ruwheid verzorgt. De vezel wordt in België bijvoorbeeld geproduceerd door het bedrijf Redco.^[19] De hoge sterkte vindt zijn oorsprong in het centrale gedeelte van de vezel terwijl de uitwendige laag gemodificeerd kan worden naargelang welke eis opgelegd wordt. Verschillen in geometrie, dikte en ruwheid kunnen door additieven verwezenlijkt worden. Zo zal de binding met de cementmatrix wezenlijk veranderen. Hoe dikker de buitenste laag, hoe duurder evenwel het procedé en hoe hoger de sterktereductie. De algemene vezels bereiken een hoge sterkte van $800\text{-}850 \text{ MPa}$.^[18] Een langere lengte is voordelig voor vezels met een lage wrijvingshechting, zoals bij HTPP, om trekversteving op te wekken. Maar als nadeel komt hier de verwerkbaarheid op de proppen, alsook een slechte dispersie van de vezels. Yang (2008)^[17] beschouwde drie soorten HTPP-vezel van Redco, in Figuur 18 HTPP 2-3-4 (2 vol.%). τ_0 is in dit geval $0,4\text{-}1,5 \text{ MPa}$.^[17]



Figuur 18: Vergelijking^[17] verschillende HTPP van Redco

Voor HTPP 2-3-4 is er sprake van versteving met goede ductiliteit (2-6 %). HTPP 4 heeft evenwel de hoogste treksterkte en rekapaciteit, hoewel het de laagste vezelsterkte heeft. Dit komt door een sterkere binding met de vlakken van de matrix wat resulteert in een hogere brugsterkte en een grotere complementaire energie. De hogere binding met de interface uit zich in de scheuropening die voor HTPP 4 de kleinste ($28 \mu\text{m}$) is.^[17]

Er kan dus besloten worden dat de vezelsterkte op zich niet de enige factor is die het composietgedrag domineert. De synergetische interactie tussen vezel, matrix en interface is de sleutel tot optimaal composiet gedrag. Het ontwerpen is niet de som nemen van de verschillende onderdelen, maar holistisch op zoek gaan naar de beste combinatie van alle micromechanische componenten.^[17]

2.2.3.12. Hybride systemen

Als er vezels met hoge stijfheid gebruikt worden zoals staalvezels, wordt een lage rek maar wel een hoge treksterktecapaciteit verkregen. Hierbij zullen de scheuropeningen dus klein zijn. Aan de andere kant, met vezels met lage stijfheid zoals PVA-vezels, wordt een hoge rek maar een lage treksterkte en grote scheurvorming verkregen. Daarom kwam het idee een hybride^[34] vezel naar voor te schuiven die de goede kwaliteiten met elkaar combineert, waardoor er een verbetering in rek en treksterkte komt. PP-vezels kunnen ook gecombineerd worden met hennep^{[43][44]} en andere combinaties^[34] zijn ook mogelijk.

2.3. Autogene heling

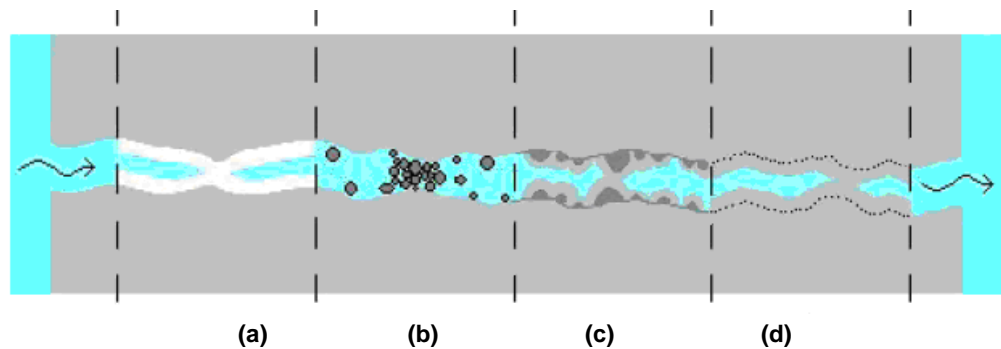
Zelfheling komt voor bij verschillende omgevingscondities en komt vooral voor in gescheurde regionen. Er wordt op de passieve heling ingespeeld door hulpmiddelen zoals microvezels voor scheurcontrole, aan te wenden.

Ideale zelfheling moet robuust zijn, hierbij wordt er verstaan:^[17]

- *Alomtegenwoordig*: altijd klaar voor activatie waar nodig bij scheurvorming;
- *Stabiel*: actief zijn gedurende de levensduur van de structuur met een vroege autonome detectie en met een massale efficiënte actie;
- *Economisch*: moet in grote hoeveelheden geproduceerd kunnen worden;
- *Betrouwbaar*: moet tegen alle soorten omgevingen bestand zijn;
- *Kwalitatief*: herwonnen transport- en mechanische eigenschappen moeten terug naar, of hoger dan het niveau voor de scheurvorming;
- *Herhalend*: en dit voor verschillende opeenvolgende schadevorming.

Verscheidene mechanismen zijn verantwoordelijk voor zelfheling.^{[45][46]}

- Kristallisatie (Figuur 19a), wat hieronder uitvoerig wordt beschreven;
- Vulling en blokkering van de scheuren door onzuiverheden, losse deeltjes, cementproducten of reactieproducten (Figuur 19b);
- Verdergaande hydratatie van ongehydrateerd cement op de vlakken blootgesteld door scheurvorming (Figuur 19c);
- Expansie door zwelling van Calcium-Silica-Hydraat C-S-H gel (Figuur 19d).

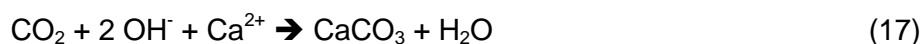
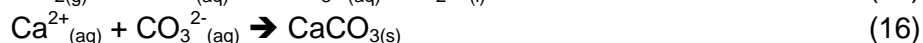
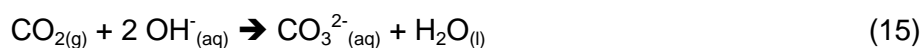


Figuur 19: Mechanismen verantwoordelijk voor zelfheling^[46]

De meest significante factor die zelfheling beïnvloedt, is de kristallisatie van calciumcarbonaat.^{[47][48]} Hierbij wordt een wit kristallijn materiaal gevormd dat de scheur dicht. De groei hiervan is afhankelijk van de scheurwijdte en de waterdruk, maar onafhankelijk van de samenstelling van het beton en het type water.

Bij onderzoek naar de stroming van water door gescheurd beton, was er een graduele reductie van de permeabiliteit met de tijd.^{[47][49]} Als hoofdoorzaak voor de geobserveerde zelfheling werd de vorming van calciumcarbonaat CaCO_3 als een reactie tussen calcium-ionen Ca^{2+} met koolstofdioxide CO_2 opgelost in water H_2O , naar voor geschoven.^[47] Dit zorgt voor een waterdichte structuur en een langere levensduur.

Als de pH van het water groter is dan 8 is het mechanisme voor CaCO_3 -kristalvorming:^[47]



Een pH tussen 7 en 8 geeft:^[47]



Aan de hand van resonantiefrequenties en vergelijking van stijfheden bleek het materiaal volledig hersteld na onderdompeling in water.^[50] Ook de buigsterkte kan volledig herstellen na een belasting op jonge leeftijd.^[51] De zelfheling van hoog performant beton wordt toegekend aan de verdergaande hydratatie van het cement. De stijfheid van de nieuwe kristallen ligt dicht bij de stijfheid van primaire C-S-H.^[50] De scheurwijdte bleek een beslissende factor te zijn om tot zelfheling te komen. Delen van ongehydrateerde cementpartikels zijn wijd verspreid doorheen de matrix. In beton met een lage W/C-factor kan dit zelfs oplopen tot 25 % of hoger. Dit kan gebruikt worden in de zelfheling.

2.3.1. Criteria voor zelfheling

Er zijn drie criteria nodig om zelfheling te manifesteren, namelijk de aanwezigheid van chemische bestanddelen, de blootstelling aan omgevingscondities en kleine scheurwijdtes.

2.3.1.1. Aanwezigheid van chemische bestanddelen

Er zijn steeds chemische bestanddelen noodzakelijk. Calciumcarbonaatvorming via formules (17) & (18) heeft bicarbonaationen HCO_3^- , en/of carbonaationen CO_3^{2-} en vrije calcium-ionen Ca^{2+} nodig.^{[47][48]} De hydratatie heeft voornamelijk ongehydrateerd cement C_3A nodig.^[52]

Scheurvorming zorgt voor de nodige diffusieve krachten die de vrije calcium-ionen naar de scheuroppervlaktes brengen en zo de vorming van herstelproducten in de aanwezigheid van water en opgeloste koolstofdioxide aanzwengelen. Deze neiging zorgt er dus voor dat de chemische bestanddelen steeds aanwezig zijn in de buurt van een scheur. De aanwezigheid van de chemische bestanddelen zal echter na verloop van tijd uitputten.

2.3.1.2. Blootstelling aan verschillende omgevingscondities

Verschillende omgevingscondities zijn mogelijk. Deze zijn bijvoorbeeld onderdompeling in water^{[17][53]}, pH-invloeden^{[47][48]}, nat/droog cycli^{[17][54][55]}, blootstelling aan chloriden^[25], temperaturen boven 80 °C^[49] en boven 300 °C^[52]. Water is nodig voor de oplossing van CO_2 en voor verdergaande hydratatie.

Er kunnen dus verschillende condities nagebootst worden. Zo is er het drogende karakter van wind en zon, regenwater dat zwavelhoudende materialen bevat (zure regen), afvloeiingen van bruggen gecontamineerd met chloriden (strooizout), vries en dooi in de winter, aanval van sulfaten en carbonatatie. Er kan ingespeeld worden op de temperatuur, zowel van water als lucht, de relatieve vochtigheid en de duur van verschillende condities. Ook het opleggen van een hydraulische gradiënt is mogelijk, wat bijvoorbeeld voorkomt bij waterleidingen. Temperatuursverschillen zijn vaak voorkomend in het watertransport, denk maar aan zonne-energie of energieopslag in het inerte beton tijdens zomers,...

2.3.1.3. Kleine scheuropeningen

De scheurvorming waarbij zelfheling nog optreedt zijn $5\text{-}10\ \mu\text{m}$ ^[56], $100\ \mu\text{m}$ ^[49], $150\ \mu\text{m}$ ^[17], $200\ \mu\text{m}$ ^[47], $205\ \mu\text{m}$ ^[57],... Deze waarden liggen ver uiteen. Wel kan er besloten worden dat er kleine scheuren nodig zijn.

Microvezels zorgen net voor deze voorwaarde, om een gecontroleerde scheurvorming te krijgen waarbij kleine meervoudige scheuren optreden. Algemeen blijft de scheurwijdte best onder $150\ \mu\text{m}$, mogelijk zelfs onder $50\ \mu\text{m}$, wat een betere waarde zal blijken. Deze kan gezien worden als een inherente materiaaleigenschap. Dit wordt besproken in 2.3.5.1.

2.3.2. Onderzoeksmethoden

De mechanische eigenschappen die onderzocht worden zijn de resonantiefrequentie, de trek-/buigstijfheid, trek-/buigsterkte & ductiliteit. Deze worden onderzocht met akoestische emissie technologie, uni-axiale trekproeven of buigproeven.

De transporteigenschappen omvatten de waterpermeabiliteit en de chloridediffusiviteit. Deze worden bestudeerd met een permeabiliteitstest en met een chloride indringingstest.

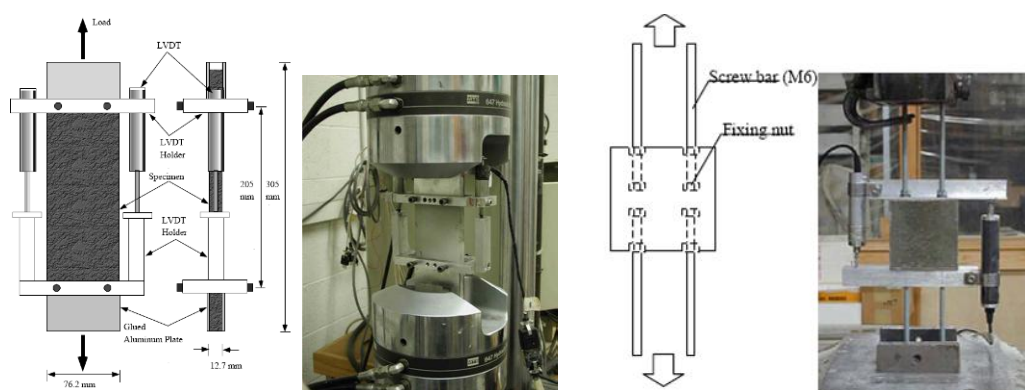
Verder kan er ook een chemische analyse van het scheurvlak gebeuren door 'Energy Dispersive X-ray Spectroscopy' (EDX) of 'Environmental Scanning Electron Microscopy' (ESEM) waarbij de chemische samenstelling van het gevormde product in de scheuren kan bepaald worden. De scheuren kunnen ook onderzocht worden met microscopisch onderzoek.

2.3.2.1. Resonantiefrequentie

De resonantiefrequentietest werkt met akoestische emissie technologie om de zelfheling te bestuderen. Deze test is gebaseerd op de ASTM C215-08 norm^{[50][57][58]} en beschouwt de variatie in de resonantiefrequentie voor en na zelfheling. Deze test kwantificeert niet de mate van zelfheling maar wel de relatieve zelfheling. De mate van herstel van mechanische of transporteigenschappen kunnen dus niet becijferd worden.^{[17][54]}

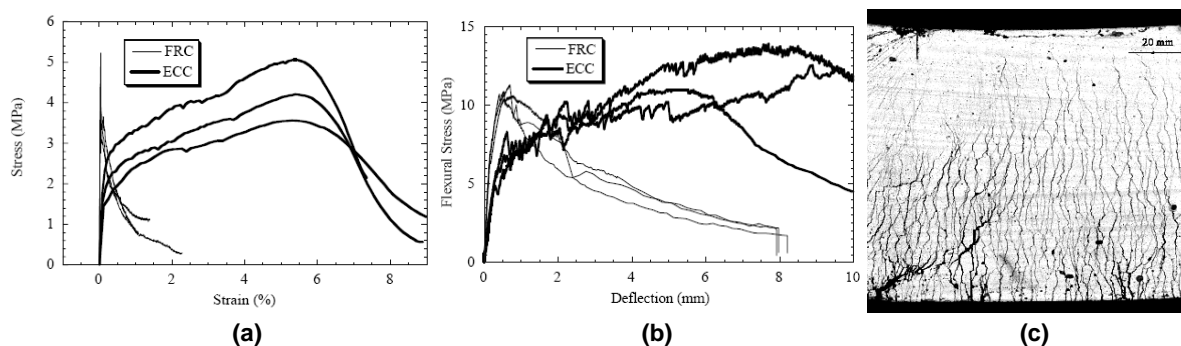
2.3.2.2. Trek- en buigproeven

Het proefstuk wordt eerst beschadigd tot een gewenste rek, waarna het ontlast wordt. Hierna wordt het stuk aan een al dan niet helende omgeving blootgesteld. Na deze periode wordt het proefstuk opnieuw belast om de mate van herstel te kwantificeren voor zowel de treksterkte, trekstijfheid als de rekcapaciteit. Ondertussen zorgt een servohydraulisch systeem voor een verplaatsingsgecontroleerde mode waarbij de belastingsnelheid laag gehouden wordt om een quasistatische belastingsconditie te simuleren.^{[17][23]} Enkele opstellingen worden weergegeven in Figuur 20.



Figuur 20: Enkele beschouwde uni-axiale trekproeven^{[23][17][45][45]}

Ook driepuntsbuigproeven en vierpuntsbuigproeven worden vaak gebruikt. Hiervoor wordt er verwezen naar paragraaf 3.2.5. Buiging geeft een ander scheurbeeld dan zuivere trek (Figuur 21a&b). De eerste scheur vormt zich bij een vierpuntsbuigproef waarna meervoudige scheurvorming optreedt. Van zodra de schade te groot wordt, zal één scheur zich verder openen (Figuur 21c).^[16]



Figuur 21: Diagram van een trekproef en een buigproef met een doorsnede^[16]

Aangezien bij het ontlasten de scheuren tot 15 % dichtn, worden alle scheuropeningen in onbelaste toestand opgemeten. Dit heeft geen invloed op de structurele eigenschappen van een gebouw in situ, waarbij scheurvorming onder belasting optreedt. Dit komt doordat de scheurwijdtes nagenoeg overeenkomen tussen deze beide gevallen (onbelast en in situ).^[17]

2.3.2.3. Waterpermeabiliteitstest

In sommige studies wordt een test met dalend verval of een constant verval gebruikt waarbij de mate van zelfheling onderzocht wordt door het monitoren van de stroming en de verandering van de permeabiliteitsconstante k in de tijd.^{[59][60]} Zelfheling komt tot uiting als de verminderde stroming door scheuren. Er wordt vertrokken vanuit de wet van Darcy (19) voor het debiet Q :^[5]

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{h}{L} \quad (19)$$

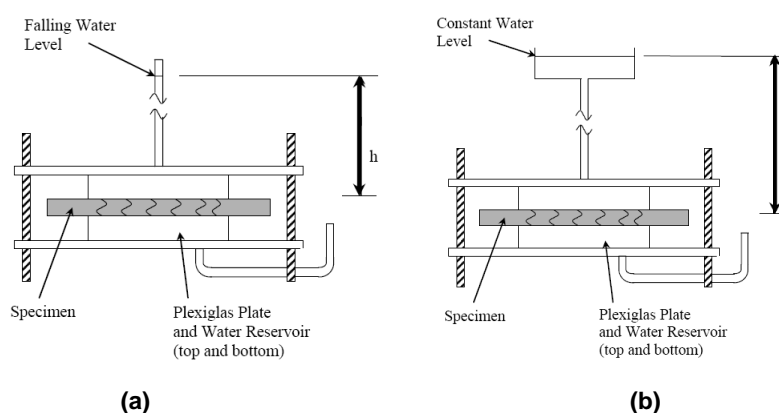
Vallend verval (Figuur 22a):

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot t_f} \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right) \quad (20)$$

Constant verval (Figuur 22b):

$$k = \frac{V \cdot L}{A \cdot h_0 \cdot t_f} \quad (21)$$

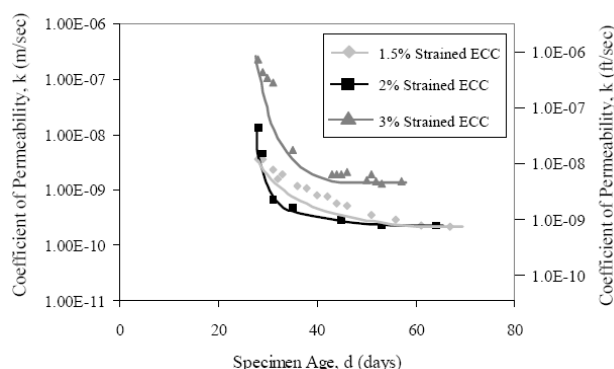
waarbij k de permeabiliteitsconstante, a de dwarsdoorsnede van de waterkolom, L de dikte van het specimen in de richting van de stroming, A de dwarsdoorsnede onderworpen aan stroming, t_f de testduur, h_0 de initiële waterstand, h_f de uiteindelijke waterstand en V het volume water dat door het proefstuk is gegaan.



Figuur 22: Waterpermeabiliteitstest met constant en dalend verval^{[17][26]}

Zelfheling ontstaat door het uitvoeren van een permeabiliteitstest, zoals in Figuur 23.^[61] Proefstukken worden 14 dagen voor het testen in water bewaard om een volledig gesatureerd proefstuk te verkrijgen.^[61] De randen van het specimen worden met een epoxyhars gedicht om een uni-directionele waterstroming te krijgen. De waterpermeabiliteit wordt dan gemeten in de onbelaste toestand. Er wordt een radicale daling van de permeabiliteit opgemerkt met verloop van tijd bij een constante scheurwijdte. Dit kan te wijten zijn aan een verdere saturatie en verdere densificatie van de matrix maar dit is hier niet het geval aangezien de proefstukken in water bewaard werden en al volledig gesatureerd waren (er kunnen evenwel nog luchtholtes aanwezig zijn). Hierdoor is er weinig sprake van verdergaande hydratatie van de cementpartikels. Een glimp in de juiste richting is de vorming van een wit residu in de scheuren gedurende de test.

In de 14 dagen voor de test was er geen sprake van zelfheling en enkel bij de proefstukken die deels ondergedompeld waren was er aan het oppervlak van het proefstuk matige zelfheling. Dit komt door de oplossing van CO₂ in het oppervlaktewater. Oppervlakteanalyse (EDX) toonde aan dat de kristallen in de scheuren voornamelijk calciumcarbonaat waren. Om zelfheling en de formatie van calciumcarbonaat te stimuleren moet dus een stroming met carbonaten en bicarbonaten aanwezig zijn (de eerste voorwaarde van aanwezigheid van de nodige chemische bestanddelen).^[61] Deze proef stimuleert dus zelfheling. Ook zal blokkering van de scheurvlakken ervoor zorgen dat de permeabiliteit daalt.^[61]



Figuur 23: Zelfheling tijdens het uitvoeren van een permeabiliteitstest^[61]

Hydratatie zorgt niet alleen voor een verschil in permeabiliteit. Ook het oplossen en herlokaliseren van gehydrateerde stoffen zorgt voor een verlaging van de stroming.^[62] Er moet opgelet worden bij het gebruik van permeabiliteitstesten indien enkel de instroming opgemeten wordt zonder de uitlaat. De instroming bevat ook het opvullen van de poriën.^[62]

Net door de blokkering van de scheur door hydratatieproducten, brokken, e.a., moeten de bekomen resultaten met de nodige voorzichtigheid en kritische zin bestudeerd worden.

De stroming van vloeistof doorheen de scheuren is afgeleid van de theorie van de parallelle-plaat-stroming van een onsamendrukbare vloeistof en schaalt zich met de derde macht van de scheurwijdte (naar Tsukamoto, formule (22)).^{[38][47][53]}

$$k = \frac{a_g \cdot I \cdot l_s \cdot g}{12 \cdot \nu} \cdot w^3 \quad (22)$$

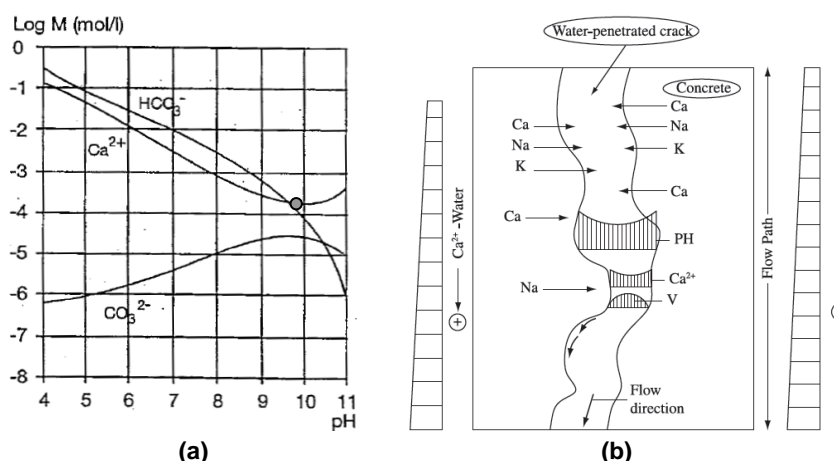
met w de scheurwijdte, a_g een stromingscoëfficiënt die de gladheid van het scheuroppervlak weergeeft ($0 < a_g \leq 1$), I de drukgradiënt (h/d_s), h de hoogte van de vloeistofkolom aan de inlaatzijde, d_s de lengte van de scheur in de stromingsrichting, ν de kinematische viscositeit, g de graviteitconstante en l_s de lengte van de scheur normaal op de stromingsrichting. De stroming door een scheur is niet die van een parallelle stroming aangezien er sprake is van macroruwheid, variatie in de wijdte langs de scheur, adhesie en cohesie.^[47] Vandaar het gebruik van de parameter a_g . Deze ligt tussen 0,04 en 0,53.^[47] De permeabiliteitscoëfficiënt is functie van w^3 , daarom is er slechts één scheur met maximale scheurwijdte aan de instroomzijde dominant.^[45]

2.3.3. Invloed van en op de nodige chemische bestanddelen

2.3.3.1. Precipitatie van calciumcarbonaat

Thermodynamisch gezien zal de precipitatie van calciumcarbonaat hoger zijn met hogere watertemperatuur, hogere pH-waarde en dalende partiële druk van CO_2 in het water.^[47]

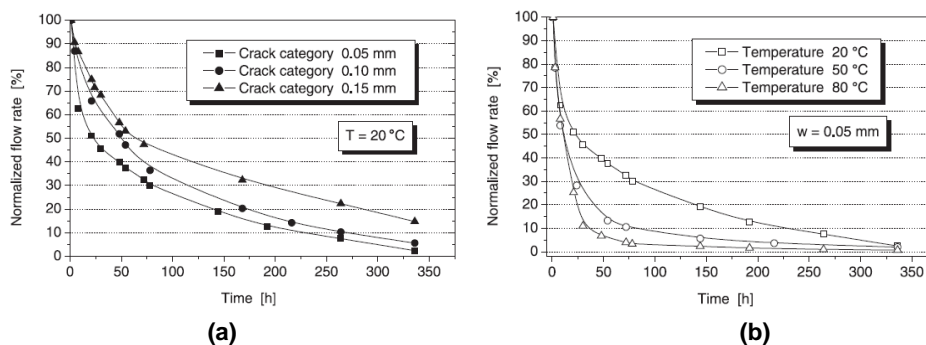
Zoals te zien is op Figuur 24a, bestaat er een optimale omgeving voor de precipitatie van CaCO_3 bij een pH van 9,8 waar er een minimum aan Ca^{2+} nodig is om de reactie te doen optreden. Het optimale geval ligt tussen de pH van beton (13,5) en deze van water (7) en het is niet duidelijk waar deze pH optreedt (Figuur 24b). Wanneer er een stroming van water is met CO_2 er in opgelost, zal deze Ca^{2+} en C-S-H vrijmaken uit de matrix en zo de pH van het water doen stijgen. In de initiële fase is de kinetische groei van de kristallen oppervlakteafhankelijk zolang er genoeg Ca^{2+} in de scheurwanden voorradig is. Als Ca^{2+} verbruikt is, is de kristalvorming diffusieafhankelijk aangezien Ca^{2+} moet getransporteerd worden uit het binnenste van het beton.^{[47][63]} De vorming van CaCO_3 komt dus voor het grootste deel voor tussen 3-5 dagen. De groei van de kristallen is afhankelijk van de scheurwijdte en de waterdruk.^[47] De Ca^{2+} diffusiesnelheid neemt af met de tijd door de vorming van zelfhelende producten.^[45]



Figuur 24: Evenwichtsconcentraties bij saturatie als een functie van de pH^{[47][63]}

2.3.3.2. Watertransport

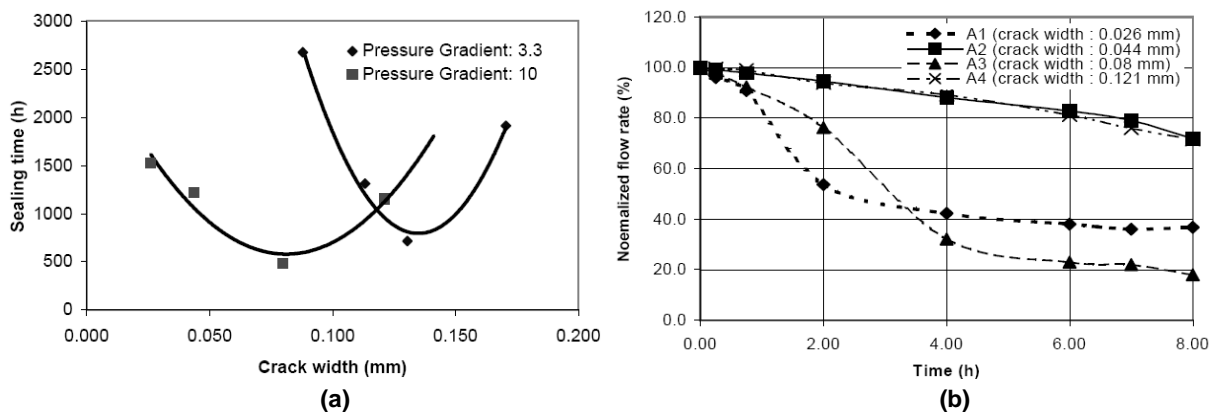
Permeabiliteitstesten tonen dat het watertransport groter is voor grote scheuren dan voor kleine scheuren (Figuur 25a). Het is net dit watertransport dat instaat voor de regeling en aanwezigheid van de chemische bestanddelen. Het transport doorheen het beton neemt toe met toenemende temperatuur en dit ook met toenemende scheuropening. De viscositeit en de densiteit van water dalen namelijk met stijgende temperatuur. De combinatie van beiden in de Hagen-Poiseuille wet zorgt voor een niet-lineaire toename met de scheurwijdte. Een scheurwijdte van 50 μm heeft voor 80 °C de meeste heling ten opzichte van 50 °C en 20 °C (Figuur 25b).^[49]



Figuur 25: Afname van de stroming bij verschillende scheurwijdtes en temperatuur^[49]

Als water door scheuren gaat, zal CaCO_3 afgezet worden op de scheurvlakken. Deze vorming is initieel sterk en verklaart de snelle daling van de permeabiliteit. Na de vorming van CaCO_3 is het loslaten van Ca^{2+} -ionen gereduceerd en vormt CaCO_3 dus trager.^[53] Ook is er initieel sprake van luchtholten en poriën die opgevuld worden.

De kleine scheuren helen het meest en het snelst, ook al is de stroming klein. Daarom zal de formatie van CaCO_3 traag gaan aangezien Ca^{2+} trager afgegeven wordt. Aan de andere kant, bij een grote scheurwijdte, zal de formatie net hoog zijn. Maar doordat een deel van het CaCO_3 door de hoge stroming weggespoeld zal worden zullen wijdere scheuren een langere periode nodig hebben om te helen. Er bestaat een optimum tussen beiden (Figuur 26a).^[53]



Figuur 26: Optimum scheurwijdte voor heling met een hydraulische gradiënt^[53]

Voor een scheur van 80 μm daalt de stroming tot 18 % van de initiële waarde. Voor 44 μm en 121 μm is dat 72 % (Figuur 26b). Dit betekent dat voor een gegeven drukgradiënt, er een optimale scheurwijdte is voor dewelke de depositie van calciumcarbonaat maximaal is en daarbij zal de scheur totale heling vertonen met een minimum aan tijd.^[53]

Bij proefstukken met een grote scheurwijdte daalde de permeabiliteitsconstante niet noemenswaardig. Dit duidt erop dat de vorming van calciumcarbonatkristallen in de wijdere scheuren niet bijdraagt tot het zelfhelend mechanisme. De kristallen kunnen niet over de grote scheurwijdte naar het andere scheurvlak gaan en kunnen zo niet voor een verzegeling zorgen.^[45]

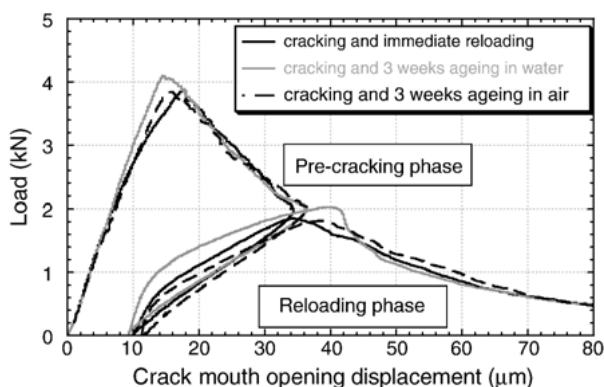
2.3.3.3. Ouderdom van het beton, cementgehalte

De hoeveelheid zelfheling die optreedt, daalt met de leeftijd van het beton bij scheurvorming. Dit komt doordat er meer primaire hydratatie (C-S-H) is opgetreden.^{[46][51]} Hoe meer ongehydrateerd cement, hoe meer mogelijkheid tot zelfheling. De invloed van het cementgehalte is verwaarloosbaar op latere leeftijd.^[64] De hoofdvoorwaarde voor zelfheling op jonge leeftijd is water. Dit zorgt voor een verdergaande hydratatie van de ongehydrateerde cementpartikels en zorgt voor een oplossing en uitloging van calciumhydroxide aan het scheuroppervlak van de cementmatrix om de zelfhelende producten te vormen. De hydratatie zorgt dus voor de vorming van de C-S-H gel. Op oudere leeftijd is ook koolstofdioxide nodig om de vorming van carbonaatkristallen te stimuleren. Bovenstaande wordt bevestigd in de literatuur. Chemische analyse van het geheele materiaal bij jong beton geeft een samenstelling van CaCO_3 (kristallisatie) en van Ca(OH)_2 (verdergaande hydratatie). Bij ouder beton neigt dit enkel naar CaCO_3 .^[46]

2.3.3.4. Water/cement factor

Voor jong beton geldt dat hoe hoger de W/C-factor, hoe meer heling er zich voordoet. Er is namelijk meer water beschikbaar voor hydratatie van de gescheurde delen. Op oudere leeftijd oefent de W/C-factor minder invloed uit, omdat er minder verdergaande hydratatie is.^[64] Hoge-sterkte beton heeft een lage W/C-factor van ongeveer 0,2 om op een grote hoeveelheid ongehydrateerd (50-60 %) cement te kunnen rekenen.^[65]

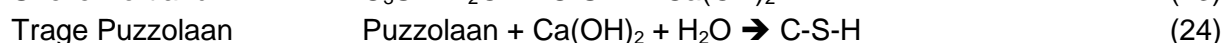
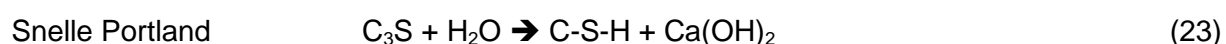
Water blijkt een nodige factor in de zelfheling van het materiaal. De heling in lucht is vrijwel nihil. De stijfheid neemt in het algemeen toe met het aantal dagen in de watertank. De nieuwe producten die over de scheuren heen gevormd worden, zijn C-S-H (verdergaande hydratatie). De stijfheid van deze kristallen is nagenoeg gelijk aan deze van de cementproducten waardoor er een compleet herstel bewerkstelligd wordt. De piekkracht bij het herbelasten na curing in water is groter dan deze bij het onmiddellijk herbelasten (Figuur 27). Deze winst blijft onder de initiële eerste-scheur-sterkte. Dit komt doordat de gevormde kristallen niet de complexe microstructuur kunnen vormen die de sterkte van het materiaal geeft, want deze bestaat uit onderlinge verbindingen tussen C-S-H. Dit zorgt voor een zwakke zone, zeker tussen de nieuw gevormde kristallen en de basiskristallen.^[65]



Figuur 27: Kracht/scheurwijdte diagram van hoge-sterkte beton na 3 weken curing^[65]

2.3.3.5. Puzzolane toevoegingen

Vliegas is het residu uit de rookgassen van de steenkoolindustrie en elektriciteitsindustrie. De sterkteontwikkeling in het beton komt door de vorming van puzzolane C-S-H door de reactie van SiO_2 (puzzolaan) en Ca(OH)_2 (klinkerreactie (23)).^[66] Op zich heeft de vliegas geen hydraulische eigenschappen, maar zal in aanwezigheid van vocht reageren met Ca(OH)_2 en bestanddelen vormen die wel hydraulische eigenschappen bezitten (puzzolane activiteit (24)). Het algemeen effect van vervanging van cement door vliegas is dat de druksterkte en de porositeit dalen.^[41]



Een hoeveelheid vliegas helpt zelfheling door de puzzolane activiteit. Deze activiteit zal lang duren doordat vliegas in beton een hoge houdbaarheid heeft. Deze reactie kan ook overal in het beton optreden en zo voor een veiligheid zorgen aangezien de scheuren eerder waar kunnen optreden. Aangezien vliegas na 28 dagen blijft hydrateren, kunnen deze producten de microstructuur veranderen, de scheuren dicht en de levensduur van de structuren verlengen. De C-S-H gel staat in voor het sluiten van de microscheuren. De mate van zelfheling via vliegas hangt af van de hoeveelheid aan ongehydrateerde vliegas en Ca(OH)_2 .^[41] Zelfheling van autonome krimp-scheuren stijgt met de fractie aan vliegas.^[67]

Onderzoek naar verschillende gewichtsprocenten aan verschillende puzzolane materialen (0, 10, 20 & 30 wt.%) in jong beton leverde op dat 10 en 20 wt.% meer heling postuleerde. Sommige proefstukken herstelden tot 85 % van de originele sterkte.^[68]

Vervanging van cement door vliegas zorgt ook voor een verlaging van de scheurwijdte. G_d daalt namelijk bij vervanging van cement door vliegas en dat resulteert in een lagere stijfheid voor de brugvorming en dus ook van de scheurwijdte.^[17]

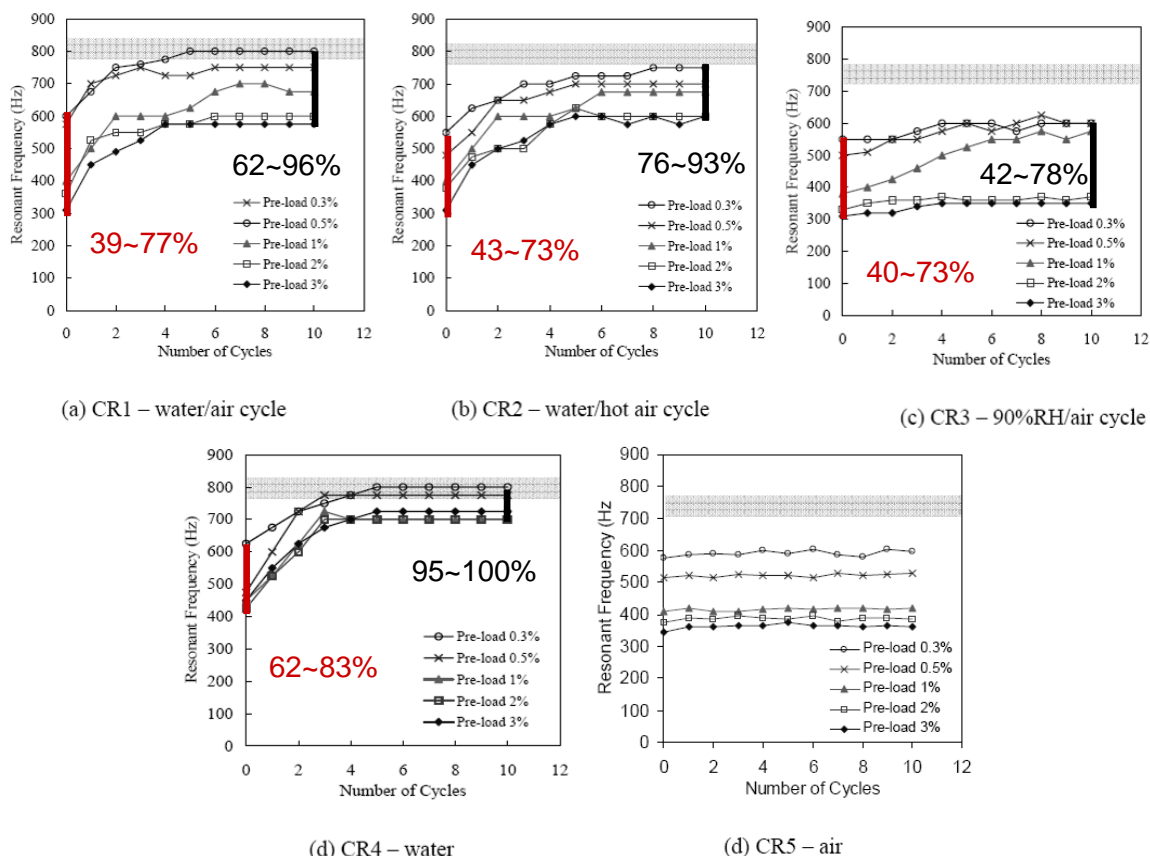
2.3.3.6. Kalksteenmeel

Ongebluste kalk, CaO , reageert in contact met water tot Ca(OH)_2 wat op haar beurt kan reageren met CO_2 om CaCO_3 te vormen. In de aanwezigheid van CaO stijgt de pH, wat leidt tot een andere vorm van C-S-H, wat de porositeit doet stijgen en zo de sterkte doet dalen.^[68] Toevoeging van kalksteen gaf een licht schadelijk effect op de heelsterkte in water.^[64]

2.3.4. Invloed van en op de omgevingscondities

2.3.4.1. Verschillende cycli

De volgende figuren tonen de mate van zelfheling via de resonantiefrequentietest bij jong beton (Figuur 28). De gearceerde zone geeft de resonantiefrequentie weer voor ongescheurde controleproefstukken.^{[17][69]}



Figuur 28: Resonantiefrequentietest bij verschillende omgevingscondities^{[17][54][55]}

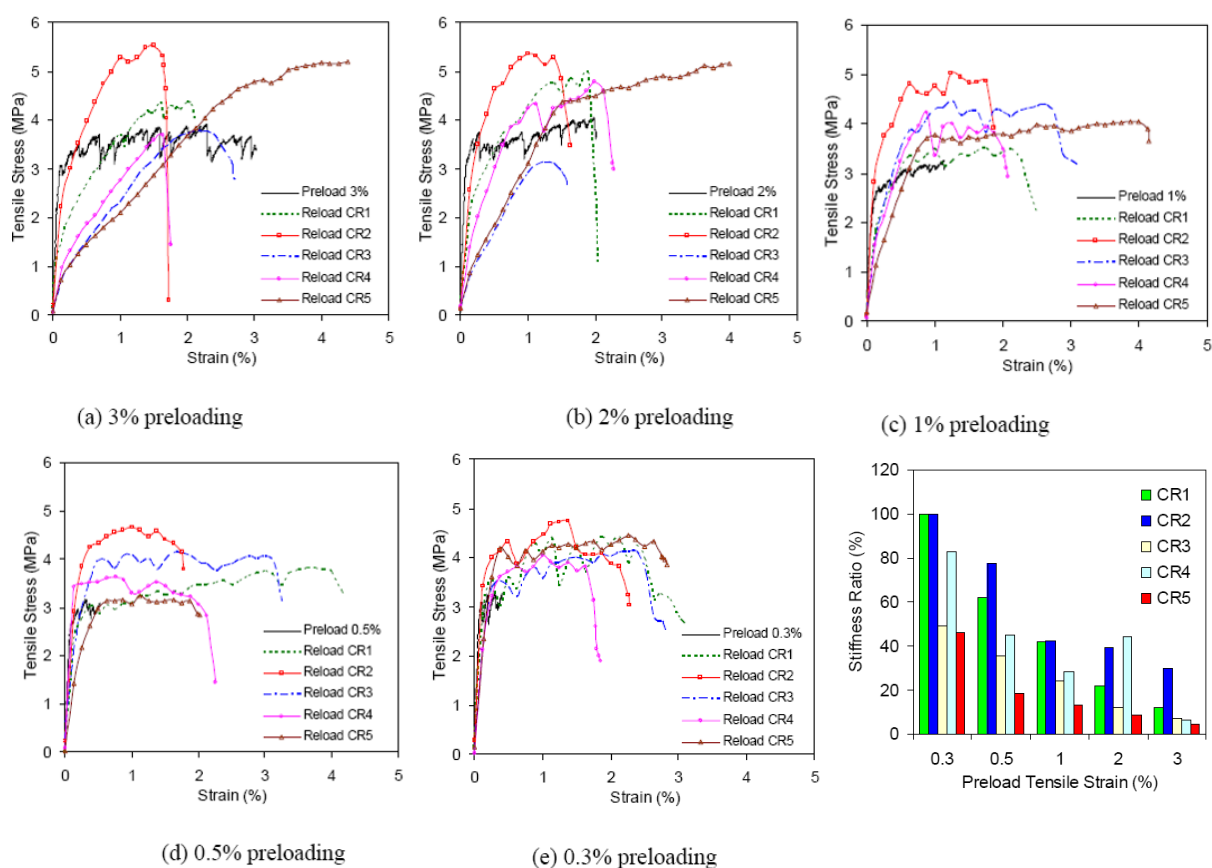
In Figuur 28 wordt de resonantiefrequentie gegeven in functie van het aantal cycli opgelegd. CR1 is een water/lucht cyclus, CR2 een water/hete lucht cyclus, CR3 een 90 % relatieve vochtigheid/lucht cyclus, CR4 een onderdompeling in water en CR5 bewaring in lucht. Op de grafieken werd steeds het percentage weergegeven ten opzichte van het referentiestuk.

Bij nat/droog cycli (1 dag in water, 1 dag in lucht) is het mogelijk dat er zich volledig herstel voordoet. De resonantiefrequentie blijkt te stagneren na 4-5 cycli met nagenoeg volledig herstel ten opzichte van de controlestukken die dezelfde cycli volgden.^{[17][54][55]}

Bij volledige onderdompeling (CR4) is zelfs totaal herstel waarneembaar voor proefstukken onderworpen aan hogere trekrekken. Voor CR3 was het herstel gelimiteerd. Blootstelling aan lucht (CR5) gaf geen verandering met cycli en geen heling. Dat lucht geen invloed heeft, komt doordat CO_2 in gasvorm niet reageert met $\text{Ca}(\text{OH})_2$.^{[17][64]}

Indien de percentages ten opzichte van het gearceerd vlak in Figuur 28 vergeleken worden, is de voorlopige volgorde van helling: $CR4 > CR1 \sim CR2 > CR3 > CR5 \sim 0$

Er dient opgemerkt dat onderdompeling in water eigenlijk voor een gewichtstoename zorgt en zo ook voor een verhoging van de resonantiefrequentie. Dit zelfs ten opzichte van de referentiestukken die de zelfde cycli hebben ondergaan. Dit komt omdat de scheur water opneemt en ook daar extra water vertoef. Een resonantietest geeft enkel een indicatie van de mate van zelfheling, geen kwantiteit. Daarom moet er een uni-axiale trekproef uitgevoerd worden om het werkelijk herstel in trekstijfheid, -ductiliteit en -sterkte te bestuderen.^[17] Deze worden weergegeven op Figuur 29 waarbij de residuele rek niet opgenomen is.



Figuur 29: Uni-axiale trekproef bij jong beton onder verschillende condities^[17]

De helling van de curve (E-modulus) van een referentiestuk toont de stijfheid dat het materiaal zou hebben moest het niet gebroken zijn. De helling van de curve bij de herbelasting van een gescheurd proefstuk in luchtcondities CR5 kan beschouwd worden als de stijfheid van het ongeheelede materiaal (nauwelijks winst in stijfheid). De stijfheid is algemeen gedaald door de vorming van microscheuren. Hoe hoger de opgelegde initiële schade, hoe meer deze reductie bedraagt.^[17]

Uit de data blijkt dat CR2 het hoogste herstel aan stijfheid vertoont en CR5 de laagste. Onder lage rek en dus weinig initiële schade herstelt het materiaal volledig bij CR1 en CR2, maar vanaf hogere rek is enkel CR2 van belang. Dit komt door een betere hydratatie bij een hogere temperatuur.^[17]

CR4 vertoont nu niet de grootste heling en het effect bij resonantiefrequentie hangt dus af van de interne damp en het excessieve water (via de scheur). Er zijn ook moleculaire absorptie aan de poriënwallen, capillaire zuigkrachten en interlayer zwelkrachten in nanoporiën, maar deze zijn ook aanwezig in de referentiestukken. C-S-H bestaat uit laminaire lagen met geabsorbeerd water ertussen. De zwelkrachten nemen toe met toenemende saturatie van water. De afstotende krachten duwen de laminaire lagen uit elkaar en de cohesieve krachten van de hydratatieproducten verminderen. De watermoleculen verminderen de oppervlakte-energie van de gehydrateerde producten en de van der Waals bindkrachten. Daarom zorgt een hogere graad aan saturatie voor een reductie aan stijfheid van het natte proefstuk.^[17]

Het besluit is: $CR2 > CR1 > CR4 > CR3 > CR5 \sim 0$

Alle proefstukken krijgen een uiteindelijke rekcapaciteit die beduidend hoger ligt dan die van normaal beton. CR5 heeft de hoogste en CR2 de laagste rekcapaciteit (Figuur 29a), welke een rechtstreeks effect is van de hogere temperatuur en zo de grotere hydratatie. De toename in matrixscheursterkte verhindert de scheurvorming en de sterke binding tussen vezels en matrix zorgt dan weer voor vezelbreuk. Deze hebben een negatieve impact op de ontwikkeling van meervoudige scheurvorming en dat manifesteert zich in een lagere trekductiliteit.^[17]

De treksterkte is steeds hoger bij herbelasting ten opzichte van de eerste belasting wat een resultaat is van de verdergaande hydratatie in het beton op jonge leeftijd. CR2 is hierbij weer het buitenbeentje met hogere waarden, aangezien de hydratatie versneld is.^[17]

Microscopische observaties van het witte residu aan de scheuropeningen geeft vooral calcium als basismateriaal op. Uit de hoeveelheden CaO en CO₂ kan een schatting gegeven worden van de hoeveelheid CaCO₃, maar doordat er een overvloed is aan CaO (stoichiometrisch meer dan voor de vorming met CO₂ van CaCO₃), blijkt er ook Ca(OH)₂ te bestaan. Daarom is het herstelproduct op jonge leeftijd een samenstelling van CaCO₃ (kristallisatie) en van Ca(OH)₂ (verdergaande hydratatie).^[17]

2.3.4.2. Temperatuur

Proefstukken onderworpen aan een hogere temperatuur (55 °C) herstellen niet volledig. Dit komt omdat vocht verdampt vanuit de proefstukken. Zo stapelt stoomdruk zich op in de poriën wat resulteert in interne beschadiging en potentiële microscheuren. Proefstukken onderworpen aan hogere temperaturen ten opzichte van controleproefstukken die aan luchttemperatuur onderworpen waren, hadden een hogere uiterste treksterkte en een lagere rekcapaciteit. Door de hogere temperatuur migreert de damp uit de specimens in een proces dat op het stoomproces lijkt. Hierbij wordt de hydratatie van ongehydrateerde cement en vliegias versneld, wat resulteert in een hogere matrixtaaiheid en sterkere binding van vezels met de cementmatrix.^{[17][54][55]}

2.3.4.3. Relatieve vochtigheid

Enkel bij volledige onderdompeling in water is er sprake van zelfheling. De relatieve vochtigheid heeft geen invloed op de zelfheling. Drie maanden met 95 % RV leveren zelfs geen zelfheling op bij jong beton (20; 27,5; 48 en 72 u scheuraanbreng).^{[46][51]} Een omgeving van 95 % RV gaf 85 % minder helende sterkte dan heling onder water.^[64]

2.3.4.4. Chloriden

Blootstelling aan chloriden is een belangrijk gegeven in een zeeomgeving. Om dit te onderzoeken werden proefstukken bewaard in een 3 % natriumchloride NaCl-oplossing. Ten opzichte van proefstukken die niet in de oplossing bewaard werden, daalde de eerste-scheur-sterkte, vergrootte de scheurwijdte maar bleef de ductiliteit en de meervoudige scheurvorming analoog. Dat de sterkte lager uitviel komt doordat chloriden voor een grotere porositeit zorgen wat op haar beurt komt doordat $\text{Ca}(\text{OH})_2$ uit de matrix loogt en zo de matrix/vezel hechtsterkte vermindert. Ook G_d en τ_0 verminderen na blootstelling aan chloriden. Dit samen zorgt voor een verhoging van de scheurwijdtes.^[25]

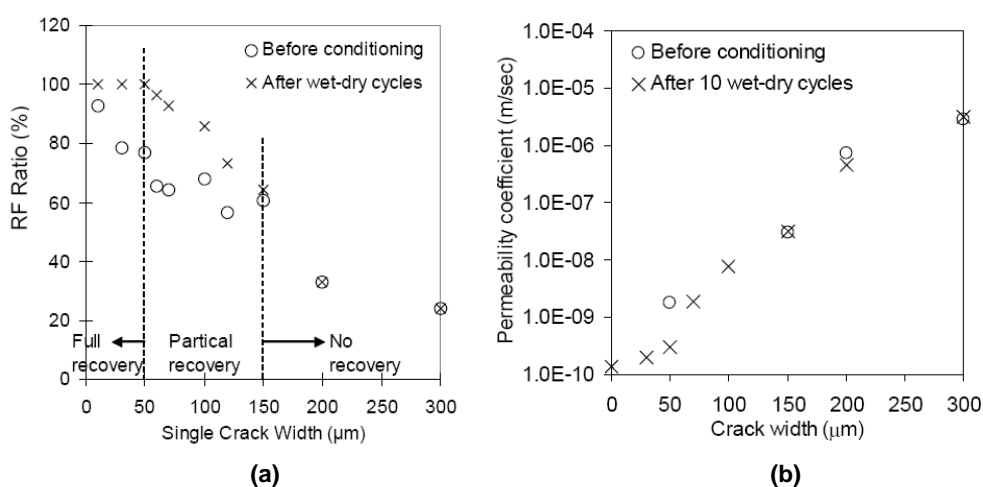
Door de lage W/C-factor en de ongehydrateerde vliegashuis, kan heling optreden. Dit gebeurde ook met de proefstukken in de NaCl-oplossing en relatief gezien was de heling groter. Chloriden kunnen dus de Portland reactie en de puzzolane reactie aanzwengelen. De scheuren dichtten en de vezel/matrix binding herstelde.^[25]

Na een diffusietest was er een wit residu en een sluiting van de scheuren waarneembaar. Dit uitte zich namelijk ook in een reductie van de chloridediffusiviteit. De aanwezigheid van NaCl bevordert het uitlogen van calciumhydroxide in de scheuren.^{[17][70][71]}

2.3.5. Invloed van en op de kleine scheurvorming

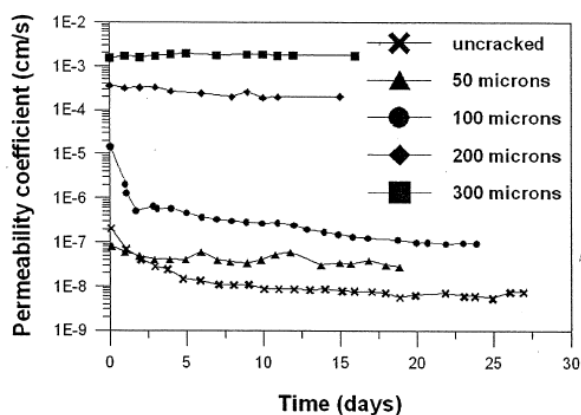
2.3.5.1. Scheurwijdte

Onderzoek met 0,5 vol.% aan PVA-vezel, dus enkelvoudige scheurvorming, onder nat-droog cycli met verschillende scheurwijdtes kwam tot volgend resultaat. Voor een scheuropening van 50 μm herstelt het proefstuk volledig en vanaf 150 μm doet er zich geen zelfheling meer voor (Figuur 30a). Een analoog resultaat is zichtbaar via permeabiliteitstesten (Figuur 30b).^{[17][54][55]} Hoe kleiner de scheurwijdte, hoe meer zelfherstel er dus optreedt.^[69]



Figuur 30: Zelfheling als functie van de scheurwijdte^[17]

Proefstukken die grote scheuren vertonen, helen nauwelijks via permeabiliteitstesten (Figuur 31). Pas vanaf een scheur van 100 μm is zelfheling duidelijk op te merken.^{[72][73]} Hierbij werden de proefstukken vooraf verzadigd met water. Grote scheurwijdtes vertonen geen daling van de doorlatendheid, terwijl proefstukken met een kleine scheurwijdte dat wel doen. Dit is in overeenstemming met Figuur 30b.

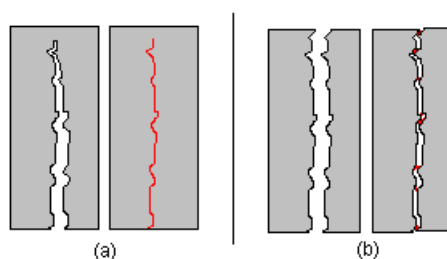


Figuur 31: Permeabiliteit in de tijd^{[72][73]}

2.3.5.2. Opgelegde rek bij het belasten

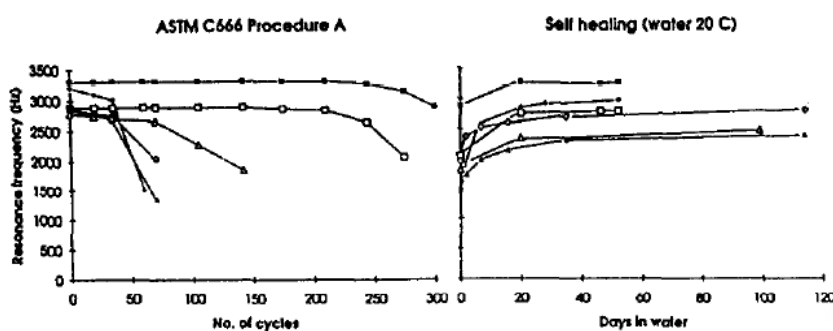
Proefstukken onderworpen aan een grotere rek, en dus meer initiële schade, blijken minder zelfheling te vertonen. Dit komt door een grotere scheurwijdte en een groter aantal scheuren. Proefstukken met 0,5 % rek hebben een initiële daling van 18 % in resonantiefrequentie en een heling tot 100 % terwijl proefstukken met 3 % rek respectievelijk 60 % initiële daling en 87 % heling vertonen.^{[17][54][55]}

Scheuren doorheen het proefstuk helen nauwelijks, maar scheuren die net niet door het proefstuk zijn gegaan, helen wel (Figuur 32). Als de twee scheurvlakken volledig van elkaar verwijderd zijn, zullen de twee vlakken nooit meer 100 % passen. Bij een goede connectie is er sprake van zelfheling, maar op plaatsen waar er een te grote ruimte is dit niet het geval.^[46]



Figuur 32: Volledige (a) en partiële (b) heling van een scheur door het proefstuk^[46]

Ook na vernietiging door vorst/dooi cycli herstelt het beton (Figuur 33). De proefstukken werden na scheuraanbreng opgeslagen in water voor twee tot drie maanden. Stukken die zelfs meer dan 50 % van hun initiële modulus verloren, bleken compleet te kunnen herstellen (47-87 % naar 85-99 % van de initiële waarden voor de resonantiefrequentie). Vorst/dooi cycli zorgen voor een absorptie van water in de scheuren en bestaande lege poriën. Als water in aanraking komt met het proefstuk zorgt het pompeffect ervoor dat het water in het beton gezogen wordt.^{[69][71]} SEM observaties geven aan dat vooral C-S-H gevormd wordt.^[56]



Figuur 33: Vorst/dooi cycli en herstel in water^[69]

2.3.5.3. Volumepercentage aan vezels

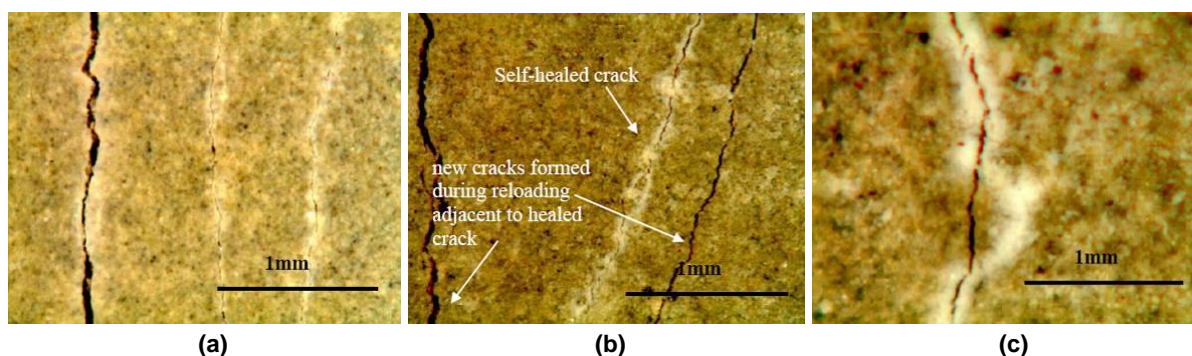
Bij een stijging van volumefractie aan PP-vezels is er een daling van de maximum scheurwijdte. Met fracties van 0,05; 0,10 & 0,30 vol.% is de maximum scheurwijdte respectievelijk 1,193; 0,313 & 0,025 mm voor een monofilament en 0,988; 0,185 & 0,015 mm voor een gefibrilleerde vezel. Een grotere lengte voor een gefibrilleerde vezel van 19 mm naar 38 mm geeft een daling naar 0,802; 0,170 & 0,014 mm.^[9] De mate van zelfheling vermeerderd met het volumepercentage aan vezels.^[45] Bij een verdere verhoging van het volumepercentage vezels treedt het omgekeerde effect op. Dit komt doordat er meer vezel/vezel interactie is, wat resulteert in een zwakkere binding met de cementmatrix. Er is ook sprake van meer porositeit aangezien er bij vezels sprake is van een transitiezone.^[68]

2.3.5.4. Drukkracht tijdens heling

De heling van een proefstuk onderworpen aan een drukkracht is hoger dan een proefstuk dat aan geen drukkracht onderhevig is. Wanneer de scheur door een drukkracht samengehouden wordt, speelt de grootte geen rol in de zelfheling. De voorwaarde is dat de vlakken van de scheur elkaar raken zodat de afstand tussen beiden klein genoeg is opdat er zelfheling zou optreden.^{[46][51]} De scheur wordt dichtgedrukt en zelfhelende producten moeten geen grote overspanning overbruggen.

2.3.6. Scheurvorming bij herbelasting

Het witte residu dat in de scheuren gevormd wordt is een typisch beeld van de kristallisatie van calciumcarbonaatkristallen. Na heling en bij het opnieuw belasten, neigen de nieuwe scheuren de oude scheuren te volgen (Figuur 34a). Dit komt doordat het zwakke kristal makkelijker breuk vertoont dan een sterke gehydrateerde cementmatrix.^[17]



Figuur 34: Scheurvorming na zelfheling van het beton bij nat-droog cycli^[17]

Dit is echter niet altijd het geval. Een scheur kan op een compleet andere locatie zich voordoen en dit hangt volledig af van de kwaliteit van het zelfhelend materiaal en de karakteristieken van de nabijgelegen cementmatrix. Het is echter wel een mooi voorbeeld van het feit dat zelfheling tot herstel van het materiaal kan leiden of zelfs de eigenschappen verbetert. Dit is duidelijk zichtbaar op Figuur 34b&c.^[17]

2.4. Zelfheling door middel van reactieve stoffen

Naast meervoudige scheurvorming via microvezels kan er ook gebruik gemaakt worden van hydrogelen of superabsorberende polymeren. Deze polymeren vertonen de eigenschap dat ze een significant aantal keer hun eigen gewicht aan vloeistof kunnen opnemen, soms tot 5000 keer, en dit binnen hun structuur te kunnen vasthouden.

Hydrogelen hebben ook de nuttige eigenschap een pH gevoeligheid te hebben in het basisch milieu, pH 10 tot 13. Aangezien door contact met koolstofdioxide vanuit de lucht bij scheurvorming, de initiële pH van beton (13) zal dalen, blijken hydrogelen dus een prominent middel te zijn om zelfherstel van scheuren in beton te realiseren. Hydrogelen geven zelfhelende kwaliteiten op twee verschillende manieren. De eerste is een zwellende reactie die voor het opvullen van scheuren kan dienen en zo zorgt voor de herwinning van de vloeistofdichtheid. De tweede wijze is de ontzwellende reactie van hydrogelen die voor een gecontroleerde vrijstelling van water of helende agentia kan zorgen.

2.4.1. Overzicht superabsorberende polymeren

2.4.1.1. Polymeren

Een polymeer is een macromoleculaire stof waarbij de atomen door covalente bindingen met elkaar verbonden zijn. De benaming polymeer komt voort uit het feit dat de macromoleculen opgebouwd zijn uit zich steeds herhalende eenheden, de monomeren. Macromoleculen komen veel voor in de natuur en sinds de prehistorie heeft de mens van hun interessante fysische eigenschappen (hoge sterkte, hoge temperatuurbestendigheid, weerstand tegen chemicaliën) gebruik gemaakt. Indien een polymeer uit twee verschillende basiseenheden opgebouwd is, is er sprake van een copolymeer. Er zijn in deze groep drie onderverdelingen: alternerende (ABABABAB), statistische (AABABBAAB) en blokcopolymeren (AAAABBBB).^[74]

Er zijn vier belangrijke polymerisatietechnieken: massa-polymerisatie, oplossings-polymerisatie, suspensie-polymerisatie en emulsie-polymerisatie. Bij massa-polymerisatie polymeriseert wordt zuiver onverdund monomeer gepolymeriseerd. Het gesmolten polymeer wordt uit de reactor gelost en in fijne korrels gemalen. Bij oplossings-polymerisatie wordt een solvent toegevoegd. Dit zorgt voor een betere controle van de polymerisatie. Suspensie-polymerisatie komt door het mengen van het monomeer in een viervoudig volume aan vloeistof waarbij geroerd wordt. Daardoor zal het monomeer in de vorm van druppeltjes gesuspenderd worden. Bij emulsie-polymerisatie wordt een wateronoplosbaar monomeer door zacht roeren in een waterige zeepoplossing gedispergeerd.^[74]

2.4.1.2. Hydrogelen

Een hydrogel is een superabsorberende gel vervaardigd van natuurlijke of synthetische polymeren. Hydrogelen bestaan uit een netwerk van crosslinks van polymeren die grote hoeveelheden van oplossingen kunnen opnemen. De hoeveelheid die opgenomen wordt is afhankelijk van de omgeving zoals de samenstelling van de oplossing, de pH waarde, de temperatuur, de sterkte van de ionen en het elektrisch veld.^[75]

Om oplossen van de polymeerketens in water te verhinderen is er crosslinking van de ketens, wat zowel fysisch als chemisch kan. Fysisch gebeurt dit aan de hand van secundaire krachten, namelijk ionische krachten of waterstofbruggen. Om een stabiel en irreversibel hydrogel te bekomen, is een chemisch covalent gebonden netwerk nodig. Een eerste methode is via polymerisatie van monomeren in de aanwezigheid van een crosslinker. Een voorwaarde is dat bij oplosbare polymeren er een polymeriseerbare zijgroep moet zijn. Ook kunnen hydrogelen gevormd worden via de reactie van complementaire groepen. Polymeren kunnen namelijk oplosbaar zijn door aanwezigheid van bepaalde functionele groepen (OH, COOH en NH₂), welke gebruikt worden om het hydrogel te synthetiseren. De covalente binding wordt gevormd door de reactie van groepen met een complementaire reactiviteit.^[76]

Een superabsorberend polymeer (SAP) kan tot 500 keer haar eigen gewicht (30-60 keer haar eigen volume) aan water absorberen. De polymeren zijn gedeeltelijk geneutraliseerd, bijvoorbeeld met natrium- NaOH of kaliumhydroxide KOH. De nog resterende zuurgroepen en de natrium- of kaliumionen zorgen voor het vasthouden van watermoleculen. In een zoute oplossing daalt de absorptie en geeft het SAP het water af. De aanwezigheid van gedissocieerde ionen in de oplossing zal de mogelijkheid tot binden met de watermoleculen tegenwerken. In water zal NaCl namelijk splitsen in ionen. Deze ionen worden gestabiliseerd door de solventmoleculen (water), waardoor het water het polymeer zal verlaten.^{[74][77]} Een impressie van de absorptie van SAP wordt gegeven in Figuur 35.



Figuur 35: Impressie van absorptie bij SAP^[78]

Superabsorbentia worden vaak bereid uit acrylzuur. Ongeveer 75 % van het zuur wordt voor de polymerisatie geneutraliseerd met NaOH, waarbij natriumacrylaat gevormd wordt. De macromoleculaire ketens worden gevormd door copolymerisatie van acrylzuur en natriumacrylaat en danken hun superabsorberende eigenschappen aan de aanwezigheid van de (-COONa)-groepen en de netwerkstructuur. Elke schakel van de keten is sterk hydrofiel.

Een eerste gebruikt fabricageproces is het gelproces waarbij het monomeer wordt gepolymeriseerd in oplossing. Op het einde van de polymerisatie wordt een kunststofmassa verkregen die moet worden fijngemalen. Zeven geeft uiteindelijk een product met de gewenste korrelgrootte. Deze kunststof lijkt op een massa kleine keitjes. Een tweede is de omgekeerde suspensie waarbij druppels monomeer tot een emulsie worden verwerkt. Tensio-actieve stoffen stabiliseren deze emulsie en polymerisatie gebeurt in elk druppeltje. Dit geeft een macromolecule die er uitziet als een tros druiven.^[74]

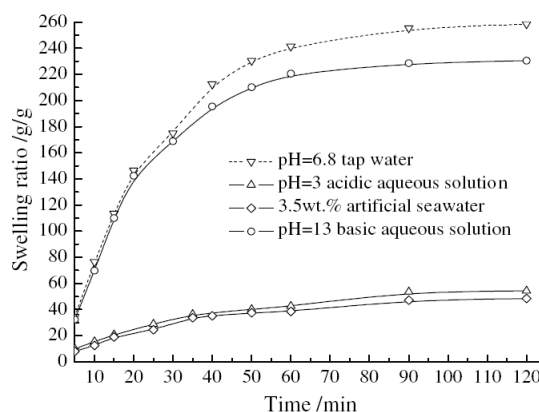
Een ander polymeer dat als superabsorberende stof toepassingen vindt in de betontechnologie, is polyacrylamide. De amidegroepen kunnen onderling interageren (waterstofbrugvorming) en op die manier netwerken vormen. De amidegroepen die overblijven hebben een sterke affiniteit met water, wat maakt dat ze tot honderden maal hun eigen massa aan water kunnen opnemen.^[74]

Hydrogelen worden gebruikt in hygiënisch materiaal aangezien ze absorberend zijn.^[74] Ze vinden ook toepassingen in de biomedische wereld. In de medische wereld wordt er onderzoek gedaan naar het gebruik van slimme pillen die pas bij ziekte kun stoffen gradueel afgeven.^{[79][80]} Wanneer de slimme pil in het lichaam komt, zal er zich door de hoge lichaamstemperatuur een gel vormen. Dit vormt zo een artificiële barrière waarin medicijnen opgeslagen zijn. Bij verandering van de temperatuur (koorts^[81]) of via andere factoren (chemische stoffen, celgroei of pH zoals maagsapresistentie^[82]) zal de gel het medicijn afgeven. Superabsorberende polymeren kunnen ook gassen absorberen. Deze worden gebruikt als een dunne laag aan de binnenkant van plastic zakjes voor langdurige verpakking van eetwaren.^[74]

2.4.1.3. Principes van zwellling

De zwelratio is gedefinieerd als de verhouding van het gewicht van de gezwollen SAP deeltjes op de gedroogde ingestorte SAP.^[83] Het zwellend vermogen van de hydrogelen hangt af van de zure of basische functionele groepen in de structuur. Door het scheiden van deze groepen en de instroming van tegenpolen zal de concentratie van ionen in het hydrogel hoger zijn dan de omringende oplossing. Dit zorgt voor een verschil in osmotische druk en voor een flux van vloeistof in het hydrogel en dus voor zwellling. De interactie en het afstoten van tegengestelde ladingen in de polymeerketen zorgt op haar beurt ook voor een zwellling. Zure groepen zullen geïoniseerd worden bij een hogere pH, en basen zullen zwellen bij verlagen van de pH. Bij hogere pH-waarden is er een overvloed aan kationen die de geïoniseerde groepen gaan afschermen. De zwellingsgraad hangt af van het aantal groepen, de densiteit van de crosslinks en het hydrofiele karakter van de monomeren.^[75] Tijdens het zwellen zullen hydroxide-ionen in de neutrale gel getransporteerd worden, terwijl tijdens krimpen protonen in de gel gaan en de negatief geladen zure groepen gaan neutraliseren.^[84] Zwellen en krimpen gebeurt niet met dezelfde snelheid. Deze beide processen hangen af van de diffusie van water in en uit de gel en minder van de uitwisseling van ionen.^[75] De kinetica wordt beïnvloed door drie types van diffusie. Het eerste is dat water in of uit de gel moet gaan, het tweede is dat de base of het zuur in de gel moet diffunderen en ten derde dat oplossingen die niet uitgestoten worden door de gel in de gel moeten diffunderen.^[84]

De SAP werden in verschillende vloeistoffen geplaatst. Deze waren kraantjeswater (pH=6,8), een zure oplossing met zoutzuur HCl (pH=3), een basische oplossing met NaOH (pH=13) en artificieel zeewater. In Figuur 36 is te zien dat de absorptie daalt van kraantjeswater (260 g/g SAP), over de basische oplossing (230 g/g SAP) en de zure oplossing (54 g/g SAP) tot het artificieel zeewater (48 g/g SAP).^[77] De kationen H^+ , Na^+ , Mg^{2+} en Ca^{2+} zorgen voor een schermeffect waardoor de zure oplossing en het artificieel zeewater zorgen voor minder zwelling.



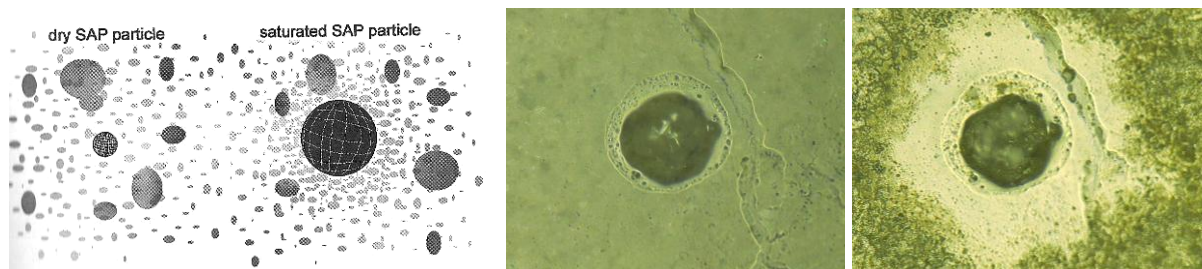
Figuur 36: Absorptie in verschillende vloeistoffen^[77]

2.4.2. Huidige toepassingen in beton

2.4.2.1. Algemeen

SAP kunnen gebruikt worden in beton. Dit om ofwel helende stoffen vrij te laten bij scheurvorming, of via een zwellende reactie de scheur te dichten. Er moeten een aantal specifieke eisen opgelegd worden aan het polymeer. Ten eerste moet de structuur intact blijven in een hoogalkalische omgeving^[85], ten tweede moet de helende stof effectief vastgehouden worden tot scheurvorming ontstaat ofwel moet de wateropname bij scheurvorming hoog genoeg zijn om de scheur te kunnen dichten.

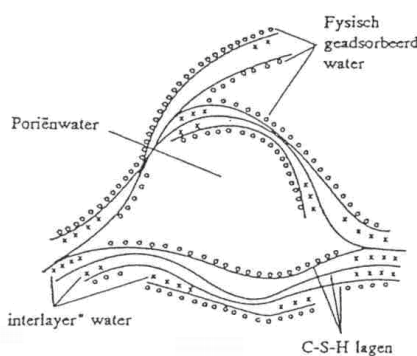
SAP hebben verschillende doelen. Ten eerste is het een bron van microdefecten om meervoudige scheurvorming te vergemakkelijken en de mechanische performantie te verhogen. Zo wordt de vorming van nieuwe microscheuren bevorderd. Ten tweede dient het als een verbeteraar van de vorstweerstand door vorming van een poriënstructuur. Ten derde is het een agens dat autogene krimp en zelfopdroging tegenwerkt. Met de daling van de relatieve vochtigheid van het omringende poriënsysteem zal het water door SAP-partikels afgegeven worden zodat interne curing kan optreden.^[85] De hoeveelheid water dat losgelaten wordt, speelt een belangrijkere rol dan de distributie in de matrix.^[86] Het gevolg is wel dat de matrix rond SAP veel dichter is omdat water in een hydrogel gehouden wordt (Figuur 37).^[87]



Figuur 37: Densificatie van de matrix rondom een SAP deeltje^[87] na 1 u^[78] en 24 u^[78]

2.4.2.2. Absorptiekenmerken

Water in cementpasta's bevatten drie fases, namelijk het vrije capillaire water, het gel water dat fysisch gebonden is en het chemisch gebonden water (Figuur 38). Enkel het vrije capillaire water is beschikbaar voor hydratatie van het cement.^[88]



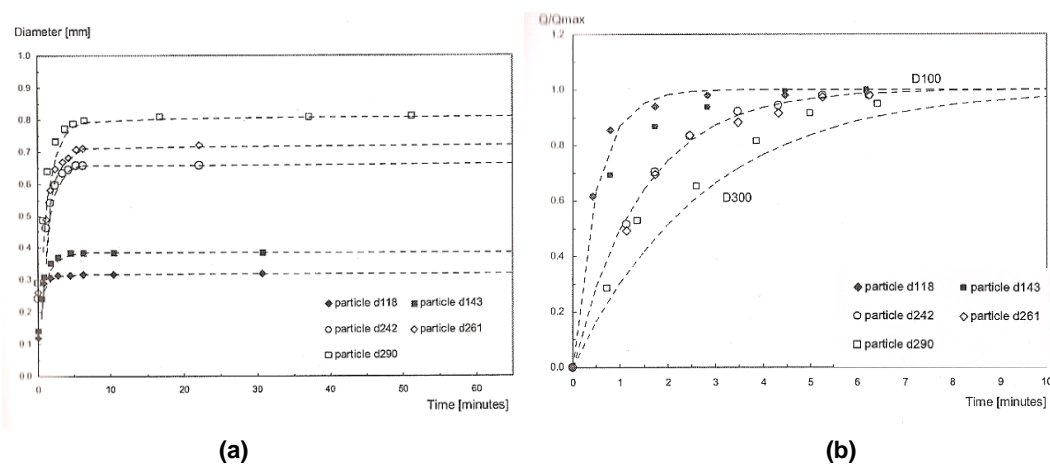
Figuur 38: C-S-H met de verschillende types water^[66]

De absorptiekenmerken kunnen bepaald worden met gravimetrische en volumetrische metingen. De volumetrische meting gebruikt een bekend startvolume van het materiaal, waarna de absorptie wordt bepaald na toevoeging van water of na droging. Gravimetrische metingen gebruiken bekende massa's en geven een snelle indicatie maar geven niet de totale absorptie (in het geval van drogen). Zo bepaalt de methode bijvoorbeeld niet de interstitiële vloeistoffase die fysisch gebonden is in de partikels, zelfs niet bij centrifugatie. Het water blijft namelijk gebonden aan het materiaal en zal niet in de absorptie voorkomen. Hoe kleiner de afmeting van het partikel, hoe meer oppervlak er vrijgesteld wordt aan van der Waals bindingen en hoe meer water er wordt vastgehouden in de interstitiëlen.^[89]

Een goede methode om de absorptie te kwantificeren blijkt uit het onderzoek van partikels die microscopisch onderzocht werden met een vergrotingsfactor 40-50x. De absorptie kinetica wordt nagegaan in een synthetisch poriënvloeistof medium (25).^[89] Het zwellen kan beduidend verschillend zijn in een betonmengsel dan in een gesimuleerde poriënvloeistof aangezien het een ideaal gesimuleerde poriënvloeistof betreft.^[90] Het is een reproductie van de vloeistoffase door het oplossen van cementdelen en heeft de volgende compositie:^[89]

$$[\text{Na}^+]=200, [\text{K}^+]=200, [\text{Ca}^{2+}]=1, [\text{SO}_4^{2-}]=15, [\text{OH}^-]=672 \quad (25)$$

De invloed van verschillende partikeldiameters werd nagegaan. Een partikel met een diameter van 300 μm bleek een maximum afmeting van 800 μm te bekomen na absorptie, wat 2,5 keer groter is (Figuur 39a). Na 10 min was er sprake van volledige absorptie.^[89] De tijd tussen de droge staat en de maximum grootte van de ondergedompelde partikels geeft de zweltijd.^[89] Het is een SAP op basis van polyacrylaat.



Figuur 39: Groei van de partikels (a) en absorptie met de tijd (b)^[89]

$$\Delta V(t) = \frac{V(t) - V(t_0)}{V(t_0)} \quad (26)$$

Uit onderzoek naar de absorptiehoeveelheid $\Delta V(t)$ (26), blijkt dat hoe kleiner het deeltje, hoe sneller het absorptieproces verloopt. Als er aangenomen wordt dat de dichtheid van het polymeer 1,4 g/cm³ is, dan blijkt de absorptiecapaciteit te variëren van 10-16 ml/g droog polymeer.^[89]

Vertrekkende van de tweede wet van Fick (27), met de diffusiecoëfficiënt D en Q_{\max} corresponderend met t_{∞} , kan het debiet Q berekend worden. D is gelinkt aan de diameter Φ_p van het SAP en is enkel geldig voor de synthetische poriënvloeistof. Dit wordt weergegeven op Figuur 39b in stippellijn, wat goed overeenkomt met de praktische resultaten.^[89]

Tweede wet van Fick:

$$\frac{dQ}{dt} = D \cdot (Q_{\max} - Q) \quad (27)$$

$$Q(t) = Q_{\max} (1 - \exp(-D \cdot t)) \quad (28)$$

$$D = 2,76 \times 10^3 \cdot \phi_p^{-1,567} \quad (29)$$

Er is een verschil in het zwellen in een 0,2 M NaOH-oplossing en cementfiltraat. Het filtraat wordt bekomen door het mengen van 20 g Portlandcement met 200 g gedeïoniseerd water waarna het cement werd uitgefiltreerd na een periode van 30 min. De pH is ongeveer hetzelfde, namelijk 12, maar het verschil zit hem in het gehalte aan ionen. De oplossing is rijk aan Ca²⁺ dat zal binden met de negatief geladen ketens van de polymeren bij een hoge pH. Dan worden namelijk protonen opgebruikt en negatieve ketens achtergelaten. Door het binden met Ca²⁺ zal er minder afstoting zijn en dus minder zwellen bij het cementfiltraat.^[83]

2.4.2.3. Mechanische eigenschappen

Een eerste onderzoek is dat van Brüdern en Mechtherine (2010). Er werd 2,2 vol.% aan vezels en 2 kg/m³ SAP toegevoegd. Extra water werd toegevoegd om ongeveer een gelijkaardige verwerkbaarheid te krijgen zoals mengsels zonder SAP. Het SAP werd geproduceerd aan de hand van suspensie-polymerisatie en had een droge afmeting van ongeveer 70 µm. Het is een covalent gecrosslinkte copolymeer van acrylamide en acrylzuur. De absorptie-capaciteit van het SAP in gedemineraliseerd water is 86,5 g/g SAP. In een gesimuleerde poriënoplossing is dit 21,8 g/g maar in vers beton wordt dit 12-13 g/g geschat.^[85] De samenstelling van de mengsels wordt weergegeven in Tabel 5.

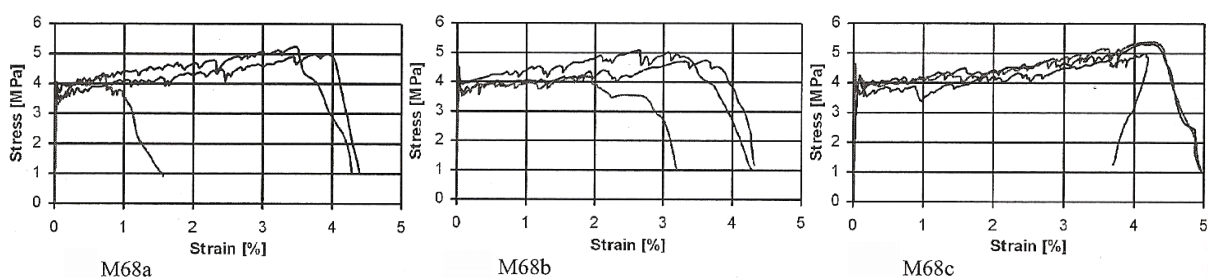
Tabel 5: Samenstelling [kg/m³] (Brüdern en Mechtherine)^[85]

	M68a [kg/m ³]	M68b [kg/m ³]	M68c [kg/m ³]
CEM I 42,5 R-HS	505	505	505
Vliegas	614	614	614
Water (extra water)	334 (-)	334 (-)	334 (25,3)
Kwartzand 0,06 – 0,2	534	534	534
Superplastificeerder	16,6	16,6	13,4
Viscositeitsagent	3,2	3,2	3,2
SAP	-	2,0	2,0
PVA-vezel (12 mm)	29	29	29

Volgende conclusies kunnen getrokken worden (Tabel 6 & Figuur 40). Voor M68b is de eerste-scheur-sterkte het hoogst, wat komt door de laagste effectieve water tot bindmiddel verhouding doordat het SAP water geabsorbeerd heeft. M68c heeft de beste performantie. Een mogelijke verklaring kan liggen in de toevoeging van water voor de verwerkbaarheid, waardoor de vezels meer gedistribueerd in de matrix terecht gekomen zijn. Toevoeging van water zorgt echter voor andere mechanische karakteristieken.^[85]

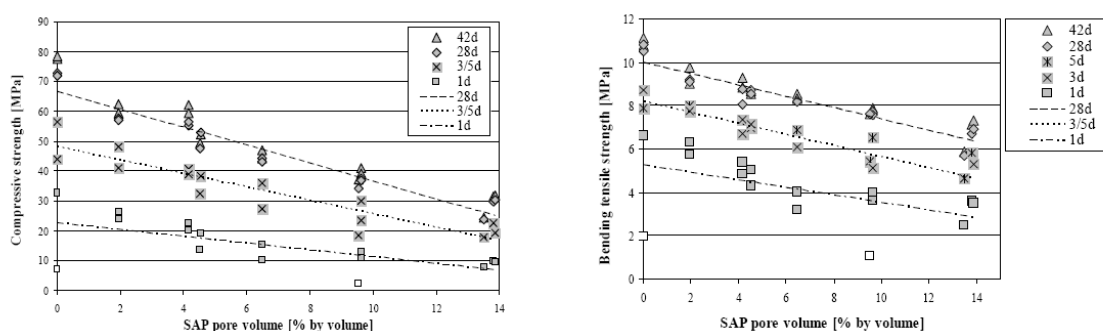
Tabel 6: Mechanische eigenschappen (Brüdern en Mechtherine)^[85]

	Druksterkte [MPa]	1 ^e -scheur-sterkte [MPa]	Treksterkte [MPa]	Breukrek [%]
M68a	57,4 (1,18)	3,77 (0,23)	4,84 (0,40)	2,71 (1,42)
M68b	50,4 (0,33)	4,71 (0,30)	4,67 (0,37)	2,71 (0,72)
M68c	44,7 (0,66)	4,37 (0,19)	5,24 (0,17)	4,17 (0,05)



Figuur 40: Resultaten van de axiale trektesten^[85]

De ontwikkeling van mechanische eigenschappen werd ook onderzocht met 15 verschillende betonmengsels met drie verschillende W/C-factoren en verschillende toevoegingen van SAP (copolymeer acrylamide/acrylzuur) door Hasholt, Seneca Jespersen en Jensen (2010) in Figuur 41.^[91] Bij lage W/C-factor ($W/C < 0,40$) en matige SAP toevoeging, zal de druksterkte op latere leeftijd (vanaf 3 dagen na bekisten) stijgen doordat SAP de hydratatiegraad zullen verhogen en zo ook de C-S-H vorming in de pasta. Er komt dus een dichtere pasta door verhoging van de hydratatie en er is ook een verhindering van de microscheurvorming die ontstaat bij zelfopdroging. De eerste drie dagen na bekisten is er nog capillair water beschikbaar voor hydratatie en zullen SAP dus geen invloed vertonen op de hydratatie. Bij hoge factor ($W/C > 0,45$) en een grote hoeveelheid aan SAP, zal dit effect niet opwegen tegen de sterktereductie door de toename van het poriënvolume en daalt de druksterkte.^[91]



Figuur 41: Druksterkte en buigtreksterkte in driepuntsbuigproef^[78]

Hoe meer SAP er worden toegevoegd, hoe lager de druk- en buigtreksterkte in Figuur 41. Mengsels met SAP blijken na 28 dagen nog steeds een verhoging van de druksterkte te geven. Dit duidt op interne curing. Doordat bij SAP grote poriën ontstaan, zal de treksterkte lager zijn. Bij druksterkte is dit minder aangezien er sprake is van sferische poriën.^[78] Bij trek is er namelijk een verminderde doorsnede waardoor de ultieme spanning sneller bereikt wordt. Bij druk kan de last over de sferische poriën als een koepel afgedragen worden zonder bijkomende spanningsconcentraties.

Het aantal partikels en hun grootte hebben een grote invloed op de sterkte. Als er twee mengsels beschouwd worden met een klein aantal grote partikels en met een groot aantal kleine deeltjes waarbij het gehalte gelijk is, zal het laatste een grotere reductie van de treksterkte vertonen doordat bij een doorsnijding het oppervlak aan poriën groter is.^[78]

De treksterkte van SAP mengsels bleek ongeveer 20 % lager te zijn dan de referentiestukken en dat komt door de veranderingen van de microstructuur waar de capillaire poriën vervangen zijn door een groot aantal lege poriën.^[92]

2.4.2.4. Krimp

Het gebruik in hoge performantie beton focust op een vermindering van de vervormingen door krimp. Dit werd onderzocht door Esteves, Cachim en Ferreira (2010).^[93] Er werd gebruik gemaakt van een suspensie van covalent gecrosslinkte acrylamide/acrylzuur copolymeer en

de SAP hadden een diameter van 50-250 μm . Om SAP volledig te laten verzadigen, wordt er bijkomend water $(W/C)_e$ toegevoegd.^[93] Er bestaan volgende verbanden met K_p de wateropname van SAP in de cementpasta^{[94][95]}:

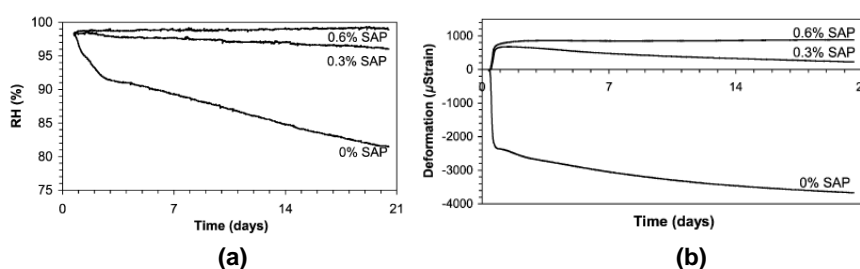
$$(W/C)_e = K_p \cdot (SAP/C) \quad (30)$$

$$(W/C)_e = 0,18 \cdot (W/C) \text{ met } (W/C) < 0,36 \quad (31)$$

SAP hebben een positief effect op de mechanische eigenschappen. De sterkte in mortels zonder SAP daalt met 30 % wanneer de relatieve vochtigheid verandert van 95 tot 30 %. Proefstukken met SAP behouden echter hun sterkte ook als de relatieve vochtigheid verandert.^[93] SAP zullen effectief de zelfopdroging van de verhardende cementpasta vermijden.^[88] SAP zorgen evenwel voor de formatie van watergevulde macro-insluitsels in het vers beton. De insluitsels zouden zo sferisch mogelijk moeten zijn om zo weinig mogelijk invloed te hebben op de sterkte en permeabiliteit van het beton.^[88]

Een cementpasta met $W/C+(W/C)_e=0,30+0,05$ is identiek aan de cementpasta met een W/C -factor van 0,35 op het vlak van maximale graad van hydratatie of totale porositeit. De poriëndistributie is significant verschillend aangezien de proefstukken met SAP geometrische, vooraf bepaalde macroporiën hebben. De plaats tussen deze poriën heeft fijnere capillaire poriën die overeenstemmen met een cement met een W/C -factor van 0,3. De sferische macroporiën reduceren de sterkte minder dan hetzelfde volume fijne poriën met onregelmatige vorm. Daarom is een proefstuk met $W/C=0,30+0,05$ sterker dan een proefstuk met een W/C -factor van 0,35. SAP insluitsels geven een hogere vorm van hydratatie. Dit zorgt voor minder grote poriën wat ten goede komt aan de permeabiliteit en de diffusieve eigenschappen van het beton.^[88]

SAP kunnen efficiënt de interne relatieve vochtigheid behouden tot boven een relatieve vochtigheid van 95 %. Dit blijkt onafhankelijk van de afmeting van het partikel te zijn.^[86] Als er geen SAP toegevoegd worden, is er een verandering van de relatieve vochtigheid in functie van de tijd (Figuur 42a). Bij 0,6 m% (massaprocent) SAP is er bijna geen verandering.^[94] Als er geen SAP toegevoegd worden, doet er zich aanzienlijke krimp voor (Figuur 42b). Toevoeging van SAP leidt tot een expansie na binding. Dit komt door de interne curing van de SAP, want bij continue voorraad aan water gedurende de hydratatie van beton zal deze expanderen. Bij 0,6 m% SAP is er een totale reductie van de krimp en een expansie na 2 dagen van 50 microstrain wat in vergelijking met de thermische vervormingen verwaarloosbaar is.^[94] Evenwel werden bovenstaande proefstukken verzegeld bewaard.



Figuur 42: Invloed van SAP op de relatieve vochtigheid en de vervormingen^[94]

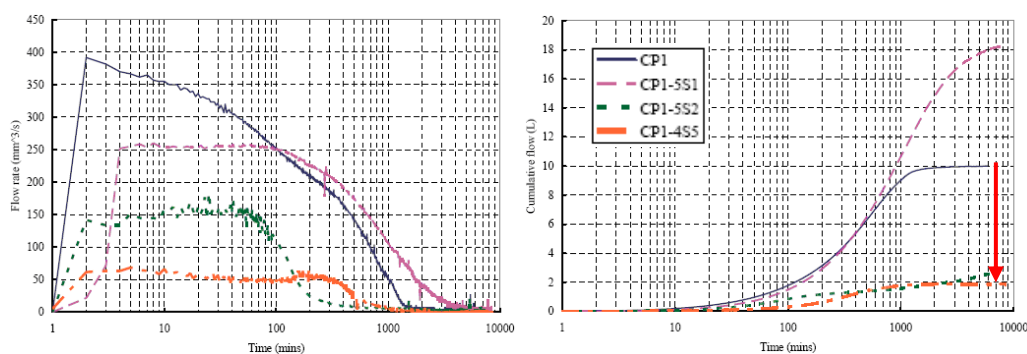
De afmetingen van de SAP deeltjes beïnvloeden de performantie, zoals de mechanische stabiliteit tijdens mixen en hun invloed op de rheologie van vers beton. Als de SAP insluitsels te groot zijn, zullen ze niet instaan voor de levering van water aan elk deel van de cementpasta tijdens het hydrateren. Ook zullen grote deeltjes tijdens het mengen onvoldoende tijd hebben om water op te nemen. Aan de andere kant, als de insluitsels klein zijn, kunnen deze opgevuld worden met hydratatieproducten.^[94]

SAP vormen sferische holtes gevuld met water gebonden door van der Waals krachten. In latere fases van hydratatie zal dit water gebruikt worden en zullen de caviteiten als lege poriën achterblijven. SAP hebben twee voorname functies, ten eerste verminderen ze de krimp en ten tweede geven ze een systeem van dichtgepakte poriën in de pasta.^[92]

2.4.2.5. Dichten van scheuren

SAP kunnen ook gebruikt worden als een toevoegsel om scheuren in beton te dichten en dat werd onderzocht door Dennis Lee, Wong en Buenfeld (2010). De partikels nemen bij een scheur vocht op, zwellen en dichten op die manier de scheur af.^[96]

Cementpasta's met verschillende types SAP werden mechanisch belast om een enkele scheur te krijgen van 100-400 μm . Deze proefstukken werden dan blootgesteld aan een NaCl-oplossing met een drukgradiënt en de stroming werd gemeten om het effect te bekijken op de dichting van de scheur (Figuur 43). Het piekdebiet doorheen een proefstuk met SAP is lager dan het controlestuk zonder SAP. De SAP zullen namelijk de scheur deels blokkeren, waardoor de stroming doorheen de scheur daalt.^[96]



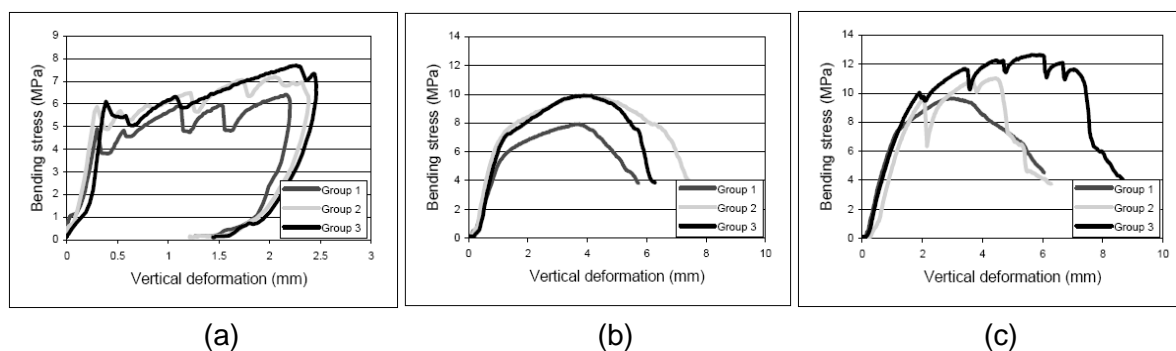
Figuur 43: Debiet en doorstromend volume doorheen een scheur van 200 μm ^[96]

S1 bestond uit 5 m% SAP op basis van een polyacrylaat (korrelgrootte <math><100 \mu\text{m}</math>). Het polyacrylaat in S2 had een korrelgrootte tussen 100 μm en 300 μm (5 m%). S3 had 4 m% SAP, een copolymeer polyacrylaat acrylamide met 1-200 μm korrelgrootte. De totale stroming door proefstukken met S2 en S3 was tot 85 % lager dan referentiestukken. S1 (hetzelfde SAP-type als S2) gaf meer doorstroming en dat ligt aan de kleinere diameter en de wateropname van het SAP. SAP met kleinere diameters zijn dus niet efficiënt om een scheur te dichten. 4 % aan S3 is ook effectiever dan 5 % S2 waardoor SAP op basis van Polyacrylaat-co-acrylamide beter een scheur kunnen dichten dan SAP op basis van Polyacrylaat.^[96]

2.4.2.6. Zelfheling

SAP kunnen dienen als een reservoir van water dat beschikbaar is voor verdergaande hydratatie en interne curing, en zo voor heling. SAP legen gradueel tijdens de primaire hydratatie maar een regenvlaag kan de SAP opnieuw voorzien van water. Dit water wordt dan gradueel in de tijd afgegeven om zelfheling bij te staan.^[97]

Figuur 44a toont de curve van scheuraanbreng met een vierpuntsbuigproef, Figuur 44b de herbelasting na curing in lucht en Figuur 44c deze na nat/droog cycli. Groep 1 bevat 2 vol.% PVA-vezel, groep 2 heeft 2 vol.% PVA-vezel met 0,5 m% SAP en groep 3 bevat 2 vol.% PVA-vezel en 1 m% SAP. Bij curing in luchtcondities blijft de grafiek vlak. Dit wilt zeggen dat de eerder gevormde scheur zich opent. Bij nat/droog cycli opent de scheur zich bij de proefstukken met enkel vezels, maar de proefstukken met SAP vertonen opnieuw meervoudige scheurvorming. Daar is de mate van zelfheling hoger.^[97]



Figuur 44: Belastingscurves van 7 dagen oud beton^[97]

2.4.2.7. Verschillende wijzen van toevoegen van SAP

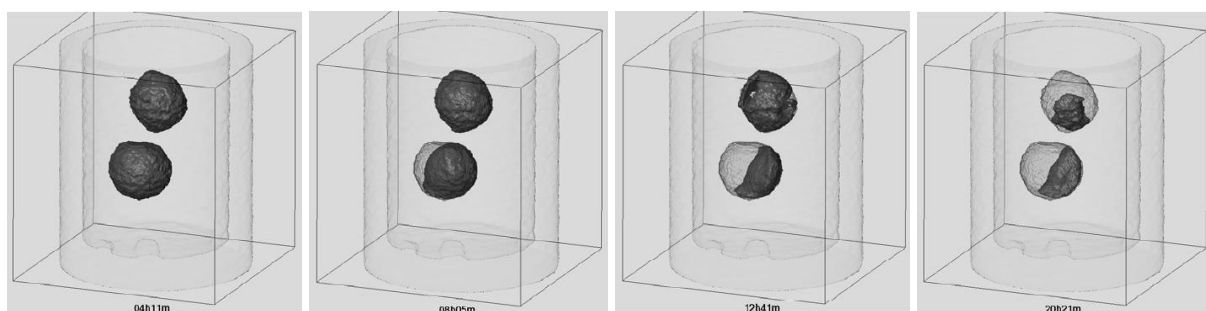
Bij het inmengen van SAP in mortel of beton zijn er twee moeilijkheden. Aan de ene kant moeten de polymeren genoeg tijd krijgen om maximaal water te kunnen absorberen om gesatureerd te raken. Maar aan de andere kant moet er steeds genoeg water zijn om de verwerkbaarheid te verzekeren. De SAP deeltjes moeten ook goed gemengd worden aangezien ze anders agglomeraten dreigen te vormen wat zeker niet ten goede komt aan de saturatie en de sterkte. Voor kleine fracties (0,6 m% van cement) is dit geen probleem. Een mogelijkheid is de SAP toe te voegen als de helft van het water is toegevoegd bij laag gehalte aan SAP. Bij een hoog gehalte wordt het SAP vooraf gemixt met het cement. De eerste methode zorgt voor een betere verwerkbaarheid maar eveneens voor een grote spreiding in de bekomen resultaten. De tweede methode verzekert een goede verspreiding van de polymeren maar een lagere verwerkbaarheid.^[78]

Er zijn twee mogelijke pistes om de reductie in verwerkbaarheid tegen te gaan: toevoegen van extra water of superplastificeerder. Extra water verhoogt de verwerkbaarheid en bedraagt best evenveel als de SAP absorberen. Het extra water zal echter ook extra capillaire poriën veroorzaken met als gevolg een meer poreuze matrix. Hierdoor zal meer water dat geabsorbeerd werd door de SAP uiteindelijk verdampen net door deze meer poreuze matrix. Vandaar het idee om SAP eventueel ook vooraf te satureren en in te mengen. Ook kan superplastificeerder toegevoegd worden en dit zal zorgen voor een dichtere matrix met toch een inwendig opgeslagen reservoir.^[78]

2.4.2.8. Verdeling en visualisatie van SAP

Na droging met ethanol wordt een betonproefstuk geïmpregneerd met een gekleurd epoxyhars. Na polijsten kunnen de proefstukken dan gescand worden en kan de spreiding van de holtes geanalyseerd worden.^[95] X-stralen tomografie (μ CT) kan gebruikt worden om de distributie van SAP poriën te onderzoeken. Er moet wel gebruik gemaakt worden van filters om alleenstaande poriën te onderscheiden van geclusterde poriën.^[98] De volumefractie aan poriën kan worden onderzocht met 'Backscattered Electron Micrographs' (BSE) en kwikporosimetrie (MIP).^[90]

Het SAP zal inwendig haar water afgeven. Dat is zichtbaar op een neutronen tomografie van SAP in een cementproefstuk (Figuur 45). Het SAP geeft gradueel haar water af.^[99]



Figuur 45: Inwendig afgeven van water door een SAP (4, 8, 12 en 20 u na mengen)^[99]

2.4.3. Modificatie SAP

SAP kunnen als reservoir dienen om een helende stof in op te slaan. Bij scheurvorming zal de helende stof dan afgegeven worden. Een tweede mogelijkheid zou zijn de SAP ongezwollen in het beton te verwerken. Bij het optreden van een scheur kan er dan water in de scheur dringen en de hydrogel doen opzwellen wat de scheur dicht.

De SAP moeten zo gemodificeerd worden dat ze het water of de helende stof vasthoudt totdat scheurvorming optreedt. Hierbij wordt er gedacht aan twee mogelijke mechanismen, namelijk de daling van de pH en de decalcificering door uitloging.

3. Materialen en methoden

3.1. Materialen

3.1.1. Algemeen en vezeltypes

De materialen die gebruikt werden zijn: type I portlandcement (CEM I 52,5 N), ASTM klasse F vliegias (OBBC), kalksteenmeel, fijn silicazand met een gemiddelde diameter van 110 μm en kleiner dan 0,5 mm (0/2), water, polycarboxylaatsuperplastificeerder en vezels. De superplastificeerder diende om de verwerkbaarheid bij te stellen en was Glenium 51 (conc. 35 %). De chemische samenstelling en specifieke oppervlakte van het portlandcement en de vliegias wordt weergegeven in Tabel 7.

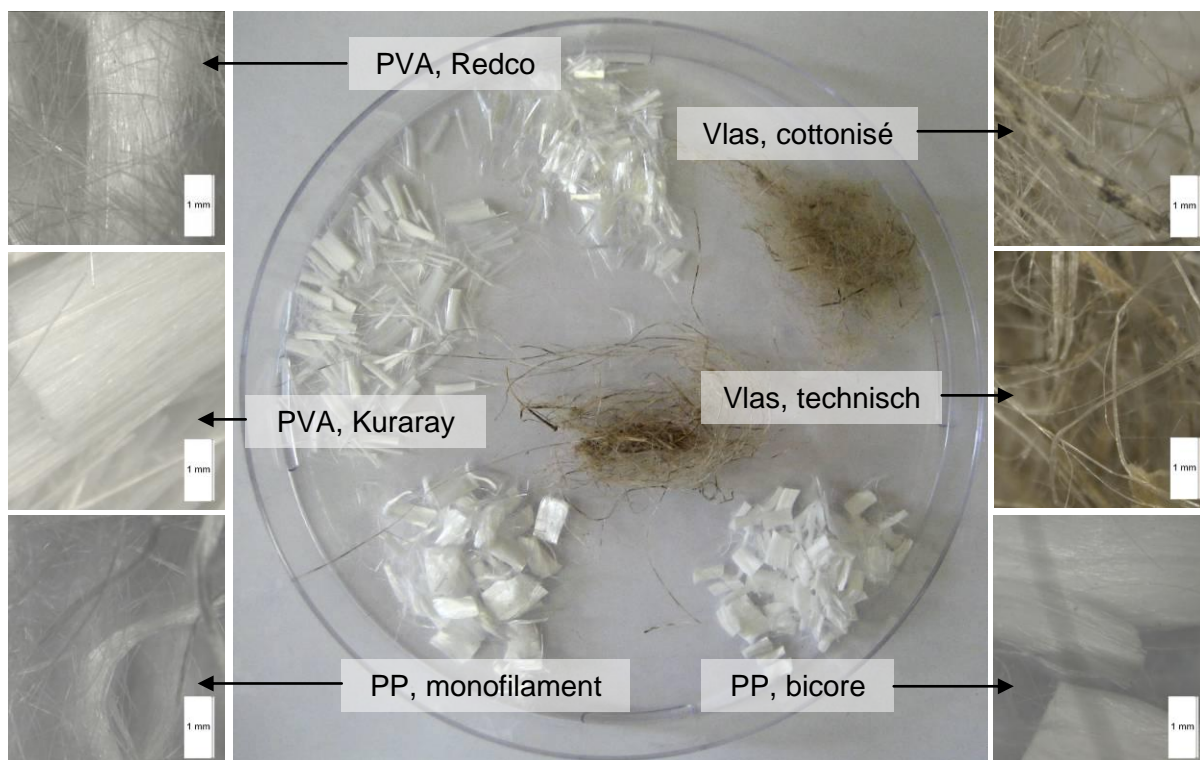
Tabel 7: Chemische compositie [m%] en specifieke oppervlakte [m^2/kg]^[100]

	CEM I 52,5 N	Klasse F vliegias
CaO	63,12	2,47
SiO ₂	18,73	49,34
Al ₂ O ₃	4,94	24,55
Fe ₂ O ₃	3,99	6,23
SO ₃	3,07	0,30
MgO	1,02	1,73
K ₂ O	0,77	3,84
Na ₂ O	0,41	0,52
Specifieke oppervlakte	390	330

Er werden zes types vezels bestudeerd (Tabel 8). Er waren twee vormen van PP-vezel, namelijk de monofilament en de bicore vezel. PP monofilament bevatte 30 % vocht en PP bicore had 20 % vocht. Ook bij de PVA-vezels werden twee types bestudeerd. Het eerste type vezel was dit van het Belgische bedrijf Redco en was niet gecoat. Het tweede type PVA-vezel was wel gecoat met 1,2 m% olie en kwam van het Japanse bedrijf Kuraray. De vezel heet technisch: Kuralon K-II (RSC15x8). Deze werd tijdens de productie met olie gecoat om de eigenschappen in ECC te verbeteren. Tenslotte werden ook de technische vlasvezel en de gecottoniseerde vorm gebruikt. De technische vezel bestond uit gekapte klodden van ongeveer 5 cm. Dit was ruw materiaal en diende nog verwerkt te worden. De klodden dienden versneden te worden tot vezels van 2-3 cm, waarbij de klodden ontdaan moesten worden van leem en andere aardmaterialen. Cottonisatie bestaat er in dat de technische vlasvezels ontbonden worden in elementaire vezels. Hierbij wordt deels het pectine en het hemicellulose verwijderd. De gemiddelde diameter van gecottoniseerd vlas ten opzichte van technisch vlas ligt lager. Figuur 46 toont een weergave van de verschillende soorten vezels. De specifieke eigenschappen van de vezels en hoe de vezels gemaakt worden, worden weergegeven in paragrafen 2.2.1.1, 2.2.2.1 en 2.2.2.2.

Tabel 8: De verschillende types vezels gebruikt in het onderzoek

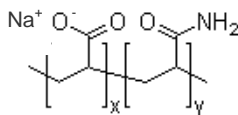
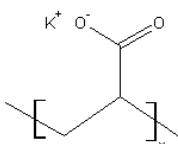
Type	ρ [kg/m ³]	L _r [mm]	Opmerking
PPb (PolyPropyleen)	910	6	Redco: Bicore
PPm (PolyPropyleen)	910	8	Redco: Monofilament
PVA (PolyVinylAlcohol)	1300	6	Redco, niet gecoat
PVK (PolyVinylAlcohol)	1300	8	Kuraray, gecoat
Technisch vlas	1500	var.	Debruyne, Technische vezel
Gecottoniseerd vlas	1500	var.	Debruyne, Gecottoniseerde vezel



Figuur 46: De gebruikte soorten vezels

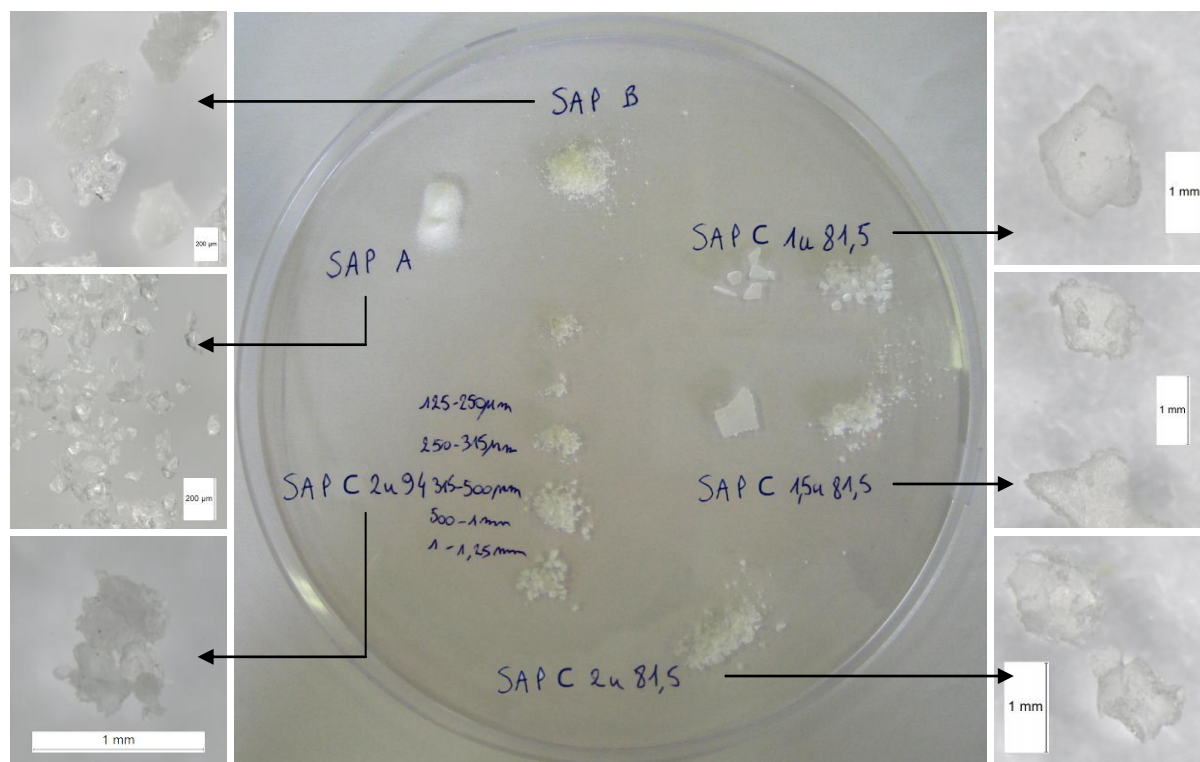
3.1.2. Superabsorberende partikels

Er werden drie soorten SAP beschouwd. De eerste soort (SAP A) is een copolymeer van acrylamide en natriumacrylaat, de tweede soort (SAP B) bestaat uit een gecrosslinkt kaliumzout polyacrylaat. De beide stoffen kunnen met het programma ChemSketch[®] gevisualiseerd worden (Figuur 47 en Figuur 48).

Figuur 47: SAP A (copolymeer) in ChemSketch[®]Figuur 48: SAP B (gecrosslinkt) in ChemSketch[®]

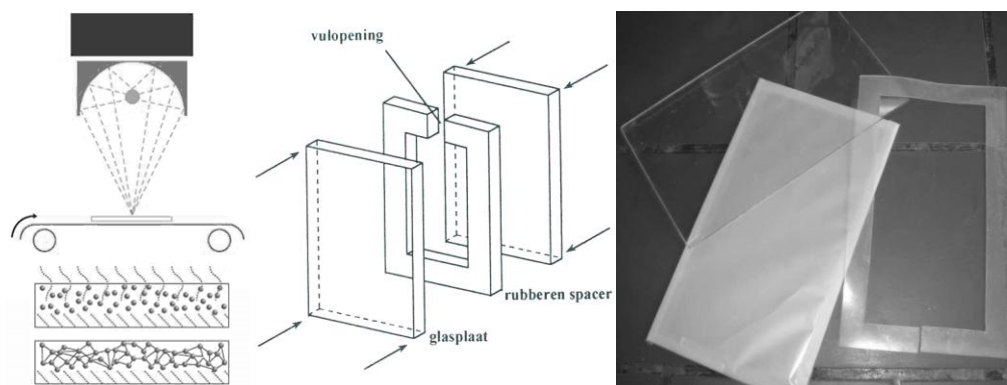
SAP A zijn geurloze witte korreltjes met een pH van 6 en hebben een dichtheid van ca. 700 kg/m^3 . Ze zijn onoplosbaar in water.^[101] Het SAP B heeft dezelfde karakteristieken.^[102]

Het derde superabsorberend polymeer is SAP C, verkregen via een nieuw polymeer ontwikkeld aan de onderzoeksgroep Polymeerchemie en Biomaterialen van de Universiteit Gent. Figuur 49 toont SAP A, SAP B en de vier soorten SAP C gebruikt in deze thesis.

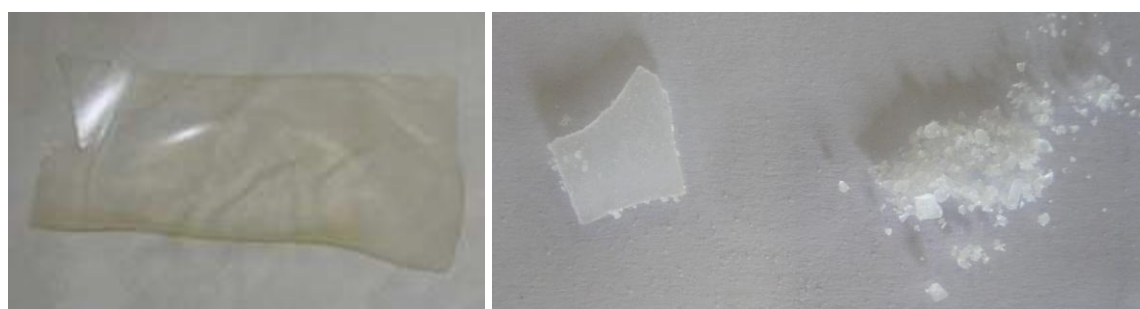


Figuur 49: De gebruikte soorten superabsorberende polymeren

Het nieuwe polymeer heeft dubbele bindingen, wat een UV-geïnitieerde vinyl-polymerisatie mogelijk maakt. De dubbele binding wordt hierbij omgevormd tot twee enkele bindingen. Het nieuwe polymeer werd opgelost in gedemineraliseerd water en een geschikte hoeveelheid UV-initiator werd toegevoegd. UV-initiatoren zullen onder invloed van UV-licht vrije radicalen vormen en de polymerisatie initiëren door te reageren met de dubbele binding. Het mengsel werd geïnjecteerd tussen twee glazen platen gescheiden door een siliconen spacer van 1mm dik (Figuur 50). Het geheel werd afgedicht en onderworpen aan een curing met UV-licht.^[103] Er werden vier soorten SAP C gemaakt. De eerste soort heeft een modificatiegraad van 81,5 % en een bestralingstijd van 1 u. De tweede heeft 81,5 % modificatiegraad en 1,5 u bestralingstijd en de derde respectievelijk 81,5 % en 2 u. De vierde soort had 2 u bestralingstijd maar een modificatiegraad van 94 %. De modificatiegraad drukt de vernettingsmogelijkheid uit na de vervaardiging van het nieuwe polymeer. Hoe hoger de modificatiegraad, hoe meer locaties om te vernetten (dubbele bindingen). De bestralingstijd drukt uit hoe lang het mengsel aan UV-licht werd onderworpen. Tijdens deze bestraling zal het nieuwe polymeer vernetten en een vaste gepolymeriseerde film vormen. Achteraf werd het hydrogel voorzichtig van tussen de glasplaten gehaald en gedroogd om het overtollige water te verwijderen.^[103] Het uiteindelijke resultaat na vernetten is een 'plaatje' SAP dat vermalen werd tot korrels (Figuur 51).



Figuur 50: Principe van UV-bestraling en het procedé van een 'plaatje' SAP^[103]



Figuur 51: Plaatje na UV-geïnitieerde vinyl-polymerisatie^[103] en vermalen van SAP C

3.1.3. Mengsels, proefstukken en afmetingen

De samenstelling van de mengsels spruit voort uit het volgend standaardmengsel (Tabel 9), gebaseerd op Yang en Li (2008) met 2 vol.% PVA-vezels (Kuraray).^[17] V_f staat hierbij voor het volumepercent aan vezels en Spl voor Superplastificeerder.

Tabel 9: Standaardmengsel 2 vol.% PVA-vezel van Redco [kg/m³]

V_f vol.%	Cement kg/m ³	Vliegas kg/m ³	Zand kg/m ³	Water kg/m ³	Spl kg/m ³	PVA kg/m ³	Totaal kg/m ³
2	571	685	456	332	15	26	2085

3.1.3.1. Mengsels ter bepaling van verwerkbaarheid en verdichting

De mengsels bestonden per proefreeks uit drie prisma's van 160·40·40 mm³. Er werd 2 vol.% PVA-vezels gebruikt van Redco en de samenstelling van drie mengsels is deze in Tabel 9. Een vierde mengsel had een lagere W/C-factor en had 314 kg/m³ water.

3.1.3.2. Mengsels ter bepaling van absorptie op het scheurvlak

Drie mengsels bestonden per reeks uit drie 160·40·40 mm³ proefstukken zonder vezels maar wel met de andere componenten uit Tabel 9. Bijkomend werd er respectievelijk 0,5 m% SAP A (2,86 kg/m³ droog ingevoegd en 15 kg/m³ superplastificeerder), 0,5 m% SAP B (2,86 kg/m³ droog ingevoegd en 10 kg/m³ superplastificeerder) en 2 m% SAP B (11,42 kg/m³ droog ingevoegd en 7 kg/m³ superplastificeerder) ingemengd.

3.1.3.3. Mengsels ter bepaling van de invloed van SAP op de sterkte

Om de invloed van SAP op de mechanische eigenschappen te onderzoeken, werden zes mengsels onderzocht. De mengsels bestonden uit *REF*, *A1*, *A1G*, *B1*, *B1G* en *B2*, en bestond per reeks uit drie 160·40·40 mm³ proefstukken. Deze hadden geen vezels en hadden enkel SAP ingevoegd. *REF* bevatte geen SAP, *A1* bevatte 1 m% SAP A (5,71 kg/m³) die als droge korrel werd ingevoegd. *A1G* bevatte ook 1 m% SAP A, maar deze werd als gel ingemengd. *B1* en *B1G* zijn van hetzelfde principe, maar bevatten SAP B in plaats van SAP A. *B2* had 2 m% aan SAP B, welke droog ingemengd was. Voor *B1* en *B1G* werd 7 kg/m³ superplastificeerder gebruikt en voor *B2* werd 5 kg/m³ superplastificeerder gebruikt.

3.1.3.4. Mengsels ter bepaling van de vierpuntsbuigproef-eigenschappen

Alle mengsels bestonden uit drie 160·40·15 mm³ proefstukken. Deze werden verkregen door twee 160·40·40 mm³ proefstukken te verzagen. Er wordt een code gebruikt om het mengsel te typeren. Allereerst wordt het type vezel vermeld waarbij *PVA* staat voor een PVA-vezel van Redco, *PVK* voor een PVA-vezel van Kuraray, *VLc* voor een gecottoniseerde vlasvezel, *VL* voor de technische vlasvezel, *PPb* voor de PP-vezel bicore en *PPm* voor de PP-vezel monofilament. Vervolgens wordt het volumepercent vezels V_f gegeven. Daarnaast komt de curingconditie. *C* staat hierbij voor een controlemengsel, *ND* voor een nat/droog cyclus, *90* voor een curing in een relatieve vochtigheid van meer dan 90 % en *60* voor een curing in een relatieve vochtigheid van 60 %. Een eventueel vierde luik in de code verduidelijkt de samenstelling of de ondergane condities van het proefstuk. Zo staat *R* voor een lager opgelegde rek, *14* voor een scheuraanbreng op 14 dagen, *1,2 %* voor een eigen gecoate PVA-vezel van Redco met ontkistingsolie (1,2 % van de vezels of 0,312 kg/m³), *K1* voor de vervanging van één derde van de vliegias door kalksteenmeel op basis van het gewicht, *K2* voor twee derden vervanging van de vliegias door kalksteenmeel, *W/C* voor een lagere W/C-factor en andere zijn de gegevens voor SAP zoals voorgaande paragrafen. De reeksen hebben de samenstelling zoals in Tabel 9, tenzij anders vermeld in Tabel 10.

Apart van deze reeksen werd er ook nog één proefstuk *PVK2* onderzocht met als afmetingen 160·40·7,5 mm³. Ook nog twee *PVK2* en twee *PPm2* 220·40·10 mm³ proefstukken werden gebruikt. Deze mengsels hadden respectievelijk 2 vol.% aan PVA-vezels van Kuraray en 2 vol.% PP-vezels monofilament.

Tabel 10: Codes, aantal en afwijking op de standaardsamenstelling [kg/m³]

Code	Aantal [-]	Scheuraanbreng [dagen]	Water [kg/m ³]	Spl [kg/m ³]	Vezels [kg/m ³]	SAP [kg/m ³]
PVA 2 C	3	56	332	15	26	-
PVA 2 ND	9	28	332	15	26	-
PVA 1 ND	3	28	332	10	13	-
PVA 0,5 ND	3	28	332	5	6,5	-
PVA 2 90	3	28	332	15	26	-
PVA 2 60	3	28	332	15	26	-
PVA 2 ND R	6	28	332	15	26	-
PVA 2 ND 14	3	14	332	15	26	-
PVA 2 ND 1,2 %	6	28	332	15	26	-
PVA 2 ND K1	3	28	332	15	26	-
PVA 2 ND K2	3	28	332	15	26	-
PVA 2 ND W/C	3	28	267	16	26	-
PVK 2 ND	3	28	332	6,8	26	-
VLc 1 C	3	56	332	15	15	-
VLc 1 ND	3	28	332	15	15	-
VLc 0,5 ND	3	28	332	7,5	7,5	-
VL 1 C	3	56	332	15	15	-
VL 1 ND	3	28	332	15	15	-
VL 0,5 ND	3	28	332	7,5	7,5	-
PPb 2 C	3	56	325,9	10	24,3	-
PPb 2 ND	3	28	325,9	10	24,3	-
PPb 1 ND	3	28	329	5	12,15	-
PPm 2 C	3	56	324,2	10	26	-
PPm 2 ND	3	28	324,2	10	26	-
PPm 1 ND	3	28	328,1	5	13	-
PVA 2 ND A1G	3	28	332	15	26	5,71
PVA 2 ND B1	3	28	332	14	26	5,71
PVA 2 90 B1	3	28	332	14	26	5,71
PVA 2 60 B1	3	28	332	14	26	5,71
PVA 2 ND B1G	3	28	332	14	26	5,71
PVA 2 ND B2	3	28	332	16	26	11,42
PVA 2 ND B4	3	28	332	17	26	22,84

3.1.3.5. Mengsels ter bepaling van de permeabiliteit

De mengsels P bestonden uit cilindrische proefstukken $\Phi 78$ mm·20 mm. Alle reeksen bevatten 1 vol.% PVA-vezels, dus 13 kg/m³. Er werden referentieproefstukken *REF* gemaakt zonder SAP en deze reeks bestond uit vijf proefstukken. De reeks *B0,5* bevatte 0,5 m% SAP B en omvatte vijf proefstukken. *B1*, *B2* en *B4* hadden respectievelijk 1 m%, 2 m% en 4 m% SAP B en bestonden respectievelijk uit drie, vier en vier proefstukken. *A1* bevatten 1 m% SAP A en bestond uit vijf cilindrische proefstukken. *C1* had 1 m% SAP C, welke een modificatiegraad had van 81,5 % en een bestralingstijd van 2 u. *C1* bestond uit vijf proefstukken. Het SAP B werd steeds droog ingemengd, het SAP A werd als gel ingemengd.

3.2. Methoden

3.2.1. Absorptiekenmerken

De absorptie van superabsorberende polymeren is belangrijk om de mate van scheurdichting door contact met vloeistoffen na te gaan. Ook de kinetica van het zwellen is belangrijk om de snelheid van de scheurdichting te duiden. De absorptiemogelijkheden in beton en mortelproefstukken zijn belangrijk aangezien ionen zoals Ca^{2+} de mate van absorptie lager doen uitvallen dan bijvoorbeeld in gedemineraliseerd water. De absorptie en de kinetica dienden dus eerst nagegaan te worden.

De absorptie kan bepaald worden via drie methoden, die elkaar aanvullen. Ten eerste is er een analogon aan de 'theezak'-methode, namelijk filtratie. Ten tweede kunnen SAP microscopisch onderzocht worden en ten derde is er de DVS-meting (Dynamic Vapour Sorption). De SAP dienden steeds vacuüm gedroogd te worden met silica-korrels. De kinetica of zweltijd werd met de eerste methode onderzocht. Het is namelijk van belang te weten hoelang de SAP nodig heeft om te zwellen, dit voor de hydratatie van het proefstuk.

3.2.1.1. Vacuüm drogen van SAP met silica-korrels

De SAP-korrels werden eerst 72 u vacuüm gedroogd met silica-korrels (Figuur 52). SAP nemen namelijk vocht op uit de omgeving en dat zou een vertekend beeld geven. SAP dienden dus steeds ontdaan te worden van hun vocht en dit voor alle proeven. SAP werden steeds afgewogen met een AG 204 Mettler Toledo (W15).

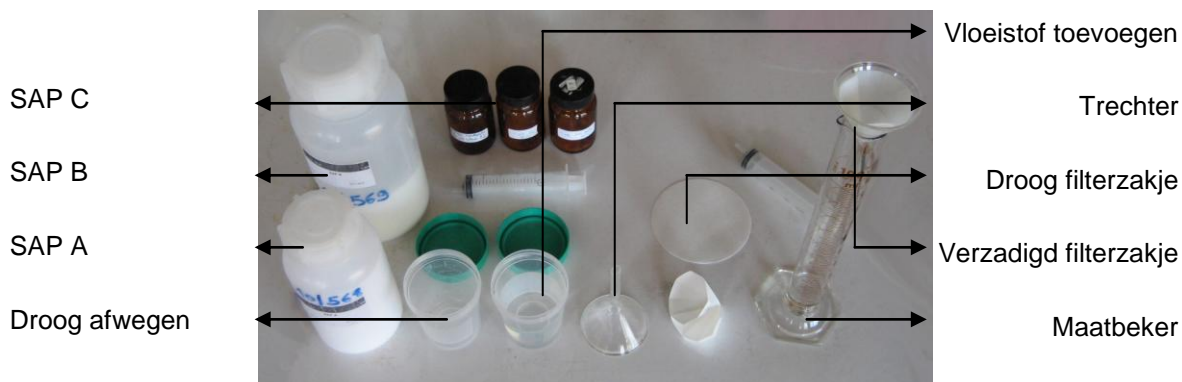


Figuur 52: Vacuüm drogen van SAP met silica-korrels

3.2.1.2. Eerste methode: filtratie

Één van onderstaande vloeistoffen werd toegevoegd aan ongeveer 0,1 g SAP. De absorptie werd bepaald in gedemineraliseerd water (pH=6,5), cementfiltraat (pH=12,8), een zure oplossing bestaande uit HCl aangelengd met water (pH=2,5), een basische oplossing bestaande uit NaOH aangelengd met water (pH=13), artificeel zeewater (pH=6,3) en

kraantjeswater (pH=6,8). Het cementfiltraat werd bekomen door 20 g CEM I in 200 g gedemineraliseerd water te mengen. Het mengsel werd afgefilterd na een periode van 30 min. 1 kg nagemaakt zeewater (Noordzee) bevatte 24 g NaCl, 5 g MgCl₂, 4 g Na₂SO₄, 0,7 g CaCl₂ en 0,8 g MgBr₂.^[104] De absorptie werd bepaald aan de hand van de opstelling in Figuur 53.



Figuur 53: Opstelling van de filtratieproef

Eerst werd het droog SAP afgewogen in een beker (per reeks drie absorptieproeven). Vervolgens werd de beschouwde vloeistof toegevoegd (op 0,1 ml nauwkeurig) aan het droog SAP. De SAP en de vloeistof rustten 24 u om de totale absorptie te bewerkstelligen. Na 24 u werd de absorptie bepaald. De vloeistof met het nu gezwollen SAP wordt afgefilterd in een maatbeker. Hierbij werd een trechter en filterzakje gebruikt. Het filterzakje werd voor de proef verzadigd met water om de absorptie ten gevolge van de filter uit te sluiten. Vervolgens werd het mengsel SAP en vloeistof afgefilterd voor 3 u. Achteraf werd enkel de doorgesijpelde vloeistof (het niet opgenomen water) opgemeten tot op 0,1 ml nauwkeurig om de absorptie te bepalen. De absorptie werd nagegaan voor SAP A, SAP B, SAP C met een modificatiegraad van 81,5 % en een bestralingstijd van 1 u; 1,5 u en 2 u, en met een modificatiegraad van 94 % en een bestralingstijd van 2 u. De volgende algemene formule (32) werd hiervoor gebruikt.

$$\frac{\Delta V [ml]}{m_{SAP} [g]} \cdot 1 [g/l] \quad (32)$$

Deze methode is analoog aan de 'theezak'-methode. Bij deze methode worden SAP-korrels in een theezakje in vloeistof gedompeld. Enkel de vloeistof kan in het zakje, waardoor de massatoename een maat is voor de absorptie. In dit onderzoek werden SAP-korrels afgefilterd waarbij de uitgelopen vloeistof werd beschouwd als een maat voor de absorptie. Dit is nauwkeuriger aangezien de theezak een beduidende invloed kan spelen.

Het effect van nat/droog cycli werd ook nagegaan. Van de bekomen filtraten werd een deel in een beker bewaard en vacuüm gedroogd met silica-korrels. Enkel één verkregen filtraat SAP A en één verkregen filtraat SAP B werden bestudeerd. Na verloop van tijd werd opnieuw de droge vorm van de SAP bereikt. Hieruit kon de desorptie berekend worden uit het verschil in massa. Na de desorptie kon de tweede absorptie berekend worden.

3.2.1.3. Tweede methode: microscopische analyse

De tweede methode was de microscopische analyse van de afzonderlijke SAP-korrel. Hierbij werd een korrel onder de optische microscoop (Leica S8 APO met DFC 295 camera in Figuur 54) gelegd en werden voorzichtig waterdruppels toegevoegd aan het SAP met behulp van een 1 ml spuit.



Figuur 54: Leica S8 APO met DFC 295 camera

De methode bestond er in de afmeting van een vacuüm gedroogd SAP en de afmeting van een verzadigd SAP op te meten. Na het toevoegen van een kleine druppel werd steeds een beeld genomen via de software Leica®. De laatste afbeelding voor het oververzadigd zijn van het SAP, is de benodigde afmeting. Dit werd gradueel gedaan aangezien er een waterbel rondom de SAP-korrels gevormd werd bij oververzadiging. In deze methode zijn sferische korrels nodig. Om de absorptie te bepalen, dient er enkel uitgegaan te worden van de relatieve verhouding van de afmetingen van een droog basiskorreltje ten opzichte van een verzadigd exemplaar. Het verschil in volume tussen het droog en verzadigd SAP-partikel ten opzichte van het droog basisvolume en dit gedeeld door de dichtheid ρ geeft de absorptiewaarde. In formule (33) staat r_{\max} voor de straal van een verzadigd SAP-partikel en r_0 voor de straal van een droog SAP-partikel. Hierbij is enkel de relatieve verhouding van de stralen van belang. Dit onderzoek werd enkel gedaan met gedemineraliseerd water, kraantjeswater en cementfiltraat en dit enkel voor SAP B, aangezien deze nagenoeg cirkelvormige korrels had. Er werden steeds drie herhalingen uitgevoerd per vloeistof.

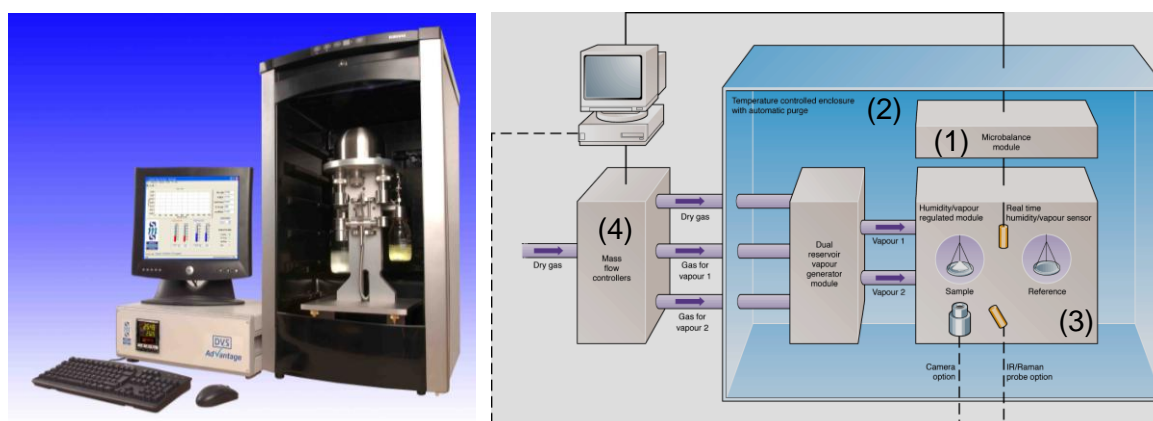
$$\frac{4/3 \cdot \pi \cdot (r_{\max}^3 - r_0^3)}{4/3 \cdot \pi \cdot r_0^3} \text{ geeft } [cm^3/cm^3] \quad (33)$$

Dit delen door ρ [cm^3] geeft [cm^3/g]

Ook de groei werd bestudeerd. Dit kon aan de hand van een graduele toevoeging van waterdruppels tot verzadiging. Dit kon ook door een grote waterdruppel over het SAP te leggen. Zo kon de wijze van zwellen gevisualiseerd worden in deze waterbel. De groei werd nagegaan voor SAP A, SAP B, SAP C met een modificatiegraad van 81,5 % en een bestralingstijd van 1 u; 1,5 u en 2 u, en met een modificatiegraad van 94 % en een bestralingstijd van 2 u.

3.2.1.4. Derde methode: dynamische damp sorptie test (DVS)

Een derde techniek om de absorptie te bepalen in een omgeving met een relatieve vochtigheid van 100 % was de dynamische damp sorptie test (DVS, Dynamic Vapour Sorption). Het is een gravimetrische techniek die de hoeveelheid geabsorbeerde waterdamp bepaalt opgenomen door het te testen sample. Er wordt gestart met een volledig droog staal, en vervolgens wordt de relatieve vochtigheid stelselmatig verhoogd. De massaverandering wordt opgemeten. Van zodra de massatoename een constant peil bereikt, wordt de relatieve vochtigheid opnieuw verhoogd. De methode toont de water sorptie isothermen. Dit is het evenwicht van waterdamp sorptie bij een constante relatieve vochtigheid en temperatuur. Het toestel dat hiervoor gebruikt werd is de DVS-1 (Figuur 55).



Figuur 55: DVS-1, Dynamic Vapour Sorption Test^[105]

De machine bestaat uit een Cahn microbalans (1) in een temperatuurgecontroleerde omhulling (2) tussen het sample en een referentiestuk (3). Alles gebeurt in een gecontroleerde toevoer van nat en droog stikstofgas om de relatieve vochtigheid te regelen tot op het gewenste peil (4).^[105]

Om de evenwichtswaarde bij elke relatieve vochtigheidsstap te bepalen, werd volgende interpolatieformule gebruikt.^[100] Dit is een analytische oplossing van de diffusievergelijking. De totale massa in functie van de tijd $m(t)$ wordt weergegeven in formule (34),

$$m(t) = a \cdot (1 - b \cdot \exp(-c \cdot t)) \quad (34)$$

waarbij a , b en c constanten zijn. Voor t naderend naar oneindig is $m(t)=a$. Dit is het evenwicht.

De DVS-absorptie werd nagegaan voor SAP A, SAP B en SAP C met een modificatiegraad van 81,5 % en een bestralingstijd van 2 u.

3.2.1.5. Zwelling in functie van de tijd

De absorptiekinetica werd nagegaan met de filtratiemethode. Eerst werden de SAP vacuüm gedroogd met silica-korrels. De SAP die onderzocht werden waren SAP C met een modificatiegraad van 94 % en een bestralingstijd van 2 u. Deze SAP hadden een groot bereik qua afmetingen van SAP-korrels. De SAP werden afgezeefd met behulp van de zeven 1,25 mm; 1 mm; 500 µm; 315 µm; 250 µm en 125 µm. De partikels groter dan 1,25 mm en kleiner dan 125 µm werden niet onderzocht. De vijf fracties die werden afgezeefd (125-250 µm, 250-315 µm, 315-500 µm, 500 µm - 1 mm en 1-1,25 mm) werden onderworpen aan filtratietesten. Het onderzoek werd verricht met cementfiltraat als te absorberen vloeistof.

Nu werd naast het verschil in volume, dat een maat is voor de absorptie, ook de tijd opgemeten waarbij de SAP zich vrij in de vloeistof bevonden. Dit is de tijd waarbij SAP een vloeistof kunnen opnemen. Het filtreren heeft hier een invloed op. De SAP zijn dan namelijk nog steeds omringd met vloeistof terwijl een deel van de vloeistof uitgefiltreerd wordt. Daarom werd bij de opgelegde tijd, de tijd bijgeteld tot wanneer het filterzakje bijna leeg was. Zo werd de tijd opgemeten waarbij de SAP steeds omringd waren door vloeistof.

Formule (28) wordt hernomen, met Q het debiet op een tijdstip t en Q_{\max} corresponderend met t_{∞} . Formule (29) werd experimenteel door Esteves (2010) bepaald voor een SAP op basis van een polyacrylaat. Hierbij is D de diffusiecoëfficiënt gelinkt aan de diameter Φ_p van een SAP-partikel. De formule (29) is enkel geldig in de synthetische poriënvloeistof van Esteves en voor een SAP op basis van een polyacrylaat.^[89] De voorfactor 2760 geldt voor een tijd uitdrukt in minuten. In dit onderzoek werd de tijd uitgedrukt in seconden, en werd de voorfactor 42 (2760/60). Deze formule werd vergeleken met de SAP in dit onderzoek.

$$Q(t) = Q_{\max} (1 - \exp(-D \cdot t)) \quad (28)$$

$$D = 2,76 \times 10^3 \cdot \phi_p^{-1,567} \quad (29)$$

Via het statistisch programma SPSS[®] werden steeds ook de bestpassende waarden voor de factoren in formule (29) via de laagste residuele som van kwadraten bepaald.

Ook SAP A en SAP B werden onderzocht op het gebied van zweltijd, en dit zowel in gedemineraliseerd water als in cementfiltraat. De afmeting van de commerciële SAP-partikels (SAP A en SAP B) werden opgemeten met de optische microscoop (Leica S8 APO met DFC 295 camera).

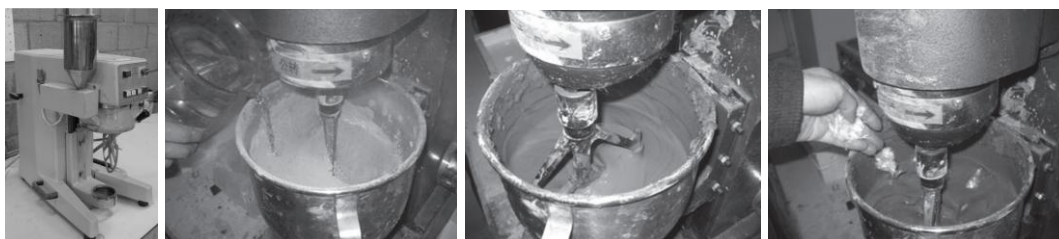
3.2.2. Zoeken naar goede mengprocedure en verdichting

De mengsels die gebruikt werden bevinden zich in paragraaf 3.1.3.1. Vanaf dat de goede mengprocedure gevonden werd, werd er onderzoek gedaan naar een goede wijze van verdichten. De drie basismengsels werden ofwel in twee keer verdicht met 60 slagen, ofwel in één keer met 120 slagen, ofwel met twee minuten op de triltafel.

3.2.3. Mengprocedure

Voor het mengen werden alle vaste bestanddelen afgewogen met de weegschaal Toledo Gravitygram (W9). Het water werd afgewogen met weegschaal Radwag WPS 4000/C/2 (W17). In de eerste stap werden de vaste elementen (portlandcement, vliegashoudend cement en fijn silicazand) met een mortelmenger (Testing, Bluhm & Feuerherdt) gedurende één minuut gemengd. Water werd dan aan het droge mengsel toegevoegd gedurende 10 s en gemengd gedurende één minuut met 140 toeren per minuut. Vervolgens werd de superplastificeerder toegevoegd en werd er verder gemengd gedurende één minuut. Vervolgens werden de randen 30 s afgeschraapt. Er werd overgeschakeld op 285 toeren per minuut. Het mengsel werd vijf minuten gemengd (tot het homogeen was). Wanneer het mengsel consistent en uniform verdeeld was, werden de vezels traag toegevoegd gedurende een tweetal minuten. Vervolgens werd er nog een minuut doorgemengd op 140 toeren per minuut en drie minuten op 285 toeren per minuut. De mallen werden gevuld en het mengsel werd verdicht door de mallen op een triltafel te plaatsen gedurende twee minuten. De proefstukken werden na 24 u ontkist en bewaard bij een relatieve vochtigheid van meer dan 90 % en een temperatuur van 20 ± 2 °C.

Een weergave van het toevoegen van water, superplastificeerder en vezels wordt in Figuur 56 getoond.



Figuur 56: Menging van PVA-ECC: water, superplastificeerder en vezeltoevoeging^[63]

De mengprocedure voor mortelproefstukken met SAP en vezels was analoog als deze voor de vezels hierboven beschreven. Het enige verschil was het bijvoegen van droog SAP aan de vaste elementen in de eerste stap. De SAP werden eerst drie dagen vacuüm gedroogd. Het toevoegen van SAP als gelvorm werd na één minuut droog mengen ingelepeld. Hierbij werden de SAP daags voordien verzadigd met kraantjeswater om gehele absorptie te garanderen. Hierbij werd het water dat ingemengd diende te worden in het mengsel, aan het benodigde droge SAP toegevoegd. De gel-stap vervangt dus de water-stap in bovenstaande mengprocedure.

Er wordt opgemerkt dat de SAP steeds vacuüm gedroogd werden met silica-korrels. Zo niet hebben de SAP al vocht uit de omgeving opgenomen.

Het toevoegen van ontkistingsolie aan ongecoate PVA-vezels van Redco gebeurde door eerst de olie af te wegen in een 1 ml spuit op de weegschaal Mettler Toledo AG 204 (W15). Vervolgens werden steeds kleine druppels aan de vezels toegevoegd en werden de vezels goed doorgeroerd en gemengd.

De ontkiste proefstukken werden bewaard bij bovenstaande omgevingscondities tot hun belastingsdag (14 of 28 dagen). Na belasting werden ze in hun omgevingsconditie (nat/droog cycli, een relatieve vochtigheid groter dan 90 % of een relatieve vochtigheid gelijk aan 60 %) geplaatst gedurende vier weken waarna de mate van zelfheling werd onderzocht.

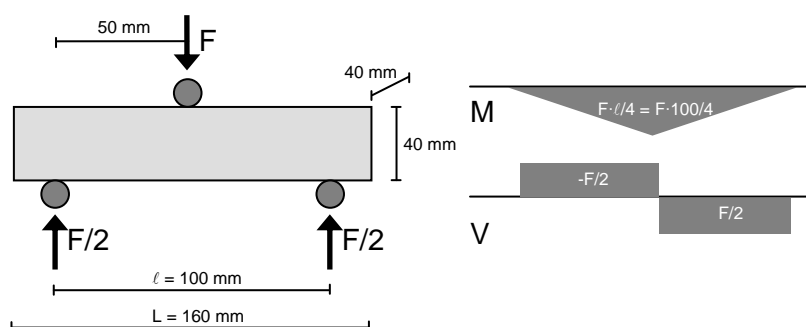
De matrix van de mortelproefstukken zal na verloop van tijd verder hydrateren en dit zal leiden tot een toename in sterkte. Om dit effect in rekening te brengen, werd er gebruik gemaakt van controlestukken die dezelfde curingcondities ondergingen als de gescheurde proefstukken maar zelf niet voorzien werden van scheuren.

3.2.4. Opmeten en afwegen van de mortelprisma's

Prisma's werden afgewogen met weegschaal Radwag WPS 4000/C/2 (W17) en afgemeten met schuifmaat DS03 of DS03b. Deze hebben een nauwkeurigheid van 0,02 mm indien de afmeting kleiner is dan 100 mm en 0,03 mm met een afmeting tussen 100 mm en 200 mm. Er werd steeds een gemiddelde waarde van afmetingen berekend via vijf metingen per vlak: vier in de hoeken en één in het midden.

3.2.5. Mechanische eigenschappen: buigtreksterkte en druksterkte

Om de buigtreksterkte van toevoeging van SAP-partikels te vergelijken zonder toevoeging van vezels, werden de mengsels uit paragraaf 3.1.3.3 onderzocht. De schematisering van de opstelling voor een driepuntsbuigproef, samen met de krachtenverdeling, wordt gegeven in Figuur 57. De visuele weergave van de proefmachine komt later aan bod.



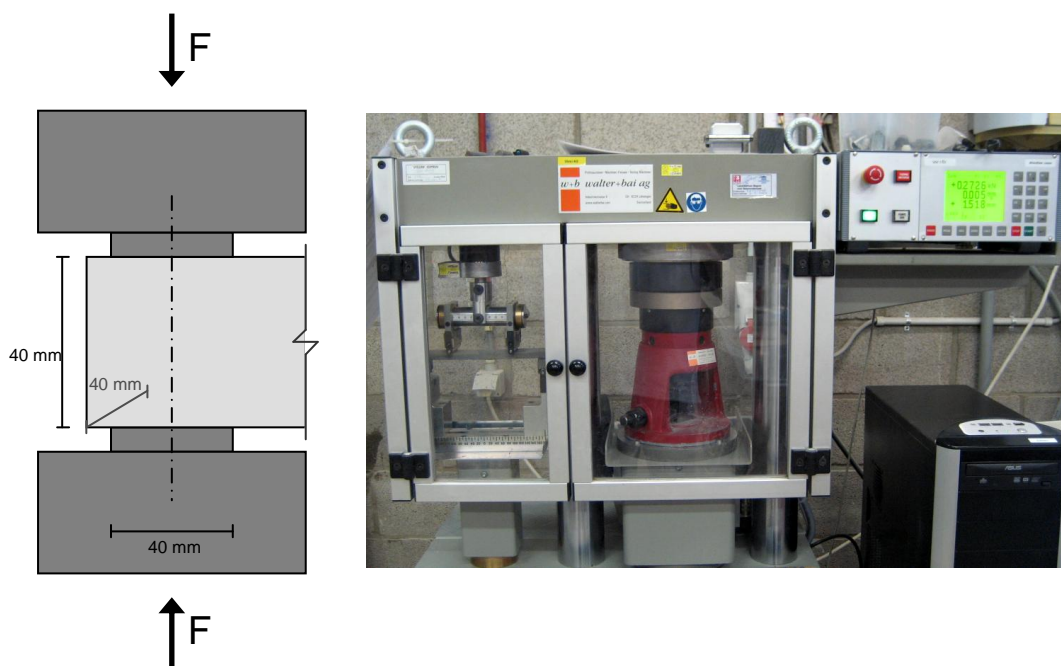
Figuur 57: Schematisering driepuntsbuigproef en krachtenverdeling

De buigtrekspanning f_{ctfl} kan berekend worden uit de maximale kracht. Dit wordt weergegeven in formule (35).^[66] Dit is het optredend moment over het weerstandsmoment van een balk met l de lengte tussen de tussensteunen, b de breedte van een prisma, h de hoogte, L de totale lengte en F_{max} de maximale kracht.

Driepuntsbuigproef:^[66]

$$f_{ctfl} = \frac{F_{max} \cdot l}{4} \cdot \frac{6}{b \cdot h^2} = \frac{300}{2} \cdot \frac{F_{max}}{b \cdot h^2} \quad (35)$$

De mechanische eigenschappen werden onderzocht met de proefmachine Walter+Bai DB 250/15. Per reeks waren er drie prisma's die belast werden met de driepuntsbuigproef tot breuk. De twee helften die per prisma bekomen werden, werden op hun beurt onderworpen aan een drukproef. Zo zijn er zes druktesten. Dit is volgens NBN EN 196-1 (maart 1995) (B12). Figuur 58 toont de schematisatie van de drukproef en haar afmetingen samen met de visuele weergave van de proefmachine. De proefmachine werkt met de software Proteus[®] 10.1.

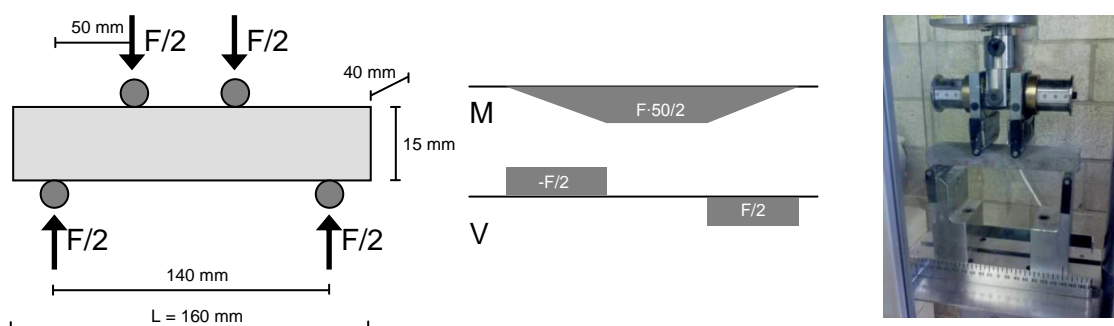


Figuur 58: Schematisering drukproef en visuele weergave van de proefmachine

3.2.6. Mechanische eigenschappen via de vierpuntsbuigproef

3.2.6.1. Opstelling en theoretische beschouwingen

Een composiet met vezels ondergaat meervoudige scheurvorming, dus het is onlogisch een driepuntsbuigproef te gebruiken aangezien het scheurvlak in het desbetreffende geval vastgelegd wordt. De herwinbare buigsterkte werd onderzocht met behulp van een vierpuntsbuigproef.^[66] Figuur 59 toont de schematisering, krachtswerking en de opstelling van de vierpuntsbuigproef in het laboratorium.



Figuur 59: Schematisering vierpuntsbuigproef, krachtenverdeling en opstelling

Een servohydraulisch testsysteem zorgde voor de verplaatsingsgecontroleerde proef (0,002 mm/s om een quasistatische belasting na te bootsen). De buigtrekspanning van de gebruikte opstelling is weergegeven in formule (37) als het moment gedeeld door het weerstandsmoment.^[66] Formule (36) geeft de buigtrekspanning bij een standaardproef met $l=100$ mm.

Vierpuntsbuigproef:^[66]

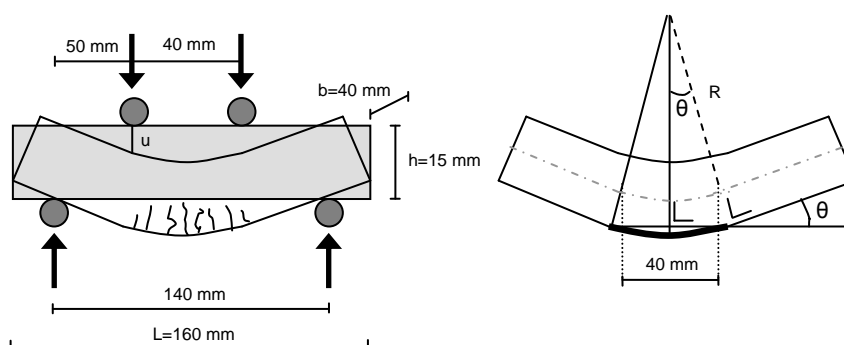
$$f_{cfl} = \frac{F_{\max} \cdot l}{2 \cdot 3} \cdot \frac{6}{b \cdot h^2} = \frac{F_{\max} \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (36)$$

Niet equidistant:

$$f_{cfl} = \frac{F_{\max} \cdot 50}{2} \cdot \frac{6}{b \cdot h^2} = \frac{F_{\max} \cdot 150}{b \cdot h^2} \quad (37)$$

Er is bij deze proef geen sprake van uniforme trekspanningen, maar van een gradiënt met de grootste spanning aan het meest gerokken uiterste deel van de matrix. Dit deel heeft een grotere rekcapaciteit door het size-effect wat hier niet diende beschouwd te worden aangezien $h=15$ mm $<$ 50 mm.

De proefstukken kunnen onderaan voorzien worden van een LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Dit werd initieel gebruikt. Door de kromming van het mortelproefstuk zal deze echter een vertekend beeld geven van de totale scheurwijdte. Ook de grafieken die bekomen werden bleken 'rommelig' te zijn. Vandaar een omrekening naar de verticale verplaatsing. Hierbij werd er vertrokken van een algemene ideale doorbuiging met twee rechte stukken en een gebogen stuk ertussen (Figuur 60). De doorbuiging u kan via analytische weg gelinkt worden aan de rek in het gebogen stuk.



Figuur 60: Algemene vierpuntsbuigproef en schematisering

De relatieve hoek θ met de zijdelingse rechte stukken bedraagt:

$$\theta = \arctan(u[\text{mm}]/50) \quad (38)$$

Tezelfdertijd is deze hoek de hoek van het cirkelsegment:

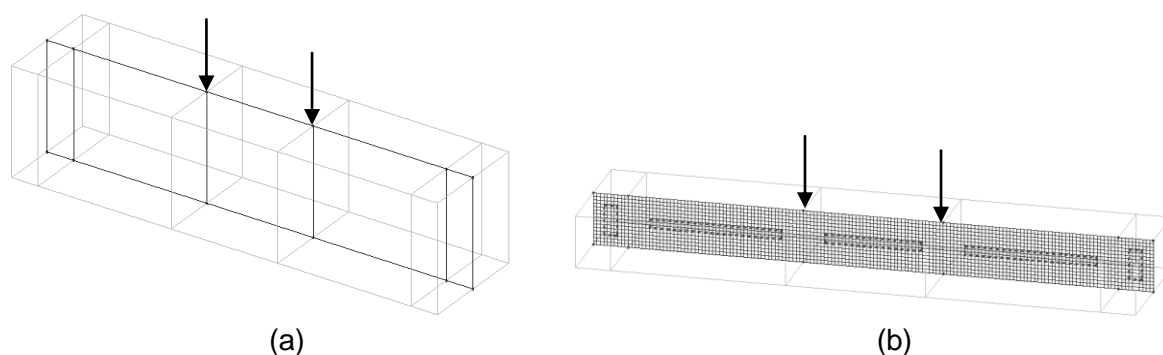
$$\sin(\theta) = 20/R \quad (39)$$

Zo bedraagt de booglengte via de straal R van de cirkel:

$$\text{booglengte} = 2 \cdot \left(R + \frac{h}{2} \right) \cdot \theta = 2 \cdot \left(\frac{20}{\sin(\arctan(u[\text{mm}]/50))} + \frac{h}{2} \right) \cdot \arctan(u[\text{mm}]/50) \quad (40)$$

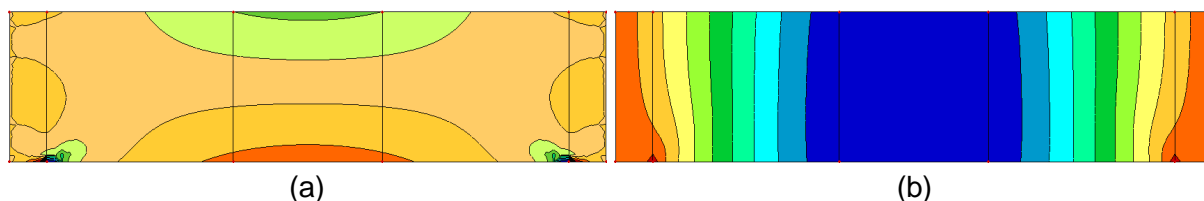
Veronderstellende dat de rechte stukken hun lengte behouden, is er enkel een relatieve rek op het boogsegment.

Indien er gebruik zou gemaakt worden van een 160·40·40 mm³ proefstuk, zou de belasting veel hoger moeten zijn om het proefstuk te scheuren. Vandaar een eerste reden om een 160·40·15 mm³ proefstuk te gebruiken. Een modellering in het programma Scia Engineer[®] weerspiegelt deze gedachtegang (Figuur 61).

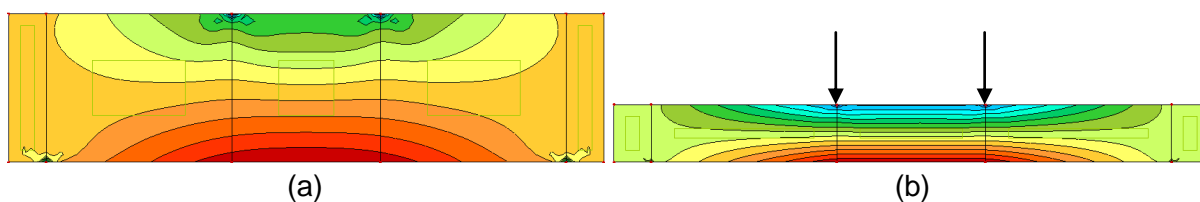


Figuur 61: Modelling van een 160·40·40 mm³ (a) en een 160·40·15 mm³ proefstuk (b)

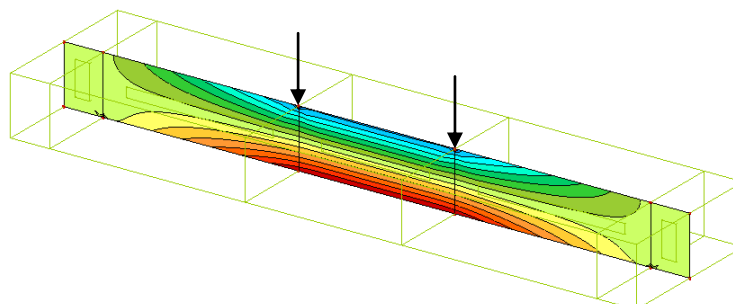
Figuur 62a toont de invloed van het eigengewicht op de spanning in een 160·40·40 mm³ proefstuk, wat verwaarloosbaar is ten opzichte van de opgelegde spanningen (Figuur 63a), want Figuur 62a wordt weergegeven onder een uitvergrotende factor. Figuur 62b toont de doorbuiging van het 160·40·40 mm³ proefstuk onder een opgelegde last van twee puntkrachten met gelijke grootte van 1 kN (zoals in de gebruikte opstelling voor de vierpuntsbuigproef) en deze stemt overeen met de werkelijkheid. De doorbuiging volgt de aannames gemaakt in bovenstaand model en werd visueel waargenomen in de proeven. Figuur 63a&b toont het verschil in krachtswerking van een 160·40·40 mm³ & 160·40·15 mm³ proefstuk. Figuur 64 is dezelfde figuur van de krachtswerking veroorzaakt door de vierpuntsbuigproef op een 160·40·15 mm³ proefstuk maar dan bevattelijk voorgesteld in 3D.



Figuur 62: Invloed van het eigengewicht op de spanning (uitvergroete factor) (a) en doorbuiging bij de vierpuntsbuigproef (b) bij een 160·40·40 mm³ proefstuk



Figuur 63: Spanning opgewekt door vierpuntsbuiging bij een 160-40-40 mm³ proefstuk (a) en een 160-40-15 mm³ proefstuk (b)



Figuur 64: 3D-aanzicht van de spanningen (vierpuntsbuigproef 160-40-15 mm³ proefstuk)

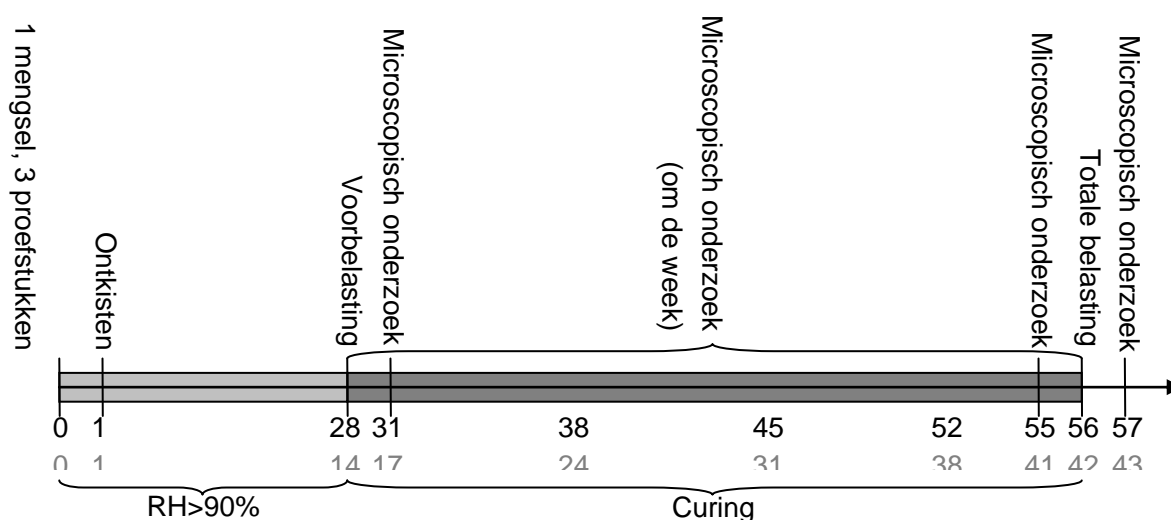
De opgewekte spanningen met eenzelfde kracht zijn een factor 7 ($40^2/15^2$) groter. Er zal dus met een lagere kracht meervoudige scheurvorming optreden. Er is een meer uniforme spanning tussen de belastingspunten bij het 160-40-15 mm³ proefstuk. De spanning reikt deels buiten de vlakken van de puntlasten van de vierpuntsbuigproef en zal in werkelijkheid meespelen in de meervoudige scheurvorming. De spanning bouwt echter af (cf. momentenlijn in Figuur 59) en enkel zwakke schakels zullen in die buitenregionen scheuren, ten opzichte van de hogere spanning tussen de belastingspunten. Het eigengewicht speelt geen beduidende rol in de krachtwerking. De doorbuiging volgt de veronderstelde buigingsvorm met twee lineaire stukken tot net voor de belastingspunten, dus de aanname van het model in Figuur 60 is gerechtvaardigd.

3.2.6.2. Experimenteel programma

Om geen uitputting van de helende agentia te hebben, moeten grote scheurwijdtes vermeden worden. In hetgeen volgt, werd de scheurwijdte beperkt tot een 50-tal μm door het inmengen van een geschikte hoeveelheid vezels waarbij de verwerkbaarheid nog aanvaardbaar moet zijn. Hierbij moet er sprake zijn van meervoudige scheurvorming met grote ductiliteit. Er diende holistisch gezocht te worden naar de ideale interactie tussen vezel, matrix en interface. De microscopische eigenschappen werden zo gemodificeerd dat de gewenste macroscopische eigenschappen bereikt werden. Het effect van het coaten van de PVA-vezels met olie werd nagegaan. PVA-vezels zijn namelijk hydrofiel door een hydroxylgroep en dat zorgt voor een sterke binding met de cementmatrix, welke in de theorie van meervoudige scheurvorming niet gewenst is. De cementgebonden matrix werd ook aangepast door het inbrengen van defecten. SAP kunnen hierbij dienen als een bron van microdefecten die meervoudige scheurvorming initiëren. Ook de matrixbreuktaaiheid werd aangepast door in te spelen op de W/C-factor.

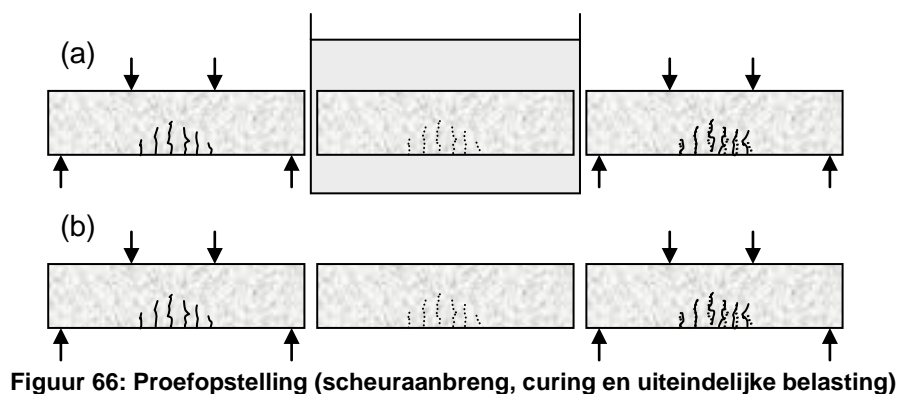
De factoren die een kritische rol spelen in het proces zijn het type vezel, de vezellengte, het volumepercentage vezels (0,5; 1 en 2 vol.%), het cementgehalte, het soort vulstof (vlieg-as of kalksteenmeel), de superplastificeerder, e.a. Deze werden gebruikt als input voor een parameterstudie. De curing gebeurde in drie omgevingscondities, namelijk een nat/droog cyclus, een relatieve vochtigheid groter dan 90 % en een relatieve vochtigheid gelijk aan 60 %. De scheur werd aangebracht op verschillende tijdstippen, namelijk 14 en 28 dagen. SAP werden zowel droog als gelachtig toegevoegd tijdens de mengprocedure van mortelproefstukken. Een andere parameter voor SAP is de gewichtsverhouding ten opzichte van het cement (0,5; 1 en 2 m% in dispersie), die gevarieerd werd in de mortelproefstukken. Met vierpuntsbuigproeven en microscopisch onderzoek werd de mate van zelfheling onderzocht.

Figuur 65 geeft het gevolgde tijdsschema weer. Allereerst werden de proefstukken gemaakt en één dag later ontkist. Wanneer de proefstukken 14 of 28 dagen oud waren, werden scheuren aangebracht met behulp van een vierpuntsbuigproef. Gedurende de curingperiode werden de scheuren op geregelde tijdstippen microscopisch onderzocht. Na nog eens 28 dagen werden de proefstukken belast tot breuk om het herstel in mechanische eigenschappen ten gevolge van zelfheling te onderzoeken. Het breukvlak werd tot slot nog een laatste keer microscopisch onderzocht. De controlestukken werden niet van een scheur voorzien na 28 dagen, maar op een leeftijd van 56 dagen belast en onmiddellijk herbelast.



Figuur 65: Tijdsschema voor de gebruikte proefreeksen [dagen]

Figuur 66 toont het verschil in curing. Sommige proefstukken werden bewaard in nat/droog cycli waarbij er steeds om de dag veranderd werd (a). De ene dag lagen de proefstukken in kraantjeswater ($T=20\pm 2$ °C) en de andere dag lagen de proefstukken bij een relatieve vochtigheid gelijk aan 60 % en een temperatuur gelijk aan 20 ± 2 °C. Andere proefstukken werden bewaard bij ofwel een $RV > 90$ %, ofwel een $RV = 60$ % (b).

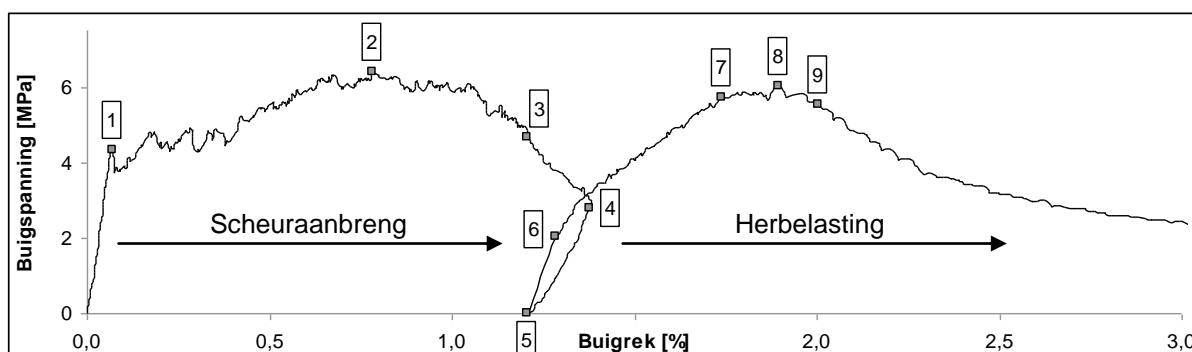


Figuur 66: Proefopstelling (scheuraanbreng, curing en uiteindelijke belasting)

De proefmachine die gebruikt werd is de proefmachine van het type Walter+Bai DB 250/15. Er werd nu enkel een hulpstuk voor een vierpuntsbuigproef aangebracht in plaats van het hulpstuk voor een driepuntsbuigproef. Om de $160 \cdot 40 \cdot 15 \text{ mm}^3$ proefstukken te verkrijgen uit paragraaf 3.1.3.4, werden twee $160 \cdot 40 \cdot 40 \text{ mm}^3$ proefstukken gemaakt en verzaagd. Indien de samenstelling dezelfde was voor twee reeksen, werden drie $160 \cdot 40 \cdot 40 \text{ mm}^3$ proefstukken gemaakt en verzaagd tot zes $160 \cdot 40 \cdot 15 \text{ mm}^3$ proefstukken. Zo werden steeds per reeks drie $160 \cdot 40 \cdot 15 \text{ mm}^3$ proefstukken gebruikt, om een statistisch gezien relevant resultaat te krijgen. De proefstukken werden op een leeftijd van zeven dagen gezaagd.

De mengsels uit paragraaf 3.1.3.4 geven de dag van scheuraanbreng weer in Tabel 10. Elk mengsel wordt belast op de dag van scheuraanbreng, 28 dagen geplaatst in curingcondities en ten slotte herbelast. De controlemengsels worden belast en onmiddellijk herbelast op een leeftijd van 56 dagen.

Een proefstuk uit één van bovenstaande reeksen werd steeds belast tot maximaal gebruik van meervoudige scheurvorming om de helende capaciteiten te onderzoeken van een uitzonderlijke belasting (verwekingsgebied: punt [4] in Figuur 67). Het gedrag van meervoudige scheurvorming werd zo volledig benut. De eindscheur had een grote scheurwijdte en hierop werd het zelfhelend gedrag bestudeerd. Het mengsel *PVA 2 ND R* werd niet belast tot het uiterste gedrag, maar tot het gedrag tussen punten [2] en [3] in Figuur 67. Dit is het punt waarbij de verweking begint op te treden. Dit leverde steeds een grote finale scheur op, om voornamelijk de grote scheuren te onderzoeken op heling. Dit als een uitzonderlijke hoge belasting.



Figuur 67: Typisch diagram als output en aanduiding opmeetpunten

De F(u)-diagrammen uit Proteus[®] 10.1 werden omgezet tot $\sigma(\epsilon)$ -diagrammen via formules (37) en (40). Hierbij wordt opgemerkt dat anomalieën werden weggewerkt zoals het positioneren van de armen van de vierpuntsbuigproef en de verhoging van de rek bij een scheur als de kracht daalt. Uit deze diagrammen werden verschillende parameters gehaald zoals de arbeid W, J_{ip} , de rek bij piekspanning ϵ_{cu} , de piekspanning σ_{cu} , ϵ_{max} , de rek horende bij de eerste-scheur-sterkte ϵ_{fc} , σ_{fc} . ϵ_{fc} en σ_{fc} werden bepaald uit de eerste relatieve knik in het diagram. De data werden gecontroleerd ten opzichte van de waarden en formules uit de literatuur. De verschillende prisma's werden onderling vergeleken op hun mechanische karakteristieken en hun gedrag op gebied van meervoudige scheurvorming. Hierbij werden de piekbelasting, de E-modulus en de sterkte vergeleken. De E-modulus werd bepaald aan de hand van de helling in het spanning/rek-diagram.

Om de mate van zelfheling te kwantificeren werden de diagrammen onderzocht op hun herwonnen stijfheid, herwonnen piekwaarde, herwonnen meervoudige scheurvorming, herwonnen eerste-scheur-sterkte en herwonnen sterkte. De formules om de proefstukken te vergelijken waren de volgende (via de punten in Figuur 67).

Stijfheid:

$$[0 - 1] \quad (41)$$

Herwonnen stijfheid:

$$\frac{[5 - 6] - [4 - 5]}{[0 - 1] - [4 - 5]} \quad (42)$$

waarbij 4-5 staat voor de helling van ongeheelde proefstukken. Dit in overstemming met verdere resultaten waarbij ongeheelde proefstukken de ontlastingscurve volgen.

Piekwaarde:

$$[2] \quad (43)$$

Herwonnen piekwaarde:

$$\frac{[8] - [4]}{[2] - [4]} \quad (44)$$

Meervoudige scheurvorming:

$$[1 - 3] \quad (45)$$

Herwonnen meervoudige scheurvorming:

$$\frac{[7 - 9]}{[1 - 3]} \quad (46)$$

Eerste-scheur-sterkte, die ook vergeleken werd met de theoretische waarde:

$$[1] \quad (47)$$

Herwonnen eerste-scheur-sterkte:

$$\frac{[7]-[4]}{[1]-[4]} \quad (48)$$

Herwonnen sterkte:

$$\frac{[6]}{[1]} \quad (49)$$

Ook de totale arbeid W , de scheurtip breuktaaiheid J_{tip} en de maximale rek ε_{max} bij eerste scheuraanbreng (punt [4]) werden vergeleken. De totale arbeid W [J] is de oppervlakte onder het spanning/verplaatsing-diagram.

Om de optredende rek duidelijker te visualiseren, werden dunne proefstukken met afmetingen $160 \cdot 40 \cdot 7,5 \text{ mm}^3$ en $220 \cdot 40 \cdot 10 \text{ mm}^3$ waargenomen en gefotografeerd bij belasting met de vierpuntsbuigproef. De belastingssnelheid was $0,002 \text{ mm/s}$ ($160 \cdot 40 \cdot 7,5 \text{ mm}^3$) en $0,005 \text{ mm/s}$ ($220 \cdot 40 \cdot 10 \text{ mm}^3$). Ook werd de tussenafstand tussen de onderste steunen vergroot naar 200 mm en tussen de armen van de vierpuntsbuigproef naar 100 mm .

3.2.7. Vezelkarakteristieken

De vezels hebben een te kleine afmeting om een vezeluittrekproef te verrichten. Ook is het moeilijk een vezel recht in een matrix te plaatsen en dan nog in te klemmen. Vandaar dat in dit onderzoek de variant gebruikt wordt, die vermeld werd in paragraaf 2.2.3.6. Na de finale belasting van de vorige paragraaf werden de uitpuilende lengtes via de variant ter bepaling van de hechteigenschappen (paragraaf 2.2.3.6) vergeleken met de waarden uit de literatuur. De uitpuilende lengtes werden opgemeten via de optische microscoop (Leica S8 APO met DFC 295 camera).

3.2.8. Visualisatie scheuren en opmeten scheuren

Er werd gebruik gemaakt van microscopisch onderzoek (Leica S8 APO met DFC 295 camera) om zelfherstel van de scheuren te visualiseren. Het aantal scheuren werd samen met de scheurwijdte geteld en opgemeten in onbelaste toestand. De scheurwijdte werd bepaald om de halve centimeter en een gemiddelde waarde werd berekend. De scheurwijdte werd vergeleken met de gemiddelde rek opgelegd in de vierpuntsbuigproef. De vorming van CaCO_3 en het zwellen van SAP werd gevisualiseerd en opgevolgd met behulp van de microscoop. De mate van scheurdichting werd weergegeven in grafiekvorm.

3.2.9. Onderzoek scheurvlak

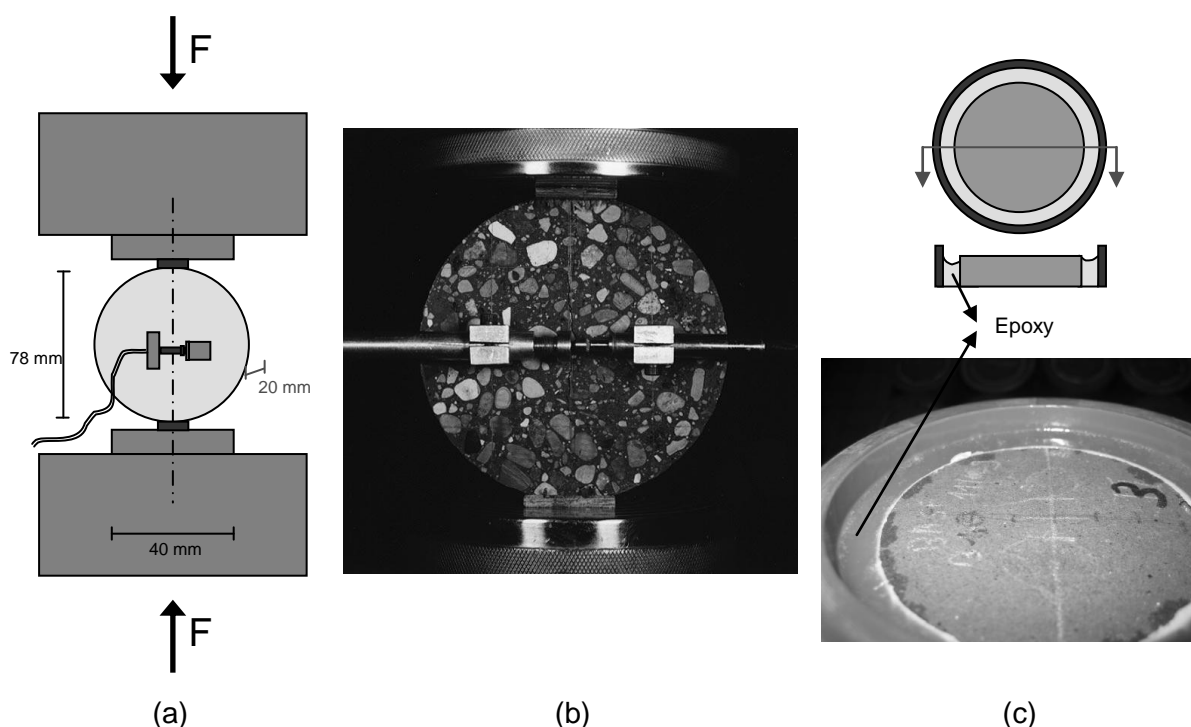
Om de mate van absorptie op een scheurvlak te onderzoeken, werden proefreeksen zonder vezels uit paragraaf 3.1.3.2 onderzocht. Deze werden dan met de proefmachine van het type Walter+Bai DB 250/15 beproefd tot breuk met een driepuntsbuigproef op een leeftijd van 11 dagen. De scheurvlakken konden dan microscopisch bestudeerd worden op het vlak van wateropname door de SAP. Hierbij werden de gebroken proefstukken eerst een week vacuüm gedroogd met silica-korrels. Vervolgens werd er water via een spuit druppelsgewijs toegevoegd op het scheurvlak. Via de optische microscoop (Leica S8 APO met DFC 295 camera) werden dan visualisaties gemaakt van de zwelcapaciteit van het SAP, ingebed in de cementgebonden matrix. Hierbij staan het opvullen van de scheuren en het herwinnen van de dichtheid door de zwellende reactie centraal.

3.2.10. Waterdoorlatendheidseigenschappen

3.2.10.1. Spleijsterkte

Bij de permeabiliteitstest, of waterdoorlatendheidsproef, werden de cilindrische proefstukken $\Phi 78 \text{ mm} \cdot 20 \text{ mm}$ uit paragraaf 3.1.3.5 gebruikt. Hiervoor werden cilindrische ringen met diameter 78 mm en hoogte 20 mm als mal gebruikt. Na het ontkisten werd de diameter en de dikte opgemeten met de schuifmaat Mitutoyo (DS 04, nauwkeurigheid 0,022 mm). Er werd steeds 1 vol.% PVA-vezels gebruikt om een enkele scheur te verkrijgen bij een spleijproef.

Na een week werd een Braziliaanse spleijproef (Figuur 68a&b) gebruikt om een totale scheurwijdte op te leggen van 300 μm . De proefmachine die gebruikt werd, was van het type Walter+Bai DB 250/15. Hierbij werden er tussen de drukplaten en het proefstuk triplex plaatjes gepositioneerd. De scheurwijdte werd opgemeten met één LVDT en de belastingssnelheid was 0,001 mm/s. De methode is deze beschreven in Aldea (1999 & 2000)^{[72][73]} en Van Tittelboom (2011)^[106].



Figuur 68: Schematisatie Braziliaanse splijtproef, visuele weergave^[72] en proefstuk

Scheuren werden opgemeten langs beide kanten, om de halve centimeter, en een gemiddelde waarde werd bepaald. Dit gebeurde aan de hand van microscopisch onderzoek (Leica S8 APO met DFC 295 camera).

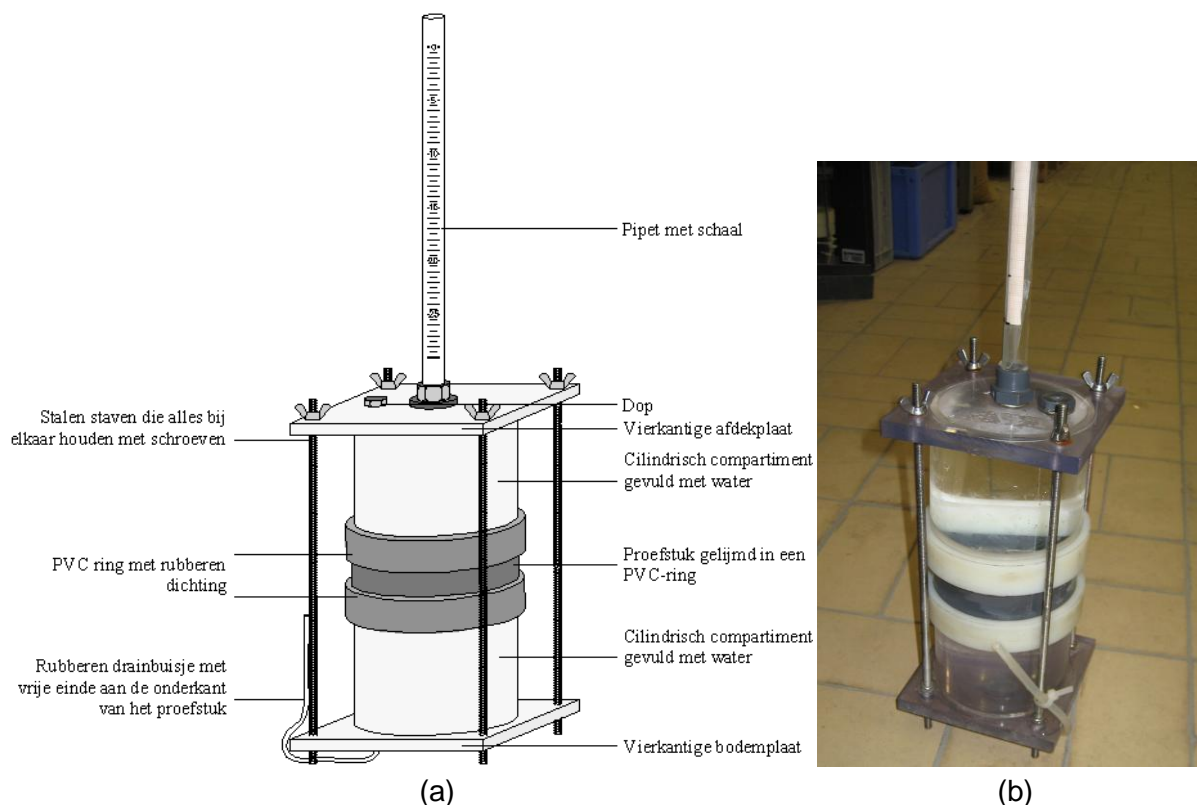
De meeste proefstukken hadden een enkele scheur. Een viertal hadden dit niet en hierbij werd de grootste scheurwijdte van de opgetreden scheuren opgemeten. Indien er meerdere scheuren aanwezig waren met eenzelfde grootte (grootste scheur), werd de waarde vermenigvuldigd met de derde wortel uit het aantal grootste scheuren. Dit aan de hand van formule (22), de formule van Tsukamoto.^{[38][47][53]} De grootste scheur aan de inlaatzijde van het proefstuk in een permeabiliteitstest (bovenkant) is namelijk dominant. Voor de verklaring van de symbolen wordt er verwezen naar paragraaf 2.3.2.3.

$$k = \frac{a_g \cdot I \cdot l_s \cdot g}{12 \cdot v} \cdot w^3 \quad (22)$$

De proefstukken werden vervolgens ingetapet aan de boven- en onderkant. Een gescheurd en getapet proefstuk werd in een PVC-ring geplaatst met grotere diameter en de opening tussen beiden werd gevuld met epoxy om geen randeffecten tijdens de proef te krijgen. De tape werd na het uitharden van het epoxy verwijderd. Hierbij werden proefstukken als in Figuur 68c bekomen.

3.2.10.2. Permeabiliteitsproef

Om de doorlatendheid te kwantificeren doorheen de proefstukken uit de vorige paragraaf, werd volgende opstelling gebruikt (Figuur 69). Zo kunnen de scheurdichtende eigenschappen van SAP worden nagegaan.



Figuur 69: Standaardopstelling permeabiliteitsproef^[106] en opstelling in het laboratorium

De opstelling bestaat uit twee cilindrische compartimenten met daartussen het proefstuk gelijmd in een PVC-ring tussen een rubberen dichting. Ze worden samengehouden door stalen staven met schroeven. Boven het bovenste cilindrische compartiment bevindt zich een pipet met schaal op millimeterpapier. Onder het onderste cilindrische compartiment komt er een rubberen drainbuisje met het vrije uiteinde ter hoogte van de onderkant van het proefstuk.

De proef werd na 3 weken opgestart, nadat de proefstukken vacuüm verzadigd werden met water. Eerst werden de proefstukken hiervoor drie dagen vacuüm getrokken en vervolgens werd gedemineraliseerd water ingezogen onder vacuüm. Er werd water ingezogen tot het moment waarbij de proefstukken zich geheel onder water bevonden. Zo bleven de proefstukken onder water en vacuüm voor drie uur. Vervolgens werd de vacuümtrekpomp uitgeschakeld en de proefstukken waren op die manier vacuüm verzadigd. De proefstukken werden in het water bewaard tot ze in de opstelling werden ingedrukt.

Eerst werd het onderste compartiment gevuld met gedemineraliseerd water tot over de rubberen dichting. Vervolgens werd het verzadigd proefstuk ingedrukt. Hierbij werd er ervoor gezorgd dat er zich geen luchtbel aan de onderkant van het proefstuk bevond. Het proefstuk werd overgoten met water om de verzadiging te verzekeren. Vervolgens werd het bovenste compartiment vastgeschroefd en deels volgegoten met water via de dop op het bovenste cilindrische compartiment. Dan werd de waterdichtheid van de rubberen dichtingen onderzocht. Indien deze niet waterdicht waren, werden de rubberen dichtingen ingesmeerd met vet. Vervolgens werd via de dop bovenaan alles opgevuld met water. Een tweede test tot waterdichtheid in de tijd werd onderzocht door een PVC-buisje aan het vrije uiteinde van de drain te plaatsen tot de hoogte van de pipet. De waterniveaus bleven steeds gelijk door het principe van de communicerende vaten. Zo kon het proefstuk ook niet droog komen te staan indien er niet opgemeten werd.

Elke dag werd de doorlatendheid gemeten aan de hand van formule (20) in paragraaf 2.3.2.3. Hierbij werd eerst het PVC-buisje weggenomen en het pipet tot boven volgegoten. h_0 tot h_f werd opgemeten, en zo ook de tijd die nodig was om dit hoogteverschil Δh te overbruggen. Op die manier kon via formule (20) de doorlatendheidsconstante k berekend worden. Voor de verklaring van de symbolen wordt er verwezen naar paragraaf 2.3.2.3.

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot t_f} \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right) \quad (50)$$

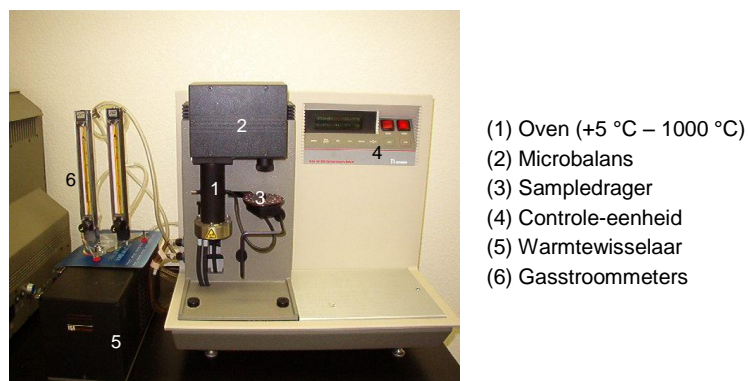
Hierbij werd de doorlatendheid k gedeeld door de derde macht van de scheurwijdte. Zo zal het effect van de scheurwijdte op de doorlatendheid k verdwijnen. Enkel de invloed van SAP wordt zo onderzocht. Dit is in overeenstemming met de formule van Tsukamoto (formule (22)).^{[38][47][53]}

$$k = \frac{a_g \cdot I \cdot l_s \cdot g}{12 \cdot \nu} \cdot w^3 \quad (22)$$

Ook op de proefstukken van de permeabiliteitstesten werd microscopisch onderzoek verricht om de zelfhelende eigenschappen te onderzoeken.

3.2.11. Thermogravimetriscche analyse (TGA)

Een thermogravimetriscche analyse (TGA) kan gebruikt worden om de samenstelling te vinden van een staal. In dit onderzoek was dit het witte residu dat bij de permeabiliteitstesten werd gevonden en zuiver SAP. Het SAP was SAP A, SAP B en SAP C (81,5 %, 2 u).



Figuur 70: TGA-machine, Hi-Res TGA 2950 Thermogravimetric Analyzer^[107]

Bij de TGA werd het staal geleidelijk (10 °C/min) opgewarmd tot een bepaalde temperatuur (900 °C). Het massaverlies werd opgemeten en aan de hand van de temperatuur waarop dit gebeurde kon het specimen geïdentificeerd worden. Dit gebeurde met de machine Hi-Res TGA 2950 Thermogravimetric Analyzer.^[107] Het monster werd hierbij op een thermisch inert schaalte geplaatst. Een elektronische microbalans controleerde het gewicht. Een thermokoppel deed dat met de temperatuur. Van zodra het materiaal degradeerde, nam de massa af en het is net dit wat voor de karakterisatie van het materiaal zorgt.

Er werd onderzocht of het materiaal, het witte residu bij de permeabiliteitstesten, calciumcarbonaat was. CaCO_3 degradeert bij een temperatuur van 700-750 °C.^[108]

3.2.12. Statistische verwerking

De gegevens gehaald uit de software Proteus[®] 10.1, werden statistisch onderzocht met het programma SPSS[®]. Het significantieniveau was steeds 5 %.

Twee gemiddelden werden vergeleken met een t-test. Meerdere gemiddelden werden vergeleken met een ANOVA (analysis of variance). Bij deze laatste werd steeds de homogeniteit van de varianties onderzocht (met een test van Levene). Om het significant verschil tussen gemiddelden te onderzoeken, werden post hoc testen uitgevoerd via ANOVA. Als de varianties homogeen waren, werd een Student-Newman-Keuls test uitgevoerd. Indien de varianties niet homogeen waren, werd een Dunnett's T3 test uitgevoerd. De testen delen de gemiddelden op in groepen met significant verschillende waarden ten opzichte van elkaar. Eenzijdige testen werden uitgevoerd om verschillen te onderzoeken. Dit steeds met een significantieniveau van 5 %.

4. Resultaten en bespreking

4.1. Onderzoek naar verwerkbaarheid en verdichting

Algemeen was het mengsel met 2 vol.% aan PVA-vezel (Redco) moeilijk verwerkbaar met de labo-menger en de superplastificeerder werd verhoogd van 6,8 tot 15 kg/m³. Een eerste mengprocedure bleek een mengsel te geven dat moeilijk verwerkbaar was, dus dit werd geoptimaliseerd tot de mengprocedure beschreven in 3.2.3. Hierbij wordt er voornamelijk langer gemengd, en op een hoger toerental (285 t/min in plaats van 140 t/min). Het mengen duurde tot er een homogeen mengsel verkregen werd. Na toevoeging van de vezels werd er opnieuw doorgemengd op een hoger toerental tot een quasi homogeen mengsel bereikt was.

Ook de wijze van verdichten werd onderzocht. Verdichting in twee lagen zorgde voor een navenante samenhang. De vezels waren dan in twee afzonderlijke delen aanwezig in het prisma. De proefstukken met de geoptimaliseerde mengprocedure verdichtten zowel 2 min op de triltafel, als met 120 slagen in één laag, analoog. Alle mengsels werden met 2 min op de triltafel verdicht.

De vezels bleken steeds de doorslaggevende factor in de globale verwerkbaarheid. Het inmengen van vezels zorgde voor een matig tot goede verwerkbaarheid. Algemeen steeg de verwerkbaarheid met het verlagen van het volumepercentage aan vezels. Mengsels met PP-vezels waren analoog qua verwerkbaarheid ten opzichte van mengsels met PVA-vezels (Redco). Vlas diende steeds gekuist te worden en ontdaan van grove stukken en leem, en uiteindelijk geknipt tot 2-3 cm. De verwerkbaarheid van mengsels met vlasvezels was slechter dan de synthetische vezels (hoewel minder volumepercentage). Dat komt door de hogere vochtopname door vlasvezels. Mengsels met gecottoniseerde vlasvezels waren het slechtst verwerkbaar en slechts een maximum van 1 vol.% aan gecottoniseerde vlasvezels was haalbaar. De lagere verwerkbaarheid komt door de kleinere diameter bij een gecottoniseerde vlasvezel. Een Kuraray mengsel was het best verwerkbaar door de ondergane coating van de PVA-vezels. De Kuraray PVA-vezels hebben zo niet meer hun hydrofiële eigenschappen en zorgen voor een verbetering van de verwerkbaarheid. Een verlaging van de W/C-factor gaf logischerwijs een mindere verwerkbaarheid. Het coaten van de PVA-vezel van Redco met ontkistingsolie (zie later) gaf weinig verschil in verwerkbaarheid.

Standaardmengsels met 2 vol.% PVA-vezels van Redco waren na een dag tot anderhalve dag verhard. PP-proefstukken bleken sneller verhard dan PVA-proefstukken (Redco). Het inmengen van kalksteenmeel zorgde voor een trage verharding van het mengsel. Proefstukken met natuurlijke vezels bleken ook trager verhard, ook al was er minder volumepercentage ingemengd ten opzichte van standaardmengsels met 2 vol.% aan PVA-vezels. De proefstukken met gecottoniseerde vlasvezels verhardden echter sneller dan de proefstukken met technische vlasvezels. Het mengsel met de technische vlasvezel was nog niet goed verhard na anderhalve dag, en dit in tegenstelling tot alle andere gebruikte types vezels.

Proefstukken met PVA-vezels van Kuraray waren het best en het snelst verhard. Een proefstuk met lage W/C-factor had een goede verdichting. Een proefstuk met de eigen oliegecoate PVA-vezel gaf een verharding analoog aan het standaardmengsel.

Droog toevoegen van SAP A zorgde voor een mengsel dat nauwelijks verwerkbaar was, ook met het maximum aan superplastificeerder. Dit zelfs als er geen vezels toegevoegd werden. Bij het ontkisten na twee dagen was het proefstuk nauwelijks verhard. Er is dus sprake van een tragere hydratatie waarbij het beton nog brokkelbaar was. Na 11 dagen was het prisma poreus langs de buitenkant en brokkelbaar. SAP nemen eerst water op uit het mengsel als ze droog toegevoegd worden en geven dit geleidelijk af in de tijd. Zo is er minder water beschikbaar voor de primaire hydratatie.

Door de SAP A als gel in te voegen, verhoogde de verwerkbaarheid sterk. Gewone toevoeging van SAP A gaf een droog mengsel dat nauwelijks verwerkbaar was en korrelige proefstukken met heel veel holtes. Door de SAP korrels op voorhand in gelvorm te brengen door het benodigde water voor het mengsel bij de SAP te voegen, verbeterde de verwerkbaarheid enorm. De gelvorm werd ruim op voorhand bereid (1 dag) aangezien SAP A meer tijd nodig heeft om water op te nemen dan SAP B. De verwerkbaarheid was iets beter dan dat van een PVA-mengsel en gaf een goed verdicht en niet-korrelig proefstuk. Algemeen verbetert de verwerkbaarheid dus door het toevoegen van SAP A als gelvorm.

Een mengsel met SAP B had minder superplastificeerder nodig en was goed verwerkbaar. SAP B verbetert dus de verwerkbaarheid door een beter plastisch karakter ten opzichte van SAP A. De proefstukken verhardden goed. Een mortelmengsel met SAP B is beter verwerkbaar en geniet dus de voorkeur op de dispersieve SAP A. Hoe meer SAP er toegevoegd worden, hoe lager de verwerkbaarheid. Dit komt omdat SAP water opnemen en het mengsel minder viskeus wordt.

De verwerkbaarheid van een mortelmengsel met SAP B als gel was iets minder dan het mengsel waarbij SAP B als korrel ingevoegd werd. Dit komt omdat SAP B relatief grote korrels heeft (zie verder) en daardoor grote brokken verzadigde SAP het mengsel obstrueren. Zo zal de SAP ook minder verspreid worden in de mortelmatrix (agglomeraten) dan wanneer SAP B droog ingemengd wordt.

De verwerkbaarheid van proefstukken met het nieuwe SAP C verschilde weinig met een standaardmengsel.

De verharding van de proefstukken met SAP hadden meer tijd nodig dan de PVA-mengsels. Hoe meer SAP er ingevoegd werden in een mortelmengsel, hoe trager de verharding. Dat komt omdat het SAP haar water traag afgeeft. Dit is ook te zien in Figuur 45.

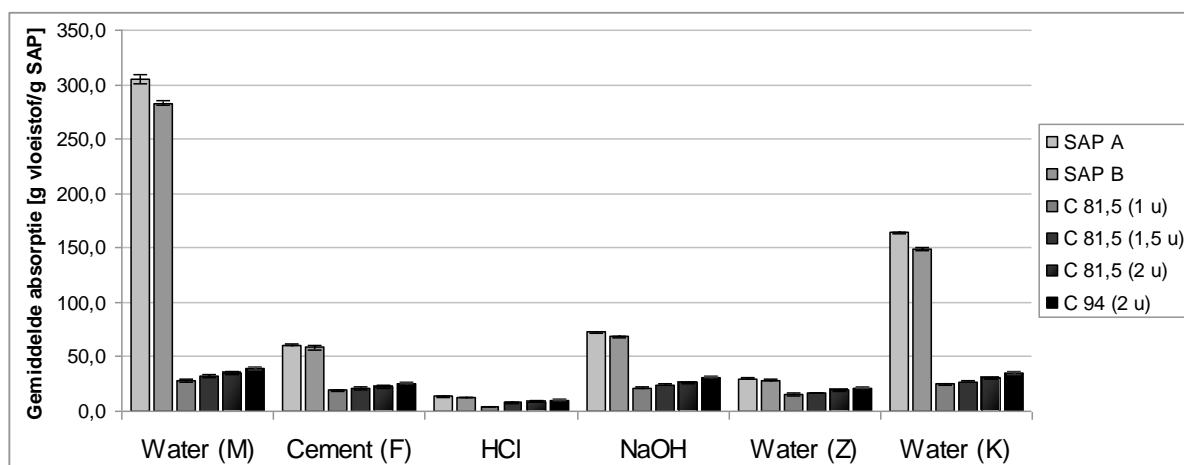
4.2. Absorptie SAP

De absorptie geeft een zwellingsaanwijzing van een vloeistof tussen de polymeerketens. Er vormen voornamelijk waterbruggen. De polymeerketens lopen in werkelijkheid niet altijd parallel, maar lopen kriskras door mekaar en zijn af en toe gecrosslinkt. De polymeerketens reichten zich na toevoegen van vloeistof en gaan uit elkaar, waardoor het SAP zwelt.

4.2.1. Filtratie

Na het toevoegen van een vloeistof (algemeen) werd een doorzichtige suspensie zichtbaar. Deze zweefde over de bodem na enkele seconden tot minuten en kon nog steeds water opnemen in de tijd. Vandaar dat het mengsel SAP en vloeistof een dag rustte. Zo werd een totale absorptie bewerkstelligd. Het is dan deze suspensie die afgefilterd werd. Algemeen werd opgemerkt dat SAP B sneller kon afgefilterd worden. Dit komt door de grotere korrelgrootte ten opzichte van SAP A. De kleine SAP A zorgt voor een blokkering van de uitstroomgaatjes in het filterzakje.

De gemiddelde absorptie wordt weergegeven in Figuur 71 en dit samen met de standaardafwijking. Hierbij staat Water (M) voor gedemineraliseerd water, Cement (F) voor cementfiltraat, HCl voor de aangelengde HCl-oplossing, NaOH voor de aangelengde NaOH oplossing, Water (Z) voor gesimuleerd zeewater en Water (K) voor kraantjeswater. C 81,5 (1 u) staat voor SAP C met een modificatiegraad van 81,5 % en een bestralingstijd van 1 u.



Figuur 71: Gemiddelde absorptie van SAP in verschillende vloeistoffen met standaardfout

Tussen alle verschillende vloeistoffen bestaat er een significant verschil in absorptie. De commerciële SAP A en B halen betere resultaten dan SAP C. Gedemineraliseerd water geeft de beste resultaten. Bij absorptie kunnen de negatief geladen polymeerketens van de SAP afgeschermd worden door ionen. Aangezien er geen ionen zijn (geen mineralen) in het gedemineraliseerd water, is er dus geen afscherming. Er is dus een maximale zwellings- en opname van water. Elke schakel van een polymeerketen is sterk hydrofiel. In water ontplooit

de keten zich en de korrels zwellen en vormen een gel. Ten opzichte van de andere vloeistoffen die wel ionen bevatten, moet de absorptie maximaal zijn, en dat vloeit ook voort uit de statistische verwerking van de resultaten. Kraantjeswater bevat ijzers en andere metalen en dus meer ionen dan gedemineraliseerd water. Vandaar is de zwelling minder in kraantjeswater.

Uit de waarden uit Figuur 36 (Song et al., 2007)^[77] blijkt dat de absorptie daalt met respectievelijk kraantjeswater, een basische oplossing en een zure of zoute oplossing. Dit is hier ook de trend. De absorptiewaarden voor de SAP gebruikt in de paper zijn hoger aangezien het andere SAP betreft. Enkel de relatieve verhouding kan vergeleken worden.

De basische oplossingen geven minder absorptie dan gedemineraliseerd water en kraantjeswater. Dit is een logisch resultaat aangezien de Ca^{2+} -ionen en Na^+ -ionen de negatief geladen polymeerketens van de SAP afschermen. Zo is er minder zwelling. Het verschil in absorptie tussen cementfiltraat en een NaOH-oplossing zit hem in het verschil in grootte van de ionen (Na^+ is kleiner dan Ca^{2+}), maar vooral in het verschil in lading. Ca^{2+} heeft een hogere lading en zorgt zo voor een sterkere reductie in zwelling. In cementfiltraat zitten er ook nog andere ionen, namelijk Na^+ , K^+ en SO_4^{2-} . Deze zorgen dan ook voor een schermffect van de negatieve ladingen in de polymeerketens waardoor de SAP minder vloeistof kunnen opnemen en zorgen dus mede voor een reductie in absorptie.

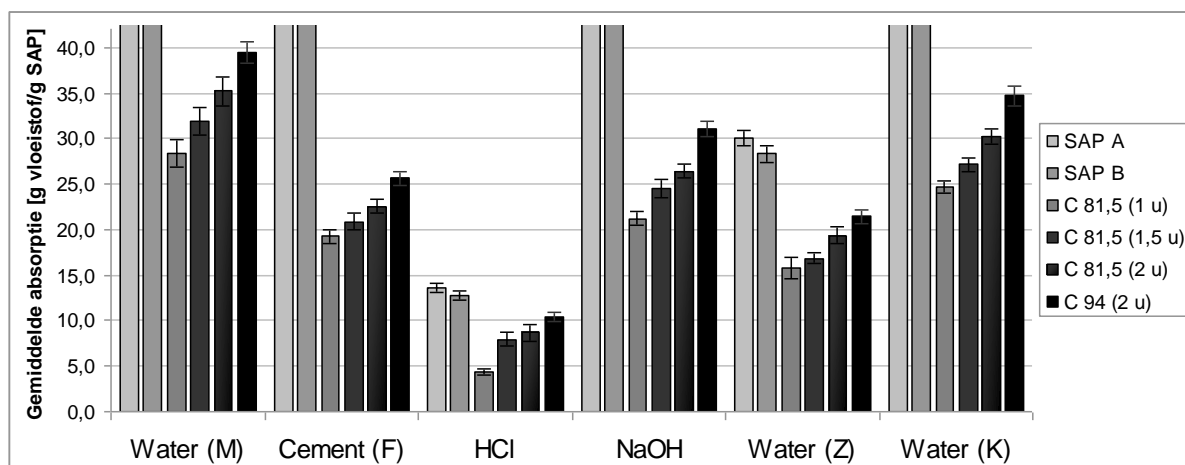
Indien een zout toegevoegd wordt aan SAP, zal het SAP water afgeven.^[74] Dat komt doordat de Na^+ -ionen voor afscherming van de polymeerketens zorgen. De ionen in het omringende zoute water worden gestabiliseerd door het water dat in de SAP zit. Daardoor zal er water uit het superabsorbens gaan.

Na^+ -ionen zullen, na toevoeging van zout water aan het droge SAP, zorgen voor een schermffect van de negatief geladen polymeerketens van het SAP. Een analoog fenomeen wordt in beton waargenomen, waar Ca^{2+} deze rol op zich neemt (cf. cementfiltraat). Het zeewater bevat nog andere ionen, namelijk Mg^{2+} en Ca^{2+} , die samen met Na^+ zorgen voor meer afscherming van de polymeerketens en minder zwelling.

Het zuur van de HCl-oplossing vernietigt de SAP deels. Grote korrels worden namelijk kleiner. HCl is erg agressief en zal dus deels corroderen. In de proefreeks geeft deze ook het slechtste resultaat qua absorptie. Dit komt doordat HCl een sterker zuur is dan water en ze haar protonen makkelijker zal afgeven aan de SAP. De H^+ -ionen schermen dus af.

Het SAP A heeft een hogere absorptie dan het SAP B. Enkel in een HCl-oplossing (29,9 % significantieniveau) en zeewater (7,9 % significantieniveau) waren de experimentele waarden niet significant verschillend.

Het effect van bestralingstijd kan ook bekeken worden. Deze tijd duidt aan hoelang het basismengsel van SAP aan UV-licht werd onderworpen. Hoe langer de bestraling, hoe meer vernetting er is opgetreden, dus hoe meer absorptiecapaciteit er is. Dit is ook zichtbaar in Figuur 72, waar opnieuw de gemiddelde absorptie wordt weergegeven samen met de standaardafwijking.



Figuur 72: Absorptie van SAP in detail met verschil in bestralingstijd

Twee uur bestralingstijd geeft significant de beste resultaten in gedemineraliseerd water, zeewater en kraantjeswater. Er zijn veel meer bindingen/crosslinks gevormd en de structuur is meer capabel om te zwellen. Bij bestraling wordt er energie gegeven aan de polymeren om te vernetten. Hoe langer het materiaal wordt blootgesteld aan UV-licht, hoe meer vernetting. In cementfiltraat zijn een bestralingstijd van 1 u en 1,5 u niet significant verschillend (6,2 % significantieniveau), 1,5 u en 2 u ook niet (16,4 % significantieniveau) maar 1 u en 2 u wel. Dus er geldt nog steeds: hoe meer bestraling, hoe meer vernetting, hoe meer absorptie. Bij een HCl-oplossing is 1,5 u niet significant verschillend van 2 u (33,5 % significantieniveau), bij een NaOH-oplossing op 8,7 % significantieniveau. Bij zeewater zijn 1 u en 1,5 u niet significant verschillend (15,8 % significantieniveau).

Ook 94 % modificatiegraad toont de beste resultaten ten opzichte van 81,5 % (steeds significant verschillend). Dit wil zeggen dat er meer mogelijkheden gevormd zijn om te vernetten. Daarom zal bij gelijke bestralingstijd, de vernetting hoger zijn, en zo ook de absorptie. De verhoudingen van de resultaten van 81,5 % en 94 % in de experimenten liggen tussen 1,11 en 1,19. De verhouding $94/81,5=1,15$ ligt hier tussen.

Het polyacrylaat van Esteves (2010)^[89] geeft in cementfiltraat een absorptie van 10-16 g/g SAP. De waarden bekomen in dit onderzoek liggen hierboven en duiden op betere SAP. Het SAP in het onderzoek van Brüdern & Mechtherine (2010)^[85] gaf een absorptie in gedemineraliseerd water van 86,5 g/g SAP en 21,8 g/g SAP in cementfiltraat.

Na het vacuüm drogen met silica-korrels bleef een gelige samengekoekte massa SAP achter. SAP A had een desorptie van 122,7 g kraantjeswater/g SAP en een tweede absorptie van 122,3 g kraantjeswater/g SAP. Het SAP A neemt dus ongeveer evenveel terug op als ze afgegeven had. SAP B heeft een desorptie van 119,1 g kraantjeswater/g SAP en tweede absorptie van 118,5 g kraantjeswater/g SAP. Er bleef initieel nog een deel vloeistof in de SAP aanwezig, waardoor de desorptie ten opzichte van initiële absorptie minder lijkt. Door het SAP te malen in de tussentijd, wordt dit effect vermeden. Maar aangezien er 0,15-0,2 g droog SAP overbleef, kon er makkelijk materiaal verloren gaan. Door het samenklitten ging de tweede absorptie ook trager aangezien enkel de buitenste delen water konden opnemen. Deze kwamen los van het geheel, waardoor nieuwe delen water konden opnemen.

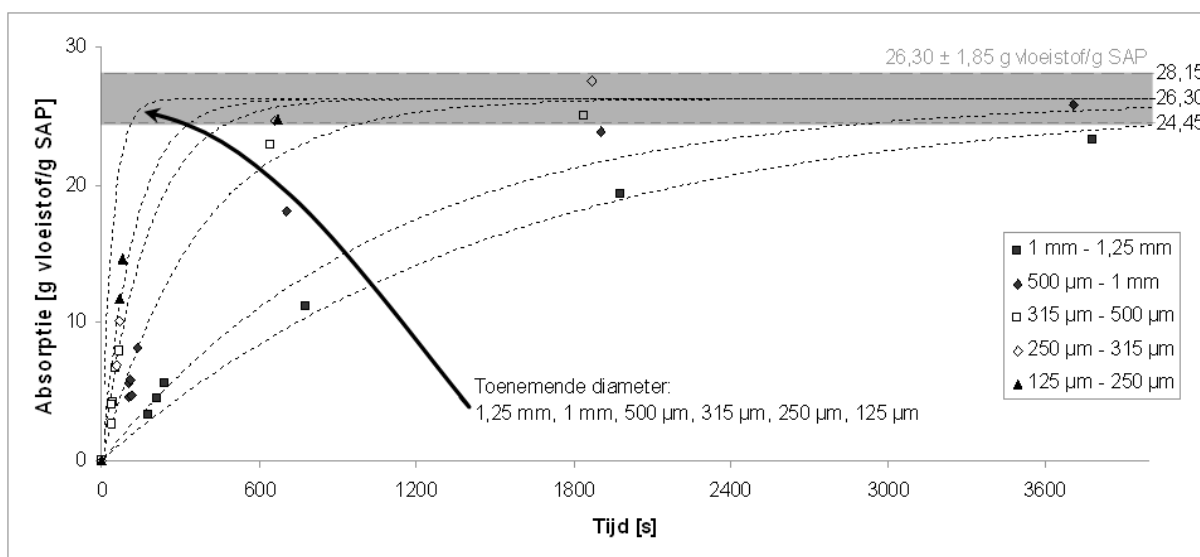
4.2.2. Zweltijd

Kleinere korreltjes zullen sneller een vloeistof opnemen dan grote korrels door het grotere specifieke oppervlak van de kleinere korrels. Om dit na te gaan werd de zweltijd experimenteel onderzocht met SAP C met een modificatiegraad van 94 %. De experimentele formule (29) van Esteves voor een SAP op basis van een polyacrylaat in een synthetische poriënvloeistof wordt hernomen.^[89]

$$Q(t) = Q_{\max} (1 - \exp(-D \cdot t)) \quad (28)$$

$$D = 46 \cdot \phi_p^{-1,567} \quad (29)$$

Figuur 73 toont de experimentele waarden en de krommen voor de afzeefgrenzen via de formule (29). Ook de totale absorptie na een dag met standaardafwijking werd weergegeven onder de vorm van een grijze band.



Figuur 73: Zweltijd voor verschillende fracties SAP C (94 %, 2 u)

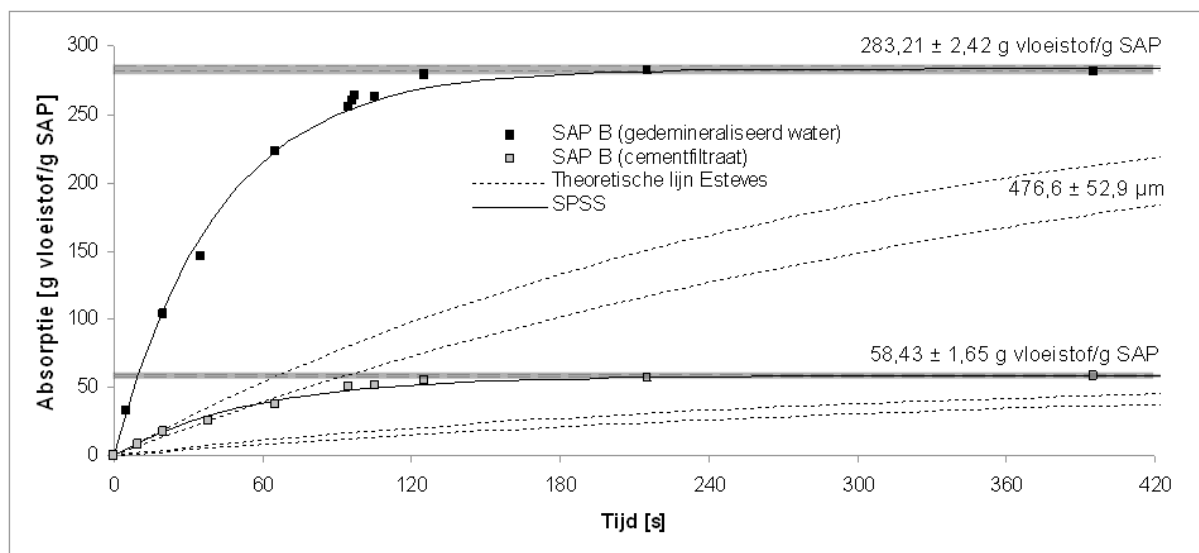
De experimentele waarden voor de fracties aan SAP C (94 %, 2 u) liggen grotendeels tussen deze grenzen. De formule (29) werd echter bepaald door Esteves voor een ander SAP, op basis van polyacrylaten. Het is dus verwonderlijk dat de beide SAP goed overeenkomen op het gebied van kinetica. Indien echter in detail gekeken wordt naar de beide SAP, dan blijkt enerzijds dat de absorptie dicht bij elkaar ligt (ongeveer 20 g cementfiltraat/g polyacrylaat en 26,30 g cementfiltraat/g SAP C). De absorptie komt enkel tussen in formule (28) onder de vorm van Q_{\max} , dus qua kinetica speelt deze geen rol. Anderzijds zijn beide SAP acrylaten en hebben ze dus dubbele bindingen van zuurstof. Deze spelen een rol in de zwelling en zijn de negatief geladen delen van de polymeerketens van het SAP. Het materiaal kan dus dezelfde trend volgen.

De gevonden experimentele waarden werden in SPSS[®] ingegeven om de factoren in formule (29) voor SAP C (94 %, 2 u) te bepalen (formule (51)). Deze is toch licht verschillend van formule (29).

$$\text{Cementfiltraat} \quad D = 15,438 \cdot \phi_p^{-1,395} \quad (51)$$

Het is duidelijk zichtbaar dat grote korrels meer tijd nodig hebben om de vloeistof te absorberen. Dit komt omdat het interne van de grote SAP-korrels nog niet aan de vloeistof kan, terwijl de kleine korrels direct verzadigd zijn. Via SPSS[®] blijkt de kinetica van grote korrels ten opzichte van kleine korrels significant verschillend te zijn.

Figuur 74 toont de experimenteel bepaalde waarden voor SAP B in gedemineraliseerd water en in cementfiltraat. Opnieuw werden de waarden na 1 dag met standaardafwijking gegeven onder de vorm van een grijze balk.



Figuur 74: Zwelltijd voor SAP B (gedemineraliseerd water en cementfiltraat)

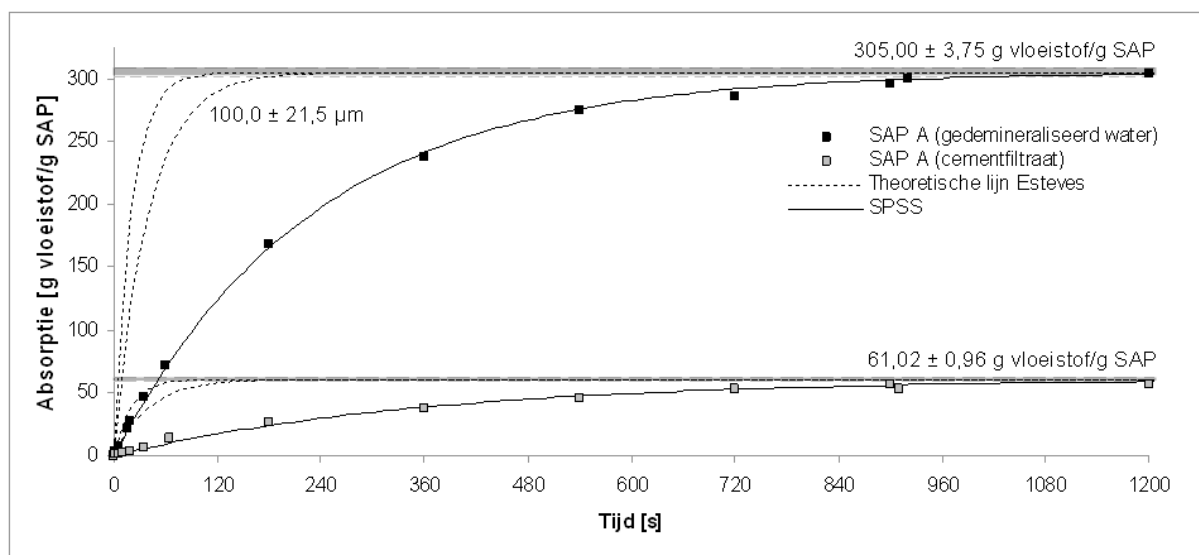
De stippellijnen tonen formule (29) uitgedrukt voor het interval van de korrelgroottes van SAP B (zie volgende paragraaf). De volle lijnen zijn de best passend curves bepaald op basis van formule (29) via SPSS[®] (gedemineraliseerd water (52) en cementfiltraat (53)).

$$\text{Gedemineraliseerd water} \quad D = 1867,921 \cdot \phi_p^{-1,828} \quad (52)$$

$$\text{Cementfiltraat} \quad D = 2611,781 \cdot \phi_p^{-1,929} \quad (53)$$

De stippellijnen en de volle lijnen komen zeker niet overeen. Dat is logisch in het geval van gedemineraliseerd water aangezien het een andere vloeistof betreft. In het geval van cementfiltraat ligt de verklaring in het feit dat SAP B, hoewel ook op basis van een acrylaatype, zich als een ander SAP gedraagt. De kinetica van SAP B ligt hoger. De kinetica (snelheid tot het bereiken van het maximum) in beide beschouwde vloeistoffen zijn gelijk (180 s) waaruit er kan besloten worden dat voornamelijk de korrelgrootte een invloed speelt in de zweltijd, en niet het soort vloeistof.

Figuur 75 toont de kinetika voor het commercieel SAP A. De kinetika van het SAP A met het SAP gebruikt door Esteves komen niet overeen. Hierbij werden de grenzen van de korrelgroottes van SAP A ($100,0 \pm 21,5 \mu\text{m}$, zie volgende paragraaf) gebruikt. SAP A heeft een lagere kinetiek ten opzichte van Esteves en dus ook ten opzichte van SAP B. De zweltijd bedraagt 1200 seconden voor SAP A en 180 seconden voor SAP B.



Figuur 75: Zweltijd voor SAP A (gedemineraliseerd water en cementfiltraat)

De volle lijnen zijn opnieuw de best passende curves bepaald op basis van formule (29) via SPSS®. De formule voor gedemineraliseerd water is (54) en deze voor cementfiltraat (55).

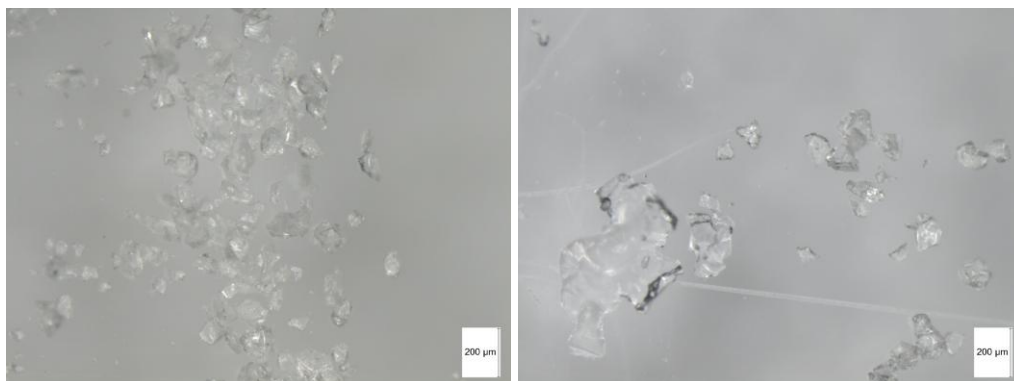
$$\text{Gedemineraliseerd water} \quad D = 699,875 \cdot \phi_p^{-1,944} \quad (54)$$

$$\text{Cementfiltraat} \quad D = 1399,994 \cdot \phi_p^{-2,128} \quad (55)$$

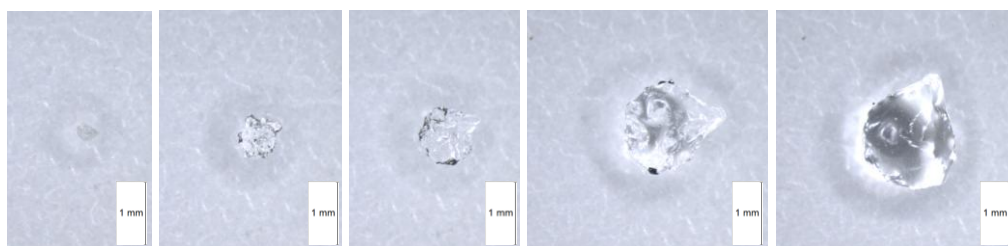
4.2.3. Microscopisch onderzoek

Allereerst werden de afmetingen van de commerciële SAP-partikels bepaald. Het SAP A heeft een diameter van $100,0 \pm 21,5 \mu\text{m}$, het SAP B $476,6 \pm 52,9 \mu\text{m}$. Deze werden bepaald door een tiental random standaard korreltjes op te meten.

De tweede methode ter bepaling van de absorptie maakt gebruik van microscopisch onderzoek. Enkele korreltjes werden gradueel met water bevochtigd en de groei werd bestudeerd. De kleinere SAP A korrels waren moeilijk te bestuderen (Figuur 76). De vormen waren hoekig en de korrel was moeilijk te bevochtigen. Het SAP B is een mooi studieobject. Er wordt gradueel water toegevoegd tot het korreltje verzadigd is, zoals in Figuur 77 te zien is. Dit werd gradueel gedaan aangezien er anders bij oververzadiging een waterbel rondom de SAP-korrels gevormd werd.

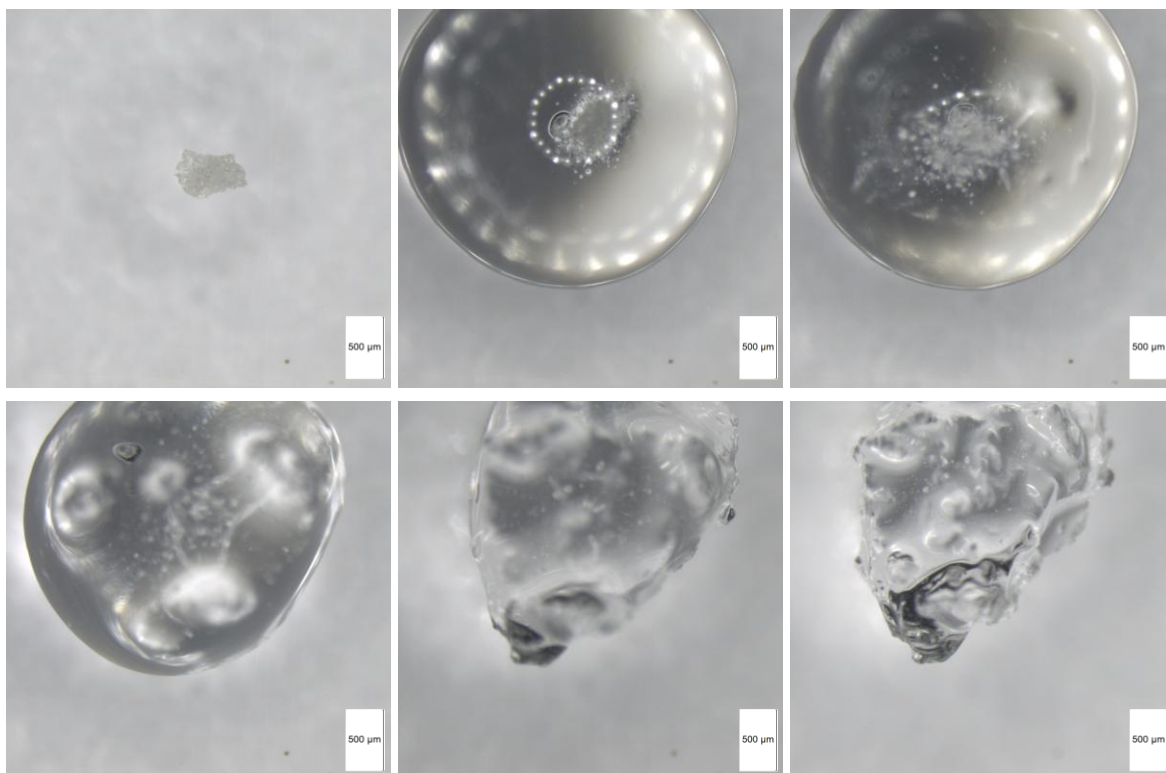


Figuur 76: Groei van een SAP A korrel bij bevochtiging met gedemineraliseerd water



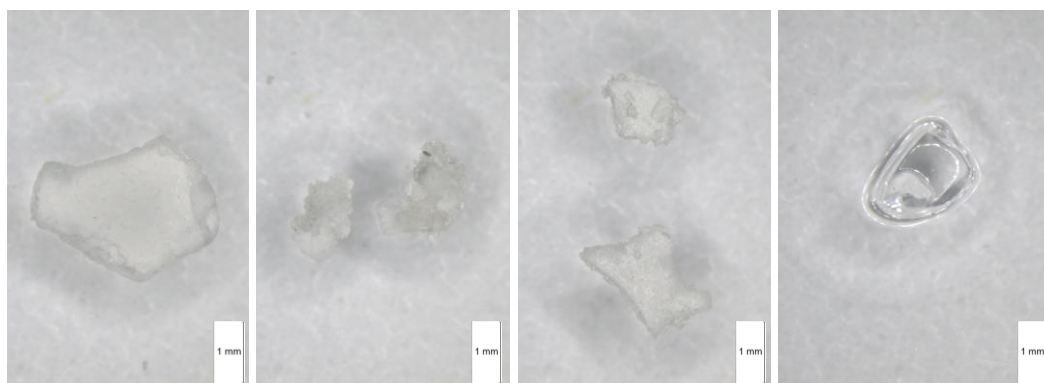
Figuur 77: Graduele groei van een SAP B korrel bij bevochtiging met kraantjeswater

Ook de groei in water kan bestudeerd worden. SAP B lost als het ware op en zwelt zichtbaar door water op te nemen en een verzadigde korrel te vormen (Figuur 78). Het zijn stappen van ongeveer tien seconden. In stap twee naar drie lost het SAP op. De buitenste delen zwellen en verplaatsen zich doorheen de waterbel.



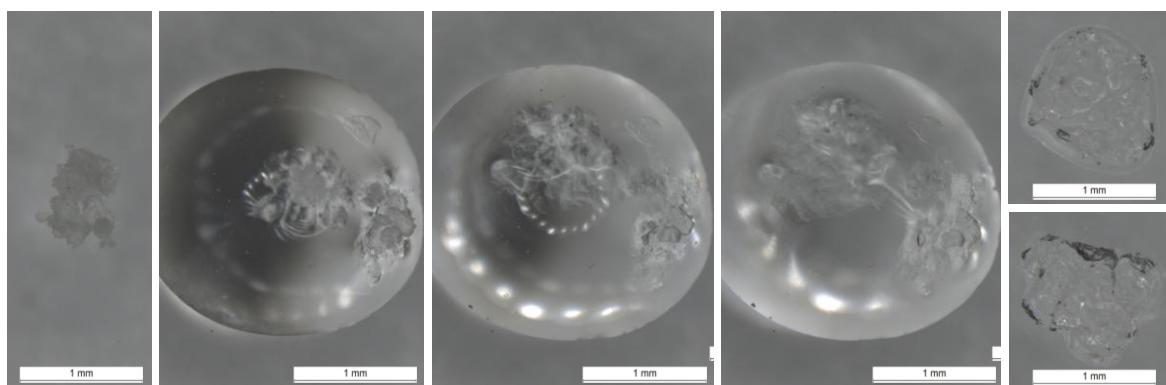
Figuur 78: Wateropname en zwellen van SAP B (gedemineraliseerd water)

SAP C met een modificatiegraad van 81,5 % had een variabele vorm. De SAP worden namelijk gemaakt uit plaatjes en vervolgens fijn gemalen. De platte plaatvorm is nog steeds visueel waarneembaar (Figuur 79). De diameter varieerde steeds van 500 μm tot enkele millimeter. Voor de absorptie werd steeds het deel 500-1500 μm gebruikt.



Figuur 79: Variabele vorm van SAP C (1 u; 1,5 u & 2 u) en absorptie

Het SAP C met een modificatiegraad van 94 % was beter vermalen en sommige partikels waren sferisch. Dit is gewenst voor de krachtswerking die later besproken wordt. Een analoge verzadiging van twee SAP C-partikels is te zien in Figuur 80. De tijdsstap is zes seconden en de volledige verzadiging geheel rechts werd na enkele minuten waargenomen.



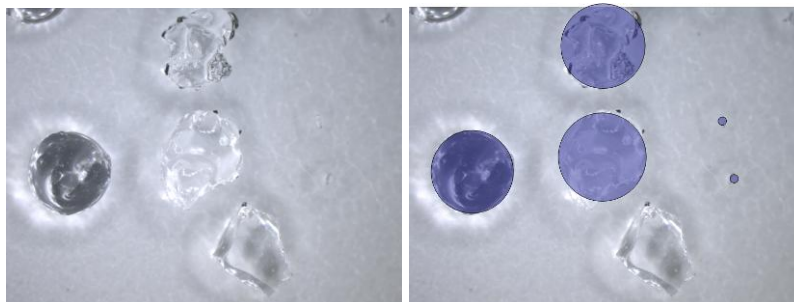
Figuur 80: Verzadiging van SAP C (2 u en 94 %)

Om de absorptie te bepalen, dient er enkel uitgegaan te worden van de relatieve verhouding van de afmetingen van een droog basiskorreltje ten opzichte van een verzadigd exemplaar. Het verschil in volume tussen het droog en verzadigd volume ten opzichte van het droog basisvolume en dit gedeeld door de dichtheid ρ geeft de absorptiewaarde. In formule (56) staat r_{max} voor de straal van een verzadigd SAP-partikel en r_0 voor de straal van een droog SAP-partikel.

$$\frac{4/3 \cdot \pi \cdot (r_{\text{max}}^3 - r_0^3)}{4/3 \cdot \pi \cdot r_0^3} \text{ geeft } [\text{cm}^3/\text{cm}^3] \quad (56)$$

Dit delen door ρ [cm^3] geeft [cm^3/g]

Hierbij is enkel de relatieve verhouding van de stralen van belang. Dit onderzoek werd enkel gedaan voor gedemineraliseerd water, kraantjeswater en cementfiltraat en voor SAP B, aangezien deze nagenoeg cirkelvormige korrels had. Er werden steeds drie metingen gedaan per vloeistof. Een weergave van de relatieve verhouding wordt gegeven in Figuur 81. De resultaten worden weergegeven in Tabel 11 waarbij ter vergelijking de waarden opgenomen werden bepaald uit de paragraaf 4.2.1 samen met de standaardafwijking.



Figuur 81: Weergave absorptiemethode (kraantjeswater)

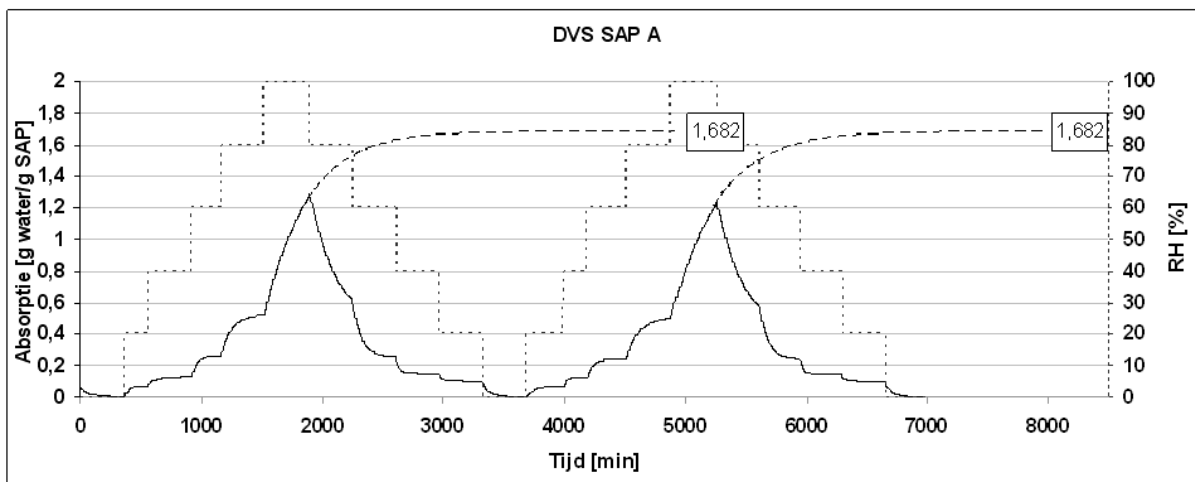
Tabel 11: Absorptie van SAP met Filtratie en Microscopisch onderzoek

Type vloeistof	Filtratie	Microscopisch onderzoek	Eenheid
Gedemineraliseerd water	283,2±2,4	282,66±7,51	g vloeistof/g SAP
Cementfiltraat	58,4±1,7	57,96±3,05	g vloeistof/g SAP
Kraantjeswater	148,9±0,9	145,96±5,62	g vloeistof/g SAP

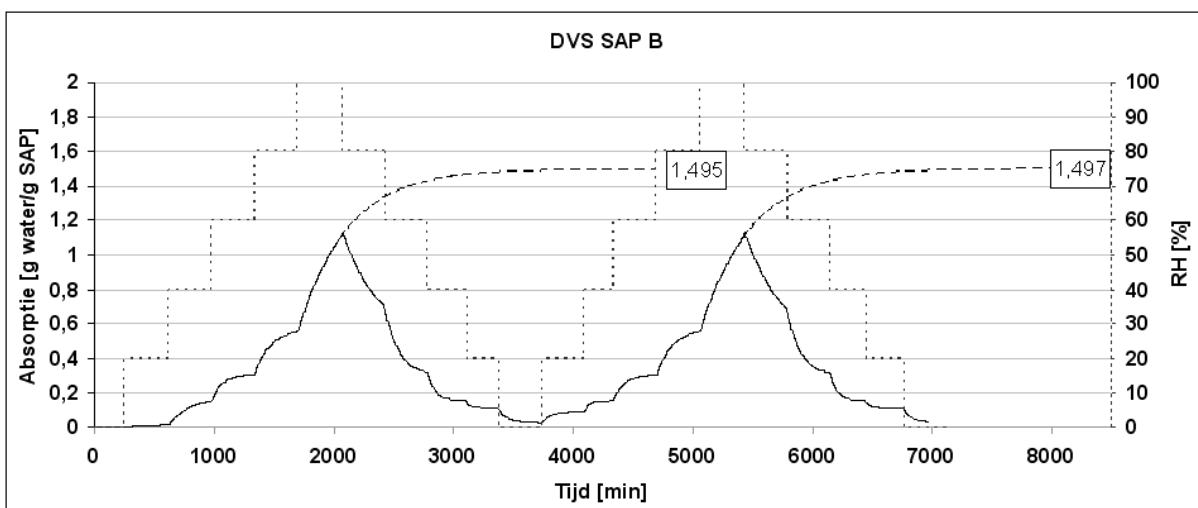
Deze methode is echter tijdrovend om toe te passen. Ook moeten steeds sferische SAP-korrels bestudeerd worden om een correcte verhouding te krijgen. Uitstulpingen worden niet meegerekend, maar uitgemiddeld. De methode geeft wel een goed beeld, aangezien de korreltjes apart zwellen, en water niet tussen korreltjes kan blijven door adhesieve krachtswerking. Dat is wel het geval bij de filtratie en de 'theezak'-methode waar de SAP in respectievelijk het filterzakje en in het theezakje aan elkaar kleven. Hiertussen is er steeds adhesieve krachtswerking en water hecht zich tussen de SAP-korrels. De resultaten komen goed overeen en zijn significant gelijk, dus de absorptie via filtratiemethoden is een correcte weergave van de werkelijke absorptie.

4.2.4. DVS

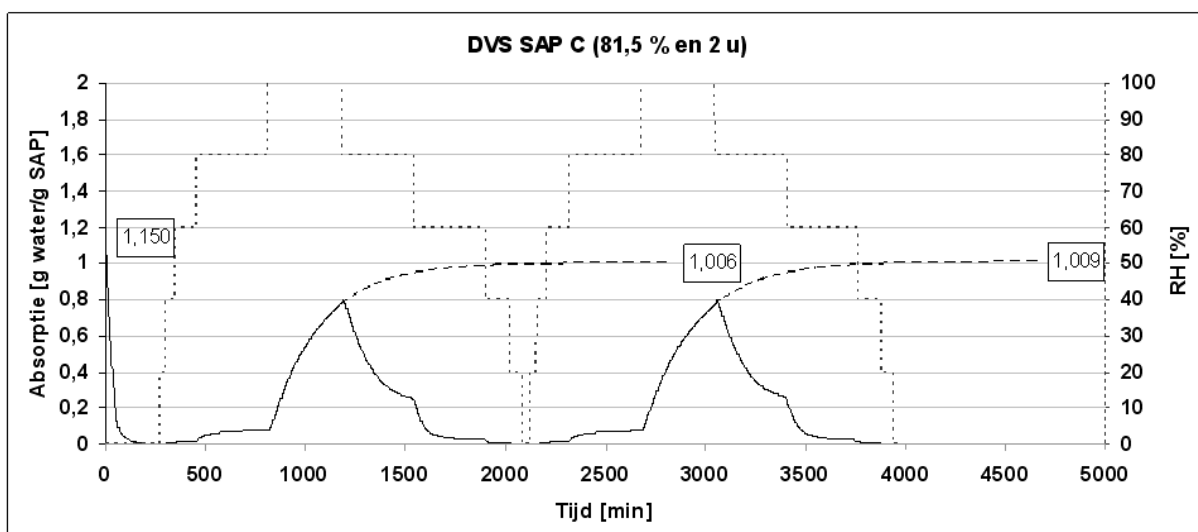
DVS metingen bepalen de absorptie in een omgeving met relatieve vochtigheid van 100 %. Er werd gestart met een relatieve vochtigheid gelijk aan 0 %. Hierbij werd steeds de relatieve vochtigheid opgedreven als een constante evenwichtswaarde werd bereikt in de desbetreffende stap. Dit is te zien in Figuur 82. De DVS metingen waren echter nog niet op hun einde (evenwicht) in de finale stap met een relatieve vochtigheid van 100 %, dus er werd geëxtrapolleerd met formule (34) (stippellijn). Dit werd zowel met de hand gedaan, als met het statistisch programma SPSS[®]. De evenwichtswaarden in de stappen voor deze met relatieve vochtigheid van 100 %, zijn steeds bereikt, dus deze zullen weinig tot geen rol spelen in de laatste relatieve vochtigheidsstap en de uiteindelijke bekomen absorptiewaarde.



Figuur 82: DVS-meting SAP A met extrapolatie



Figuur 83: DVS-meting SAP B met extrapolatie

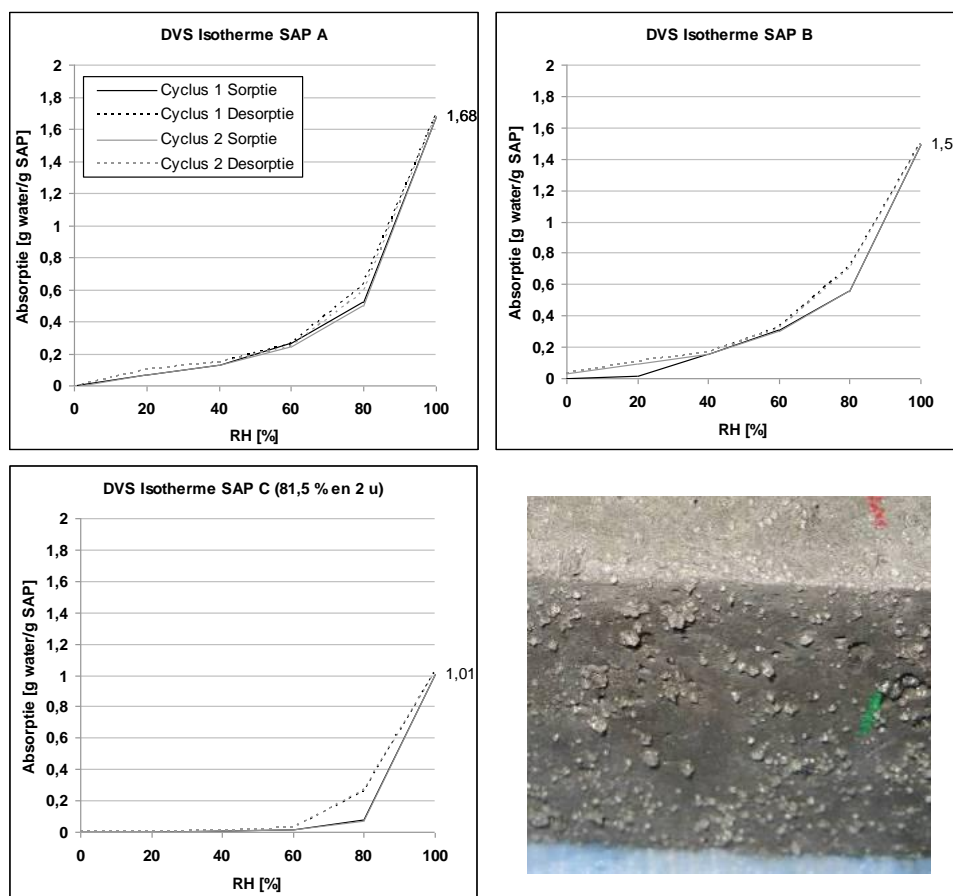


Figuur 84: DVS-meting SAP C (81,5 % en 2 u) met extrapolatie

Er wordt opgemerkt dat SAP A (1,68 g water/g SAP in Figuur 82) meer damp kan opnemen dan de andere SAP (1,50 g water/g SAP B, 1,01 g water/g SAP C in Figuur 83 en Figuur 84). Dat komt doordat SAP A een kleinere korrelgrootte heeft, en dus meer contactoppervlak. De specifieke oppervlakte is groter en daardoor is de sorptie hoger.

SAP C (81,5% modificatiegraad en 2 u bestralingstijd) bevatte initieel veel water (Figuur 84). Dit komt door het productieproces en het nog niet vacuüm gedroogd te zijn. In alle andere proeven werden de SAP-korrels wel gedroogd. De startwaarde is ook hoger (1,15 g water/g SAP C) dan de uiteindelijke waarde bij 100 % relatieve vochtigheid (1,01 g water/g SAP C). In water is de absorptie dus alleszins hoger dan met waterdamp.

Indien visueel gekeken werd naar de absorptie van SAP met water op proefstukken, was de absorptie duidelijk zichtbaar (rechtsonder in Figuur 85). Indien proefstukken met SAP echter bewaard werden bij een relatieve vochtigheid van meer dan 90 %, was er nauwelijks tot geen een toename in volume zichtbaar. Water geeft een grotere absorptie.

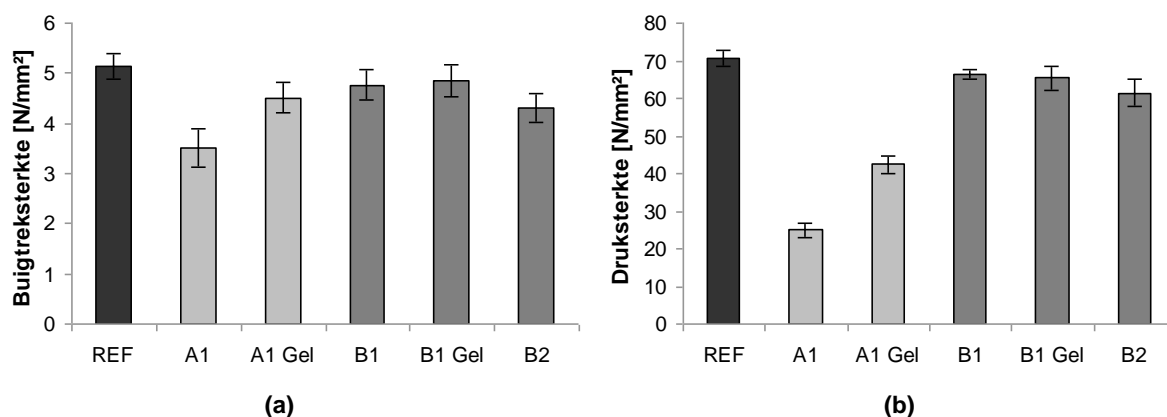


Figuur 85: Vergelijking DVS Isothermen en zwelling van SAP B op een proefstuk

Bij desorptie blijft er water tussen SAP-korrels kleven en is er adhesieve krachtswerking. Het water kan er moeilijker uit dan in. Daarom ligt de desorptie-curve boven de sorptie-curve en is er hysteresis. SAP B heeft een onverklaarbaar resultaat aangezien het verschil in absorptie bij desorptie aanwezig is bij RV = 80 %, afwezig bij RV = 60 % en RV = 40 %, en opnieuw aanwezig is bij RV = 20 %. In een tweede cyclus volgende de curven steeds dezelfde trend.

4.2.5. Buigtrek- en druksterkte prisma's met SAP

A1 (1 m% SAP A droog ingemengd) blijkt voor de buigtreksterkte (Figuur 86a met de gemiddelde waarden en de standaardafwijking) significant verschillend van de andere mengsels. Dat komt door de slechte verwerkbaarheid van het mengsel en het verkrijgen van een korrelig proefstuk. Ook is er een grotere reductie van de buigtreksterkte doordat bij een doorsnijding van een proefstuk met een groot aantal kleine deeltjes, er een grotere reductie is van het oppervlak.^[78] Het als gel inmengen (*A1 Gel*) levert dan ook betere mechanische eigenschappen. Ook de referentiestukken (*REF*) zijn significant verschillend van de andere experimentele waarden. Deze zijn niet onderhevig aan een vermindering van de doorsnede door SAP. Tussen *A1 Gel*, *B1* en *B1 Gel* bestaat er geen significant verschil. Bij *B2* (2 m% SAP B droog ingemengd) ten opzichte van *B1* is een verschil met een significantieniveau van 9,7 %. Hoe meer SAP, hoe minder doorsnede en dus hoe lager de buigtreksterkte.

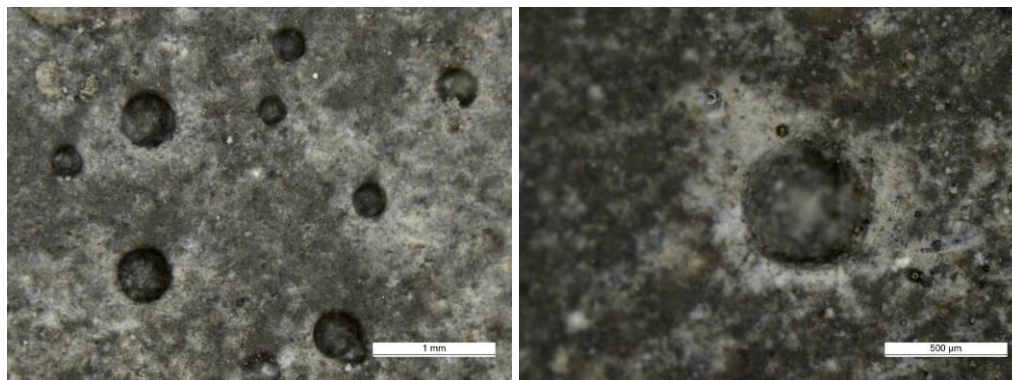


Figuur 86: Buigtreksterkte (a) en druksterkte (b) van mortelprisma's met/zonder SAP

Figuur 86b toont het effect van de aanwezigheid van SAP op de druksterkte. ECC heeft een druksterkte tussen 50 MPa en 80 MPa.^[17] De druksterkte van de *REF* proefstukken ligt hier tussen. Enkel *B1* en *B1 Gel* zijn niet significant verschillend van elkaar. SAP zullen enerzijds de druksterkte verhogen doordat de microscheurvorming die ontstaat bij zelfopdroging, verhinderd wordt. Anderzijds zullen SAP de druksterkte verlagen. Dit komt door de vorming van macroporiën. Dit effect neemt de bovenhand aangezien de mengsels met SAP een lagere druksterkte vertonen dan de referentiemengsels. Een vermeerdering van het massaprocent aan SAP geeft ook een lagere druksterkte (*B1* naar *B2*). Proefstukken met SAP A hebben algemeen een lagere druksterkte dan proefstukken met SAP B. SAP B is meer sferisch en zal de krachten beter afleiden. Sferische SAP zorgen voor een koepelwerking bij de krachtsoverdracht bij druk, maar voor een vermindering van de doorsnede bij trek.

Toevoeging van SAP aan het mengsel verlaagde ook de trek- en druksterkte bij het onderzoek van Brüderl & Mechtherine (2010)^[85]. Een verhoging van het massaprocent aan SAP gaf zowel een lagere buigtreksterkte als een lagere druksterkte in het onderzoek van Hasholt et al. (2010)^[78]. Ook het onderzoek van Mönning & Lura (2007)^[92] toont dat de treksterkte afneemt door de vorming van poriën.

Densificatie van de matrix rondom SAP is zichtbaar in Figuur 87. Dit is analoog aan Figuur 37. Dit zorgt mede voor de koepelwerking bij druk aangezien de koepel dener is in de minder dense matrix. Het toont dat SAP gradueel in de tijd water afgeven aan de cementmatrix.

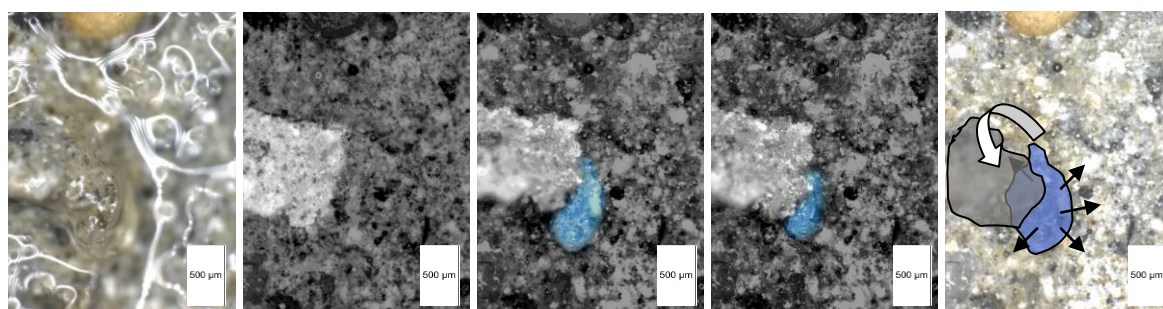


Figuur 87: Densificatie rondom holtes die SAP bevatten (2 m% SAP B)

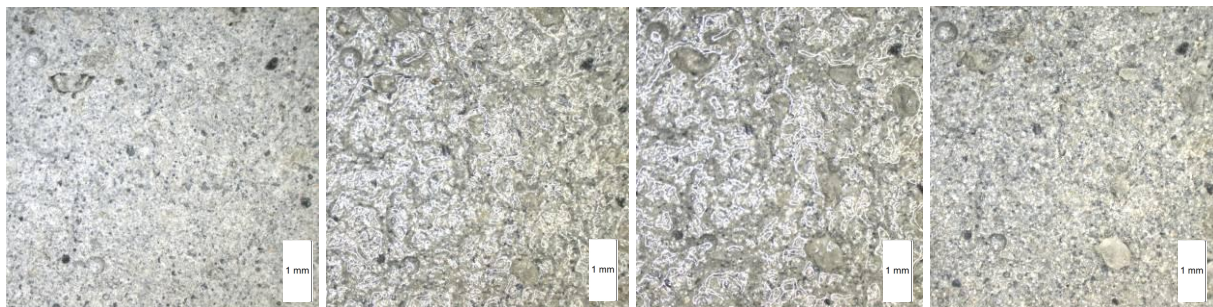
4.2.6. Bestudering van het scheurvlak

Het breukvlak werd na vacuümdroging besprenkeld met water. SAP zijn duidelijk in staat water op te nemen, wat duidt dat SAP een scheur kunnen opvullen. Het water wordt door SAP vastgehouden zonder dat het beton dit opzuigt. SAP zullen onderhevig zijn aan diffusiekrachten van het beton en met verloop van tijd leeggezogen worden. Pas na enkele minuten gaf het SAP haar water terug af. De opnamekracht weerspiegelt zich in Figuur 88. Een brokstukje dat los lag wordt uit het vlak geduwd wanneer een SAP partikel water opneemt. De absorptie van de SAP is niet zo sterk om verdere scheurvorming te krijgen, maar wel voldoende om de scheuren te dichten. De drie middelste afbeeldingen in Figuur 88 werden bewerkt met Adobe Photoshop® om de duidelijkheid te verbeteren.

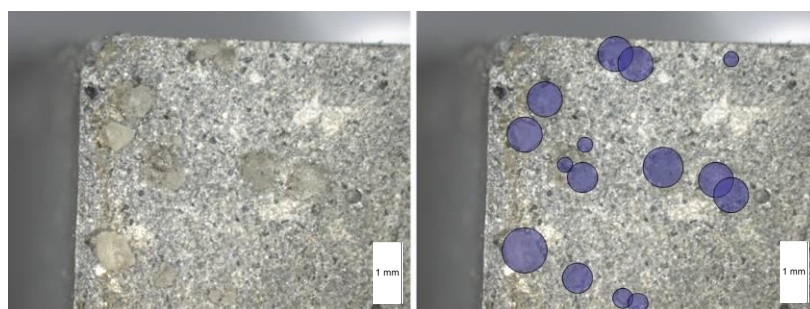
Figuur 89 geeft weer dat SAP in staat zijn water vast te houden als het scheurvlak bevochtigd wordt. Figuur 90 toont de distributie van 2 m% verspreide SAP. Na zes maanden is er nog steeds sprake van wateropname na bevochtiging (Figuur 91). Dit is steeds het geval en SAP zullen instaan voor het dichten van scheuren als het in contact komt met een vloeistof. Dat wordt later besproken in het deel over permeabiliteit. Ook werd er experimenteel wat water in het scheurvlak gebracht en dat leverde een sluiting op van de scheur door de opname van water door een SAP partikel (Figuur 92 en Figuur 93).



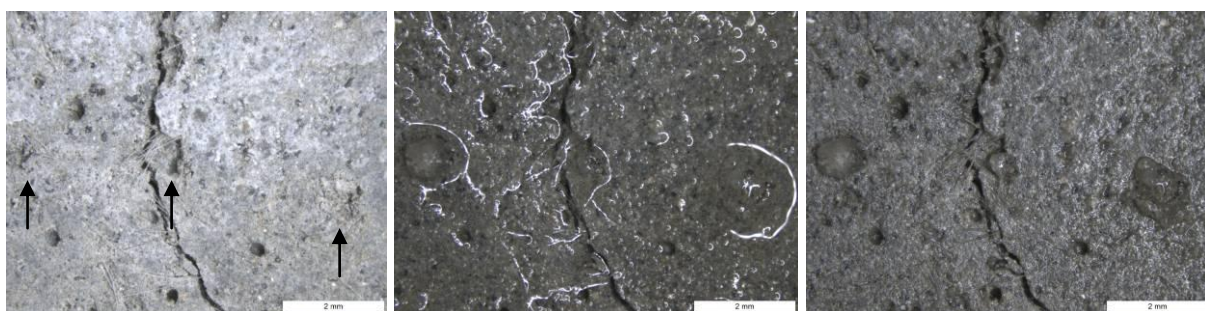
Figuur 88: Opname van water door een SAP partikel onder het oppervlak (0,5 m% SAP B)



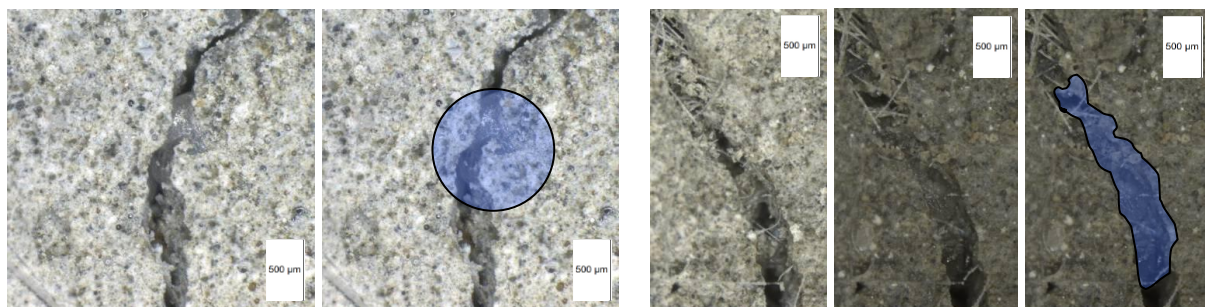
Figuur 89: Vorming van verzadigde SAP partikels (2 m% SAP B)



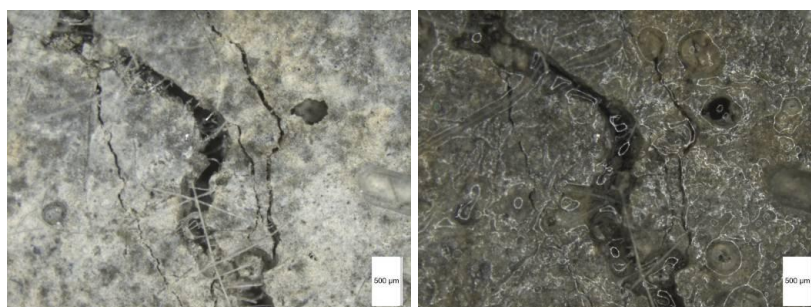
Figuur 90: Vorming van verzadigde SAP partikels en lokalisering (2 m% SAP B)



Figuur 91: Vorming van verzadigde SAP partikels (0,5 m% SAP B)



Figuur 92: Blokkering van de scheur door een SAP partikel (0,5 m% SAP en 4 m% SAP)

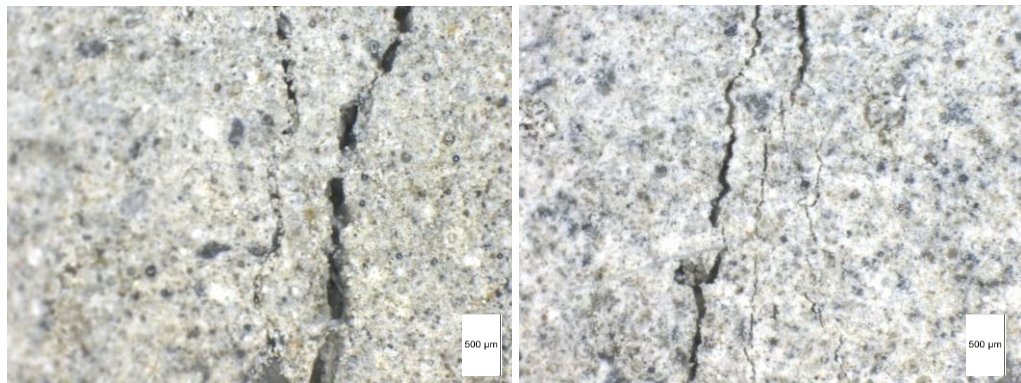


Figuur 93: Blokkering van de scheur door SAP partikels (4 m% SAP B)

4.3. Meervoudige scheurvorming

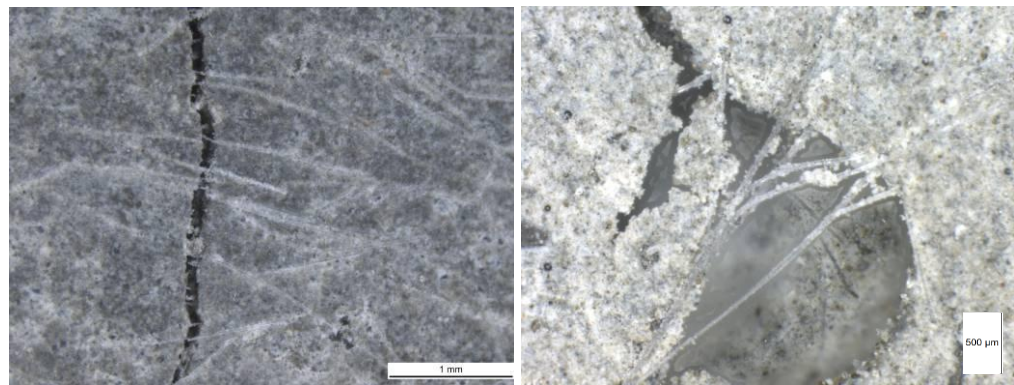
4.3.1. Onderzoek van de scheuren

Microscopisch onderzoek gaf volgende resultaten. Allereerst was er sprake van meervoudige scheurvorming (Figuur 94).



Figuur 94: Meervoudige scheurvorming (2 vol.% PVA-vezels)

De vezels zorgen duidelijk voor brugvorming (Figuur 95a). Ook was micro-afsplintering zichtbaar, zoals weergegeven in Figuur 95b (paragraaf 2.2.3.8). Doordat de matrix afsplintert zal de hoek afnemen, de spanningsconcentratie dalen en de vezelbreuk uitgesteld worden.



(a)

(b)

Figuur 95: Brugvorming en micro-afsplintering (1 vol.% PVA-vezels)

Allereerst werd de eerste-scheur-sterkte σ_{fc} berekend met de gegevens en de formules uit de literatuur (paragraaf 2.2.3.2). Als input werden de parameters, weergegeven in Tabel 12 ingevoerd. Deze zijn de elasticiteitsmodulus van de vezel E_f , de vezeldiameter d_f , de vezellengte L_f , de hechtsterkte τ , het volumepercentage V_f , de snubbingfactor f , de matrixbreuktaaiheid K_m , de E-modulus van de matrix E_m , de E-modulus van het composiet E_c en de straal van een scheur c . Alle andere grootheden uit de formules in paragraaf 2.2.3.2 kunnen aan de hand van deze parameters berekend worden. De eerste-scheur-sterkte wordt op latere figuren (spanning/rek diagrammen) weergegeven als een stippellijn.

Tabel 12: De eerste-scheur-sterkte: input en resultaat

	PVA Redco	PVA Kuraray	PP monofilament	PP bicore	
E_f	23000	23000	11600	11600	MPa
d_f	39	39	16,6	16,6	μm
L_f	8	6	8	6	mm
τ	1,11	2,93	0,34	0,6	MPa
V_f	2	2	2	2	%
f	0,2	0,2	0,34	0,34	
K_m	0,4	0,4	0,4	0,4	MPa $\cdot\sqrt{\text{m}}$
E_m	20000	20000	20000	20000	MPa
E_c	33000	33000	22000	22000	MPa
c	0,02	0,02	0,02	0,02	m
σ_{fc}	5,05	5,65	3,88	4,25	MPa

Verschillende zaken kunnen gebruikt worden om de meervoudige scheurvorming te initiëren. De belangrijkste microdefecten zijn de SAP. Andere defecten kunnen plantaardige restanten zijn zoals bastvezels van vlas (zie Figuur 4) in Figuur 96 of holtes.



Figuur 96: Baststengels van vlas als scheurinitiatoren

Het oppervlak van PVA-vezels kan met ontkistingsolie worden bewerkt om het hydrofiele karakter deels teniet te doen. Anders zal de PVA-vezel neigen te scheuren in plaats van uitgetrokken te worden uit de matrix en dienst te doen in de meervoudige scheurvorming. Door het hydrofiele karakter is er een chemische bindsterkte met de matrix welke initieel overwonnen dient te worden. PP-vezels daarentegen, hebben typisch geen chemische bindsterkte ($G_d=0$). Deze eigenschap is gewenst voor de meervoudige scheurvorming.

Ook kan de matrixtaaiheid zwakker gemaakt worden door het invoegen van SAP of door het verlagen van de W/C-factor. Zo scheurt de matrix beter en mag de vezel een chemische bindsterkte vertonen.

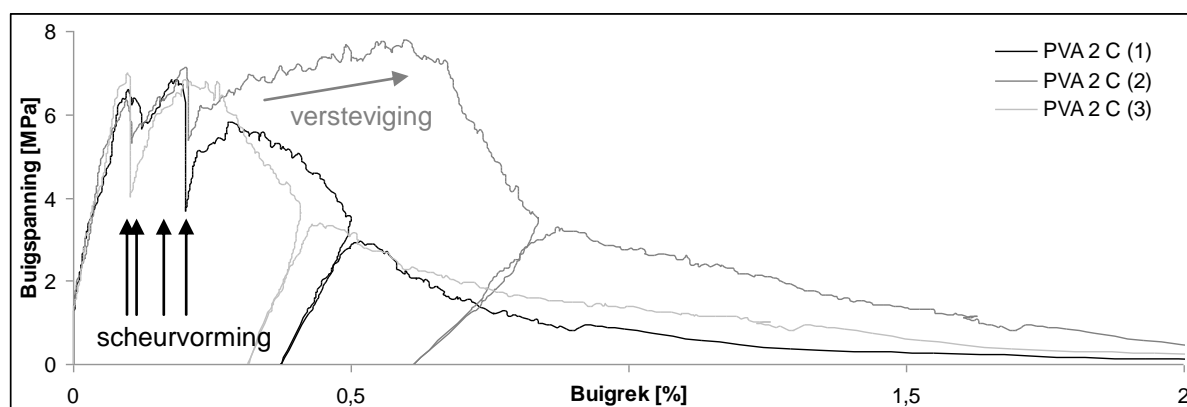
4.3.2. Spanning-rek diagrammen

In deze paragraaf worden de spanning-rek diagrammen besproken van vier groepen. Deze groepen zijn de mengsels met PVA-vezels, de mengsels met vlasvezels, de mengsels met PP-vezels en de mengsels met zowel PVA-vezels als SAP. De figuren bevatten naast het spanning-rek diagram ook de optredende scheurwijdtes en hun positie op het proefstuk. Een 'zwarte' scheur duidt op de finale scheur. Dit is één van de eerder gevormde 'grijze' scheuren die zich opent doordat brugvorming de last niet meer kan opnemen. In de figuren wordt waar mogelijk de theoretische eerste-scheur-sterkte als een stippellijn weergegeven. De proefreeksen die gebruikt worden, samen met hun uitleg, worden gevonden in paragraaf 3.1.3.4 en Tabel 10. Het eerste deel van een code geeft de gebruikte vezelsoort weer, het tweede deel het volumepercentage aan vezels, het derde deel de curingconditie (C is controle, ND zijn nat/droog cycli, 90 is een RV > 90 % en 60 is een RV = 60 %) en het vierde deel een verduidelijking van de curing of de samenstelling.

Pas in de paragraaf 4.3.3 zullen de mengsels per groep onderling en ten opzichte van de andere groepen vergeleken worden op het vlak van mechanische eigenschappen en heling.

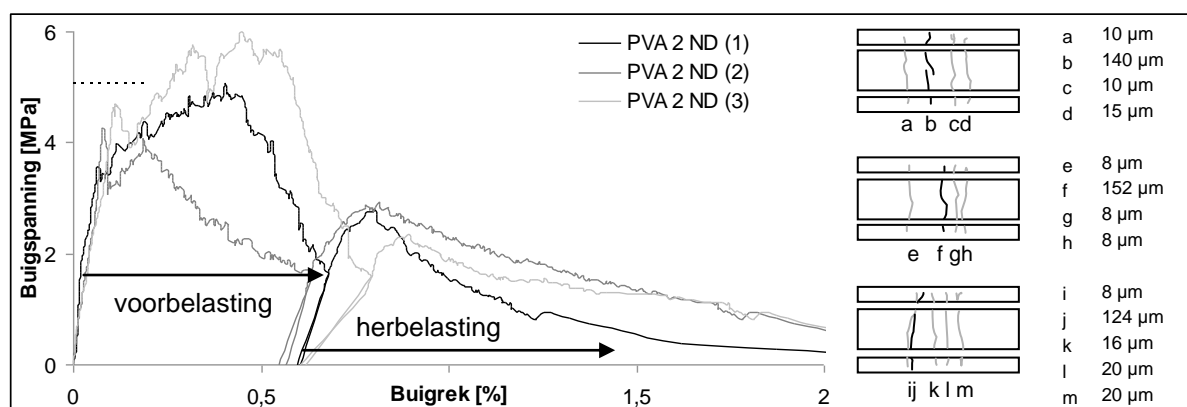
4.3.2.1. Mengsels met PVA-vezels

De proefstukken werden tussen de leeftijd van 28 dagen en 56 dagen in nat/droog cycli geplaatst. De controlestukken (Figuur 97) werden belast en direct herbelast op 56 dagen. Ze tonen dat de curve bij onmiddellijke herbelasting de ontlastingscurve volgt en er geen heling is opgetreden, wat ook logisch is. De voorbelastingscurves tonen alledrie meervoudige scheurvorming. Hierbij wordt er een eerste scheur gevormd bij de eerste-scheur-sterkte. Vervolgens neemt brugvorming door de vezels de nieuwe belasting op en zal de spanning stijgen tot de vorming van een nieuwe scheur. Dit zal doorgaan tot een scheur zich zal openen. Scheurvorming is zichtbaar als een val in het spanning/rek diagram zoals aangeduid met de zwarte pijlen in Figuur 97. Er is ook sprake van versterking aangezien de spanning kan stijgen doordat brugvorming de krachten opneemt. De scheuren werden niet onderzocht bij de controlestukken aangezien er direct herbelast werd.



Figuur 97: Spanning-rek diagram voor de controlestukken PVA 2 C

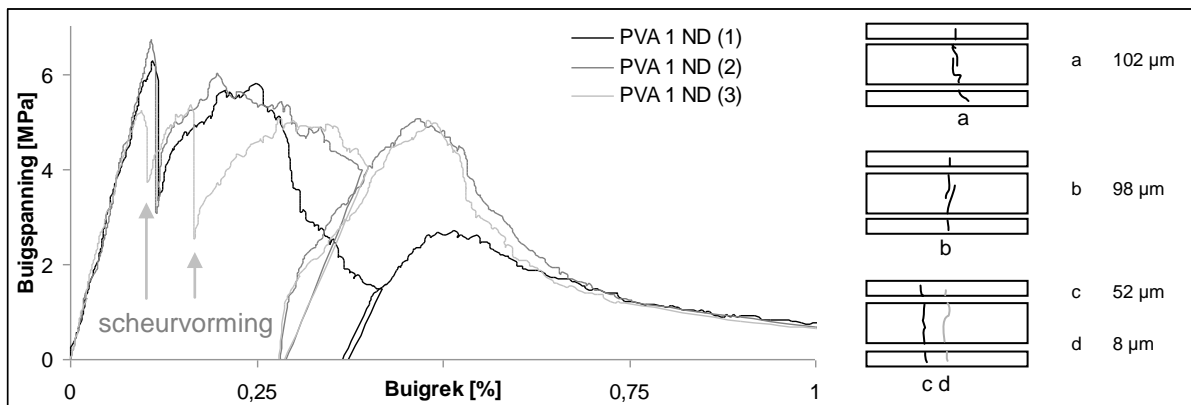
PVA-mengsels met 2 vol.% PVA-vezels van Redco onder nat/droog cycli (*PVA 2 ND*) vertonen verstevigend gedrag en meervoudige scheurvorming, zoals te zien in Figuur 98. Er werd voor elk proefstuk een vergelijking gemaakt van de buigrek in het diagram en de som van de scheurwijdtes. Deze kwamen steeds goed overeen. Zo bedraagt voor *PVA 2 ND (1)* de buigrek bij ontlasting 0,55 %. De som van de scheurwijdtes bedraagt 175 μm . Voor *PVA 2 ND (2)* is dit respectievelijk 0,54 % en 176 μm , en voor *PVA 2 ND (3)* 0,59 % en 188 μm . De rek die gebruikt wordt, werd omgerekend via de verticale doorbuiging van de proefmachine met de methode beschreven in paragraaf 3.2.6.1. 0,55 %; 0,54 % en 0,59 % van de tussenafstand van de twee armen van de vierpuntsbuigproef bovenaan (40 mm) bedraagt 220 μm ; 216 μm en 236 μm . Deze waarden komen in verhouding goed overeen, maar blijken de echte scheurwijdtes te overschatten. De proefstukken werden eerst gescheurd en iets later microscopisch onderzocht. De scheuren ontspanden verder doordat de spanning werd weggenomen. De ontspanning is een mogelijke verklaring van het feit dat de opgemeten scheurwijdte lager uitvalt dan theoretisch berekend wordt. De scheurwijdtes beperken zich tot 30 μm , tot zich een grote scheur vormt. De kleine optredende scheurwijdte komt door de grote hechtsterkte ten opzichte van gecoate vezels. ECC[®], welke gecoate PVA-vezels van Kuraray bevatten, vertonen scheuren tussen 60 en 100 μm .^{[17][27][28][29]} Een kleinere scheurwijdte bij de ongecoate vezel uit zich in een hogere binding met de interface.



Figuur 98: Spanning-rek diagram voor PVA 2 ND proefstukken

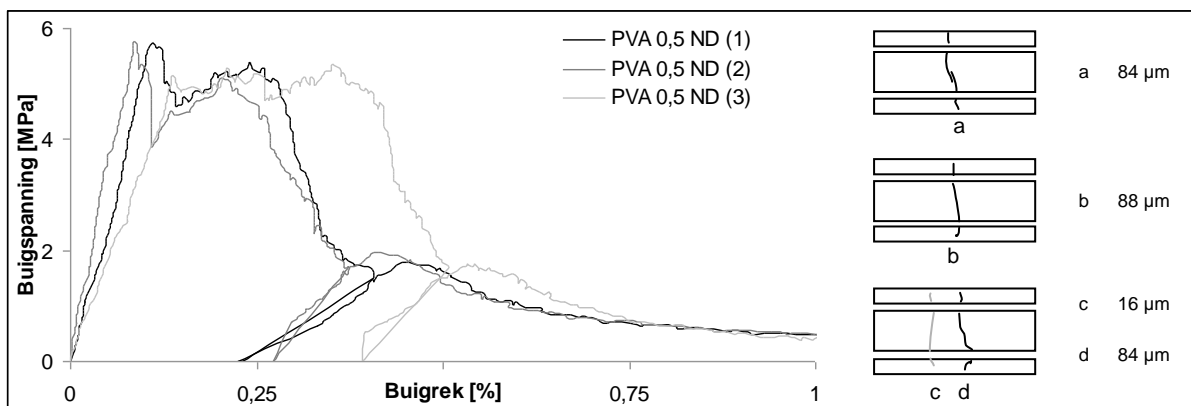
Bij herbelasting is er een lichte herwonnen meervoudige scheurvorming. Dat toonde zich in de vorming van nieuwe scheuren, welke later besproken worden. Ook de pieksterkte steeg, maar bleef onder de initiële eerste-scheur-sterkte. De nieuw gevormde C-S-H kristallen hebben namelijk niet de complexe structuur van de primaire C-S-H. Daardoor is er een onderlinge zwakke zone tussen de eerder gevormde en nieuwe kristallen.

PVA-mengsels met 1 vol.% PVA-vezels van Redco (*PVA 1 ND*, Figuur 99) toont veel minder meervoudige scheurvorming dan 2 vol.% tengevolge van het verlagen van het volumepercentage aan vezels. De scheurvorming is zichtbaarder in de diagrammen aangezien er minder brugvorming is waardoor de val in het spanning-rek diagram meer uitgesproken is. Het aantal scheuren kan makkelijk geteld worden. *PVA 1 ND (1)* heeft één duidelijke scheur, net als *PVA 1 ND (2)*. De scheur vormt zich, brugvorming neemt over, maar er kan nergens een andere scheur vormen. *PVA 1 ND (3)* toont twee scheuren in het diagram en er werden ook twee scheuren microscopisch waargenomen.



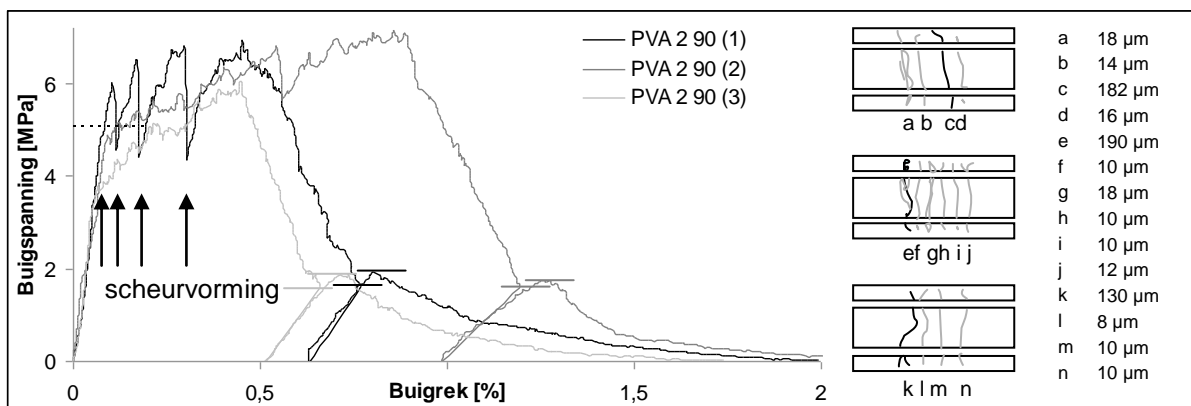
Figuur 99: Spanning-rek diagram voor PVA 1 ND proefstukken

Bij *PVA 0,5 ND* is er sprake van slechts één enkele scheur (Figuur 100). Bij *PVA 0,5 ND (3)* was er een verstevigend effect dat resulteerde in de vorming van twee scheuren.



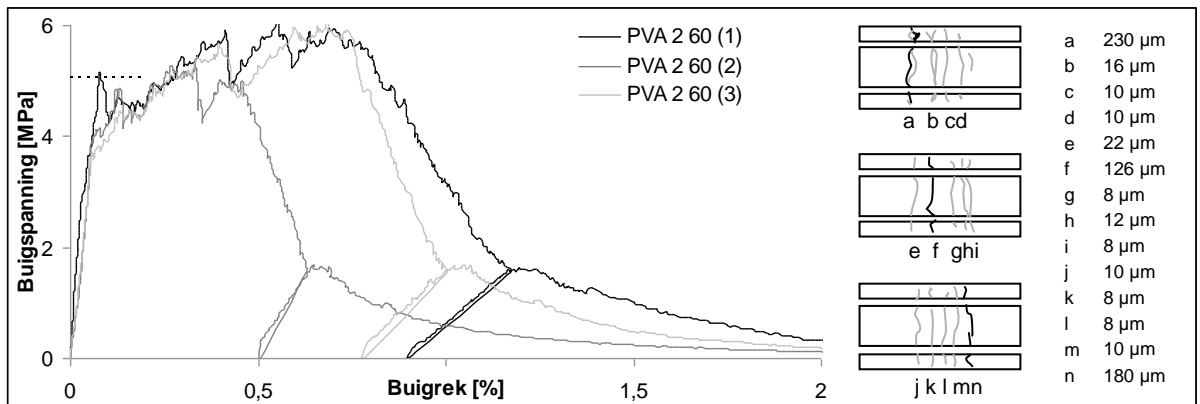
Figuur 100: Spanning-rek diagram voor PVA 0,5 ND proefstukken

De proefstukken onderworpen aan een $RV > 90\%$ (Figuur 101) vertonen een lichte winst in sterkte-eigenschappen (verhoging van de pieksterkte bij herbelasting). De mate van zelfheling wordt later besproken. Bij *PVA 2 90 (1)* is de vorming van scheuren zichtbaar. De theoretische eerste-scheur-sterkte komt goed overeen met de experimentele waarden. De theoretische waarde is steeds een overschatting aangezien er van een rechte steady-state scheur vertrokken wordt. In werkelijkheid zal dit eerder naar een parabolische scheur neigen.



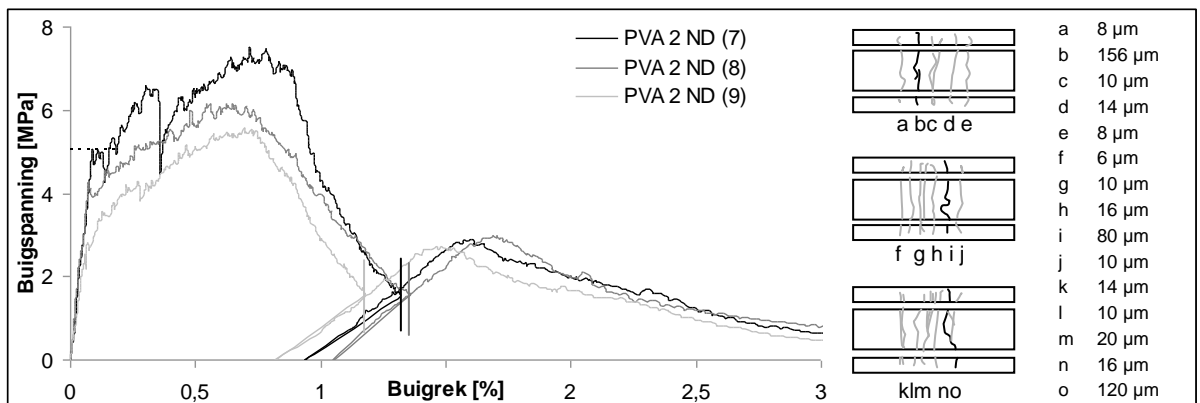
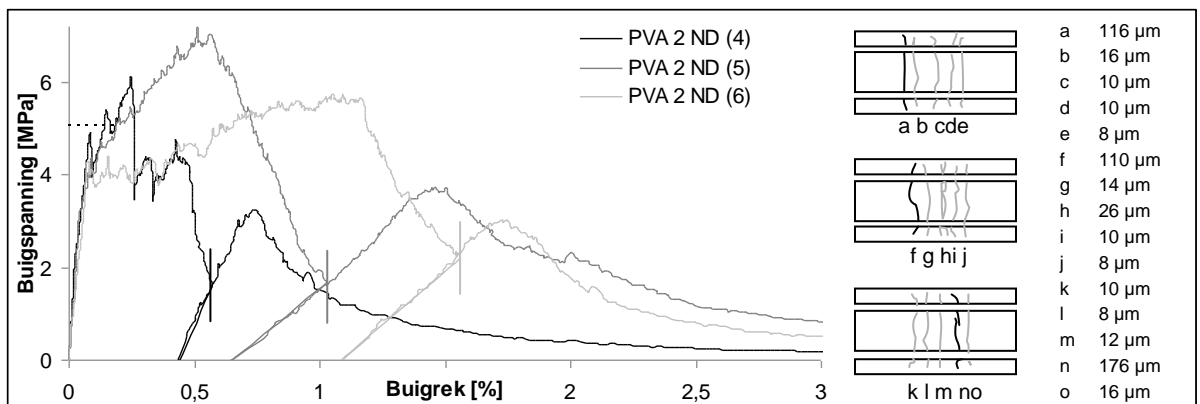
Figuur 101: Spanning-rek diagram voor PVA 2 90 proefstukken bij een $RV > 90\%$

Voor de reeks *PVA 2 60* die bewaard werd bij een $RV = 60\%$ (Figuur 102) is er nauwelijks een verschil zichtbaar met de controlestukken en treedt er geen heling op. Dit is in overeenstemming met de literatuur waar er geen heling bij blootstelling aan lucht.^[17]

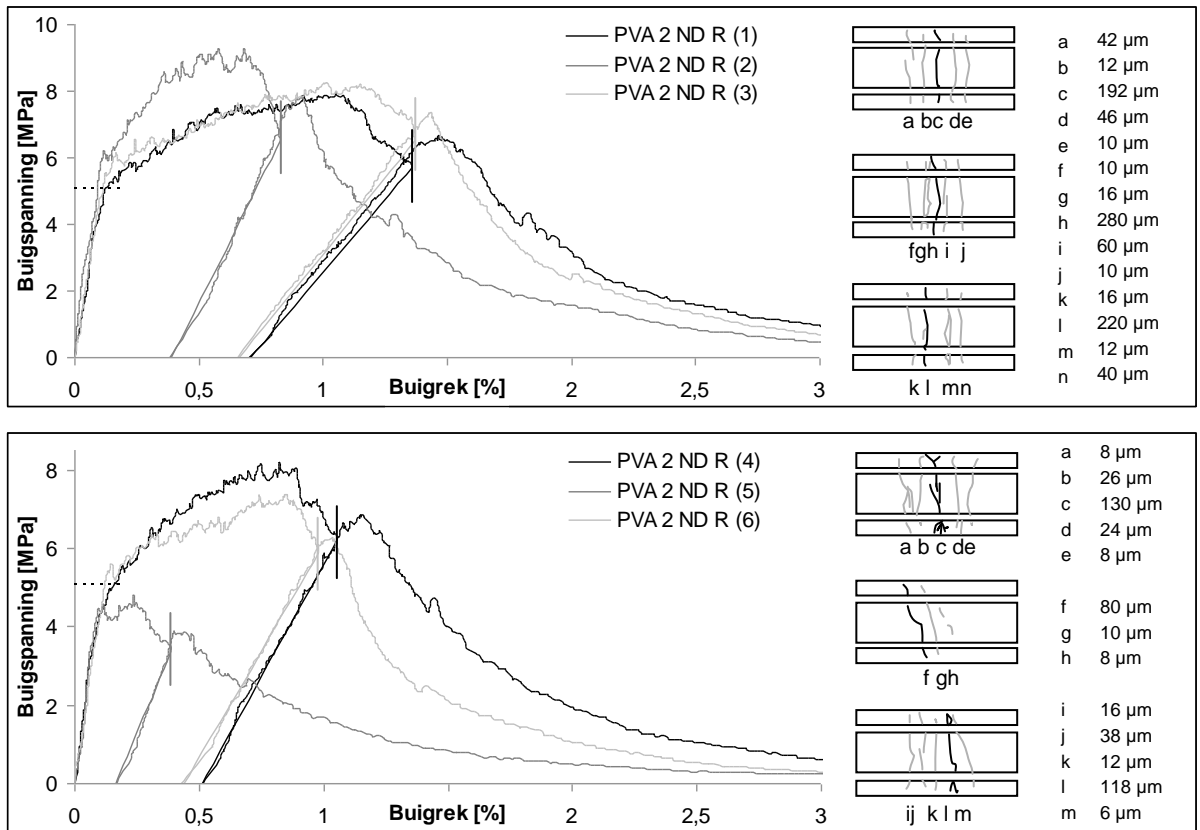


Figuur 102: Spanning-rek diagram voor *PVA 2 60* proefstukken bij een $RV = 60\%$

Het effect van de opgelegde eindrek, op de mate van zelfheling, werd eveneens onderzocht. De proefstukken *PVA 2 ND* werden voorbelast tot ver in hun verwekingsgedrag (aanduiding met strepen in Figuur 103) en proefstukken *PVA 2 ND R* werden belast tot wanneer de laatste scheur werd gevormd maar nog voor de initiële eerste-scheur-sterkte opnieuw werd bereikt (Figuur 104). De herbelastingscurves volgden nog steeds de ontlastingscurve.

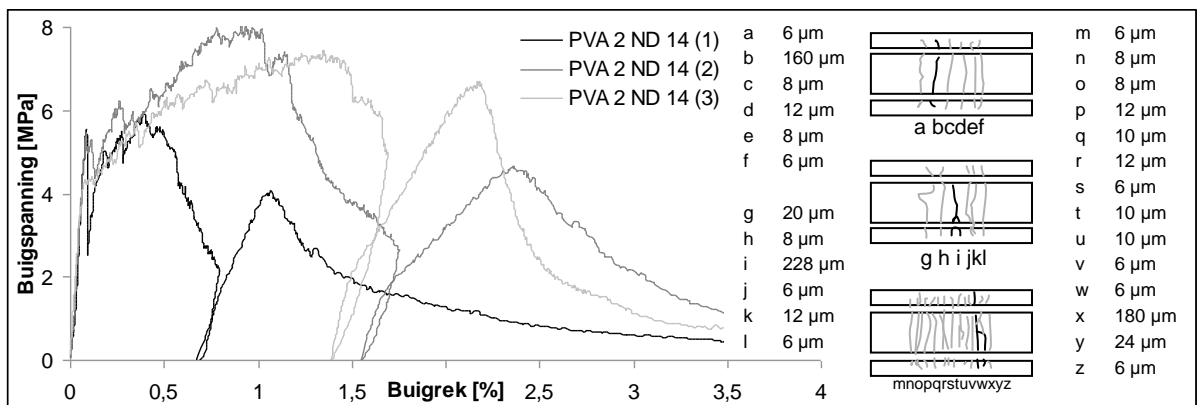


Figuur 103: Spanning-rek diagram voor *PVA 2 ND* proefstukken



Figuur 104: Spanning-rek diagram voor PVA 2 ND R proefstukken

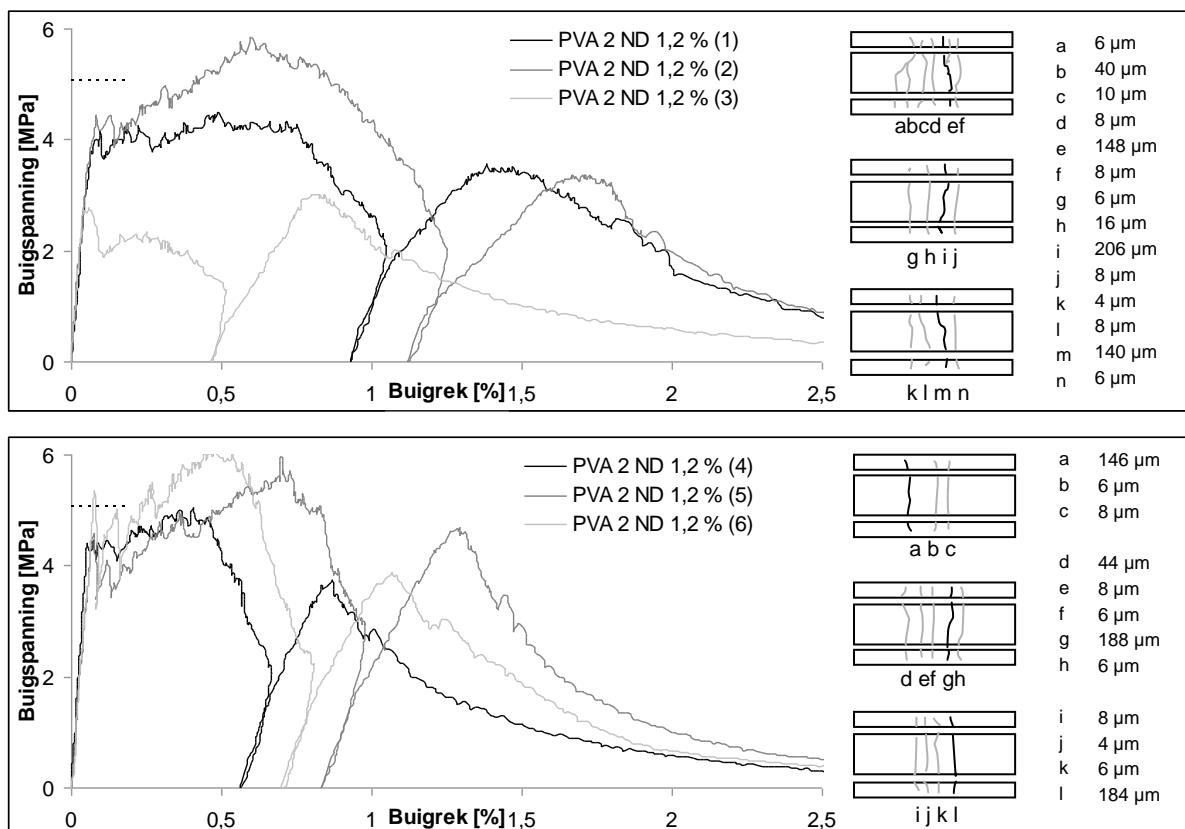
Scheuraanbreng op 14 dagen levert theoretisch een hogere meervoudige scheurvorming aangezien de matrix nog niet zo sterk is als op 28 dagen. Het meest treffende voorbeeld van meervoudige scheurvorming is terug te vinden bij *PVA 2 ND 14 (3)*, rechts in Figuur 105.



Figuur 105: Spanning-rek diagram voor PVA 2 ND 14 met scheuraanbreng op 14 dagen

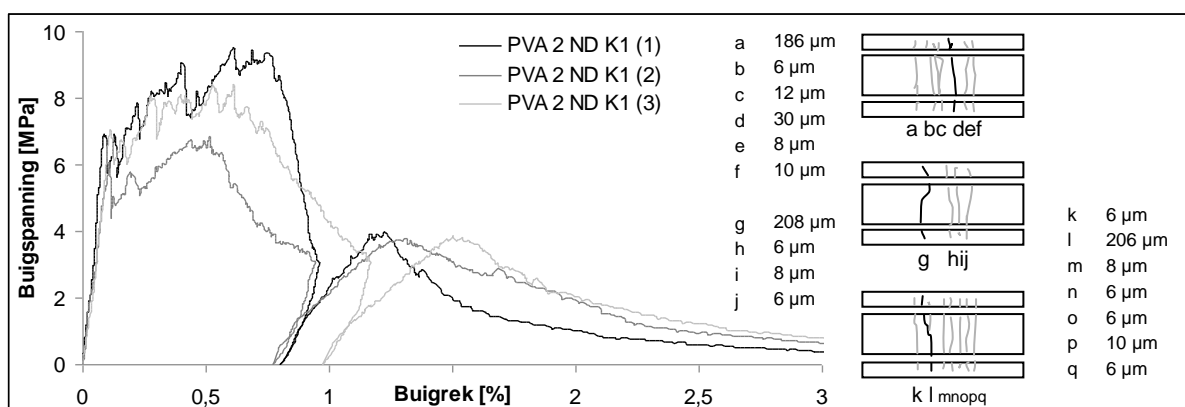
Bij PVA-vezels van Redco is de matrix iets te sterk op 28 dagen om een hoge rekapaciteit waar te nemen aangezien de vezel niet gecoat is. Het coaten verhelpt het hydrofiele karakter van de vezel en promoot het ontstaan van meervoudige scheurvorming en een grotere rekapaciteit. Dit effect wordt nagegaan door een eigen coating aan te brengen op de vezels of door gebruikt te maken van de PVA-vezels van Kuraray.

Het zelf coaten met ontkistingsolie levert deels vezels op die van hun hydrofiële karakter zijn ontdaan (Figuur 106). Er wordt opgemerkt dat het coaten met ontkistingsolie niet perfect uitgevoerd kan worden doordat de vezels de olie opsorpen bij druppelsgewijze toevoeging. Dus niet elke vezel heeft een deel van de coating gekregen. Het drenken van vezels in ontkistingsolie en het dan laten drogen levert geen goede resultaten. De vezels klitten namelijk aaneen en kunnen moeilijk verwerkt worden.

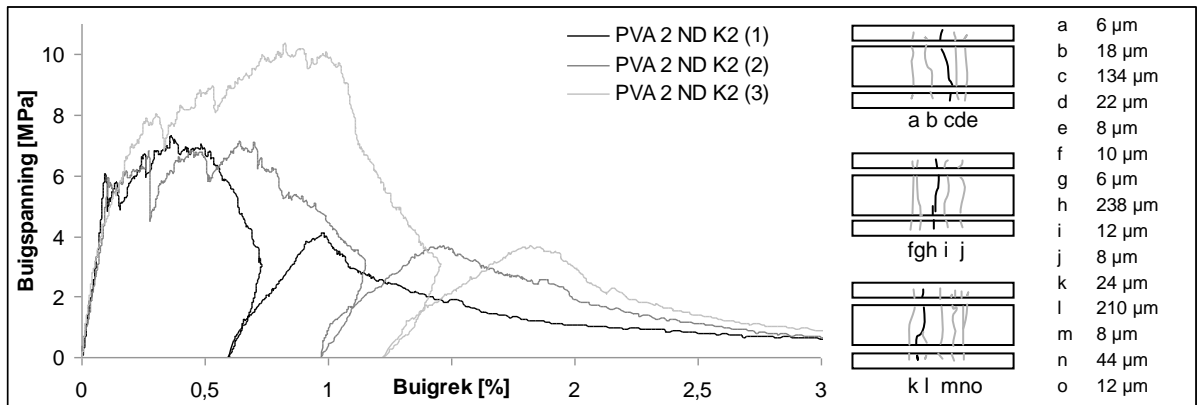


Figuur 106: Spanning-rek diagram voor eigen gecoate PVA 2 ND 1,2 % proefstukken

Het inmengen van één derde kalksteenmeel en twee derden vliegias (Figuur 107) levert een hogere eerste-scheur-sterkte. Dat wordt later duidelijk in paragraaf 4.3.3.7. Twee derden kalksteenmeel ten opzichte van één derde vliegias wordt weergegeven in Figuur 108.

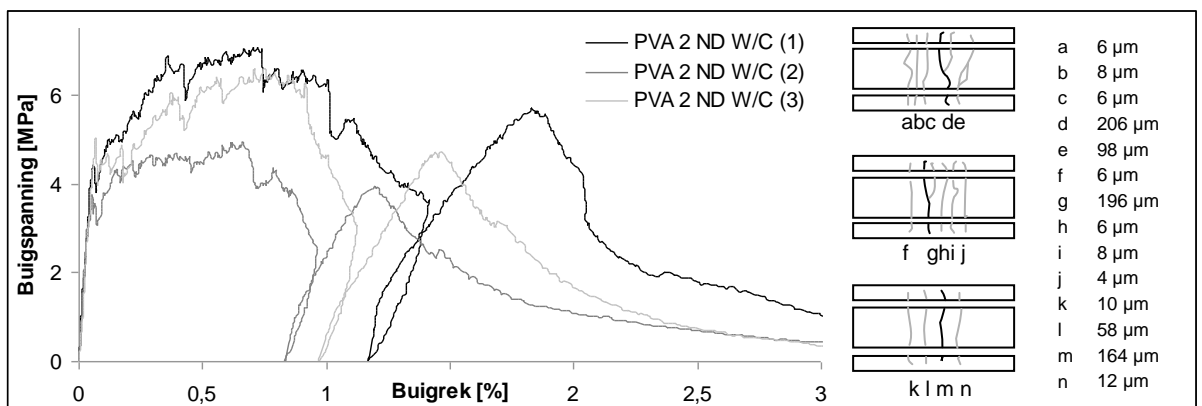


Figuur 107: Spanning-rek diagram van 1/3 vliegias vervangen door kalksteenmeel (K1)



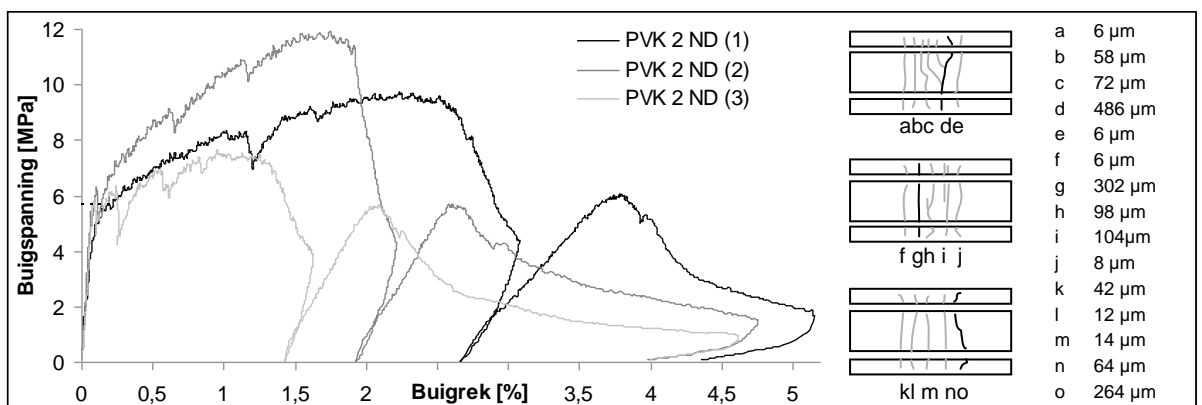
Figuur 108: Spanning-rek diagram van $\frac{2}{3}$ vlieg-as vervangen door kalksteenmeel (K2)

Een verlaging van de W/C-factor (Figuur 109) geeft een lagere matrixsterkte, dus een hogere rekcapaciteit en meervoudige scheurvorming. Doordat de W/C-factor lager is, is er ook meer ongehydrateerd cement aanwezig in de matrix. Dat zorgt dan weer voor meer mogelijkheid tot zelfheling door verdergaande hydratatie in nat/droog cycli.



Figuur 109: Spanning-rek diagram van PVA 2 ND W/C met een lagere W/C-factor

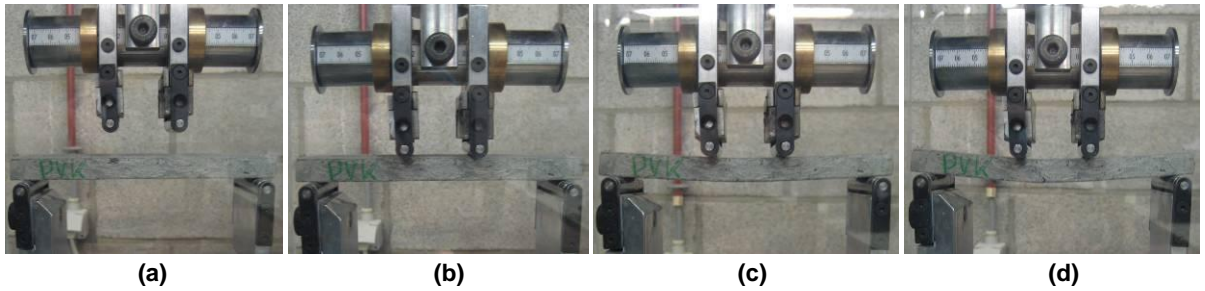
De theoretische waarde van de eerste-scheur-sterkte bij de PVK-vezel (Kuraray PVA-vezel) ligt net boven de experimenteel bepaalde waarden in Figuur 110. De rekcapaciteit ligt veel hoger dan deze voor PVA-vezels van Redco en voor de zelf gecoate PVA-vezels.



Figuur 110: Spanning-rek diagram van PVK 2 ND proefstukken (Kuraray)

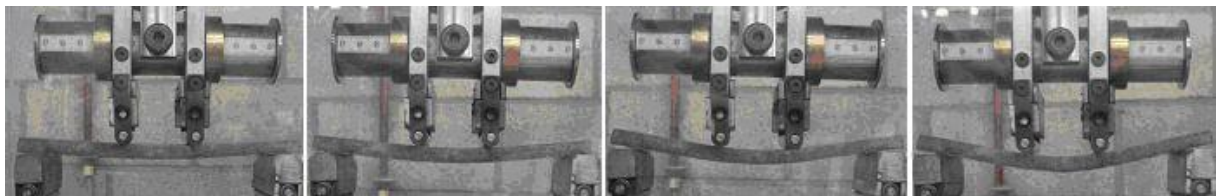
De rekcapaciteit komt overeen met deze in Figuur 8. De scheurwijdtes voordat een scheur zich opent, liggen tussen 6 en 104 μm . Dit is analoog aan ECC[®] met PVK-vezels, welke scheuren tussen 60 en 100 μm vertonen.^{[17][27][28][29]} De scheuren in Figuur 110 zijn 2-10 mm onderling verspreid. Bij ECC[®] zijn de scheuren 2-5 mm onderling verspreid.^[26]

Figuur 111 toont de doorbuiging van een *PVK 2 ND* proefstuk. Figuur 111a toont de onbelaste toestand, Figuur 111b de start van de proef, Figuur 111c een doorbuiging van 3 mm en Figuur 111d een doorbuiging van 6 mm.



Figuur 111: Doorbuiging van PVK 2 ND (onbelast, start, 3 en 6 mm doorbuiging)

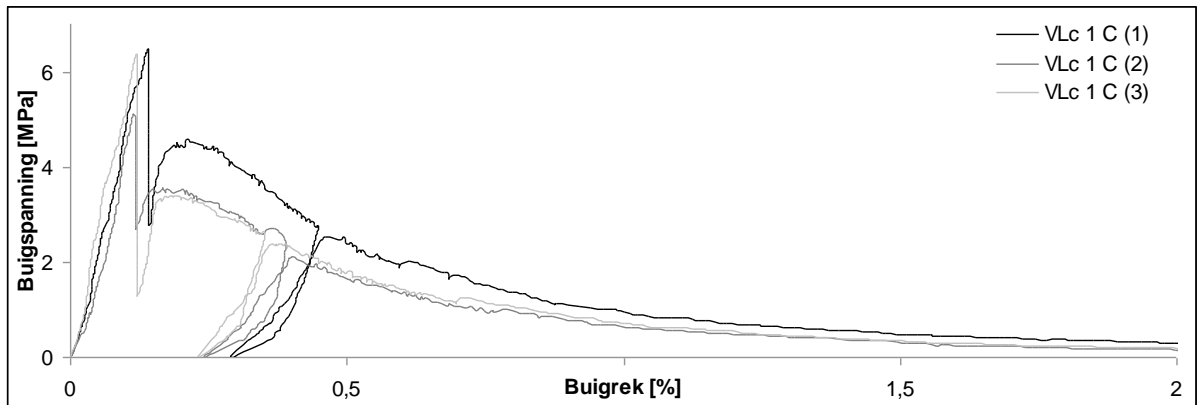
De doorbuiging lijkt niet zo fenomenaal als in Figuur 7. Dat komt omdat de proefstukken relatief dik zijn ten opzichte van deze gebruikt in de literatuur. Een dunner proefstuk wordt weergegeven in Figuur 112. De doorbuiging is respectievelijk 1, 3, 6 en 9 mm. Deze doorbuigingen zijn wel gelijkaardig aan deze in Figuur 7 en in het onderzoek van Kim en Schlangen (2011)^[97] waar de maximale doorbuiging 8 mm bedraagt.



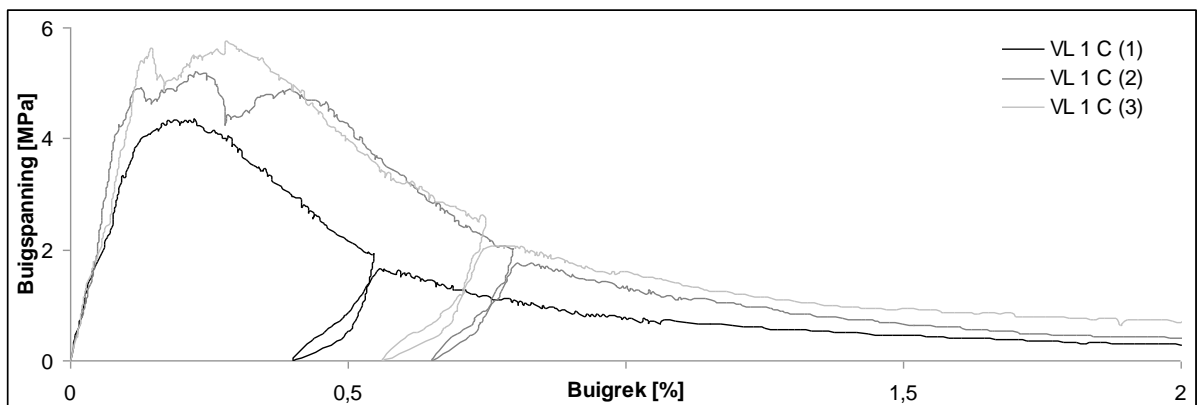
Figuur 112: Doorbuiging van een dun PVK 2 proefstuk (1, 3, 6 en 9 mm doorbuiging)

4.3.2.2. Mengsels met vlasvezels

Bij de controlestukken van beide soorten vlasvezel (Figuur 113 en Figuur 114) volgt de herbelastingscurve de trend van de ontlastingscurve. Enkel de mengsels met de technische vlasvezel (VL) neigen in de richting van meervoudige scheurvorming. De mengsels met de gecottoniseerde vorm (VLc) geven geen positief resultaat.

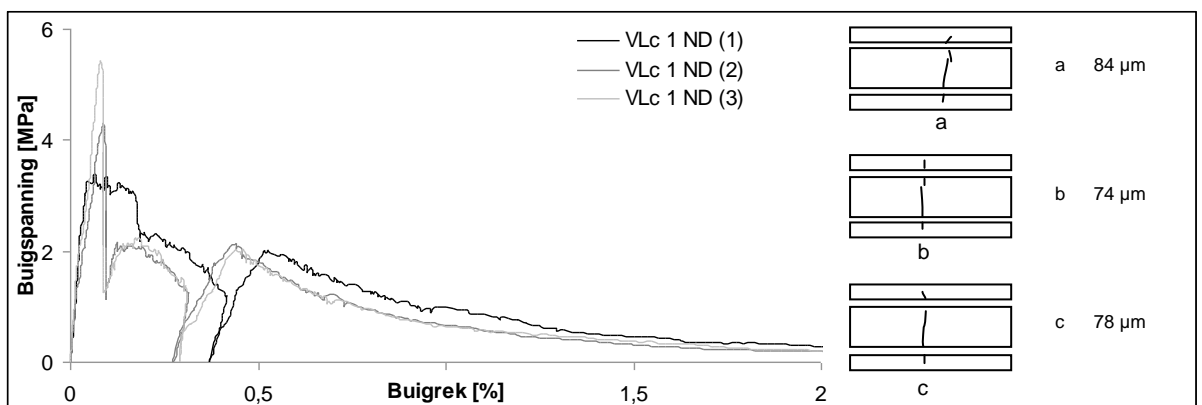


Figuur 113: Spanning-rek diagram voor controlestukken VLc 1 C

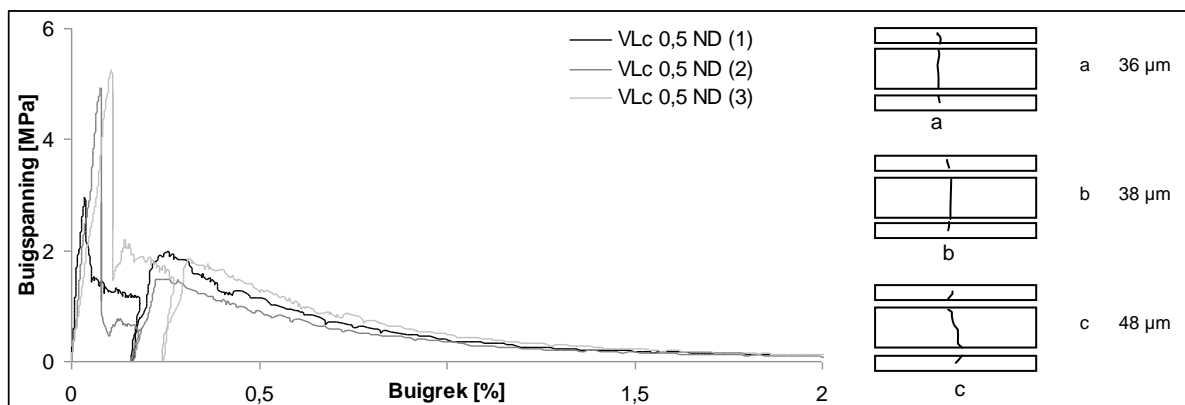


Figuur 114: Spanning-rek diagram voor controlestukken VL 1 C

Gecottoniseerde vlasvezels (Figuur 116) geven geen meervoudige scheurvorming en geen verstevigend effect bij 0,5 vol.%. Ook bij 1 vol.% vezels is er geen meervoudige scheurvorming zichtbaar (Figuur 115). De vezels zijn niet in staat om via brugvorming de extra last op te nemen. 1 vol.% is het maximum aan vlasvezel dat ingemengd kon worden.

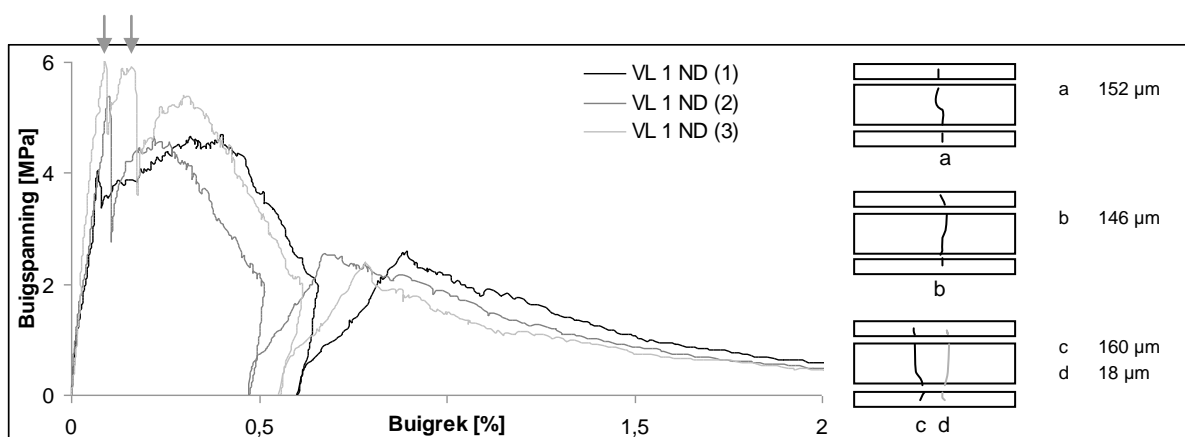


Figuur 115: Spanning-rek diagram voor 1 vol.% gecottoniseerde vlasvezel (VLc 1 ND)

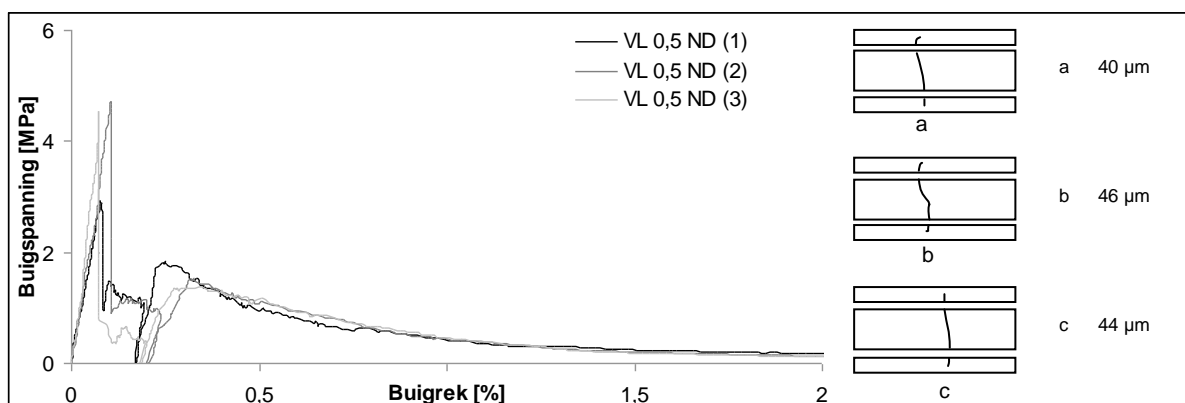


Figuur 116: Spanning-rek diagram voor 0,5 vol.% gecottoniseerde vezel (VLc 0,5 ND)

Voor de technische vlasvezel is er bij 0,5 vol.% vezels (Figuur 118) geen sprake van meervoudige scheurvorming. Bij 1 vol.% vezels (Figuur 117) is er bij VL 1 ND (1) sprake van een verstevigend effect en bij VL 1 ND (3) van dubbele scheurvorming. 1 vol.% aan vlasvezels is het maximum aan vezels dat kon ingemengd worden door afname van de verwerkbaarheid.



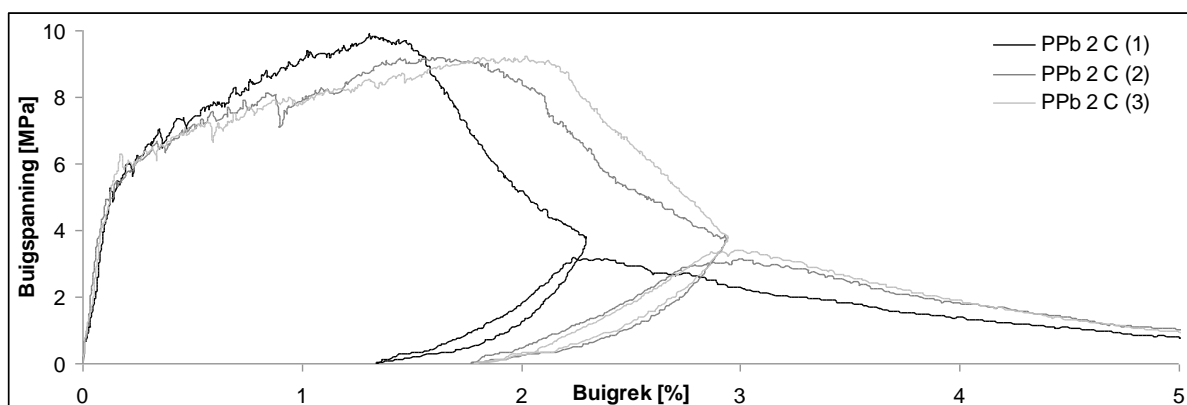
Figuur 117: Spanning-rek diagram voor 1 vol.% technische vlasvezel (VL 1 ND)



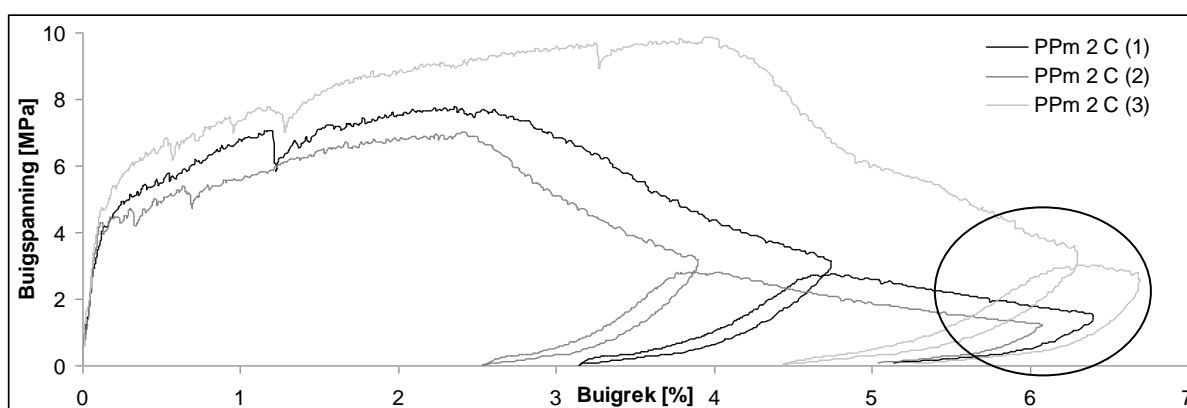
Figuur 118: Spanning-rek diagram voor 0,5 vol.% technische vlasvezel (VL 0,5 ND)

4.3.2.3. Mengsels met PP-vezels

De controlestukken *PPb 2 C* (Figuur 119) en *PPm 2 C* (Figuur 120) leveren steeds hogere waarden voor de eerste-scheur-sterkte (4,25 MPa voor de bicore-vezel en 3,88 MPa voor de monofilament-vezel op een leeftijd van 28 dagen) aangezien er verdergaande hydratatie is opgetreden door een scheuraanbreng op 56 dagen na curing in nat/droog cycli. Een grote verbetering in het rekgedrag treedt op doordat PP-vezels geen hechtsterkte vertonen. Dit is een goede karakteristiek op het vlak van meervoudige scheurvorming.



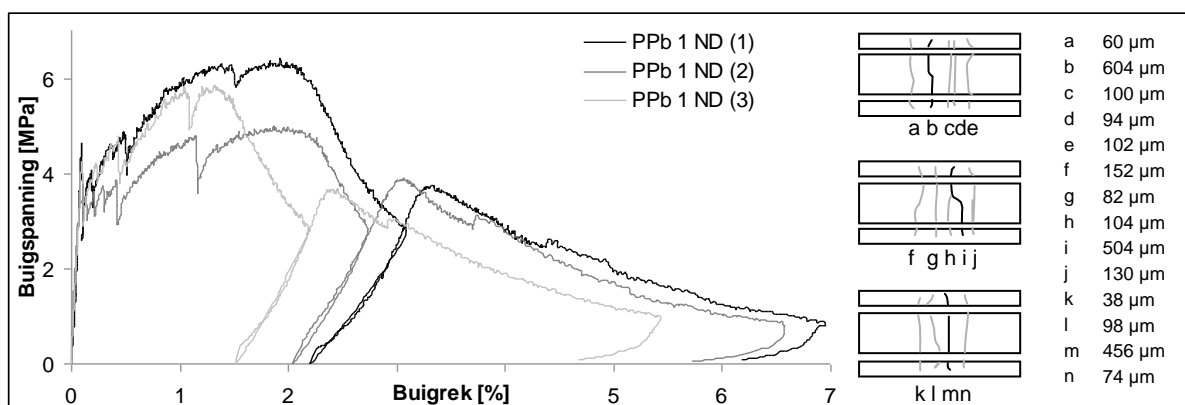
Figuur 119: Spanning-rek diagram van 2 vol.% PP-vezel bicore (controlemengsel)



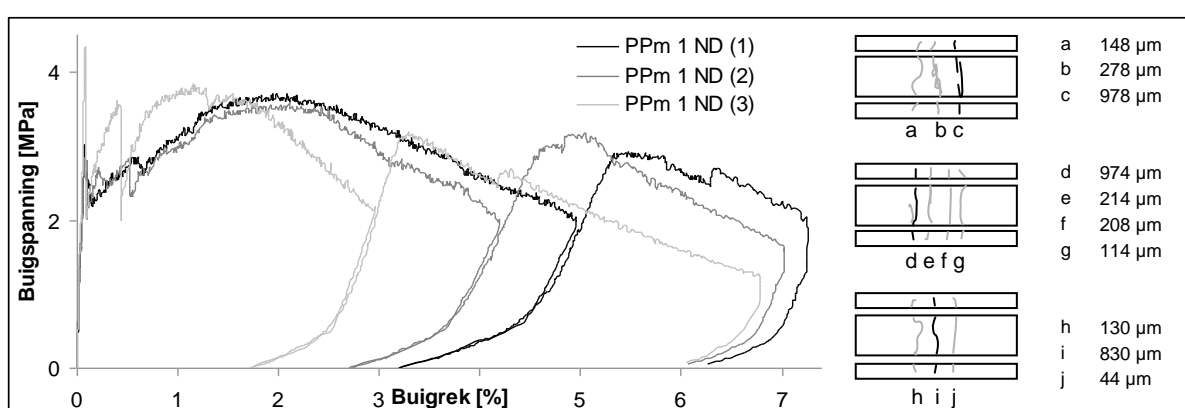
Figuur 120: Spanning-rek diagram van 2 vol.% PP-vezel monofilament (controlemengsel)

Bij *PPm 2* proefstukken, zoals in Figuur 120, zijn er ontlastingscurves zichtbaar bij de herbelasting. Dat komt omdat de proefmachine maximaal 20 mm kan doorbuigen. Deze grens werd bereikt (12 mm initieel vrij en 8 mm werkelijke daling).

Ook 1 vol.% aan PPb-vezels levert een hoge rekapaciteit (Figuur 121). Bij de proefstukken vormde zich steeds een grote laatste scheur, aangezien de vezels uitgetrokken worden doordat de hechtsterkte nul is. Bij het type monofilament is er een hogere rekapaciteit aanwezig dan bij de bicore-vezel, zoals te zien is in Figuur 122. Dat komt door de gekrulde vorm van de vezel ten opzichte van de rechte bicore-vezel. De herbelastingscurve volgt de ontlastingscurve en, hoewel de scheurwijdtes heel groot zijn, is er toch herstel zichtbaar. In het inwendige van de scheur treedt heling op.

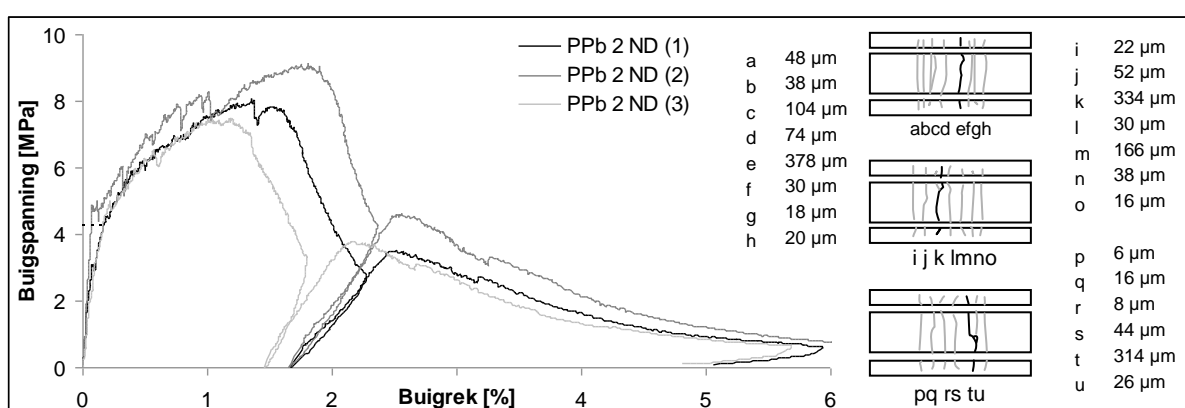


Figuur 121: Spanning-rek diagram van 1 vol.% PP-vezel bicore (PPb 1 ND)



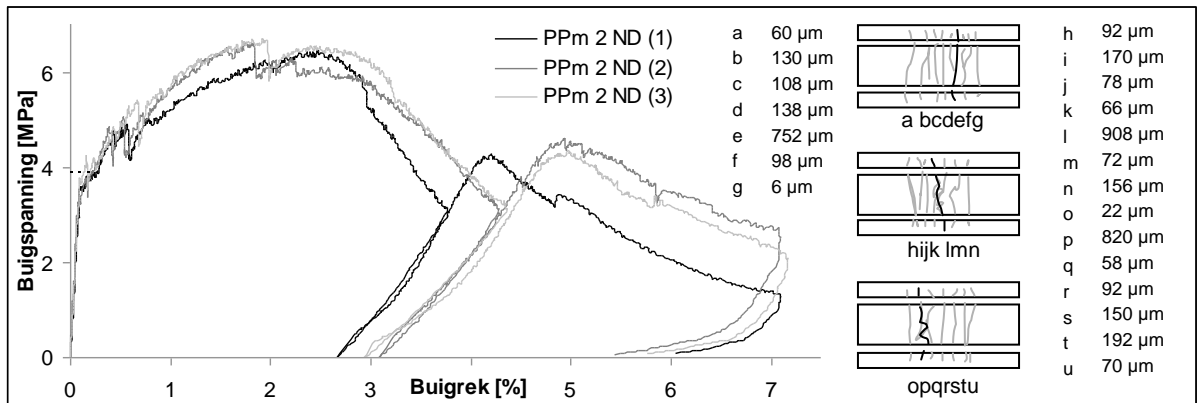
Figuur 122: Spanning-rek diagram van 1 vol.% PP-vezel monofilament (PPm 1 ND)

Verhoging van het volumepercentage vezels levert betere meervoudige scheurvorming en een verbetering van het verstevigend gedrag (*PP b 2 ND* in Figuur 123). De theoretische eerste-scheur-sterkte ligt opnieuw boven de experimentele waarden. De scheurwijdtes dalen door het verhogen van het volumepercentage aan vezels. Dit is in overeenstemming met paragraaf 2.3.5.3 en Boghossian & Wegner (2008)^[9].



Figuur 123: Spanning-rek diagram van PPb 2 ND proefstukken

Het verstevigend karakter en de meervoudige scheurvorming van een mengsel met 2 vol.% PP-vezels monofilament (*PPm 2 ND* in Figuur 124) is groter dan het mengsel met 1 vol.% PPm-vezels. De theoretische waarde van de eerste-scheur-sterkte ligt perfect in de buurt van de experimentele waarden. In Figuur 125 is de verticale doorbuiging van 6 mm te zien bij de voorbelasting van een *PPm 2*-proefstuk.



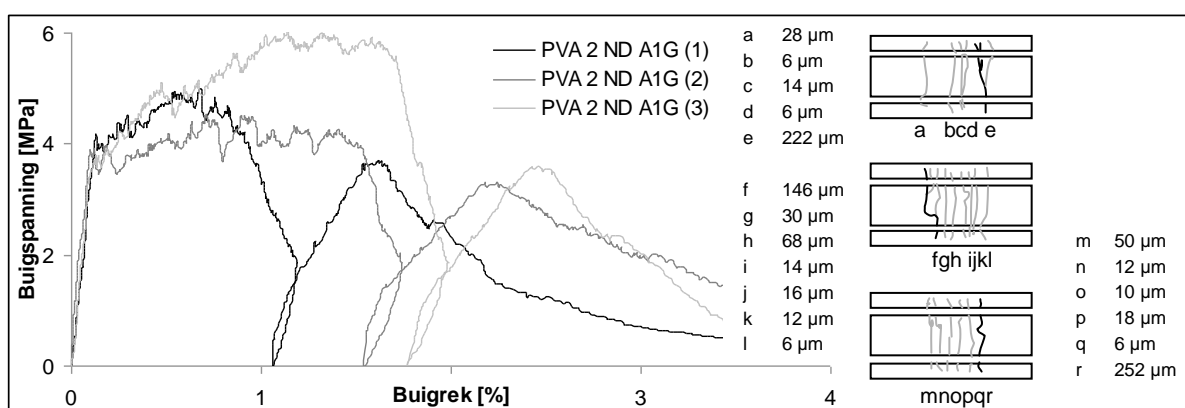
Figuur 124: Spanning-rek diagram van *PPm 2 ND* proefstukken



Figuur 125: 6 mm doorbuiging bij voorbelasting van een *PPm 2* proefstuk

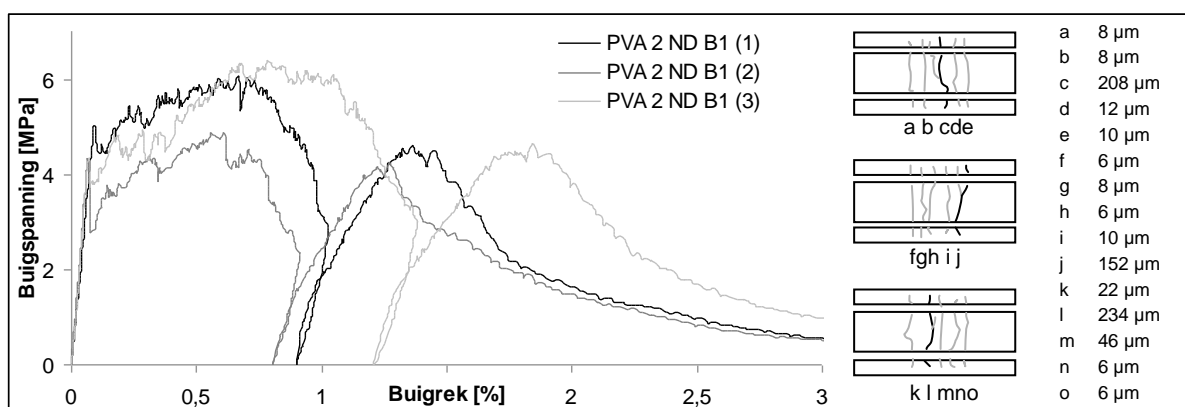
4.3.2.4. Mengsels met PVA-vezels en SAP

De meervoudige scheurvorming kan verhoogd worden door het inmengen van extra defecten. Deze kunnen bijvoorbeeld SAP zijn die microdefecten geven in het proefstuk. De opgetreden meervoudige scheurvorming door het inmengen van SAP A als gelvorm (droog is niet verwerkbaar) in Figuur 126, is groter dan bij een standaard mengsel. SAP-korrels geven initiaties tot scheuren waardoor een scheur makkelijker optreedt.



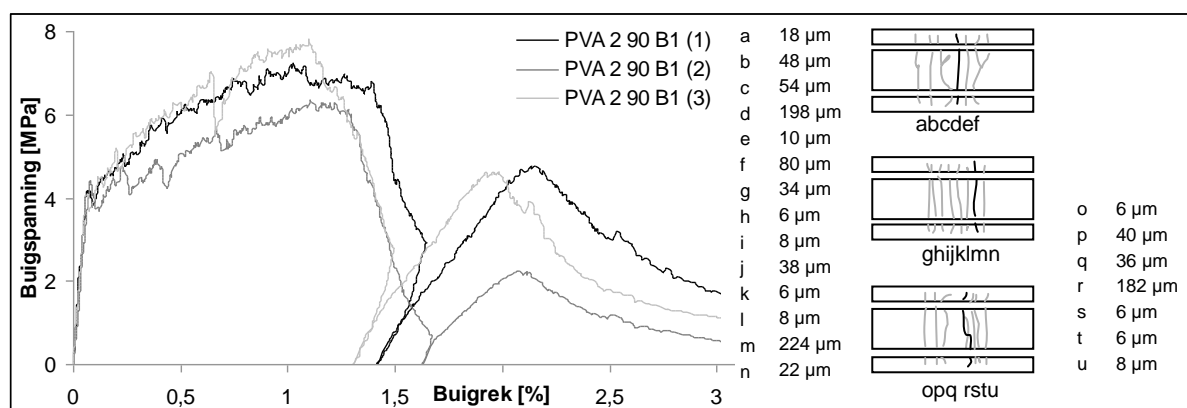
Figuur 126: Spanning-rek diagram voor PVA 2 ND A1G proefstukken

Het inmengen van SAP B verhoogt de scheurvormingscapaciteit. Dat is zichtbaar in Figuur 127. Ook de mate van zelfheling is hoger dan voor proefstukken zonder SAP. Dat komt later aan bod. Ook blijkt er opnieuw een lichte vorm van meervoudige scheurvorming op te treden.



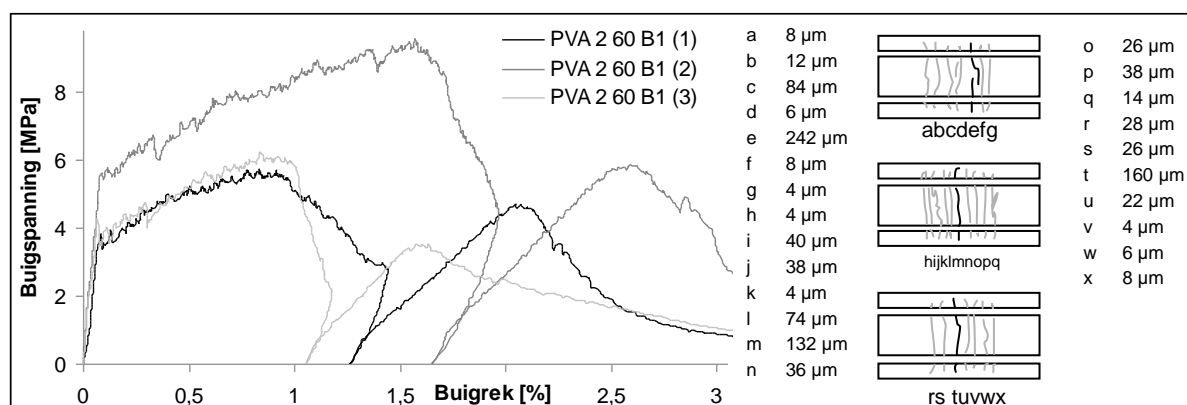
Figuur 127: Spanning-rek diagram van proefstukken met 1 m% SAP B (PVA 2 ND B1)

Bij curing onder een $RV > 90\%$ (Figuur 128) blijkt er zelfheling te zijn opgetreden. SAP houden water en vocht vast en geven dit gradueel af aan de cementmatrix. Zo kan er verdergaande hydratatie optreden en dus heling. Ook blijft er water voorradig om in te staan voor de vorming van CaCO_3 door het oplossen van CO_2 .



Figuur 128: Spanning-rek diagram met 1 m% SAP B onder een RV > 90 %

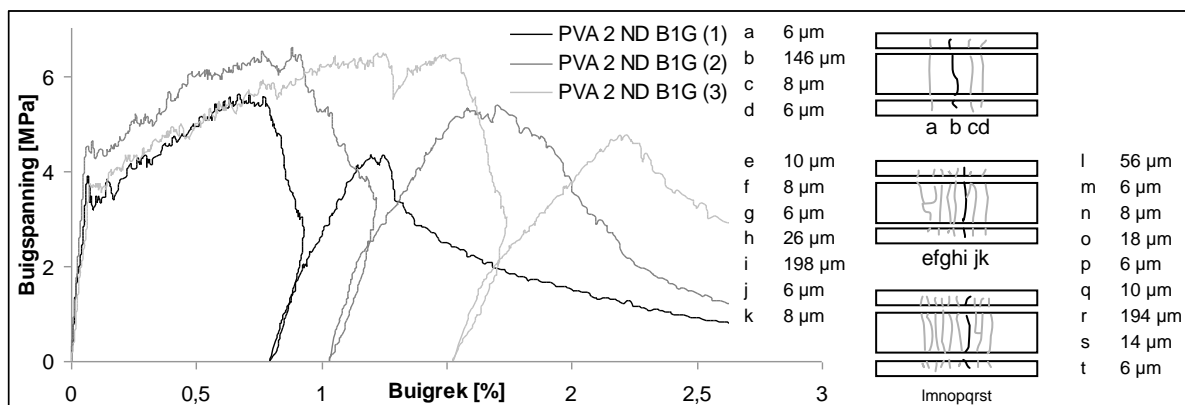
Hetzelfde wordt opgemerkt bij een RV = 60 % in Figuur 129. Bij een RV > 90 % bestaat de kans dat waterdruppels via de vernevelaar op het proefstuk terecht komen. Dat was echter weinig waarschijnlijk aangezien de proefstukken goed afgeschermd stonden. Maar ook bij een RV = 60 % treedt heling op, dankzij het inmengen van SAP. Opnieuw wordt het vocht vastgehouden en gradueel afgegeven aan de cementmatrix. Het vasthouden van vocht bij een RV = 60 % werd ook waargenomen in de DVS-metingen uit paragraaf 4.2.4. Het vasthouden van 0,35 g vocht/ g SAP blijkt dus voldoende te zijn voor zelfheling.



Figuur 129: Spanning-rek diagram met 1 m% SAP B onder een RV = 60 %

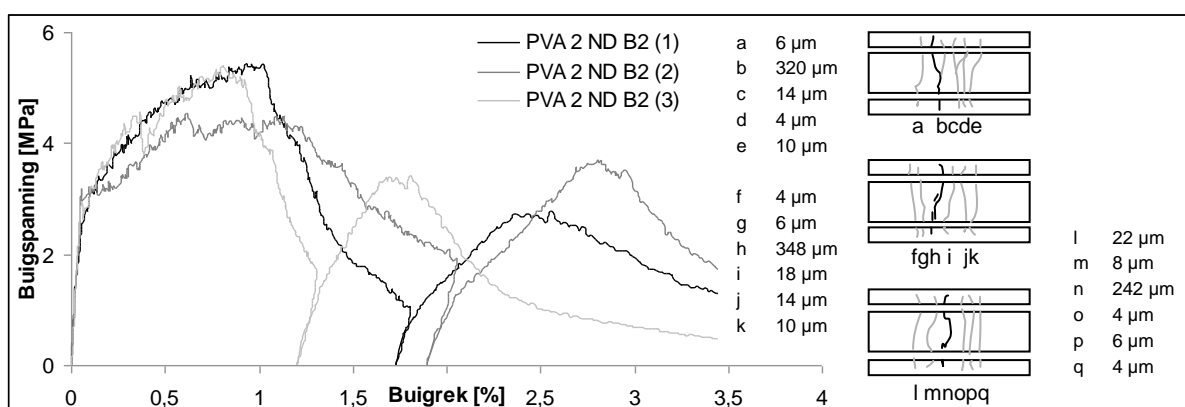
SAP kan zowel droog (voorgaande) als in gelvorm ingemengd worden. Bij SAP A verbeterde het in gelvorm inmengen de verwerkbaarheid.

Bij het inmengen van SAP B als gel (Figuur 130) werd hetzelfde patroon waargenomen als bij het droog inmengen (Figuur 127). De mate van initiële meervoudige scheurvorming ligt wel lager dan bij het droog inmengen van SAP B. Dat komt omdat SAP B bij absorptie tot gel grote vlokken vormt, welke niet goed verspreid zijn in de mortelmatrix. Bij de inmenging van de gel zijn er dus agglomeraten van SAP-wolken, tegenover de goed verspreide droog ingemengde SAP.



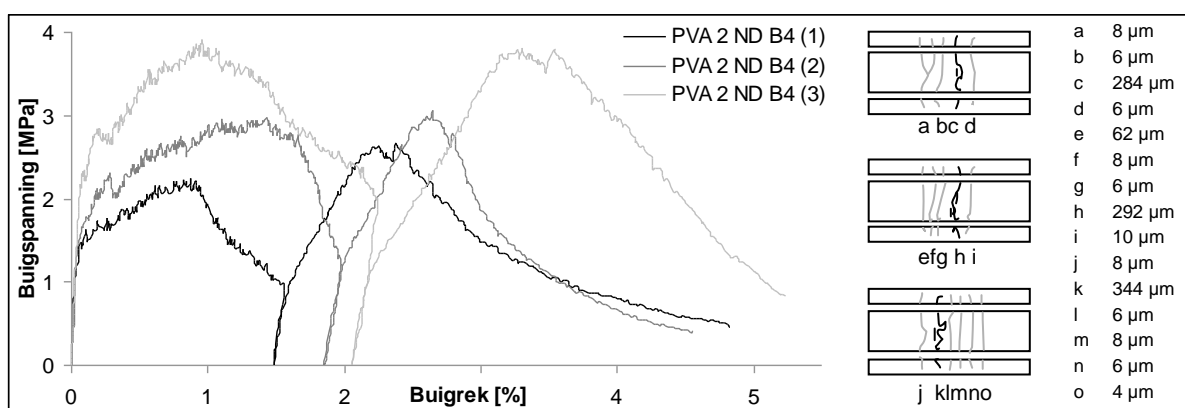
Figuur 130: Spanning-rek diagram met 1 m% SAP B ingemengd als gelvorm

Bij het inmengen van een hoger massaprocent SAP, daalt de eerste-scheur-sterkte (Figuur 131). Dat komt omdat SAP holtes vormen na inkrimpen en dus voor een verminderde doorsnede zorgen. Er is wel sprake van een verhoogde meervoudige scheurvorming. Dit is analoog aan paragraaf 4.2.5.



Figuur 131: Spanning-rek diagram met 2 m% SAP B (PVA 2 ND B2)

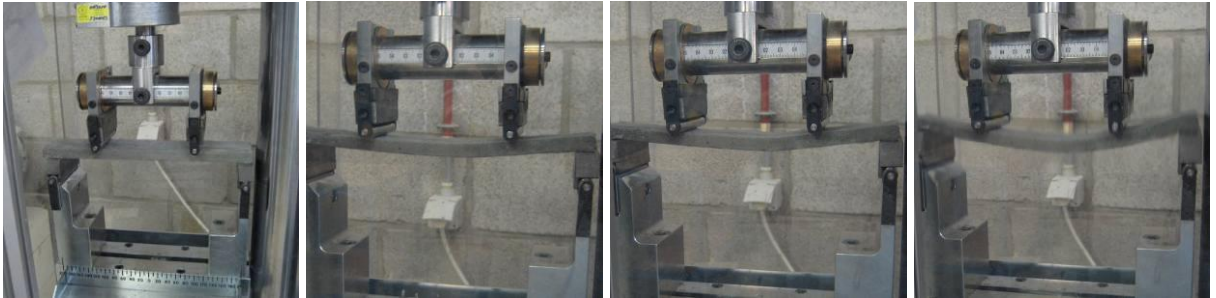
Ook bij mengsels met 4 m% SAP B in Figuur 132, is er meer meervoudige scheurvorming en een grotere rekcapaciteit maar nog lagere buigtrekeigenschappen ten opzichte van 2 m% SAP B.



Figuur 132: Spanning-rek diagram met 4 m% SAP B (PVA 2 ND B4)

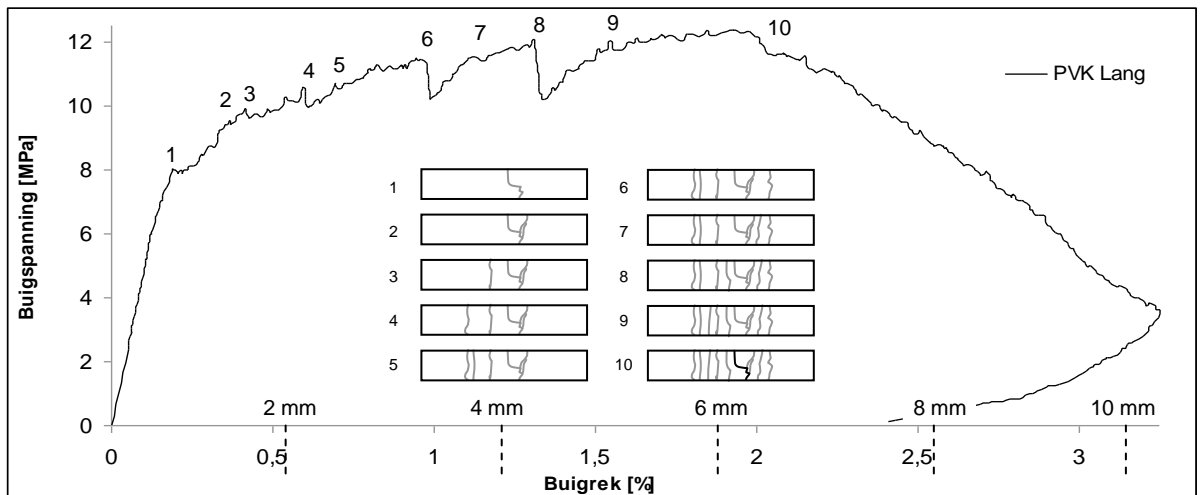
4.3.2.5. Lange dunne PVK 2 en PPm 2 proefstukken

Ook langere, maar dunnere ($220 \cdot 40 \cdot 10 \text{ mm}^3$) proefstukken met 2 vol.% PVA-vezels van Kuraray en PP-vezels monofilament werden onderzocht. Er werd een maximale doorbuiging van 10 mm bij de *PVK 2* proefstukken (Figuur 133) bekomen en 8 mm bij de *PPm 2* proefstukken.



Figuur 133: Doorbuiging van een PVK 2 proefstuk (start, 2, 6 en 10 mm)

Deze doorbuiging, samen met de optredende scheurvorming wordt weergegeven in Figuur 134. De meervoudige scheurvorming komt duidelijk tot uiting. Eerst vormt er zich een scheur en de vezels nemen door brugspanning de krachtswerking op zich. Vervolgens vormt er zich een tweede scheur, en een derde,... Tot wanneer één scheur de krachten niet meer kan opnemen door brugvorming. Dat bleek de eerst gevormde scheur te zijn, aangeduid in zwart.



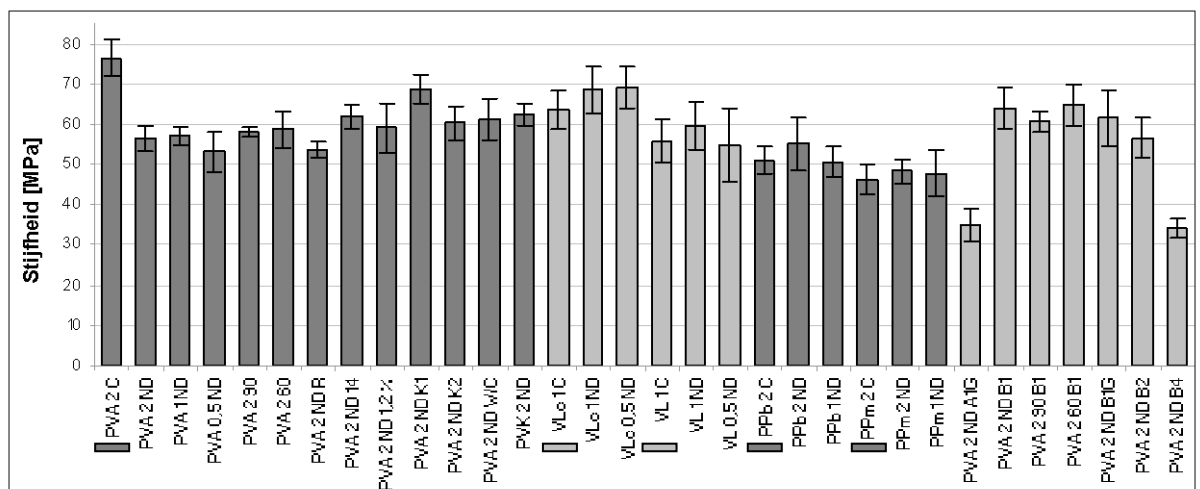
Figuur 134: Spanning-rek diagram van een PVK 2 proefstuk met scheurvorming

4.3.3. Vergelijking van de verschillende reeksen

Alle bovenstaande gevallen verdeeld in vier groepen worden nu meer bevattelijk vergeleken in de volgende grafieken. Deze omvatten de stijfheid, de herwonnen stijfheid, de piekwaarde, de herwonnen piekwaarde, de meervoudige scheurvorming, de maximale rek, de totale arbeid, de herwonnen meervoudige scheurvorming, de eerste-scheur-sterkte, de scheurtip breuktaaiheid, de herwonnen eerste-scheur-sterkte en de herwonnen sterkte. Voor de betekenis van voorgenoemde eigenschappen wordt verwezen naar paragraaf 3.2.5. De controlemengsels worden extra aangeduid door een balk voor hun code. Het gehanteerde significantieniveau is steeds 5 % in de besluittrekking.

4.3.3.1. Stijfheid

Figuur 135 toont de gemiddelden van de stijfheden met hun standaardafwijking. *PVA 2 C* blijkt significant stijver te zijn dan *PVA 2 ND* mengsels. Bij *PVA 2 ND* mengsels werden scheuren aangebracht op een leeftijd van 28 dagen, bij *PVA 2 C* pas op 56 dagen. Tussen de 28 en 56 dagen werd *PVA 2 C* ook onderworpen aan nat/droog cycli en bijgevolg trad verdergaande hydratatie op en is de stijfheid hoger. Bij de andere vezelmengsels gaat dit niet op en verschillen de mengsels niet onderling van elkaar.



Figuur 135: Stijfheid [MPa] bij vierpuntsbuigproef van verschillende mengsels

Tussen de stijfheid van het *PVA 1* mengsel en het mengsel met technische vlasvezels (*VL 1*) bestaat er geen significant verschil. *VLc 1* heeft echter een hogere stijfheid dan *PVA 1*. Op een significantieniveau van 8,4 % bestaat er een verschil in beide vlagsmengsels. Op dit niveau kan besloten worden dat mengsels met gecottoniseerde vlasvezels een hogere stijfheid vertonen dan mengsels met technische vlasvezels.

Vervanging van één derde vliegias door kalksteenmeel (*PVA 2 ND K1*) geeft een verbetering van de stijfheid. Vervanging van twee derden vliegias door kalksteenmeel (*PVA 2 ND K2*) geeft analoge stijfheidseigenschappen als mengsels zonder de vervanging.

Mengsels met PP-vezels bicore en monofilament zijn niet significant verschillend op gebied van stijfheid ten opzichte van de mengsels met PVA-vezels van Redco. 2 vol.% PP-vezel monofilament geeft mengsels (*PPm 2 ND*) met een lagere stijfheid ten opzichte van de mengsels *VLc 1 ND*, *VL 1 ND* en *PVK 2 ND*.

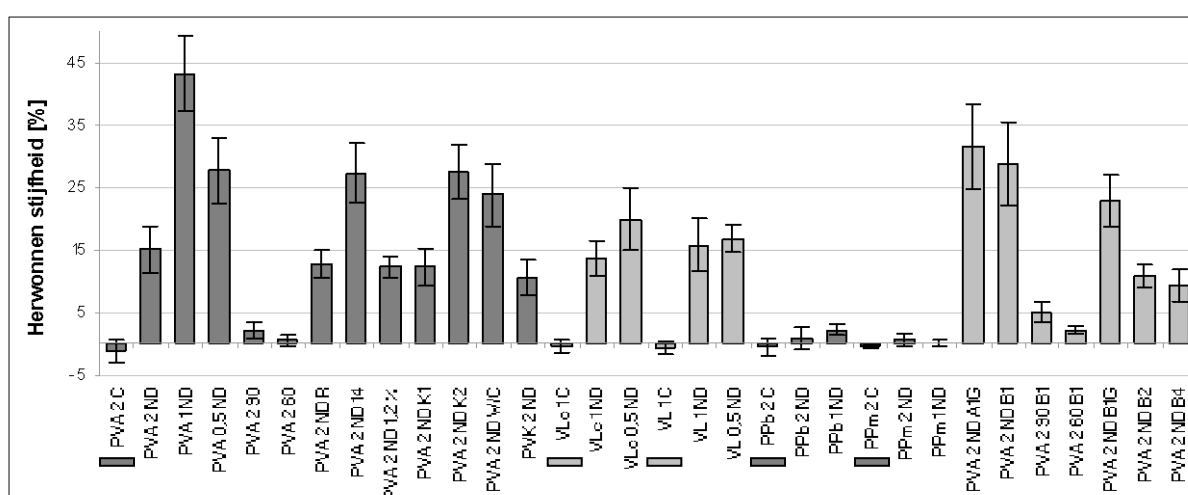
Het inmengen van 1 m% SAP A (*PVA 2 ND A1G*) en 4 m% SAP B (*PVA 2 ND B4*) zorgt voor een lagere stijfheid en beiden zijn onderling niet significant verschillend van elkaar. Dit komt door de slechtere verwerkbaarheid van deze mengsels ten opzichte van de andere mengsels. Een verhoging van het massaprocent aan SAP zorgt voor een verlaging van de E-modulus. In de proefstukken worden namelijk meer macroporiën gecreëerd door de SAP (*PVA 2 ND B1*, *PVA 2 ND B2* en *PVA 2 ND B4*).

De stijfheid van het mengsel met 1 m% SAP B (*PVA 2 ND B1*) is significant verschillend ten opzichte van de stijfheid van het mengsel zonder SAP (*PVA 2 ND*). SAP geven gradueel in de tijd hun water af aan de matrix wat resulteert in een stijvere matrix. De agglomeraten gevormd door het inmengen van 1 m% SAP B als gelvorm (*PVA 2 ND B1G*) geven geen significant verschil in stijfheid met het SAP-loos mengsel *PVA 2 ND*.

Mengsels met PVA-vezels van Kuraray (*PVK 2 ND*) geven een hogere stijfheid dan de proefstukken met PVA-vezels van Redco (*PVA 2 ND*). De PVK-vezel is zo gefabriceerd dat de eigenschappen van het mortelmengsel verbeterd worden. Het zelf coaten van de PVA-vezel (*PVA 2 ND 1,2 %*) gaf geen verbetering van de stijfheid.

4.3.3.2. Herwonnen stijfheid

Figuur 136 geeft de herwonnen gemiddelde stijfheid weer van de verschillende proefreeksen met hun standaardafwijking. Dit is een wijze om de mate van zelfheling uit te drukken.



Figuur 136: Herwonnen stijfheid [%] van de verschillende mengsels

Tussen de controlemengsels (C) bestaat er geen significant verschil in herwonnen stijfheid. Ten opzichte van een RV = 60 % en RV > 90 % zonder SAP (*PVA 2 60* en *PVA 2 90*) is er ook geen significant verschil in herwonnen stijfheid. Dit is in overeenstemming met paragrafen 2.3.4.1 en 2.3.4.3. Een mengsel met 1 m% SAP B in een RV = 60 % (*PVA 2 60 B1*) geeft wel een significant verschil in herwonnen stijfheid dan de controlemengsels. Ook bij een RV > 90 % (*PVA 2 90 B1*) geven de mengsels meer herwonnen stijfheid dan de controlemengsels en dan mengsels bewaard bij een RV = 60 %.

PVA 1 ND en *PVA 0,5 ND* vertonen een hogere herwinning in stijfheid dan *PVA 2 ND*. Dat komt door de kleinere finale scheurwijdte bij *PVA 1 ND* en *PVA 0,5 ND*. De mogelijke opgelegde rek bij *PVA 2 ND* was veel groter en door het hoger volumepercentage aan vezels is de finale scheurwijdte groter. Dit komt doordat de brugvorming bij een hoger aantal vezels meer kracht kan opnemen voordat alle vezels breken. Dit lijkt in te druisen tegen het feit dat een verhoging van het volumepercentage vezels voor kleinere scheurwijdtes zorgen. Dit is steeds het geval. Hier gaat het over één van de eerder gevormde scheuren die zich opent tot een finale scheurwijdte. Het is deze scheurwijdte die van belang is in het helend proces aangezien hier de meeste schade toegebracht werd.

Proefstukken die op een leeftijd van 14 dagen (*PVA 2 ND 14*) voorzien werden van scheuren geven meer herwonnen stijfheid dan de proefstukken met scheuraanbreng op 28 dagen (*PVA 2 ND*). Dat komt omdat er meer ongehydrateerd cement aanwezig is bij proefstukken die 14 dagen oud zijn op het moment van scheuraanbreng. Een verlaging van de W/C-factor geeft hetzelfde resultaat (*PVA 2 ND W/C*) qua herwinning van stijfheid. Doordat er minder water is ingemengd, is er meer ongehydrateerd cement aanwezig. Inmengen van 1 m% SAP A en B geeft ook een analoog resultaat op het vlak van herwonnen stijfheid (*PVA 2 ND A1G* en *PVA 2 ND B1*). De herwonnen stijfheid komt door het gradueel afgeven van water door de SAP bij het droge gedeelte van de nat/droog cycli. Dit is interne curing. Een verhoging van het massaprocent SAP B geeft een verlaging van het percentage herwonnen stijfheid (*PVA 2 ND B2* en *PVA 2 ND B4*). De scheurwijdtes zijn namelijk groter.

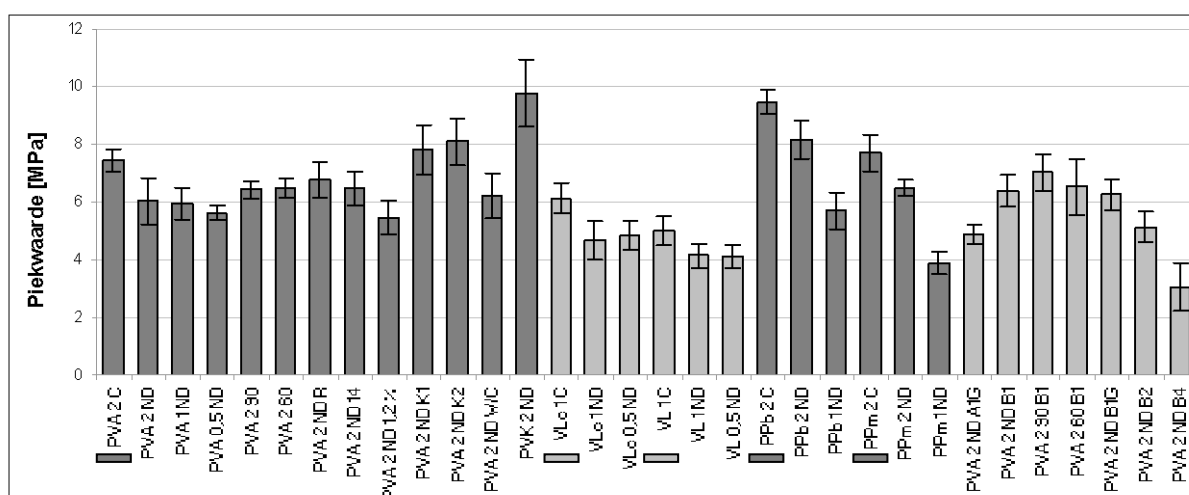
Mengsels met vlasvezels (*VLc 1 ND* en *VL 1 ND*) geven minder herstel van de stijfheid dan mengsels met PVA-vezels (*PVA 1 ND*). De vlasvezelmengsels verschillen onderling niet significant op het vlak van herwonnen stijfheid.

Vervanging van twee derden vliegias door kalksteenmeel geeft meer herstel in stijfheid (*PVA 2 ND K2* ten opzichte van *PVA 2 ND K1* en *PVA 2 ND*). *PVA 2 ND K1* is niet significant verschillend van *PVA 2 ND* qua herwinning in stijfheid.

Mengsels met PP-vezels helen nauwelijks tot niet (*PPb-* en *PPm*-reeks). Dat komt door de heel grote opgelegde scheurwijdtes bij deze proefstukken.

4.3.3.3. Piekwaarde

De gemiddelde piekwaarde met standaardafwijking wordt weergegeven in Figuur 137. De grootste piekwaarde wordt gevonden bij een mengsel met PVA-vezels van Kuraray (*PVK 2 ND*). Algemeen geven controlemengsels (*C*) met scheuraanbreng op 56 dagen een hogere piekwaarde dan de mengsels die van scheuren voorzien werden op een leeftijd van 28 dagen. Dat komt door de verdergaande hydratatie en puzzolane activiteit.



Figuur 137: Piekwaarde [MPa] bij scheuraanbreng van de verschillende mengsels

Er is geen significant verschil in piekwaarde tussen mengsels met een verschillend volumepercentage (*PVA 2 ND*, *PVA 1 ND* en *PVA 0,5 ND*), met de gecoate vezel (*PVA 2 ND 1,2 %*) en met een lagere W/C-factor (*PVA 2 ND W/C*).

Mengsels met vlasvezels (*VLc* en *VL*) geven een significant andere piekwaarde dan mengsels met PVA-vezels. De piekwaarde van *VLc 0,5 ND* verschilt van deze van *VL 0,5 ND* met een significantieniveau van 9,1 %. De piekwaarde van *VLc 1 ND* van *VL 1 ND* met 24,6 %. *VLc 1 C* verschilt echter wel significant van *VL 1 C* qua pieksterkte. Mengsels met de gecottoniseerde vlasvezel vertonen op basis van voorgaande significantieniveaus een hogere piekwaarde dan deze met de technische vlasvezel.

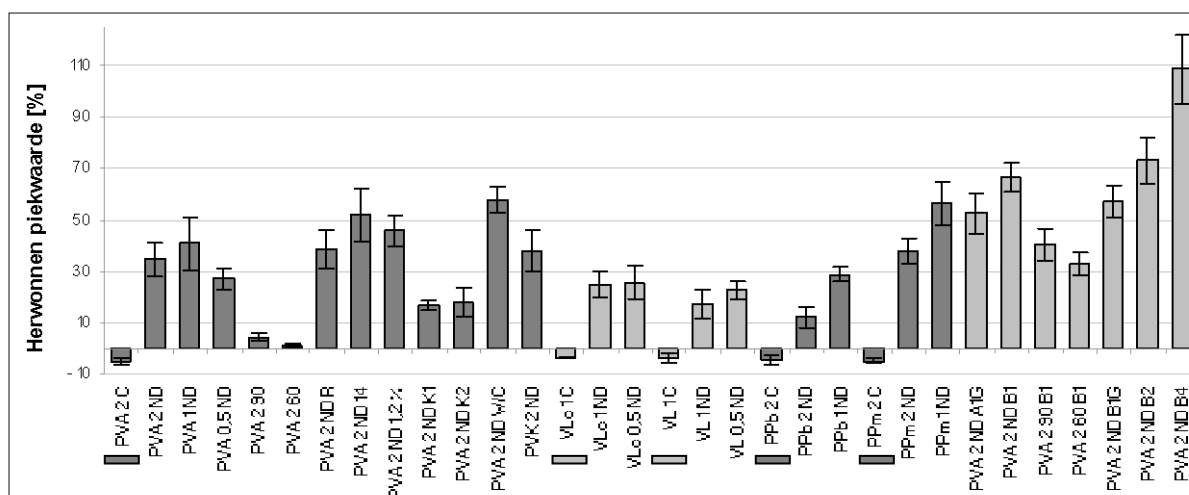
Het inmengen van kalksteenmeel geeft een hogere piekwaarde (*K1* en *K2*) dan *PVA 2 ND*. Kalksteenmeel levert namelijk Ca^{2+} voor de portlandreactie, terwijl vliegaspas later reageert.

Mengsels met 2 vol.% PP-vezels monofilament (*PPm 2 ND*) hebben eenzelfde piekwaarde als de PVA-mengsels (*PVA 2 ND*). Mengsels met 2 vol.% PP-vezels bicore (*PPb 2 ND*) geven echter een hogere piekwaarde. Het verhogen van het volumepercentage vezels zorgt bij de PP-vezels voor een verhoging van de piekwaarde.

Het inmengen van SAP B (*PVA 2 ND B1*) geeft geen significant verschil in piekwaarde met het mengsel zonder SAP (*PVA 2 ND*). Het verhogen van het massaprocent van SAP zorgt evenwel voor een significante daling van de piekwaarde (*B1*, *B2* en *B4*). *PVA 2 ND A1G* vertoonde een lage piekwaarde, doordat de verwerkbaarheid navenant was.

4.3.3.4. Herwonnen piekwaarde

Zelfheling kan ook uitgedrukt worden als de mate van herwonnen piekwaarde. Dit wordt schematisch voorgesteld in Figuur 138 met de gemiddelde waarden per reeks met de standaardafwijking. Als controle op de bepaling van de herwonnen stijfheid vertonen de controlemengsels (C) een licht negatieve herwonnen piekspanning.



Figuur 138: Herwonnen piekwaarde [%] van de verschillende mengsels

Bij een curing met een relatieve vochtigheid van meer dan 90 % is er sprake van een licht herwonnen piekwaarde bij de proefstukken zonder SAP (*PVA 2 90*) en dus een lichte vorm van zelfheling. Bij een curing met een $RV = 60\%$ was er geen sprake van een herwonnen piekwaarde (*PVA 2 60*). Dit is in overeenstemming met paragrafen 2.3.4.1 en 2.3.4.3.

Scheuraanbreng op een leeftijd van 14 dagen (*PVA 2 ND 14*) in plaats van 28 dagen geeft een hoger herstel in piekwaarde. Dit doordat er meer ongehydrateerd cement aanwezig is. Hetzelfde principe wordt bij een lagere W/C-factor teruggevonden (*PVA 2 W/C*). Vervanging van vliegas door kalksteenmeel (*K1* en *K2*) vertoont een mindere winst in piekwaarde dan bij standaardmengsels. Dat komt doordat er minder sterkte kan gehaald worden uit de puzzolane reactie aangezien er minder vliegas aanwezig is.

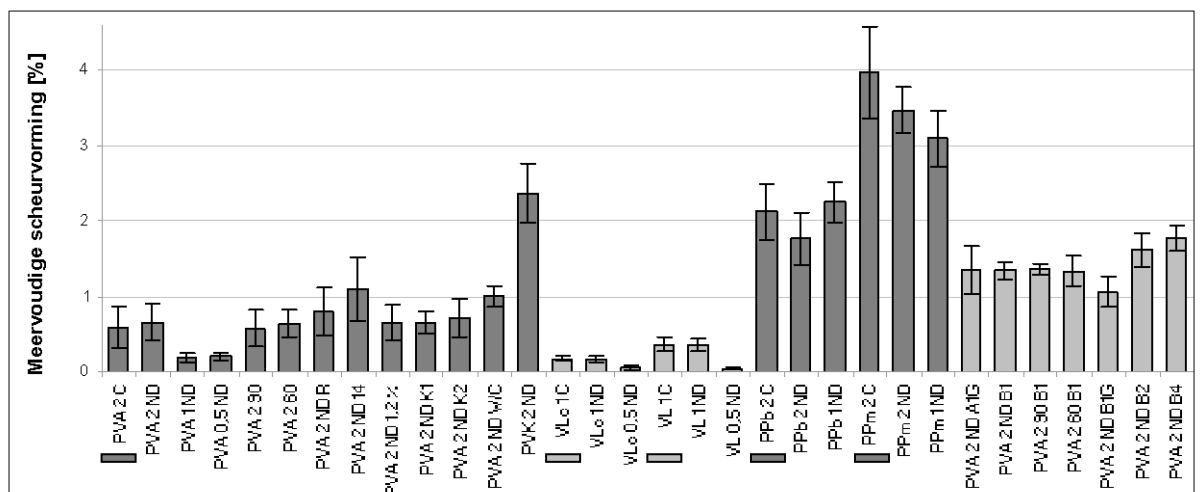
PPb-mengsels geven een significant lager herstel in piekwaarde dan de PPM-mengsels. Dat komt door de golvende vorm van de PP-vezel monofilament ten opzichte van de rechte PP-vezel bicore. Het inwendige van de scheur zal door het samentrekken van de vezel meer heling vertonen en zo een hogere herwonnen piekwaarde. *PPm 2 ND* geeft analoge winsten in piekwaarde als *PVA 2 ND*. Een verhoging van het volumepercentage PP-vezels resulteert in een daling van de herwonnen piekwaarde. Mengsels *PPm 2 ND* en *PPb 2 ND* zijn tot een hogere rek belast dan *PPm 1 ND* en *PPb 1 ND*. Vandaar dat de winst lager uitvalt.

Inmengen van SAP verhoogt het percentage van de herwonnen piekwaarde (*PVA 2 ND A1G* en *PVA 2 ND B1*). Een verhoging van het massaprocent aan SAP B geeft een verhoging van het percentage herwonnen piekwaarde (*B1*, *B2* en *B4*). Dit komt door de inwendige curing van de scheur. Daar zal er meer hydratatie optreden.

Het bewaren van mengsels met SAP in een RH > 90 % (*PVA 2 90 B1*) of in een RH = 60 % (*PVA 2 60 B1*) levert geen significant verschil in herwonnen piekwaarde op in vergelijking met standaardmengsels onderworpen aan nat/droog cycli (*PVA 2 ND*). SAP zijn dus in staat vocht op te nemen (ook in het inwendige van de scheur) en deze af te geven aan de matrix. Dit vocht zorgt voor een verdergaande hydratatie en dus voor zelfheling.

4.3.3.5. Meervoudige scheurvorming, maximale rek en totale arbeid W

Het ductiel gedrag van de proefstukken uitte zich in meervoudige scheurvorming (Figuur 139). De mengsels met 2 vol.% PVA-vezels van Redco (*PVA 2 ND*, 90 en 60) verschillen niet op het vlak van meervoudige scheurvorming met de eigen gecoate vezel (*PVA 2 ND 1,2 %*) en met de kalksteenmeel-mengsels (*K1* en *K2*). De eigen gecoate vezel geeft dus geen verbetering van de meervoudige scheurvorming. Dat was nochtans de bedoeling, maar een eigen druppelsgewijze coating is niet zo goed als een fabriek coating. PVA-vezels van Kuraray (*PVK 2 ND*) geven wel significant meer meervoudige scheurvorming. Een verlaging van het volumepercentage (*PVA 2 ND*, *PVA 1 ND* en *PVA 0,5 ND*) resulteert logischerwijs in een lager opgetreden meervoudige scheurvorming. Ook bij de vlasvezels is dit verschil significant (*VLc 0,5 ND* ten opzichte van *VLc 1 ND* en *VL 0,5 ND* ten opzichte van *VL 1 ND*).



Figuur 139: Meervoudige scheurvorming [%] van de verschillende mengsels

Mengsels met 1 m% technische vlasvezel (*VL 1 ND* en *VL 1 C*) geven een hoger gehalte meervoudige scheurvorming dan de mengsels met de gecottoniseerde vlasvezel (*VLc 1 ND* en *VLc 1 C*). Dat komt doordat de technische vezel een grotere vezel is die minder hecht met de matrix en zo voor glijden in de matrix zorgt. Het gehalte aan meervoudige scheurvorming van *VL 1 ND* is hoger dan het gehalte van een mengsel met PVA-vezels (*PVA 1 ND*).

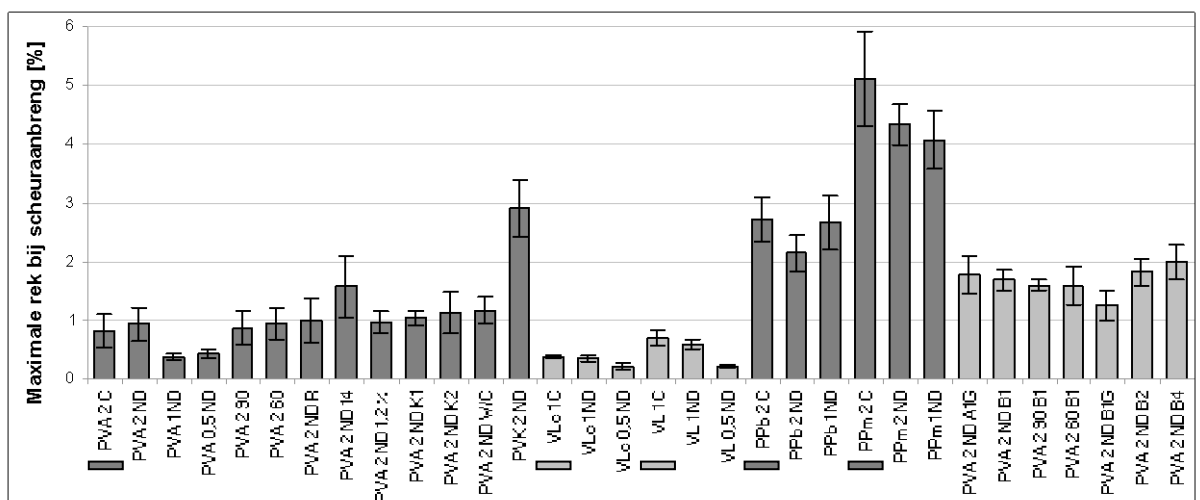
Mengsels met PP-vezels monofilament (*PPm 2 ND*) vertonen de grootste meervoudige scheurvorming. Dat is logisch aangezien de PP-vezels geen hechtsterkte hebben. PVA-vezels hebben dit niet en hebben steeds een hydrofiele neiging (Kuraray-vezels minder dan Redco-vezels). Doordat de hechtsterkte nul is, kan de vezel glijden in de matrix en zorgen voor een hoge ductiliteit dat zich weerspiegelt in meervoudige scheurvorming.

De bicore PP-vezel (*PPb 2 ND*) geeft lagere meervoudige scheurvorming dan het monofilament (*PPm 2 ND*). Dat komt doordat de bicore-vezel recht is en het monofilament een krullend verloop kent. Ook is het monofilament langer (8 mm) wat voor meer glijding in de matrix zorgt dan het geval is bij de kortere bicore-vezel (6 mm).

De meervoudige scheurvorming kan vergroot worden door het zwakker maken van de matrix. Een lagere W/C-factor (*PVA 2 ND W/C*) geeft een significant verschil op het vlak van meervoudige scheurvorming ten opzichte van *PVA 2 ND*. De matrix is door de lagere W/C-factor zwakker en zal zo makkelijker scheuren. Indien de matrix te sterk is, zullen de vezels niet genoeg sterkte vertonen om de krachten op te nemen. Dat is de tweede voorwaarde (formule (12)) voor meervoudige scheurvorming. Tijdens het onthechten kan de vezel breken als de last P de vezeltreksterkte overschrijdt, wat vaak het geval is in PCA-ECC door de chemische bindsterkte van de vezel met de cementmatrix.

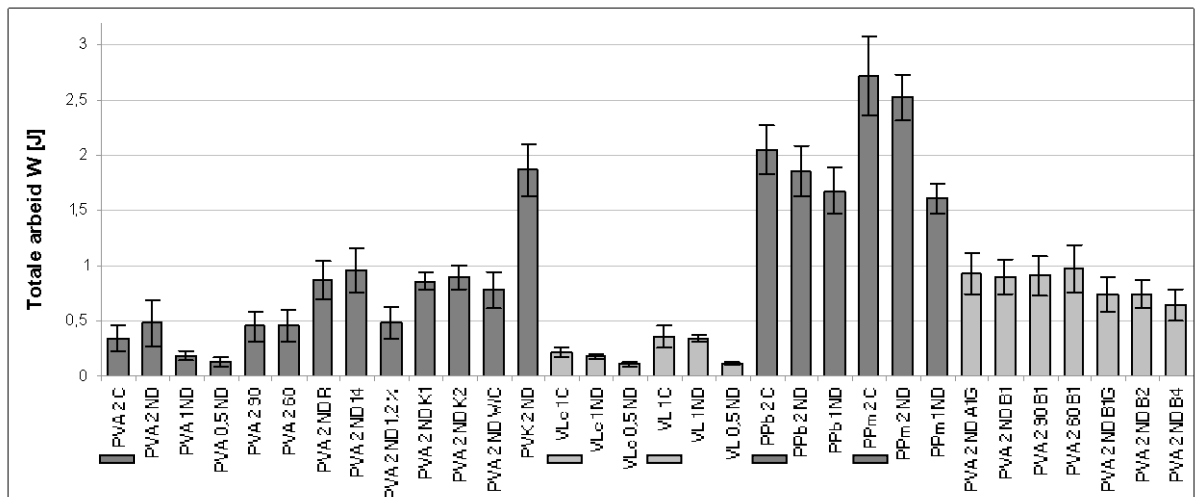
Een andere methode om de meervoudige scheurvorming te verbeteren, is het inmengen van microdefecten. Deze kunnen gevormd worden door het inmengen van SAP. Mengsels met SAP (*PVA 2 ND A1G, B1, B1G, B2* en *B4*) hebben een significant hogere meervoudige scheurvorming dan de mengsels zonder SAP (*PVA 2 ND*). Microdefecten zorgen er voor dat er makkelijker scheurinitiaties zijn als de vezel de kracht opneemt na een scheur. Daardoor zullen er zich meer scheuren vormen. De defecten worden gevormd als een SAP-partikel haar vloeistof afgeeft aan de matrix (Figuur 45). Mengsels met SAP A en SAP B zijn niet significant verschillend van elkaar. Het droog verwerken van 1 m% SAP B (*PVA 2 ND B1*) geeft meer meervoudige scheurvorming dan het als gel inmengen (*PVA 2 ND B1G*). Dat komt omdat bij de gelvorm agglomeraten van SAP-deeltjes gevormd worden die niet goed doorgemengd kunnen worden. Een verhoging van het massaprocent aan SAP geeft een hogere meervoudige scheurvorming door meer scheurinitiaties (*B4* ten opzichte van *B1*).

Figuur 140 toont de maximale rek bij scheuraanbreng. Deze grafiek toont hetzelfde verloop als de grafiek in Figuur 139. Enkel *PVA 2 ND R* is iets lager door de lager opgelegde rek.



Figuur 140: Maximale opgelegde rek bij scheuraanbreng [%]

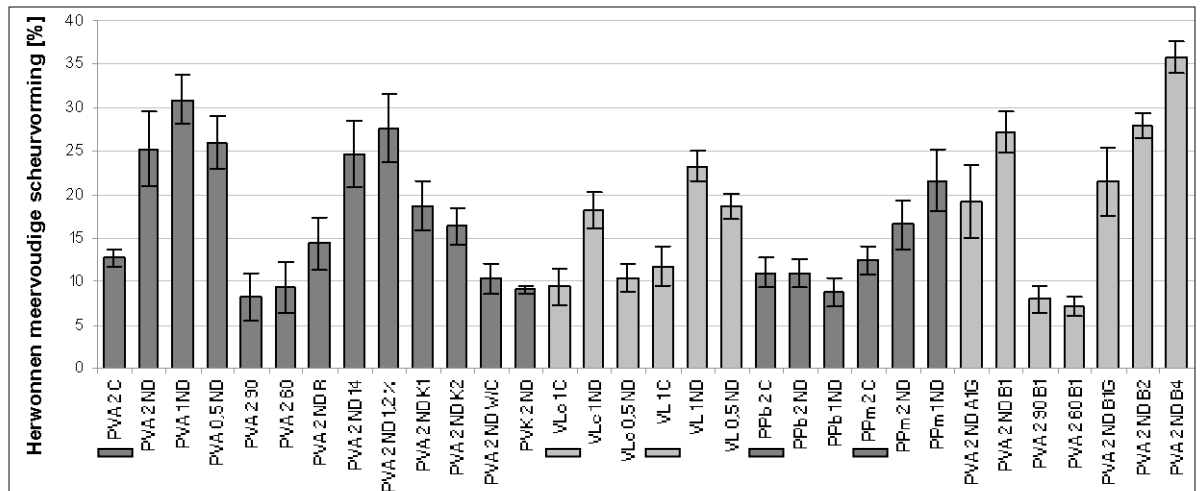
Ook de grafiek in Figuur 141 toont een gelijkaardig verloop als beide voorgaande grafieken. De totale arbeid W is de oppervlakte onder de spanning-verplaatsing diagram. Er zijn enkele waarden die relatief lager uitvallen dan deze weergegeven in Figuur 139 en Figuur 140. De reeks *PVA 2 ND R* geeft een significant hogere waarde door de initieel lagere opgelegde rek. Daardoor loopt de herbelastingscurve hoger, wat resulteert in een hogere totale arbeid aangezien bij herbelasting de grafiek hoger loopt. Mengsels met kalksteenmeel (*K1* en *K2*) verschillen ook significant. Dat komt door de sterkere primaire hydratatie waardoor de eerste-scheur-sterkte hoger ligt bij kalksteenmeel-mengsels (zie 4.3.3.7). Dit zorgt voor meer oppervlak onder de curve en dus een hogere totale arbeid W . Het mengsel *PPm 1 ND* atteneert bij de totale arbeid W . Dat komt omdat de grafiek bij herbelasting niet volledig uitgevoerd kon worden. De proefmachine heeft een bereik tot 20 mm doorbuiging en deze werd bereikt bij de mengsels met PP-vezels. Doordat er een tweede ontlastingscurve zich voordoet, is de arbeid onder de gehele curve lager dan moest deze zich wel voordoen. Daardoor valt de totale arbeid W lager uit. De mengsels *PVA 2 ND B2* en *PVA 2 ND B4* geven een lagere arbeid. Dat komt door de lagere eerste-scheur-sterkte en zo dus minder oppervlak onder de curve.



Figuur 141: Totale arbeid W [J] van de verschillende mengsels

4.3.3.6. Herwonnen meervoudige scheurvorming

Nog een maat voor de opgetreden zelfheling is het herstel in meervoudige scheurvorming. Dit wordt weergegeven in Figuur 142. De controlemengsels (C) vertonen een herwonnen meervoudige scheurvorming van ongeveer 12 %. Dat is de afvlakking van het herbelastingsdiagram en hierop is er dus geen winst van meervoudige scheurvorming. Zo kan er besloten worden dat proefstukken die onderworpen waren aan een $RV > 90 \%$ (*PVA 2 90* en *PVA 2 90 B1*) en een $RV = 60 \%$ (*PVA 2 60* en *PVA 2 60 B1*) geen herwonnen meervoudige scheurvorming vertonen. De SAP kunnen niet genoeg vocht uit de lucht halen om het meervoudig scheurvormend gedrag te herstellen.



Figuur 142: Herwonnen meervoudige scheurvorming [%]

VLc 0,5 ND, *PPb 1 ND*, *PPb 2 ND*, *PVA 2 ND W/C* en *PVK 2 ND* vertonen geen herstel. *VLc 0,5 ND* had initieel geen noemenswaardige meervoudige scheurvorming. *PPb* vertoonde steeds grote scheurwijdtes en deze konden moeilijk overbrugd worden. De scheur opende zich opnieuw bij herbelasting waardoor er geen sprake was van meervoudige scheurvorming. De PP-vezel monofilament daarentegen gaf meer herstel in meervoudige scheurvorming dan de bicore-vezel. Dat komt door het krullend verloop van de vezel. Deze strekt zich en zorgt voor meer ductiliteit. *PVA 2 ND W/C* en *PVK 2 ND* hadden ook grote scheuren die zich opnieuw openden.

PVA 2 ND, *PVA 1 ND* en *PVA 0,5 ND* vertoonden hetzelfde gedrag op herwinning van meervoudige scheurvorming. Soms werd zelfs een nieuwe scheur gevormd. *PVA 2 ND 14* en *PVA 2 ND 1,2 %* vertoonden geen significant verschil ten opzichte van *PVA 2 ND*.

De proefstukken met 1 vol.% vlasvezels (*VLc 1 ND* en *VL 1 ND*) vertoonden minder herstel in meervoudige scheurvorming dan met 1 vol.% PVA-vezels (*PVA 1 ND*). Dat komt doordat de vlasvezelproefstukken initieel minder meervoudige scheurvorming vertoonden. Er is een significant verschil in winst aan meervoudige scheurvorming tussen de proefstukken met technische vezel en met gecottoniseerde vezel. De proefstukken met technische vlasvezel vertoonden meer herstel (*VL 1 ND* ten opzichte van *VLc 1 ND* en *VL 0,5 ND* ten opzichte van *VLc 0,5 ND*). De technische vezel vertoonde meer meervoudige scheurvorming (zie 4.3.3.5).

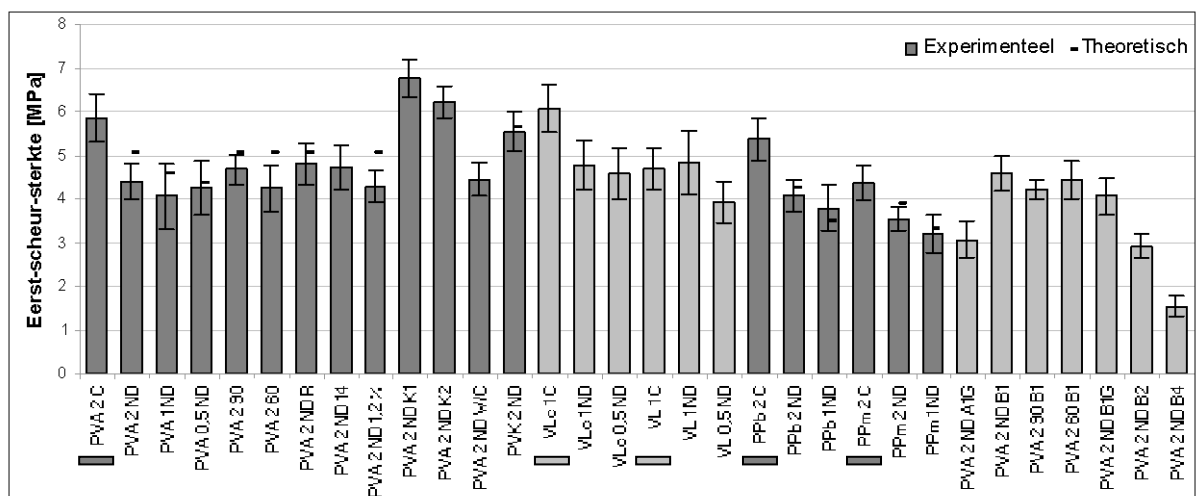
Proefstukken met SAP (*PVA 2 ND A1G*, *B1*, *B1G* en *B2*) vertonen geen significant verschil in herwonnen meervoudige scheurvorming ten opzichte van de proefstukken zonder SAP (*PVA 2 ND*). Er is echter wel een significant verschil onderling. *B1* geeft meer herstel in meervoudige scheurvorming dan *A1G* en is te wijten aan de slechte verwerkbaarheid van SAP A ten opzichte van SAP B. *B1* en *B2* zijn niet significant verschillend maar wel *B1G* en *B2*. Het als gel inmengen zorgt voor een samenscholing van SAP die dus minder verspreid zijn in de matrix. Daardoor wordt hun vocht lokaal afgegeven en de middelste korrels zullen geen vocht kunnen opnemen doordat de omringende SAP de toegang versperren. *B4* heeft een significant groter herstel in meervoudige scheurvorming dan *B1* en *B2*. Er is meer SAP dat voor inwendige curing kan zorgen.

Toevoeging van kalksteenmeel in plaats van vliegashout zorgt voor een minder herstel van de meervoudige scheurvorming ($K1$ en $K2$). Er is minder vliegashout aanwezig om de puzzolane activiteit aan te roepen voor zelfheling.

In het onderzoek van Kim en Schlangen (2011)^[97] werd meer herstel van de meervoudige scheurvorming bekomen bij proefstukken met SAP. Het verschil is dat de scheurwijdte in deze thesis groter was, door het maximaal gebruik van meervoudige scheurvorming.

4.3.3.7. Eerste-scheur-sterkte en scheurtip breuktaaiheid J_{tip}

In Figuur 143 wordt de gemiddelde eerste-scheur-sterkte weergegeven samen met de theoretische eerste-scheur-sterkte. De gemiddelde waarden komen goed overeen en de theoretische waarde ligt steeds in de foutbalken met de standaardafwijking, of minder dan 21 % er boven.^[34] Dat *PVA 2 ND* veel lager uitvalt ten opzichte van de theoretische waarde dan *PVA 1 ND* en *PVA 0,5 ND* komt door het feit dat bij meervoudige scheurvorming de zwakste schakel eerst scheurt. Er zullen steeds zwakke schakels aanwezig zijn en vandaar is de experimentele waarde lager voor *PVA 2 ND* waar de zwakke plekken meer geaccentueerd worden door het hoge volumepercentage aan vezels. Controlemengsels (*C*) vertonen steeds een hogere eerste-scheur-sterkte dan gelijkwaardige mengsels. Dat komt doordat er verdergaande hydratatie is opgetreden, en dat onder een nat/droog cyclus.



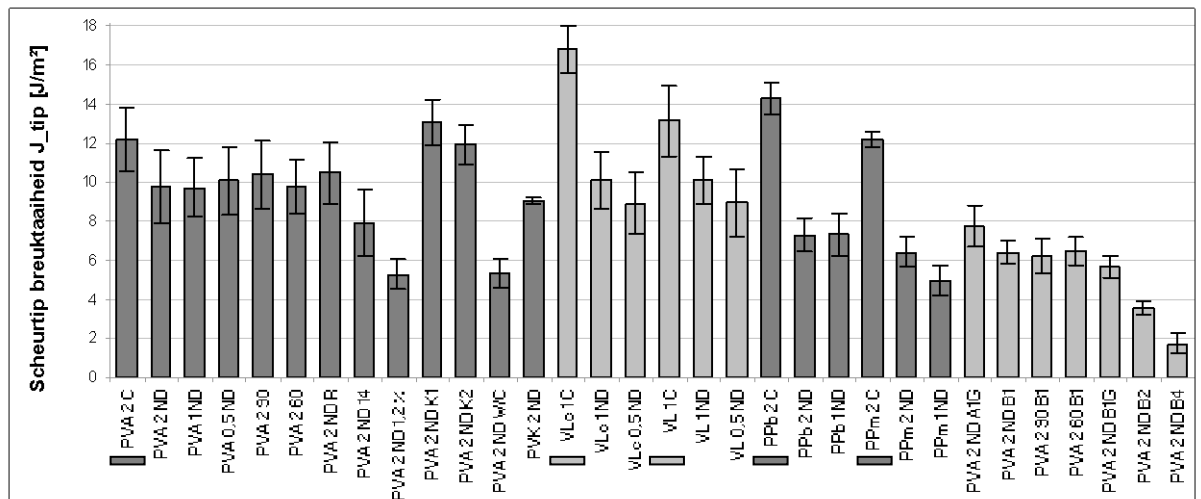
Figuur 143: Experimentele en theoretische eerste-scheur-sterkte [MPa]

Bij *PVA 2 ND 1,2 %* wordt er opgemerkt dat de gemiddelde eerste-scheur-sterkte het meest verschilt ten opzichte van de theoretische waarde. De formule voor de eerste-scheur-sterkte (formule (3)), stelt dat hoe lager de hechtsterkte, hoe lager de eerste-scheur-sterkte. Het grote verschil kan hierop wijzen, maar is statistisch gezien niet significant. Een verlaging van het volumepercentage aan vezels geeft lagere eerste-scheur-sterktes. G_d daalt namelijk met verhoging van het aantal vezels per volume. Dit komt door een lossere poriënstructuur en dito lager te overwinnen sterkte. Tussen de mengsels met 2; 1 en 0,5 vol.% PVA-vezel is er geen significant verschil in eerste-scheur-sterkte (*PVA 2 ND*, *PVA 1 ND* en *PVA 0,5 ND*).

Bij de PP-vezels wordt de trend ook gevolgd en is de eerste-scheur-sterkte voor het mengsel *PPm 2 ND* significant kleiner dan voor het mengsel *PVA 2 ND*. *PPb 2 C* en *PPm 2 C* zijn significant verschillend van elkaar qua eerste-scheur-sterkte. *PPb*-vezels geven een hogere eerste-scheur-sterkte dan *PPm*-vezels, wat ook voortvloeit uit de theoretische waarde. Het mengsel *PVK 2 ND* heeft een hogere eerste-scheur-sterkte dan het mengsel *PVA 2 ND*. Tussen de mengsels *VL* en *VLc* bestaat er geen significant verschil behalve bij de controlemengsels. *VLc 1 C* heeft een hogere eerste-scheur-sterkte ten opzichte van *VL 1 C*. Een vervanging van een deel vliegias door kalksteenmeel (*K1* en *K2*) geeft een hogere eerste-scheur-sterkte. Meer Ca^{2+} was voorradig voor de primaire hydratatie.

De invloed van het inmengen van SAP op de eerste-scheur-sterkte, is analoog aan de bepaling in paragraaf 4.2.5 voor de treksterkte. Een verhoging van het massaprocent aan SAP gaf een daling in de treksterkte. Dat is ook voor de eerste-scheur-sterkte het geval. Het mengsel met 1 m% SAP A (*PVA 2 ND A1G*) geeft een lagere eerste-scheur-sterkte dan het mengsel met 1 m% SAP B en zonder SAP (*PVA 2 ND B1* en *PVA 2 ND*). *PVA 2 ND A1G* is niet verschillend van *PVA 2 ND B2*, wat ook het geval was in paragraaf 4.2.5. Het mengsel *B4* heeft een significant lagere eerste-scheur-sterkte dan het mengsel *B2*, wat op haar beurt een lagere eerste-scheur-sterkte vertoont dan het mengsel *B1*. Een verhoging van het massaprocent SAP geeft dus een lagere eerste-scheur-sterkte tot gevolg. Ook het onderzoek van Brüdern & Mechtherine (2010)^[85] gaf een verlaging na toevoegen van SAP.

De eerste-scheur-sterkte hangt samen met de scheurtip breuktaaiheid J_{tip} (Figuur 144).



Figuur 144: Scheurtip breuktaaiheid J_{tip} [J/m²] van de verschillende reeksen

Bij de controlemengsels *VLc 1 C*, *VL 1 C*, *PPb 1 C* en *PPm 1 C* is J_{tip} hoger dan bij de equivalente reeksen. Dat komt omdat verdergaande hydratatie van de later gescheurde controleproefstukken voor meer weerstand zorgt bij de eerste-scheur-vorming. Tussen de vlasvezels met scheuraanbreng na 28 dagen is er geen verschil. Bij de controlestukken is dit wel het geval. Controlemengsels met gecottoniseerde vlasvezels (*VLc 1 C*) hebben een hogere J_{tip} dan de controlemengsels met technische vlasvezels (*VL 1 C*).

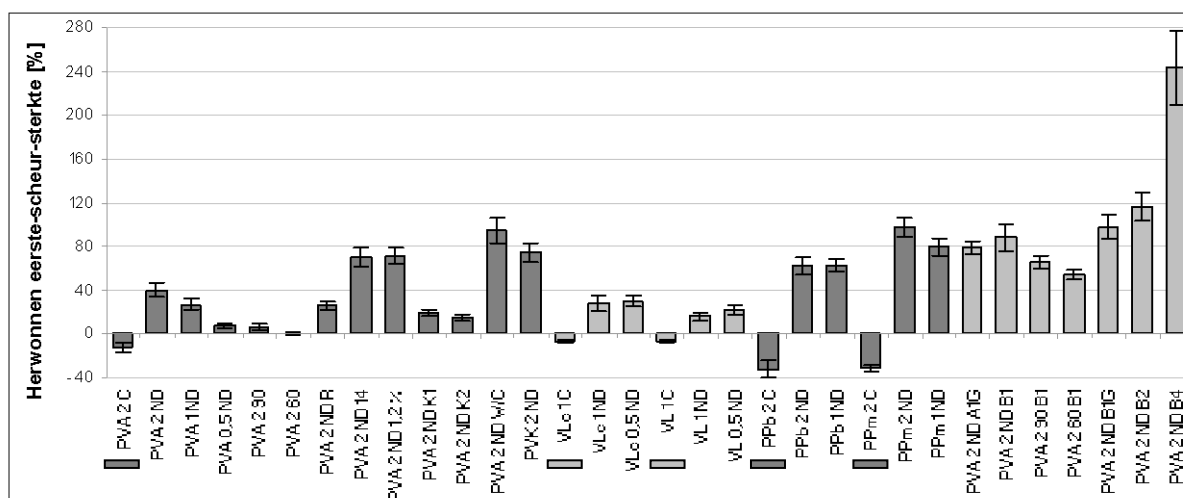
Het zelf coaten van de PVA-vezel (*PVA 2 ND 1,2 %*) geeft een lagere J_{tip} doordat de hydrofiële eigenschappen van de PVA-vezel van Redco deels teniet zijn gedaan. Daarom glijdt de vezel makkelijker in de matrix en dat zorgt voor minder 'moeite' tot scheurvorming. Ook een lagere W/C-factor heeft aanleiding tot minder 'moeite' tot scheurvorming en een lagere J_{tip} (*PVA 2 ND W/C*). Er was namelijk minder hydratatie opgetreden dan bij *PVA 2 ND*.

Mengsels met PP-vezels (*PPb 2 ND* en *PPm 2 ND*) hebben een lagere J_{tip} dan de mengsels met PVA-vezels (*PVA 2 ND* en *PVK 2 ND*). Dat weerspiegelt zich ook in een lagere weerstand tot scheurvorming bij een chemische bindsterkte gelijk aan nul.

Het inmengen van SAP B (*PVA 2 ND B1*) geeft een lagere J_{tip} dan de mengsels zonder SAP (*PVA 2 ND*). De SAP verlagen de scheurtip breuktaaiheid door vorming van microdefecten, wat de meervoudige scheurvorming ten goede komt. Het verhogen van het massaprocent aan SAP B (*B1*, *B2* en *B4*) levert een significante verlaging van de scheurtip breuktaaiheid.

4.3.3.8. Herwonnen eerste-scheur-sterkte

Figuur 145 toont de herwonnen eerste-scheur-sterktes van de verschillende reeksen. De controlemengsels (C) blijven steeds onder de 0 %. *PPb 2 C* en *PPm 2 C* blijven ruimschoots onder de laatste waarde voor ontlasten. Een verlaging van het volumepercentage aan vezels geeft een verlaging in de herwonnen eerste-scheur-sterkte. Er is sprake van minder brugvorming en dus zo ook van een mindere winst indien zelfheling optrad. Dit is significant bij *PVA 2 ND* ten opzichte van *PVA 1 ND*, en *PVA 1 ND* ten opzichte van *PVA 0,5 ND*. Ook tussen *PPm 2 ND* en *PPm 1 ND* is het verschil significant.



Figuur 145: Herwonnen eerste-scheur-sterkte [%] van de verschillende reeksen

Een curing bij een relatieve vochtigheid van meer dan 90 % (*PVA 2 90*) geeft een lagere herwonnen eerste-scheur-sterkte dan standaardmengsels (*PVA 2 ND*) welke nat/droog cycli ondergaan hebben die voor een herstel in mechanische eigenschappen zorgde. *PVA 2 90* is echter ook significant verschillend op het vlak van herwonnen eerste-scheur-sterkte dan *PVA 2 60*, een curing bij een relatieve vochtigheid van 60 %.

Er is dus meer heling opgetreden bij een relatieve vochtigheid van meer dan 90 % ten opzichte van deze gelijk aan 60 %. Er kunnen eventueel waterspatten op het proefstuk terecht gekomen zijn die voor lichte verdergaande hydratatie zorgden. De proefstukken waren echter goed afgeschermd van de sproeikoppen en het vocht condenseerde dus op de scheurvlakken wat zorgde voor verdergaande hydratatie.

Een scheuraanbreng op 14 dagen (*PVA 2 ND 14*) en een lagere W/C-factor (*PVA 2 ND W/C*) geven een hoger percentage herwonnen eerste-scheur-sterkte door de aanwezigheid van meer ongehydrateerd cement.

Ten opzichte van *VLc 1 ND* en *VL 1 ND* bestaat er een significant verschil in herwonnen eerste-scheur-sterkte. Mengsels met gecottoniseerde vlasvezels geven een hogere winst in eerste-scheur-sterkte dan de mengsels met technische vlasvezels.

Mengsels met PP-vezels geven een hoger percentage herwonnen eerste-scheur-sterkte. Dat komt doordat de hechtsterkte nul is voor de PP-vezel. *PPm 2 ND* is verschillend van *PPb 2 ND* door een krullende en langere vezel bij *PPm 2 ND*. Opvallend is dat de mengsels met de eigen gecoatete PVA-vezel (*PVA 2 ND 1,2 %*) een hogere winst in eerste-scheur-sterkte vertonen dan de standaardmengsels (*PVA 2 ND*). Dit kan duiden op een grotere glijding in de matrix door het meer hydrofoob maken van de vezel. De resultaten verschillen niet significant van het mengsel *PVK 2 ND*. Dit is de fabrieksgecoatete PVA-vezel van Kuraray.

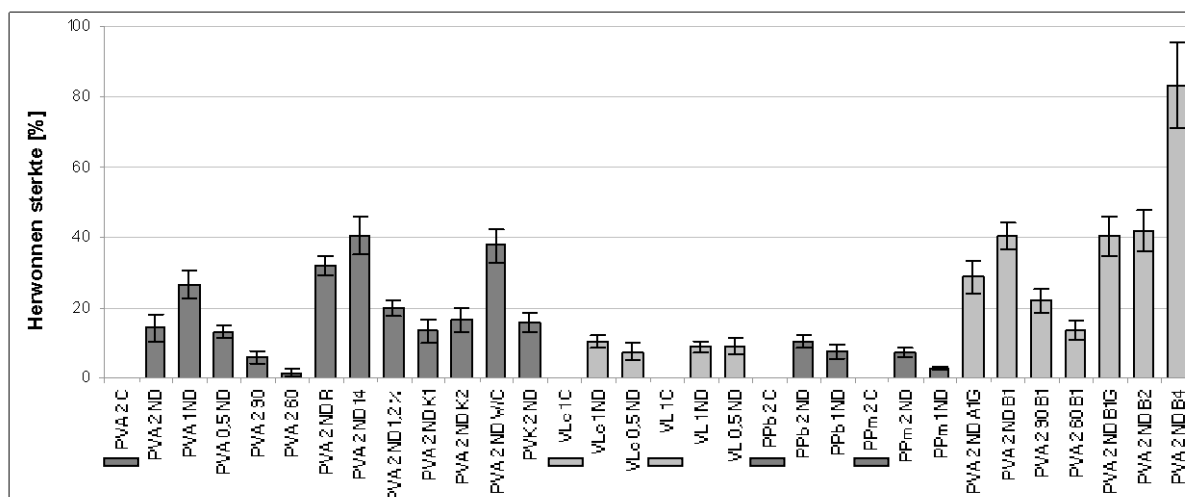
Inmengen van een deel kalksteenmeel (*K1* en *K2*) levert minder winst op dan voor het geval van de standaardmengsels (*PVA 2 ND*). Er is minder vliegashouding aanwezig om zelfheling via de puzzolane activiteit op te roepen.

Het inmengen van SAP levert steeds een significant hoger percentage aan herwonnen eerste-scheur-sterkte op bij nat/droog cycli. SAP A (*PVA 2 ND A1G*) en SAP B (*PVA 2 ND B1*) verschillen niet significant van elkaar. Een verhoging van het massaprocent SAP B (*B1*, *B2* en *B4*) levert een hogere significante winst op. Er wordt meer water vastgehouden met het verhogen van het massaprocent aan SAP, wat gradueel in de droge fasen van een nat/droog cyclus afgegeven wordt. Dat zorgt voor een verdere gecontroleerde hydratatie wat voor een hoger percentage herwonnen eerste-scheur-sterkte zorgt.

Curing bij een relatieve vochtigheid van meer dan 90 % met SAP (*PVA 2 90 B1*) levert een significant hogere winst op van het percentage herwonnen eerste-scheur-sterkte dan standaardmengsels zonder SAP in nat/droog cycli (*PVA 2 ND*). Er wordt continu vocht opgenomen en afgegeven aan de matrix door de SAP wat zorgt voor een meer gecontroleerde hydratatie. Curing in een relatieve vochtigheid van 60 % met SAP (*PVA 2 60 B1*) levert geen verschil op tegenover de standaardmengsels. Opnieuw is er een meer gecontroleerde verdergaande hydratatie die zorgt voor heling.

4.3.3.9. Herwonnen sterkte

De herwonnen sterkte wordt weergegeven in Figuur 146. 1 vol.% aan PVA-vezel (*PVA 1 ND*) geeft een hogere herwonnen sterkte dan 2 vol.% (*PVA 2 ND*). Dat komt door de kleinere scheurwijdte, waardoor helende materialen sneller en beter de scheur dichtten. Heling bij een relatieve vochtigheid van meer dan 90 % geeft een lager herstel (*PVA 2 90*), en heling bij een relatieve vochtigheid van 60 % een nog lager herstel (*PVA 2 60*). Hier is het onmogelijk dat zelfhelende materialen de scheur overbruggen aangezien water niet voorhanden is.



Figuur 146: Herwonnen sterkte [%] van de verschillende reeksen

Minder opgelegde rek (*PVA 2 ND R*) resulteert in een hogere gewonnen sterkte. Dat komt omdat de scheur bij een lagere rek (relatief gezien voor de scheur) een kleinere scheurwijdte had en het inwendige van de scheur minder schade ondervond.

De invloed van verdergaande hydratatie bij scheuraanbreng na 14 dagen (*PVA 2 ND 14*) en een lagere W/C-factor (*PVA 2 ND W/C*) op de herwonnen sterkte wordt ook in paragraaf 4.3.3.8 weerspiegeld. Tussen de mengsels met vlasvezel (*VLc* en *VL*) is er geen significant verschil in herwonnen sterkte. Ook bij de eigen gecoate vezel (*PVA 2 ND 1,2 %*), de kalksteenmeel-mengsels (*K1* en *K2*) en de Kuraray-vezel (*PVK 2 ND*) kan geen besluit getrokken worden.

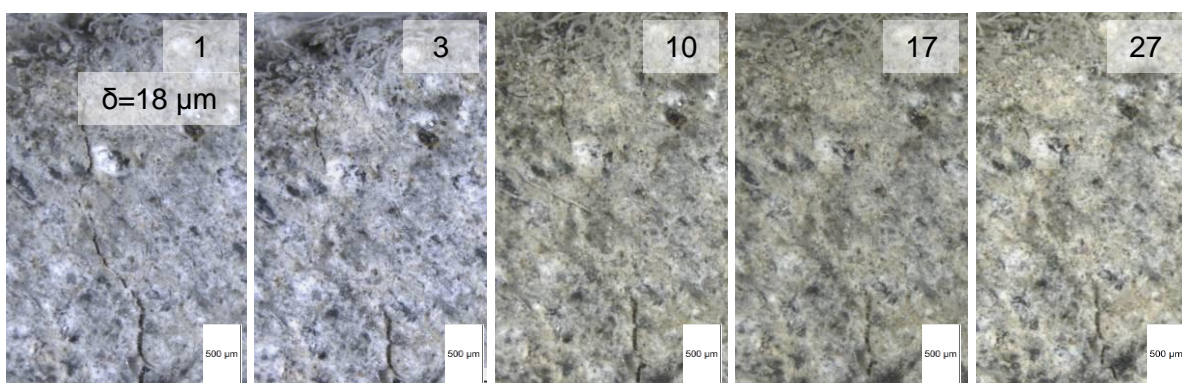
Er is meer heling in sterkte opgetreden bij mengsels met 2 vol.% PP-vezels (*PPb 2 ND* en *PPm 2 ND*) dan met 1 vol.% PP-vezels (*PPb 1 ND* en *PPm 1 ND*). Dat komt door de grotere scheurwijdtes bij mengsels met 1 vol.% PP-vezels. Hoewel de scheurwijdtes groot zijn, is er toch een winst in sterkte.

Toevoeging van SAP geeft analoge besluiten als bij de herwonnen eerste-scheur-sterkte. Nu geven mengsels met SAP B (*PVA 2 ND B1* en *B1G*) significante verschillen in herstel van sterkte met deze van SAP A (*A1G*). Dat komt door de slechtere matrix door de slechtere verwerkbaarheid van SAP A ten opzichte van SAP B. *B4* geeft de beste waarden qua herstel. De eerste-scheur-sterkte van voorbelasten worden quasi opnieuw bereikt.

4.3.4. Scheuronderzoek: zelfheling

In de figuren die volgen wordt steeds de dag vermeld waarop het microscopisch onderzoek is uitgevoerd (het aantal dagen na de scheuraanbreng).

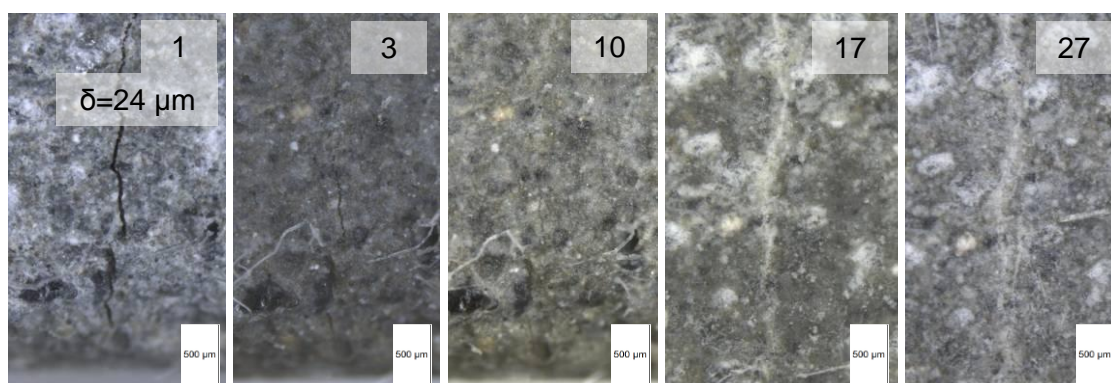
De proefstukken die onderworpen werden aan een $RV > 90\%$ toonden nauwelijks tot geen zelfheling (Figuur 147). Doordat de vochtigheid hoog is en er mogelijks waterdruppels op het proefstuk kunnen vallen, is er verdergaande hydratatie. Er was geen sprake van kristalvorming.



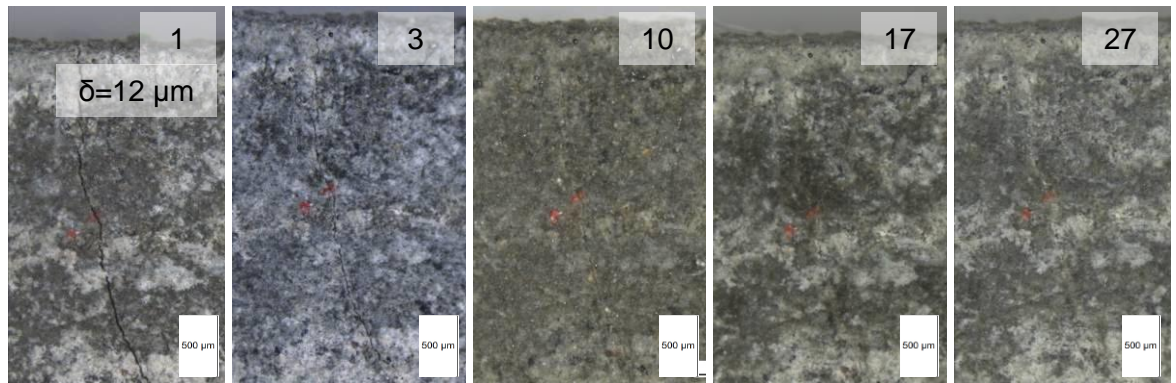
Figuur 147: Verdergaande hydratatie bij een $RV > 90\%$ (2 vol.% PVA)

Proefstukken die onderworpen waren aan een $RV = 60\%$ vertoonden noch kristalvorming, noch verdergaande hydratatie. Deze proefstukken worden beschouwd als ongeheelde proefstukken.

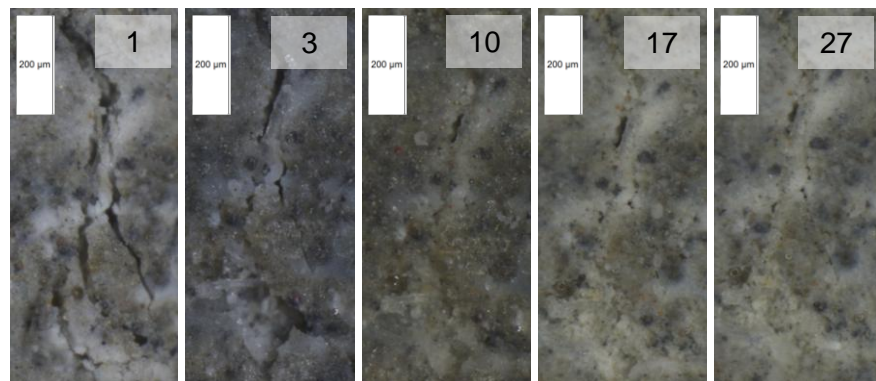
Bij kleine scheurwijdtes zoals $24 \mu\text{m}$ in Figuur 148 of $12 \mu\text{m}$ in Figuur 149, heelt de scheur volledig. Bij andere bestudeerde scheuren $< 50 \mu\text{m}$ was dit ook steeds het geval. Detailopnamen uit Figuur 150 en Figuur 151 tonen duidelijk dat de scheur dicht.



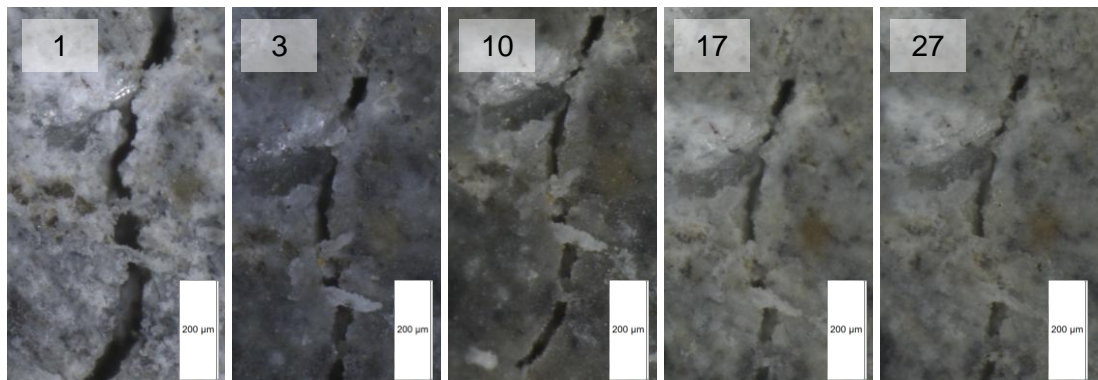
Figuur 148: Dichten van een scheur bij 0,5 vol.% PVA



Figuur 149: Dichten van een scheur bij 2 vol.% PVA

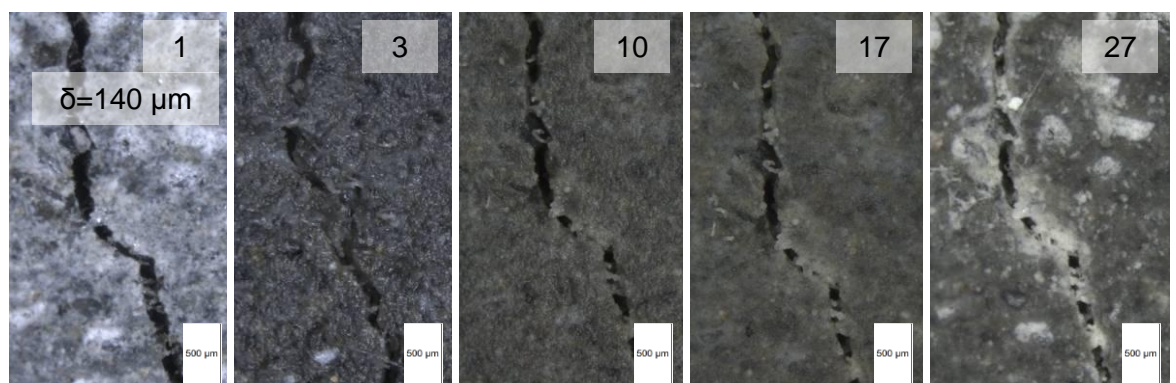


Figuur 150: Detail van dichten van een scheur bij 2 vol.% PVA ($\delta = 24 \mu\text{m}$)



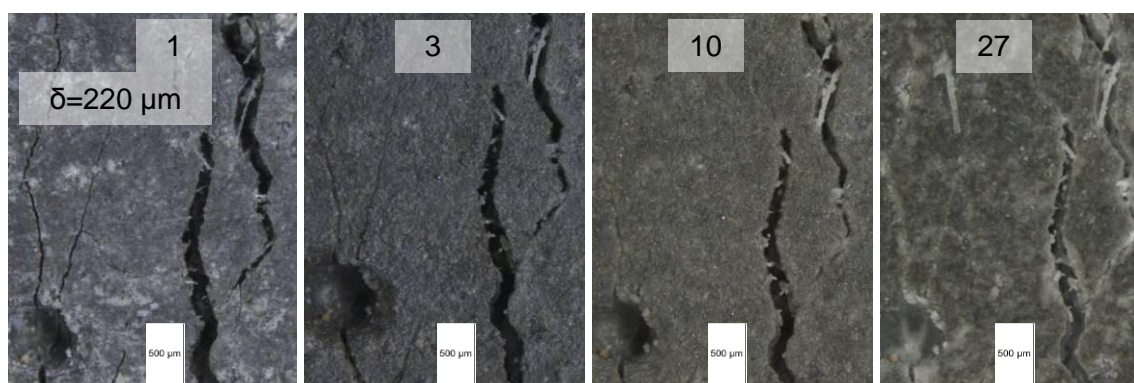
Figuur 151: Detail van dichten van een scheur bij 2 vol.% PVA ($\delta = 26 \mu\text{m}$)

Grotere scheuren, zoals 140 μm in Figuur 152 helen matig. Dit ging door tot 150 μm .

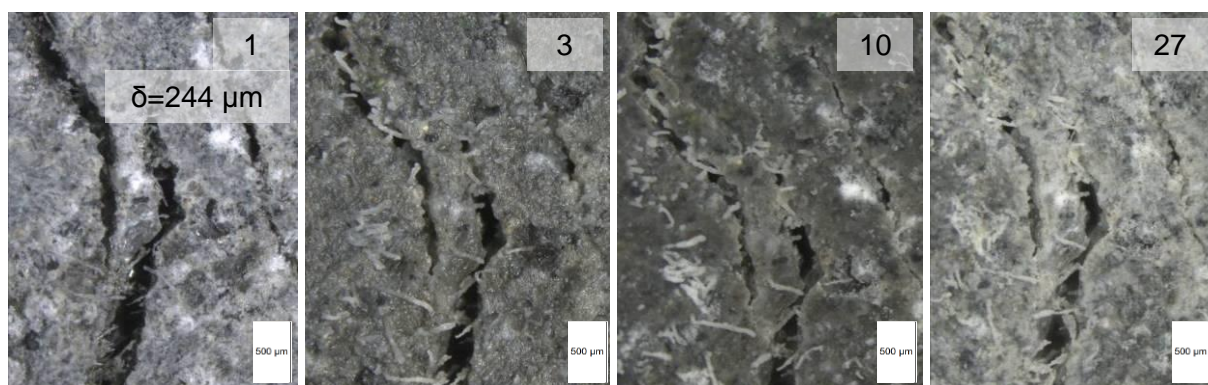


Figuur 152: Dichten van een scheur (2 vol.% PVA)

Grote scheuren zoals 220 μm in Figuur 153 helen nauwelijks tot niet. De scheuren dichten niet. Bij een scheur van 244 μm in Figuur 154 hecht het materiaal op plaatsen waar de scheurwijdte verkleint.

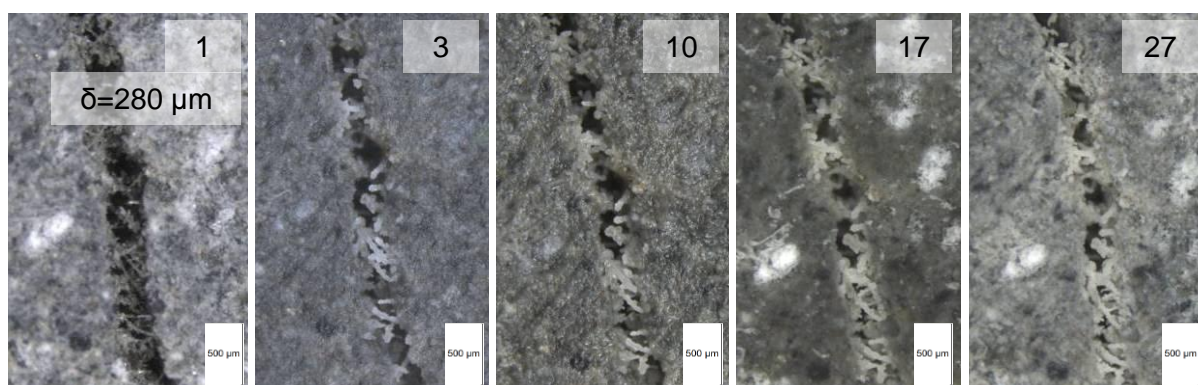


Figuur 153: Nauwelijks heling bij een grote scheur (2 vol.% PVA)



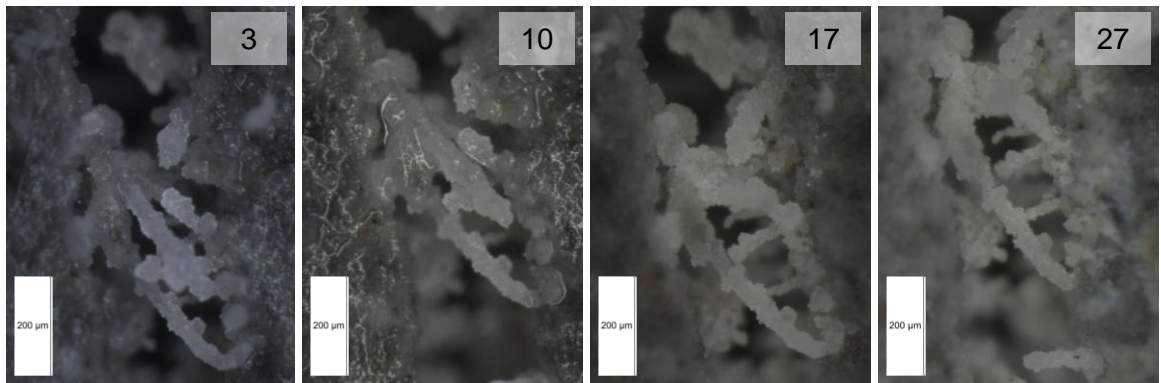
Figuur 154: Vorming van helend materiaal in de uiteinden van de scheur (2 vol.% PVA)

Een steeds terugkerende observatie is dat het hechtend materiaal zich hecht aan de vezels. Deze zorgen mee voor de overbrugging van de scheur door het helend materiaal. Figuur 155 geeft een treffend voorbeeld. Hoewel de scheur 280 μm groot is, wordt ze deels overbrugd.

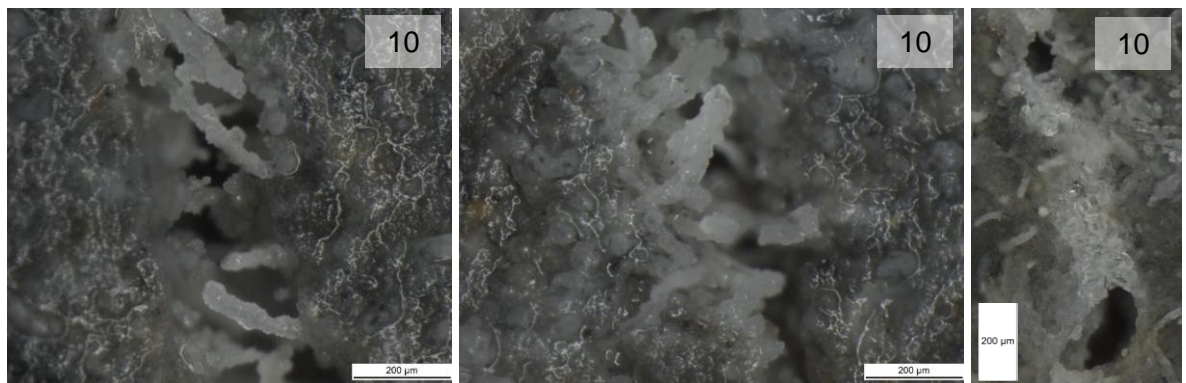


Figuur 155: Overbrugging door aanhechting aan de microvezels (2 vol.% PVA)

Deze aanhechting maakt het mogelijk de gevormde producten van naderbij te bestuderen. Dit wordt weergegeven in Figuur 156 waarbij de kristallen goed zichtbaar zijn. De grootte neemt toe met toenemende cycli, maar de vorming is het grootst in de eerste dagen, na een eerste nat/droog cyclus. Gevormde kristallen situeren zich rondom microvezels (Figuur 157).

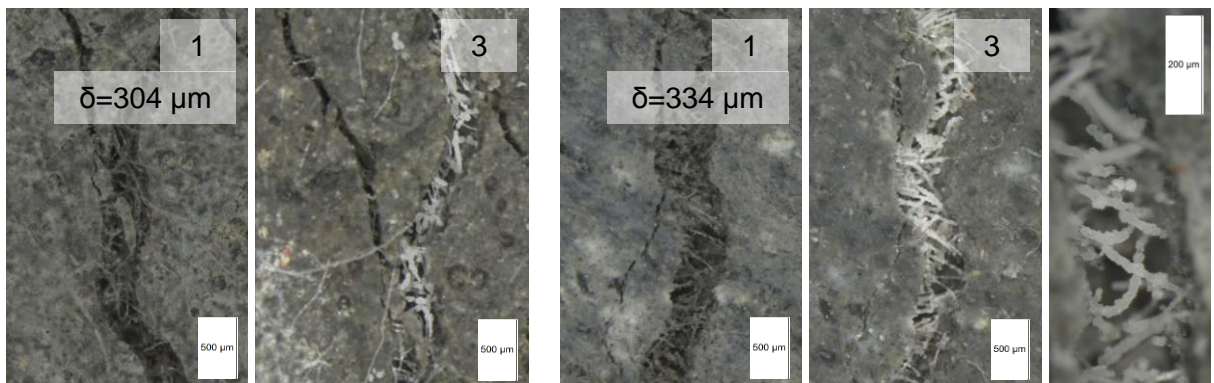


Figuur 156: Detail van de gevormde producten (2 vol.% PVA)



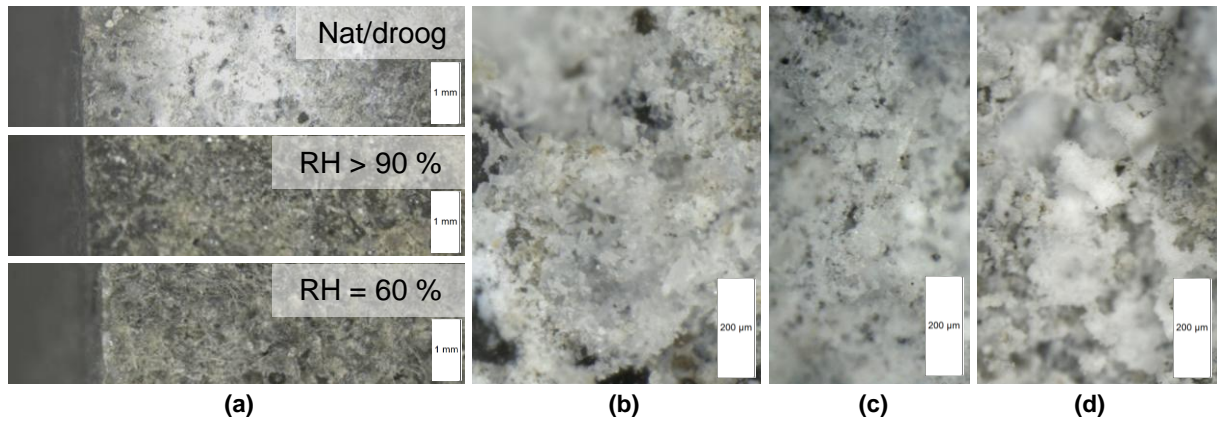
Figuur 157: Aanhechting van helend materiaal op de vezels (2 vol.% PVA)

Andere voorbeelden worden gevonden bij de PP-vezels (Figuur 158). Hoewel de scheurwijdtes groot zijn blijkt er toch kristalvorming op te treden op de vezels, zowel op de bicore vorm als op het monofilament.

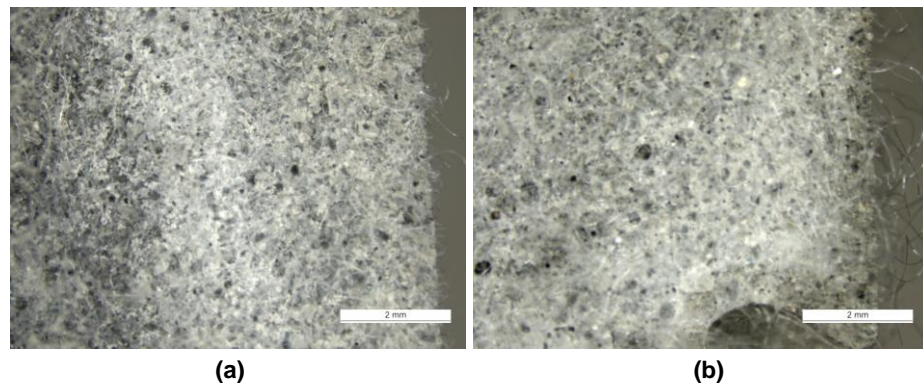


Figuur 158: Aanhechting op PP-vezels (1 en 2 vol.% PPb)

Figuur 159a toont het scheurvlak van een proefstuk dat nat/droog cycli onderging, een $RV > 90\%$ en een $RV = 60\%$. Er is enkel duidelijke zelfheling waarneembaar in het eerste geval. Bij een $RV = 60\%$ is er niets zichtbaar. Bij een $RV > 90\%$ is er verdergaande hydratatie zichtbaar door een andere kleur van het scheurvlak. Figuur 159b,c&d toont het zelfhelend materiaal in detail. Er dient opgemerkt dat het witte residu zich over de totale lengte van de scheur zich bevindt en tot op de halve hoogte van het proefstuk (tot waar de scheur loopt). Dit wit residu was bij elk proefstuk waarneembaar. Extra vorming (door de grotere scheuren) bevond zich bij de PP-vezels onder nat/droog cycli (Figuur 160).



Figuur 159: Onderzoek van de scheurvlakken en kristalvorming (2 vol.% PVA)



Figuur 160: Kristalvorming op scheurvlak bij PP bicore (a) en PP monofilament (b)

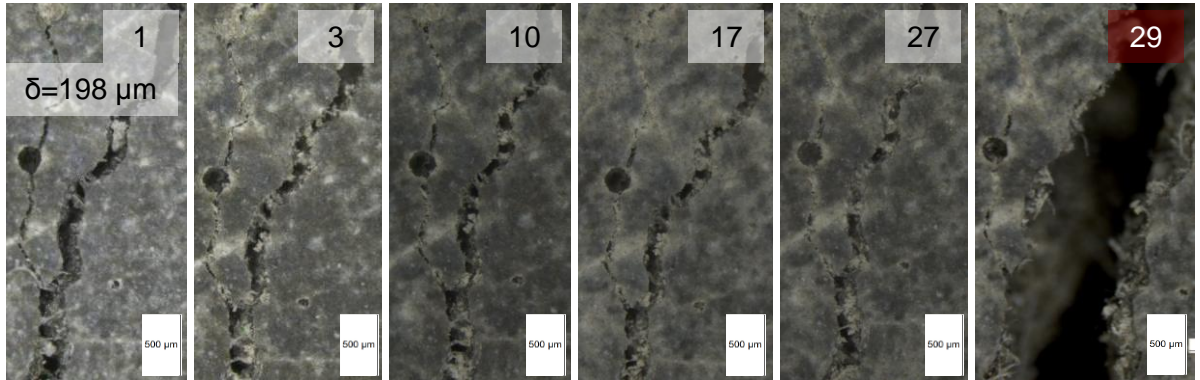
De vorming van het witte residu (calciumcarbonaat) is de hoofdreden voor de heling van de scheuren, naast de verdergaande hydratatie. Dat ook grote scheuren inwendig geheeld worden door kristalvorming, zoals in Figuur 160, toont het nut van zelfheling door kristalvorming. De vezels dienen mee om de scheur te overbruggen en als locaties waar het zelfhelend materiaal op kan bouwen.

Bij mengsels met 1 m% SAP A waren de scheuren moeilijk zichtbaar na curing in nat/droog cycli. Dit duidt dat de scheuren goed geheeld zijn. Bij SAP B werden koepelvormen waargenomen, zoals in Figuur 161. SAP nemen vocht op uit de omgeving en er worden kristallen gevormd. Deze koepels blijven over na inkrimping van de SAP.



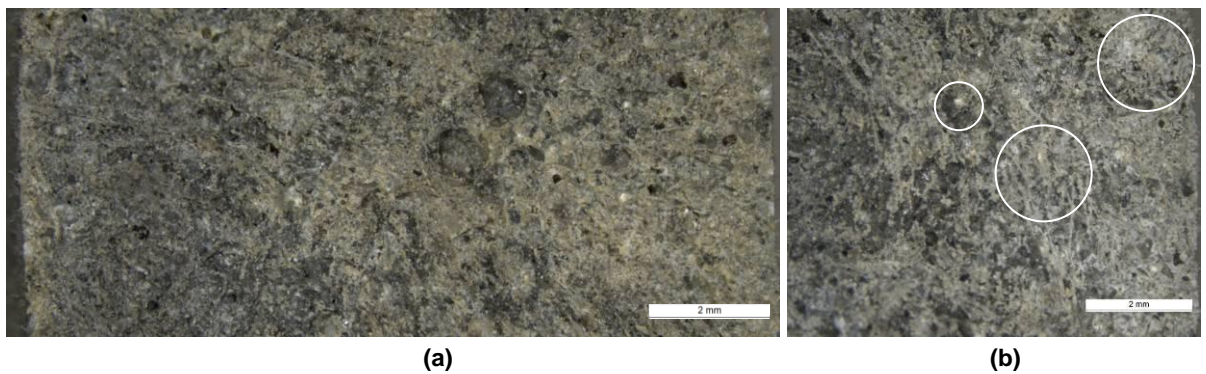
Figuur 161: Koepelvorming na desorptie van een SAP B partikel (2 m%)

Bij de proefstukken met een $RV > 90\%$ en met 1 m% SAP B trad zelfheling op in lichte vorm. Dit is te zien in Figuur 162. De rode kader met 29 staat voor de scheur na herbelasting. Hierbij is het proefstuk volledig gescheurd. Hoewel de proefstukken goed afgeschermd waren, kan er toch contact geweest zijn met water. Het minste water wordt opgenomen door de SAP, die het dan in de tijd vrijgeven voor zelfheling. In droge regionen kan dit wel een oplossing geven om zelfheling te manifesteren als het weinig regent.



Figuur 162: Opgetreden zelfheling bij een $RV > 90\%$ (2 vol.% PVA en 1 m% SAP B)

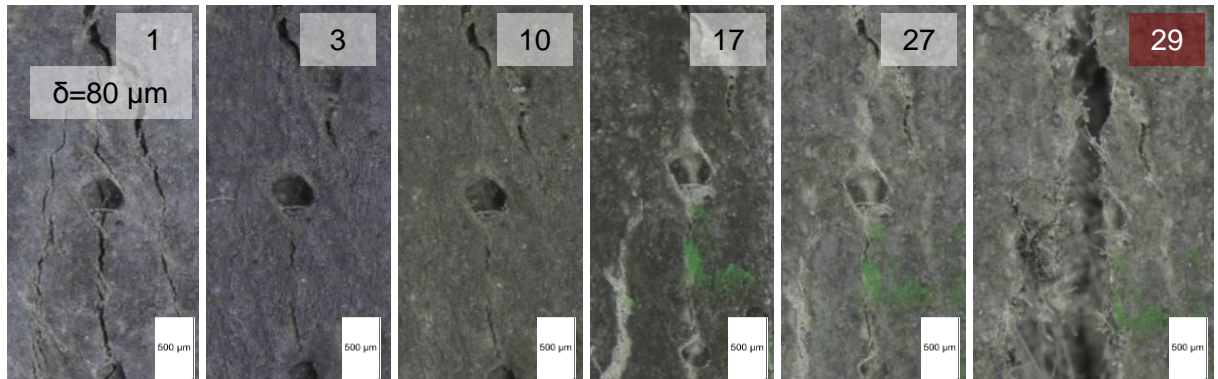
Het scheurvlak toonde vooral verdergaande hydratatie aangezien het water gradueel in de tijd afgegeven werd door de SAP in het mortelproefstuk. Een volledige doorsnede van een scheurvlak bij een $RV > 90\%$ en bij nat/droog cycli wordt gegeven in Figuur 163a. De verdergaande hydratatie samen met de vorming van CaCO_3 -kristallen in nat/droog cycli zoals deels rechts op Figuur 163b zorgen voor de zelfheling.



Figuur 163: Scheurvlak bij bewaring op een $RV > 90\%$ (a) en nat/droog cycli (b) (1 m%)

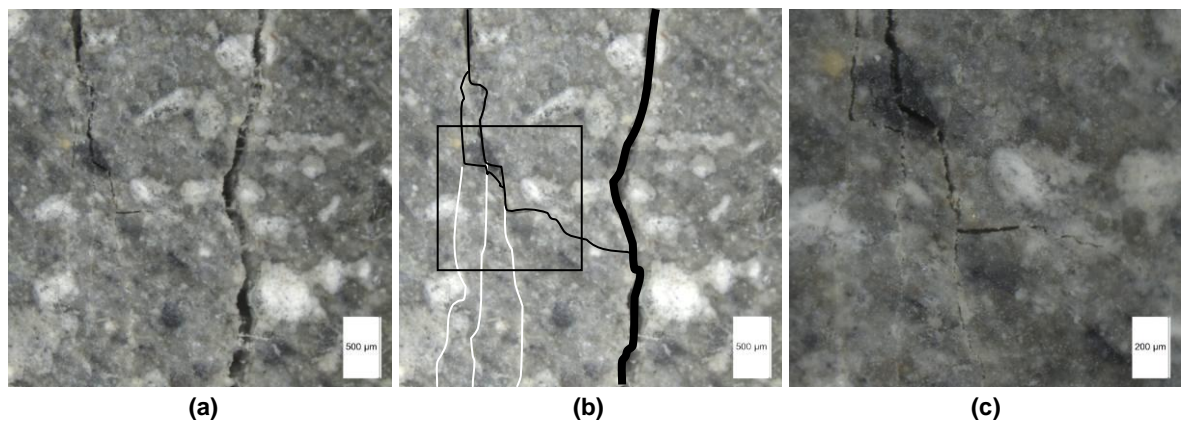
4.3.5. Scheuronderzoek: verbetering van de eigenschappen

Doordat het kristal meestal het zwakke materiaal is, volgen de nieuwe scheuren bij herbelasting de eerder gevormde scheuren (Figuur 164). Dit is echter niet steeds het geval, zoals uit verdere figuren zal blijken.



Figuur 164: Vorming van kristallen en doorscheuren bij herbelasting (2 vol.% PVA)

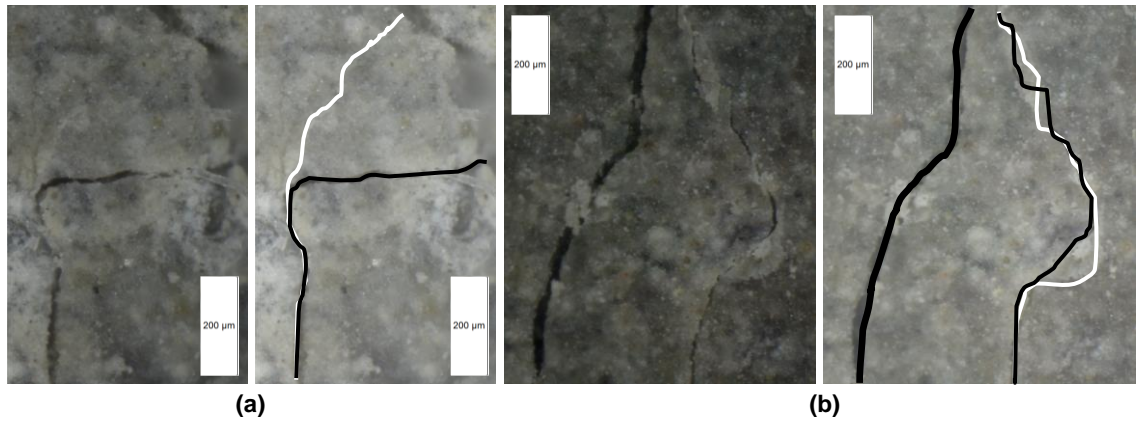
Figuur 165a toont de herbelasting van *PVA 1 ND*. De nieuwe scheur volgt niet de oude scheur, maar wijkt af naar de hoofdscheur (Figuur 165b). Figuur 165c toont een detailopname. 'Witte' lijnen staan voor oude geheelde scheuren, 'zwarte' lijnen voor nieuwe.



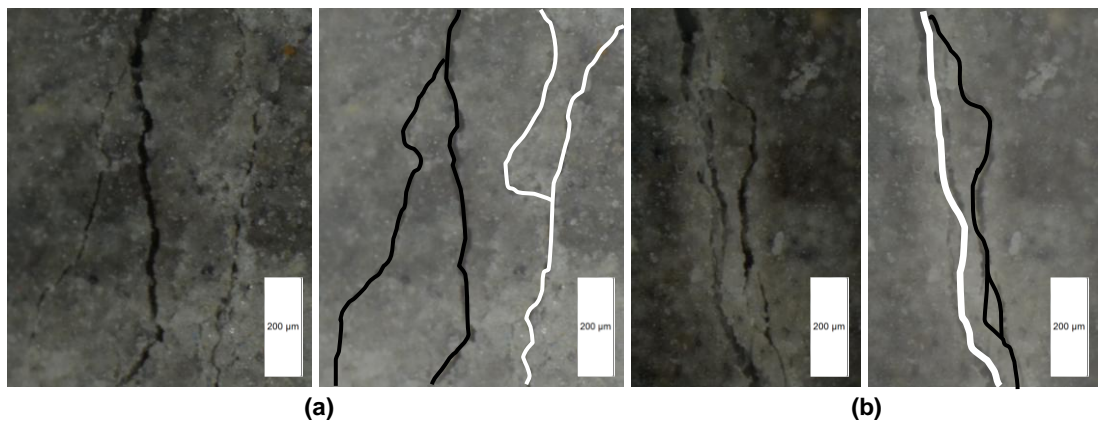
Figuur 165: Herwonnen sterkte bij PVA 1 ND

Figuur 166a toont de afbuiging van een scheur en de oude scheur wordt niet meer gevolgd. Figuur 166b toont treffend dat de scheur een bocht afsnijdt waardoor dus geconcludeerd kan worden dat het zelfhelend materiaal in dat gebied sterker is dan de matrix. Ook wordt er een totaal nieuwe scheur gevormd naast de bestaande microscheur.

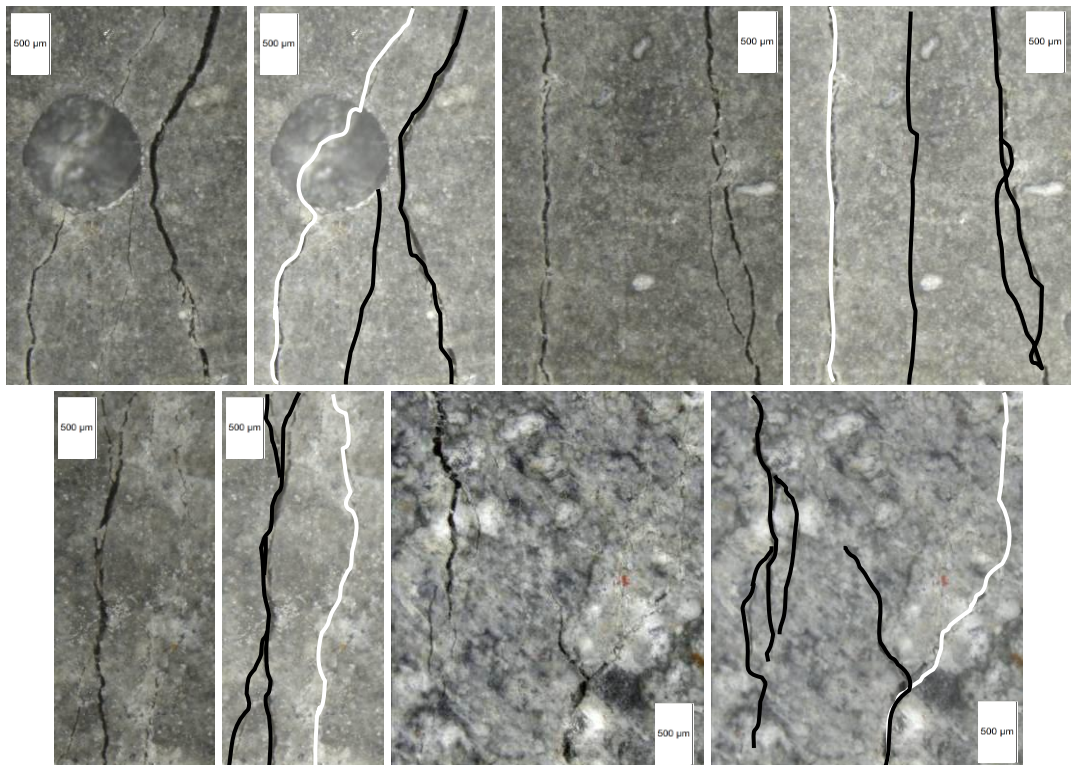
Nog een voorbeeld van een nieuwe scheur naast een geheelde scheur wordt getoond in Figuur 167a. Figuur 167b toont scheuren in het zelfhelend materiaal die ook door de omringende matrix gaan. Andere voorbeelden van nieuwe scheuren worden gegeven in Figuur 168. De bovenste twee figuren tonen dezelfde scheur. Twee nieuwe scheuren worden gevormd. Bij de figuur linksonder volgt de nieuwe scheur parallel de oude scheur en rechtsonder stopt de scheur plots om op een andere locatie verder te gaan.



Figuur 166: Herwonnen sterkte en sterkere regionen bij PVA 2 ND

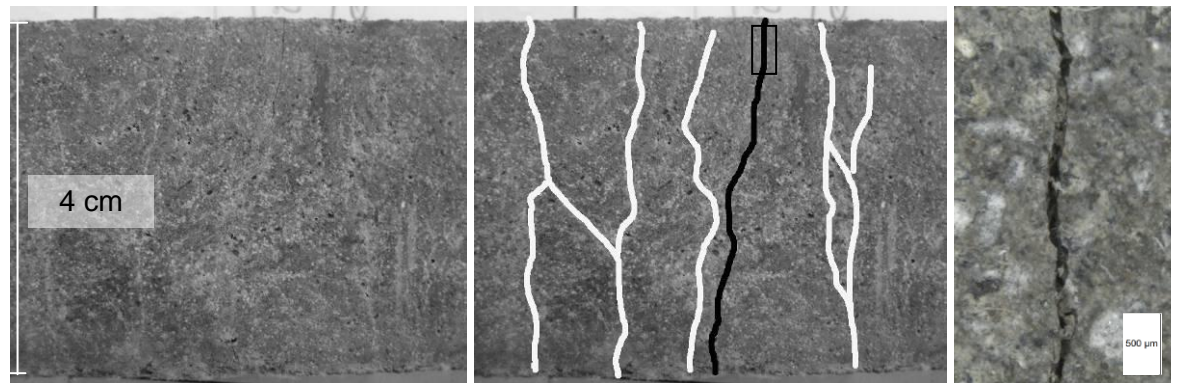


Figuur 167: Vorming van nieuwe scheuren en scheur van helend materiaal bij PVA 2 ND



Figuur 168: Vorming van nieuwe scheuren bij PVA 2 ND

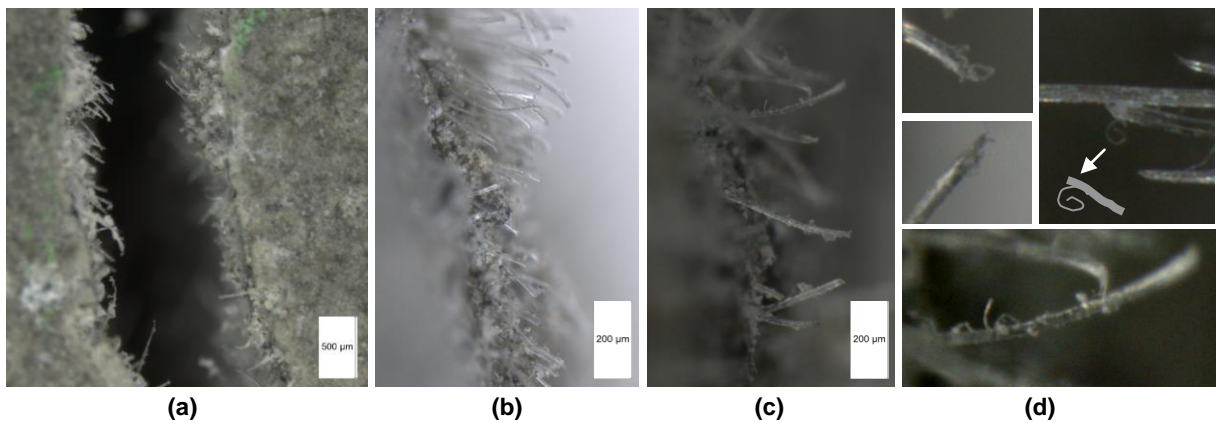
Het meest treffende resultaat was de vorming van een nieuwe scheur niet in de buurt van geheelde scheuren. Figuur 169 toont deze scheur en deze had een scheurwijdte van $88\ \mu\text{m}$.



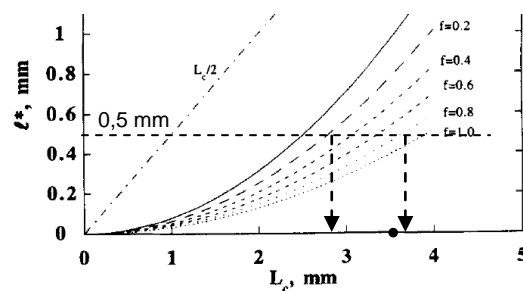
Figuur 169: Vorming van nieuwe microscheur bij PVA 2 ND

4.3.6. Variant ter bepaling van de vezeleigenschappen

Figuur 170a toont twee scheurvlakken na herbelasting. De scheur volgde opnieuw de oude scheur en de uitgetrokken vezels zijn duidelijk zichtbaar. Op Figuur 170b&c kunnen de vezels opgemeten worden. Deze zijn tussen $200\ \mu\text{m}$ en $500\ \mu\text{m}$ lang. Deze lengte l^* kan gebruikt worden om de variant voor de bepaling van de vezeleigenschappen na te gaan. Met behulp van Figuur 13 kan L_c bepaald worden. f ligt tussen 0,2 en 0,8 en bij uitzetting van $l^*=500\ \mu\text{m}$ in Figuur 171, wordt L_c tussen ongeveer 2,85 mm en 3,7 mm bekomen.



Figuur 170: Uitgetrokken vezels bij 2 vol.% PVA en detailopnamen

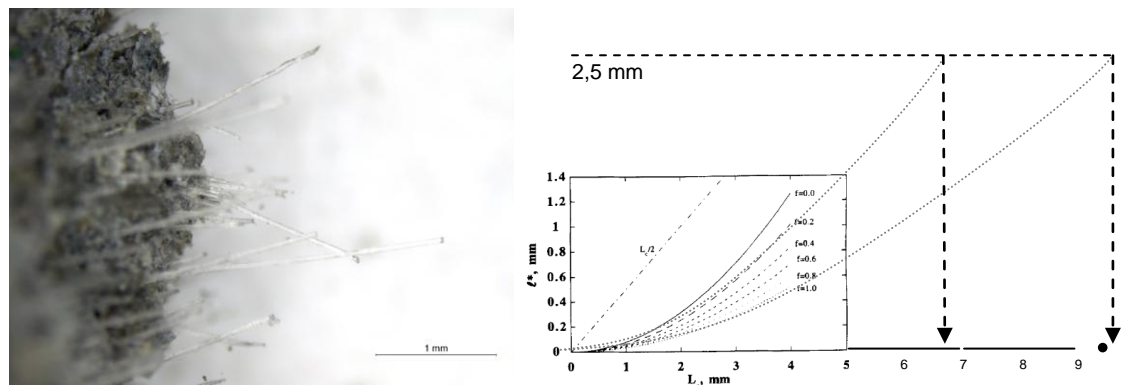


Figuur 171: Toepassing van de grafische omzettingmethode bij de variantbepaling

Met een $d_f=39 \mu\text{m}$, $\sigma_{fu}=1070 \text{ MPa}$ en $\tau=2,93 \text{ MPa}$, wordt via formule (14) een L_c bekomen van 3,56 mm. Deze waarde komt goed overeen en werd ook aangeduid op de figuur.

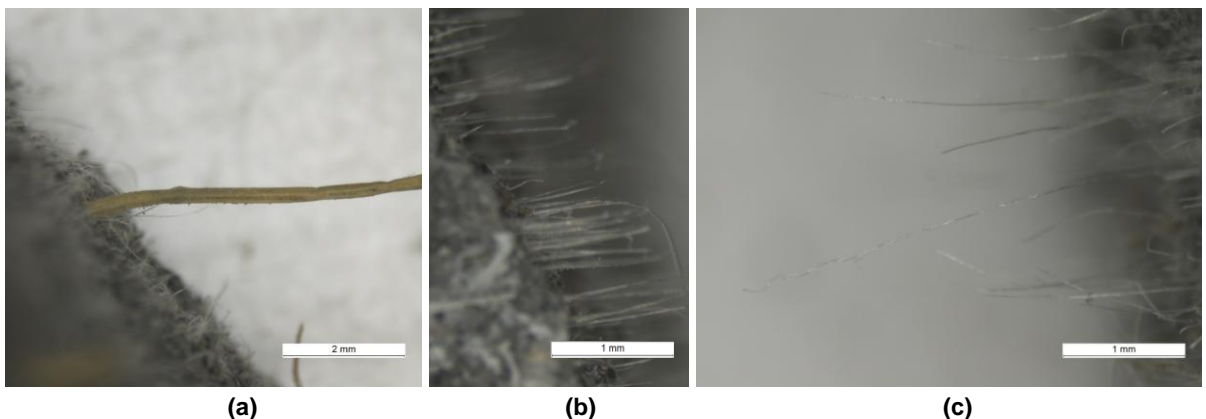
Figuur 170d toont enkele details. De onderste afbeelding toont het ruw worden van de vezel doordat de vezel gegleden heeft in de matrixtunnel. Vezels neigen in de tunnel te blokkeren zoals een vinger in een handpalm. Dit gaat door tot de vezel uitpuilt. Dan krijgt de top van de uitpuilende vezel het karakteristiek uitzicht zoals op de kleine figuren. De figuur rechtsboven toont het afpellen van de vezel, opnieuw door de interactie met de matrixtunnel.

De PVA-vezel van Kuraray is gecoat en heeft, in vergelijking met de hiervoor beschreven PVA-vezel van Redco, enkel een andere τ , namelijk 1,11 MPa. Zo wordt theoretisch een $L_c=9,39 \text{ mm}$ bekomen. Figuur 172 toont uitpuilende lengtes die variëren van 2 tot 2,5 mm. Met deze $l^*=2,5 \text{ mm}$ kan opnieuw L_c met de grafische methode bepaald worden. Dit ligt in de buurt van de theoretisch bepaalde waarde (via extrapolatie). Voor zowel PVA-vezels van Redco als van Kuraray, ligt de waarde het dichtst bij $f=0,8$.



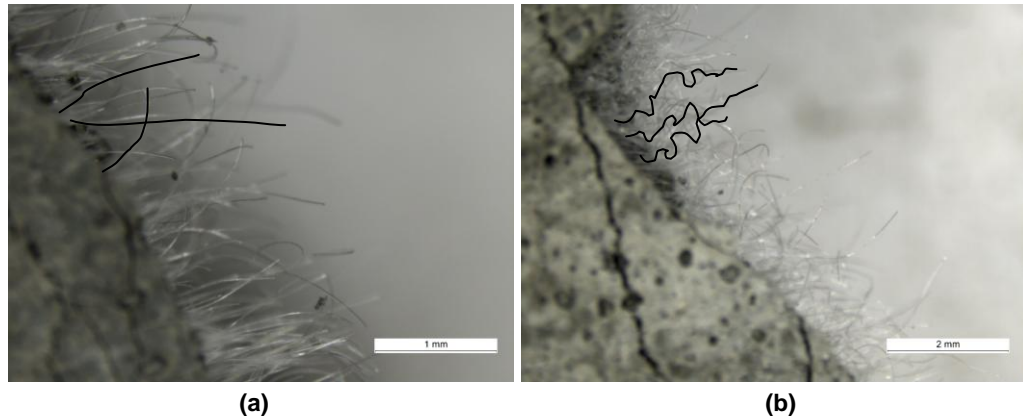
Figuur 172: Uitpuilende lengte PVA-vezel

Bij de vlasvezels waren er nog enkele restanten van stengels (bastvezels opgebouwd uit technische vezels) die niet bonden met de matrix (Figuur 173a). Sommige waren 1,5 cm lang. De technische vezel had een uitgetrokken lengte van ongeveer 1 mm (Figuur 173b). De gecottoniseerde vezel had uitgetrokken lengtes tot 4 mm (Figuur 173c). Aangezien er weinig gegevens beschikbaar zijn als input voor de variantbepaling, werd hier niet dieper op ingegaan.



Figuur 173: Uitgetrokken vezels bij de technische vlasvezel (a&b) en cottonisé (c)

De PP-vezels worden op Figuur 174 weergegeven. De bicore-vezel heeft een uitgetrokken lengte van ongeveer 1,4 mm; het monofilament ongeveer 2,4 mm. Ook is duidelijk zichtbaar dat de monofilament-vezel krullend is (Figuur 174b).



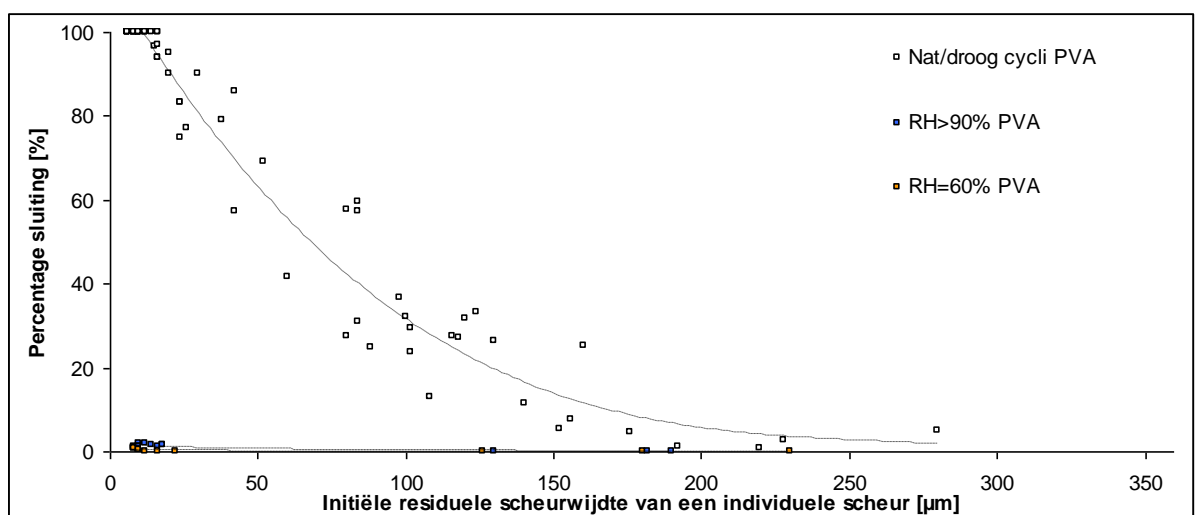
Figuur 174: Uitgetrokken lengte bij PP bicore (a) en PP monofilament (b)

Met een $d_f=16,6 \mu\text{m}$; een $\sigma_{fu}=926 \text{ MPa}$ en een $\tau_{\text{monofilament}}=0,34 \text{ MPa}$ en $\tau_{\text{bicore}}=0,6 \text{ MPa}$, wordt via (14) een L_c bekomen van respectievelijk 11,3 mm en 6,4 mm. Met een $f=0,34$ uitgezet op de grafiek op Figuur 13 wordt met de hierboven gegeven l^* een L_c bekomen van ongeveer 8 mm en 5,4 mm. Deze waarden liggen dicht bij deze bepaald uit de formule. De gelijkenis voor de bicore-vezel is treffend, maar voor het monofilament iets minder. Dit komt doordat de vezel, zoals in Figuur 174b krullend is. Indien een l^* van 3 mm wordt genomen, dan komt het ongeveer in de buurt van 11,3 mm terecht. De methode kan dus goed toegepast worden. Er dient wel steeds een correctie te gebeuren op vezels met een krulvorm waar de variant ter bepaling van de hechteigenschappen geen rekening mee houdt.

4.3.7. Heling aan het scheuoppervlak per individuele scheur

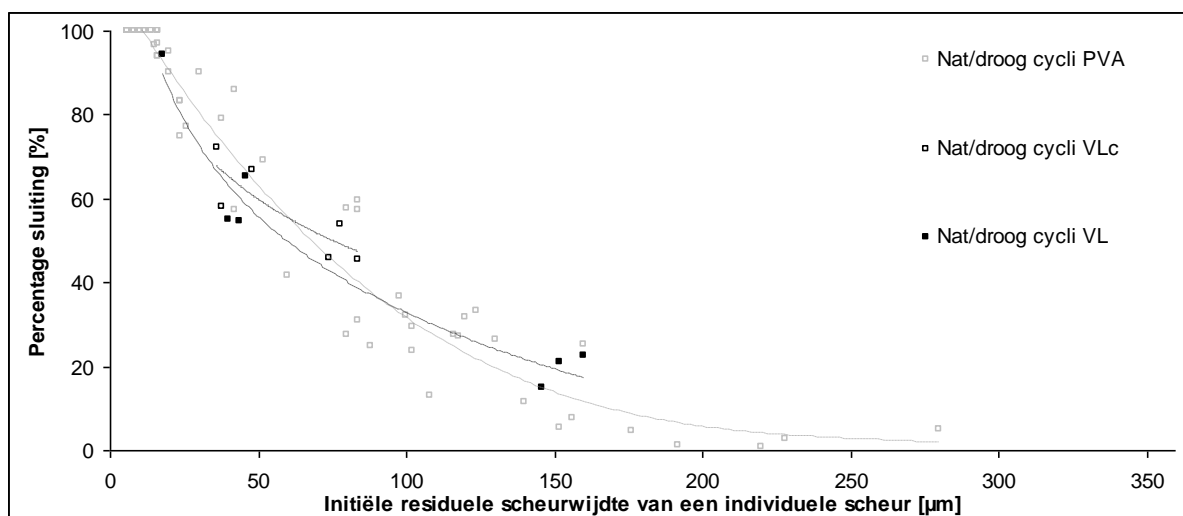
De scheuren werden tijdens hun curingcondities microscopisch opgevolgd. Op het einde van hun curingperiode werd de scheur opnieuw opgemeten en vergeleken met de initiële residuele scheurwijdte. Deze vorm van visuele heling is niet de karakteristiek van de heling maar kan wel een goed beeld tonen van het curingeffect. De afzonderlijke proefreeksen konden zo onderzocht worden. In de volgende figuren werd steeds de best passende derdegraads polynoom weergegeven. Enkele clusters van experimentele punten zijn duidelijk van elkaar verschillend, maar sommige verschillen zijn niet duidelijk zichtbaar. De data werd statistisch geanalyseerd met een significantieniveau van 5 %. Op de clusters van punten kon een meervoudige variantieanalyse uitgevoerd worden. Steeds was er sprake van inhomogene varianties en werd een Dunnett's T3 test uitgevoerd bij het meervoudig vergelijken van de gemiddelden. In wat volgt worden de conclusies gegeven. In de alle figuren wordt steeds de data en de trendlijn weergegeven van Nat/droog cycli PVA (Redco).

Er is een duidelijk verschil in de mate van heling van de verschillende curingcondities (Figuur 175). Bij nat/droog cycli van mengsels met PVA-vezels is er sprake van heling. Kleine scheuren kunnen makkelijk dichten. Grote scheuren kunnen moeilijk overbrugd worden door helende producten. Bij bewaring bij een relatieve vochtigheid van meer dan 90 % is er nauwelijks sprake van heling. Er is wel een licht verschil met een bewaring bij een $RV = 60\%$. Dit kan wijzen op enkele druppels die op het proefstuk terecht kunnen gekomen zijn, hoewel dit onwaarschijnlijk is. Bij een $RV = 60\%$ is er geen heling. Dit is in overeenstemming met paragrafen 2.3.4.1 en 2.3.4.3. Ook is de gelijkennis treffend met Figuur 30. Daar wordt een totale heling van de scheuren $< 50\ \mu\text{m}$ gesteld en partiële heling tot scheuren $< 150\ \mu\text{m}$.^[17]



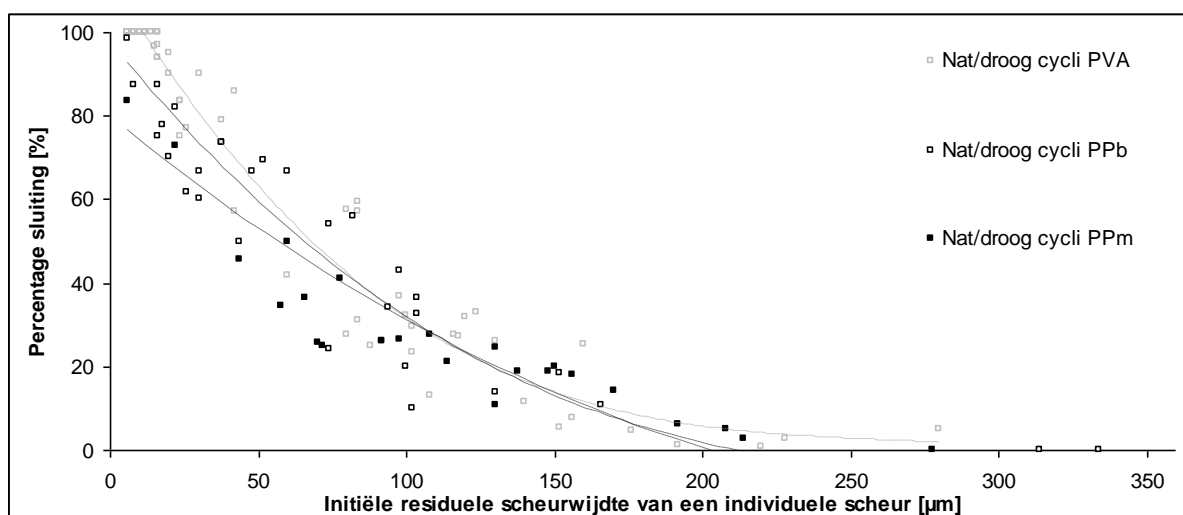
Figuur 175: Scheursluiting van bij nat/droog cycli, $RV > 90\%$ en $RV = 60\%$ (PVA)

Tussen mengsels met de technische vlasvezel en met de gecottoniseerde vorm ten opzichte van de PVA-mengsels is er geen significant verschil in het percentage sluiting (Figuur 176).



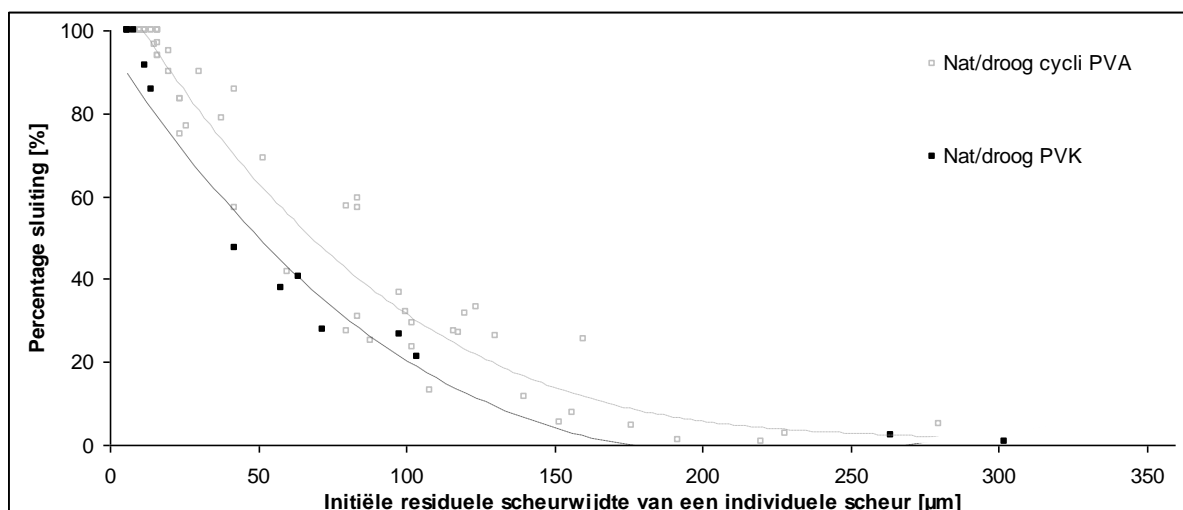
Figuur 176: Scheursluiting van mengsels met vlasvezels (VLc en VL)

Ook tussen de mengsels met PP-vezels bicore en monofilament was er geen onderscheid in percentage sluiting in vergelijking met de PVA-mengsels (Figuur 177). Enkel in het gebied $< 25 \mu\text{m}$ blijken PP-mengsels statistisch slechter te presteren dan PVA-mengsels. Vanaf een scheurwijdte van $200 \mu\text{m}$ wordt de heling aan het scheuroppervlak nihil.



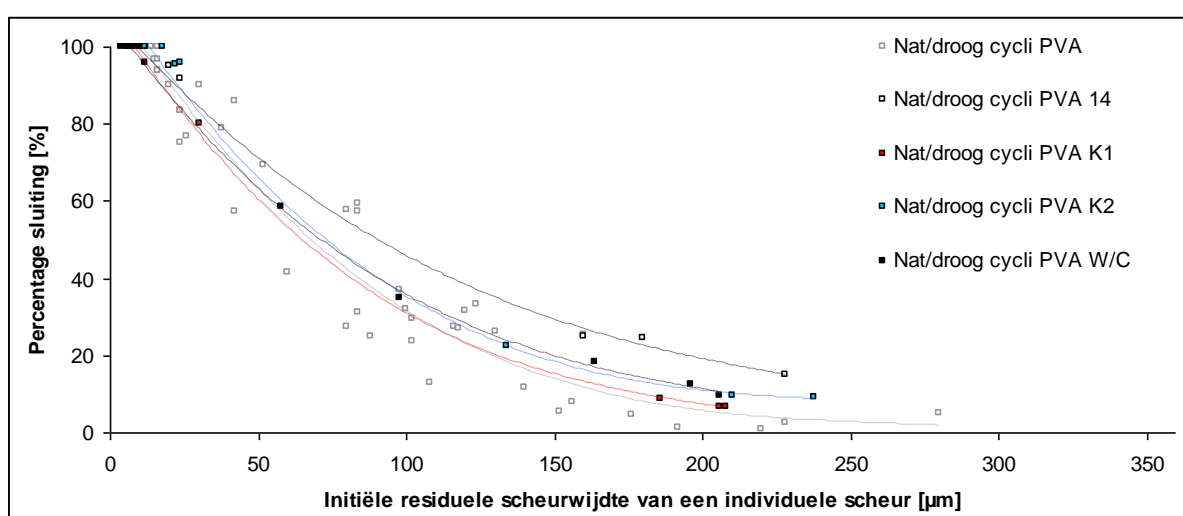
Figuur 177: Scheursluiting van mengsels met PP bicore en PP monofilament

Het percentage sluiting bij de PVA-vezel van Kuraray ligt onder de PVA-vezel van Redco, zoals te zien is in Figuur 178. Dat is niet verwonderlijk. De vezel is namelijk fabrieksgewijs gecoat met olie en bezit minder hechteigenschappen dan de PVA-vezel van Redco. Zoals later zal blijken uit visuele opnamen hechten helende kristallen zich makkelijker aan PVA-vezels van Redco, door hun hechteigenschappen. Zoals ook in Figuur 30 te zien was, is er sprake van $> 50 \%$ heling bij een scheurwijdte $< 50 \mu\text{m}$ en nauwelijks tot geen heling bij een scheurwijdte $> 150 \mu\text{m}$. Dezelfde trend wordt opnieuw gevolgd.



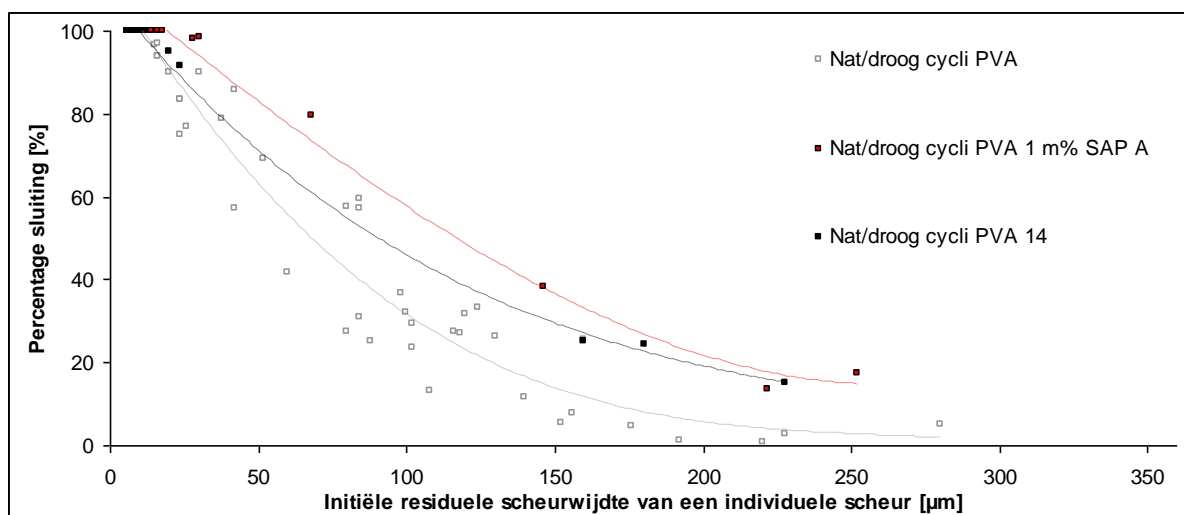
Figuur 178: Scheurdichting van PVA-mengsels van Kuraray (PVK)

In Figuur 179 wordt de proefreeks met scheuraanbreng op 14 dagen (Nat/droog cycli 14), de twee verhoudingen kalksteenmeel op vliegias (Nat/droog cycli K1 en Nat/droog cycli K2) en de proefreeks met lagere W/C-factor (Nat/droog cycli W/C) vergeleken. Er is geen significant verschil in heling aan het scheuroppervlak tussen een PVA-mengsel en een mengsel met kalksteenmeel. Tussen de mengsels K1 en K2 is er wel een verschil op het vlak van scheurdichting. Bij het K2-mengsel is er meer kalksteenmeel aanwezig. Vandaar de grotere aanwezigheid van Ca^{2+} -ionen om de heling volgens formules (17) en (18) te starten. Dit heeft een even groot effect als het verlagen van de W/C-factor (ook te zien in de figuur). Deze speelt in op de verdergaande hydratatie door een hoger gehalte aan ongehydrateerd cement. Een hogere mate van heling wordt gevonden bij een belasting op 14 dagen. Hoewel de curingperiode even lang was, is de mate van heling groter. Opnieuw is er meer ongehydrateerd cement aanwezig en is het proefstuk nog gradueel meer aan het verharden na 14 dagen ten opzichte van de proefstukken met scheuraanbreng op 28 dagen.

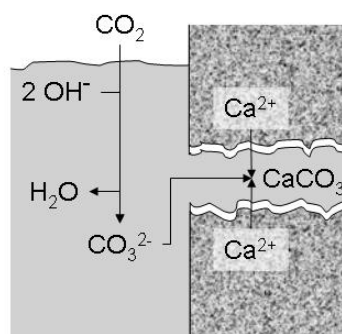


Figuur 179: Scheurdichting bij mengsels Nat/droog cycli PVA 14, K1, K2 en W/C

Het inmengen van SAP verhoogt de mate van heling. In Figuur 180 wordt de dichting aan het scheuroppervlak van een mengsel met 1 m% SAP A afgebeeld die een sterker resultaat vertoont dan een mengsel met scheuraanbreng op 14 dagen. SAP nemen water op in de nat/droog cycli en geven het water gradueel af in de tijd. Er is dus steeds water aanwezig, en dat in een dunne film. Zo zal CO_2 makkelijker opgenomen worden dan in een 'groot' waterbad. Figuur 181 toont het mechanisme tot het vormen van calciumcarbonaatkristallen. Water is hierbij steeds nodig. Het gradueel afgeven van water zorgt ook mee voor verdergaande hydratatie door de waterafgifte aan de cementmatrix door de SAP.

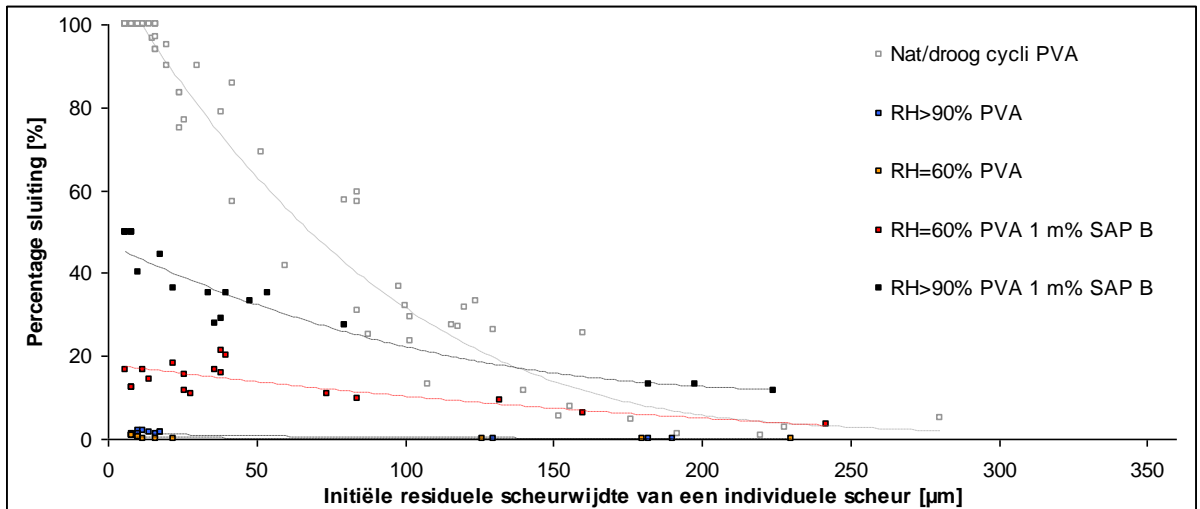


Figuur 180: Scheurdichting bij mengsels met 1 m% SAP A in gelvorm



Figuur 181: Mechanisme tot vorming van CaCO_3 -kristallen

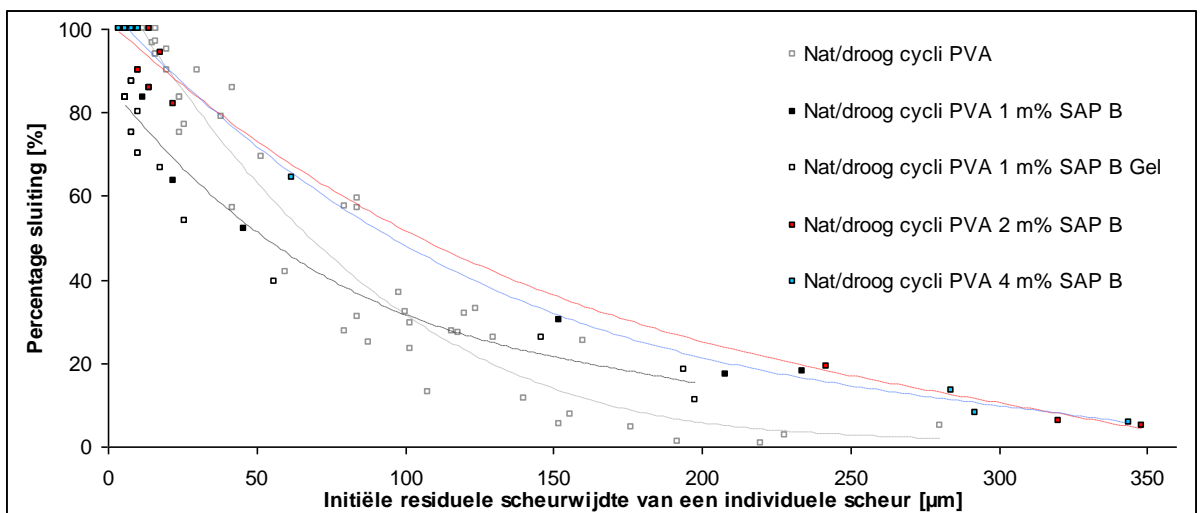
Inmengen van SAP B geeft een verbetering van de heling aan het scheuroppervlak bij een $\text{RV} = 60\%$ en een $\text{RV} > 90\%$ (Figuur 182). En dit over alle scheurwijdtes. Dat komt omdat SAP vocht uit de omgeving kunnen opnemen en dat vocht kunnen afgeven nodig voor verdergaande hydratatie en CaCO_3 -precipitatie. Hoewel uit DVS metingen (zie paragraaf 4.2.4) is gebleken dat die vochtopname laag is, blijkt het toch voldoende om de hydratatie en precipitatie van calciumcarbonaat aan te zwengelen. Bij een $\text{RV} > 90\%$ bestaat de kans dat er water op het proefstuk terecht komt, maar bij een $\text{RV} = 60\%$ is dit niet het geval. SAP staan dus in voor interne curing en zelfheling en zorgen voor een sluiting van de scheur.



Figuur 182: Scheurdichting bij mengsels met SAP B bij een RV > 90 % en RV = 60 %

Het inmengen van SAP B als gel geeft iets mindere heling dan droog inmengen (Figuur 183). Dat komt doordat de grote agglomeraten verzadigde SAP niet goed vermengd zijn en grote gebieden met SAP vormen. Het inwendige van een wolk SAP kan niet altijd vocht opnemen door afscherming door de SAP rondom. Het droog inmengen verzekert een gelijkmatige verdeling van de SAP. Daardoor kunnen alle SAP water opnemen.

1 m% aan SAP B geeft minder heling dan 2 m% en 4 m% aan SAP B (Figuur 183). Er is geen significant verschil in heling aan het scheuroppervlak bij de mengsels met 2 m% en 4 m% aan SAP B. Het verhogen van SAP geeft meer mogelijkheid tot wateropname en gradueel afgeven van water.

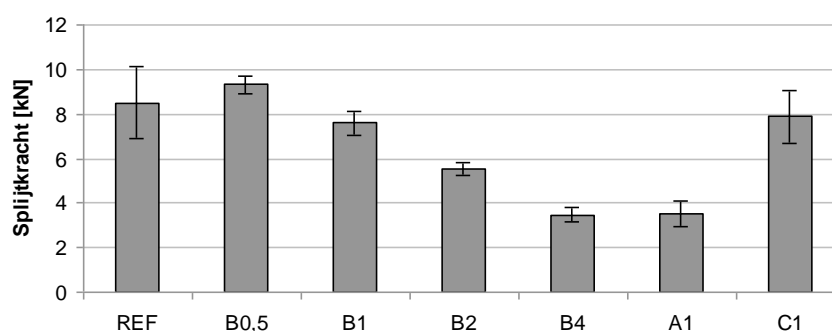


Figuur 183: Scheurdichting bij mengsels met SAP B (1 m%, 2 m% & 4 m%)

4.4. Permeabiliteitsproeven

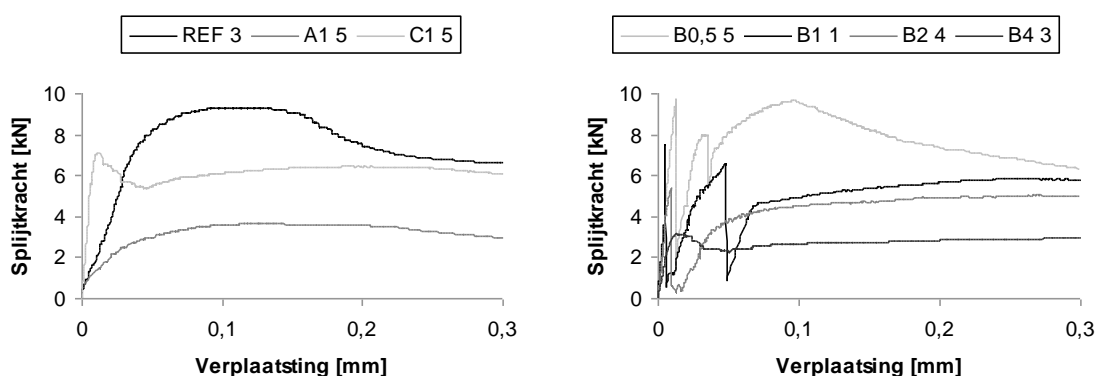
4.4.1. Splejtkracht

In Figuur 184 daalt de splejtkracht significant met toename van het massaprocent aan SAP B. Dit is logisch aangezien de splejtproof trekkkrachten opwekt en de doorsnede gereduceerd is door de holten gevormd door de SAP. 1 m% SAP A geeft slechtere resultaten in vergelijking met 1 m% SAP B. Dat komt door de slechte verwerkbaarheid tijdens het maken van de mengsels met SAP A. Dit is analoog aan de paragraaf 4.2.5. SAP C geeft quasi dezelfde resultaten als REF. De SAP C-korrels zijn groot en zorgen voor grote holten, maar zijn niet goed verspreid waardoor er ongeveer dezelfde doorsnede voorhanden is.



Figuur 184: Splejtkracht van de Braziliaanse proef van de verschillende mengsels

Enkele typische splejtdiagramma worden in Figuur 185 weergegeven. Er dient opgemerkt dat de scheurcontrole met vezels moeizaam verloopt en dat om een standvastige scheur te krijgen, er beter met staalvezels wordt gewerkt. Dezelfde conclusies kunnen gemaakt worden omtrent de toename van het massaprocent aan SAP. Er wordt ook opgemerkt dat er een lichte vorm van meervoudige scheurvorming is (B0,5; B1 en B2), die zichtbaar zijn als dalingen in de diagramma. De meervoudige scheurvorming gaf extra scheuren van ongeveer 10 μm welke niet in de bepaling van de scheurwijdte meegerekend werden.



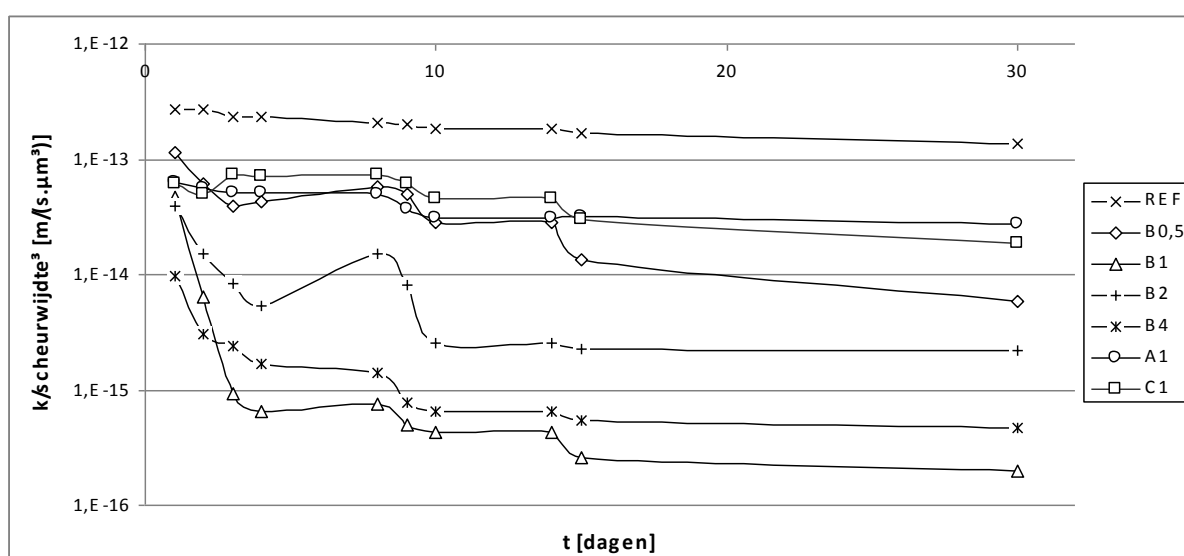
Figuur 185: Verschillende typische splejtdiagramma van de mengsels

[REF (3), A1 (5), C1 (5) & B0,5 (5), B1 (1), B2 (4), B4 (3)]

4.4.2. Doorlatendheid in functie van de scheurwijdte³

De doorlatendheid werd opgemeten gedurende de permeabiliteitstesten. Figuur 186 toont de gemiddelde permeabiliteit van alle proefstukken in een reeks met verloop van tijd over de scheurwijdte tot de derde macht op een logaritmische schaal. Van alle proefstukken in een reeks werd dus steeds de gemiddelde waarde berekend. De derde macht van de scheurwijdte is in overeenstemming met de formule (22), de formule van Tsukamoto.^{[38][47][53]} Zo wordt een correcter beeld gegeven van de resultaten. De scheurwijdte zal zo niet meer determinerend zijn, en enkel de invloed van de SAP wordt zo bestudeerd.

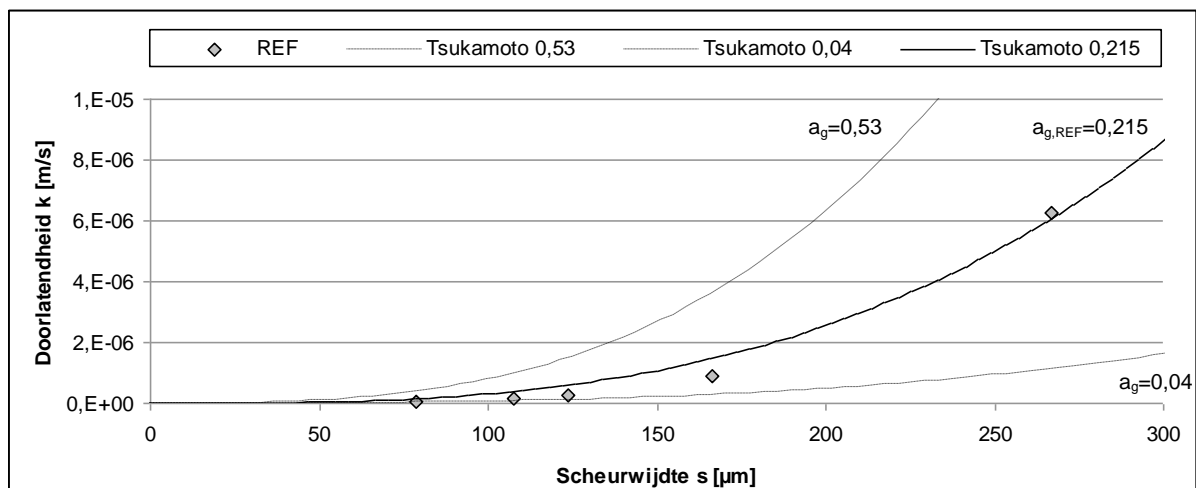
$$k = \frac{a_g \cdot I \cdot l_s \cdot g}{12 \cdot \nu} \cdot w^3 \quad (22)$$



Figuur 186: Gemiddelde permeabiliteit over scheurwijdte³ met verloop van tijd

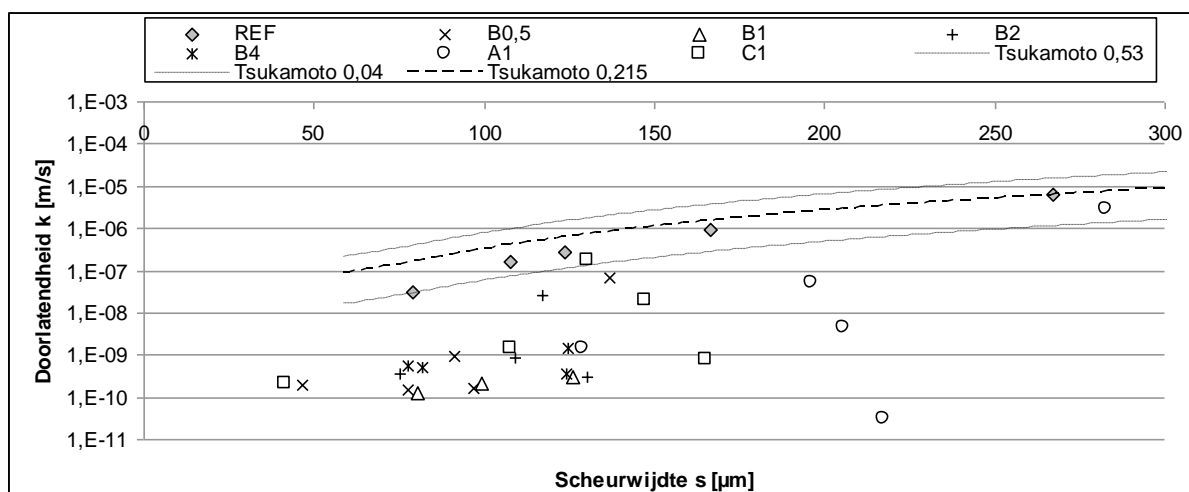
In het begin daalt de permeabiliteit, aangezien poriën opgevuld worden met water en de proefstukken verder verzadigd worden. Ook zelfheling speelt hierbij een rol. Tijdens het uitvoeren van de proef over enkele dagen is er steeds een sterke daling, voor een groot deel te wijten aan het effect van zelfheling. B0,5 daalt in de eerste dagen sterk, en zo ook B1. Deze laatste heeft de beste dichtende eigenschappen in het algemeen. De SAP dichten als het ware de scheur waardoor de daling in permeabiliteit meer is dan waargenomen bij de referentiestukken. De invloed van vezels werd ook uitgesloten. Deze kunnen werken als pijlers in de stroming, maar elk proefstuk had 1 vol.% aan PVA-vezels ingemengd.

Figuur 187 toont het verband tussen de doorlatendheid van REF-proefstukken en de scheurwijdte. Indien in de formule van Tsukamoto voor het verhang $I = h/d_s = h_0/L$, met L de dikte van het proefstuk, en voor l_s de diameter van het proefstuk genomen wordt, kan het verband weergegeven worden. De kinematische viscositeit ν van gedemineraliseerd water is $0,000001 \text{ m}^2/\text{s}$. a_g varieert tussen 0,04 en 0,53. De best passende derdegraadspolynoom voor REF ligt hier tussen, en $a_{g,REF}$ bedraagt 0,215 volgens SPSS®.



Figuur 187: Doorlatendheid in functie van de scheurwijdte (30 dagen) voor REF

De andere mengfels zijn niet goed zichtbaar op de lineaire as en worden weergegeven in Figuur 188 op een logaritmische as. De formule van Tsukamoto geldt in de gevallen van SAP niet. Deze zorgen namelijk voor een sluiting van de scheuren, waardoor de formule niet meer opgaat. Algemeen geldt wel dat hoe groter de scheur, hoe groter k .

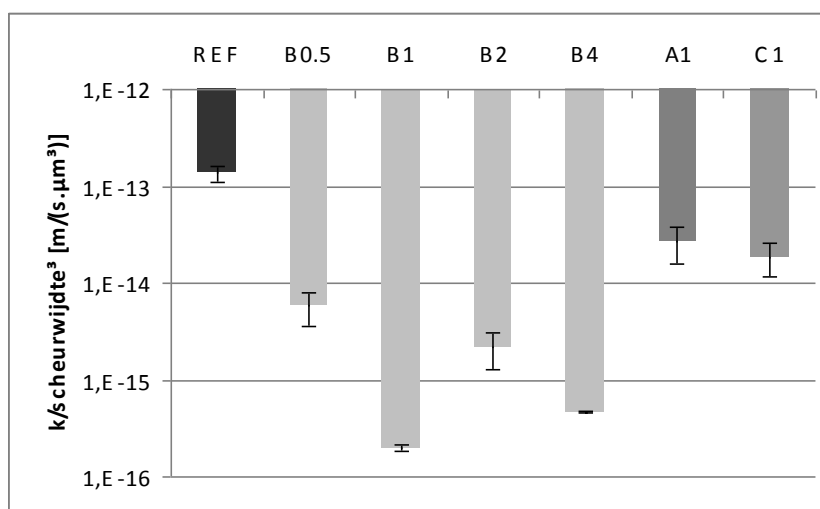


Figuur 188: Doorlatendheid in functie van de scheurwijdte (30 dagen) voor alle mengfels

Bij A1 ligt er bij een grote scheurwijdte een meting in het interval bepaald door $a=0,04$ en $a=0,53$. De andere metingen liggen hier onder. Dit duidt dat de kleinere scheuren onderhevig zijn aan blokkering door SAP. Bij grotere scheuren gaat dit niet meer op. Ze kunnen onmogelijk de scheur overbruggen en zullen eerder weggespoeld worden. Ook is de scheurwijdte dan dermate groot dat de SAP niet kunnen zorgen voor een blokkering. Ook Lee et al. (2010)^[96] bestudeerden SAP-korrels met een kleinere diameter ten opzichte van SAP-korrels met een grotere diameter en kwamen tot hetzelfde besluit.

De doorlatendheid k ligt in het gebied van 1^{e-10} m/s voor een scheur van $50 \mu\text{m}$ tot 1^{e-5} m/s voor een scheur van $300 \mu\text{m}$. Deze waarden stemmen overeen met deze van Lepech en Li (2005)^[26], deze in Figuur 30b, deze in Figuur 31 en bij Homma (2009)^[45].

De resultaten van de permeabiliteit over de scheurwijdte tot de derde macht na dertig dagen worden weergegeven in Figuur 189. Hierbij worden de gemiddelde waarden voorgesteld, samen met de standaardafwijking.



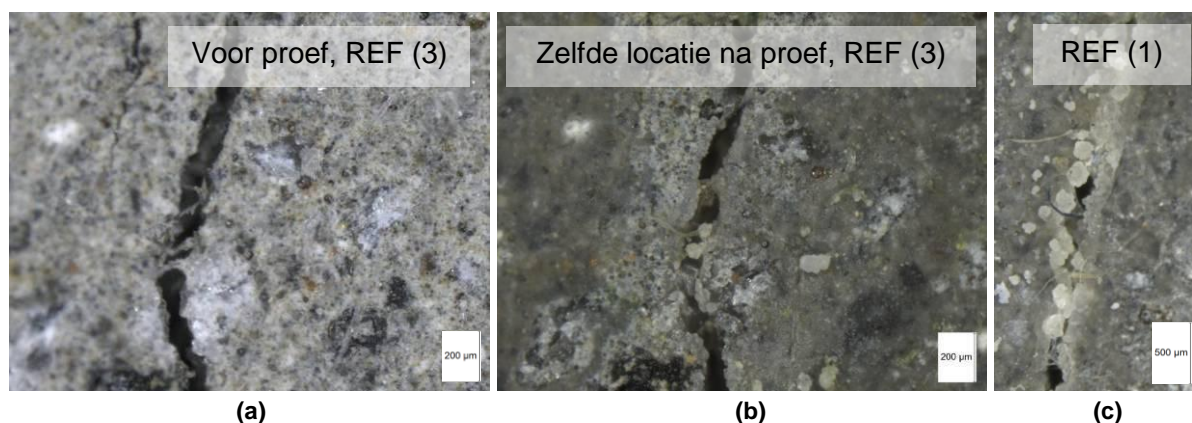
Figuur 189: Gemiddelde permeabiliteit met standaardafwijking over scheurwijdte³

Er kan geen sluitende conclusie geformuleerd worden omtrent A1 en C1 (enkel deze zijn niet significant verschillend, significantieniveau 37,6%). De korrelgrootte van A1 is zoals hierboven vermeld te klein, maar de korrelgrootte van C1 is dan weer te groot. Zo zullen de SAP de scheur overbruggen, maar dit zal enkel maar lokaal het geval zijn en het merendeel van de scheur zal niet gedicht zijn. De korrelgrootte dient dus fijner genomen te worden. Dit is een belangrijke factor aangezien de absorptie van SAP A groter is dan SAP C.

Proefstukken met SAP B geven de beste resultaten. De korrels zijn groot genoeg om de scheur te overbruggen en voor blokkering te zorgen. Een verhoging van het massaprocent aan SAP geeft een op het eerste zicht onlogisch resultaat. Er wordt verwacht dat hoe hoger het massaprocent aan SAP, hoe meer dichting er is. Het beste resultaat wordt verkregen indien 1 m% SAP B wordt toegevoegd. Een verhoging van het massaprocent geeft echter ook een zwakkere matrix, en dus meer scheurvorming en dus meer mogelijkheid voor de vloeistof om een andere baan te zoeken. Ook de gevormde holten van de SAP dragen bij voor meer holtes waardoor de vloeistof kan migreren. Ook is er bij vermeerdering van het massaprocent aan SAP B een vermindering in verwerkbaarheid en een zwakkere matrix.

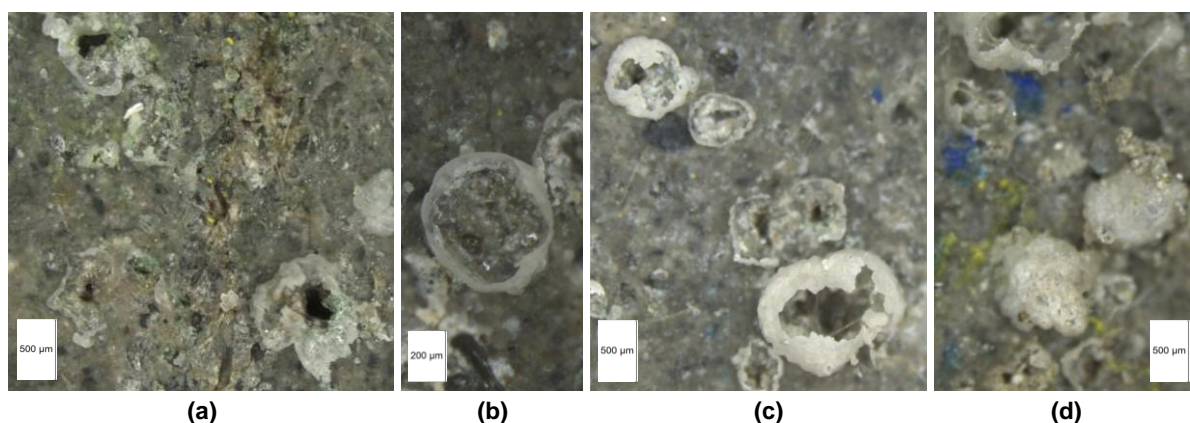
4.4.3. Heling aan de inlaatzijde

Studie van de scheuren aan de inlaatzijde (bovenkant in de opstelling voor de permeabiliteitstesten in Figuur 69) leidt tot enkele conclusies. Aan de inlaatzijde is er sprake van weinig kristalvorming (Figuur 190a&b) tot duidelijke kristalvorming die de scheur dicht (Figuur 190c). Het water spoelt helende agentia namelijk in de scheur en er zal meer dichting zich voordoen in het inwendige van de scheur.



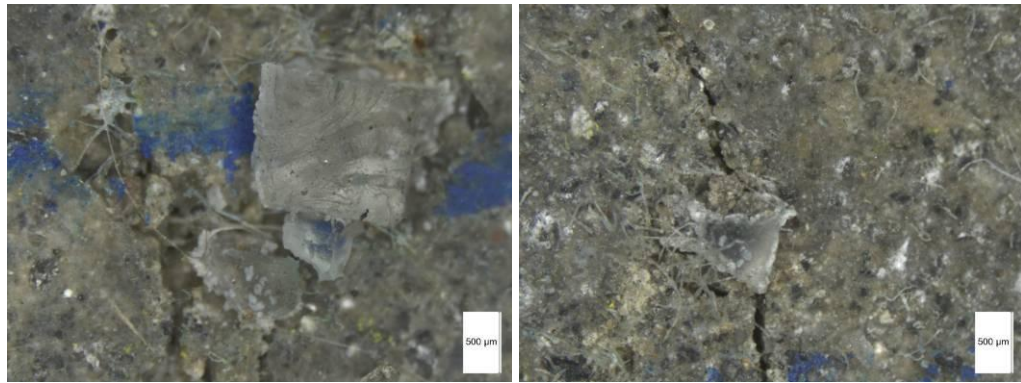
Figuur 190: Scheur aan de inlaatzijde na 30 dagen permeabiliteit (REF (3), REF (1))

De SAP waren steeds duidelijk zichtbaar op het morteloppervlak, en na droging lieten ze kristalvorming achter. Dit geeft weer dat SAP ook instaan, naast het dichten van de scheur, voor het stimuleren van zelfheling. Achtergelaten koepeltjes wit residu zijn te zien in Figuur 191. Figuur 191a toont teruggetrokken SAP B partikels waarbij kristallen achterblijven.



Figuur 191: Koepelvorming van zelfhelend materiaal door SAP (B2 (2), (2), (4) & B4 (5))

SAP hebben ook het nut als bron van microdefecten in de scheurvorming. SAP C-deeltjes zijn duidelijk zichtbaar, maar zijn nog groot (Figuur 192). Vandaar dat de proefstukken met SAP C in Figuur 189 niet veel daling van de doorlatendheid vertonen.

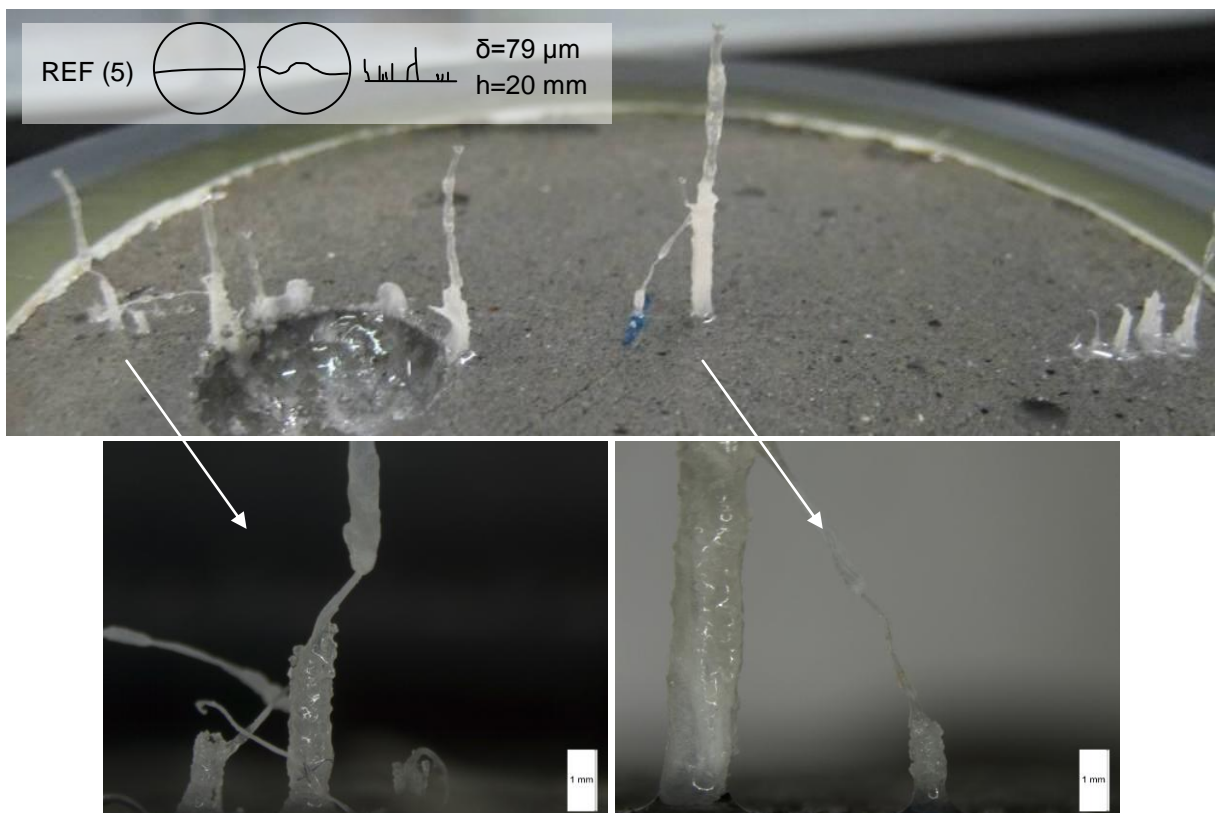


(a) (b)
 Figuur 192: Zichtbaar aanwezige SAP C (C1 (2) & C1 (3))

4.4.4. Heling aan de uitlaatzijde

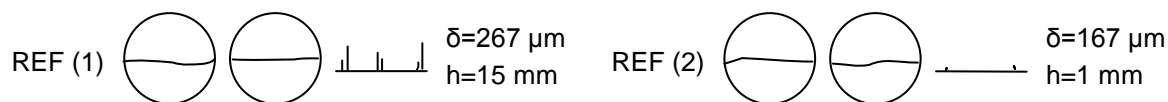
Aan de uitlaatzijde was er sprake van veel vorming van kristallen onder de vorm van stalactieten. In onderstaande figuren wordt er ook steeds schematisch de scheurvorming weergegeven van de grootste scheuren. De eerste figuur toont de scheur aan de inlaatzijde, de tweede aan de uitlaatzijde. Vervolgens wordt de stalactietvorming weergegeven met bijhorende scheurgrootte δ en hoogte h van de stalactieten (rudimentair).

REF (5) wordt weergegeven in Figuur 193. Er is duidelijke stalactietvorming en met een hoogte van 2 cm zijn er heel grote kristallen.



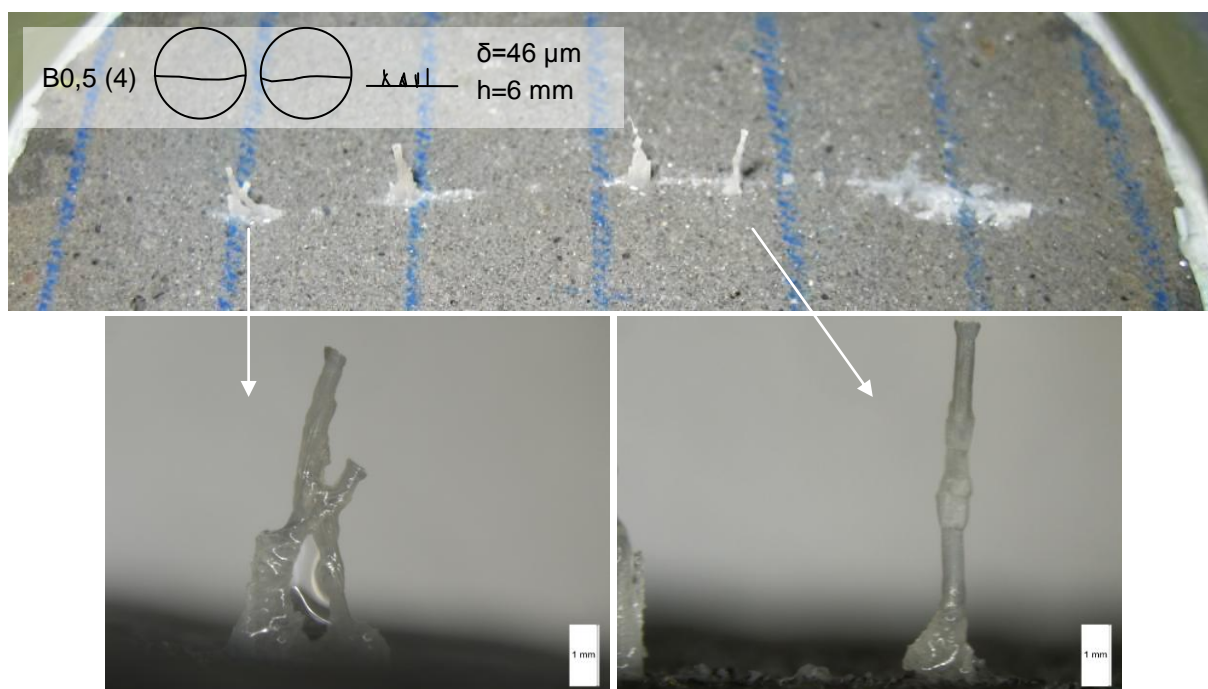
Figuur 193: Stalactietvorming bij REF (5)

REF (1) heeft ook veel stalactietvorming, en dit tegenover *REF (2)* (Figuur 194). *REF (5)* heeft dan weer meer stalactietvorming dan beiden. Dat *REF (5)* veel vorming vertoonde komt door de kleinere scheurwijdte en de lagere doorlatendheid waardoor de kristallen makkelijker gevormd worden. Het verschil tussen *REF (1)* en *REF (2)* kan zo niet verklaard worden. Ook is de doorlatendheid van *REF (2)* kleiner dan *REF (1)*. De stalactieten kunnen wel afgebroken zijn door golfwerking in de opstelling bij het ontmantelen.



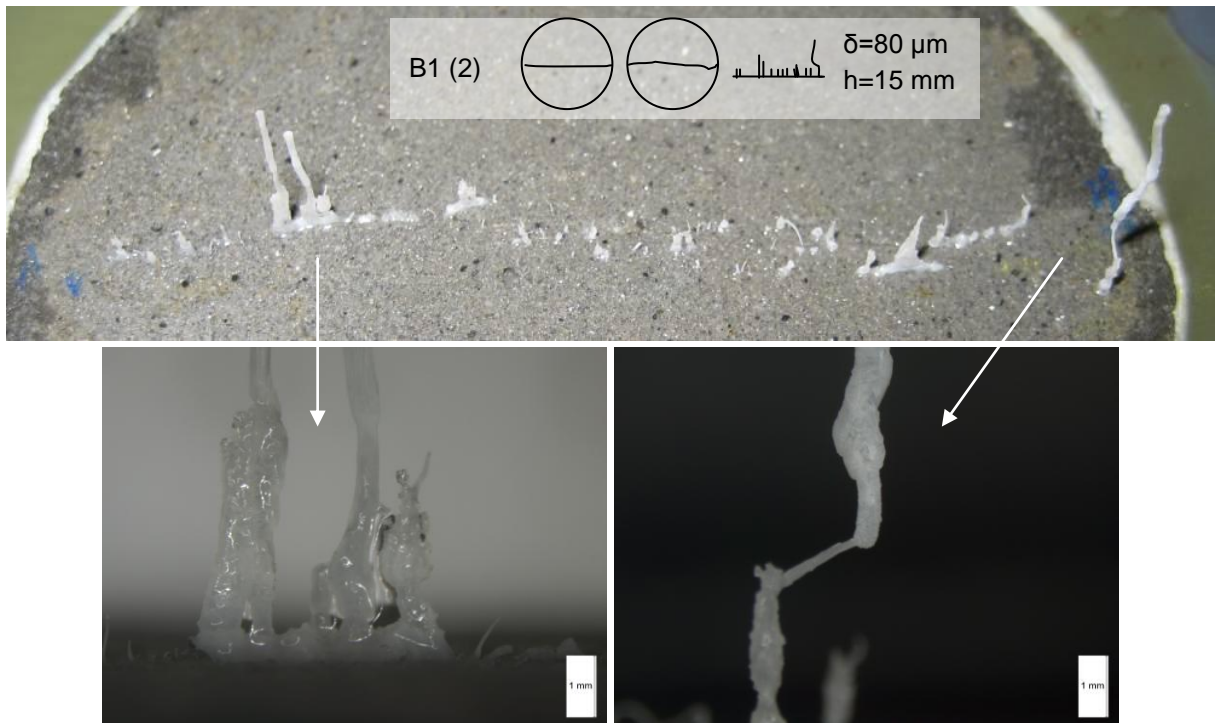
Figuur 194: Stalactietvorming bij REF (1) & (2)

Figuur 195 toont de stalactietvorming bij *B0,5 (4)*. Er zijn verdikkingen zichtbaar die lijken te duiden op de tijdstippen waarop de permeabiliteit werd opgemeten. Hierbij stroomt er water doorheen de scheur van het proefstuk. Dan is er echter ook een grotere uitstroom van zelfhelend materiaal dat dan voor meer stalactietvorming zorgt. SAP kunnen nu ook wegspoelen en zorgen voor een blokkering van de scheuren (dit naast het zwellen van SAP). De stroom concentreert zich daarom rond enkele punten waar uitstroom nog steeds mogelijk is. Zo worden de stalactieten gevormd rondom deze uitstroomgaten.



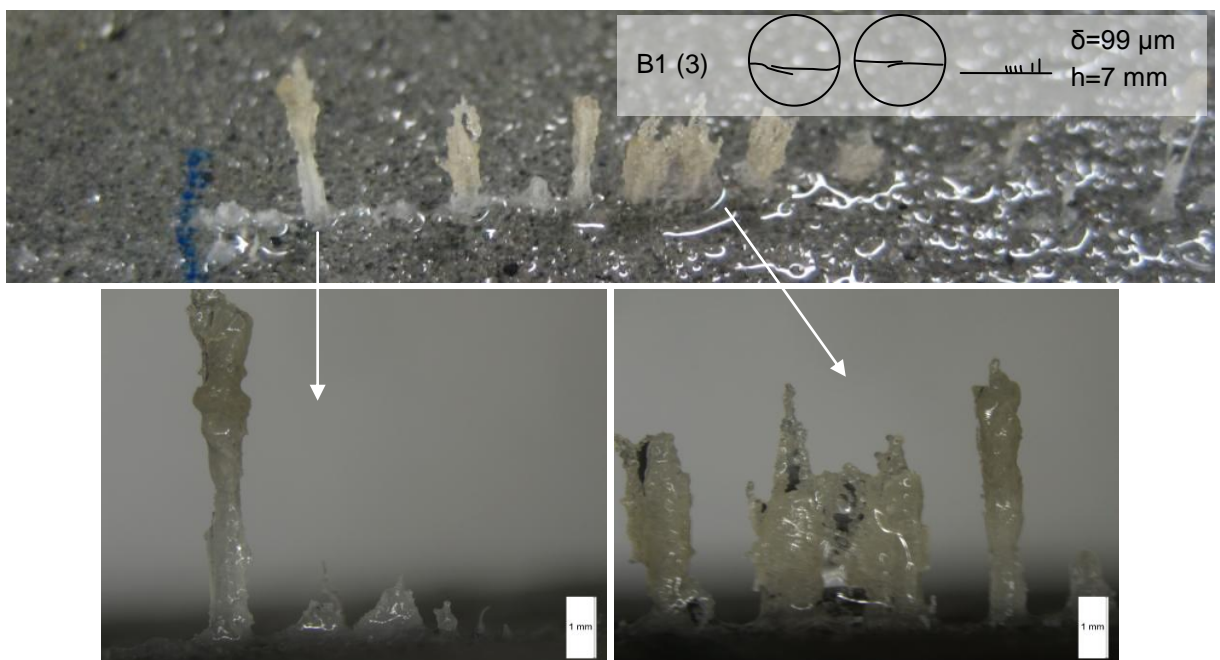
Figuur 195: Stalactietvorming bij B0,5 (4)

Het niet opmeten van de permeabiliteit voor een paar dagen bij *B1 (2)* is zichtbaar in Figuur 196. Er hebben zich namelijk grote basisconsoles gevormd. Ook complexe vormen zijn mogelijk waarbij er relatieve knikken gevormd worden.



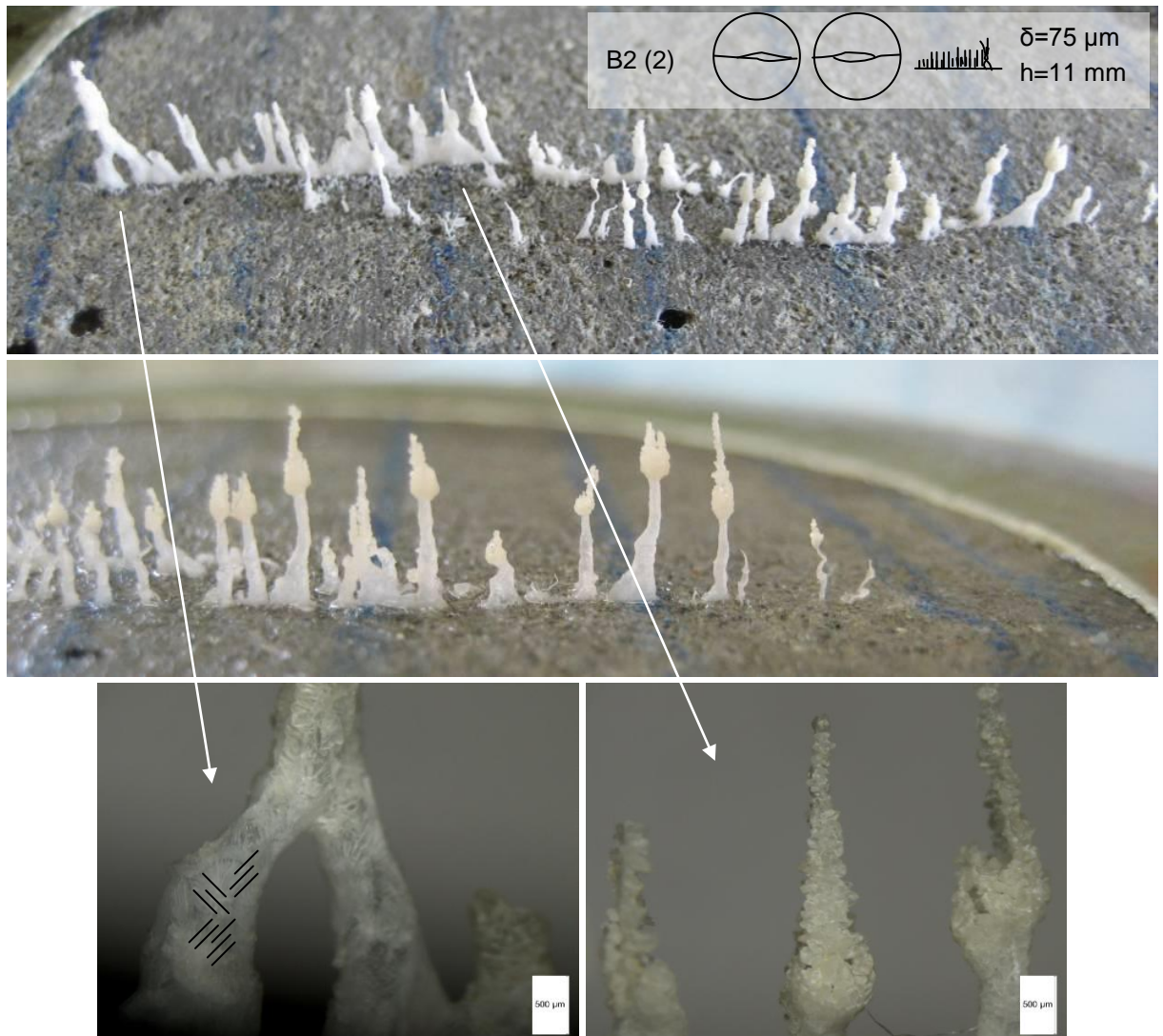
Figuur 196: Stalactietvorming bij B1 (2)

Er is ook uitstroom van gelig materiaal (Figuur 197). Dit kunnen hydratatieproducten zijn of SAP-partikels die ook geel uitschijnen na opname van cementfiltraat bij de absorptieproeven. De bepaling van de helende producten wordt in volgende paragraaf besproken.



Figuur 197: Stalactietvorming bij B1 (3)

De grootste stalactietvorming kwam voor bij B2 (2) (Figuur 198). De toppen van de stalactieten bevatten zelf fijne kristallen.

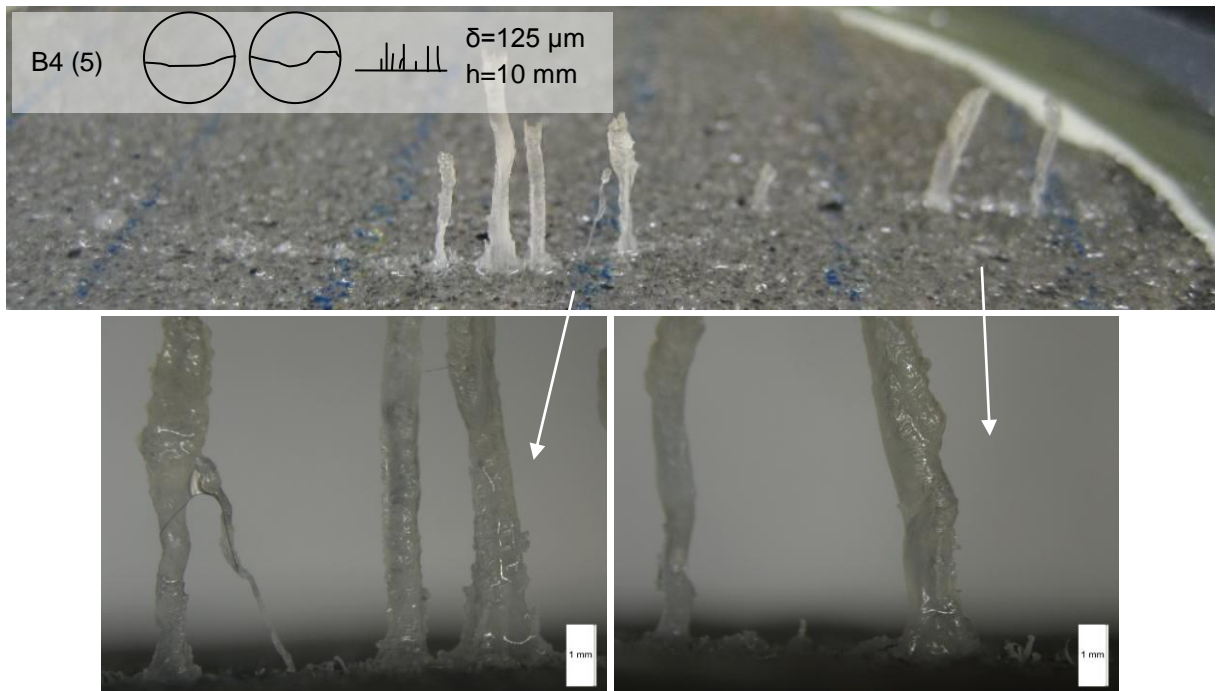


Figuur 198: Stalactietvorming bij B2 (2)

Ook zichtbaar is de kristallijne vorm linksonder in Figuur 198. De kristallen aligneren zich en vormen de stalactiet.

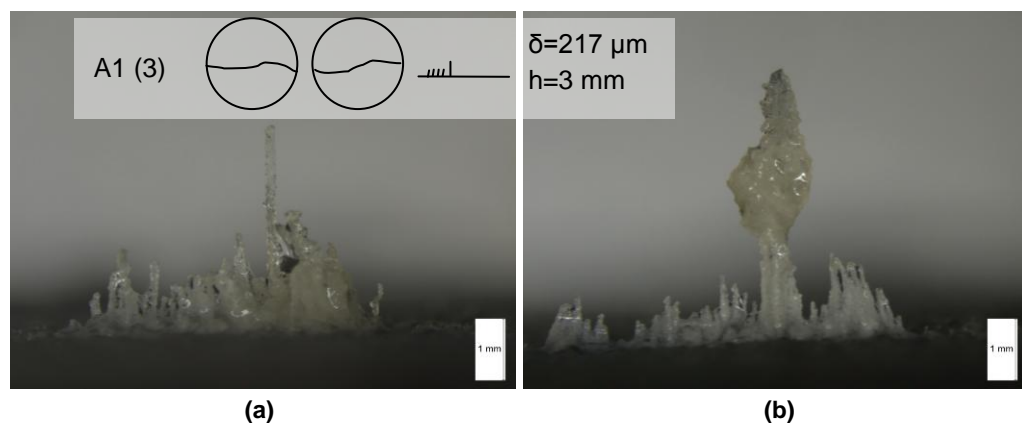
Het oppervlak in Figuur 198 is korrelig en bevat enkele koepels die achtergelaten werden door het inkrimpen van de SAP. Het oppervlak was geheel bezet met SAP die opzwellen na het contact met water.

Ook bij *B4* is de stalactietvorming waarneembaar (Figuur 199). Fijne vormen komen samen bij grotere vormen en tonen de complexe vorming van de stalactieten.



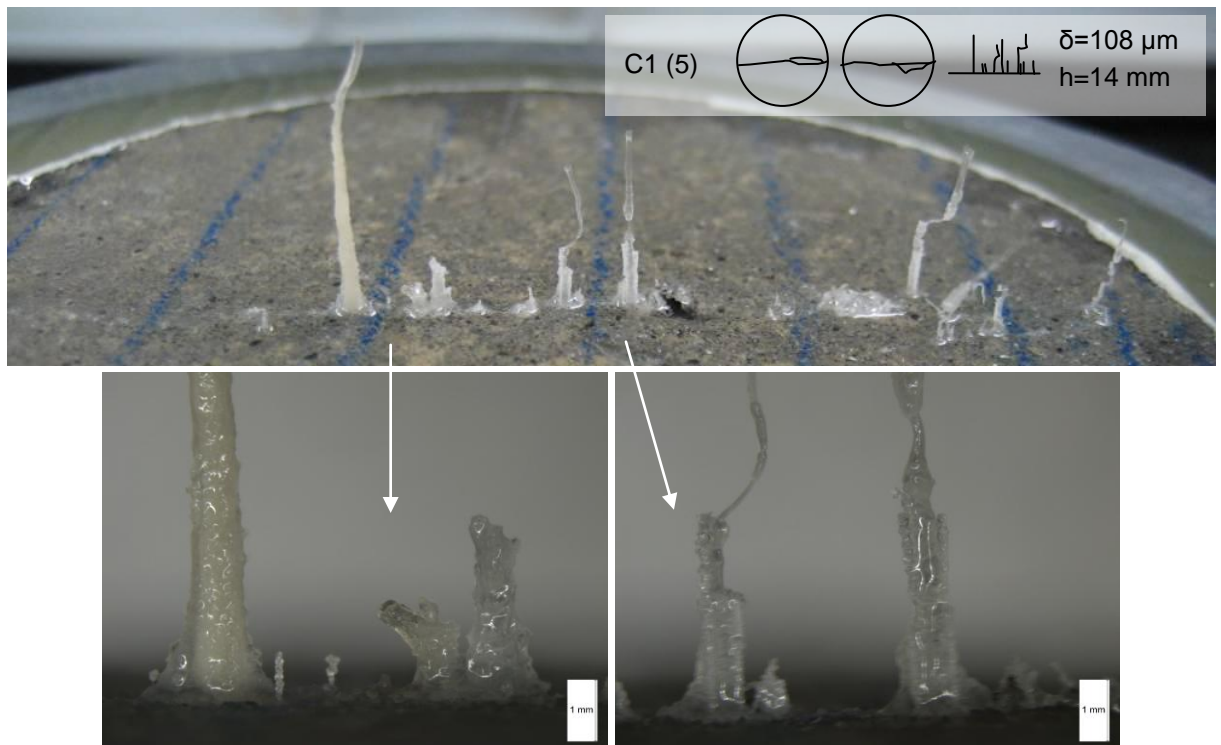
Figuur 199: Stalactietvorming bij B4 (5)

Figuur 200 toont de vorming van stalactieten bij SAP A. Deze zijn over het algemeen kleiner en Figuur 200b krijgt een gele schijn als top. Dit is waarschijnlijk uitgespoelde SAP A (fijnere korrel) die daar coaguleert. De SAP werd namelijk ook gelig door het opnemen van cementfiltraat in de absorptieproeven.



Figuur 200: Stalactietvorming bij A1 (3)

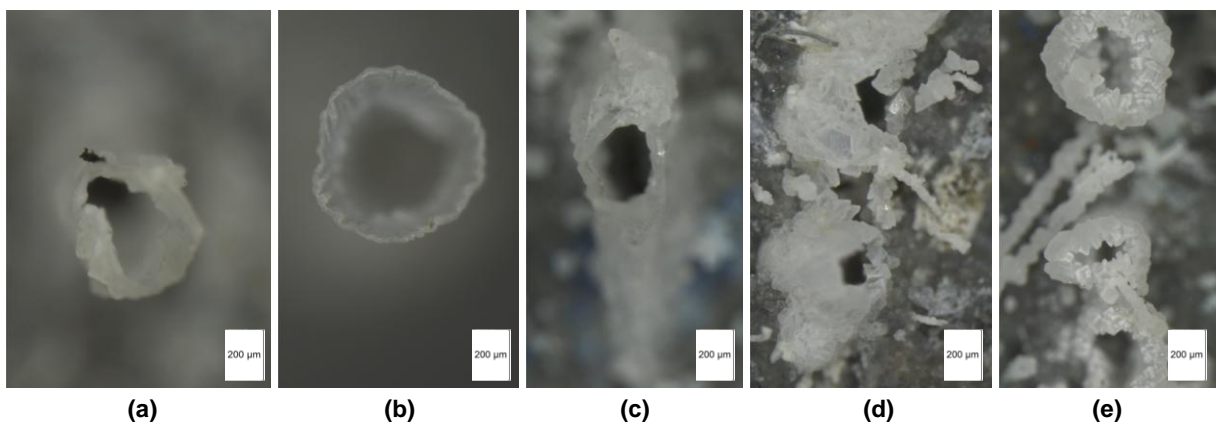
Proefstukken met SAP C geven een analoog beeld als de referentiestukken (Figuur 201). De conclusie is dat SAP C beter vermalen dient te worden om mee te spelen in de scheurdichting en de scheurheling.



Figuur 201: Stalactietvorming bij C1 (5)

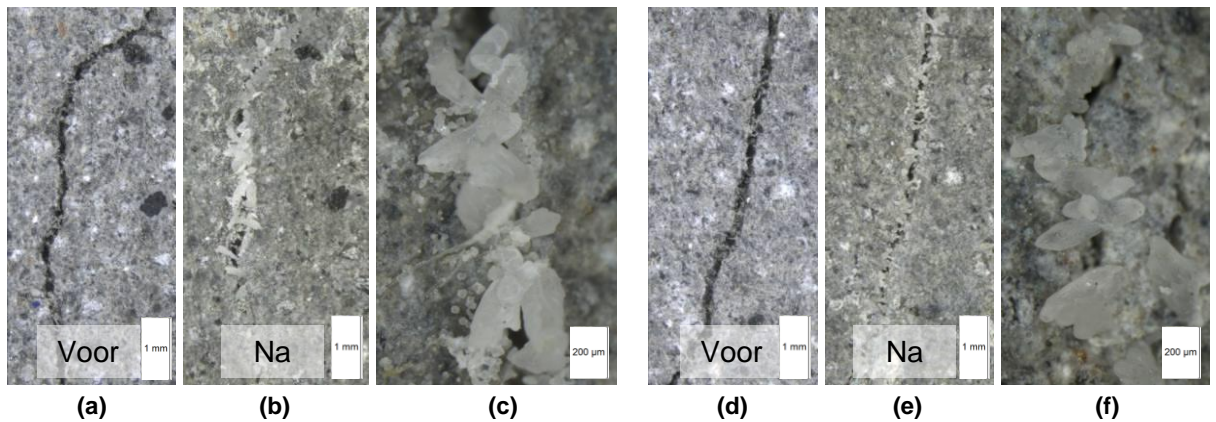
Alle proefstukken vertoonden stalactietvorming en overal in ruime vorm.

De stalactieten werden gevormd rondom uitstroomgaten en de stalactieten waren daarom hol vanbinnen (Figuur 202a,b&c). Afzettingen werden langs de buitenkant van uitstroomgaten opgebouwd tot een holle buis gevormd was. Dit was zo bij alle proefstukken (ook REF in Figuur 202a,b), dus dit heeft niets te maken met SAP. Soms was er een punt op de stalactieten die evenwel wel van SAP opgebouwd kunnen zijn, en waar een druipende stalactietvorm de overhand neemt. Figuur 202d toont uitstroomgaten met kristalvorming rondom. Figuur 202e toont dan weer duidelijke kristallen aan de top van een stalactiet.



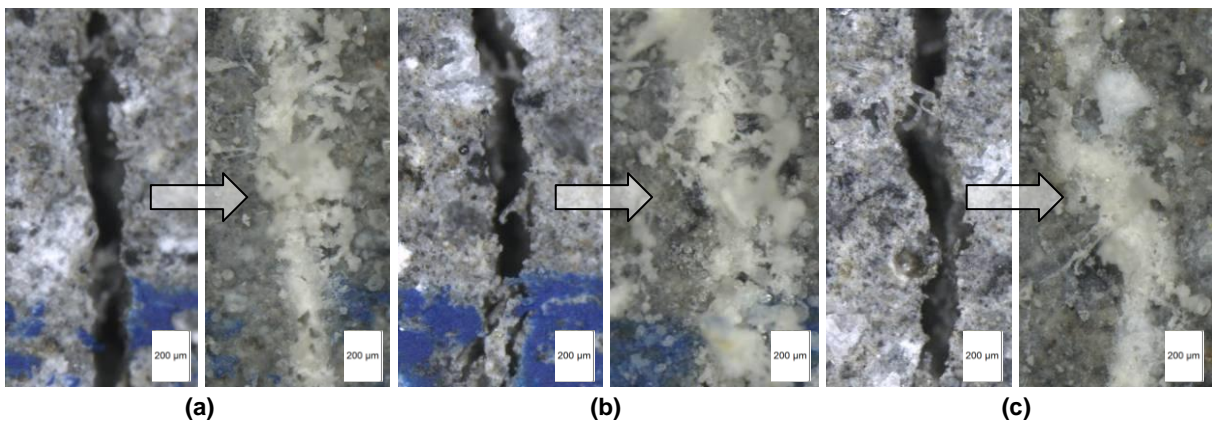
Figuur 202: Holle stalactieten (REF (1), REF (5), B0,5 (2), B1 (2) & B2 (3))

Figuur 203a/d toont een scheur voor de permeabiliteitsproef, Figuur 203b/e toont dezelfde scheur, maar na de proef. Figuur 203c/f is een detailopname van de gevormde kristallen. De scheur dicht door zelfheling en is in staat om haar dichtheid te herwinnen.

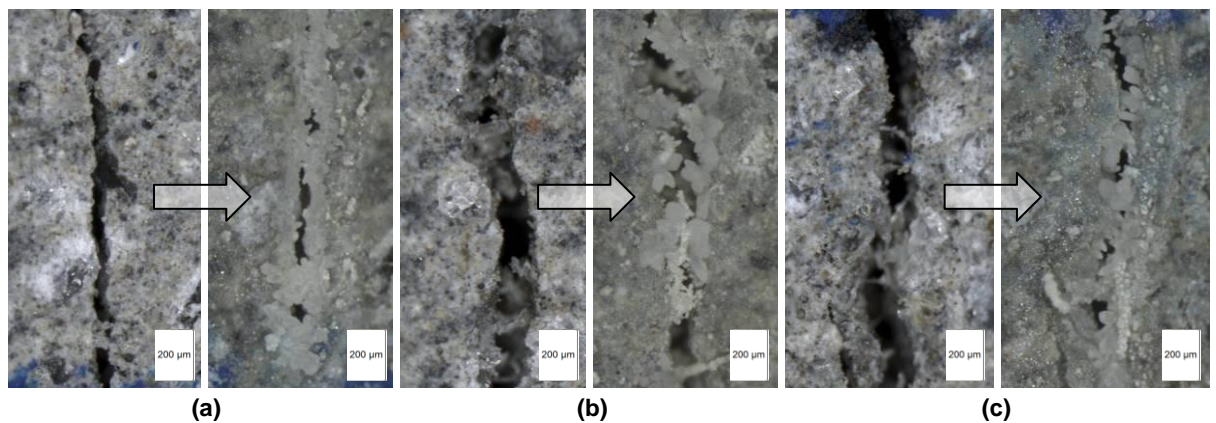


Figuur 203: Heling van de uitlaatscheur bij REF (2)

Figuur 204 toont drie scheuren die totaal geheeld zijn. Het water dat door de scheuren gaat, accumuleert bij uitstroomgaten, die dan stalactieten vormen. Ook kunnen scheuren meespelen in de doorlatendheid en moeten de kristallen de scheur nog overbruggen, zoals te zien is in Figuur 205.

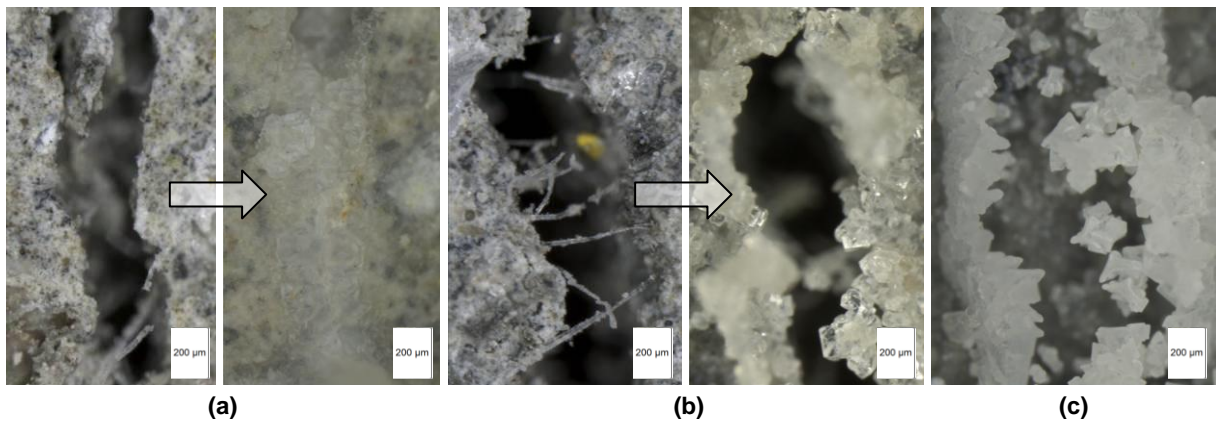


Figuur 204: Heling van uitlaatscheuren bij REF (4)



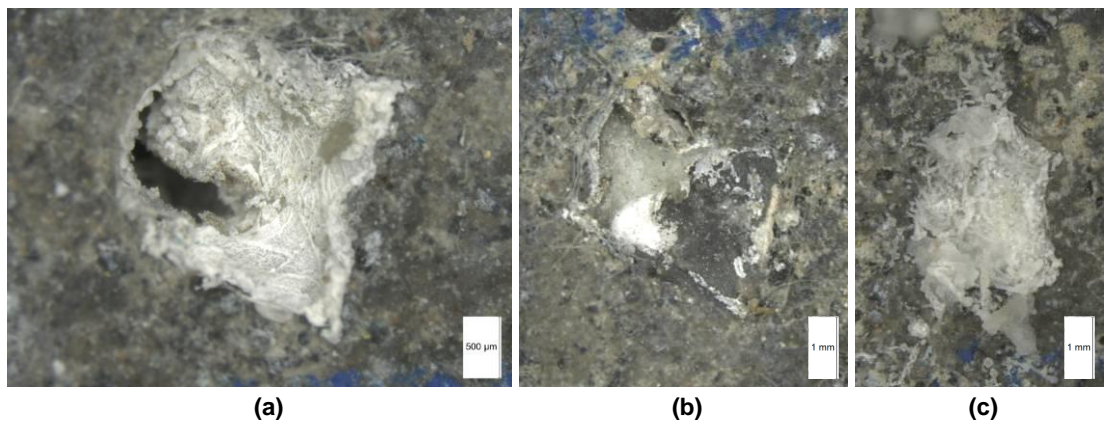
Figuur 205: Heling van uitlaatscheuren bij REF (4)

Figuur 206a toont een volledig gedichte scheur en Figuur 206b een scheur die moeilijk te overbruggen is. Figuur 206c toont uitloop via twee fijne scheuren en duidelijke kristalvorming. De kristalvorming in Figuur 206c wordt ook waargenomen door Homma (2009)^[45].



Figuur 206: Heling van uitlaatscheuren (a&b B1 (1), c B1 (3))

De grote SAP C-partikels zijn overduidelijk aanwezig op het oppervlak. Deze hebben ook gevormde helingproducten, zoals te zien is in Figuur 207.

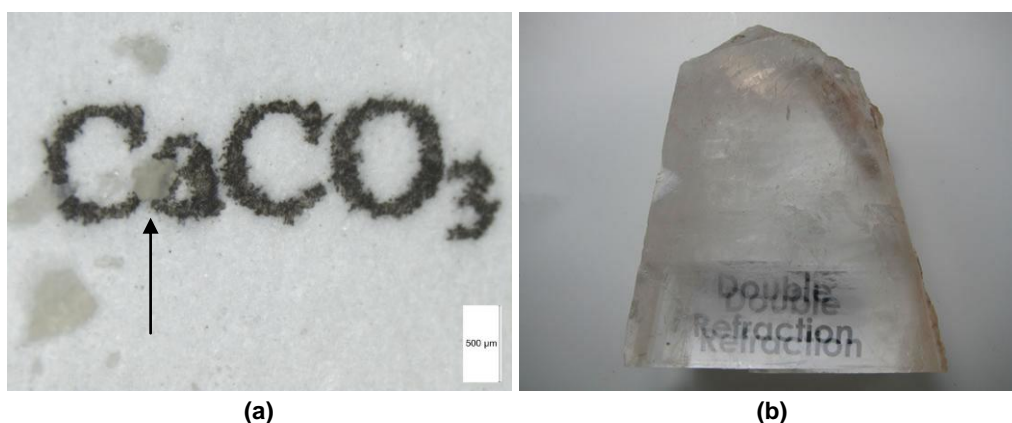


Figuur 207: Heling rondom SAP C (C1 (2), C1 (3) & C1 (5))

4.4.5. Identificatie zelfhelend materiaal, TGA

4.4.5.1. Visuele waarneming en inleiding

Het gevormde materiaal zou CaCO_3 moeten zijn. Puur calciet is dubbelbrekend, en mits wat goede wil is dit zichtbaar in Figuur 208a. Figuur 208b toont zuiver calciet.



Figuur 208: Dubbelbrekend calciet uit stalactiet en uit literatuur^[109]

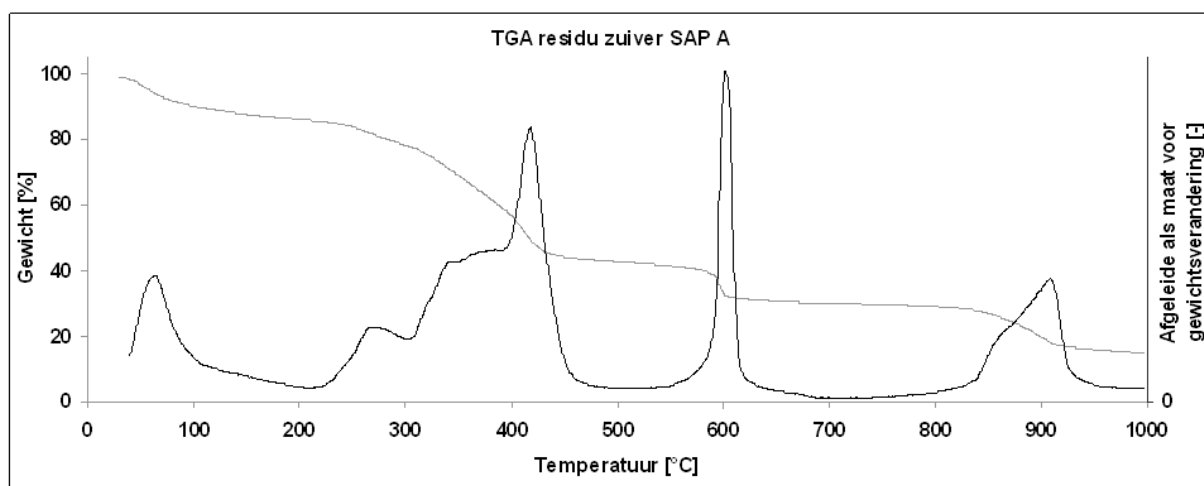
Een betere manier om het materiaal, afgezet in de stalactieten, ten identificeren is gebruik maken van een TGA. Hierbij werden eerst de drie soorten SAP, SAP A; SAP B en SAP C (81,5 %, 2 u), onderzocht op hun degradatietemperatuur. Deze resultaten werden vergeleken met de TGA van de verschillende proefreeksen.

4.4.5.2. TGA van zuiver SAP

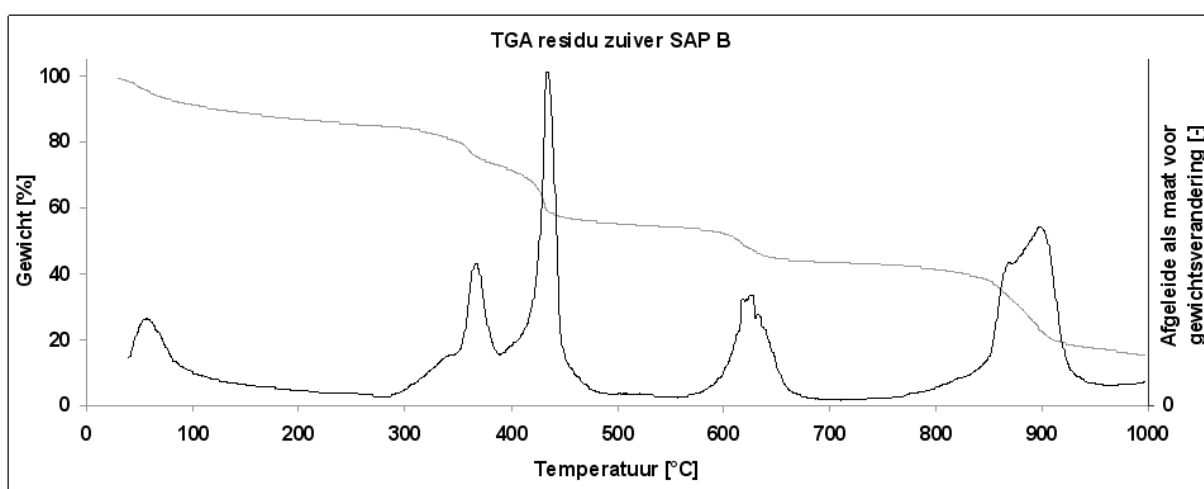
Een TGA van zuiver SAP werd uitgevoerd om na te gaan of er SAP uitgespoeld werd en in de stalactieten werd vastgehouden. De gewichtsverandering werd uitgedrukt als de eerste afgeleide (zwart in volgende figuren) van de TGA-kromme (grijs in volgende figuren).

SAP A en SAP B vertonen een degradatiegedrag tussen 250 °C en 450 °C en twee pieken rond 600 °C en 900 °C (Figuur 209 en Figuur 210). SAP A en SAP B vertonen ook een piek voor 100 °C. Dit duidt op vocht dat door het SAP werd opgenomen en verdampt in de TGA. Het SAP was een maand voordien gedroogd en gesloten bewaard in een bekertje. SAP nemen snel eender welk vocht op. Dit is een eigenschap die zowel uit de DVS-metingen (paragraaf 4.2.4) als uit het herstel van mechanische eigenschappen bleek (paragraaf 4.3.3). SAP A neemt relatief gezien meer vocht op dan SAP B, net zoals bij de DVS-metingen door een hogere specifieke oppervlakte van SAP A ten opzichte van SAP B.

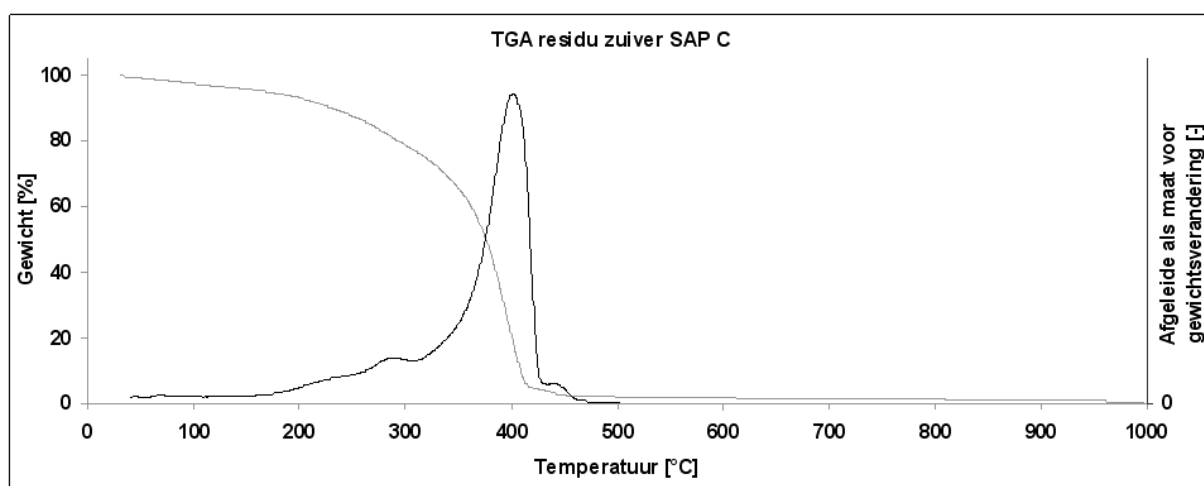
SAP C vertoont een degradatietemperatuur rond 400 °C, te zien in Figuur 211. Het materiaal begint te decomposeren rond 250 °C.



Figuur 209: TGA-curve en haar afgeleide als maat voor gewichtsverandering (SAP A)



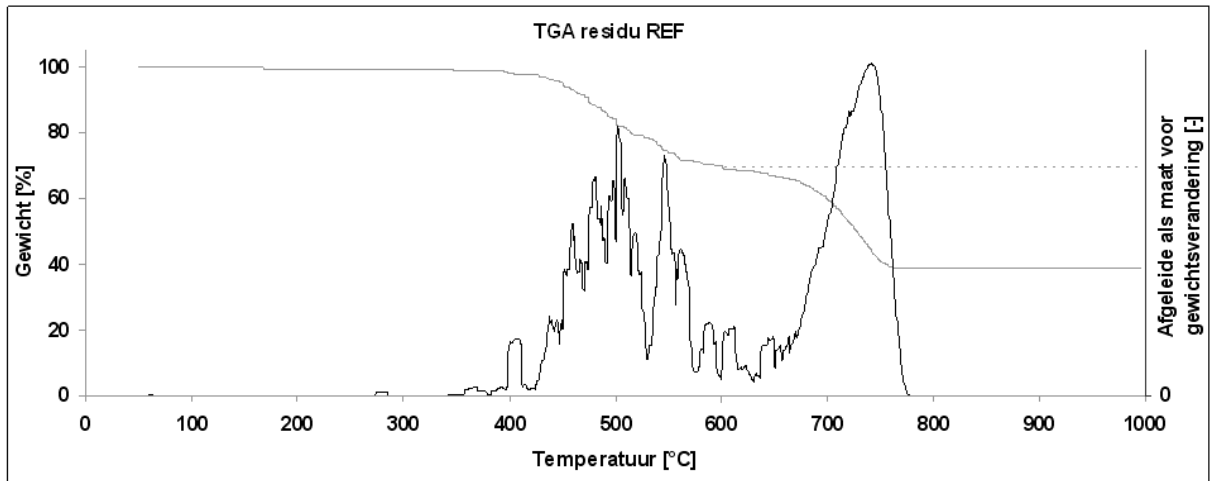
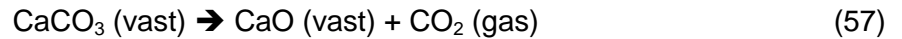
Figuur 210: TGA-curve en haar afgeleide als maat voor gewichtsverandering (SAP B)



Figuur 211: TGA-curve en haar afgeleide als maat voor gewichtsverandering (SAP C)

4.4.5.3. TGA van de onderzochte proefreeksen

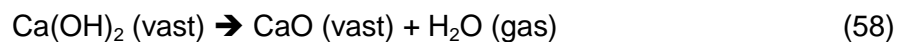
Van elke proefreeks werd het helend materiaal onderzocht. Bij de referentiestukken (Figuur 212) werd een maximale gewichtsverandering waargenomen tussen 700 °C en 750 °C. Dit wordt aangeduid met de eerste afgeleide van de TGA-kromme. De piek duidt op CaCO_3 dat rond die temperatuur degradeert in CaO en CO_2 .^[108]



Figuur 212: TGA-curve en haar afgeleide als maat voor gewichtsverandering (REF)

Voor deze piek is er degradatie van andere producten die niet CaCO_3 zijn. Dit kan als volgt gezien worden. Indien naar het atoomgewicht voor Ca (40,08), C (12,01) en O (16,00) gekeken wordt, dan is het atoomgewicht van CaCO_3 (100,09), CaO (56,08) en CO_2 (44,01) ook gekend. De stoichiometrische coëfficiënten zijn allen één in formule (57). CaO blijft bij decompositie van CaCO_3 achter en het gas ontsnapt. Zo komt er een massaverlies van $44,01/100,09=43,97\%$. Deze waarde wordt ook weergegeven in Figuur 212 door een stippellijn bij de onderstelling dat enkel CaO overblijft bij 1000 °C. Dit komt overeen met een evenwicht in de TGA-curve. Er bevinden zich dus nog enkele pieken in het interval 400-600 °C. Dit kunnen hydratatieproducten uit de portlandreactie (23) zijn.

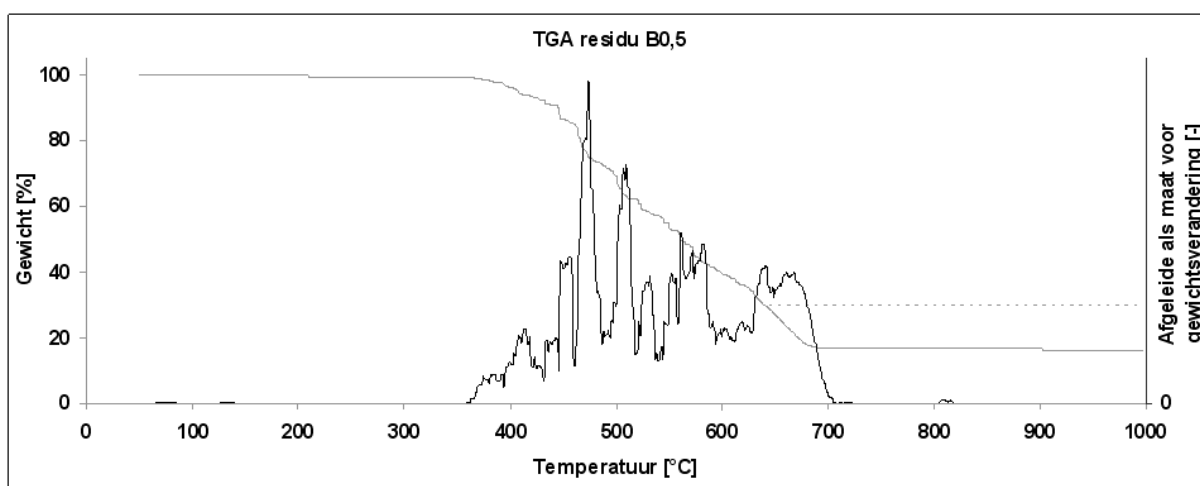
Beaudoin et al. (2006)^[110] toonden aan dat de degradatie van zuiver $\text{Ca}(\text{OH})_2$ uit de verdergaande hydratatie start rond 320 °C, een piek vertoont rond 480 °C en stopt rond 510 °C. Dit is ook het geval in Figuur 212. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ degradeert ook tot CaO met de vorming van waterdamp.



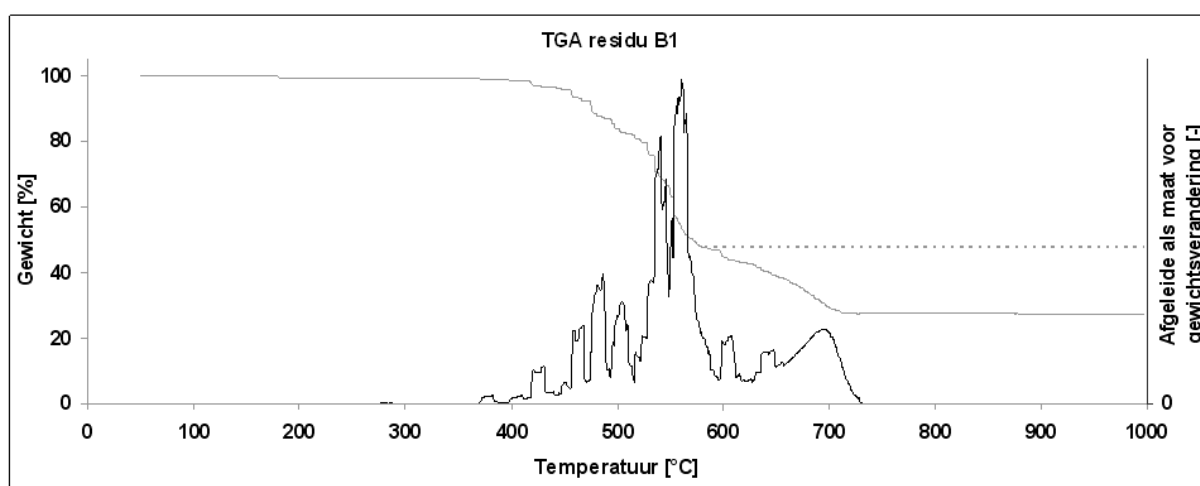
Opnieuw kan het massaverlies bepaald worden met nu ook het atoomgewicht van H (1,008). Het atoomgewicht van $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is 74,096 en van H_2O 18,016. Het massaverlies bedraagt 24,31 %. Deze waarde verklaart waarom de stippellijn in Figuur 212 iets boven de werkelijke startwaarde voor de degradatie van CaCO_3 ligt doordat $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ook CaO als degradatieproduct heeft.

Ook C-S-H decomposeert rond een temperatuur van 500-600 °C naar CaO, H₂O en een andere vaste fase van C-S-H.^[111] Dit kan de tweede piek zijn in Figuur 212. Er is dus sprake van Ca(OH)₂, C-S-H en CaCO₃ bij de referentiestukken.

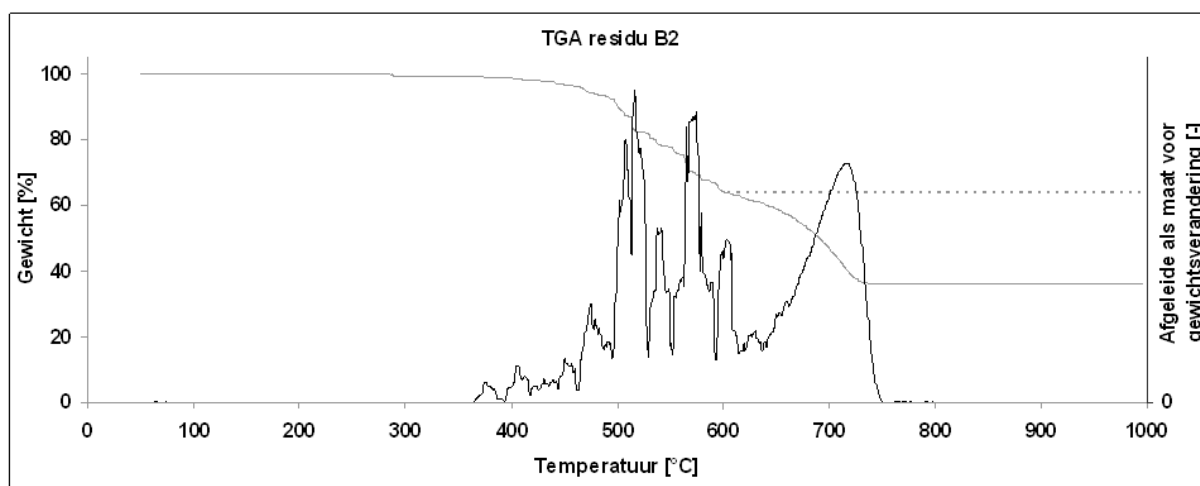
Figuur 213 tot Figuur 216 tonen een TGA-curve van het residu van de proefstukken met SAP B. De piek van CaCO₃ is gemaskeerd maar nog steeds aanwezig, zo ook de piek rond 480 °C. De Ca(OH)₂-decompositie is duidelijk aanwezig, zo ook de aanwezigheid van C-S-H. De pieken van SAP B uit Figuur 210 zijn niet te bespeuren. SAP B wordt dus niet vastgehouden in de stalactieten. Bij 0,5 m% zijn de pieken ongeveer even groot, bij 1 m% zijn echter de 'hydratatie'-pieken het grootst. 2 m% geeft analoge pieken als 0,5 m% en 4 m% iets grotere 'hydratatie'-pieken. De trend is dezelfde in Figuur 189. Er worden meer SAP gebruikt in de zelfheling en zelfdichting van de scheur, waarbij het SAP vloeistof opneemt met daarin vormen van hydratatieproducten (cf. cementfiltraat). De vloeistof met hydratatieproducten wordt uitgespoeld en weergegeven in de TGA-krommen. Dit geeft de stalactieten de gelige schijn.



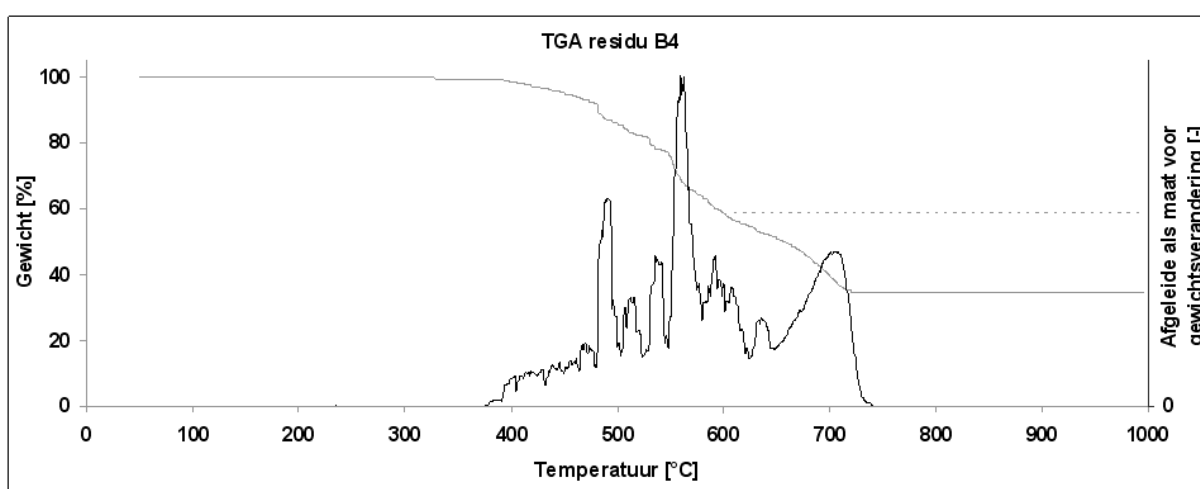
Figuur 213: TGA-curve en haar afgeleide als gewichtsverandering (0,5 m% SAP B)



Figuur 214: TGA-curve en haar afgeleide als gewichtsverandering (1 m% SAP B)

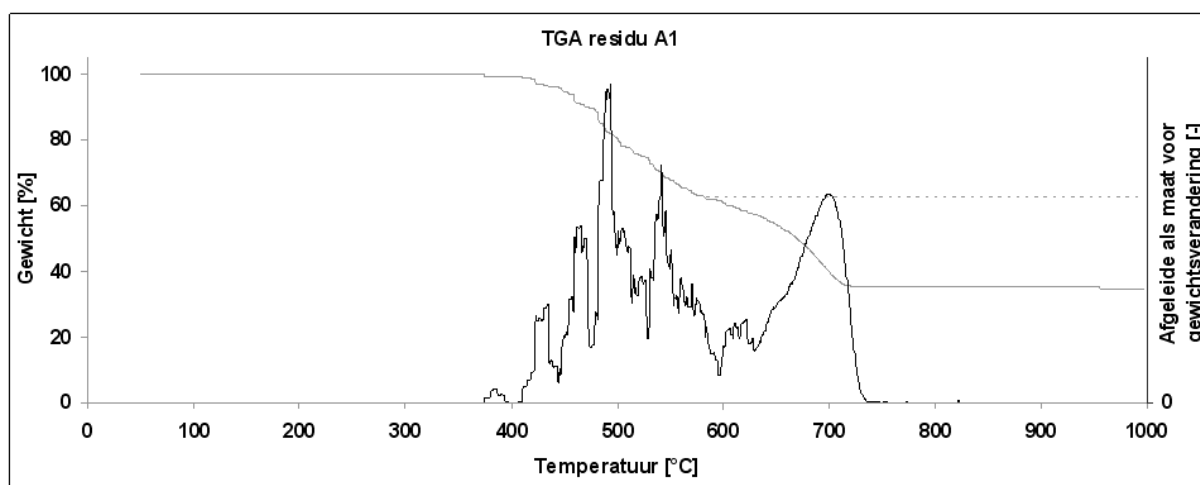


Figuur 215: TGA-curve en haar afgeleide als gewichtsverandering (2 m% SAP B)



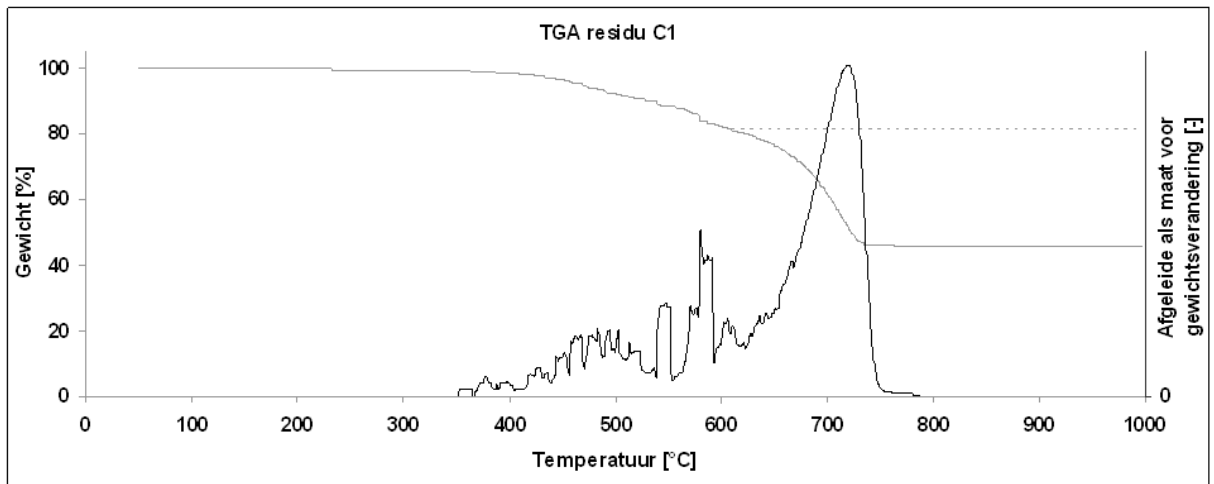
Figuur 216: TGA-curve en haar afgeleide als gewichtsverandering (4 m% SAP B)

Proefstukken met SAP A (Figuur 217) hebben ongeveer hetzelfde effect als 4 m% SAP B. Hoewel de korrelgrootte kleiner is dan deze ten opzichte van SAP B, nemen SAP A nog steeds vloeistof op, en zorgen voor een uitstroom van hydratatieproducten.



Figuur 217: TGA-curve en haar afgeleide als gewichtsverandering (1 m% SAP A)

De TGA-curve van de stalactieten uit proefstukken met SAP C (94 %, 2 u) in Figuur 218 toont een uitgesproken CaCO_3 -piek. De SAP-partikels waren te groot voor een goede verspreiding en de absorptie ligt lager ten opzichte van SAP A en SAP B. Daardoor zijn er minder 'hydratatie'-pieken.



Figuur 218: TGA-curve van proefstukken met SAP C

Er kan besloten worden dat de stalactieten bestaan uit hydratatieproducten, zoals $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en C-S-H, en uit CaCO_3 . Er was dus sprake van zelfheling.

5. Discussies en connecties

5.1. Superabsorberende polymeren

De verwerkbaarheid en de verharding gaan hand in hand. Een mengsel dat moeilijk verwerkbaar was, vertoonde een trage verharding. Het droog inmengen van SAP A gaf een verlaging van de verwerkbaarheid en de verharding was ook trager. Het inmengen als gelvorm van SAP A gaf een verbetering van de verwerkbaarheid. SAP A nemen namelijk traag vloeistof op en onttrekken deze van het water dat instaat voor primaire hydratatie indien deze SAP-korrels droog ingemengd worden. Het als gel inmengen zorgt er voor dat de SAP al verzadigd zijn op voorhand. Dat zorgde voor een viskeus mengsel dat goed verwerkt kon worden. Het water dat opgenomen werd door het SAP wordt tijdens het mengen afgegeven. Het vrije Ca^{2+} neemt namelijk de rol op zich van het Na^+ bij een zout dat voor afscherming zorgt in het SAP. Het water in het SAP wil de Ca^{2+} -rijke vloeistof rondom stabiliseren en het water gaat uit het SAP wat de verwerkbaarheid ten goede komt.

SAP B gaf een verhoging van de verwerkbaarheid bij het droge toevoegen ervan en een verlaging bij het als gelvorm toevoegen. Dat komt doordat SAP B grote korrelgroottes vertonen en agglomeraten vormen die moeilijk doormixt kunnen worden. De absorptie van SAP A en van SAP B is ongeveer hetzelfde. Het verschil in verwerkbaarheid met SAP A is voornamelijk te wijten aan de kleinere korrelgrootte maar ook de tragere absorptie van SAP A. Dit werd weerspiegeld in de zweltijd die beduidend hoger is voor de kleine SAP A dan voor de grote SAP B. Zowel in de filtratiemethode, als in het microscopisch onderzoek absorbeerde SAP A trager dan SAP B. SAP C zit tussen de twee in maar toont dat kleinere partikels sneller hun vloeistof opnemen. Het als gel inmengen zorgt voor een samenscholing van SAP die dus minder verspreid zijn in de matrix. Daardoor wordt hun vocht lokaal afgegeven en de middelste korrels zullen geen vocht of water kunnen opnemen in curingcondities doordat de omringende SAP de toegang versperren.

Hoewel de absorptie bepaald werd in cementfiltraat, wordt er in beton best gerekend met ongeveer $\frac{1}{2}$ tot $\frac{2}{3}$ keer [g cementfiltraat/g SAP] aangezien de absorptie anders is dan in een 'ideale' poriënvloeistof. Dit als algemene opmerking.

De 'theezak'-methode in de literatuur beschreven gebruikt het verschil in massa voor en na absorptie van de SAP. Via het volumeverschil voor en na de proef van de uitgefiltreerde vloeistof wordt de absorptiewaarde via de filtratiemethode berekend. Hierbij is er een betere controle van het water opgenomen door de filterzak en het SAP. De waarde die bekomen wordt is hetzelfde als deze via microscopisch onderzoek. Microscopisch onderzoek is echter tijdrovend door het gradueel toevoegen van water en heeft sferische partikels nodig. Het SAP C had hoekige vormen waardoor de absorptie niet representatief zou zijn. Het SAP C met een modificatiegraad van 94 % vertoonde wel sferische partikels. Microscopisch onderzoek sluit het adhesief vasthouden van water tussen SAP uit. Dat de absorptiewaarde niet significant verschillend is aan de waarde verkregen via de filtratiemethode toont het verwaarloosbaar karakter van het adhesief vasthouden bij de filtratiemethode.

Ook moeten de partikels groot genoeg zijn om graduele toevoeging van water toe te laten. SAP A bleek te klein.

SAP nemen veel vloeistof op, maar weinig damp. Dat werd weerspiegeld in de DVS-metingen en was ook visueel zichtbaar. SAP C, welke initieel niet gedroogd was, gaf een lagere absorptiewaarde van vocht dan er initieel aanwezig was. Dit toont heel duidelijk dat SAP meer absorberen in een vloeistof dan in een vochtige atmosfeer. De SAP dienen echter altijd gedroogd te worden voor elke proef.

5.2. Mechanische eigenschappen

Een verhoging van het massaprocent aan SAP B gaf een verlaging van de buigtreksterkte en druksterkte. Met het inmengen van een hoger massaprocent SAP, dalen ook de eerste scheur-sterkte en de piekwaarde bij de vierpuntsbuigproeven. Bij de splijttesten voor de permeabiliteitsproeven daalde de splijttreksterkte met verhoging van het massaprocent.

Voor het verkrijgen van goede mechanische karakteristieken moet er steeds gebruik gemaakt worden van sferische SAP. Deze leiden de krachten beter weg via koepelvorming bij drukproeven en zullen door hun minder hoekig karakter voor minder scheurinitiaties zorgen bij trekproeven.

Hoewel de gecottoniseerde vlasvezel de mechanische eigenschappen ten opzichte van de technische vlasvezel aanzienlijk zou moeten verhogen, blijkt dit slechts deels te gebeuren. De eigenschappen verbeteren, maar hebben niet het verhoopte effect.

5.3. Meervoudige scheurvorming

Indien een grote scheur gevormd wordt bij een hoge belasting, zijn de helende eigenschappen snel uitgeput aangezien grote scheurwijdtes niet overbrugd kunnen worden door helende producten. Door vorming van meerdere kleinere scheuren, zijn de helende eigenschappen niet uitgeput en kan elke individuele scheur helen. Er zijn meer nodige chemische bestanddelen voorradig bij meerdere kleine scheuren dan bij één grote scheur. De meervoudige scheurvorming heeft dus een groot nut en wordt verkregen door het inmengen van vezels.

Hoe hoger het hydrofiele karakter van de vezel, hoe lager het gehalte aan meervoudige scheurvorming. Het gehalte aan meervoudige scheurvorming stijgt als volgt: gecottoniseerde vlasvezel, technische vlasvezel, PVA-vezel, PVA-vezel van Kuraray en PP-vezel. De snelheid van verharding daalt met dezelfde volgorde. Dat is logisch aangezien de PP-vezels een hechtsterkte hebben van nul. PVA-vezels van Redco en Kuraray hebben dit niet en hebben steeds een hydrofiele neiging (Kuraray-vezels minder dan Redco-vezels). Vezels met een kleine hechtsterkte kunnen glijden in de matrix en zorgen voor een hoge ductiliteit welke zich weerspiegelt in meervoudige scheurvorming.

De PVA-vezels zijn hydrofiel, wat de meervoudige scheurvorming tegenwerkt. PVA-vezels kunnen met ontkistingsolie op het oppervlak worden bewerkt om het hydrofiele karakter deels teniet te doen. De eigen coating van de vezel met ontkistingsolie gaf weinig verschil met de ongecoate vezel. De Kuraray vezel die fabrieksgewijs gecoat werd, gaf wel significant betere resultaten. De druppelsgewijze toevoeging van ontkistingsolie blijkt een slechte verspreiding rond de vezels te geven en enkel lokaal is de vezel gecoat.

Bovenstaande verhouding werd ook weerspiegeld in de breuktip scheurtaaiheid J_{tip} welke de makkelijkheid van scheurvorming weergeeft. Het zelf coaten van de PVA-vezel geeft een lagere J_{tip} doordat de hydrofiele eigenschappen van de PVA-vezel van Redco deels teniet zijn gedaan. Daarom glijdt de vezel makkelijker in de matrix en dat zorgt voor minder 'moeite' tot scheurvorming (formule (11)). Ook een lagere W/C-factor heeft een dergelijk resultaat en een lagere J_{tip} . Mengsels met PP-vezels hebben een lagere J_{tip} dan de mengsels met PVA-vezels. Dat weerspiegelt zich ook in een lagere weerstand tot scheurvorming en een chemische bindsterkte gelijk aan nul. Ook proefstukken met SAP vertoonden een lagere J_{tip} . Het feit dat de eigen coating van de vezel geen goede resultaten gaf, is omdat er nog een tweede voorwaarde diende te voldoen. Indien de matrix te sterk is, zullen de vezels niet genoeg sterkte vertonen om de krachten op te nemen. Dat is de tweede voorwaarde in formule (12). Tijdens het onthechten kan de vezel breken als de last P de vezeltreksterkte overschrijdt, wat vaak het geval is in PCA-ECC door de chemische bindsterkte. De matrixsterkte kan verlaagd worden door het invoegen van SAP of het verlagen van de water/cement-factor.

$$\text{Eerste voorwaarde:}^{[17]} \quad J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_m} \leq \sigma_0 \cdot \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \equiv J_b' \quad (11)$$

$$\text{Tweede voorwaarde:} \quad \sigma_c \leq \sigma_0 \quad (12)$$

De vlasvezels gaven minder goede resultaten dan de synthetische vezels. Vlasvezels zijn echter beter voor het milieu en zo wordt de vlasstengel goed benut. Ook blijkt er een lichte vorm van meervoudige scheurvorming op te treden, wat toch duidt dat natuurlijke vezels hier ook dienst kunnen doen.

De scheuraanbreng van 1 vol.% aan PVA-vezels gaf een lichte vorm van meervoudige scheurvorming bij de Braziliaanse splijtproef bij de proefstukken van de permeabiliteitsproef. Een verlaging van het volumepercentage vermijdt dit effect, maar zorgt voor een ongecontroleerde grote scheurvorming. Een verhoging van het volumepercentage aan vezels zorgt voor meer meervoudige scheurvorming. Bij de permeabiliteitsproef moet er om het effect van SAP te bestuderen zowel scheurcontrole zijn en een enkele scheur. Beter zou zijn om met twee staalvezels de scheurvorming gecontroleerd te laten geschieden. Zo wordt er geen meervoudige scheurvorming verkregen en is de scheurvorming beter gecontroleerd.

5.4. Bepaling van de hecht karakteristieken

De variant ter bepaling van de hechte eigenschappen komt goed overeen met de experimentele waarden. De methode is dus zeker evenwaardig met enkele-uittrekproeven. Deze laatste zijn moeilijk uit te voeren op korte vezels aangezien de vezels recht in een proefstuk moeten ingebed worden en de vezel goed moet vastgegrepen worden tijdens de uittrekproef. De grafische methode geeft dus veelbelovende resultaten.

5.5. Zelfheling

De maatstaven om zelfheling te meten, namelijk de herwonnen stijfheid, de herwonnen piekwaarde, de herwonnen meervoudige scheurvorming, de herwonnen eerste-scheursterkte en de herwonnen sterkte, vertonen hetzelfde beeld en zijn elk op zich een goed criterium voor de mate van opgetreden zelfheling. Soms werd een nieuwe scheur gevormd die zowel uit de herwonnen meervoudige scheurvorming bleek als via microscopisch onderzoek. Het dichten van de scheuren was goed op te volgen en de vezels zorgden mee voor de overbrugging van de scheur als hechtplaats voor calciumcarbonaat.

Bij een relatieve vochtigheid van meer dan 90 % ondervonden de proefstukken zonder SAP een heel lichte vorm van verdergaande hydratatie. Hoewel de proefstukken goed afgeschermd waren, konden er waterdruppels van de sproeiers op de proefstukken gevallen zijn die de zelfheling aanzwengelde.

Het inmengen van SAP verhoogt niet enkel de scheurvormingscapaciteit. De interne curing en optredende zelfheling bij inmengen van SAP kwam duidelijk naar voor en stimuleerde de zelfheling. Bij curing onder een relatieve vochtigheid van 60 % en groter dan 90 % blijkt er zelfheling te zijn opgetreden. SAP houden water en vocht vast en geven dit gradueel af aan de cementmatrix. Zo kan er verdergaande hydratatie optreden en dus heling. Hoewel de hoeveelheid vocht die opgenomen kan worden bij een $RV > 90 \%$ of een $RV = 60 \%$ laag is (cf. DVS-meting), is dit toch voldoende om de zelfheling aan te zwengelen. SAP helpen ook de vorming van calciumcarbonaat en dat was microscopisch zichtbaar door de vorming van 'koepels' kristallen. Deze waren ook zichtbaar bij de permeabiliteitsproeven.

De mate van zelfheling werd ook gestimuleerd door meer ongehydrateerd cement in de matrix. Dit was het geval bij een vroege scheuraanbreng en een lagere water/cement-factor. De vervanging van vliegias door kalksteenmeel gaf zowel een positief als negatief effect. Er is meer Ca^{2+} aanwezig wat de calciumcarbonaatvorming ten goede komt, maar er is minder vliegias om de puzzolane kant van de zelfheling via de vliegiasreactie op te roepen.

Soms werden nieuwe scheuren gevormd maar meestal werd de oude scheur gevolgd aangezien de proefstukken tot hun maximale meervoudige scheurvorming waren belast. Dit was om een extreme rek te bestuderen. Het feit dat sommige proefstukken deels heelden en nieuwe scheuren vertoonden geeft een goed en sterk beeld van de mogelijke zelfheling.

5.6. Zelfdichting

De meervoudige scheurvorming (inmengen van microvezels) wordt gecombineerd met het effect van SAP. Te grote scheuren kunnen niet overbrugd worden. Daarom moet er gebruik gemaakt worden van scheurcontrole door middel van vezels. SAP zijn in staat om de scheuren te dichten en dit was zowel visueel zichtbaar bij het microscopisch onderzoek als bij de permeabiliteitstesten. Enkel SAP C met een modificatiegraad van 81,5 % en een bestralingstijd van 2 u gaf een minder goed resultaat. De korrelgrootte was te groot om goede scheurdichtende eigenschappen te vertonen. Het verschil in korrelgrootte van de SAP C (94 %, 2 u) dient daarom bestudeerd te worden aan de hand van nieuwe permeabiliteitsproeven. De absorptie ligt lager ten opzichte van de commerciële SAP, maar het SAP zal toch dichtende eigenschappen kunnen vertonen.

De SAP sluiten de scheur tijdelijk maar zullen hun vloeistof met verloop van tijd weer afgeven. Daardoor is de scheur niet meer gesloten. De SAP zijn effectief om de scheur te dichten en grote stromen van vloeistof in eerste instantie tegen te houden. De SAP kunnen dus effectief zijn in watertegenhoudende structuren die aan scheurvorming onderhevig zijn. Anderzijds stimuleren SAP de interne curing en de autogene heling, wat voor een sluiting van de scheur zorgt.

Een correcter beeld werd gegeven door de doorlatendheidscoëfficiënt k te delen door de derde macht van de scheurwijdte, conform de formule van Tsukamoto^{[38][47][53]}. De scheurwijdte zal zo niet determinerend zijn en enkel de invloed van SAP wordt zo bestudeerd. Bij het gebruik van vezels is de scheurvorming onvoorspelbaar en sommige proefstukken vertoonden meervoudige scheurvorming wat ongewenst is indien enkel de invloed van SAP dient bestudeerd te worden.

Zelfheling en zelfdichting traden op tijdens de permeabiliteitsproef en kwam tot uiting als de daling van de doorlatendheidscoëfficiënt in de tijd en de omvangrijke vorming van stalactieten. Deze bevatten zowel CaCO_3 als uitgespoelde hydratatieproducten bepaald met TGA-proeven. Sommige stalactieten hadden een gelige schijn en dit was ook zichtbaar bij het drogen van SAP voor de bepaling van de desorptie.

De SAP dichten als het ware de scheur waardoor de daling in permeabiliteit groter is dan waargenomen bij de referentiestukken. Het wegspoelen van SAP zorgt ook voor samentroepen van SAP die de scheur gaan blokkeren. De scheur dicht door zelfheling en de zwelling van SAP en is in staat om haar dichtheid te herwinnen.

Het SAP A is mede door een tragere absorptie en door de kleine korrel geen goed dichtende SAP. SAP B is dat wel. 1 m% aan SAP B gaf de beste resultaten. Bij 4 m% aan SAP B is de korrelige matrix zwakker en daardoor zal er minder dichting van de scheuren zijn, ook al zijn er meer SAP aanwezig. Ook de extra gevormde holten van de SAP zijn paden waarlangs de vloeistof kan migreren en waardoor er minder dichting is.

6. Conclusies

Hoe hoger het hydrofiele karakter van de vezel, hoe lager de verwerkbaarheid, de verharding en het gehalte aan meervoudige scheurvorming. Mengsels met SAP A droog ingemengd zijn nauwelijks verwerkbaar. De verwerkbaarheid stijgt met het als gelvorm inmengen van SAP A. Algemeen stijgt de verwerkbaarheid met het inmengen van SAP B. Met betrekking tot een betere verspreiding in de matrix geniet het droog inmengen van SAP B de voorkeur.

De absorptie van het SAP stijgt respectievelijk in een HCl-oplossing, zout zeewater, cementfiltraat, een NaOH-oplossing, kraantjeswater en gedemineraliseerd water. De absorptie van SAP A is hoger dan bij SAP B en hoger dan SAP C. De absorptie van SAP C stijgt met de bestralingstijd en de modificatiegraad. De zweltijd van kleine partikels is lager dan deze van grote partikels. SAP A absorbeert minder snel haar vloeistof dan SAP C en SAP B neemt sneller haar vloeistof op dan SAP C.

De buigtrek- en druksterkte van SAP A was kleiner dan deze voor SAP B. Een verhoging van het massaprocent aan SAP gaf een verlaging van de buigtrek-, druk-, splijt- en eerste-scheur-sterkte. Het verhogen van het volumepercentage aan vezels geeft een hogere eerste-scheur-sterkte. De experimentele eerste-scheur-sterkte komt goed overeen met de theoretische eerste-scheur-sterkte bij de proefstukken met vezels bij vierpuntsbuigproeven. De scheurtip breuktaaiheid J_{tip} is een maat voor de eerste-scheur-sterkte. De mechanische eigenschappen van een mengsel met gecottoniseerd vlas zijn meestal significant beter dan deze van de mengsels met technisch vlas.

Zowel SAP als plantenrestanten kunnen dienen als scheurinitiatoren. Ook het verlagen van de matrixsterkte door een verlaging van de water/cement-factor heeft meer meervoudige scheurvorming tot gevolg. Een mengsel met technische vlasvezels neigt in de richting van meervoudige scheurvorming en toont een dubbele scheur en een verstevigend gedrag. De synthetische vezels hebben goede eigenschappen op het vlak van meervoudige scheurvorming en resulteren in de vorming van gemiddeld 5 tot 8 scheuren bij een vierpuntsbuigproef. Mengsels met PP-vezels monofilament vertonen de grootste rekcapaciteit en vertonen eveneens verstevigend gedrag.

De heling trad op door precipitatie van calciumcarbonaat, interne curing via SAP, de puzzolane activiteit van vlieg-as en meer aanwezigheid van ongehydrateerd cement door vroegere scheuraanbreng en een lagere water/cement-factor. Bij curing onder een relatieve vochtigheid van meer dan 90 % en gelijk aan 60 % treedt er zelfheling op bij proefstukken met SAP. SAP houden vocht vast en geven dit gradueel af aan de cementmatrix. Er treedt inwendige curing op. De lage absorptie van vocht is voldoende om herstel te stimuleren. SAP zijn dus in staat vocht op te nemen (ook in het inwendige van de scheur) en deze af te geven aan de matrix. SAP helpen zelfheling door water te voorzien voor de vorming van calciumcarbonaat en dat was microscopisch zichtbaar als de vorming van 'koepels' kristallen.

Zelfheling uitte zich in de vorming van nieuwe scheuren en herwonnen mechanische eigenschappen. Zelfheling via het visueel dichten van de scheur was zichtbaar in het microscopisch onderzoek. De vezels zorgden mee voor de overbrugging van de scheur als hechtplaats voor calciumcarbonaat.

De variant ter bepaling van de hechteigenschappen komt goed overeen met de experimentele resultaten. De methode is dus zeker evenwaardig met enkele-uitrekproeven.

Door de doorlatendheidscoëfficiënt te delen door de derde macht van de scheurwijdte, wordt een correct beeld gegeven van het effect van SAP op de doorlatendheid. Tijdens het uitvoeren van de permeabiliteitsproeven is er een sterke daling, te wijten aan het effect van zelfheling en het dichten van de scheur door SAP. De scheur dicht en het materiaal is in staat om haar dichtheid te herwinnen. De stroming wordt gereduceerd en SAP worden in de tijd volop gebruikt. De beste resultaten worden bereikt door het inmengen van 1 m% SAP B.

SAP kunnen ook wegspoelen en zorgen voor een blokkering van de scheuren (dit naast het zwellen van SAP). De stroming concentreert zich daarom rond enkele punten waar uitstroom nog steeds mogelijk is. Zo worden de stalactieten gevormd rondom deze uitstroomgaten. Er is steeds sprake van grote stalactietvorming die bestonden uit calciumcarbonaat en uitgespoelde hydratatieproducten.

Het beste gecombineerd resultaat van goede mechanische eigenschappen, zelfheling en zelfdichting wordt verkregen door het inmengen van 1 m% SAP B.

Zelfheling wordt geholpen door kleine scheurwijdtes na het inmengen van microvezels en door interne curing na het inmengen van reactieve stoffen onder de vorm van superabsorberende polymeren. De SAP hebben ook zelfdichtende eigenschappen. Beton kan dus na falen haar vroegere sterkte en eigenschappen zelfstandig herwinnen door combinatie van microvezels met reactieve stoffen.

Referenties

- [1] De Schutter, G., *Diagnose en Herstelling van bouwwerken*, cursus, Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, 2009-2010.
- [2] Taerwe, L., *Niet lineaire en Bezwijkanalyse van Bouwwerken, Partim Betonconstructies*, cursus, Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, 2010-2011.
- [3] Projectvoorstel BOF, *Zelfheling door de combinatie van microvezels met reactieve geïmmobiliseerde stoffen*, voorstel masterproef, 2010.
- [4] Baley, C., "Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase," *Composites, Part A*, vol.33, pp.939-948, 2002.
- [5] Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A. & Chotard, T., "Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction," *European Ceramic Society*, vol.28, pp.183-192, 2008.
- [6] Bodros, E. & Baley, C., "Study of the tensile properties of stinging nettle fibres (*Urtica dioica*)," *ScienceDirect Materials Letters*, vol.63, pp.2143-2145, 2008.
- [7] Savastano Jr., H. & Agopyan, V., "Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites," *Cement & Concrete Composites*, vol.21, pp.49-57, 1999.
- [8] Liao, K.Y., Chang, P.K, Peng, Y.N. & Yang, C.C., "A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete," *Cement & Concrete Research*, vol.34, no.6, pp.977-989, 2004.
- [9] Boghossian, E. & Wegner, L.D., "Use of flax fibres to reduce plastic shrinkage cracking in concrete," *Cement & Concrete Composites*, vol.30, pp.929-937, 2008.
- [10] Bos, H., Van den Oever, M. & Peters, O., "Tensile and compressive properties of flax fibres for natural fibre reinforced composites," *Materials Science*, vol.37, pp.1683-1692, 2002.
- [11] Bekaert & Douterloigne, 3 februari 2009, *Staalvezelbeton*.
[Powerpointpresentatie]
- [12] Bekaert, 3 februari 2009, *Dramix Duo 100*. [Powerpointpresentatie]

-
- [13] Bekaert, 3 februari 2009, *Dramix, staalraadvezels voor betonversterking*.
[documentatieset met sample]
- [14] Bekaert, 3 februari 2009, *Dramix, technische gegevens*. [technische fiches]
- [15] The Constructor, "Fiber Reinforced Concrete," online webpagina, 9 augustus 2010. (<http://theconstructor.org/2009/10/fiber-reinforced-concrete-2/>)
- [16] Li, V.C., "Engineered Cementitious Composites (ECC) – Tailored Composites through Micromechanical Modelling," *Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future*, Canadian Society of Civil Engineers, 1997.
- [17] Yang, E-H., *Designing added functions in Engineered Cementitious Composites*, Ph.D. Dissertation, The University of Michigan, Department of Civil Engineering, 2008.
- [18] De Lhoneux, B., Kalbskopf, R., Kim, P., Li, V.C., Lin, Z., Vidts, D., Wang, S. & Wu, H., "Development of High Tenacity Polypropylene Fibres for Cementitious Composites," *Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) - Application & Evaluation -*, Takayama, Japan, pp.121.132, 2002.
- [19] Etex Group, "Redco nv.," online webpagina, augustus 2010.
(<http://www.etexgroup.com/company/redco-nv-belgium>)
- [20] De Lhoneux, B., "Productie van PVA- en PP-vezels," telefoongesprek, 22 april 2011.
- [21] Kiekens, P., *Geavanceerde vezels en afgeleide materialen*, cursus, Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, 2010-2011.
- [22] Li, V.C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A. & Saito, T., "Interface Tailoring for Strain-hardening PVA-ECC," *ACI Materials*, vol.99, no.5, pp.463-472, 2002.
- [23] Kanda, T. & Li, V.C., "A new micromechanics design theory for pseudo strain hardening cementitious composite," *paper*, Advanced Civil Engineering – Materials Research Lab, University of Michigan, pp.1-45, 1999.
- [24] Li, V.C., Wang, S. & Wu, C., "Tensile strain hardening behaviour of polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC)," *ACI Materials*, vol.98, no.6, pp.483-492, 2001.
- [25] Li, M. & Li, V.C., "Cracking and Healing of Engineered Cementitious Composites under Chloride Environment," *ACI Materials*, vol.108, no.3, pp.333-340, 2011.

-
- [26] Lepech, M.D., and Li, V.C., "Water Permeability of Cracked Cementitious Composites," *ICF 11*, Turin, Italy, 2005.
- [27] Li, V.C. & Leung, C.K.Y., "Steady State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites," *ASCE Engineering Mechanics*, vol.188, no.11, pp.2246-2264, 1992.
- [28] Li, V.C. & Wu, H.C., "Conditions for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites," *Applied Mechanics Review*, vol.45, no.8, pp.390-398, 1992.
- [29] Li, V.C., "Engineered Cementitious Composites (ECC) – Material, Structural, and Durability Performance," *Concrete Construction Engineering Handbook*, Chapter 24, Ed. E. Nawy, CRC Press, 2008.
- [30] Michigan Engineering, "College of Engineering," online webpagina, augustus 2010. (<http://www.engin.umich.edu/>)
- [31] Aveston, J., Cooper, G.A. & Kelly, A., "Single and multiple fracture," *The properties of fiber composites*, Science and Technology Press Ltd., Groot-Brittannië, pp.15-24, 1971.
- [32] Li, V.C. & Yang, E.H., "Self Healing in Concrete Materials," *Self Healing Materials. An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*, S. van de Zwaag (ed.), Springer, pp.161-193, 2007.
- [33] Wang, Y., Backer, S. & Li, V.C., "A Statistical Tensile Model of Fiber Reinforced Cementitious Composites," *Composites*, vol.20, no.3, pp.265-274, 1990.
- [34] Ahmed, S.F.U., Maalej, M. & Paramasivam, P., "Analytical Model for Tensile Strain Hardening and Multiple Cracking Behaviour of Hybrid Fiber-Engineered Cementitious Composites," *Materials in Civil Engineering*, vol.19, no.7, pp.527-539, 2007.
- [35] Kanda, T., *Design of Engineered Cementitious Composites for Ductile Seismic Resistant Elements*, Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, 329pp, 1998.
- [36] Redon, C., Li, V.C., Wu, C., Hoshiro, H., Saito, T. & Ogawa, A., "Measuring and Modifying Interface Properties of PVA Fibers in ECC Matrix," *ASCE Materials in Civil Engineering*, vol.13, no.6, pp.399-406, 2001.

-
- [37] Lin, Z., Kanda, T. & Li, V.C., "On Interface Property Characterization and Performance of Fiber Reinforced Cementitious Composites," *Materials Science Letters*, vol.15, pp.173-184, 1999.
- [38] Obla, K.H., Li, V.C., "A Novel Technique for Fiber-Matrix Bond Strength Determination for Rupturing Fibers," *Cement & Concrete Composites*, vol.17, pp.219-227, 1995.
- [39] Wang, S., *Micromechanics Based Matrix Design for Engineered Cementitious Composites*, Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, 221pp, 2005.
- [40] Li, V.C., Stang, H. & Krenchel, H., "Micromechanics of Crack Bridging in Fibre-Reinforced Concrete," *Materials & Structures*, no.26, pp.486-494, 1993.
- [41] Wang, S. & Li, V.C., "Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: material design and performances," *International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications*, G. Fischer & V. C. Li, RILEM Publications SARL, pp.65-73, 2006.
- [42] Stang, H., Mobacher, B. & Shah, S.P., "Quantitative Damage Characterization in Polypropylene Fiber Reinforced Concrete," *Cement & Concrete Research*, vol.20, no.4, pp.540-558, 1990.
- [43] Bledzki, A.K., Fink, H.P. & Specht, K., "Unidirectional Hemp and Flax EP- and PP-Composites: Influence of Defined Fiber Treatments," *Applied Polymer Science*, vol.93, pp.2150-2156, 2004.
- [44] Bourmaud, A. & Baley, C., "Rigidity analysis of polypropylene/vegetal fibre composites after recycling," *Polymer Degradation & Stability*, vol.94, pp.297-305, 2009.
- [45] Homma, D., Mihashi, H. & Nishiwaki, T., "Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites," *Advanced Concrete Technology*, vol.7, no.2, pp.217-228, 2009.
- [46] Ter Heide, N., *Crack Healing in Hydrating Concrete*, MSc Dissertation, TU Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Microlab, 2005.
- [47] Edvardsen, C., "Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete," *ACI Materials*, vol.96, pp.448-445, 1999.
- [48] Jooss, M., "Leaching of Concrete Under Thermal Influence," *Otto-Graf*, vol.12, pp.51-68, 2001.

-
- [49] Reinhardt, H., Jooss, M., "Permeability and Self-healing of Cracked Concrete as a Function of Temperature and Crack Width," *Cement & Concrete Research*, vol.33, pp.981-985, 2003.
- [50] Granger, S., Pijaudier-Cabot, G. & Loukili, A., "Mechanical behaviour of self-healed Ultra High Performance Concrete: from experimental evidence to modelling," *Proceedings FRAMCOS 6*, Catalina, Italy, 2007.
- [51] Ter Heide, N., Schlangen, E. & Breugel, K., "Crack healing of early age cracks in concrete," *Measuring, Monitoring and Modelling Concrete Properties*, M.S. Konsta-Gdoutos, (ed.), Springer, pp.273-284, 2006.
- [52] Farage, M.C.R., Sercombe, J., and Gallé, C., "Rehydration and microstructure of cement paste after heating at temperatures up to 300°C," *Cement & Concrete Research*, vol.33, pp.1047-1056, 2003.
- [53] Nanayakkara, A., "Self-healing of Cracks in Concrete Subjected to Water Pressure," *New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia*, Tokyo, 2003.
- [54] Yang, Y., Lepech, M.D., Yang, E.H. & Li, V.C., "Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles," *Cement & Concrete Research*, vol.39, pp.382-390, 2009.
- [55] Ying-zi, Y., Lepech, M.D. & Li, V.C, "Self-healing of engineered cementitious composites under cyclic wetting and drying," *Proceedings International Workshop on Durability of Reinforced Concrete under Combined Mechanical and Climatic Loads (CMCL)*, Qingdao, China, 2005.
- [56] Jacobsen, S., Marchand, J. & Hornain, H., "SEM observations of the microstructure of frost deteriorated and self healed concrete," *Cement & Concrete Research*, vol.25, no.8, pp.55-62, 1995.
- [57] Aldea, C., Song, W., Popovics, J.S. & Shah, S.P., "Extent of Healing of Cracked Normal Strength Concrete," *Materials In Civil Engineering*, vol.12, pp.92-96, 2000.
- [58] International Standards, "Standards," online webpagina, augustus 2010. (<http://www.astm.org/Standards>)
- [59] Haegeman, W., *Grondmechanica*, cursus, Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, 2008-2009.

-
- [60] Peiffer, H., *Grondwaterstroming en Contaminantentransport*, cursus, Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, 2009-2010.
- [61] Lepech, M.D., *A Paradigm for Integrated Structures and Materials Design for Sustainable Transportation Infrastructure*, PhD Dissertation, The University of Michigan, Department of Civil Engineering, 2006.
- [62] Hearn, N., "Self-sealing, Autogenous healing and continued hydration: What is the difference?," *Materials & Structures*, vol.31, pp.563-567, 1998.
- [63] Jia, H.Y., Wei, C., Ming, X.Y. & Yang, E.H., "The microstructure of Self-Healed PVA ECC Under Wet and Dry Cycles," *Materials Research*, vol.13, no.2, pp.225-231, 2010.
- [64] Lauer, K.R. & Slate, F.O., "Autogenous Healing of Cement Paste," *ACI Materials*, vol.52, no.10, pp.1083-1097, 1956.
- [65] Granger, S., Loukili, A., Pijaudier-Gabot, G. & Chanvillard, G., "Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis," *Cement & Concrete Research*, vol.37, pp.519-527, 2007.
- [66] De Schutter, G., *Betontechnologie*, cursus, Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, 2007-2008.
- [67] Termkhajornkit, P., Nawa, T., Yamashiro, Y. & Saito, T., "Self-healing ability of fly ash-cement systems," *Cement & Concrete Composites*, vol.31, pp.195-203, 2009.
- [68] Haddad, R.H. & Bsoul, M.A., "Self-healing of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete; Pozzolan Effect," *paper*, Civil Engineering Department, Jordan University of Science and Technology, Irbid, Jordan, 1999.
- [69] Jacobsen, S. & Sellevold, E.J., "Self Healing of High strength Concrete after Deterioration by Freeze/Thaw," *Cement & Concrete Research*, vol.26, no.1, pp.55-62, 1996.
- [70] Sahmaran, M., Li, M. & Li, V.C., "Transport Properties of ECC under Chloride Exposure," *ACI Materials*, pp.303-310, 2007.
- [71] Jacobsen, S., Marchand, J., & Boisvert, L., "Effect of Cracking and Healing on Chloride Transport in OPC Concrete," *Cement & Concrete Research*, vol.26, pp.869-881, 1996.

-
- [72] Aldea, C., Shah, S. & Karr, A., "Effect of Cracking on Water and Chloride Permeability of Concrete," *Materials in Civil Engineering*, vol.11, no.3, pp.181-187, 1999.
- [73] Aldea, Ghandehari, M., C., Shah, S. & Karr, A., "Estimation of Water Flow through Cracked Concrete under Load," *ACI Materials*, vol.97, no.5, pp.567-575, 2000.
- [74] Du Prez, F.E., *Polymeren*, cursus, Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, 2010-2011.
- [75] Gerlach, G., Guenther, M., Suchaneck, G., Sorber, J., Arndt, K.F. & Richter, A., "Application of Sensitive Hydrogels in Chemical and pH Sensors," *Macromolecular Symposia*, no.210, pp.403-410, 2004.
- [76] Van Vlierberghe, S., *Cell-Interactive Biopolymer-based Hydrogels designed for Tissue Engineering*, PhD Dissertation, The University of Ghent, Department of Chemistry, 2010.
- [77] Song, X., Wei, J. & He, T., "A method to repair concrete leakage through cracks by synthesizing super-absorbent resin in situ," *Construction & Building Materials*, vol.33, pp.386-391, 2009.
- [78] Mönning, S., *Superabsorbing additions in concrete – applications, modelling and comparison of different internal water sources*, PhD Dissertation, The University of Stuttgart, Department of Civil Engineering, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, 2009.
- [79] Qui, Y., Park, K., "Environment-sensitive hydrogels for drug delivery," *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol.53, pp.321-339, 2001.
- [80] Gupta, P., Vermani, K. & Garg, S., "Hydrogels: from controlled release to pH-responsive drug delivery," *Drug Discovery Today*, vol.7, pp.569-579, 2002.
- [81] Hoogenboom, R., "Smart polymers for the pharmaceutical industry," lezing, *Onderzoek & innovatie voor meer welvaart in 2020: SMART*, ie-net, Roadmap Vlaanderen, Universiteit Gent, 175 jaar Ingenieursopleiding, 2010.
- [82] Pharma, *Compendium 2006*, Brussel, Leo Neels, pp.2767, 2006.
- [83] Siriwatwechakul, W., Siramanont, J. & Vichit-Vadakan, W., "Superabsorbent polymer structures," International RILEM Conference on *Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete*, Proceedings PRO 74, 15-18 August 2010, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

-
- [84] Gerlach, G., Guenther, M., Sorber, J., Suchanek, G., Arndt, K.F. & Richter, A., "Chemical and pH sensors based on the swelling behaviour of hydrogels," *Sensors and actuators B*, no.111-112, pp.555-561, 2005.
- [85] Brüdern, A.E. & Mechtherine, V., "Multifunctional use of SAP in strain-hardening Cement-based Composites," International RILEM Conference on *Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete*, Proceedings PRO 74, 15-18 August 2010, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- [86] Esteves, L.P., "Water-entrained cement-based materials by superabsorbent polymers: on the fundamentals...", International RILEM Conference on *Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete*, Proceedings PRO 74, 15-18 August 2010, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- [87] Kopkáně, D. & Nováček, J., "SAP-based particles with delayed absorption," International RILEM Conference on *Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete*, Proceedings PRO 74, 15-18 August 2010, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- [88] Jensen, O.M. & Hansen, P.F., "Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background," *cement & Concrete Research*, vol.31, pp.647-654, 2001.
- [89] Esteves, L.P., "On the absorption kinetics of superabsorbent polymers," International RILEM Conference on *Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete*, Proceedings PRO 74, 15-18 August 2010, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- [90] Dennis Lee, H.X., Wong, H.S. & Buenfeld, N., "Estimation the swelling ratio of superabsorbent polymers in cement-based materials," International RILEM Conference on *Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete*, Proceedings PRO 74, 15-18 August 2010, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- [91] Hasholt, M.T., Seneca Jespersen, M.H. & Jensen, O.M., "Mechanical Properties of concrete with SAP part I: development of compressive strength," International RILEM Conference on *Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete*, Proceedings PRO 74, 15-18 August 2010, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- [92] Mönnig, S. & Lura, P., "Superabsorbent Polymers – An Additive to Increase the Free-Thaw Resistance of High Strength Concrete," *Advances in Construction Materials*, Part V, pp.351-358, 2007.

-
- [93] Esteves, L.P., Cachim, P. & Ferreira, V.M., "Mechanical properties of cement mortars with superabsorbent polymers," *Advances in Construction Materials*, Part VI, pp.451-462, 2007.
- [94] Jensen, O.M. & Hansen, P.F., "Water-entrained cement-based materials II. Experimental observations," *Cement & Concrete Research*, vol.32, pp.973-978, 2002.
- [95] Igarashi, S., Aragane, N. & Koike, Y., "Effects of spacial structure of superabsorbent polymer particles on autogenous shrinkage behaviour of cement paste," International RILEM Conference on *Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete*, Proceedings PRO 74, 15-18 August 2010, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- [96] Dennis Lee, H.X., Wong, H.S. & Buenfeld, N., "Self-sealing cement-based materials using superabsorbent polymers," International RILEM Conference on *Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete*, Proceedings PRO 74, 15-18 August 2010, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- [97] Kim, J & Schlangen, E., "Super absorbent polymers to stimulate self healing in ECC," *paper*, Delft University of Technology, 2011.
- [98] Laustsen, S., Bentz, D.P., Hasholt, M.T. & Jensen, O.M., "CT measurement of SAP voids in concrete," International RILEM Conference on *Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete*, Proceedings PRO 74, 15-18 August 2010, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- [99] Trtik, P, Muench, B., Weiss, W., Herth, G., Kaestner, A., Lehmann, E. & Lura, P., "Neutron tomography measurements of water release from superabsorbent polymers in cement paste," International RILEM Conference on *Material Science*, Proceedings PRO 77, Aachen, 2010.
- [100] De Belie, N., Kratky, J. & Van Vlierberghe, S., "Influence of pozzolans and slag on the microstructure of partially carbonated cement paste by means of water vapour and nitrogen sorption experiments and BET calculations," *Cement & Concrete Research*, vol.40, pp.1723-1733, 2010.
- [101] BASF, The Chemical Company, "SAP A," veiligheids- en productdata, 2010.
- [102] BASF, The Chemical Company, "SAP B," veiligheids- en productdata, 2010.
- [103] Vandenhoute, M., *Vernetbare derivaten als nieuwe generatie van stimuli responsive polymeermaterialen*, Masterproef, Universiteit Gent, Faculteit Wetenschappen, Vakgroep Organische Chemie, 2008-2009.

-
- [104] Gale, T., "Ocean Chemical Processes," *Water: Science and Issues*, 2006.
- [105] Departement Organische Chemie, 11 mei 2011, *DVS-1 Dynamic Vapour Sorption Apparatus*, Faculteit Wetenschappen. [Powerpointpresentatie]
- [106] Van Tittelboom, K., De Belie, N., Van Loo, D. & Jacobs, P., "Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent," *Cement & Concrete Composites*, vol.33, pp.497-505, 2011.
- [107] Departement Organische Chemie, 11 mei 2011, *Hi-Res TGA 2950 Thermogravimetric Analyzer*, Faculteit Wetenschappen. [Powerpointpresentatie]
- [108] Tiwari, R., "Thermal Techniques for Material Characterization," *Ceramic Industry*, 2008.
- [109] Geology, "Calcite: Mineral Uses & Properties," online webpagina, april 2011. (<http://geology.com/minerals/calcite.shtml>)
- [110] Beaudoin, J.J., Sato, T. & Tumidajski, P.J., "The Thermal Decomposition of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Polymorphs," *2nd International symposium on Advances in Concrete Through Science and Engineering*, Québec city, pp.1-15, 2006.
- [111] Okada, Y., Ishida, H. & Mitsuda, T., "Thermal Decomposition of Tricalcium Silicate Hydrate," *American Ceramic Society*, vol.77, no.9, pp.2277-2282, 1994.

Lijst van gebruikte figuren

Figuur 1: Treksterkte en spanningen, breukrek ^[1] & E-modulus in jong beton	2
Figuur 2: Verschillende falingsmechanismen	3
Figuur 3: Voorstelling van de natuurlijke vezels ^{[4][5]} met polygonale vezeldoorsnede ^[4]	4
Figuur 4: Samenstelling(a) ^[10] , natuurlijke defecten(b) ^[4] en een typisch F(u)-diagram(c) ^{[4][6][10]}	5
Figuur 5: Het gebruik van staalvezels in beton ^[11]	6
Figuur 6: Spinopstelling te Redco voor de productie van PP-vezels ^[18]	8
Figuur 7: Voorbeeld van de ductiliteit van ECC ^[30]	9
Figuur 8: Meervoudige scheurvorming bij ECC ^{[29][32]} en typisch diagram ^{[17][29]}	10
Figuur 9: Enkele voorbeelden van de eerste-scheur-vorming ^[27]	11
Figuur 10: Het $\sigma(\delta)$ -diagram ^[17] met de definitie van J_{tip} & J'_b	12
Figuur 11: Een steady-state vlakke scheur (links) & een Griffith scheur (rechts) ^[17]	13
Figuur 12: Enkele uittrekproef en typische bekomen data ^[37]	14
Figuur 13: Uitpuilende lengte en grafische omzettingmethode ^[38]	14
Figuur 14: Verschillende mogelijkheden bij trek (a) ^[33] en P(u)-diagram (b) ^[17]	15
Figuur 15: Eenzijdige vezeluittrekking (a) ^[39] , 0,749 mm (b) ^[36] & 5 mm (c) ^[36]	16
Figuur 16: Opeenvolgende stappen tijdens het onthechten ^[36]	16
Figuur 17: Micro-afsplintering (a) en het Cook-Gordon effect (b & c) ^[17]	16
Figuur 18: Vergelijking ^[17] verschillende HTPP van Redco	18
Figuur 19: Mechanismen verantwoordelijk voor zelfheling ^[46]	20
Figuur 20: Enkele beschouwde uni-axiale trekproeven ^{[23][17][45][45]}	23
Figuur 21: Diagram van een trekproef en een buigproef met een doorsnede ^[16]	23
Figuur 22: Waterpermeabiliteitstest met constant en dalend verval ^{[17][26]}	24
Figuur 23: Zelfheling tijdens het uitvoeren van een permeabiliteitstest ^[61]	25
Figuur 24: Evenwichtsconcentraties bij saturatie als een functie van de pH ^{[47][63]}	26
Figuur 25: Afname van de stroming bij verschillende scheurwijdtes en temperatuur ^[49]	27
Figuur 26: Optimum scheurwijdte voor heling met een hydraulische gradiënt ^[53]	27
Figuur 27: Kracht/scheurwijdte diagram van hoge-sterkte beton na 3 weken curing ^[65]	28
Figuur 28: Resonantiefrequentietest bij verschillende omgevingscondities ^{[17][54][55]}	30
Figuur 29: Uni-axiale trekproef bij jong beton onder verschillende condities ^[17]	31
Figuur 30: Zelfheling als functie van de scheurwijdte ^[17]	34
Figuur 31: Permeabiliteit in de tijd ^{[72][73]}	34
Figuur 32: Volledige (a) en partiële (b) heling van een scheur door het proefstuk ^[46]	35
Figuur 33: Vorst/dooi cycli en herstel in water ^[69]	35
Figuur 34: Scheurvorming na zelfheling van het beton bij nat-droog cycli ^[17]	36
Figuur 35: Impressie van absorptie bij SAP ^[78]	38
Figuur 36: Absorptie in verschillende vloeistoffen ^[77]	40
Figuur 37: Densificatie van de matrix rondom een SAP deeltje ^[87] na 1 u ^[78] en 24 u ^[78]	41
Figuur 38: C-S-H met de verschillende types water ^[66]	41
Figuur 39: Groei van de partikels (a) en absorptie met de tijd (b) ^[89]	42
Figuur 40: Resultaten van de axiale trektesten ^[85]	43
Figuur 41: Druksterkte en buigtreksterkte in driepuntsbuigproef ^[78]	44
Figuur 42: Invloed van SAP op de relatieve vochtigheid en de vervormingen ^[94]	45

Figuur 43: Debiet en doorstromend volume doorheen een scheur van 200 μm ^[96]	46
Figuur 44: Belastingscurves van 7 dagen oud beton ^[97]	47
Figuur 45: Inwendig afgeven van water door een SAP (4, 8, 12 en 20 u na mengen) ^[99]	48
Figuur 46: De gebruikte soorten vezels	50
Figuur 47: SAP A (copolymeer) in ChemSketch [®]	50
Figuur 48: SAP B (gecrosslinkt) in ChemSketch [®]	50
Figuur 49: De gebruikte soorten superabsorberende polymeren	51
Figuur 50: Principe van UV-bestraling en het procedé van een 'plaatje' SAP ^[103]	52
Figuur 51: Plaatje na UV-geïnitieerde vinyl-polymerisatie ^[103] en vermalen van SAP C	52
Figuur 52: Vacuüm drogen van SAP met silica-korrels	55
Figuur 53: Opstelling van de filtratieproef	56
Figuur 54: Leica S8 APO met DFC 295 camera	57
Figuur 55: DVS-1, Dynamic Vapour Sorption Test ^[105]	58
Figuur 56: Menging van PVA-ECC: water, superplastificeerder en vezeltoevoeging ^[63]	60
Figuur 57: Schematisering driepuntsbuigproef en krachtenverdeling	61
Figuur 58: Schematisering drukproef en visuele weergave van de proefmachine	62
Figuur 59: Schematisering vierpuntsbuigproef, krachtenverdeling en opstelling	62
Figuur 60: Algemene vierpuntsbuigproef en schematisering	63
Figuur 61: Modelleren van een 160·40·40 mm ³ (a) en een 160·40·15 mm ³ proefstuk (b).....	64
Figuur 62: Invloed van het eigengewicht op de spanning (uitvergroete factor) (a)	64
Figuur 63: Spanning opgewekt door vierpuntsbuiging bij een 160·40·40 mm ³ proefstuk (a) .	65
Figuur 64: 3D-aanzicht van de spanningen (vierpuntsbuigproef 160·40·15 mm ³ proefstuk)	65
Figuur 65: Tijdschema voor de gebruikte proefreeksen [dagen]	66
Figuur 66: Proefopstelling (scheuraanbreng, curing en uiteindelijke belasting).....	67
Figuur 67: Typisch diagram als output en aanduiding opmeetpunten	67
Figuur 68: Schematisatie Braziliaanse slijtproef, visuele weergave ^[72] en proefstuk	71
Figuur 69: Standaardopstelling permeabiliteitsproef ^[106] en opstelling in het laboratorium.....	72
Figuur 70: TGA-machine, Hi-Res TGA 2950 Thermogravimetric Analyzer ^[107]	74
Figuur 71: Gemiddelde absorptie van SAP in verschillende vloeistoffen met standaardfout.	77
Figuur 72: Absorptie van SAP in detail met verschil in bestralingstijd	79
Figuur 73: Zwelltijd voor verschillende fracties SAP C (94 %, 2 u)	80
Figuur 74: Zwelltijd voor SAP B (gedemineraliseerd water en cementfiltraat)	81
Figuur 75: Zwelltijd voor SAP A (gedemineraliseerd water en cementfiltraat)	82
Figuur 76: Groei van een SAP A korrel bij bevochtiging met gedemineraliseerd water.....	83
Figuur 77: Graduele groei van een SAP B korrel bij bevochtiging met kraantjeswater.....	83
Figuur 78: Wateropname en zwellen van SAP B (gedemineraliseerd water)	83
Figuur 79: Variabele vorm van SAP C (1 u; 1,5 u & 2 u) en absorptie	84
Figuur 80: Verzadiging van SAP C (2 u en 94 %).....	84
Figuur 81: Weergave absorptiemethode (kraantjeswater)	85
Figuur 82: DVS-meting SAP A met extrapolatie	86
Figuur 83: DVS-meting SAP B met extrapolatie	86
Figuur 84: DVS-meting SAP C (81,5 % en 2 u) met extrapolatie	86
Figuur 85: Vergelijking DVS Isothermen en zwellen van SAP B op een proefstuk	87
Figuur 86: Buigtreksterkte (a) en druksterkte (b) van mortelprisma's met/zonder SAP	88
Figuur 87: Densificatie rondom holtes die SAP bevatten (2 m% SAP B)	89
Figuur 88: Opname van water door een SAP partikel onder het oppervlak (0,5 m% SAP B)	89

Figuur 89: Vorming van verzadigde SAP partikels (2 m% SAP B).....	90
Figuur 90: Vorming van verzadigde SAP partikels en lokalisering (2 m% SAP B)	90
Figuur 91: Vorming van verzadigde SAP partikels (0,5 m% SAP B).....	90
Figuur 92: Blokkering van de scheur door een SAP partikel (0,5 m% SAP en 4 m% SAP) ..	90
Figuur 93: Blokkering van de scheur door SAP partikels (4 m% SAP B)	90
Figuur 94: Meervoudige scheurvorming (2 vol.% PVA-vezels)	91
Figuur 95: Brugvorming en micro-afsplintering (1 vol.% PVA-vezels).....	91
Figuur 96: Baststengels van vlas als scheurinitiatoren	92
Figuur 97: Spanning-rek diagram voor de controlestukken PVA 2 C	93
Figuur 98: Spanning-rek diagram voor PVA 2 ND proefstukken	94
Figuur 99: Spanning-rek diagram voor PVA 1 ND proefstukken.....	95
Figuur 100: Spanning-rek diagram voor PVA 0,5 ND proefstukken	95
Figuur 101: Spanning-rek diagram voor PVA 2 90 proefstukken bij een RV > 90 %.....	95
Figuur 102: Spanning-rek diagram voor PVA 2 60 proefstukken bij een RV = 60 %.....	96
Figuur 103: Spanning-rek diagram voor PVA 2 ND proefstukken	96
Figuur 104: Spanning-rek diagram voor PVA 2 ND R proefstukken	97
Figuur 105: Spanning-rek diagram voor PVA 2 ND 14 met scheuraanbreng op 14 dagen ...	97
Figuur 106: Spanning-rek diagram voor eigen gecoate PVA 2 ND 1,2 % proefstukken.....	98
Figuur 107: Spanning-rek diagram van $\frac{1}{3}$ vliegias vervangen door kalksteenmeel (K1).....	98
Figuur 108: Spanning-rek diagram van $\frac{2}{3}$ vliegias vervangen door kalksteenmeel (K2).....	99
Figuur 109: Spanning-rek diagram van PVA 2 ND W/C met een lagere W/C-factor	99
Figuur 110: Spanning-rek diagram van PVK 2 ND proefstukken (Kuraray)	99
Figuur 111: Doorbuiging van PVK 2 ND (onbelast, start, 3 en 6 mm doorbuiging)	100
Figuur 112: Doorbuiging van een dun PVK 2 proefstuk (1, 3, 6 en 9 mm doorbuiging).....	100
Figuur 113: Spanning-rek diagram voor controlestukken VLc 1 C	101
Figuur 114: Spanning-rek diagram voor controlestukken VL 1 C.....	101
Figuur 115: Spanning-rek diagram voor 1 vol.% gecottoniseerde vlasvezel (VLc 1 ND).....	101
Figuur 116: Spanning-rek diagram voor 0,5 vol.% gecottoniseerde vezel (VLc 0,5 ND)	102
Figuur 117: Spanning-rek diagram voor 1 vol.% technische vlasvezel (VL 1 ND).....	102
Figuur 118: Spanning-rek diagram voor 0,5 vol.% technische vlasvezel (VL 0,5 ND).....	102
Figuur 119: Spanning-rek diagram van 2 vol.% PP-vezel bicore (controlemengsel)	103
Figuur 120: Spanning-rek diagram van 2 vol.% PP-vezel monofilament (controlemengsel) 103	
Figuur 121: Spanning-rek diagram van 1 vol.% PP-vezel bicore (PPb 1 ND)	104
Figuur 122: Spanning-rek diagram van 1 vol.% PP-vezel monofilament (PPm 1 ND).....	104
Figuur 123: Spanning-rek diagram van PPb 2 ND proefstukken	104
Figuur 124: Spanning-rek diagram van PPm 2 ND proefstukken	105
Figuur 125: 6 mm doorbuiging bij voorbelasting van een PPm 2 proefstuk	105
Figuur 126: Spanning-rek diagram voor PVA 2 ND A1G proefstukken	106
Figuur 127: Spanning-rek diagram van proefstukken met 1 m% SAP B (PVA 2 ND B1)	106
Figuur 128: Spanning-rek diagram met 1 m% SAP B onder een RV > 90 %.....	107
Figuur 129: Spanning-rek diagram met 1 m% SAP B onder een RV = 60 %.....	107
Figuur 130: Spanning-rek diagram met 1 m% SAP B ingemengd als gelvorm	108
Figuur 131: Spanning-rek diagram met 2 m% SAP B (PVA 2 ND B2)	108
Figuur 132: Spanning-rek diagram met 4 m% SAP B (PVA 2 ND B4)	108
Figuur 133: Doorbuiging van een PVK 2 proefstuk (start, 2, 6 en 10 mm)	109
Figuur 134: Spanning-rek diagram van een PVK 2 proefstuk met scheurvorming	109

Figuur 135: Stijfheid [MPa] bij vierpuntsbuigproef van verschillende mengsels	110
Figuur 136: Herwonnen stijfheid [%] van de verschillende mengsels	111
Figuur 137: Piekwaarde [MPa] bij scheuraanbreng van de verschillende mengsels	113
Figuur 138: Herwonnen piekwaarde [%] van de verschillende mengsels	114
Figuur 139: Meervoudige scheurvorming [%] van de verschillende mengsels	115
Figuur 140: Maximale opgelegde rek bij scheuraanbreng [%]	116
Figuur 141: Totale arbeid W [J] van de verschillende mengsels	117
Figuur 142: Herwonnen meervoudige scheurvorming [%]	118
Figuur 143: Experimentele en theoretische eerste-scheur-sterkte [MPa]	119
Figuur 144: Scheurtip breuktaaiheid J_{tip} [J/m ²] van de verschillende reeksen	120
Figuur 145: Herwonnen eerste-scheur-sterkte [%] van de verschillende reeksen	121
Figuur 146: Herwonnen sterkte [%] van de verschillende reeksen	123
Figuur 147: Verdergaande hydratatie bij een RV > 90 % (2 vol.% PVA)	124
Figuur 148: Dichten van een scheur bij 0,5 vol.% PVA	124
Figuur 149: Dichten van een scheur bij 2 vol.% PVA	125
Figuur 150: Detail van dichten van een scheur bij 2 vol.% PVA ($\delta=24 \mu\text{m}$)	125
Figuur 151: Detail van dichten van een scheur bij 2 vol.% PVA ($\delta=26 \mu\text{m}$)	125
Figuur 152: Dichten van een scheur (2 vol.% PVA)	125
Figuur 153: Nauwelijks heling bij een grote scheur (2 vol.% PVA)	126
Figuur 154: Vorming van helend materiaal in de uiteinden van de scheur (2 vol.% PVA) ...	126
Figuur 155: Overbrugging door aanhechting aan de microvezels (2 vol.% PVA)	126
Figuur 156: Detail van de gevormde producten (2 vol.% PVA)	127
Figuur 157: Aanhechting van helend materiaal op de vezels (2 vol.% PVA)	127
Figuur 158: Aanhechting op PP-vezels (1 en 2 vol.% PPb)	127
Figuur 159: Onderzoek van de scheurvlakken en kristalvorming (2 vol.% PVA)	128
Figuur 160: Kristalvorming op scheurvlak bij PP bicore (a) en PP monofilament (b)	128
Figuur 161: Koepelvorming na desorptie van een SAP B partikel (2 m%)	128
Figuur 162: Opgetreden zelfheling bij een RV > 90 % (2 vol.% PVA en 1 m% SAP B)	129
Figuur 163: Scheurvlak bij bewaring op een RV > 90 % (a) en nat/droog cycli (b) (1 m%) .	129
Figuur 164: Vorming van kristallen en doorscheuren bij herbelasting (2 vol.% PVA)	130
Figuur 165: Herwonnen sterkte bij PVA 1 ND	130
Figuur 166: Herwonnen sterkte en sterkere regionen bij PVA 2 ND	131
Figuur 167: Vorming van nieuwe scheuren en scheur van helend materiaal bij PVA 2 ND	131
Figuur 168: Vorming van nieuwe scheuren bij PVA 2 ND	131
Figuur 169: Vorming van nieuwe microscheur bij PVA 2 ND	132
Figuur 170: Uitgetrokken vezels bij 2 vol.% PVA en detailopnamen	132
Figuur 171: Toepassing van de grafische omzettingmethode bij de variantbepaling	132
Figuur 172: Uitpuilende lengte PVA-vezel	133
Figuur 173: Uitgetrokken vezels bij de technische vlasvezel (a&b) en cottonisé (c)	133
Figuur 174: Uitgetrokken lengte bij PP bicore (a) en PP monofilament (b)	134
Figuur 175: Scheursluiting van bij nat/droog cycli, RV > 90 % en RV = 60 % (PVA)	135
Figuur 176: Scheursluiting van mengsels met vlasvezels (VLc en VL)	136
Figuur 177: Scheursluiting van mengsels met PP bicore en PP monofilament	136
Figuur 178: Scheurdichting van PVA-mengsels van Kuraray (PVK)	137
Figuur 179: Scheurdichting bij mengsels Nat/droog cycli PVA 14, K1, K2 en W/C	137
Figuur 180: Scheurdichting bij mengsels met 1 m% SAP A in gelvorm	138

Figuur 181: Mechanisme tot vorming van CaCO ₃ -kristallen	138
Figuur 182: Scheurdichting bij mengsels met SAP B bij een RV > 90 % en RV = 60 %	139
Figuur 183: Scheurdichting bij mengsels met SAP B (1 m%, 2 m% & 4 m%).....	139
Figuur 184: Slijtkracht van de Braziliaanse proef van de verschillende mengsels	140
Figuur 185: Verschillende typische slijtdiagramma van de mengsels	140
Figuur 186: Gemiddelde permeabiliteit over scheurwijdte ³ met verloop van tijd.....	141
Figuur 187: Doorlatendheid in functie van de scheurwijdte (30 dagen) voor REF.....	142
Figuur 188: Doorlatendheid in functie van de scheurwijdte (30 dagen) voor alle mengsels	142
Figuur 189: Gemiddelde permeabiliteit met standaardafwijking over scheurwijdte ³	143
Figuur 190: Scheur aan de inlaatzijde na 30 dagen permeabiliteit (REF (3), REF (1)).....	144
Figuur 191: Koepelvorming van zelfhelend materiaal door SAP (B2 (2), (2), (4) & B4 (5)) .	144
Figuur 192: Zichtbaar aanwezige SAP C (C1 (2) & C1 (3))	145
Figuur 193: Stalactietvorming bij REF (5).....	145
Figuur 194: Stalactietvorming bij REF (1) & (2)	146
Figuur 195: Stalactietvorming bij B0,5 (4).....	146
Figuur 196: Stalactietvorming bij B1 (2)	147
Figuur 197: Stalactietvorming bij B1 (3)	147
Figuur 198: Stalactietvorming bij B2 (2)	148
Figuur 199: Stalactietvorming bij B4 (5)	149
Figuur 200: Stalactietvorming bij A1 (3)	149
Figuur 201: Stalactietvorming bij C1 (5)	150
Figuur 202: Holle stalactieten (REF (1), REF (5), B0,5 (2), B1 (2) & B2 (3)).....	150
Figuur 203: Helling van de uitlaatscheur bij REF (2)	151
Figuur 204: Helling van uitlaatscheuren bij REF (4)	151
Figuur 205: Helling van uitlaatscheuren bij REF (4)	151
Figuur 206: Helling van uitlaatscheuren (a&b B1 (1), c B1 (3)).....	152
Figuur 207: Helling rondom SAP C (C1 (2), C1 (3) & C1 (5))	152
Figuur 208: Dubbelbrekend calcië uit stalactiet en uit literatuur ^[109]	153
Figuur 209: TGA-curve en haar afgeleide als maat voor gewichtsverandering (SAP A)	154
Figuur 210: TGA-curve en haar afgeleide als maat voor gewichtsverandering (SAP B)	154
Figuur 211: TGA-curve en haar afgeleide als maat voor gewichtsverandering (SAP C)	154
Figuur 212: TGA-curve en haar afgeleide als maat voor gewichtsverandering (REF)	155
Figuur 213: TGA-curve en haar afgeleide als gewichtsverandering (0,5 m% SAP B).....	156
Figuur 214: TGA-curve en haar afgeleide als gewichtsverandering (1 m% SAP B).....	156
Figuur 215: TGA-curve en haar afgeleide als gewichtsverandering (2 m% SAP B).....	157
Figuur 216: TGA-curve en haar afgeleide als gewichtsverandering (4 m% SAP B).....	157
Figuur 217: TGA-curve en haar afgeleide als gewichtsverandering (1 m% SAP A).....	157
Figuur 218: TGA-curve van proefstukken met SAP C	158

Lijst van gebruikte tabellen

Tabel 1: Gemiddelde mechanische eigenschappen van elementair vlas ^{[4][6][9][10]}	5
Tabel 2: Gemiddelde mechanische eigenschappen van polypropyleenvezels ^{[9][17][18]}	7
Tabel 3: Gemiddelde mechanische eigenschappen van polyvinylalcoholvezels ^{[17][23][24][25]}	8
Tabel 4: Samenstelling PVA-ECC M45 [kg/m ³] ^[17]	17
Tabel 5: Samenstelling [kg/m ³] (Brüdern en Mechtherine) ^[85]	43
Tabel 6: Mechanische eigenschappen (Brüdern en Mechtherine) ^[85]	43
Tabel 7: Chemische compositie [m%] en specifieke oppervlakte [m ² /kg] ^[100]	49
Tabel 8: De verschillende types vezels gebruikt in het onderzoek	50
Tabel 9: Standaardmengsel 2 vol.% PVA-vezel van Redco [kg/m ³]	52
Tabel 10: Codes, aantal en afwijking op de standaardsamenstelling [kg/m ³]	54
Tabel 11: Absorptie van SAP met Filtratie en Microscopisch onderzoek	85
Tabel 12: De eerste-scheur-sterkte: input en resultaat	92

