# Invloed van de reologie op de mechanische eigenschappen van zelfverdichtend beton

### Mathijs Bostyn, Frederick Demuenynck

Promotoren: prof. dr. ir. Geert De Schutter, dr. ir. Pieter Desnerck

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

Vakgroep Bouwkundige Constructies Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur Academiejaar 2012-2013



Invloed van de reologie op de mechanische eigenschappen van zelfverdichtend beton

Mathijs Bostyn, Frederick Demuenynck

Promotoren: prof. dr. ir. Geert De Schutter, dr. ir. Pieter Desnerck

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

Vakgroep Bouwkundige Constructies Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur Academiejaar 2012-2013



# Woord vooraf

Toen ons vorig jaar een ellenlange lijst met mogelijke thesisonderwerpen werd voorgelegd, sprongen de onderwerpen met zelfverdichtend beton ons direct in het oog. Uiteindelijk heeft de scriptieomschrijving van: 'invloed van de reologie op de mechanische eigenschappen van zelfverdichtend beton' ons overtuigd. De interesse in zelfverdichtend beton en het feit dat dit beton meer en meer zijn plaats inneemt, en verder zal innemen in de betonwereld, heeft ons over de streep getrokken. Daarnaast mag ook het praktische luik, die met dit eindwerk verbonden was, niet uit het oog verloren worden. Dit was voor ons ook absoluut een bijzondere drijfveer om voor dit onderwerp te kiezen. In de eerste plaats willen we daarom ook onze promotoren, prof. dr. ir. Geert De Schutter en dr. ir. Pieter Desnerck, oprecht bedanken omdat zij ons de kans hebben gegeven om dit onderzoek uit te voeren.

Daarnaast nog een extra woord van dank aan dr. ir. Pieter Desnerck wiens deur steeds voor ons open stond gedurende het academiejaar. Steeds was hij bereid ons te helpen en ons in de goede richting te sturen. Wanneer we door examens weinig tijd hadden om enkele praktische proeven uit te voeren, heeft hij deze voor ons opgevolgd. Daarom zouden we hem ten zeerste willen bedanken.

De Universiteit Gent en de volledige technische staf van het Laboratium Magnel voor betononderzoek dienen zeker bedankt te worden. Steeds stond er in het labo iemand klaar om ons te helpen wanneer we iets niet vonden of een machine niet konden bedienen, bedankt!

Ook dienen we zeker onze vrienden te bedanken. Alhoewel ze niet rechtstreeks met dit onderzoek te maken hebben, speelden ze een voorname rol. Met hen was steeds prettig samenwerken op school, maar zeker even plezant buiten de schoolomgeving. Ze stonden steeds klaar om ons verse moed, afleiding en amusement te verschaffen.

Tenslotte dienen ook onze ouders vermeld te worden. Zonder hun steun en financiële inspanning zouden we nu dit dankwoord niet aan het schrijven zijn. Alhoewel we tijdens onze studies veel in Gent verbleven, was het steeds een verademing om thuis te komen. Dankjewel!

Mathijs Bostyn & Frederick Demuenynck

Gent, juni 2013

### **Toelating tot bruikleen**

"De auteurs geven 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 authors give 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, 3 juni 2013

Mathijs Bostyn Frederick Demuenynck

# Overzicht

### Invloed van de reologie op de mechanische eigenschappen van zelfverdichtend beton

door

Mathijs Bostyn, Frederick Demuenynck

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

Academiejaar 2012-2013

Promotoren: prof. dr. ir. Geert De Schutter dr. ir. Pieter Desnerck

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur Universiteit Gent

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

### Samenvatting

Om een goed zelfverdichtend beton te maken, is het gebruik van superplastificeerder noodzakelijk. Deze zorgt ervoor dat er een hogere verwerkbaarheid verkregen wordt bij eenzelfde watergehalte. In het eerste deel van het onderzoek wordt de verwerkbaarheid en de stroming van het beton onderzocht door middel van een reometer en met behulp van verse betonproeven. Uit de resultaten van de reometer wordt de vloeigrens bepaald, dit is de spanning die nodig is om het beton in beweging te brengen. Daarnaast geeft de viscositeit aan hoe makkelijk het beton stroomt eens het in beweging is. De druksterkte van iedere mengeling wordt bepaald om de invloed van de soort en de hoeveelheid superplastificeerder na te gaan. In het tweede deel wordt het beton gestort op verschillende tijdstippen. Op die manier kan de verandering van de verwerkbaarheid bij het gebruik van verschillende superplastificeerders onderzocht worden. Dit gebeurt enkel door verse betonproeven. Op het verhard beton wordt de verandering van druksterkte en van de elasticiteitsmodulus nagegaan.

TREFWOORDEN: Zelfverdichtend beton, mechanische eigenschappen, verwerkbaarheid, reologie

# Influence of the rheology on the mechanical properties of self-compacting concrete

Mathijs Bostyn, Frederick Demuenynck

Supervisors: Prof. dr. ir. G. De Schutter, dr. ir. P. Desnerck

*Abstract*: The paper describes the influence of the rheology on the mechanical properties of self-compacting concrete (SCC). In order to create a good self-compacting concrete the use of a superplasticizer is required. This ensures a higher workability for the same water-to-cement ratio.

In the first part of the study the workability and the flow of the SCC, mixed with various superplasticisers, is examined by means of a rheometer and by tests on fresh concrete. From the result of the rheometer the yield stress and the viscosity can be determined. A concrete mixture with a lower powder content is very viscous and the workability is thus lower. The higher the content of superplasticiser, the higher the slump flow and workability of the SCC. The compressive strength is determined to check the influence of the nature and the amount of superplasticiser.

In the second part the influence of the casting time is investigated. In this way the change of workability by using various superplasticisers is examined by tests on fresh concrete only. Some superplasticiser provides both a higher and longer workability. The mechanical properties are monitored by the compressive strength and the modulus of elasticity. The type and the amount of superplasticiser does not influence the compressive strength. There is no clear decision about the gradient of the compressive strength. Generally the modulus of elasticity decreases with an increasing air content and is lower after 100 minutes then at 0 minutes.

*Keywords*: Self-compacting concrete, mechanical properties, workability, rheology

#### I. INTRODUCTION

It has been observed that the amount of superplasticiser has an influence on the workability and the rheological properties of self-compacting concrete [1]. Rheology is defined as the study of the flow of matter. SCC has a non-linear behaviour that can be modelled by a Herschel-Bulkley relation [2].

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \gamma^n$$

τ<sub>0</sub>: yield stress [Pa]
K: consistency factor [Pa.s<sup>n</sup>]
n: consistency index [-]

The yield stress must be exceeded in order to initiate flow, the plastic viscosity is the resistance to increase the flow velocity. When the consistency index is larger than one it corresponds to shear thickening behaviour, when its lower than one it corresponds to shear thinning behaviour [3]. Parameters that affect the rheological parameters, amongst others, include the amount of the coarse and fine aggregates, the water-to-cement ratio and the incorporation of superplasticisers.

In the first part of this research (SCC 1-9) the results of the rheometer test are linked to the fresh concrete tests. Two types of superplasticisers are used in varying amounts to obtain different slump flow vaulues. A superplasticiser provides a higher workability at a lower W/C ratio [1]. An increase in the amount of superplasticizer is thus responsible for an increase in the slump flow.

Thereafter the compression strength of the SCC samples is determined. In this way a relationship between compression strength, fresh concrete tests and the rheometer tests can be deducted.

In the second part of this research (SCC 10-14) concrete is cast between 0 and 100 minutes with increments of 20 minutes. The point in time 0 corresponds to the time at which mixing of the concrete was completed. Here only the fresh concrete properties and the compressive strength are tested. Trough these experiments, the loss/gain of workability and compressive strength are examined in time.

#### II. MATERIALS AND METHODS

#### A. Materials

The materials used for all concrete mixes are CEM I 52,5 N, sand 0/5, gravel 2/8 and gravel 8/16 and limestone filler P2. Two types of superplasticisers are used in various amounts to create the concrete mixes. Superplasticiser 1 (SP1) is GLENIUM® 51 con.35% and superplasticiser 2 (SP2) is GLENIUM® 27 con.20%. The composition of the tested concrete is shown in Table 1.

Table 1: Composition of tested concrete

	Type 1	Type 2
CEM I 52,5 N (kg/m <sup>3</sup> )	300	260
Sand 0/5 (kg/m <sup>3</sup> )	870	944
Aggregate 2/8 (kg/m <sup>3</sup> )	268	290
Aggregate 8/16 (kg/m <sup>3</sup> )	443	479
Filler (kg/m <sup>3</sup> )	300	260
Water (kg/m <sup>3</sup> )	165	143
Superplasticiser	Table 2	Table 2
W/C ratio [-]	0,55	0,55
C/P ratio [-]	0,50	0,50

M. Bostyn is with the Magnel Laboratory for Concrete Research, Ghent University (UGent), Gent, Belgium. E-mail: Mathijs.Bostyn@UGent.be .

F. Demuenynck is with the Magnel Laboratory for Concrete Research, Ghent University (UGent), Gent, Belgium. E-mail: Frederick.Demuenynck@UGent.be.

Table 2: The amount of superplasticiser

Type 1	SP1 (l/m³)	SP2 (l/m <sup>3</sup> )	Type 2	SP1 (l/m <sup>3</sup> )	SP2 (l/m <sup>3</sup> )
SCC 1	2,9	-	SCC 6	3,4	-
SCC 2	3,5	-	SCC 7	4,0	-
SCC 3	3,0	-	SCC 8	-	11,0
SCC 4	-	11,0	SCC 9	-	18,0
SCC 5	-	8,0	SCC 12	3,3	-
SCC 10	2,8	-	SCC 13	-	9,2
SCC 11	-	8,6	SCC 14	-	10,5

### B. Experimental methods

During mixing of the concrete the dry constituents are first mixed during one minute. Then the water is added and mixed for another minute. Thereafter the superplasticiser is added and the concrete is mixed for another three minutes. If the superplasticiser content had to be increased (to obtain the desired slump flow), the mixing continues for another minute after adding the additional amount of superplasticiser. When the concrete is poured during time the mixing takes place for another minute before every concrete age.

After mixing the fresh concrete, the properties of all the mixes were tested (slump flow, sieve stability, V-funnel and L-box test). When the concrete is poured in time the slump flow and V-funnel were tested at every concrete age. The tests on the fresh SCC gives a good indication of the behaviour of SCC as the concrete gets older during the tests.

In order to know the rheological parameters for each SCC, a rheometer test is carried out with the ConTec Viscometer 5.

To determine the mechanical properties of the SCC the compressive strength is measured. When the concrete is poured during time the compressive strength is determined at every casting age. The modulus of elasticity is determined at 0 minutes and after 100 minutes.

#### III. RESULTS AND DISCUSSION

#### A. Rheological properties

All of the concrete compositions show a shear thickening behaviour with a value greater than 1 for the consistency index. This index increases with increasing amount of superplasticiser for the same concrete composition with SP1. If the content of coarse aggregates increases, the consistency index decreases and the shear thickening behaviour decreases as well. For mixtures with SP2 these statements can not be confirmed, on the contrary the consistency index remains constant.

The flow curves for concrete mixtures SCC 1-4 are illustrated in Figure 1 and for mixtures SCC 6-9 in Figure 2 depending on the concrete composition type.

The flow curves confirm an average of 35% lower yield stress for concrete composition type 2. This type has the lowest powder content. This was expected because the mixture will be much less coherent by the lower content of fine particles.

A high fluidity and a sufficient resistance to segregation are two essential requirements to obtain a good self-compacting concrete. This means that the yield stress must be low enough while maintaining the plastic viscosity of the mixture [4]. In order to obtain a sufficiently large slump flow, the yield stress must have a low value. Generally one can expect, the lower the yield stress the greater the slump flow will be. A lower yield stress may be, in addition to other adjustments to the compositions, obtained by the addition of a higher amount of superplasticiser. In this experiment the following is observed. For all mixtures (SCC 1-9) a low VF class implies a low plastic viscosity. In the end the workability of the mixtures which used SP2 was better.



Figure 1: Flow curve for concrete composition type 1



Figure 2: Flow curve for concrete composition type 2

In this research, dynamic segregation was found for concrete composition type 2. For each mixture the segregation coefficient [5] was calculated to find an indication for dynamic segregation. Despite of the segregation coefficient a visual indication remains necessary since there often is uncertainty in these segregation values. For concrete composition type 2 the segregation coefficient was 31% higher than the composition with the highest powder content and this could be visually confirmed. The lower mortar fraction in these mixtures was not able to hold the coarse aggregates together due to the lower content of fine material.

Stability is a crucial property for successful placement and performance of self-compacting concrete. It is recommended to use a new method to determine the dynamic segregation in future research. Esmaeilkhanian, B. et al. have developed and employed a novel dynamic stability test, the Tilting box, to quantify dynamic segregation of SCC [6].

#### B. Workability

Comparing the type of superplasticiser, it is clear that SP2 has a better workability during time than SP1 (Figure 3 & Figure 4). In the case of SP1, the full workability is attained at the beginning of the experiment, or between 0 and 20 minutes. The evolution of workability for SP2 is much more constant. The full workability is achieved after about 40 minutes and even after 100 minutes the SCC is still workable.





Figure 4: Slump flow - SP2

The V-funnel time, which characterizes the flow behaviour of SCC, exhibit an inverse gradient of the slump flow. Again SP2 has a more constant evolution. The V-funnel times are also higher for SCC with a lower content of powder and the use of SP1 (Figure 5). For SCC with SP2 this statement is not valid (Figure 6).



Figure 5: V-funnel time - SP1



Figure 6: V-funnel time - SP2

#### C. Mechanical properties

A significant difference in the results for the compressive strength between the SCC mixes cannot be demonstrated for the first part of the research. The compressive strength tend to be independent of the type and the amount of superplasticiser.

The course of the compressive strength of the SCC with SP1 exhibits a light descending trend for the cube compressive strength, the cylinder compressive strength is rather constant (Figure 7). For SCC with SP2 the cube compressive strength is increasing and the cylinder compressive strength is rather constant (Figure 8). The numerical values for the compressive strength are quite similar. Again the compressive strength tends to be independent of the type and the amount of superplasticiser.



Figure 7: Coarse of compressive strength with SP1



Figure 8: Coarse of compressive strength with SP2

The modulus of elasticity decreases with increasing air content [7] (Table 3). The modulus of elasticity for SCC 14 after 100 minutes is an exception. But, SCC 14 is the only concrete mix whose air content is known after 100 minutes. So a correct evaluation of this result is not possible.

Table 3: Air content

	Air content [%]	E <sub>C</sub> [MPa]
SCC 12 (00')	2,0	42900
SCC 13 (00')	2,4	39300
SCC 10/11/14 (00')	2,5	39000
SCC 14 (100')	3,2	40700

The modulus of elasticity is generally lower if measured on concrete specimens cast after 100 minutes then after 0 minutes (Figure 9). Again, SCC 14 is an exception for the decrease in modulus. This aberrant behaviour was also visible in the fresh concrete tests.



Figure 9: Modulus of elasticity

#### IV. CONCLUSIONS

Following conclusions are obtained from the results and the analysis:

The higher the content of superplasticiser, the higher the slump flow and workability of the SCC.

Superplasticiser 2 provides both a higher and longer workability.

A concrete mixture with a lower powder content is very viscous and the workability is thus lower.

The type of superplasticiser does not influence the compressive strength. There is no clear decision about the course of the compressive strength.

Generally the modulus of elasticity decreases with an increasing air content and is lower for specimens cast after 100 minutes then at 0 minutes.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank prof. dr. ir. G. De Schutter and dr. ir. P. Desnerck for their support. The authors would also like to acknowledge the technical staff of the Laboratory Magnel for Concrete Research for the help and the technical support during testing.

#### REFERENCES

- Magera, P. & Ployaert, C. (2009, vijfde herziene druk). Betontechnologie: Hulpstoffen. Brussel: Belgische Betongroepering, hoofdstuk II, paragraaf 2.2, pp. 101-104.
- [2] Feys, D. (2009). Interacties tussen de reologische eigenschappen en het verpompen van zelfverdichtend beton. Doctoraat, Universiteit Gent, Vakgroep bouwkundige constructies, pp. 20-21.
- [3] De Schutter, G., Feys, D. & Verhoeven, R. (2005). *The rheology of fresh Self-Compacting* Concrete: A compromise between Bingham and Herschel-Bulkley?. Sixth FirW PhD Symposium, Faculty of Engineering, Ghent University.
- [4] Desmyter, J. & Dieryck, V. (2009, vijfde herziene druk). Betontechnologie: Speciale betonsoorten, zelfverdichtend beton. Brussel: Belgische Betongroepering, hoofdstuk XII.7, pp. 491-503.
- [5] Wallevik, O.H. (2009). Introduction to Rheology of Fresh Concrete. Reykjavik: Innovation Center Iceland, pp. 5.21-5.22.
- [6] Esmaeilkhanian, B. et al. (2013). Characterization of Dynamic Stability of Self-Consolidating Concrete. Proceedings of the Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, Illinois, USA, 12-15.
- [7] Crouch, L. K., Hewitt, R. & Pitt, J. (2007). Aggregate effects on pervious Portland cement concrete static modulus of elasticity. *Journal* of Materials in Civil Engineering, 19, 7, pp. 561-568.

# Inhoudsopgave

Woord	vooraf	2	
Overzi	Overzicht		
Extend	ed abstract	5	
Inhoud	sopgave	9	
Lijst m	et symbolen en afkortingen	14	
Liist m	et figuren	19	
L iist m	et tabellen	22	
List	et enefielten	24	
Lijst m	et graneken	24	
Inleidi	ng	25	
Deel I:	Literatuurstudie	27	
Hoofds	stuk 1: Inleiding	28	
1.1	Definitie	28	
1.2	Voordelen en nadelen	29	
1.3	Vergelijking met traditioneel beton	29	
Hoofds	Hoofdstuk 2: Beproevingsmethodes		
2.1	Verse betonproeven	31	
2.1.1	Spreidmaat	31	
2.1.2	Doorstroomtijd	32	
2.1.3	L-box test	33	
2.1.4	Sieve segregation test	34	
2.1.5	Luchtgehalte	35	
2.1.6	Volumieke massa	35	
2.1.7	Samenvatting	36	
2.2	Proeven op verhard beton	37	
2.2.1	Volumieke massa	37	
2.2.2	Druksterkte	37	
2.2.2.1	Beproeving	37	
2.2.2.2	Karakteristieke druksterkte	39	
2.2.2.3	Resultaten	41	

2.2.2.4	Druksterkte met ouderdomscoëfficiënt	41
2.2.3	Elasticiteitsmodulus	42
2.2.3.1	Algemeen	42
2.2.3.2	Theoretische benadering	44
2.2.3.3	Experimentele beproeving	45
2.2.3.4	Factoren uit de literatuur die de E-modulus beïnvloeden	48
2.2.4	Treksterkte	51
2.2.4.1	Buigtreksterkte	52
2.2.4.2	Splijttreksterkte	53
Hoofds	tuk 3: Superplastificeerder	56
3.1	Inleiding	56
3.2	Definitie, basisproducten en toepassingsgebieden	56
3.3	Doel	57
3.4	Algemene werking	57
3.5	Toegepaste hulpstof	59
Hoofds	tuk 4: Reologie	60
4.1	Inleiding	60
4.2	Hoofdeigenschappen SCC	62
4.2.1	Filling ability	63
4.2.2	Passing ability	63
4.2.3	Segregation resistance	63
4.3	Theoretisch model	64
4.3.1	Newtoniaanse stroming	65
4.3.2	Niet-Newtoniaanse stroming	65
4.3.2.1	Bingham	66
4.3.2.2	Herschel-Bulkley	66
4.3.2.3	Gemodificeerd Bingham model	68
4.3.3	Vloeigedrag	69
4.3.4	Thixotropie	70
4.3.4.1	Inleiding	70
4.3.4.2	Definitie	70
4.3.4.3	Werking	71
4.3.4.4	Fysische verklaring	73

4.3.4.	5 Andere tijdsafhankelijke eigenschappen	74
4.4	ConTec Viscometer 5	74
4.4.1	Geometrie	74
4.4.2	Concentrische cilinder reometer	75
4.4.3	Basisprincipe van de viscositeitsmeting	77
4.4.3.	1 Segregatie	80
4.5	Databehandeling en transformatie	82
Hoofd	lstuk 5: De reologie van beton	85
5.1	Inleiding	85
5.2	Pakkingsdichtheid	86
5.2.1	Traditionele pakkingsdichtheid	86
5.2.2	Natte pakkingsdichtheid	88
5.3	WFT en PFT bij mortel	91
5.3.1	Bepaling van de WFT en PFT	91
5.3.2	Vloeispanning en schijnbare viscositeit	93
5.3.3	Invloed van de WFT en de PFT	94
5.4	WFT en PFT bij beton (Kwan & Li, 2013)	97
5.4.1	Inleiding	97
5.4.2	Bepaling van de WFT en PFT	97
5.4.3	Invloeden van de WFT en PFT	98
5.4.3.	1 Effect op de verwerkbaarheid en de vloeibaarheid	98
5.4.3.2	2 Effect op de kubusdruksterkte	98
Deel l	II: Onderzoek	99
Hoofd	lstuk 6: Samenstelling van het beton	100
6.1	Granulaten	100
6.2	Cement	101
6.3	Hulpstoffen	101
6.4	Toeslagstoffen	102
6.5	Proefmengelingen	102
6.6	Mengprocedure en betonneren	105
Hoofd	lstuk 7: Proeven	106
7.1	Proefprogramma	106
7.2	Bewaring en voorbereiding	107

7.2.1	Drukproef	. 107
7.2.2	Buigproef en splijtproef	. 108
7.2.3	Elasticiteitsmodulus	. 108
Hoofd	stuk 8: Proefresultaten	. 110
8.1	Deel 1: ZVB 1 - 9	. 110
8.1.1	Verse betonproeven	. 110
8.1.2	Reometer	. 112
8.1.2.1	Verwerken van de ruwe data	. 112
8.1.2.2	2 Reologische stromingscurves	. 114
8.1.2.3	3 Segregatiecoëfficiënt	. 121
8.1.3	Proeven op verhard beton	. 125
8.1.3.1	Druksterkte	. 125
8.1.3.2	2 Treksterkte	. 126
8.2	Deel 2: ZVB 10 - 14	. 127
8.2.1	Verse betonproeven	. 127
8.2.1.1	l Slump flow	. 127
8.2.1.2	2 V-funnel	. 130
8.2.1.3	3 L-box	. 132
8.2.1.4	Luchtgehalte	. 133
8.2.2	Proeven op verhard beton	. 137
8.2.2.1	l Drukproeven	. 137
8.2.2.2	2 Elasticiteitsmodulus	. 144
Deel I	II: Besluit	. 151
Hoofd	stuk 9: Besluit	. 152
9.1	Algemeen	. 152
9.2	Invloed van de reologische parameters op de mechanische eigenscha	ppen
(ZVB	1 - 9)	. 153
9.2.1	Verse betonproeven	. 153
9.2.2	Reometer	. 154
9.2.3	Proeven op verhard beton	. 155
9.2.4	Conclusie	. 155
9.3	Invloed van de reologische parameters op de mechanische eigenscha	ppen
(ZVB	10 - 14)	. 156

9.3.1	Verse betonproeven	156
9.3.2	Proeven op verhard beton	157
9.3.3	Conclusie	158
9.4	Algemeen besluit	160
Referenties		161
Bijlagen		. 167

# Lijst met symbolen en afkortingen

### Symbolen

А	Dwarsdoorsnede van een proefstuk	$mm^2$
A <sub>xmm</sub>	Specifieke oppervlakte van het grove granulaat met afmeting xmm	$m^{2}/m^{3}$
A <sub>A</sub>	Specifiek oppervlak van de overblijvende fractie granulaten	$m^{2}/m^{3}$
$A_{C}$	Specifiek oppervlak van het cement	$m^{2}/m^{3}$
A <sub>FA</sub>	Specifiek oppervlak van de fijne granulaten	$m^{2}/m^{3}$
$A_{M}$	Specifiek oppervlak van de vaste deeltjes	$m^{2}/m^{3}$
$A_S$	Specifieke oppervlakte	$m^{2}/m^{3}$
A' <sub>FA</sub>	Specifiek oppervlak van de overblijvende fractie aan fijn granulaat	$m^{2}/m^{3}$
c	Paramater die aanduidt of een vloeistof shear thinning of shear	-
	thickening gedrag vertoond (gemodificeerd Bingham model)	
$d_1$	Eerste diameter van de slump flow	mm
$d_2$	Tweede diameter van de slump flow	mm
d <sub>gem</sub>	Gemiddelde van d <sub>1</sub> en d <sub>2</sub>	mm
D <sub>max</sub>	Maximale diameter van de granulaten	mm
Е	Elasticiteitsmodulus	MPa
Ec	Elasticiteitsmodulus van beton	MPa
$E_{c^{\infty}}$	Tangenselasticiteitsmodulus van beton	MPa
E <sub>cm</sub>	Secanselasticiteitsmodulus van beton	MPa
E <sub>cm</sub> (t)	Secanselasticiteitsmodulus van beton op tijdstip t	MPa
$\Delta E$	Energie	J
$\mathbf{f}_{\mathbf{c}}$	Betondruksterkte	N/mm <sup>2</sup>
$f_{ci(SCC)}$	Splijttreksterkte voor zelfverdichtend beton	N/mm <sup>2</sup>
$f_{ck} \\$	Karakteristieke druksterkte	N/mm <sup>2</sup>
$f_{ck,cil}$	Karakteristieke cilinderdruksterkte	N/mm <sup>2</sup>
f <sub>ck,cil,1</sub>	Karakteristieke cilinderdruksterkte bepaald met methode B	N/mm <sup>2</sup>
$f_{ck,cil,2}$	Karakteristieke cilinderdruksterkte bepaald met methode B	N/mm <sup>2</sup>
f <sub>ck,cub</sub>	Karakteristieke kubusdruksterkte	N/mm <sup>2</sup>
f <sub>ck,cub,1</sub>	Karakteristieke kubusdruksterkte bepaald met methode B	N/mm <sup>2</sup>
f <sub>ck,cub,2</sub>	Karakteristieke kubusdruksterkte bepaald met methode B	N/mm <sup>2</sup>

$\mathbf{f}_{cm}$	Gemiddelde gemeten druksterkte	N/mm <sup>2</sup>
$f_{cm}(t)$	Gemiddelde druksterkte op tijdstip t	N/mm <sup>2</sup>
$\mathbf{f}_{cm,cil}$	Gemiddelde gemeten cilinderdruksterkte	N/mm <sup>2</sup>
$f_{cm,cub}$	Gemiddelde gemeten kubusdruksterkte	N/mm <sup>2</sup>
$\mathbf{f}_{ct}$	Rechtstreekste treksterkte bepaald a.d.h.v. de splijttreksterkte	N/mm <sup>2</sup>
$f_{ct,fl} \\$	Buigtreksterkte	N/mm <sup>2</sup>
$f_{ct,sp} \\$	Splijttreksterkte	N/mm²
$f_{ct,sp,gem}$	Gemiddelde splijttreksterkte	N/mm <sup>2</sup>
F <sub>max</sub>	Breukbelasting	Ν
G	Vloeiweerstand bij $N = 0$ (Bingham model)	Nm
Н	Hoogte van de cilinder ondergedompeld in de betonspecie (ConTec	m
	Viscometer 5)	
Н	Relatieve viscositeit (Bingham model)	$Nm \cdot s$
k	k-waarde (methode B t.b.v. de karakteristieke druksterkte)	-
$k_2$	Waarde vastgelegd op 1,48 (methode A t.b.v. de karakteristieke	-
	druksterkte)	
Κ	Consistentie factor (Herschel-Bulkley relatie)	$Pa \cdot s^n$
1	Oorspronkelijke lengte van een proefstuk	mm
$\Delta l$	Verkorting van een proefstuk	mm
m	Massa	g of kg
m <sub>gran,verz</sub>	Massa van de verzadigde granulaten	g of kg
n	Consistentie index (Herschel-Bulkley relatie)	-
Ν	Rotatiesnelheid	rot/s
$p_{\rm w}$	Pastaratio	-
p'w	Verhouding van de overtollige pasta	-
R <sub>i</sub>	Externe straal van de binnenste cilinder (ConTec Viscometer 5)	mm
Ro	Interne straal van de buitenste cilinder (ConTec Viscometer 5)	mm
R <sub>xmm</sub>	Percentage granulaten met afmeting <i>xmm</i> ten opzichte van totaal	-
	volume vaste stof	
R <sub>C</sub>	Percentage cement ten opzichte van het totaal volume vaste stof	-
R <sub>FA</sub>	Percentage fijne granulaten ten opzichte van het totaal volume vaste	-
	stof	
S	Coëfficiënt in functie van het gebruikte cement-type	-

S	Standaardafwijking	-
t	Ouderdom van het betonnen proefstuk in dagen	-
Т	Torsiemoment	Nm
$T_i$	Torsiemoment gemeten t.h.v. de binnenste cilinder	Nm
u	Poriëngehalte	-
u <sub>a</sub>	Luchtgehalte	-
u <sub>p</sub>	Pastaratio	-
u <sub>w</sub>	Watergehalte	-
uw	Verhouding van het overtollige water	-
V	Totaal volume $(V_H + V_D)$	<i>m</i> <sup>3</sup>
$V_D$	Volume van deeltjes	<i>m</i> <sup>3</sup>
$V_{\mathrm{H}}$	Volume van holle ruimtes	<i>m</i> <sup>3</sup>
$\beta_{cc}(t)$	Coëfficiënt die verband geeft tussen de druksterkte op een tijdstip t en	-
	de leeftijd van 28 dagen	
3	Holtepercentage	%
ε <sub>a</sub>	Luchthoeveelheid	-
ε <sub>c</sub>	Axiale stuik in het beton	-
$\epsilon_{c,1,n}$	Vervorming, gemeten in de n <sup>de</sup> belastingscyclus bij $\sigma_{c,1}$ t.b.v. de	-
	elasticiteitsmodulus van beton	
$\epsilon_{c,2,n}$	Vervorming, gemeten in de n <sup>de</sup> belastingscyclus bij $\sigma_{c,2}$ t.b.v. de	-
	elasticiteitsmodulus van beton	
$\boldsymbol{\epsilon}_w$	Waterhoeveelheid	-
$\Delta\epsilon_m$	Vervormingsverandering (E-modulus)	-
ø	Pakkingsdichtheid	-
γ	Afschuifsnelheid (shear rate)	$s^{-1}$
μ	Plastische viscositeit	Pa·s
ρ	Pakkingsdichtheid van de overblijvende fractie	-
$\rho_{gran}$	Dichtheid van de granulaten	kg/m³
$\sigma_{c}$	Axiale drukspanning in het beton	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{c,1}$	Aanvangsspanning van 0,5N/mm <sup>2</sup> t.b.v. de elasticiteitsmodulus van	N/mm <sup>2</sup>
	beton	
$\sigma_{c,2}$	Spanningspunt dat overeenkomt met een derde van de druksterkte t.b.v.	N/mm <sup>2</sup>

	de elasticiteitsmodulus van beton	
τ	Afschuifspanning (shear stress)	Pa
$\tau_0$	Vloeigrens (yield stress)	Pa
υ	Poriëngehalte van de fijne granulaten	-
$\Omega_{\mathrm{i}}$	Rotatiesnelheid bij de binnenste cilinder	rot/s

### Afkortingen

- C/A Verhouding van de hoeveelheid cement tot de hoeveelheid granulaten
- C/P Cement-poeder factor
- EC2 Eurocode 2
- EN Europese norm
- IUPAC International Union of Pure and Applied Chemistry
- MC90 Model Code 1990
- NBN Belgische norm
- NSS Not-steady-state
- NVC Normally-vibrated concrete
- PA Passing ability klasse
- PCC Portland cement concrete
- PCE Polycarboxylaatethers
- PFT Paste film thickness
- RV Relatieve vochtigheidsgraad [%]
- SCC Self-compacting concrete
- SD Standard deviation (standaardafwijking)
- SEG Segregation point
- SF Slump flow klasse [mm]
- SP1 Superplastificeerder 1 (zie technische fiche in bijlage A)
- SP2 Superplastificeerder 2 (zie technische fiche in bijlage B)
- SR Sieve stability klasse [%]
- SS Steady state
- SSdata Steady state data
- TB Traditioneel beton
- UHPC Ultra-high-performance concrete
- VF V-funnel klasse [s]
- W/C Water-cement factor
- W/S Verhouding water tot vaste stof
- WFT Water film thickness
- WTCB Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf
- ZVB Zelfverdichtend beton

# Lijst met figuren

Figuur 1: Vergelijking van bestanddelen in volumeprocenten tussen ZVB en TB (Boel, 2006)
Figuur 2: Bepalen van de spreidmaat
Figuur 3: Uitgevloeid beton
Figuur 4: Bepalen van de doorstroomtijd
Figuur 5: V-funnel
Figuur 6: L-box (Raeymaekers, 2012)
Figuur 7: L-box na de proef
Figuur 8: Sieve segregation test
Figuur 9: Bepalen van het luchtgehalte
Figuur 10: Drukpers (6000kN) in Laboratorium Magnel
Figuur 11: Spanning-vervormingsdiagram voor beton onderworpen aan axiale druk
(Vandewalle, 2009)
Figuur 12: E-modulus versus ouderdom van het beton (Lin et al., 2012)
Figuur 13: Principeschets van de proefmethode, elasticiteitsmodulus
Figuur 14: Voorstelling van de secanselasticiteitsmodulus waarbij tan $\alpha_{cm} = E_{cm}$ (De Vylder et
al., 2002)
Figuur 15: Druksterkte in functie van het luchtgehalte (Crouch, Hewitt & Pitt, 2007) 50
Figuur 16: Statische elasticiteitsmodulus in functie van het luchtgehalte (Crouch, Hewitt &
Pitt, 2007)
Figuur 17: Driepuntsbuigproef - Vierpuntsbuigproef (Vandewalle, 2009)
Figuur 18: Opstelling splijtproef (Vandewalle, 2009)53
Figuur 19: Werking van de superplastificeerders: van links naar rechts adsorptie op het
grensvlak cement-water, elektrostatische afstoting tussen twee naburige cementdeeltjes en
sterische plaatsinname (Magera & Ployaert, 2009) 58
Figuur 20: Proefopstelling ConTec Viscometer 5
Figuur 21: Stromingsdiagram van een Newtoniaanse vloeistof (Bartos et al., 2008)65
Figuur 22: Stromingsdiagram van een Bingham vloeistof (Bartos et al., 2008)
Figuur 23: Stromingscurves voor de verschillende modellen (Feys, 2009)67
Figuur 24: Overschatting van de vloeigrens bij het Herschel-Bulkley model (De Schutter,
Feys & Verhoeven, 2005)

Figuur 25: Thixotrope lus (Roussel, 2006)
Figuur 26: Afnemende rotatiesnelheid tijdens een reometertest (Roussel, 2006)
Figuur 27: Toenemende rotatiesnelheid tijdens een reometertest (Roussel, 2006)72
Figuur 28: Variatie van de afschuifspanning in een thixotropische materie (Banfill, 2006)73
Figuur 29: Fysische verklaring voor het verschijsel van thixotropie (Roussel, 2006)73
Figuur 30: Schematische doorsnede van de ConTec Viscometer 5
Figuur 31: Schoepenrad en cilindrische emmer van de ConTec Visometer 5
Figuur 32: Met betonspecie gevuld vat klaar voor de reometertest
Figuur 33: Verband tussen rotatiesnelheid en torsiemoment (Pelova & Walraven, 1998) 79
Figuur 34: Karakteristiek diagram voor verschillende betonsamenstellingen (Pelova &
Walraven, 1998)
Figuur 35: Illustratie ter bepaling van de segregatiecoëfficiënt (Wallevik, 2009) 81
Figuur 36: Mengprocedure (Fung, Kwan & Wong, 2008)
Figuur 37: Bepalen van het optimale watergehalte (Fung, Kwan & Wong, 2008)91
Figuur 38: Vloeispanning in functie van de C/A factor (Kwan & Li, 2012)94
Figuur 39: Schijnbare viscositeit in functie van de C/A factor (Kwan & Li, 2012)94
Figuur 40: WFT in functie van C/A factor en W/C factor (Kwan & Li, 2012)95
Figuur 41: PFT in functie van C/A factor en W/C factor (Kwan & Li, 2012)95
Figuur 42: Vloeigrens in functie van de WFT en PFT (Kwan & Li, 2012)96
Figuur 43: Schijnbare viscositeit in functie van de WFT en PFT (Kwan & Li, 2012)96
Figuur 44: Zeefkromme rijnzand 0/5 100
Figuur 45: Zeefkromme grind 2/8 en 8/16 100
Figuur 46: Zeefkromme CEM I 52,5 N 101
Figuur 47: Verpakking van superplastificeerder 2 (SP2, concentratie 20%) 101
Figuur 48: Zeefkromme kalksteenmeel P2 102
Figuur 49: Kleine betonmolen (50 <i>l</i> )
Figuur 50: Grote betonmolen (200 <i>l</i> )
Figuur 51: Aantal proefstukken (ZVB 10 - 14) 105
Figuur 52: Klimaatkamer
Figuur 53: Solderen van de tunnelpoortjes
Figuur 54: Kleven van de rekstrookjes 108
Figuur 55: Proefopstelling voor het bepalen van de elasticiteitsmodulus 108
Figuur 56: Rekstrookjes 109
Figuur 57: Tweecomponentenlijm

Figuur 58: Voorbeeld van een T/N diagram na transformatie van de ruwe data - Herschel-
Bulkley model (ZVB 1) 114
Figuur 59: Gedrag van betonmengsel ZVB 9 na het uitvoeren van de reometertest 123
Figuur 60: Beton in L-box na 100 min (ZVB 10)
Figuur 61: Beton in L-box na 100 minuten (ZVB 12)132
Figuur 62: Luchtgehalte ZVB 14 - 0 minuten
Figuur 63: Luchtgehalte ZVB 14 - 20 minuten
Figuur 64: Luchtgehalte ZVB 14 - 40 minuten
Figuur 65: Luchtgehalte ZVB 14 - 60 minuten
Figuur 66: Luchtgehalte ZVB 14 - 80 minuten
Figuur 67: Luchtgehalte ZVB 14 - 100 minuten

# Lijst met tabellen

Tabel 1: Classificatie slump flow ZVB (EFNARC, 2005)	31
Tabel 2: Classificatie V-funnel tijd ZVB (EFNARC, 2005)	32
Tabel 3: Classificatie L-box ZVB (EFNARC, 2005)	34
Tabel 4: Classificatie sieve segregation test ZVB (EFNARC, 2005)	34
Tabel 5: Klassen filling ability, slump flow	36
Tabel 6: Klassen filling ability, V-funnel	36
Tabel 7: Klassen passing ability, L-box	36
Tabel 8: Klassen segregatieweerstand	36
Tabel 9: k-waarde voor methode B	40
Tabel 10: Waarden van coëfficiënt s (De Blaere, 2010)	42
Tabel 11: De secanselasticiteitsmodulus E <sub>cm</sub> in functie van de sterkteklassen	44
Tabel 12: Betonmengelingen	. 103
Tabel 13: Mengprocedure	. 105
Tabel 14: Proeven op ZVB 1	. 106
Tabel 15: Proeven op ZVB 2 - 9	. 106
Tabel 16: Proeven op ZVB 10 - 14	. 106
Tabel 17: Samenvatting van de karakteristieken van de rekstrookjes op het beton	. 109
Tabel 18: Verse betonproeven ZVB $1 \rightarrow 9$	. 110
Tabel 19: Vergelijking V-funnel tijd samenstelling 1 en 2	. 111
Tabel 20: Samenvatting betreffende de reologische parameters en resultaten van de	verse
betonproeven	. 114
Tabel 21: Hoeveelheid superplastificeerder versus consistentie index	. 115
Tabel 22: Verband slumpflow en vloeigrens	. 119
Tabel 23: Verband met de V-funnel tijden	. 120
Tabel 24: Verband met de vloeigrens, de soort en de hoeveelheid superplastificeerder	. 120
Tabel 25: Resultaten van de segregatiecoëfficiënt en de sieve segregation test	. 122
Tabel 26: Gemiddelde segregatiecoëfficiënt per betonsamenstelling	. 124
Tabel 27: Resultaten drukproeven ZVB 1 - 9	. 125
Tabel 28: Verhouding druksterkte cilinders/kubussen ZVB 1 - 9	. 126
Tabel 29: Buigtreksterkte ZVB 1	. 126
Tabel 30: Splijttreksterkte ZVB 1	. 126

Tabel 31: L-box ratio	132
Tabel 32: Vergelijking naar druksterkte tussen ZVB 10 en 12	139
Tabel 33: Vergelijking naar druksterktes tussen ZVB 11 en ZVB 14	142
Tabel 34: Ouderdom van de proefstukken bij uitvoering van de E-modulusproef	145
Tabel 35: Overzicht voor de resultaten van de elasticiteitsmodulus en het luchtgehalte	146
Tabel 36: Samenvatting luchtgehalte versus elasticiteitsmodulus	147
Tabel 37: Samenvatting van de elasticiteitsmoduli (afgeronde waarden tot op 100MPa)	149

# Lijst met grafieken

Grafiek 1: Alle opgemeten torsiemomenten per rotatiesnelheid	78
Grafiek 2: Laatste 60 opgemeten torsiemomenten per rotatiesnelheid	78
Grafiek 3: Voorbeeld van een T/N diagram gegenereerd door de reometer zelf - Bing	gham
model (ZVB 1)	. 112
Grafiek 4: Reologische stromingscurves voor betonsamenstelling 1	. 117
Grafiek 5: Reologische stromingscurves voor betonsamenstelling 2	. 117
Grafiek 6: Slump flow - SP1	. 128
Grafiek 7: Mogelijk verloop van de slump flow - SP1	. 128
Grafiek 8: Slump flow - SP2	. 129
Grafiek 9: Slump flow ZVB 11 en 13 - SP2	. 130
Grafiek 10: V-funnel - SP1	. 131
Grafiek 11: V-funnel - SP2	. 131
Grafiek 12: Verloop van het luchtgehalte bij ZVB 14	. 133
Grafiek 13: Verloop van de druksterkte bij ZVB 10 - SP1	. 138
Grafiek 14: Verloop van de druksterkte bij ZVB 12 - SP1	. 138
Grafiek 15: Verloop van de druksterkte bij ZVB 11 - SP2	. 141
Grafiek 16: Verloop van de druksterkte bij ZVB 14 - SP2	. 141
Grafiek 17: Verloop van de druksterkte bij ZVB 13 - SP2	. 143
Grafiek 18: Spanning-vervormingsdiagram na uitvoering van de E-modulus	proef
(ZVB 10 - 100')	. 144
Grafiek 19: Kolomdiagram van de experimentele elasticiteitsmodulus	. 148

# Inleiding

Zelfverdichtend beton is een relatief nieuwe betonsoort waarvan nog niet alle eigenschappen gekend zijn. In het bijzonder de invloed van de reologie op de mechanische eigenschappen. De reologie, verwerkbaarheid en stroming wordt sterk beïnvloed door het watergehalte in het beton. Dat water vervult een dubbele functie, namelijk het verzekeren van de cementhydratatie en ervoor zorgen dat het beton de nodige verwerkbaarheid krijgt. Om tot een aanvaardbare verwerkbaarheid te komen is er meer water nodig dan noodzakelijk voor de hydratatie, waardoor de sterkte beperkt blijft. Het gebruik van krachtige superplastificeerders zorgt voor een hogere verwerkbaarheid bij een gelijkblijvend watergehalte. Dergelijke superplastificeerders oefenen dus een invloed uit op de reologische parameters. Verder wordt onderzocht of dit ook zijn uitwerking heeft op de mechanische eigenschappen van het beton.

In de literatuurstudie wordt eerst nagegaan hoe zelfverdichtend beton gekarakteriseerd kan worden, zowel in verse als in verharde toestand. De reologische eigenschappen van het beton worden onderzocht met behulp van een reometer. Om de resultaten van een dergelijke proef te analyseren kan gebruik gemaakt worden van verschillende modellen, elk met hun eigen vooren nadelen. Uiteindelijk wordt een Herschel-Bulkley model gebruikt. Daarnaast wordt ook de '*water film thickness*' (WFT) en de '*paste film thickness*' (PFT) gebruikt om de reologie van beton te beschrijven. Dit is respectievelijk een pastalaagje en een waterlaagje rond de granulaten. Deze laagjes zorgen voor een smering van de granulaten en gaan op die manier de stroming van het beton bepalen.

In het effectieve onderzoeksgedeelte worden twee verschillende betonsamenstellingen gebruikt, waarbij per samenstelling de soort en de hoeveelheid superplastificeerder varieert. Het onderzoeksgedeelte wordt opgesplitst in twee delen.

Het eerste deel is gericht op het bepalen van de reologische paramaters gebruikmakend van een reometer. Naast het gebruik van de reometer wordt de verwerkbaarheid ook nagegaan aan de hand van proeven op vers beton. Tenslotte wordt na verharding van iedere mengeling de druksterkte gemeten.

In het tweede deel worden betonmengelingen vervaardigd waarbij het beton gestort wordt tussen de 0 en 100 minuten, met telkens tussenstappen van 20 minuten. Op die manier kan de verandering van de verwerkbaarheid in de tijd worden onderzocht bij het gebruik van een verschillende soort en hoeveelheid superplastificeerder. De verwerkbaarheid wordt in dit deel enkel nog gemeten door middel van verse betonproeven. Er wordt geen gebruik gemaakt van een reometer omdat deze niet meer beschikbaar is tijdens het tweede semester. Bij iedere tussenstap worden cilinders en kubussen vervaardigd om het verloop van de druksterkte in de tijd na te gaan. Om inzicht te krijgen in een verandering van de elasticiteitsmodulus wordt deze gemeten op het beton gestort na 0 minuten en na 100 minuten, dus op het beton bij het begin van de proef en het beton volledig op het einde van de proef.

Met de proeven uit het tweede deel wordt nagegaan welke superplastificeerder zijn verwerkbaarheid behoudt in de tijd en er dus voor zorgt dat het beton 100 minuten na vervaardiging nog steeds gemakkelijk hanteerbaar blijft in de praktijk.

**Deel I: Literatuurstudie** 

# Hoofdstuk 1: Inleiding

In deze literatuurstudie wordt eerst een beknopte inleiding gegeven over het materiaal zelfverdichtend beton (ZVB). Op de algemene kenmerken wordt niet uitgebreid ingegaan omdat dit in de voorgaande jaren reeds uitvoerig is gebeurd. Daarnaast wordt er vooral toegespitst op het specifieke onderwerp van deze masterproef, namelijk de invloed van de reologie op de mechanische eigenschappen van zelfverdichtend beton.

### 1.1 Definitie

Het materiaal beton wordt slechts zelden geassocieerd met innovatie. Voor buitenstaanders wordt het vaak aanzien als een mengsel van cement, water, zand en stenen. Dit is echter een verkeerde opvatting. De betontechnologie wordt immers steeds complexer als gevolg van de toepassing van nieuwe hulpstoffen en toeslagstoffen. De innovatieve techniek die momenteel de meeste aandacht krijgt is zonder twijfel deze van het zelfverdichtende beton (WTCB-contact, 2005).

Zelfverdichtend beton, in het Engels 'self-compacting concrete' of 'self-consolidating concrete' (SCC) genoemd, werd voor het eerst voorgesteld aan de universiteit van Tokio in 1988 door professor Okamura. Het is een beton dat een dusdanige vloeibaarheid vertoont dat het louter onder invloed van eigengewicht, dus zonder trillen, een dicht wapeningsnet kan vullen. Daarnaast heeft het beton ondanks zijn hoge vloeibaarheid voldoende stabiliteit tegen ontmenging. Zo blijft het homogeen gedurende het transport, verpompen en verwerken. Traditioneel beton is vaak moeilijk te trillen bij een hoog wapeningspercentage en/of een moeilijke bekistingsvorm. Daarnaast kan er door foutief, meestal te lang op eenzelfde plaats, trillen ontmenging van het beton ontstaan waardoor er een slechte hechting met het betonstaal kan optreden. Hier biedt zelfverdichtend beton een aanzienlijk voordeel daar het niet verdicht hoeft te worden (Ployaert, 2005).

In de literatuur wordt ook de term 'zelfnivellerend' teruggevonden. Zelfnivellerend beton is een speciale vorm van zelfverdichtend beton. Deze benaming wordt slechts gebruikt bij horizontale toepassingen, zoals betonvloeren. Het beton bezit de eigenschap om door het eigengewicht een volledig effen oppervlak te vormen na het storten. In de literatuur worden de termen wel eens door elkaar gebruikt. Strikt gezien wijst de term 'zelfverdichtend' op verticale toepassingen en 'zelfnivellerend' op horizontale toepassingen (Ployaert, 2005).

## 1.2 Voordelen en nadelen

Zelfverdichtend beton heeft enkele belangrijke voordelen.

Op het gebied van verwerking:

- Trillen is overbodig. Dit zorgt voor minder geluidsoverlast, minder slijtage van metalen mallen en bekistingen.
- Betere arbeidsomstandigheden door een minder lawaaierige werkomgeving.
- Verkorting van de storttijd, er moet namelijk niet verdicht worden.
- Mogelijkheid om beton te storten op plaatsen die voor de mens moeilijk bereikbaar zijn.
- Hoge wanden kunnen in één stortfase worden gestort.

Op het gebied van betonkwaliteit:

- Er is een perfecte vulling van dicht gewapende elementen.
- Hoge kwaliteit van het betonoppervlak. De betonhuid is glad waardoor een meer esthetisch uitzicht verkregen wordt.
- Hoge betonkwaliteit in situ, die quasi niet afhankelijk is van het vakmanschap van de arbeiders. Dit verhoogt mede de duurzaamheid van de bouwwerken.

Naast de voordelen zijn ook enkele nadelen verbonden aan zelfverdichtend beton:

- Initiële kostentoename van grondstoffen, productie en controle.
- Zwaardere bekistingen nodig om de uitgeoefende druk op te nemen.

Het economisch voordeel, door de gevoelige tijdswinst en de daarbij horende lagere loonkost, de kwaliteitsvollere afwerking van het eindproduct en de verminderde slijtage aan bekistingen, heffen de nadelen van zelfverdichtend beton ruimschoots op.

## 1.3 Vergelijking met traditioneel beton

Als zelfverdichtend beton wordt vergeleken met traditioneel beton (TB) is meteen duidelijk dat zelfverdichtend beton veel meer fijne deeltjes bevat. Ook zijn er meer hulpstoffen toegevoegd aan deze laatste. De hulpstoffen zorgen ervoor dat de gewenste viscositeit van het beton bereikt wordt. Zelfverdichtend beton begint een belangrijke rol te spelen in de betonbouw. Vooral in de prefabricage heeft deze betonsoort een grote positie ingenomen. Daarom is het belangrijk om al zijn eigenschappen te kennen.



Figuur 1: Vergelijking van bestanddelen in volumeprocenten tussen ZVB en TB (Boel, 2006)

Vulstoffen bestaan uit hele fijne deeltjes. Deeltjes worden als fijn beschouwd als de afmetingen van de deeltjes kleiner zijn dan 0,125mm. De vulstoffen verhogen de verwerkbaarheid en de dichtheid van het beton. In sommige gevallen kunnen deze bijdragen aan de sterkteontwikkeling. Gekende vulstoffen zijn vliegas, kalksteenmeel, slakken, silica fume, etc.

Hulpstoffen worden in kleine hoeveelheden aan het beton toegevoegd en kunnen één of meerdere eigenschappen van het beton beïnvloeden. Gekende hulpstoffen zijn uithardingsvertragers, luchtbelvormers, plastificeerders en superplastificeerders.

Er dient opgemerkt te worden dat de manier van werken bij zelfverdichtend beton anders is dan bij conventioneel beton. Zelfverdichtend beton kan aanzien worden als een hoogtechnologisch product waarbij veel zorg moet besteed worden aan het mengselontwerp. Ook is de stortmethode verschillend. Het zelfverdichtend beton moet voldoende langzaam gestort worden zodat zijn zelfverdichtend karakter tot ontwikkeling kan komen (Huyghe, 2005).

# Hoofdstuk 2: Beproevingsmethodes

### 2.1 Verse betonproeven

Tijdens het storten van het beton worden proeven uitgevoerd om de consistentie ervan te bepalen. De consistentie van de betonspecie is een begrip dat de verwerkbaarheid ervan karakteriseert (De Schutter, 2009). Voor het zelfverdichtend beton in deze masterproef wordt gebruik gemaakt van de spreidmaat (slump flow test) en de doorstroomtijd bekomen uit de trechterproef (V-funnel test) voor het bepalen van het vloei- en vulgedrag van het beton. Daarnaast wordt er ook nog gebruik gemaakt van de L-box test. Met deze test wordt nagegaan in welke mate het beton in staat is om doorheen dunne openingen te vloeien, zoals openingen tussen wapeningstaven. Als laatste wordt de stabiliteit tijdens zeven bepaald (sieve segregation test). Hiermee wordt de weerstand van het beton tegen segregatie bepaald. Steeds wordt ook de volumemassa en het luchtgehalte gemeten.

Er bestaan echter nog andere proeven (J-ring, U-box, filling box test, ...) om de consistentie van het beton te bepalen, die verder in dit werk niet worden gebruikt.

### 2.1.1 Spreidmaat

De spreidmaat of slump flow wordt bepaald met behulp van de Abramskegel zoals deze gebruikt wordt bij het bepalen van de zetmaat voor traditioneel beton. De spreidmaat wordt bepaald volgens NBN EN 12350-8, 2007. De kegel wordt gevuld met beton en vervolgens gelijkmatig omhoog getrokken. Daarna wordt de lengte van twee onderling loodrechte diameters ( $d_1$  en  $d_2$ ) van de uitgevloeide betonspecie gemeten, waarbij de eerste diameter de grootst meetbare is en de tweede diameter deze loodrecht daarop. De uitspreiding is nu het gemiddelde ( $d_{gem}$ = slump flow) van de twee loodrechte diameters.

De opgemeten gegevens moeten gelegen zijn tussen de waarden in Tabel 1.

Tabel 1: Classificatie slump flow ZVB (EFNARC, 2005)

Slump flow klasse	Slump flow
SF1	550 – 650 <i>mm</i>
SF2	660 – 750 <i>mm</i>
SF3	760 – 850 <i>mm</i>



Figuur 2: Bepalen van de spreidmaat (Desmyter & Dieryck, 2009)

Figuur 3: Uitgevloeid beton

### 2.1.2 Doorstroomtijd

De doorstroomtijd wordt bepaald volgens NBN EN 12350-9, 2007. Bij de V-funnel test wordt de trechter volledig gevuld met het vloeibare beton. Vervolgens wordt onderaan een klep geopend waardoor het beton uit de trechter stroomt. De tijd gemeten tussen het openen van de klep aan de onderkant en de volledige lediging van de trechter geeft de doorstroomtijd of de V-funnel tijd. Praktisch gezien wordt de volledige lediging gelijk gesteld met de eerste lichtdoorval van onderuit.

Tabel 2: Classificatie V-funnel tijd ZVB (EFNARC, 2005)

V-funnel klasse	V-funnel tijd
VF1	$\leq 8s$
VF2	9 s tot 25 <i>s</i>



Figuur 4: Bepalen van de doorstroomtijd (Desmyter & Dieryck, 2009)



Figuur 5: V-funnel

### 2.1.3 L-box test

Het vermogen van zelfverdichtend beton om wapening of andere obstakels in de bekisting te passeren, de zogenaamde '*passing ability*' wordt bepaald met de L-box test volgens NBN EN 12350-10. Tijdens de proef mag het beton niet ontmengen of blokkeren. Er bestaan twee varianten van de proef:

- twee wapeningstaven in de opening (bredere wapening);
- drie wapeningstaven in de opening (dichte wapening).

In het verticale gedeelte van de L-box wordt een afgemeten hoeveelheid betonspecie gestort. Eens de schuif wordt opengetrokken, vloeit het beton horizontaal tussen de openingen van de staven door. Het hoogteverschil tussen de betonspecie voor de staven en deze aan het einde van de goot levert een maat voor het vermogen om wapening te passeren.



Figuur 6: L-box (Raeymaekers, 2012)



Figuur 7: L-box na de proef

Als het beton twee minuten 'gerust' heeft wordt de schuif geopend en kan het vloeibare beton horizontaal door de openingen stromen. De verhouding tussen het beton op het einde van de box en deze in het verticale stuk wordt bepaald. Een verhouding groter dan 0,8 geeft aan dat het beton voldoende zelfverdichtend is. Als het beton blokkeert of segregeert bij de staven wordt er een lagere ratio gemeten, terwijl dit eigenlijk wil zeggen dat het zelfverdichtend beton geen goede kwaliteit heeft. Het is mogelijk dat een verhouding groter dan één wordt waargenomen bij zelfverdichtend beton met een zeer lage viscositeit. Het beton stroomt dan zeer vlug door en blijft meer aan de verste zijde van de L-box liggen. De classificatie gebeurt volgens Tabel 3.

Tabel 3: Classificatie L-box ZVB (EFNARC, 2005)

Passing ability klasse	Doorstroomcapaciteit
PA1	$\geq$ 0,8 (2 staven)
PA2	$\geq$ 0,8 (3 staven)

### 2.1.4 Sieve segregation test

Met deze test wordt nagegaan in hoeverre het zelfverdichtend beton bestand is tegen segregatie, ontmenging. Een mengsel van 5kg +/- 0,2kg wordt op een zeef met openingen van 5mm gegoten vanop een hoogte van ongeveer 50cm. Na twee minuten wordt dan de hoeveelheid afgewogen die door de zeef is gevloeid. De verhouding tussen het doorgevloeide beton en het initieel betongewicht geeft dan de weerstand aan. Een verhouding lager dan 15% wordt als goed aanzien. De classificatie is terug te vinden in Tabel 4.

Tabel 4: Classificatie sieve segregation test ZVB (EFNARC, 2005)

Sieve stability klasse	Segregatie-index
SR1	$\leq 20\%$
SR2	$\leq 15\%$



Figuur 8: Sieve segregation test
# 2.1.5 Luchtgehalte

Het luchtgehalte in vers beton kan gemeten worden met de proefmethode beschreven in de Belgische norm NBN EN 1230-7 '*Proeven op beton - luchtgehalte in vers beton - Methode met veranderlijke druk*'. Deze methode is gebaseerd op de relatie tussen het volume van de lucht en de toegepaste druk. Deze relatie wordt bij constante temperatuur beschreven door de wet van Boyle. Indien het proeftoestel goed geijkt is, wat hier het geval is, kan het luchtgehalte van het verse beton onmiddellijk worden afgelezen (De Schutter, 2010).



Figuur 9: Bepalen van het luchtgehalte

### 2.1.6 Volumieke massa

De volumieke massa van het vers beton kan bepaald worden door het vullen van een recipiënt met gekend volume. Door het bepalen van de massa van de hoeveelheid beton die het volume vult, kan onmiddellijk de volumieke massa becijferd worden (De Schutter, 2010). In dit geval dient het beton dus niet verdicht te worden, wat bij de oorsprong van deze proef wel het geval was om de volumieke massa van traditioneel beton te bepalen.

# 2.1.7 Samenvatting

Slump flow	Klasse	Beschrijving
		Een lage filling ability. De ondergrens ligt in deze klasse, maar is
	SF1	afhankelijk van de samenstelling. Algemeen kan gesteld worden
550 - 650 <i>mm</i>		dat een vers zelfverdichtend beton met een $SF < 600mm$ meestal
		niet bruikbaar is.
660 - 750mm	SF2	Een goede filling ability. Dit beton is bruikbaar voor de meeste
		praktische toepassingen.
		Een hoge filling ability. Het beton vloeit goed, snel en over grote
760 - 850 <i>mm</i>	SF3	afstanden. Ze wordt daarom vaak gebruikt bij complexe vormen
		en zwaar gewapende constructies. Er dient opgelet te worden dat
		er voldaan is aan de segregatieweerstand en aan de passing ability.

Tabel 5: Klassen filling ability, slump flow

#### Tabel 6: Klassen filling ability, V-funnel

V-funnel tijd	Klasse	Beschrijving						
$\leq 8s$	VF1	Goede filling ability.						
9 - 25s	VF2	Matige tot lage filling ability.						

#### Tabel 7: Klassen passing ability, L-box

Ratio	Klasse	Beschrijving									
$\geq$ 0,80 (2 staven)	PA1	Een goede passing ability voor toepassingen met lichte wapening.									
≥ 0,80 (3 staven)	PA2	Een goede passing ability voor toepassingen met dichtere									
		wapening.									

#### Tabel 8: Klassen segregatieweerstand

Segregatie-index	Klasse	Beschrijving
≤ 20%	SR1	Voldoende weerstand tegen segregatie.
≤ 15%	SR2	Goede weerstand tegen segregatie.

# 2.2 Proeven op verhard beton

### 2.2.1 Volumieke massa

De volumieke massa of volumemassa van het beton wordt volgens NBN EN 12390-7 gedefinieerd als de verhouding, uitgedrukt in kilogram per kubieke meter, van de massa van een bepaalde hoeveelheid verhard beton tot zijn schijnbaar volume. Deze volumieke massa kan zowel bepaald worden bij een proefstuk in verse toestand dan wel in droge toestand (Vandewalle, 2009).

De volumieke massa wordt bepaald voor ieder aangemaakt proefstuk, dus de cilinders en de kubussen. Voorafgaand aan de drukproeven worden de stukken gewogen. Via de afmetingen kan dan de volumieke massa bepaald worden.

### 2.2.2 Druksterkte

### 2.2.2.1 Beproeving

Onder druksterkte van het beton verstaat men de gemiddelde breukspanning over de doorsnede van een betonnen proefstuk dat onder enkelvoudige druk wordt belast (Vandewalle, 2009).

De druksterkte wordt hoofdzakelijk beïnvloed door de betonsamenstelling zelf en door de ouderdom van het beton. Secundaire, maar niet onbelangrijke invloeden zijn: de bewaaromstandigheden van het beton, de vorm en afmetingen van het proefstuk, de vlakheid van het contactvlak van zowel de persplaat als het beton en de snelheid van belasten (Vanwewalle, 2009).

De druksterkte van het beton wordt bepaald door het uitvoeren van drukproeven op vervaardigde proefstukken. De meest gebruikte proefstukken zijn cilinders, kubussen en prisma's. De drukproef wordt uitgevoerd volgens de richtlijnen in NBN EN 12390-3 (Vanwewalle, 2009).

De kubussen en cilinders die hier gebruikt worden, hebben gestandaardiseerde afmetingen. Er worden kubussen gebruikt met riblengte 150*mm* en cilinders met hoogte 300*mm* en diameter 150*mm*. Om tot goede resultaten te komen, dienen de drukvlakken voldoende effen te zijn om spanningsconcentraties te vermijden.

Na iedere menging van het beton worden na de verse betonproeven cilinders en kubussen vervaardigd om later de druksterkte te bepalen. Voor iedere mengeling worden meerdere cilinders en meerdere kubussen vervaardigd. Deze worden bewaard in een vochtige kamer bij een temperatuur van  $20 \pm 2^{\circ}C$  en een relatieve vochtigheid van minimaal 95% tot ze beproefd worden. Het beproeven gebeurt na 28 dagen.

De drukproef wordt uitgevoerd met behulp van een drukpers. De cilinders dienen eerst gezaagd en geëffend te worden om twee drukvlakken te verkrijgen die zo effen en evenwijdig mogelijk zijn. Het is van groot belang dat de cilinders haaks worden gezaagd, zodanig dat de twee drukvlakken precies evenwijdig liggen. Indien dit niet het geval is, wordt meer op de ene kant van de cilinder gedrukt dan op de andere kant, wat leidt tot spanningsconcentraties. De kubussen worden zodanig gepositioneerd dat de meest ruwe kant niet dient als drukvlak. Op die manier moeten de kubussen niet meer bewerkt worden.



Figuur 10: Drukpers (6000kN) in Laboratorium Magnel

Het proefstuk wordt tussen de drukplaten van de drukpers geplaatst en onderworpen aan een drukkracht die continu, aan een matige snelheid wordt opgedreven. Het opdrijven van de drukkracht gebeurt automatisch, zodat de druk gelijkmatig toeneemt. De spanning stijgt met 0,4 tot  $0,8N/mm^2$  per seconde, hier specifiek met  $0,6N/mm^2$ , zodat de proef in ongeveer 60 seconden kan worden uitgevoerd (Ann Van Geysel et al., 1999).

De druk neemt toe totdat het proefstuk bezwijkt door het overschrijden van de inwendige trekspanningen. De resultaten worden digitaal uitgelezen met een meetnauwkeurigheid van 1kN.

### 2.2.2.2 Karakteristieke druksterkte

De karakteristieke druksterkte  $f_{ck}$  wordt gedefinieerd als de sterkte voor dewelke de waarschijnlijkheid van 95% bestaat dat het resultaat van een proefneming  $f_c$  groter is dan  $f_{ck}$ . In de berekeningen wordt uitgegaan van de druksterkte na 28 dagen.

Men drukt de karakteristieke druksterkte uit met volgende vergelijking (De Blaere, 2009):

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,64 \cdot s$$
 (2.1)

$$f_{cm} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} f_c \qquad (2.2)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \cdot (f_{c} - f_{cm})^{2}}{n - 1}}$$
(2.3)

Met:

- f<sub>c</sub>: individuele druksterkte van een proefstuk [N/mm<sup>2</sup>];
- f<sub>ck</sub>: karakteristieke druksterkte [N/mm<sup>2</sup>];
- f<sub>cm</sub>: gemiddelde druksterkte [N/mm<sup>2</sup>];
- n: aantal proefnemingen;
- s: standaardafwijking [-].

Men dient op te merken dat deze theoretische benadering geldig is voor zover het aantal monsternemingen n tenminste gelijk is aan 20. Bij afwezigheid van een dergelijk aantal proefresultaten mag volgens de norm NBN B 15-002 (1999) par. 4.2.1.3 worden verondersteld dat:

$$f_{ck} = f_{cm} - 8N/mm^2$$
 (2.4)

Aangezien het vereiste aantal monsternemingen nooit wordt bereikt, zou er gebruik gemaakt moeten worden van deze experimentele formule.

In EN13791 is een methode beschreven om de karakteristieke druksterkte van boorkernen te bepalen indien er minder dan 20 monsternemingen zijn. Er wordt onderscheid gemaakt naar gelang het aantal kernen. Indien er meer dan 15 monsternemingen zijn, gebruikt men methode A om de karakteristieke druksterkte te bepalen. Is het aantal monsternemingen tussen de 3 en de 15 dan gebruikt men methode B.

#### Methode A

De karakteristieke druksterkte wordt de kleinste waarde van:

$$f_{ck} = f_{cm} - k_2 \cdot s \tag{2.5}$$

$$f_{ck} = f_{c,laagst} + 4 \tag{2.6}$$

Met:

- s: standaarddeviatie van de resultaten of 2,0*N/mm*<sup>2</sup> indien kleiner;
- k<sub>2</sub>: waarde vastgelegd op 1,48.

#### Methode B

De karakteristieke druksterkte wordt de kleinste waarde van:

$$\mathbf{f}_{ck} = \mathbf{f}_{cm} - \mathbf{k} \tag{2.7}$$

$$f_{ck} = f_{c,laagst} + 4 \tag{2.8}$$

De waarde van k kan uit Tabel 9 gehaald worden.

# monsternemingen	k
10 - 14	5
7 - 9	6
3 - 6	7

Tabel 9: k-waarde voor methode B

In het verder verloop van deze masterproef zullen de formules van methode B gebruikt worden. In dit geval is dit het meest aangewezen aangezien deze rekening houdt met het geringe aantal monsternemingen.

#### 2.2.2.3 Resultaten

De druksterkte kan berekend worden met de volgende formule:

$$f_c = \frac{F_{max}}{A} [N/mm^2]$$
(2.9)

Waarin:

- F<sub>max</sub>: breukbelasting [N];
- A: dwarsdoorsnede van het proefstuk [mm<sup>2</sup>].

De gemeten druksterkte van een welbepaald beton is echter afhankelijk van de vorm en afmetingen van het proefstuk. Hoe hoger en hoe slanker het proefstuk is, hoe kleiner de gemeten druksterkte wordt. Gezien de heterogeniteit van het materiaal beton is een zekere spreiding van de proefresultaten te verwachten. De spreiding zal des te kleiner zijn naarmate het beton homogener is. In NBN EN 206-1 wordt de druksterkte van het beton dan ook uitgedrukt door haar karakteristieke waarde  $f_{ck}$ . (Vandewalle, 2009).

### 2.2.2.4 Druksterkte met ouderdomscoëfficiënt

Beton kent een stijgende druksterkte naarmate het ouder wordt. De sterkteklasse is een maat voor de druksterkte van beton. Deze sterkteklasse is gebaseerd op de karakteristieke druksterkte na 28 dagen, uitgedrukt in  $N/mm^2$ .

Wanneer men de druksterkte van het beton wenst te ramen op een ouderdom verschillend van deze waarop de drukproeven werden uitgevoerd, kan men beroep doen op benaderende omrekeningscoëfficiënten in functie van het cement-type. Deze zijn bepaald op basis van vele proeven over verschillende jaren (De Blaere, 2010). Zo kan de druksterkte na x aantal dagen omgezet worden naar een druksterkte na 28 dagen. Het verband tussen de druksterkte op een tijdstip t en de leeftijd van 28 dagen wordt gegeven door volgende formule afkomstig van NBN B 15-002:1999.

$$f_{cm}(t) = f_{cm} \cdot \beta_{cc}(t)$$
(2.10)

Met:

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left\{s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t/t_1}\right)^{1/2}\right]\right\}$$
(2.11)

Hierin is:

- $f_{cm}(t)$  : de gemiddelde druksterkte op tijdstip t [N/mm<sup>2</sup>];
- f<sub>cm</sub>: de gemiddelde druksterkte op 28 dagen ouderdom [N/mm<sup>2</sup>];
- t: de ouderdom in dagen van het beton;
- t<sub>1</sub>: één dag;
- s: een coëfficiënt in functie van het gebruikte cement-type;
- β<sub>cc</sub>(t): coëfficiënt die verband geeft tussen de druksterkte op een tijdstip t en de leeftijd van 28 dagen.

In het beton werd cement-type CEM I 52,5 N gebruikt. De coëfficiënt die hiermee overeenstemt bedraagt 0,23. Deze is terug te vinden in Tabel 10.

CEM I 32,5	0,33	CEM II/A-M 32,5 R	0,40	CEM III/A 32,5	0,38
CEM I 42,5	0,33	CEM II/A-M 42,5	0,40	CEM III/A 42,5	0,38
CEM I 42,5 R	0,25	CEM II/B-M 32,5	0,40	CEM III/A 52,5	0,33
CEM I 52,5	0,23	CEM II/B-M 32,5 R	0,38	CEM III/B 32,5	0,45
CEM I 52,5 R	0,18	CEM II/B-M 42,5	0,38	CEM III/B 42,5	0,40
				CEM III/B 52,5	0,38
				CEM V/A 32,5	0,45

Tabel 10: Waarden van coëfficiënt s (De Blaere, 2010)

# 2.2.3 Elasticiteitsmodulus

### 2.2.3.1 Algemeen

Een belangrijke eigenschap van een materiaal is de vervorming onder invloed van een belasting. Indien een betonproefstuk onderworpen wordt aan een één-assige kortstondige drukproef, bekomt men een verband tussen de axiale drukspanning  $\sigma_c$  en de axiale stuik  $\varepsilon_c$ . Hierbij is  $\varepsilon_c = \Delta l/l$  met  $\Delta l$  = verkorting en l = oorspronkelijke lengte van het proefstuk. De verhouding tussen de gemeten spanning en stuik is nagenoeg constant bij lage spanningen. Echter bij hogere spanningen blijkt de stuik meer toe te nemen dan de spanningen. Deze extra vervormingstoename wordt naast het visco-elastisch karakter van het materiaal mede veroorzaakt door het ontstaan van microscheurtjes in het beton. In een vervormingsgestuurde proef kan men ook de dalende tak in het diagram doorlopen (Vandewalle, 2009).

Het verband tussen de axiale drukspanning  $\sigma_c$  en de axiale stuik  $\varepsilon_c$  wordt geschetst in Figuur 11. De elastische vervormingen zijn grotendeels afhankelijk van de ouderdom en de betonsamenstelling, voornamelijk de granulaten zijn bepalend voor de waarde van de Emodulus (EN 1992-1-1:2004 (E)).



Figuur 11: Spanning-vervormingsdiagram voor beton onderworpen aan axiale druk (Vandewalle, 2009)

Concreet is de elasticiteitsmodulus E de verhouding tussen de drukspanning en de corresponderende stuik en wordt uitgedrukt in N/mm<sup>2</sup>,  $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ . In de literatuur wordt er echter wel een onderscheid gemaakt tussen twee verschillende elasticiteitsmoduli, namelijk de tangens- en de secanselasticiteitsmodulus (Vandewalle, 2009).

De tangenselasticiteitsmodulus ( $E_{c\infty}$ ) komt overeen met de raaklijn aan de  $\sigma_c$ - $\varepsilon_c$  kromme in de oorsprong en correspondeert met de dynamische elasticiteitsmodulus die aangewend wordt bij de analyse van dynamische verschijnselen. Deze elasticiteitsmodulus kan eenvoudig bepaald worden aan de hand van een formule of experimenteel via de resonantietechniek. Omdat er in deze thesis geen sprake is van dynamische verschijnselen is de tangenselasticiteitsmodulus van ondergeschikt belang en wordt er dan ook niet dieper op ingegaan.

Bij belastingen van lange duur, zou men eerder de secanselasticiteitsmodulus ( $E_{cm}$ ) in de berekeningen moeten invoeren. Deze elasticiteitsmodulus, soms ook de statische elasticiteistmodulus genoemd, zal wel worden behandeld en de experimentele bepaling ervan wordt dan ook uitvoerig besproken in paragraaf '2.2.3.3 *Experimentele beproeving*' en in het onderzoeksgedeelte van deze thesis.

#### 2.2.3.2 Theoretische benadering

In Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004 (E)) wordt een formule vooropgesteld waarbij de waarde van de secanselasticiteitsmodulus eenvoudig kan bepaald worden aan de hand van de druksterkte.

$$E_{cm} = 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3}$$
(2.12)

Met:

- E<sub>cm</sub>: secanselasticiteitsmodulus [MPa];
- f<sub>cm</sub>: de gemiddelde druksterkte vanuit de drukproeven [N/mm<sup>2</sup>].

Er dient vermeld te worden dat deze formule slechts geldig is voor traditioneel beton. In de realiteit blijkt het nog een groot vraagteken te zijn of de formule mag toegepast worden voor zelfverdichtend beton. Toch zal in het onderzoeksgedeelte deze formule gebruikt worden ter vergelijking van de resultaten verkregen met de vervormingsgestuurde proef.

Uitwerking van dit verband (vergelijking 2.12) geeft voor de verschillende sterkteklassen van beton de waarden vermeld in Tabel 11. Aangezien de karakteristieke sterkte  $f_{ck}$  van beton overeenkomt met een sterkte na 28 dagen, hebben de waarden van  $E_{cm}$  in de tabel als regel ook betrekking op 28 dagen.

Enkele waarden betreffende de secanselasticiteitsmodulus, vermeld in Eurocode 2 voor traditioneel beton, worden weergegeven in Tabel 11. De waarden in deze tabel worden als indicatief beschouwd voor algemene toepassingen. De norm schrijft voor dat de waarden van  $E_{cm}$  in Tabel 11 geldig zijn voor beton gemaakt met kwartsietgrind en verhard onder normale omstandigheden. Voor beton gemaakt met porfiersteenslag en van dezelfde sterkteklasse wordt gerekend met  $1,1E_{cm}$ . Voor beton gemaakt met kalksteenslag wordt gerekend met  $0,9E_{cm}$ . In deze thesis werden voor de proefstukken ronde grindgranulaten gebruikt, meer bepaald kwartsietgrind. Er dient dus geen omrekening te gebeuren.

Tabel 11: De secanselasticiteitsmodulus  $E_{\rm cm}$  in functie van de sterkteklassen

Sterkteklassen voor traditioneel beton														
f <sub>ck</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
f <sub>cm</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
E <sub>cm</sub> [GPa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44

Verder wordt in de Eurocode ook nog een formule voorgesteld voor de schatting van de variatie van de elasticiteitsmodulus in de tijd.

$$E_{cm}(t) = (f_{cm}(t)/f_{cm})^{0,3} \cdot E_{cm}$$
(2.13)

Hierin is:

- E<sub>cm</sub>(t): de secanselasticiteitsmodulus op tijdstip t [MPa];
- f<sub>cm</sub>(t): de gemiddelde druksterkte op tijdstip t [N/mm<sup>2</sup>];
- E<sub>cm</sub>: de secanselasticiteitsmodulus op 28 dagen ouderdom [MPa];
- f<sub>cm</sub>: de gemiddelde druksterkte op 28 dagen ouderdom [N/mm<sup>2</sup>].

De relatie tussen  $f_{cm}(t)$  en  $f_{cm}$  volgt uit vergelijking 2.10.

In het onderzoeksgedeelte werden enkele elasticiteitsmodulussen bepaald op proefstukken met een ouderdom afwijkend van 28 dagen. Toch zal formule 2.13 niet worden gebruikt omdat de afwijking maximaal drie dagen bedraagt. Dergelijke afwijking heeft weinig of geen effect ten opzichte van een elasticiteitsmodulus bepaald op 28 dagen. Dit wordt verduidelijkt in Figuur 12. Hierop is te zien dat vanaf een bepaalde ouderdom van het betonproefstuk de elasticiteitsmodulus weinig varieert. Indien de opmeting van een E-modulus niet op 28 dagen na vervaardiging wordt bepaald, zal dit worden vermeld in de tekst.



Figuur 12: E-modulus versus ouderdom van het beton (Lin et al., 2012)

### 2.2.3.3 Experimentele beproeving

Via de vervormingsgestuurde proef wordt de secanselasticiteitsmodulus bepaald door meting van langsvervormingen. Er wordt gebruik gemaakt van cilindrische proefstukken en de experimentele bepaling van de secanselasticiteitsmodulus staat beschreven in de Belgische norm NBN B 15-203. Verder in deze masterproef vindt u de bepaling van de elasticiteitsmodulus van het beton volgens deze werkwijze.

De proefstukken worden bewaard in een vochtige kamer bij een temperatuur van  $20 \pm 2^{\circ}C$  en een relatieve vochtigheid van minimaal 95% tot de dag van beproeving. De test ter bepaling van de elasticiteitsmodulus gebeurt zo dicht mogelijk nabij 28 dagen. Om tot goede resultaten te komen, dienen net zoals bij de drukproeven de drukvlakken voldoende effen te zijn. Indien dit niet het geval is, wordt meer op de ene kant van de cilinder gedrukt dan op de andere kant wat kan leiden tot spanningsconcentraties. De juiste haaksheid en vlakheid wordt verkregen door het oppervlak te bewerken door zagen.

Alvorens de vervormingsgestuurde proef aan te vatten, dient men de proefstukken voor te bereiden. Het principe daarvan wordt schematisch geïllustreerd in Figuur 13. De proefstukken bestaan uit cilinders met diameter 150*mm* en hoogte 300*mm* overeenkomstig met de norm. Op drie plaatsen, met een hoek van 120° ertussen, worden rekstrookjes geplaatst met een meetbasis van 120*mm*.



Figuur 13: Principeschets van de proefmethode, elasticiteitsmodulus

De rekstrookjes worden op hun beurt, via een elektrische bedrading, verbonden met een computer. Eens de verbinding tot stand wordt gebracht, kan het proefstuk gepositioneerd worden in de drukpers. Deze drukpers werd eveneens gebruikt voor de uitvoering van de drukproeven beschreven in paragraaf '2.2.2 Druksterkte'. Eens deze voorbereiding correct en nauwkeurig wordt aangebracht en toegepast, kan de eigenlijke proef starten.

De methode bestaat erin de langsvervormingen op te meten van een proefstuk uit verhard beton dat wordt onderworpen aan drie belastingscycli. Daarna wordt een drukproef uitgevoerd ter bepaling van de breukbelasting. Er wordt een bepaalde drukspanning opgelegd op het proefstuk waarna via de rekstrookjes de rek in het beton wordt opgemeten. De secanselasticiteitsmodulus wordt dan bepaald via de wet van Hooke die de verhouding tussen de spanningen en de rek vastlegt.

$$E_{\rm cm} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \tag{2.14}$$

De secanselasticiteitsmodulus, voorgesteld in Figuur 14, is de helling van een rechte getrokken door een punt met aanvangsspanning  $\sigma_{c,1} = 0.5N/mm^2$  en een volgend spanningspunt dat overeenkomt met een derde van de vooraf bepaalde druksterkte van het beton  $\sigma_{c,2} = \frac{1}{3} f_c [N/mm^2]$  (De Vylder et al., 2002).

$$E_{cm} = \frac{\sigma_{c,2} - \sigma_{c,1}}{\epsilon_{c,2,n} - \epsilon_{c,1,n}}$$
(2.15)

In vergelijking 2.15 is:

- E<sub>cm</sub>: de secanselasticiteitsmodulus [MPa];
- ε<sub>c,1,n</sub>: de vervorming, herleid tot de meetbasis, gemeten in de n<sup>de</sup> belastingscyclus bij
   σ<sub>c,1</sub>[-];
- ε<sub>c,2,n</sub>: de vervorming, herleid tot de meetbasis, gemeten in de n<sup>de</sup> belastingscyclus bij
   σ<sub>c,2</sub> [-].



Figuur 14: Voorstelling van de secanselasticiteitsmodulus waarbij tan  $\alpha_{cm} = E_{cm}$  (De Vylder et al., 2002)

De druksterkte van het beton wordt vooraf bepaald op drie kubussen met een identieke samenstelling en ouderdom als diegene waarvan de elasticiteitsmodulus wordt gezocht. Ieder proefstuk ondergaat driemaal een lus tussen de beide belastingsniveaus. Bij elk belastingsniveau wordt de opgelegde kracht gedurende 90 seconden aangehouden. Het ontlasten of belasten van het proefstuk van  $0,5N/mm^2$  tot  $\frac{1}{3}$  f<sub>c</sub> [N/mm<sup>2</sup>] duurt ongeveer 30 seconden. Na de uitvoering van deze drie belastingslussen wordt een vierde maal de druk opgevoerd tot het proefstuk bezwijkt door het overschrijden van de inwendige trekspanningen. Dit proces gebeurt volledig automatisch zodanig dat de spanning gelijkmatig toeneemt of afneemt met een snelheid van  $0,6 \pm 0,4N/mm^2$  per seconde. Per betonsamenstelling en ouderdom bij 0 en 100 minuten zijn er telkens drie cilinders waarvan de secanselasticiteitsmodulus wordt bepaald.

### 2.2.3.4 Factoren uit de literatuur die de E-modulus beïnvloeden

Net zoals de druksterkte stijgt de elasticiteitsmodulus mee met de leeftijd van het verharde beton. De stijging blijkt ongeveer even snel te verlopen voor zelfverdichtend beton als voor traditioneel beton, alhoewel er vermeld dient te worden dat zelfverdichtend beton iets meer vervormbaar is. Deze kleine verschillen in stijfheid kunnen toegeschreven worden aan de hogere mortelfractie in zelfverdichtend beton.

In een experimentele studie van Gómez, Parra & Valcuende worden de mechanische eigenschappen van zelfverdichtend beton vergeleken met deze van traditioneel beton. Verschillende mengsels worden aangemaakt waarbij hoofdzakelijk de fractie aan fijne deeltjes varieert. Men constateerde dat het zelfverdichtend beton een lagere elasticiteitsmodulus had (ongeveer 2%) dan het traditioneel beton. Dit verschijnsel is te wijten aan het groter mortelgehalte (beton zonder de grove granulaten) in de zelfverdichtende betonmengsels. De mortelpasta is meer vervormbaar dan de granulaten, wat ertoe leidt dat de zelfverdichtende proefstukken zich minder stijf gedragen. Dit uit zich in de resultaten, hoe groter het volume aan mortelpasta in een mengsel, hoe lager de stijfheid van het proefstuk, hoe groter de vervormbaarheid en bijgevolg hoe lager de elasticiteitsmodulus (Gómez, Parra & Valcuende, 2011).

Vervolgens vermeld men ook het volgende. Vanuit het oogpunt in verband met de vervormbaarheid is het gedrag van zelfverdichtend beton vrij gelijkaardig met traditioneel beton. Daarom kan de uitdrukking ter berekening van de elasticiteitsmodulus uitgaande van

de druksterkte als geldig beschouwd worden voor het specifieke geval van zelfverdichtend beton. Gómez et al. vermeld volgende formule uit CEB-FIB Model Code 1990:

$$\mathbf{E}_{\rm c} = 1,15 \cdot 8500 \cdot \mathbf{f}_{\rm c}^{1/3} \tag{2.16}$$

Gómez, Parra & Valcuende beweren dat indien men de experimenteel verkregen resultaten vergelijkt met de resultaten aan de hand van vergelijking 2.16, dat de absolute procentuele fout dan zeer laag ligt. De formule 2.16 is ongeveer dezelfde als formule 2.12 waarbij deze laatste gebruikt zal worden. Man mag dus, uit het oogpunt van de vervormbaarheid, de formules die vermeld worden in Eurocode 2 ter bepaling van de elasticiteitsmodulus uitgaande van de druksterkte voor traditioneel beton ook gebruiken voor het specifieke geval van zelfverdichtend beton. De resultaten berekend met 2.16 blijken dicht tegen de experimentele waarden te schommelen in hun experimenteel onderzoek (Gómez, Parra & Valcuende, 2011).

Een ander onderzoek heeft aangetoond dat het effectief gehalte aan holle ruimte, dit zijn de holtes toegankelijk vanaf het oppervlak van een proefstuk, een grote rol spelen in de verharde eigenschappen van doorlatend Portland cement concrete (pervious PCC). Er wordt meer bepaald aangetoond dat het effectief gehalte aan holle ruimtes of het luchtgehalte in het beton wel degelijk een invloed kan hebben op de druksterkte en ook op de elasticiteitsmodulus (Crouch, Hewitt & Pitt, 2007).

In de literatuur worden vaak volgende vaststellingen voor traditioneel beton, in verband met de elasticiteitsmodulus, aangehaald:

- De elasticiteitsmodulus is afhankelijk van de stijfheid, type, hoeveelheid en grootte van de granulaten (Neville, 1997; Carrasquillo & Cetin, 1998).
- Sommige onderzoekers menen dat de waarde van de elasticiteitsmodulus hoofdzakelijk afhankelijk is van de grove granulaten (Wu et al., 2001).
- Algemeen ondervindt men, hoe hoger de waarde van de druksterkte, hoe groter de waarde van de elasticiteitsmodulus zal zijn (Manita & Sideris, 2004; Wu et al., 2001).
- Bij gelijkblijvende granulaatgehaltes vertonen de betonmengsels met kleine granulaatafmetingen de grootste druksterktes. Echter de elasticiteitsmodulus stijgt bij grotere granulaatafmetingen (Burdette, Deatherage & Oloukon, 1991).
- Beton met hogere granulaatgehaltes vertonen een lichte verhoging van de elasticiteitsmodulus (Carrasquillo & Cetin, 1998).

 De granulaten zijn het stijfste materiaal in een normaal betonmengsel, bijgevolg hoe meer granulaten men toevoegt, hoe groter de stijfheid en bijgevolg hoe groter de elasticiteitsmodulus zal zijn van het eindproduct (Carrasquillo & Cetin, 1998).

Een experimenteel onderzoek van Crouch, Hewitt & Pitt toont het effect van het luchtgehalte (effective void content [%]) op de elasticiteitsmodulus aan voor vier verschillende betonmengsels. Alle vier de mengsels hebben ofwel een andere granulaatgradatie, een andere granulaathoeveelheid of een andere granulaatgrootte. Belangrijk is dat men in iedere situatie kan vaststellen dat de waarde van de elasticiteitsmodulus daalt bij stijgend luchtgehalte. Het onderzoek werd uitgevoerd voor doorlatend Portland cement betonmengsels, maar dit fenomeen kan zich eventueel ook voordoen bij traditioneel beton en zelfs voor zelfverdichtend beton.

In het onderzoeksgedeelte van deze thesis zal dit in het achterhoofd worden gehouden en zal dan ook worden onderzocht of het luchtgehalte wel degelijk een invloed kan hebben op de elasticiteitsmodulus of de druksterkte.

Figuur 15 toont het verband tussen het luchtgehalte en de druksterkte voor vier betonmengsels. Men kan duidelijk waarnemen dat de druksterkte daalt naarmate het luchtgehalte toeneemt.



Figuur 15: Druksterkte in functie van het luchtgehalte (Crouch, Hewitt & Pitt, 2007)

Vervolgens geeft Figuur 16 duidelijk de verlaging van de elasticiteitsmodulus weer naarmate het luchtgehalte toeneemt.



Figuur 16: Statische elasticiteitsmodulus in functie van het luchtgehalte (Crouch, Hewitt & Pitt, 2007)

In het onderzoek van Crouch, Hewitt & Pitt werden de reeds opgesomde vaststellingen van andere onderzoekers, in verband met de elasticiteitsmodulus, ook geconstateerd. Men kan dus besluiten dat het luchtgehalte wel degelijk een invloed kan hebben op de elasticiteitsmodulus van gelijk welk betonproefstuk. Dit fenomeen is ook vaak vastgesteld in het Labo Magnel voor betononderzoek, maar werd nog niet uitgebreid onderzocht om dit te bevestigen.

### 2.2.4 Treksterkte

Beton weerstaat zeer slecht aan trek. De breuk wordt voor normaal beton meestal ingeleid via aanwezige microscheuren en holten die hetzij zich uitbreiden, hetzij aanleiding geven tot scheurinitiatie onder toenemende trekspanning. De vermelde microscheuren zijn hoofdzakelijk hechtingsscheuren in het contactvlak tussen de grove granulaten en cementsteen (Vandewalle, 2009). De treksterkte kan op verschillende manieren bepaald worden. In de Belgische normen zijn drie verschillende proeven opgenomen:

- rechtstreekse trek (NBN EN 15-211);
- bepaling van de buigtreksterkte (NBN EN 12390-5);
- bepaling van de treksterkte door splijten (NBN EN 12390-6).

In deze thesis wordt geen gebruik gemaakt van de eerste methode, namelijk rechtstreekse trek.

### 2.2.4.1 Buigtreksterkte

Eerst wordt gebruik gemaakt van een buigproef op prismatische proefstukken. Er is een onderscheid gemaakt tussen de drie- en de vierpuntsbuigproef. De bekomen treksterkte  $(f_{ct,fl})$  noemt men de buigtreksterkte en kan berekend worden met de lineaire elasticiteitstheorie.

Driepuntsbuigproef: 
$$f_{ct,fl} = \frac{3}{2} \cdot \frac{(F_{max} \cdot l)}{b \cdot h^2} [N/mm^2]$$
 (2.17)

Vierpuntsbuigproef: 
$$f_{ct,fl} = \frac{(F_{max} \cdot l)}{b \cdot h^2} [N/mm^2]$$
 (2.18)

Met:

- F<sub>max</sub>: breukbelasting [N];
- l: spanwijdte [mm];
- b,h: breedte, respectievelijk hoogte van de dwarsdoorsnede [mm].

Bij de driepuntsbuigproef ondervindt het prisma een maximaal buigend moment in zijn centrale doorsnede. Het breukvlak is in dit geval opgelegd en is daarom niet noodzakelijk de zwakste doorsnede over de volledige overspanning. Bij een vierpuntsbuigproef wordt een maximaal buigend moment opgewekt in één derde van de overspanning. Het breukvlak dat zal optreden is dus de zwakste doorsnede in dit derde van de overspanning. Daarom zal de buigtreksterkte volgens een driepuntsbuigproef wat hoger uitvallen.



Figuur 17: Driepuntsbuigproef - Vierpuntsbuigproef (Vandewalle, 2009)

### 2.2.4.2 Splijttreksterkte

Als de prisma's gebroken zijn door een buigproef wordt op de twee helften een splijtproef of Braziliaanse proef uitgevoerd, dit geeft de splijttreksterkte ( $f_{ct,sp}$ ).

Het proefstuk wordt op druk belast volgens twee beschrijvende rechten waarbij de theoretische lijnlast uitgeoefend wordt als een last verdeeld over een belastingstrookje uit een halfhard materiaal. Volgens de x-as ontstaan er trekspanningen. Indien a  $< (1/10) \cdot d$  zouden de splijtspanningen nagenoeg eenparig verdeeld zijn over de hoogte (Vandewalle, 2009).



Figuur 18: Opstelling splijtproef (Vandewalle, 2009)

De splijtsterkte wordt als volgt bepaald:

$$f_{ct,sp} = (2 \cdot F_{max}) / (\pi \cdot l \cdot d) [N/mm^2]$$
(2.19)

Met:

- F<sub>max</sub>: breukbelasting [N];
- l: lengte van het proefstuk [mm];
- d: diameter, respectievelijk hoogte van het proefstuk [mm].

De splijttreksterkte is een maat voor de rechtstreekse treksterkte. Volgens NBN B 15-002 kan de treksterkte als volgt bepaald worden:

$$f_{ct} = 0.9 \cdot f_{ct,sp}$$
 (2.20)

Deze relatie is geldig voor traditioneel beton. Voor zelfverdichtend beton is deze verhouding ietwat afwijkend. Daarnaast is ook de proefstukgrootte van belang.

Voor het afleiden van de zuivere treksterkte uit de splijttreksterkte voor poedergebaseerd zelfverdichtend beton volgens MC90 of EC2 levert de formule een ruwe, maar realistische schatting. Een meer specifiekere verhouding kan berekend worden met de formule voorgesteld door Rocco et al., maar daarvoor dient de karakteristieke materiaallengte van het zelfverdichtend beton gekend te zijn (Raeymaekers, 2012).

In de literatuur zijn studies in verband met de splijttreksterkte van zelfverdichtend beton erg beperkt en ze spreken elkaar soms tegen. Een nieuwe uitgebreide studie van Gómez, Parra & Valcuende vermeld echter wel dat de splijttreksterkte voor zelfverdichtend beton waarin kalksteen filler wordt gebruikt, 15% lager ligt in vergelijking met traditioneel beton. Dit kan worden veroorzaakt door het gebruik van superplastificeerders of door een hoger gehalte aan fijne deeltjes in zelfverdichtend beton. De proefstukken hebben een ouderdom groter of gelijk aan 28 dagen. Bij een ouderdom van 7 dagen blijkt het verschil in splijttreksterkte tussen zelfverdichtend beton en traditioneel beton veel kleiner te zijn (Gómez, Parra & Valcuende, 2011).

De resultaten blijken dus af te wijken van gelijkaardige studies waarbij een andere toeslagstof wordt gebruikt, bijvoorbeeld vliegas of hoogovenslakken. Gómez, Parra & Valcuende concludeerden dat de splijttreksterkte voor zelfverdichtend beton met kalksteen filler veel lager ligt indien men vliegas of hoogovenslakken als toeslagstof gebruikt. Ook andere onderzoekers bevestigen dit besluit (Gómez, Parra & Valcuende, 2011). Er wordt opgemerkt

dat de toeslagstof van de betonmengsels, die vervaardigd worden in deze thesis, bestaat uit kalksteenmeel.

Roncero en Gettu verwijzen naar de vorming van grote kristallen bij het gebruik van superplastificeerders gebaseerd op polycarboxylgroepen. Deze grote kristallen verzwakken de overgangszone van granulaat-pasta en het gevolg hiervan is een daling van de treksterkte van het beton.

Door de grote verschillen in splijttreksterkte voor zelfverdichtend beton (self-compacting concrete, SCC) en traditioneel beton (normally-vibrated concrete, NVC) stelt Gómez et al. voor om de standaard formules voor het schatten van de splijttreksterkte aan te passen.

$$f_{ci(SCC)} = 0.845 \cdot f_{ci(NVC)}$$
 (2.21)

In vergelijking 2.21 is f<sub>ci</sub> de splijttreksterkte [N/mm<sup>2</sup>] (Gómez, Parra & Valcuende, 2011).

# Hoofdstuk 3: Superplastificeerder

# 3.1 Inleiding

Het aandeel van de granulaten bedraagt meestal ongeveer 80% van het betonvolume. De cement pasta, welke op zichzelf een samengesteld product is, omhult en scheidt de partikels van de granulaten. Op die manier wordt een '*smerende*' laag gevormd welke de wrijving tussen deze granulaten vermindert en vervolgens ook de beweging en de herschikking vergemakkelijkt. Vervolgens wordt via een complexe interactie tussen de pasta en de granulaten de stroming van een vloeibaar betonmengsel geregeld en biedt daarbij het mengsel een bepaald niveau van verwerkbaarheid (Bartos et al., 2008).

Op een macroscopische schaal is ongewapend beton een samengesteld materiaal bestaande uit granulaten, cement pasta en een kleine hoeveelheid holten gevuld met lucht of water. Soms en altijd bij zelfverdichtend beton komen daar nog een hoeveelheid hulpstoffen bij. Er wordt gesproken over de superplastificeerders.

Typisch schommelt de maximale dosering van een bepaalde hulpstof in een betonmengsel rond de 5,0% van het gebruikte volume cement. Respectievelijk dus zo'n 50*ml* per kg cement.

# 3.2 Definitie, basisproducten en toepassingsgebieden

In de literatuur beschrijft men de superplastificeerders als zijnde hulpstoffen die, voor een gegeven betonmengeling, toelaten het watergehalte sterk te verminderen zonder de verwerkbaarheid te wijzigen of die, bij gelijk blijvend watergehalte, tot een belangrijke verhoging van de verwerkbaarheid leiden of nog tot beide uitwerkingen samen aanleiding geven (Magera & Ployaert, 2009).

Actueel worden er vier producttypes op de markt gebracht (Magera & Ployaert, 2009):

- polycondensaten van gesulfoneerde melamine-formaldehyde;
- condensaten van gesulfoneerde naftaleenformaldehyde;
- vinylcopolymeren;
- polycarboxylethers.

Het toepassingsdomein van de superplastificeerders geldt voor alle betontypes:

- traditioneel beton;
- zelfverdichtend beton;
- hogesterktebeton (UHPC);
- spuitbeton.

# 3.3 Doel

In de praktijk streeft men ernaar om een beton te verkrijgen met een goede en langere verwerkbaarheid zonder negatieve bijwerkingen. Vaak is het nodig om een verlenging van de verwerkbare tijd te verwezenlijken voor verschillende uren. Men dient ook rekening te houden met eventuele vertragingen als het beton vervoerd wordt met een mixer naar de plaats van bestemming. Dit is bijzonder van belang voor bouwlocaties in bijvoorbeeld de stad met druk verkeer of in afgelegen gebieden met lange transporttijden. Een vloeibaar beton maakt immers het gehele bouwproces gemakkelijker.

Om bovenstaande te kunnen verwezenlijken, wordt gebruikt gemaakt van superplastificeerders. Ze worden gebruikt om de verwerkbaarheid van het vloeibaar beton te verbeteren, maar ook de duurzaamheid ervan te verhogen.

# 3.4 Algemene werking

Door het toevoegen van een superplastificeerder aan het betonmengsel wordt een verhoogde verwerkbaarheid bekomen door het vroegtijdig samenvlokken van cement en vulstoffen (filler) te voorkomen. Via adsorptie hechten de moleculen van de superplastificeerders zich vast aan het grensvlak tussen de cementdeeltjes en het aanmaakwater. Door de elektrostatische aantrekkingskracht hechten de superplastificeerders zich vast aan het hydraterend cement (Magera & Ployaert, 2009). Figuur 19 toont een beknopte grafische weergave van de werking van de superplastificeerders.

Eens geadsorbeerd, vormen de superplastificeerders een laag met negatieve lading rond elk cementdeeltje. Hierdoor verkrijgen twee naburige cementdeeltjes dezelfde oppervlaktelading en stoten elkaar bijgevolg af. Het gevolg van deze elektrostatische afstoting is een dispersie van de cementdeeltjes, een afname van de viscositeit van de cementpasta en een verhoging van de verwerkbaarheid. Daarnaast leidt de sterische plaatsinname van de superplastificeerders eveneens tot een afstotingskracht werkende op korte afstand. Deze moleculaire opbouw van de superplastificeerders in de vorm van lange kettingen, bestaande uit lussen en staarten, slingeren zich tussen de cementdeeltjes. Op die manier wordt de onderlinge toenadering tussen de deeltjes belemmerd en hierdoor kan het water de cementdeeltjes meer omringen (Banfill, 2006), (Bartos et al., 2008) & (Magera & Ployaert, 2009).



Figuur 19: Werking van de superplastificeerders: van links naar rechts adsorptie op het grensvlak cement-water, elektrostatische afstoting tussen twee naburige cementdeeltjes en sterische plaatsinname (Magera & Ployaert, 2009)

Er dient opgemerkt te worden dat bepaalde superplastificeerders en cementsoorten niet bij elkaar passen. De negatieve ladingen van cementdeeltjes en hydratatieproducten hangen immers sterk af van de cementsoort. Ook tussen de verschillende soorten superplastificeerder komen grote verschillen voor in elektrostatische lading. De gepaste combinatie blijft dus kritisch om een goed betonmengsel te verkrijgen. Verder kan in sommige situaties een combinatie van verschillende superplastificeerders leiden tot sedimentatie of gelvorming.

De doeltreffendheid van de superplastificeerders hangt van een groot aantal factoren af (Magera & Ployaert, 2009):

- de categorie van het product;
- de geschiktheid van het product om door het cement geadsorbeerd te worden;
- het type en de aard van het cement;
- de W/C factor;
- de wijze en het ogenblik van inbrengen in het beton.

Superplastificeerders zijn hulpstoffen die door hun vele voordelen zeer aantrekkelijk zijn voor betoningenieurs. Ze bieden immers een grotere verwerkbaarheid aan betonmengsels met een aanvaardbare W/C factor en druksterkte of een gelijkaardige verwerkbaarheid aan een lagere W/C factor, gereduceerd tot 30-35%, en bijgevolg een hogere druksterkte. Echter hun spectaculaire effecten op de reologie zijn soms onvoorspelbaar. Een mogelijk probleem is hun effect op het verloop van de hydratatiereactie welke vroegtijdige verharding veroorzaakt. Dit

verlies aan slump flow kan soms gelinkt worden aan het tijdstip van toevoeging van de superplastificeerder of de duurtijd van het mixen (Banfill, 2006).

# 3.5 Toegepaste hulpstof

In het onderzoek van deze thesis wordt gebruik gemaakt van Glenium<sup>®</sup> 51 con.35% en Glenium<sup>®</sup> 27 con.20% als superplastificeerders. Deze hulpstoffen behoren tot de derde generatie superplastificeerders op basis van een chemische keten van gemodificeerde polycarboxylic ethers. De polymeren bestaan uit ruggengraten met carboxylgroepen en zijketens. De moleculen van deze hulpstof hebben een dubbele werking welke reeds werd toegelicht in paragraaf '*3.4 Algemene werking*'.

Ter herhaling kunnen de dispersiemechanismen waarvan sprake is globaal worden ingedeeld in twee klassen:

- mechanisme gebaseerd op elektrostatische afstoting;
- mechanisme gebaseerd op sterische afstoting.

Door deze twee-fasen-werking wordt het verlies aan verwerkbaarheid in de tijd tegengewerkt.

Zoals reeds vermeld, worden in het onderzoeksprogramma twee soorten hulpstoffen gebruikt. In het verdere verloop van deze thesis zal gesproken worden over superplastificeerder 1 (SP1) met verwijzing naar de technische fiche in bijlage A en superplastificeerder 2 (SP2) met verwijzing naar de technische fiche in bijlage B.

# Hoofdstuk 4: Reologie

# 4.1 Inleiding

De definitie van zelfverdichtend beton werd reeds aangetoond in paragraaf '1.1 Definitie'. Het beton dient dus aan volgende voorwaarden te voldoen:

- In staat zijn om moeilijke vormen door het eigengewicht, dus zonder trillen, op te vullen.
- In staat zijn om doorheen dichte wapeningsnetten te vloeien.
- Een hoge segregatieweerstand bezitten.

Zelfverdichtend beton bezit bijzondere reologische eigenschappen die deze voorwaarden mogelijk maken.

De term '*reologie*' is afkomstig vanuit het Grieks en wordt gedefinieerd als '*de studie van de stroming*'. Het is de tak van de wetenschap die omgaat met de deformatie en stroming van materialen onder invloed van een bepaalde spanning. Reologie omvat zowel het gedrag van vloeibaar als verhard beton (Bartos et al., 2008).

Vanuit voorgaande definitie geraakt men niet veel wijzer. De term reologie is dan ook een zeer complex begrip waarvoor eigenlijk geen echte definitie bestaat. Vooral vanuit het standpunt van de reologische eigenschappen van zelfverdichtend beton is dit een heel complexe studie.

Als gevolg van de progressieve fysisch-chemische veranderingen die zich voordoen, wijzigen ook de reologische eigenschappen van het vloeibare beton voortdurend en dit op een nonlineaire wijze. De snelheid en omvang van deze wijziging hangt niet alleen af van de samenstelling van het mengsel, maar ook van de omgevingsomstandigheden (Bartos et al., 2008).

Reologische vergelijkingen welke verband leggen met de fundamentele reologische eigenschappen, zoals afschuifspanning en viscositeit, van een vloeibaar betonmengsel vertrouwen op verschillende basisveronderstellingen.

Volgende hypothesen worden verondersteld (Bartos et al., 2008):

- Een homogeen materiaal bestaande uit een uniforme samenstelling.
- Een isotroop materiaal waarvan de eigenschappen dezelfde zijn in alle richtingen.
- Een continuüm zonder discontinuïteiten tussen twee punten of locaties in het materiaal zelf.

De mate waarin de bovenstaande aannames geldig zijn, is sterk afhankelijk van de samenstelling van het betonmengsel en de schaal (macroschaal) waarop het wordt waargenomen en beoordeeld (Bartos et al., 2008).

De fundamentele reologische eigenschappen, zoals afschuifspanning en viscositeit, zijn in staat om voorspellingen te maken van de vervormingen of stroming afkomstig van een bepaalde afschuifspanning. Omgekeerd, metingen van vervormingen of stroming kan worden gebruikt om de toegepaste spanning te berekenen. Hierbij wordt de afschuiving in vloeistoffen gewoonlijk uitgedrukt als een relatieve beweging van twee parallelle platen waarbij een laminaire stroming wordt verondersteld voor lage afschuifsnelheden (Bartos et al., 2008).

Tot op vandaag zijn er verschillende reometers beschikbaar die telkens een relatie proberen te leggen tussen de afschuifspanning  $\tau$  [Pa] (= shear stress) en de afschuifsnelheid  $\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$  [1/s] (= shear rate). Op die manier bekomt men een reologische curve. Dankzij de reometers van vandaag kan men de testcondities dichter bij de werkelijkheid brengen. Namelijk het simuleren van de schuifsnelheden die worden bereikt in de praktijk tijdens het hanteren en plaatsen van vloeibaar beton.

Voor deze thesis werden de eerste negen betonsamenstellingen bestaande uit zelfverdichtend beton gekarakteriseerd met de ConTec Viscometer 5 reometer. Voor meer informatie over deze reometer wordt verwezen naar paragraaf '4.4 ConTec Viscometer 5'. De proefopstelling voor het bepalen van de reologische eigenschappen wordt afgebeeld op Figuur 20.

In de literatuur daarentegen wordt vaak gebruik gemaakt van de Tattersall Mk-II reometer. Verder zijn er nog veel meer reometers op de markt en in de literatuur terug te vinden. Deze toestellen verschillen in de fundamentele reologische principes die ze gebruiken. Omdat deze reometers niet in deze thesis wordt gebruikt, wordt er dan ook niet verder op ingegaan en wordt er enkel aandacht besteed aan de ConTec Viscometer 5.



Figuur 20: Proefopstelling ConTec Viscometer 5

# 4.2 Hoofdeigenschappen SCC

Bij traditioneel beton wordt door middel van de zetmaat (slump) een maat voor de consistentie bepaald. Deze wordt uitgevoerd aan de hand van een Abramskegel. Het gedrag van zelfverdichtend beton echter is grondig verschillend dan dat van de traditionele getrilde soort. Daarbij komt nog dat de slump test onbetrouwbaar wordt bij waarden groter dan 200*mm*. Voor zelfverdichtend beton wordt dan ook geen zetmaat opgemeten, maar wel een vloeimaat of slump flow.

De karakterisering van zelfverdichtend beton kan gebeuren door de fundamentele reologische eisen, wat betreft de vloeigrens en de viscositeit, om te zetten naar drie eigenschappen die belangrijk zijn in de praktijk (Bartos et al., 2008):

- vulcapaciteit (filling ability);
- capaciteit om doorheen nauwe openingen te vloeien (passing ability);
- weerstand tegen segregatie (segregation resistance).

Deze drie eigenschappen moeten een behoorlijk niveau behalen om te kunnen spreken van zelfverdichtend beton en dit moet zo blijven gedurende transport en plaatsing onder gelijk welke omstandigheden.

## 4.2.1 Filling ability

Zelfverdichtend beton dient gemakkelijk te kunnen vloeien onder zijn eigengewicht. De vulcapaciteit of filling ability kan omschreven worden als het vermogen van een vloeibaar mengsel om te kunnen vloeien onder zijn eigengewicht en daarbij alle mogelijke ruimtes in de bekisting op te vullen. Met andere woorden moet de vulcapaciteit voldoende hoog zijn (voldoende vloeibaar beton) zodat eventuele lucht tijdens het mengproces of tijdens het storten uit het beton kan ontsnappen. Op die manier kan een voldoende gecompacteerd beton geplaatst worden (Bartos et al., 2008).

De vloeibaarheid of filling ability kan eenvoudig getest worden aan de hand van de testmethode van de slump flow. De uitvoeringsmethode van de slump flow wordt omschreven in paragraaf '2.1.1 Spreidmaat'. Een andere test die in de literatuur vaak terug te vinden is, is de J-ring. Deze wordt niet toegelicht omdat de methode van de J-ring niet wordt toegepast in het onderzoeksgedeelte van deze thesis.

## 4.2.2 Passing ability

De passing ability bepaalt hoe goed het vloeibare betonmengsel zal vloeien door beperkte en vernauwde ruimtes, smalle openingen of tussen dichte wapening. Het vloeibare betonmengsel dient dus in staat te zijn om de bekisting te vullen zonder te blokkeren bij het vloeien. Door de passing ability wordt het risico bepaald waarbij de stroming van het verse beton eventueel kan worden verminderd of zelfs geblokkeerd door de grove granulaten. Deze granulaten kunnen tijdens de stroming van het vloeibare mengsel worden ingeklemd of ze kunnen bogen vormen tussen wapeningsstaven of bij smalle doorgangen en openingen (Bartos et al., 2008).

De passing abiltiy wordt vaak bepaald aan de hand van de L-box test. De uitvoeringsmethode van de L-box wordt omschreven in paragraaf '2.1.3 L-box test'. Andere methodes die vaak in de literatuur voorkomen zijn de U-test en de J-ring. Deze worden niet toegelicht omdat ze niet worden toegepast in het onderzoeksgedeelte van deze thesis.

### 4.2.3 Segregation resistance

Het is de bedoeling dat de samenstelling van een vloeibaar beton homogeen blijft tijdens en na de verwerking, dus vóór verharding optreedt. Segregatie in vloeibaar beton is een fenomeen dat gerelateerd wordt aan de plastische viscositeit en de dichtheid van de cementpasta (Bartos et al., 2008).

De waarschijnlijkheid dat segregatie voorkomt in vloeibaar beton is groter indien de dichtheid van de granulaten groter is dan deze van de cementpasta, waarbij de viscositeit van deze laatste ook laag is. Het fenomeen wordt vaak zichtbaar als de bekisting wordt verwijderd, dus in het verharde beton, onder de vorm van grindnesten. Grindnesten vertonen grote, meestal onregelmatige holtes tussen de grove granulaten welke afgescheiden worden van de cementpasta. Vaak komt dit verschijnsel voor op moeilijk bereikbare plaatsen tijdens het storten.

Andere vormen van segregatie kunnen voorkomen onder de vorm van 'bleeding' en 'pressure segregation'. Bij bleeding zal water zich afscheiden van het mengsel en een dun horizontaal laagje vormen op de bovenkant van het betonelement. Dit laagje bevat een zeer hoge W/C ratio. Pressure segregation daarentegen zal voorkomen tijdens het verpompen van het vloeibare beton met een lage cohesie. De lage cohesie zal toelaten dat de vloeibare cementpasta zich zal afscheiden van de grove granulaten.

De mate waarin een betonmengsel zal segregeren kan worden bepaald aan de hand van de sieve segregation test. De uitvoeringsmethode van deze proef wordt omschreven in paragraaf '2.1.4 Sieve segregation test'. Andere methodes die vaak in de literatuur voorkomen zijn de penetratietest voor segregatie en de settlement column test. Deze worden niet verder toegelicht omdat ze niet worden toegepast in het onderzoeksgedeelte van deze thesis.

De mate waarin een mengsel is gesegregeerd, kan worden bepaald aan de hand van een reometertest (in deze thesis met de ConTec Viscometer 5). Het al dan niet optreden van deze dynamische segregatie kan men aantonen aan de hand van een segregatiecoëfficiënt die in paragraaf '4.4.3.1 Segregatie' verder wordt toegelicht.

# 4.3 Theoretisch model

In de literatuur zijn meerdere modellen terug te vinden die de stroming van vloeistoffen beschrijven. De voornaamste die toegepast kunnen worden voor het beschrijven van het reologisch gedrag van zelfverdichtend beton worden opgesomd.

Vooraleer verder te gaan op dit onderwerp, wordt ter verduidelijking een belangrijke begrip gedefinieerd dat regelmatig zal terugkeren. De vloeigrens of *'yield stress'* is de spanning nodig om de plastische deformatie of stroming van een materiaal in te leiden (Bartos et al., 2008).

### 4.3.1 Newtoniaanse stroming

Zuiver water is een voorbeeld van een Newtoniaanse vloeistof. Deze vloeistof bezit geen vloeigrens ( $\tau_0 = 0$ ) en bijgevolg zal het verloop van de reologische curve lineair zijn vanuit de oorsprong van een reologische grafiek waarbij de afschuifspanning  $\tau$  in functie staat van de afschuifsnelheid  $\dot{\gamma}$ . De volgende vergelijking beschrijft het gedrag van een Newtoniaanse vloeistof.

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \tag{4.1}$$

Hierin is:

- τ: afschuifspanning (shear stress) [Pa];
- μ: plastische viscositeit [Pa·s];
- $\dot{\gamma}$ : afschuifsnelheid (shear rate) [s<sup>-1</sup>].



Figuur 21: Stromingsdiagram van een Newtoniaanse vloeistof (Bartos et al., 2008)

Bijgevolg wordt de helling van de rechte bepaald door de plastische viscositeit  $\mu$  (Welty et al., 2000).

### 4.3.2 Niet-Newtoniaanse stroming

De stroming van vers beton voldoet niet aan de vergelijking die eerder werd beschreven. Dit komt omdat vloeibaar beton een bepaalde schuifspanning vereist om het in beweging te brengen. Deze term werd eerder reeds beschreven door de vloeigrens. De stroming zal dus worden beschreven door een niet-Newtoniaanse vergelijking.

#### 4.3.2.1 Bingham

Zoals reeds werd aangehaald, bezitten de meeste materialen een vloeigrens. Dit kan uitgedrukt worden door, aan het Newtoniaanse model, een extra term toe te voegen aangeduid met  $\tau_0$ . Van zodra de vloeigrens wordt overschreden en de relatie tussen de afschuifspanning en de afschuifsnelheid lineair blijft, kan het materiaal beschreven worden door een Bingham model (De Schutter, Feys & Verhoeven, 2005).

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \tag{4.2}$$



Figuur 22: Stromingsdiagram van een Bingham vloeistof (Bartos et al., 2008)

Hieruit blijkt dat een Bingham-vloeistof volledig beschreven wordt door twee constanten  $\tau_0$  en  $\mu$ .

#### 4.3.2.2 Herschel-Bulkley

In de literatuur echter blijkt dat zelfverdichtend beton zelden voldoet aan het Bingham-model. Het gebeurt dat door het fitten van bestaande Bingham modellen negatieve waarden worden bekomen. Het negatief zijn van de waarden voor de afschuifspanning  $\tau$  en de vloeigrens  $\tau_0$  is fysisch onmogelijk (De Schutter, Feys & Verhoeven, 2007). Daarom kan een alternatieve oplossing leiden tot het gebruik van de Herschel-Bulkley relatie (Feys, 2009).

$$\tau = \tau_0 + \mathbf{K} \cdot \dot{\gamma}^{\mathrm{n}} \tag{4.3}$$

Hierin is:

- τ<sub>0</sub>: vloeigrens [Pa];
- K: consistentie factor [Pa·s<sup>n</sup>];
- n: consistentie index [-].

Een materiaal dat voldoet aan een Herschel-Bulkley model vertoont ofwel een shear thinning (n < 1) of een shear thickening (n > 1) gedrag. In de vergelijking wordt dit aangetoond met de exponent n. Indien n = 1 dan wordt het Bingham model verkregen (De Schutter, Feys & Verhoeven, 2005). Verschillende onderzoekers hebben aangetoond dat de waarde van de consistentie index n stijgt naarmate de hoeveelheid superplastificeerder verhoogt in het betonmengsel (Banfill, 2006).

Figuur 23 toont de vermelde stromingscurves.



Shear rate (1/s)

Figuur 23: Stromingscurves voor de verschillende modellen (Feys, 2009)

Er zijn wel enkele nadelen verbonden aan dit reologisch model. De fysische interpretatie van de vergelijking van Herschel-Bulkley blijkt moeilijk te zijn en de parameter K is eveneens moeilijk te bepalen. Deze materiaalparameter is een constante welke gerelateerd wordt aan de consistentie van de vloeistof en is ook afhankelijk van de consistentie index n.

Dit betekent dus dat de consistentiefactor K geen fysische betekenis heeft in tegenstelling tot de viscositeit  $\mu$  in het Bingham model (De Schutter, Feys & Verhoeven, 2005).

#### 4.3.2.3 Gemodificeerd Bingham model

De literatuur toont aan dat de exponent n, in de Herschel-Bulkley relatie, meestal kleiner is dan 2. Op die manier volstaat een Taylorontwikkeling tot en met de tweede graad. Om die reden wordt het gemodificeerd Bingham model verkregen welke een compromis vormt tussen het model van Bingham en Herschel-Bulkley (De Schutter, Feys & Verhoeven, 2007).

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} + c \cdot \dot{\gamma}^2 \tag{4.4}$$

In deze vergelijking is  $\tau_0$  nog steeds de vloeigrens en  $\mu$  de plastische viscositeit bij de start van het vloeien. De parameter c duidt aan of de vloeistof een shear thinning (c < 0) of een shear thickening (c > 0) gedrag vertoont. Indien c = 0 dan wordt opnieuw het Bingham model verkregen.

Het gemodificeerd Bingham model wordt in deze thesis niet gebruikt omdat de transformatieformules (beschreven in paragraaf '4.5 Databehandeling en transformatie') afhangen van een reologisch model. Voor het gemodificeerd Bingham model zijn er geen transformatieformules voorhanden in het Excel bestand dat ter beschikking werd gesteld.

Nochtans zijn er een aantal voordelen verbonden aan dit model (De Schutter, Feys & Verhoeven, 2005):

- De parameters zijn niet meer afhankelijk van andere materiaaleigenschappen.
- De parameter van de viscositeit μ staat terug in de vergelijking.
- De c/µ verhouding wordt beschouwd als een parameter om het shear thickening gedrag te beschrijven.
- Er is geen overschatting van de vloeigrens meer bij shear thickening (n > 1). Dit wordt aangetoond in een voorbeeld van een mengsel bestaande uit zelfverdichtend beton op Figuur 24. Ook de onderschatting bij shear thinning (n < 1) wordt vermeden.</p>



Figuur 24: Overschatting van de vloeigrens bij het Herschel-Bulkley model (De Schutter, Feys & Verhoeven, 2005)

### 4.3.3 Vloeigedrag

Uit de vorige paragraaf kan dus afgeleid worden dat de stroming van zelfverdichtend beton het best wordt beschreven met een Herschel-Bulkley relatie of een gemodificeerd Bingham model. Algemeen kan men stellen dat zelfverdichtend beton een beton is met een hoge vloeibaarheid. Echter, om toch een goede segregatieweerstand te verzekeren, is een voldoende hoge viscositeit vereist. Reologisch gezien komt dit neer op een beton met een lage vloeigrens  $\tau_0$  en een voldoende hoge viscositeit  $\mu$ .

Voor deze tegenstrijdige eisen dient dus een compromis te worden gevonden. Enerzijds leidt een te lage vloeigrens tot segregatie, anderzijds zorgt een te hoge vloeigrens ervoor dat het beton niet ver genoeg uitvloeit onder zijn eigen gewicht (vb.: te kleine slump flow). De waarde van de vloeigrens verlaagt dus als de consistentie verhoogt. Hetzelfde principe geldt voor de viscositeit. Enerzijds zorgt een te hoge viscositeit ervoor dat het beton te langzaam vloeit, anderzijds kan een te lage viscositeit leiden tot ontmenging (vb.: slecht vloeigedrag door een dichte wapening).

De bepaling van de vloeigrens en de viscositeit gebeurt aan de hand van complexe reometers. In paragraaf '4.4 ConTec Viscometer 5' wordt het principe van de reometer uitgelegd die in het onderzoeksgedeelte van deze thesis wordt gebruikt.

### 4.3.4 Thixotropie

### 4.3.4.1 Inleiding

Stroming kan omkeerbare en onomkeerbare structurele veranderingen veroorzaken in betonmengsels. Als deze veranderingen omkeerbaar zijn en daarnaast ook tijdsafhankelijk dan wordt er gesproken over het thixotropisch effect. Het verhardingsproces (hydratatieproces) van cement bijvoorbeeld is een onomkeerbaar proces, maar vers/vloeibaar op cement gebaseerde producten zoals beton zijn thixotrope materialen.

Vele niet-Newtoniaanse vloeistoffen, waaronder zelfverdichtend beton, vertonen dit thixotroop gedrag. Zij worden thixotrope vloeistoffen genoemd terwijl de anti-thixotrope vloeistoffen een tegengesteld gedrag vertonen. Via een viscositeitstest kan het thixotroop gedrag aangetoond worden. Hierbij wordt de afschuifspanning lineair opgedreven naar een maximum waarna het vermindert naar een minimum namelijk de vloeigrens  $\tau_0$ . Dezelfde of een andere waarde van de vloeigrens wordt bereikt en het volledige proces kan worden herhaald. Het resultaat van zo'n test wordt afgebeeld in Figuur 25. Hierin is duidelijk dat voor de stijgende tak de afschuifspanning groter is dan deze voor de dalende tak. De oppervlakte van deze thixotrope lus is een maat voor de hoeveelheid energie nodig om de structuur af te breken (Roussel, 2006).



Figuur 25: Thixotrope lus (Roussel, 2006)

#### 4.3.4.2 Definitie

Er werden reeds veel verschillende definities aan de term thixotropie meegegeven, maar tegenwoordig wordt de volgende universele definitie aanvaard. Thixotropie wordt algemeen gedefinieerd als een continue daling van de viscositeit in de tijd als er een stroming wordt
uitgeoefend op een monster dat reeds eerder in rust was en het daaropvolgend herstel van de viscositeit in de tijd wanneer de stroming wordt onderbroken. Deze definitie is consistent met de IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) terminologie. De essentiële elementen die in de hedendaagse definitie worden gebruikt zijn de volgende (Mewis & Wagner, 2009):

- Thixotropie is gebaseerd op viscositeit.
- Het omvat een tijdsafhankelijke daling van de viscositeit die wordt geïnduceerd door stroming.
- Het effect is omkeerbaar als de stroming daalt of wordt gestopt.

Eenvoudigweg is het verschijnsel een verandering van de viscositeit met de tijd. Het wordt veroorzaakt door het omkeerbaar breken en terug opbouwen van fysische verbindingen tussen cementdeeltjes. Na het opheffen van de schuifspanning keert de beginviscositeit terug. De afname van viscositeit wordt veroorzaakt doordat de samenstellende deeltjes zich evenwijdig aan de opgelegde afschuifspanning gaan oriënteren.

Thixotropie kan dus eenvoudiger gedefinieerd worden als een daling van de viscositeit met de tijd bij een constante afschuifspanning of afschuifsnelheid gevolgd door een geleidelijk herstel als deze spanning of snelheid wordt opgeheven (Feys, 2009). Dit impliceert ofwel een reductie in afschuifspanning bij constante afschuifsnelheid of een toename in afschuifsnelheid bij constante afschuifspanning. Het effect is dus tijdsafhankelijk in tegenstelling tot het shear thinning gedrag waarbij de viscositeit daalt terwijl de afschuifsnelheid of afschuifspanning stijgt. Dit shear thinning gedrag leidt tot een pseudoplastiche stromingscurve (power law met een index lager dan 1) welke onafhankelijk is van de tijd (Banfill, 2006).

#### 4.3.4.3 Werking

Het complexe reologisch gedrag van thixotrope materialen ligt aan de basis van de microstructuur die daarbij ook afhankelijk is van de belastingsgeschiedenis van de materie. Het is meestal het gevolg van relatief zwakke aantrekkingskrachten tussen de deeltjes in de microstructuur. Deze krachten veroorzaken de vorming van vlokken welke verder uitgroeien tot grote oppervlakken bestaande uit fijne netwerken. De verbindingen zijn echter zwak genoeg om gebroken te worden door de mechanische spanningen die optreden tijdens de stroming. Het resultaat is dat gedurende die stroming het fijne netwerk breekt in aparte vlokken welke verder in grootte dalen als de schuifsnelheid verhoogd. Een daling van de afschuifsnelheid kan een vergroting van de vlokken doen ontstaan. Het stoppen van de

stroming zal het netwerk, bestaande uit de aparte deeltjes, toestaan om zich terug op te bouwen. De drijvende mechanismen achter deze effecten worden in de literatuur omschreven als orthokinetic en perikinetic coagulation (Mewis & Wagner, 2009).

In Figuur 26 en Figuur 27 wordt de opmeting van het torsiemoment afgebeeld, opgemeten aan de hand van een reometertest met afnemende of stijgende rotatiesnelheid. Hierin stelt de dikkere lijn in de beide figuren het theoretisch te verwachten verloop voor terwijl de dunnere lijn de werkelijk opgemeten resultaten weergeeft (Roussel, 2006).



Figuur 26: Afnemende rotatiesnelheid tijdens een reometertest (Roussel, 2006)

Figuur 27: Toenemende rotatiesnelheid tijdens een reometertest (Roussel, 2006)

Het verschil tussen de twee lijnen wordt veroorzaakt door het thixotroop gedrag van het betonmengsel waardoor een soort van vertraging in het materiaal wordt verkregen. Recent werd door Roussel aangetoond dat deze vertraging, in het geval van cementpasta's, afhankelijk is van de aangebrachte afschuifsnelheid en de stromingsgeschiedenis van de materie (Roussel, 2006).

In Figuur 28 wordt een schematische weergave afgebeeld ter verduidelijking van de bovenstaande theorie voor een volledige cyclus uitgedrukt in de reologische parameters afschuifspanning (shear stress) en afschuifsnelheid (shear rate). Hierbij wordt de afschuifsnelheid stapsgewijs verhoogd tot een bepaalde waarde om daarna in stappen terug af te nemen waarbij gedurende iedere stap de afschuifsnelheid constant wordt gehouden. In de afbeelding is duidelijk dat de afschuifspanning tijdens een stap daalt tot een evenwichtswaarde voor de stijgende curve, maar stijgt tot een bepaalde evenwichtswaarde voor de dalende curve (Banfill, 2006).



Figuur 28: Variatie van de afschuifspanning in een thixotropische materie (Banfill, 2006)

Het bestaan van thixotropie in cementgebonden mengsels heeft praktische voordelen. Bij zelfverdichtend beton bijvoorbeeld is een snelle structurele opbouw (structural build-up) voordelig om de drukken, uitgeoefend op de bekisting, te reduceren.

#### 4.3.4.4 Fysische verklaring

Vervolgens wordt een eenvoudige fysische verklaring getoond van dit thixotroop gedrag. De verschillende stadia worden afgebeeld in Figuur 29 en daarna bondig uitgelegd.



Figuur 29: Fysische verklaring voor het verschijsel van thixotropie (Roussel, 2006)

Door de interactiekrachten tussen de verschillende deeltjes wordt voor elk partikeltje een potentiaalput gevormd (a). Dit wil zeggen dat er een evenwichtspositie is voor elk deeltje met een minimale energie. Zolang de energie  $\Delta E$  van het systeem onder een bepaalde waarde blijft, zal het deeltje de potentiaalput niet verlaten (b). Indien de externe krachten op het systeem opgeheven worden, zal het deeltje terugvallen naar zijn oorspronkelijke positie (*'elastic solid behavior'*). Echter als de energie  $\Delta E$  van het systeem een bepaalde waarde overstijgt, zal het deeltje in staat zijn om deze energieput te verlaten (c) en op die manier een

stroming opwekken ('yield stress behavior'). Door de Brownse beweging en door mogelijke evoluties in colloïdale interacties zal, in het geval van thixotrope materialen in rust, de diepte van de energieput stijgen met de tijd. De benodigde energie  $\Delta E$ , dat het partikeltje nodig heeft om de energieput te verlaten, stijgt naar een hogere waarde aangeduid als  $\Delta E'$ . De deeltjes zullen dus meer moeite hebben om uit de kuil te ontsnappen. Indien het partikeltje er toch in slaagt om de energieput te verlaten, zal de kuil terug zijn oorspronkelijke diepte aannemen (Roussel, 2006).

#### 4.3.4.5 Andere tijdsafhankelijke eigenschappen

Naast thixotropie worden in de literatuur nog twee andere tijdsafhankelijke reologische eigenschappen vermeld. Deze verschijnselen zijn structural breakdown en verlies aan verwerkbaarheid en mogen dus niet verward worden met thixotropie (Feys, 2009). De termen worden bijkomend verklaard, maar in tegenstelling tot thixotropie niet uitgebreid besproken.

- Structural breakdown is in theorie de afbraak van chemisch gevormde verbindingen.
- Verlies aan verwerkbaarheid wordt veroorzaakt door fysische en/of chemische verbindingen die niet meer verbroken kunnen worden.

## 4.4 ConTec Viscometer 5

In deze paragraaf wordt de reometer uitgelegd, welke in deze thesis is gebruikt ter bepaling van de vloeigrens en de viscositeit.

#### 4.4.1 Geometrie

De ConTec Viscometer 5 is gebaseerd op het principe van de BML-Viscometer. De reometer bestaat uit een cilindrisch vat met een diameter van 290*mm* en een schoepenrad bestaande uit twee delen. Het schoepenrad heeft een diameter van 200*mm* en de hoogte van de vinnen die ondergedompeld worden in het beton bedraagt 125*mm*. Het cilindrisch vat kan met 12 tot 15 liter beton gevuld worden. Er wordt een vrijboord van 50*mm* voorzien zodat het beton niet over de emmer loopt tijdens het beproeven. De maximale diameter van de granulaten bedraagt  $D_{max} \leq 22mm$ .

Op Figuur 30 en Figuur 31 is duidelijk te zien dat het schoepenrad bestaat uit twee delen. Het bovenste deel van de vinnen is in staat om het torsiemoment te meten. Beide cilinders, d.w.z. het vat (buitenste cilinder) en het schoepenrad (binnenste cilinder), zijn voorzien van verticale ribben, ter voorkoming van het glijden van het verse beton ten opzichte van de wand.



Figuur 30: Schematische doorsnede van de ConTec Viscometer 5 (Heirman et al., 2008)



Figuur 31: Schoepenrad en cilindrische emmer van de ConTec Visometer 5

Figuur 30 geeft de schematische doorsnede van de ConTec Viscometer 5. Volgende onderdelen worden hierbij weergegeven:

- (1) niet ondergedompeld deel van het schoepenrad;
- (2) buitenste cilinder, het stalen vat met een interne straal  $R_0 = 145mm$ ;
- (3) vloeibaar betonmengsel dat onderworpen wordt aan de reometertest;
- (4) binnenste cilinder, bovenste deel met een externe straal  $R_i = 100$ mm;
- (5) binnenste cilinder aan de onderkant van het schoepenrad.

## 4.4.2 Concentrische cilinder reometer

Het type van concentrische cilinder reometer werd genoemd naar zijn oorspronkelijke ontwikkelaar Maurice Couette in 1890 namelijk de Couette-reometer (Couette, 1890). Deze reometer bestaat uit twee concentrische cilinders die een verschil in rotatiesnelheid hebben, relatief gezien ten opzichte van elkaar.

De ConTec Viscometer 5 is gebaseerd op het principe van de concentrische cilinder reometer. Bij de ConTec vormt het stalen vat, gevuld met het te beproeven beton, de buitenste cilinder. De binnenste cilinder bestaat uit het tweedelige schoepenrad. Volgende hypothesen worden hierbij verondersteld in acht genomen te worden (Macosko, 1994):

- evenwichtige, laminaire en isothermische stroming;
- geen stroming in de radiale en verticale richting;
- verwaarlozen van de zwaartekracht en eindeffecten;
- symmetrie in de tangentiële richting.

Indien aan deze hypothesen wordt voldaan, kan men gebruik maken van volgende vergelijkingen voor het bepalen van de afschuifspanning (shear stress) en de afschuifsnelheid (shear rate).

$$\tau = \frac{T_i}{2 \cdot \pi \cdot R_i^2 \cdot h} \tag{4.5}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega_{i} \cdot (R_{o} + R_{i})}{2 \cdot (R_{o} - R_{i})}$$
(4.6)

Met:

- T<sub>i</sub>: torsiemoment gemeten t.h.v. de binnenste cilinder [Nm];
- R<sub>i</sub>: straal van de binnenste cilinder [m];
- R<sub>o</sub>: straal van de buitenste cilinder [m];
- H: hoogte van de cilinder ondergedompeld in de betonspecie [m];
- Ω<sub>i</sub>: rotatiesnelheid bij de binnenste cilinder [rot/s].

Hierbij dient wel  $R_i/R_o > 0,99$  te zijn. Echter voor de ConTec Viscometer 5 is dit niet het geval. Dan dient de volgende vergelijking te worden gebruikt om de afschuifsnelheid te bepalen.

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot \Omega_{\rm i}}{n \cdot (1 - (\frac{R_{\rm i}}{R_{\rm o}})^{2/n})} \tag{4.7}$$

$$met n = \frac{dln(T_i)}{dln(\Omega_i)}$$
(4.8)

## 4.4.3 Basisprincipe van de viscositeitsmeting

Bij een reometer zijn er in het algemeen vier verschillende combinaties cilinder-schoepenrad met verscheidene afmetingen afhankelijk van de grootste korrelafmetingen van het betonmengsel en de consistentie/verwerkbaarheid (Pelova & Walraven, 1998). Bij de ConTec werden alle proefstukken telkens beproefd met eenzelfde combinatie cilinder-schoepenrad.

Nadat het zelfverdichtend beton wordt geproduceerd en kan gebruikt worden om de proefstukken te vervaardigen, wordt een deel daarvan aangewend om het vat van de reometer te vullen. Dit vat wordt op het roterend deel van het toestel aangebracht met een vrijboord van 50*mm* (Figuur 32) om het overlopen van de betonspecie over de rand van het vat te vermijden zodra het begint te roteren. De software die de reometer stuurt, kan gemakkelijk met de gepaste instellingen worden aangeschakeld. Na het indrukken van de startknop verloopt het proces volledige automatisch.



Figuur 32: Met betonspecie gevuld vat klaar voor de reometertest

Nadat het stalen vat op een correcte manier in de reometer werd geplaatst, kan het proces van start gaan. Op het schoepenrad wordt een torsiemoment uitgeoefend door de traagheid van de betonspecie in de roterende emmer. Hierbij wordt het torsiemoment opgemeten waarbij het meetbereik ligt tussen 0,27 tot 27*Nm*.

De reometertest start met de hoogste rotatiesnelheid die daarna stapsgewijs vermindert. Hierbij wordt bij elke rotatiesnelheid het torsiemoment opgemeten en dit om de 0,25 seconden. Elke snelheidswijziging gebeurt om de 25 seconden. Per stap worden dus 100 punten geregistreerd en daarvan worden enkel de laatste 60 punten genomen om het gemiddelde te bepalen. Deze werkwijze dient om enkel punten uit het stabiel regime in aanmerking te nemen.





Grafiek 1: Alle opgemeten torsiemomenten per rotatiesnelheid



Grafiek 2: Laatste 60 opgemeten torsiemomenten per rotatiesnelheid

Tijdens de eerste 40 opgemeten punten zijn er telkens veel uitschieters terwijl de laatste 60 punten in de tijdstap veel stabieler zijn. Dat gemiddelde wordt vervolgens uitgezet in een T/N diagram op het scherm van de reometer.

In de grafiek, die men bekomt met de reometertest, wordt dus het torsiemoment uitgezet in functie van de rotatiesnelheid. Per betonmengsel worden tien verschillende snelheden aangehouden. Op het einde van de test wordt nog een extra meetpunt uitgezet in de grafiek bij

2/3 van de maximale rotatiesnelheid. Dit laatste meetpunt wordt de segregatiecoëfficiënt genoemd waarvan de betekenis later nog aan bod komt in paragraaf *'4.4.3.1 Segregatie'*.

De ontwikkelaars van de ConTec Viscometer 5 hebben gekozen om het Bingham model te gebruiken op alle resultaten om de verkregen data te transformeren naar fundamentele reologische eenheden. Hierbij wordt dus aanvaard dat de betonspecie zich gedraagt als een Bingham-vloeistof. Via dit model wordt als karakteristiek diagram een rechte verkregen. De rechte wordt afgebeeld op Figuur 33 en gaat algemeen niet door de oorsprong.

De vergelijking van de rechte wordt als volgt beschreven.

$$\Gamma = \mathbf{G} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{N} \tag{4.9}$$

Met:

- T: torsiemoment [Nm];
- G: vloeiweerstand voor N = 0, een maat voor de vloeigrens [Nm];
- H: relatieve viscositeit, een maat voor de plastische viscositeit [Nm·s];
- N: rotatiesnelheid [rot/s].



Figuur 33: Verband tussen rotatiesnelheid en torsiemoment (Pelova & Walraven, 1998)

De waarden G en H uit de vergelijking van Bingham zijn karakteristieke waarden die afhankelijk zijn van de mengselsamenstelling.

Om het basisprincipe van het Bingham model goed te begrijpen worden enkele karakteristieke diagrammen afgebeeld op Figuur 34.



Figuur 34: Karakteristiek diagram voor verschillende betonsamenstellingen (Pelova & Walraven, 1998)

De vloeiweerstand G is het punt waar de karakteristieke rechte de verticale as snijdt bij N = 0. In het diagram is mengsel 1 een voorbeeld van klassiek beton. Mengsel 2 bezit een hogere vloeiweerstand dan mengsel 1. Er is dus meer energie nodig om mengeling 2 in beweging te brengen. Eenmaal het beton vloeit, zal het snel uitvloeien omwille van de lage plastische viscositeit H (kleine helling van rechte 2). Voor mengsel 2 kan er dus sprake zijn van een stijf beton.

De laatste rechte 3 in het karakteristiek diagram kan een voorbeeld zijn van zelfverdichtend beton. Deze wordt gekenmerkt door een zeer lage vloeiweerstand en een relatief hoge plastische viscositeit (grote helling van rechte 3). Deze laatste betonspecie bezit bijgevolg een stroperig karakter zodat het langzaam zal uitvloeien.

#### 4.4.3.1 Segregatie

Zoals in de vorige paragraaf reeds kort werd vermeld, zal op het einde van de reometertest nog een extra meetpunt worden bepaald bij 2/3 van de maximale rotatiesnelheid (0,42rot/s). Dit meetpunt kan een indicatie geven over het al dan niet optreden van ontmenging gedurende de reometertest. Het controlepunt voor segregatie wordt in de literatuur vaak aangeduid als het segregatiepunt.

Dynamische segregatie kan ontstaan doordat de zwaardere deeltjes (granulaten) van het betonmengsel naar de buitenzijde van het vat worden geduwd onder invloed van de optredende inertiekrachten. Hierbij blijft in het centrale gedeelte van het stalen vat een zware pasta over, bestaande uit cementdeeltjes en water. De grovere zand- en grindkorrels bevinden zich meer naar de buitenrand van het vat. Dit verschijnsel kan men eventueel visueel bevestigen. Hierbij kan geconcludeerd worden dat bij dit fenomeen van ontmenging de cementpasta niet in staat is om de grovere korrels bij elkaar te houden.

De segregatiecoëfficiënt wordt beschouwd als de relatieve verandering in helling of viscositeit gedurende het uitvoeren van een reometertest (Wallevik, 2009).

Segregatiecoëfficiënt = 
$$\frac{H - H'}{H} \cdot 100\%$$
 (4.10)

De parameters in vergelijking 4.10 worden bekomen via het opgemeten verband tussen het torsiemoment T en de rotatiesnelheid N dat wordt voorgesteld in Figuur 35.

Hierbij is:

- H: de helling van de dalende lineair rechte gefit doorheen de meetpunten op basis van een Bingham model.
- H': de helling van de rechte die ligt tussen het segregatiepunt en het snijpunt van de dalende Bingham rechte met de T-as.



Figuur 35: Illustratie ter bepaling van de segregatiecoëfficiënt (Wallevik, 2009)

Men dient op te merken dat het segregatiepunt niet wordt opgenomen in de curve fitting van het Bingham model. Indien er geen segregatie optreedt tijdens de reometertest zal het segregatiepunt dicht bij de getrokken curve liggen. Met de getrokken curve wordt bedoeld: de verbinding van de tien meetpunten opgemeten door de reometer die geprogrammeerd is volgens het Bingham model. Indien de grovere granulaten zich echter naar de buitenkant van het vat zullen bewegen, veranderen de reologische eigenschappen van het betonmengsel. Er treedt ontmenging op en het segregatiepunt zal sterk afwijken van de getrokken curve.

In de literatuur worden volgende regels gehanteerd (Wallevik, 2009):

- Indien de segregatiecoëfficiënt < 5% → er treedt geen significante segregatie op tijdens de reometertest die een verschil zou kunnen geven in de reologische eigenschappen, het betonmengsel is relatief stabiel.
- Indien de segregatiecoëfficiënt > 10% → Er is een groot verschil in de waarde van de twee hellingen (H en H') waardoor de resultaten worden beïnvloed door ontmenging, het betonmengsel is onstabiel.

De berekening van de segregatiecoëfficiënt moet steeds vergezeld zijn van een visuele vaststelling na de reometertest in verband met het al dan niet optreden van segregatie. Uit de literatuur stelt men soms vast dat bij een grote segregatiecoëfficiënt er steeds een kans bestaat dat er toch geen ontmenging is opgetreden (Deneckere, 2012). De coëfficiënt geeft enkel een indicatie voor ontmenging, maar zeker geen zekerheid. Daarom wordt een visuele controle steeds aanbevolen.

# 4.5 Databehandeling en transformatie

Zoals reeds eerder vermeld werd, hebben de ontwikkelaars van de ConTec Viscometer 5 ervoor gekozen om alle resultaten te fitten op basis van een Bingham model. De software van de reometer berekent telkens het gemiddelde van het opgemeten torsiemoment en rotatiesnelheid per tijdsstap. Hierdoor wordt een set van discrete punten verkregen in een torsie-rotatiesnelheidsdiagram (T/N diagram). Deze punten dienen te worden getransformeerd in een reologische stromingscurve die de relatie tussen afschuifspanning (shear stress) en afschuifsnelheid (shear rate) uitdrukt.

De transformatieformules vermeld in paragraaf '4.4.2 Concentrische cilinder reometer' kunnen worden toegepast om deze stromingscurves te bekomen. Bij het gebruik van deze formules uit de vermelde paragraaf dient men op te merken dat er geen keuze moet worden

gemaakt van een welbepaald reologisch model zodat men slechts een benaderende oplossing zal bekomen.

Een betere wijze om het torsiemoment versus rotatiesnelheid te transformeren, is als volgt. In een eerste stap wordt de lineaire relatie van torsiemoment bepaald in functie van de rotatiesnelheid via volgende vergelijking.

$$\mathbf{T} = \mathbf{G} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{N} \tag{4.11}$$

De waarden van G en H worden getransformeerd in vloeispanning  $\tau_0$  en viscositeit  $\mu$ . Dit zijn twee parameters horende bij het Bingham model. De transformatie volgens dit Bingham model gebeurt als volgt.

$$\tau_0 = \frac{\mathbf{G} \cdot (\frac{1}{\mathbf{R}_i^2} - \frac{1}{\mathbf{R}_o^2})}{4 \cdot \pi \cdot \mathbf{h} \cdot \ln^{[m]}(\frac{\mathbf{R}_i}{\mathbf{R}_o})}$$
(4.12)

$$\mu = \frac{H \cdot (\frac{1}{R_{i}^{2}} - \frac{1}{R_{o}^{2}})}{8 \cdot \pi^{2} \cdot h}$$
(4.13)

Hierin is:

- τ<sub>0</sub>: vloeispanning [Pa];
- G: vloeiweerstand voor N = 0, een maat voor de vloeigrens [Nm];
- R<sub>i</sub>: straal van de binnenste cilinder [m];
- R<sub>o</sub>: straal van de buitenste cilinder [m];
- h: hoogte van de binnenste cilinder ondergedompeld in het vers beton [m];
- μ: viscositeit [Pa·s];
- H: relatieve viscositeit, een maat voor de plastische viscositeit [Nm·s].

Er dient opgemerkt te worden dat deze formules niet worden gebruikt voor de verwerking van de resultaten verkregen met de ConTec Viscometer 5. De formules worden enkel opgenomen ter informatie.

Deze vergelijkingen zijn slechts geldig indien het beton, tussen de binnenste en buitenste cilinder van de reometer, volledige afschuiving ondergaan. Indien de afschuifspanning op een bepaalde afstand in de reometer lager is dan de ogenblikkelijke lokale vloeigrens, dan ondergaat het beton geen volledige afschuiving en treedt er plugstroming op waarbij geen snelheidsvariatie optreedt (Wallevik, 2003).

Er werd reeds vermeld dat het Bingham model niet voldoet voor zelfverdichtend beton. In dit geval mogen de bovenstaande vergelijkingen niet gebruikt worden. Met behulp van de volgende vergelijkingen wordt de relatie tussen het torsiemoment T en de rotatiesnelheid N getransformeerd in een Herschel-Bulkley model.

Herschel-Bulkley: 
$$T = G_{HB} + K_{HB} \cdot N^m$$
 (4.14)

$$\tau_{0} = \frac{G_{HB}}{4 \cdot \pi \cdot h} \cdot \left(\frac{1}{R_{i}^{2}} - \frac{1}{R_{o}^{2}}\right) \cdot \frac{1}{\ln[m](\frac{R_{o}}{R_{i}})}$$
(4.15)

$$K = \frac{H_{HB}}{2^{2n+1} \cdot \pi^{n+1} \cdot h} \cdot n^{n} \cdot \left(\frac{1}{R_{i}^{2/n}} - \frac{1}{R_{o}^{2/n}}\right)^{n}$$
(4.16)

$$\mathbf{n} = \mathbf{m} \tag{4.17}$$

Hierin is:

- G<sub>HB</sub>, K<sub>HB</sub>, m: Herschel-Bulkley parameters van de T-N relatie;
- τ<sub>0</sub>, K, n: Herschel-Bulkley parameters van de afschuifspanning-afschuifsnelheid relatie.

Deze formules (4.14 - 4.17) worden gebruikt voor de verwerking van de ruwe data verkregen met de ConTec Viscometer 5. Op die manier wordt een torsie-rotatiesnelheidsdiagram verworven, toegepast op een Herschel-Bulkley model.

Na elke test uitgevoerd met de ConTec Viscometer 5 wordt de ruwe data tijdelijk opgeslagen zodat deze achteraf kunnen worden geanalyseerd. In deze thesis worden procedures en gespecialiseerde programma's gebruikt om de ruwe data om te zetten naar de gewenste reologische stromingscurves.

Voor meer informatie omtrent de vergelijkingen in verband met de transformatie naar reologische eenheden wordt verwezen naar het doctoraat van Dimitri Feys 'Interacties tussen de reologische eigenschappen en het verpompen van zelfverdichtend beton', 2008-2009.

# Hoofdstuk 5: De reologie van beton

# 5.1 Inleiding

Om de reologie van mortel en beton te beschrijven wordt in de literatuur vaak gebruik gemaakt van WFT en PFT. Met de WFT en de PFT wordt respectievelijk de *'water film thickness'* en de *'paste film thickness'* bedoeld. Dit kan vertaald worden als de dikte van een waterlaagje of respectievelijk pastalaagje rond de granulaten in het beton. Dit laagje heeft een invloed op de reologie van pasta, mortel en beton. Algemeen gezien stijgt de complexiteit als men overgaat van de reologie van pasta, naar mortel en naar beton.

Om een onderscheid te maken naar pasta, mortel en beton kan een mixontwerp opgedeeld worden in drie niveaus (Kwan & Li, 2012):

**Niveau 1**: Hier neemt men de cementachtige materialen en de microfillers kleiner of gelijk aan cement. Deze materialen vormen na het mengen met water een pasta die de holten gaat vullen in het volgende niveau. Op dit niveau spreekt men van betonpasta.

**Niveau 2**: Hier worden de fijne granulaten beschouwd en de vulstoffen die qua afmetingen kleiner of gelijk zijn aan het fijn granulaat. De materialen vormen na menging met de pasta een mortel die de holten in het volgende niveau gaat opvullen. Op dit niveau spreekt men van de betonmortel.

**Niveau 3**: Hier worden de grove granulaten toegevoegd aan de betonmortel en wordt dus het eigenlijke beton bekomen.

Voor een zelfverdichtend beton dient de betonmortel als eerste ontworpen te worden. Aangezien een zelfverdichtend beton over lange afstanden moet kunnen stromen en moeilijk bereikbare hoeken moet kunnen vullen zonder te segregeren, dient het een hoge vloeibaarheid en een hoge cohesie te bezitten. Daarenboven is het de mortel die ervoor moet zorgen dat er een hoge kleefkracht is, dat deze voldoende vermogen heeft om zich vast te hechten aan oppervlakken en dat ze voldoende bindt met het grove granulaat. Deze gewenste hoge vloeibaarheid, samenhang en hechting zijn moeilijk samen te bereiken (Kwan & Li, 2012). In het verleden zijn er enkele studies uitgevoerd om de belangrijkste factoren op de reologie van mortel te bestuderen, daaruit is gebleken dat:

- Zowel de vloeispanning als de viscositeit exponentieel afneemt met het watergehalte (Banfill, 1994).
- De eigenschappen van de fijne granulaten een belangrijk effect hebben. Het benodigde water voor een mortel is sterk verbonden met de pakkingsdichtheid van de fijne granulaten (De Schutter & Poppe, 2004).
- Bij een mortel die gemaakt wordt met fijner zand zal er meer water nodig zijn om tot dezelfde verwerkbaarheid te komen. Dit is te wijten aan het groter specifiek oppervlak van het zand (Gupta & Reddy, 2008).

De belangrijkste factoren met betrekking tot de reologie van mortel zijn dus de waterhoeveelheid, de pakkingsdichtheid en het specifiek oppervlak van het zand. Zowel de pakkingsdichtheid van de fijne granulaten, als de pakkingsdichtheid van de cementachtige materialen hebben effect op de reologie van de mortel.

# 5.2 Pakkingsdichtheid

#### 5.2.1 Traditionele pakkingsdichtheid

Om de pakkingsdichtheid te bepalen moeten vooreerst enkele definities worden vastgelegd. In het volume materiaal is eveneens een volume aan holle ruimte aanwezig die beschreven kan worden via het holtepercentage  $\varepsilon$ . Dit holtepercentage is de verhouding van het volume aan holle ruimte tot het totaal volume. Daarnaast is er een andere definiëring van het percentage holle ruimte, nu het holtepercentage of poriëngehalte u, deze wordt gesteld als de verhouding van het volume holle ruimten tot het vast volume van de deeltjes. Dit wordt weergegeven door volgende formules (Kwan, Li & Sung, 2011).

$$\varepsilon = \frac{V_{\rm H}}{V} \tag{5.1}$$

$$u = \frac{V_{\rm H}}{V_{\rm D}} \tag{5.2}$$

Met :

- V<sub>H</sub>: volume van de holle ruimtes [m<sup>3</sup>];
- V<sub>D</sub>: volume van de deeltjes [m<sup>3</sup>];
- V: totaal volume (V<sub>H</sub> + V<sub>D</sub>) [m<sup>3</sup>].

Deze worden met elkaar verbonden door volgende relatie:

$$\varepsilon = \frac{u}{1+u} \tag{5.3}$$

Deze holle ruimten worden nu gevuld met water, lucht of een combinatie van beide, afhankelijk van de vochtigheid. De waterhoeveelheid  $\varepsilon_w$  wordt gedefinieerd als het volume water tot het totale volume. Het watergehalte u<sub>w</sub> is het volume water tot het volume vaste bestanddelen. De luchthoeveelheid  $\varepsilon_a$  wordt gedefinieerd als het volume lucht tot het totaal volume, het luchtgehalte u<sub>a</sub> als het volume lucht tot het volume vaste bestanddelen (Kwan, Li & Sung, 2010).

De termen zijn met elkaar verbonden door:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{\mathrm{w}} + \mathbf{u}_{\mathrm{a}} \tag{5.4}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{\rm w} + \varepsilon_{\rm a} \tag{5.5}$$

De concentratie van de hoeveelheid vaste stof of pakkingsdichtheid  $\phi$  wordt dan gedefinieerd als de hoeveelheid vaste stoffen tot het totaal volume.

$$\phi = 1 - \varepsilon = \frac{1}{1+u} \tag{5.6}$$

De conventionele droge methode voor het meten van de pakkingsdichtheid, zoals aangegeven is in British Standards en in de Eurocode, is niet geschikt voor fijne granulaten en voor cementgebonden materialen omdat deze de eigenschap vertonen agglomeraten te vormen in droge toestand. Bovendien is de pakkingsdichtheid die op die manier gemeten wordt zeer gevoelig voor de aard van verdichting (Kwan & Li, 2012).

## 5.2.2 Natte pakkingsdichtheid

Aangezien de conventionele, droge methode, niet geschikt is, is er een nieuwe methode ontwikkeld die de natte pakkingsdichtheid meet. De dichtheid van zowel de cementgebonden materialen, de fijne granulaten en de samenstelling van cementgebonden materiaal en fijne granulaten wordt opgemeten. Het grote voordeel is dat de werkelijke natte toestand van verse cementpasta of mortel beschouwd wordt. Eventueel toegevoegde superplastificeerder geeft namelijk aanzienlijke invloed op de pakkingsdichtheid. Door het reeds aanwezig zijn van de superplastificeerder bij het meten van de pakkingsdichtheid is dit probleem eveneens verholpen (Kwan & Li, 2012).

Fung, Kwan en Wong hebben in 2008 een methode beschreven om de natte pakkingsdichtheid te bepalen. De methode omvat grofweg de volgende stappen:

- menging van de granulaten met water;
- het mengsel overbrengen naar een cilinder;
- pakkingsdichtheid bepalen.

Het mengen van de granulaten met het water kan slechts eenvoudig gebeuren als alle deeltjes groter zijn dan 300µm. Zijn er kleinere deeltjes aanwezig dan vertonen ze de neiging om watergebonden agglomeraten te vormen tijdens het mengen. Dit gebeurt vooral bij lage watergehaltes, waardoor er een lange mengtijd nodig is om grondig te mengen. De tijd die vereist is om dergelijke agglomeraten te vormen en deze met elkaar te laten samensmelten, wordt bepaald door het snelheidsbeperkende proces van de waterafvoer in de poriën van de agglomeraten naar hun oppervlak (Schaafsma et al., 1998). Wanneer er nu fijne deeltjes worden toegevoegd om de poriëngrootte te verkleinen, die dan op hun beurt de waterdrainage vertragen, dan wordt de tijd om dergelijke agglomeraten door menging te laten samensmelten tot een uniform mengsel vergroot (Fung, Kwan & Wong, 2008).

Om de tijd beperkt te houden, dienen dergelijke agglomeraten vermeden te worden van bij het begin. Daarom zijn er een aantal proeven uitgevoerd die het evenwicht zoeken tussen de complexiteit van de mengmethode en de werkelijke tijdsbesparing. In een eerste stap wordt de helft van de granulaten vermengd met het water en geroerd gedurende 3 minuten. De andere helft van de granulaten wordt verdeeld in vier gelijke porties, evenals de eventuele superplastificeerder. Na toevoeging van elke portie wordt terug 3 minuten gemengd. Er worden geen agglomeraten gevormd en er is grondig gemengd in slechts 15 minuten (Fung, Kwan & Wong, 2008).

De mengmethode is grafisch voorgesteld in Figuur 36. Er dient opgemerkt te worden dat de mengprocedure soms verschilt naargelang de fijnheid van de deeltjes.



Figuur 36: Mengprocedure (Fung, Kwan & Wong, 2008)

In natte toestand is het pakkingsgedrag afhankelijk van de verhouding water tot vaste stof in het volume. Dit wordt afgekort als de W/S ratio. Er kunnen nu twee toestanden beschreven worden (Fung, Kwan & Wong, 2008):

 Is de W/S ratio hoger dan de verzadigde toestand dan wordt een suspensie gevormd waarbij de deeltjes verspreid zijn in het water. De concentratie aan vaste stof neemt dus af als de W/S ratio toeneemt.  Is de W/S ratio lager dan de verzadigde toestand dan is er niet genoeg water om alle holten te vullen. Daardoor wordt er lucht ingesloten en ontstaan er waterbruggen tussen de deeltjes. De concentratie aan vaste stof stijgt nu als de W/S ratio daalt.

Er moet dus een optimale W/S ratio bestaan. Bij die optimale verhouding is de concentratie aan vaste stof het grootst en zijn de korrels het dichtst gepakt. Om de natte pakkingsdichtheid te bepalen moet de W/S ratio de optimale worden. Daarom worden verschillende W/S ratios genomen in een bereik die de optimale W/S ratio bevat. Als er nog geen verdere gegevens beschikbaar zijn, wordt aangeraden om te starten bij een W/S ratio van één en deze te laten dalen. Dit tot de concentratie aan vaste stof een maximale waarde bereikt en start met dalen (Fung, Kwan & Wong, 2008).

Vanuit de vooropgestelde W/S factor, die zal varieren in de verschillende stappen, kan het volume water ten opzichte van het volume granulaten bepaald worden. Met de dichtheden kan dan de massa berekend worden.

- V<sub>1</sub>: volume granulaten [m<sup>3</sup>];
- V<sub>2</sub>: volume water [m<sup>3</sup>];
- m<sub>1</sub>: massa granulaten [kg];
- m<sub>2</sub>: massa water [kg].

Dit mengsel wordt nu gemengd via de vooropgestelde mengprocedure, eventueel met de benodigde hoeveelheid superplastificeerder. Daarna wordt dit mengsel overgebracht naar de cilinder ( $m_{cil}$ ) die dan volledig gevuld wordt met water en waarvan de massa opgemeten wordt. Via volgende vergelijking kan de massa van het water  $m_3$  gevonden worden.

$$m = m_{cil} + m_1 + m_2 + m_3 \tag{5.7}$$

Nu alle watermassa's gekend zijn, kan de massa van de verzadigde granulaten bepaald worden. Met deze waarde kan het vast volume van de granulaten gezocht worden met behulp van de dichtheid.

$$V_{s} = \frac{m_{gran,verz}}{\rho_{gran}}$$
(5.8)

Hieruit volgen dan de volgende grootheden:

Holtepercentage: 
$$\varepsilon = \frac{V_H}{V} = \frac{V - V_s}{V}$$
 (5.9)

Pakkingsdichtheid: 
$$\phi = \frac{V_s}{V}$$
 (5.10)

Zoals reeds aangehaald, wordt de proef uitgevoerd voor verschillende W/S ratios. Bij elke proef wordt het poriëngehalte en de concentratie vaste stof bepaald. Als dit uitgezet wordt in een grafiek wordt het verloop van Figuur 37 verkregen. Daaruit kan de optimale W/S ratio bepaald worden, dus deze waarbij het poriëngehalte (voids ratio) zo laag mogelijk is en de concentratie vaste stof (solid concentration) zo hoog mogelijk.



Figuur 37: Bepalen van het optimale watergehalte (Fung, Kwan & Wong, 2008)

# 5.3 WFT en PFT bij mortel

#### 5.3.1 Bepaling van de WFT en PFT

Kwan en Li hebben in 2012 een methode beschreven om de WFT en de PFT van een mortelmonster te bepalen.

Als eerste moet de dichtheid van de vaste deeltjes gemeten worden om de WFT te bepalen. Vanuit deze pakkingsdichtheid van de vaste deeltjes  $\phi$  (verhouding van het vast volume aan deeltjes tot het totaal volume) kan het poriëngehalte van de vaste deeltjes u (verhouding van het volume holten tot het vast volume deeltjes) bepaald worden.

$$\phi = \frac{V_{\rm D}}{V} \tag{5.11}$$

$$u = \frac{V_{\rm H}}{V_{\rm s}} \tag{5.12}$$

Deze worden met elkaar verbonden via de volgende relatie:

$$u = \frac{1 - \phi}{\phi} \tag{5.13}$$

Eens het poriëngehalte u gekend is, kan de verhouding van het overtollige water  $u'_w$  bepaald worden. Deze wordt gedefinieerd als het volume aan overtollig water tot het volume aan vaste deeltjes. Om deze te bepalen dient de waterratio  $u_w$  gekend te zijn, die wordt gedefinieerd als de verhouding van het volume water tot het volume vaste deeltjes.

$$\mathbf{u}_{\mathbf{w}}^{'} = \mathbf{u}_{\mathbf{w}} - \mathbf{u} \tag{5.14}$$

Het specifiek oppervlak van de vaste deeltjes  $A_M$ , gedefinieerd als het vast oppervlak per vast volume, wordt gegeven door:

$$A_{\rm M} = A_{\rm C} \cdot R_{\rm C} + A_{\rm FA} \cdot R_{\rm FA} \tag{5.15}$$

Waarin:

- A<sub>C</sub>: specifiek oppervlak van het cement [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>];
- A<sub>FA</sub>: specifiek oppervlak van de fijne granulaten [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>];
- R<sub>C</sub>: percentage cement ten opzichte van het totaal volume vaste stof [-];
- R<sub>FA</sub>: percentage fijne granulaten ten opzichte van het totaal volume vaste stof [-].

Met de voorgaande waarden kan de WFT bepaald worden. Deze heeft de fysische betekenis de gemiddelde dikte van de waterfilm rond de vaste deeltjes te zijn.

WFT = 
$$\frac{\dot{u_w}}{A_M}$$
 (5.16)

De uit te voeren stappen om de PFT van een mortelmonster te bepalen zijn gelijklopend. Tijdens het mengproces worden de deeltjes kleiner dan  $75\mu m$  vermengd met de pasta. Daarom wordt de pasta geherdefinieerd. Deze wordt nu gedefinieerd als poederpasta en ze bevat alle deeltjes kleiner dan  $75\mu m$ . Dit in tegenstelling tot de vorige definitie van pasta, die enkel cement, microfiller en water bevatte. Dus moet bij het bepalen van de pakkingsdichtheid van de fijne granulaten de fractie kleiner dan  $75\mu m$  worden uitgesloten.

Vanuit de pakkingsdichtheid  $\rho$  van de overblijvende fractie (> 0,75 $\mu$ m) kan het poriëngehalte  $\upsilon$  van de fijne granulaten bepaald worden.

$$\upsilon = \frac{1 - \rho}{\rho} \tag{5.17}$$

De verhouding van de overtollige pasta  $p_w$  is gedefinieerd als het volume aan overtollige pasta tot het volume vaste deeltjes. Om dit te bepalen dient de pastaratio  $p_w$  gekend te zijn. Deze ratio wordt gedefinieerd als de verhouding van het volume pasta tot het volume vaste deeltjes.

$$\mathbf{p}'_{\mathbf{w}} = \mathbf{p}_{\mathbf{w}} - \mathbf{v} \tag{5.18}$$

Het specifiek oppervlak van de overblijvende fractie aan fijn granulaat  $A_{FA}$ , gedefinieerd als het vast oppervlak per vast volume van de deeltjes groter dan 75 $\mu m$ , kan bepaald worden uit het korrelverdelingsdiagramma. Daarmee kan de PFT bepaald worden. Deze heeft de fysische betekenis de gemiddelde dikte van de pastafilm rond de vaste deeltjes groter dan 75 $\mu m$  te zijn.

$$PFT = \frac{p_{W}}{A_{FA}}$$
(5.19)

#### 5.3.2 Vloeispanning en schijnbare viscositeit

Om de reologie van de mortel te beschrijven, wordt gebruik gemaakt van een snelheidsgestuurde reometer. De best passende curve wordt bekomen via regressie analyse gebruik makende van het Herschel-Bulkley model (Kwan & Li, 2012).

De volgende twee parameters worden gebruikt om de reologie te beschrijven:

- vloeispanning: de schuifspanning bij een afschuifsnelheid van 0Pa;
- schijnbare viscositeit: de schuifspanning bij een afschuifsnelheid van 14tr/min.

Kwan en Li hebben vanuit hun proefprogramma besloten dat zowel de vloeispanning als de schijnbare viscositeit dalen met stijgende C/A factor en/of een stijgende W/C factor. De C/A factor geeft de verhouding van de hoeveelheid cement tot de hoeveelheid granulaten weer. Het watergehalte stijgt bij stijgende C/A en/of W/C factor en daardoor daalt de schuifweerstand van de mortel. De vloeibaarheid van de mortel wordt dus verhoogd. Deze besluiten zijn duidelijk te zien in Figuur 38 en Figuur 39.





Figuur 38: Vloeispanning in functie van de C/A factor (Kwan & Li, 2012)

Figuur 39: Schijnbare viscositeit in functie van de C/A factor (Kwan & Li, 2012)

#### 5.3.3 Invloed van de WFT en de PFT

De specifieke oppervlakte van de granulaten heeft een belangrijk effect op de reologie van de mortel. Algemeen kan gesteld worden dat hoe lager de specifieke oppervlakte is, hoe hoger de vloeibaarheid van de mortel (Kwan & Li, 2012).

Dit is te verklaren met de dikte van het waterlaagje dat zich rond de granulaten bevindt. Als er eenzelfde hoeveelheid overtollig aanmaakwater aanwezig is, dan zal de WFT kleiner zijn en de vloeibaarheid lager zijn bij een hoger specifiek oppervlak, en omgekeerd. Het is dus de WFT die zorgt voor de consistentie van de mortel (Helmuth, 1980). Het water in een cementpasta kan dus onderverdeeld worden in twee delen. Als eerste het water dat nodig is om de holten tussen de deeltjes te vullen. Dit zorgt dus niet voor de vloeibaarheid van de mortel. Ten tweede het overtollig water dat zorgt voor een waterlaagje rond de granulaten waardoor de vloeibaarheid van de mortel verhoogd (Zhang et al., 1996).

De WFT verhoogt met zowel een stijgende C/A factor als met een stijgende W/C factor. Zolang de C/A factor relatief laag is (kleiner dan 0,4) is er een sterke stijging van de WFT, terwijl bij een relatief hoge C/A factor (groter dan 0,5) de stijging minder uitgesproken is. Daartegenover stijgt de WFT min of meer lineair met een toenemende W/C factor. De PFT daarentegen stijgt min of meer constant bij een toenemende C/A factor en/of W/C factor. Dit is te zien in Figuur 40 en Figuur 41 (Kwan & Li, 2012).



Figuur 40: WFT in functie van C/A factor en W/C factor (Kwan & Li, 2012)

Figuur 41: PFT in functie van C/A factor en W/C factor (Kwan & Li, 2012)

De variaties van de WFT en PFT met de C/A factor en de W/C factor bevatten de gecombineerde effecten van zowel de waterinhoud, pasta inhoud, de pakkingsdichtheid en het specifiek oppervlak van de granulaten. De WFT en PFT zullen toenemen als de toename van het overtollige water of overtollige pasta groter is dan de toename van het specifiek oppervlak. Het verhogen van de pakkingsdichtheid zonder het specifiek oppervlak noemenswaardig te vergroten is de beste methode om de WFT en PFT te verhogen (Kwan & Li, 2012).

Als de vloeigrens wordt uitgezet in functie van de WFT wordt de grafiek van Figuur 42 verkregen. De functie is dalend aangezien een mengsel met een grotere WFT een kleinere schuifweerstand dient te overwinnen om te beginnen vloeien.

De resultaten liggen ook allen in een dunne band, wat aangeeft dat de WFT een zeer belangrijke rol speelt. Echter wanneer de WFT kleiner is dan  $0,25\mu m$  is de vloeispanning niet enkel afhankelijk van de WFT, maar ook van de PFT. Hoe groter de PFT wordt, hoe kleiner de vloeigrens. Dit is logisch aangezien het pastalaagje dan als het ware het mengsel gaat smeren. Bij een lage WFT is het dus zowel de WFT als de PFT die de vloeibaarheid van de mortel bepaalt (Kwan & Li, 2012).



Figuur 42: Vloeigrens in functie van de WFT en PFT (Kwan & Li, 2012)

Voor de schijnbare viscositeit zijn door Kwan en Li dezelfde besluiten genomen. Zolang de WFT groter is dan  $0,25\mu m$  dan is deze de bepalende. Wordt de WFT kleiner dan  $0,25\mu m$  dan speelt ook de PFT een rol. Dit is duidelijk te zien in Figuur 43.



Figuur 43: Schijnbare viscositeit in functie van de WFT en PFT (Kwan & Li, 2012)

Er kan besloten worden dat de WFT de belangrijkste rol speelt met betrekking tot de reologie van de mortel. Maar zodra de WFT kleiner wordt dan  $0,25\mu m$  is ook de PFT van belang.

# 5.4 WFT en PFT bij beton (Kwan & Li, 2013)

#### 5.4.1 Inleiding

Wanneer beton beschouwd wordt, bevindt men zich in niveau drie van het mixontwerp. Het aanmaakwater moet eerst de holten tussen de vaste deeltjes vullen. Het is slechts het overtollig water dat de vaste deeltjes gaat smeren. Een grotere pakkingsdichtheid zorgt voor minder holten en er is dus minder water nodig om deze op te vullen. Daardoor is er meer overtollig water waardoor de vervormbaarheid en vloeibaarheid van het mengsel toeneemt. Op dezelfde manier dient de pasta eerst de holten te vullen rond de grove granulaten en is het slechts de overschot aan pasta die de grove granulaten gaat smeren. Dus zal een stijging van de pakkingsdichtheid zorgen voor een kleiner volume aan nodige pasta en dus voor een groter volume overtollige pasta die de vervormbaarheid en de vloeibaarheid van het beton vergroot. Maar dit zijn niet de enige factoren die een rol spelen in de verse en verharde eigenschappen van beton. Het overtollige water en de overtollige pasta moeten uitgespreid worden over de vaste oppervlakken van de granulaten. Hoe groter het specifiek oppervlak van de granulaten dus wordt, hoe minder de smering.

#### 5.4.2 Bepaling van de WFT en PFT

De begrippen WFT en PFT worden door Kwan en Li gebruikt om de reologie van beton te beschrijven. Om tot het beton te komen worden in vergelijking met de mortel grove granulaten opgenomen in de menging. Om de WFT en PFT te bepalen dient dezelfde methode gebruikt te worden als bij de mortel. Als eerste dient dus de natte pakkingsdichtheid van de vaste deeltjes bepaald te worden. Eens deze bepaald is, kan de verhouding van het overtollig water  $(u'_w)$  worden berekend. Aangezien er nu ook grove granulaten toegevoegd zijn aan het mengsel dienen deze opgenomen te worden in de bepaling van de specifieke oppervlakte.

$$A_s = A_C \cdot R_C + A_{FA} \cdot R_{FA} + A_{x1mm} \cdot R_{x1mm} + \dots$$
(5.20)

Hierin staat  $A_{xmm}$  voor de specifieke oppervlakte van het grove granulaat met afmeting xmm en  $R_{xmm}$  staat terug voor de verhouding. De WFT wordt nu als volgt uitgerekend:

WFT = 
$$\frac{u_w}{A_s}$$
 (5.21)

Voor de bepaling van de PFT worden de deeltjes kleiner dan 75 $\mu m$  uitgesloten om dezelfde reden als bij de mortel. Het specifiek oppervlak van de overblijvende fractie granulaten A<sub>A</sub> wordt terug bepaald vanuit het korrelverdelingsdiagramma. Met behulp van de verhouding overtollige pasta (u'<sub>p</sub>) kan dan de PFT berekend worden:

$$PFT = \frac{u_p}{A_A}$$
(5.22)

#### 5.4.3 Invloeden van de WFT en PFT

#### 5.4.3.1 Effect op de verwerkbaarheid en de vloeibaarheid

Kwan en Li hebben gebruik gemaakt van de slump om de verwerkbaarheid van het beton te onderzoeken en van de flow om de vloeibaarheid van het beton te onderzoeken. Er is gebleken dat bij stijgende WFT zowel de verwerkbaarheid als de vloeibaarheid toenemen. Hetzelfde gebeurt bij stijgende PFT. De verwerkbaarheid en de vloeibaarheid zijn afhankelijk van zowel de WFT als de PFT, maar de rol van de WFT is belangrijker dan die van de PFT, die een secundaire rol speelt. Keerzijde is dat wanneer de WFT te grote waarden aanneemt het gevaar op segregatie toeneemt.

#### 5.4.3.2 Effect op de kubusdruksterkte

In tegenstelling tot de verwerkbaarheid neemt de kubusdruksterkte na 28 dagen toe als de WFT afneemt. Dit is toe te wijzen aan de verlaging van de W/C factor. Naast de WFT is de kubusdruksterkte net als de verwerkbaarheid eveneens afhankelijk van de PFT. Hoe lager de WFT (<  $0,40\mu m$ ) is, hoe groter het effect van de PFT. Wanneer de WFT grotere waarden aanneemt (>  $0,40\mu m$ ) is de invloed van de PFT klein tot onbestaand. Het effect van de PFT op de kubusdruksterkte is dus afhankelijk van de WFT.

Dit kan als volgt verklaard worden. Bij een lage WFT is het beton minder verwerkbaar en minder vloeibaar, wat zorgt voor een moeilijkere verdichting. Is de PFT hoger dan zorgt dit voor een betere samenhang en dus een hogere eindsterkte. In het omgekeerde geval, dus bij een grotere WFT, is het beton reeds meer vloeibaar en verwerkbaar waardoor het een gemakkelijkere verdichting ondergaat. Een grotere PFT is dus niet nodig waardoor het een kleiner effect heeft op de kubusdruksterkte.

De kubusdruksterkte is dus net zoals de verwerkbaarheid en de vloeibaarheid vooral afhankelijk van de WFT, maar bij lage waarden van de WFT speelt ook de PFT een rol.

# **Deel II: Onderzoek**

# Hoofdstuk 6: Samenstelling van het beton

# 6.1 Granulaten

Als fijn granulaat wordt rijnzand 0/5 gebruikt met een massadichtheid van  $2625kg/m^3$ . De grove granulaten bestaan uit grind 2/8 en grind 8/16, beiden met een massadichtheid van  $2620kg/m^3$ . De zeefkrommes van de materialen zijn terug te vinden in Figuur 44 en Figuur 45.





Figuur 44: Zeefkromme rijnzand 0/5

Figuur 45: Zeefkromme grind 2/8 en 8/16

# 6.2 Cement

Het cement, dat gebruikt wordt voor de betonsamenstellingen, is van het Europese type CEM I 52,5 N en heeft een massadichtheid van  $3120kg/m^3$ . De zeefkromme van het cement, bepaald door middel van laser diffractie, is terug te vinden in Figuur 46.



Figuur 46: Zeefkromme CEM I 52,5 N

# 6.3 Hulpstoffen

Als hulpstof wordt een superplastificeerder toegevoegd aan de betonsamenstelling van het zelfverdichtend beton. Er wordt gebruik gemaakt van SP1 (concentratie 35%) of SP2 (concentratie 20%), dit zijn hulpstoffen van de derde generatie op basis van een chemische keten van gemodificeerde polycarboxylic ethers. Deze hulpstoffen werden reeds uitvoerig besproken in '*Hoofdstuk 3: Superplastificeerder*'.



Figuur 47: Verpakking van superplastificeerder 2 (SP2, concentratie 20%)

# 6.4 Toeslagstoffen

Als toeslagstof wordt er kalksteenmeel P2 gebruikt met een massadichtheid van  $2650 kg/m^3$ . De zeefkromme is terug te vinden in Figuur 48.



Figuur 48: Zeefkromme kalksteenmeel P2

# 6.5 Proefmengelingen

In deze masterproef worden twee verschillende betonsamenstellingen toegepast. Per samenstelling worden verschillende hoeveelheden superplastificeerder gebruikt. De twee verschillende betonsamenstellingen zijn samengevat in Tabel 12. Er zijn in totaal 14 betonmengelingen gemaakt met behulp van twee betonmixers, met respectievelijk een capaciteit van 50*l* (Figuur 49) of 200*l* (Figuur 50).

Door gebruik te maken van twee basissamenstellingen waarbij enkel de soort en de hoeveelheid superplastificeerder veranderen, kan deze invloed op de eigenschappen van het beton worden nagegaan, en dit zowel in verse als in verharde toestand.





Figuur 50: Grote betonmolen (2001)

Figuur 49: Kleine betonmolen (50*l*)

Tabel 12: I	Betonmengelingen
-------------	------------------

Bestanddelen [alles in kg/m³]	ZVB 1	ZVB 2	ZVB 3	ZVB 4	ZVB 5	ZVB 6	ZVB 7	ZVB 8	ZVB 9	ZVB 10	ZVB 11	ZVB 12	ZVB 13	ZVB 14
Zand 0/5	870	870	870	870	870	944	944	944	944	870	870	944	944	944
Grind 2/8	268	268	268	268	268	290	290	290	290	268	268	290	290	290
Grind 8/16	443	443	443	443	443	479	479	479	479	443	443	479	479	479
Cement CEM I 52,5 N	300	300	300	300	300	260	260	260	260	300	300	260	260	260
Water	165	165	165	165	165	143	143	143	143	165	165	143	143	143
Filler kalksteenmeel P2	300	300	300	300	300	260	260	260	260	300	300	260	260	260
Superplastificeerder [l/m <sup>3</sup> ]	2,9	3,5	3,0	11,0	8,0	3,4	4,0	11,0	18,0	2,8	8,6	3,3	9,2	10,5
Superplastificeerder per mengeling														
SP [soort]	SP1	SP1	SP1	SP2	SP2	SP1	SP1	SP2	SP2	SP1	SP2	SP1	SP2	SP2
Hoeveelheid [ml]	510	175	150	550	400	170	200	550	900	510	1550	600	1650	2000
Volume beton [1]	175	50	50	50	50	50	50	50	50	180	180	180	180	190
Ratio														
W/C [-]	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
C/P [-]	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

De eerste proefmengeling ZVB 1 wordt aangemaakt met behulp van de grote betonmolen. Naast de traditionele cilinders en kubussen om de druksterkte te bepalen, zijn hier bijkomend prisma's gebetonneerd om de buig- en splijtsterkte van het beton te bepalen. Met een gedeelte van het beton worden na 45 minuten kubusmallen gevuld. Dit ter bepaling van de invloed van de ouderdom bij storten op de druksterkte van het beton.

Bij de proefmengelingen ZVB 2 tot en met 9 wordt alle beton zo vlug mogelijk na het produceren en na het uitvoeren van de verse betonproeven, in de mallen gestort. Voor ZVB 2 tot en met 5 wordt steeds een mengeling van 50*l* gemaakt. Voor deze vier mengelingen wordt dezelfde betonsamenstelling gebruikt waarbij de soort en de hoeveelheid superplastificeerder verschillend is. Bij ZVB 2 en 3 wordt SP1 gebruikt in een zodanige hoeveelheid dat de klassen SF1 of SF2 en SF3 gehaald worden. Hetzelfde wordt toegepast voor ZVB 4 en 5, hier wordt echter SP2 gebruikt. Voor ZVB 6 tot en met 9 wordt hetzelfde principe gehanteerd, maar hier wordt de tweede betonmix gebruikt.

Tot en met ZVB 9 wordt voor iedere proefmengeling ook een proef met de reometer uitgevoerd. De reometer is ter beschikking gesteld door de KU Leuven. Voor het verdere proefprogramma, in het tweede semester, is deze reometer niet meer beschikbaar. Verder worden voor ZVB 1 tot en met 9 steeds alle verse betonproeven uitgevoerd.

De volgende mengelingen ZVB 10 tot en met 14 worden met behulp van de grote betonmolen vervaardigd. Voor ZVB 10 tot en met 13 zijn de twee betonmixen gebruikt, telkens met de twee soorten superplastificeerder. Bij ZVB 14 wordt dezelfde samenstelling van ZVB 13 genomen, maar met een iets hoger gehalte superplastificeerder. Bij de laatste mengeling, namelijk ZVB 14, wordt bijkomend de verandering van het luchtgehalte in de tijd nagegaan. Voor deze mengelingen (ZVB  $10 \rightarrow 14$ ) worden telkens kubussen en cilinders gestort op een ouderdom van het beton van 0 tot 100 minuten met tussentijden van 20 minuten. Het startpunt, bij 0 minuten, is gesteld op het tijdstip waarop het beton een eerste keer volledig gemixt is. Dit is na het uitvoeren van stap 3, of eventueel stap 4, in Tabel 13. Op die manier worden steeds zes resultaten bekomen waarmee de verandering in de tijd kan worden nagegaan. Bij het begin, na 0 minuten, worden alle verse betonproeven uitgevoerd. Op de tussentijdstippen enkel de slump flow en de V-funnel test. Op het laatste tijdstip wordt de Lbox test nog eens uitgevoerd om de passing ability van het beton na 100 minuten na te gaan.

# 6.6 Mengprocedure en betonneren

Om een bijkomende invloed van de mengprocedure op de gemeten eigenschappen van het beton te vermijden, wordt steeds dezelfde mengprocedure toegepast. Deze procedure wordt weergegeven in Tabel 13.

Tabel 13: Mengprocedure	;
-------------------------	---

Stap	Bestanddeel	Mengtijd	
1	Droge bestanddelen	1min	
2	+ Water	1min	
3	+ Superplastificeerder	3min	
(4)	+ Extra superplastificeerder	1min	

Voorafgaand aan de proeven wordt de hoeveelheid superplastificeerder geschat aan de hand van mengelingen die vroeger werden vervaardigd in het Labo Magnel. Indien de gewenste slump flow niet gehaald wordt na een eerste menging, wordt er nog een extra hoeveelheid superplastificeerder toegevoegd. Na toevoeging wordt het geheel nog 1 minuut extra gemengd, dit is de mogelijke vierde stap.

Na het mengen, worden de proeven op het verse beton zo vlug mogelijk uitgevoerd. Daarna kan gestart worden met het betonneren van de proefstukken.



Figuur 51: Aantal proefstukken (ZVB 10 - 14)

# Hoofdstuk 7: Proeven

# 7.1 Proefprogramma

In de volgende tabellen wordt het proefprogramma op het verhard beton weergegeven. Er zijn drukproeven, zowel op cilinders als kubussen, buigproeven, splijtproeven en proeven ter bepaling van de elasticiteitsmodulus uitgevoerd. Om het wat overzichtelijk weer te geven, wordt een opsplitsing gemaakt tussen ZVB 1, ZVB 2 tot en met 9 en ZVB 10 tot en met 14.

Proef	Symbool	Proefstukken (afmetingen in mm)
Drukproef	f <sub>c</sub>	6 cilinders $150 \times 300$
		8 kubussen $150 \times 150$
Buigproef	f <sub>ctfl</sub>	3 prisma's $150 \times 600$ (driepuntsbuigproef)
		3 prisma's $150 \times 600$ (vierpuntsbuigproef)
Splijtproef	f <sub>ctsp</sub>	12 prisma's 150 × 150
Elasticiteitsmodulus	E <sub>c</sub>	-

Tabel 14: Proeven op ZVB 1

#### Tabel 15: Proeven op ZVB 2 - 9

Proef	Symbool	Proefstukken (afmetingen in mm)
Drukproef	f <sub>c</sub>	24 cilinders $150 \times 300$
		24 kubussen $150 \times 150$
Buigproef	f <sub>ctfl</sub>	-
		-
Splijtproef	f <sub>ctsp</sub>	-
Elasticiteitsmodulus	E <sub>c</sub>	-

#### Tabel 16: Proeven op ZVB 10 - 14

Proef	Symbool	Proefstukken (afmetingen in mm)
Drukproef	f <sub>c</sub>	60 cilinders $150 \times 300$
		90 kubussen 150 × 150
Buigproef	$\mathbf{f}_{\text{ctfl}}$	-
		-
Splijtproef	f <sub>ctsp</sub>	-
Elasticiteitsmodulus	E <sub>c</sub>	30 cilinders $150 \times 300$
Met deze proeven is het mogelijk om de invloed van de soort en hoeveelheid superplastificeerder op de druksterkte na te gaan. Ook kunnen deze resultaten vergeleken worden met de resultaten vanuit de verse proeven. In een tweede deel wordt de invloed van de tijd op de druksterkte van het beton nagegaan. Deze resultaten kunnen dan vergeleken worden met de resultaten van de verse betonproeven en met de soort en hoeveelheid gebruikte superplastificeerder.

## 7.2 Bewaring en voorbereiding

Na het vervaardigen van de proefstukken worden deze bewaard in een klimaatkamer bij een temperatuur van  $20 \pm 2^{\circ}C$  en een relatieve vochtigheidsgraad van minimaal 95%. Op een ouderdom van 24 uur worden de proefstukken ontkist en terug in de klimaatkamer geplaatst tot het moment van beproeving.



Figuur 52: Klimaatkamer

## 7.2.1 Drukproef

Om de drukproeven op kubussen uit te voeren, is geen specifieke voorbereiding vereist. Er wordt gedrukt op twee evenwijdige bekistingsvlakken. Om de drukproeven op de cilinders uit te voeren worden de drukvlakken eerst geëffend door slijpen. Na het slijpen worden de cilinders verder bewaard in de klimaatkamer.

## 7.2.2 Buigproef en splijtproef

De buigproef wordt uitgevoerd op prisma's en hiervoor is geen specifieke voorbereiding vereist. De prisma's die gebruikt worden om de splijtproeven uit te voeren zijn de reststukken van de buigproeven. Ook hier is geen extra voorbereiding nodig.

## 7.2.3 Elasticiteitsmodulus

De elasticiteitsmodulus wordt bepaald op cilinders die opnieuw eerst geëffend worden door slijpen. Om de elasticiteitsmodulus te kunnen bepalen, dienen eerst drie rekstroken gekleefd en gesoldeerd te worden. Deze worden op halve hoogte van de cilinder gekleefd met tweecomponentenlijm. De rekstroken zijn gelijk verdeeld over de omtrek van de cilinders, dus met tussenhoeken van 120°.



Figuur 53: Solderen van de tunnelpoortjes

Figuur 54: Kleven van de rekstrookjes

Eens de cilinders voorbereid zijn met de rekstrookjes worden deze gepositioneerd op de drukpers. De tunnelpoortjes die reeds aan de rekstrookjes gesoldeerd zijn, worden nu verbonden met de computer die dan op zijn beurt de drukpers gaat sturen.



Figuur 55: Proefopstelling voor het bepalen van de elasticiteitsmodulus

Voor de uitvoering van de proef worden dus in totaal drie rekstrookjes voorzien per proefstuk. In Tabel 17 staan de eigenschappen van de rekstroken beschreven.

Type rekstrookje	PL-120-11					
Gauge Length	120mm					
Gauge Resistance	$120\Omega\pm0,3\%$					
Gauge Factor	$2,11 \pm 1\%$					
Temp. Compensation	11 [10 <sup>-6</sup> /°C]					
Transverse Sensitivity	0,1%					
Ideale gebruiksomstandigheden						
<ul> <li>Temperatuur</li> </ul>	23°C					
• RV	50%					
Type lijm	Tweecomponentenlijm (A&B)					
Appluiting	Tunnelpoortje voorplaatsen en solderen aan					
Aanstutting	rekstrookje en vervolgens aan de aansluitkabels					

Tabel 17: Samenvatting van de karakteristieken van de rekstrookjes op het beton



Figuur 56: Rekstrookjes



Figuur 57: Tweecomponentenlijm

# Hoofdstuk 8: Proefresultaten

De bespreking van de proefresultaten wordt opgedeeld in twee stukken. In het eerste deel worden het beton en de proefstukken besproken waarbij de reometer wordt gebruikt (ZVB 1 tot en met 9). In het tweede deel het beton en de proefstukken waarbij er gebetonneerd wordt in de tijd (ZVB 10 tot en met 14).

## 8.1 Deel 1: ZVB 1 - 9

## 8.1.1 Verse betonproeven

De resultaten van de verse betonproeven zijn terug te vinden in Tabel 18. Op elke betonmengeling zijn alle verse betonproeven uitgevoerd, enkel bij mengsel ZVB 1 is het luchtgehalte niet opgemeten.

Proefnummer: 12/015 FD_ZVB_X		ZVB 1	ZVB 2	ZVB 3	ZVB 4	ZVB 5	ZVB 6	ZVB 7	ZVB 8	ZVB 9
Superplastificeerd	er									
SP [soort]		SP1	SP1	SP1	SP2	SP2	SP1	SP1	SP2	SP2
Hoeveelheid [l/n	n <sup>3</sup> ]	2,9	3,5	3,0	11,0	8,0	3,4	4,0	11,0	18,0
Slump flow	d <sub>gem</sub> [mm]	600	770	650	780	650	710	770	680	770
	klasse	SF1	SF3	SF1	SF3	SF1	SF2	SF3	SF2	SF3
V-funnel	tijd [s]	13,50	13,19	11,28	7,69	8,78	24,60	14,41	10,28	13,03
	klasse	VF2	VF2	VF2	VF1	VF1	VF2	VF2	VF2	VF2
L-box	ratio [-]	0,63	0,84	0,73	0,88	0,68	0,74	0,86	0,78	0,92
	klasse	-	PA2	-	PA2	-	-	PA2	-	PA2
Sieve segregation	ratio [%]	1,75	0,73	6,95	14,70	26,32	0,90	5,52	2,53	4,29
	klasse	SR2	SR2	SR2	SR2	-	SR2	SR2	SR2	SR2
Volumemassa [kg/m <sup>3</sup> ]		2369	2381	2363	2381	2375	2394	2413	2394	2375
Luchtgehalte [%]		-	2,5	2,3	1,2	2,3	2,2	2,3	2,3	2,3

Tabel 18: Verse betonproeven ZVB  $1 \rightarrow 9$ 

Als een vergelijking gemaakt wordt naar de V-funnel tijd bij dezelfde betonsamenstelling en hetzelfde type superplastificeerder, maar een andere slump flow klasse dan zou er verwacht worden dat de hoogste slump flow klasse de laagste V-funnel tijd zou vertonen. De hogere slump flow klasse wordt verkregen door het verhogen van de hoeveelheid superplastificeerder. Dit is logisch aangezien de superplastificeerder zorgt voor een hogere verwerkbaarheid bij dezelfde W/C-factor.

Als ZVB 2 en 3 vergeleken worden dan heeft de slump flow klasse SF3 een hogere V-funnel tijd dan de slump flow klasse SF2. Dit is dus het omgekeerde van wat er verwacht zou worden. ZVB 4 en 5 volgen dan wel terug de trend die verwacht wordt evenals ZVB 6 en 7, terwijl ZVB 8 en 9 dit niet doen. De soort superplastificeerder speelt geen rol aangezien het eenmaal SP1 en eenmaal SP2 is die de verwachte trend niet volgt.

Indien de resultaten van ZVB 1 tot en met 5 bekeken worden, dan is de V-funnel tijd steeds hoger bij SP1 dan bij SP2 voor ongeveer dezelfde slump flow, dus dezelfde slump flow klasse. Bij de tweede betonsamenstelling, ZVB 6 tot en met 9, treedt hetzelfde fenomeen op. Dit wijst erop dat SP2 een snellere uitvloeiing vertoont bij hetzelfde vloeigedrag. Dit is terug te vinden in Tabel 18 op de vorige bladzijde.

	V-funne	el tijd [s]			
	Samenstelling 1	Samenstelling 2			
SP1	13,50	24,60			
	11,28	14,41			
	13,19				
SP2	8,78	10,28			
	7,69	13,03			

Tabel 19: Vergelijking V-funnel tijd samenstelling 1 en 2

Bij het uitvoeren van de proeven werd reeds duidelijk dat de tweede betonsamenstelling veel viskeuzer is dan de eerste samenstelling. Het beton is op zich meer 'plakkerig' en moeilijker te storten in de mallen en proefopstellingen. Dit vertaalt zich ook in de V-funnel tijden uit Tabel 19 die bij samenstelling 2 steeds groter zijn.

Voor een goed zelfverdichtend beton is de L-box ratio vastgelegd op minimaal 0,8. Vanuit Tabel 18 is duidelijk dat er voor de twee samenstellingen een slump flow klasse SF3 vereist is om tot de gewenste ratio te komen.

De weerstand tegen ontmenging is voor alle samenstellingen hoog, behalve bij ZVB 4 en 5. Reeds bij het uitvoeren van de sieve segregation test was duidelijk dat er veel beton doorheen de zeef was gelopen. Het maximaal ontmengingspercentage is vastgelegd op 20%. ZVB 5 valt dus buiten deze begrenzing. De reden hiervoor is de schrijvers niet duidelijk.

## 8.1.2 Reometer

In het eerste semester van het academiejaar 2012-2013 was er in het Labo Magnel voor betononderzoek een reometer ter beschikking afkomstig van de KU Leuven, namelijk de ConTec Viscometer 5. Daardoor was het mogelijk de eerste negen betonsamenstellingen te onderwerpen aan een reometertest. Het principe, de beschrijving en de werking van deze reometer werd uitvoerig behandeld in paragraaf '4.4 ConTec Viscometer 5' in 'Deel I: Literatuurstudie'. De reometer zal worden gebruikt ter bepaling van de vloeigrens en de viscositeit van de betonmengsels. Vervolgens worden ook de verse betonproeven vergeleken met de resultaten. Tenslotte wordt nagegaan of er segregatie is opgetreden tijdens de reometertest.

#### 8.1.2.1 Verwerken van de ruwe data

Na het uitvoeren van de reometertest wordt een eerste grafiek op het display van het toestel weergegeven. Op dit T/N diagram worden de tien meetpunten (zwart) en bijkomend het segregatiepunt (rood) uitgezet. Hierdoor kan men reeds een eerste inschatting maken van de eigenschappen van het beproefde beton en vergelijken met visuele waarnemingen. Een voorbeeld van zo'n grafiek, met de ruwe data die op het display van het toestel verschijnt, wordt weergegeven in Grafiek 3.



Grafiek 3: Voorbeeld van een T/N diagram gegenereerd door de reometer zelf - Bingham model (ZVB 1)

Zoals reeds werd vermeld in de literatuurstudie, worden de resultaten van de ConTec Viscometer 5 gefit op basis van een Bingham model. Op Grafiek 3 wordt een set van tien discrete punten verbonden aan de hand van de Bingham rechte in een torsie-rotatiesnelheidsdiagram. Het verschijnen van deze grafiek op het display van het toestel heeft als voordeel dat de onderzoeker al een eerste indruk krijgt in verband met het verloop van de test. Zelfs al moet de ruwe data nog worden getransformeerd naar het Herschel-Bulkley model om de correcte reologische stromingscurves te verkrijgen.

Eerst en vooral kan de R<sup>2</sup>-waarde nagegaan worden van het Bingham model. Daarnaast kan men aan de hand van het segregatiepunt (rode punt op Grafiek 3) controleren of er tijdens de reometertest segregatie van het betonmengsel is opgetreden. Wanneer dit punt sterk afwijkt van de getrokken curve wijst dit op segregatie. Men kan dit ook nagaan door een visuele controle van het beproefde mengsel. Tenslotte geeft de steilheid van de rechte een eerste visuele indicatie van de viscositeit van het mengsel.

Om de gewenste reologische stromingscurves te bekomen, dient men de ruwe data van de reometer te transformeren naar het Herschel-Bulkley model. Figuur 58 geeft een voorbeeld weer van dit model voor betonmengsel ZVB 1.

In deze grafiek stellen de holle ruitvormige punten (SSdata = steady state data) de gemeten torsiekoppels voor van de reometer voor een bepaald toerental. Deze worden opgemeten gedurende de laatste 15 seconden (= laatste 60 punten van de opgemeten 100 punten) van iedere snelheidsstap. Bij elk toerental hoort ook een gemiddelde van die torsiekoppels. Dit gemiddelde wordt afgebeeld aan de hand van een blauw punt (SS). Eventuele donkergele punten (NSS) zijn de metingen waarvoor het mengsel zich nog niet in de steady state fase bevindt, maar deze worden niet meegenomen in de curve fitting. Het gele punt (SEG) in de grafiek is het controlepunt voor segregatie. Indien dit punt sterk afwijkt van de getrokken curve wijst dit op segregatie. Ook dit punt wordt niet meegenomen in de curve fitting (Lesage, 2009).



Figuur 58: Voorbeeld van een T/N diagram na transformatie van de ruwe data – Herschel-Bulkley model (ZVB 1)

## 8.1.2.2 Reologische stromingscurves

Aan de hand van de Herschel-Bulkley parameters kunnen de reologische stromingscurves worden opgesteld. Tabel 20 bundelt voor ieder betonmengsel, onderworpen aan de reometertest, de reologische parameters en de belangrijkste gegevens betreffende de verse betonproeven.

Proefnummer: 12/015 FD_ZVB_X	ZVB 1	ZVB 2	ZVB 3	ZVB 4	ZVB 5	ZVB 6	ZVB 7	ZVB 8	6 AVZ
Betonmolen [1]	200	50	50	50	50	50	50	50	50
SP [soort]	SP1	SP1	SP1	SP2	SP2	SP1	SP1	SP2	SP2
Hoeveelheid [l/m <sup>3</sup> ]	2,9	3,5	3,0	11,0	8,0	3,4	4,0	11,0	18,0
Slump flow [mm]	600	770	650	780	650	710	770	680	770
V-funnel [s]	13,50	13,19	11,28	7,69	8,78	24,60	14,41	10,28	13,03
τ <sub>0,HB</sub> [Pa]	170,91	124,21	217,27	101,54	-	95,88	102,37	105,40	95,11
K [-]	100,61	9,47	14,50	14,94	-	32,03	10,46	21,89	24,34
n [-]	1,19	1,94	1,68	1,50	_	1,51	1,89	1,51	1,53

Tabel 20: Samenvatting betreffende de reologische parameters en resultaten van de verse betonproeven

Bij mengsel ZVB 5 is er een fout opgetreden tijdens de meting met de reometer waardoor deze gegevens niet beschikbaar zijn.

Via de gegevens uit Tabel 20 kan voor ieder betonmengsel de reologische stromingscurve worden opgesteld, gebaseerd op een Herschel-Bulkley relatie.

$$\tau = \tau_0 + \mathbf{K} \cdot \dot{\gamma}^n \tag{8.1}$$

Hierin is:

- τ: afschuifspanning (shear stress) [Pa];
- τ<sub>0</sub>: vloeigrens [Pa];
- K: consistentie factor [Pa·s<sup>n</sup>];
- $\dot{\gamma}$ : afschuifsnelheid (shear rate) [s<sup>-1</sup>];
- n: consistentie index [-].

Er wordt opgemerkt dat de waarden voor de vloeigrens uit Tabel 20 vrij hoog liggen in vergelijking met de waarden uit de literatuur. Deze overschatting van de vloeigrens kan waarschijnlijk deels worden toegeschreven aan het gebruik van het Herschel-Bulkley model. Dit verschijnsel werd reeds toegelicht in paragraaf '4.3.2.3 Gemodificeerd Bingham model', Figuur 24.

Het betonmengsel vertoont telkens een shear thickening gedrag. Dit blijkt uit de waarde van de consistentie index n die telkens hoger is dan 1, maar overal lager blijft dan 2. De literatuur heeft reeds aangetoond dat de waarde van de consistentie index n stijgt naarmate de hoeveelheid superplastificeerder verhoogt in het betonmengsel.

Proefstuk	Hoeveelheid superplast [l/m <sup>3</sup> ]	Consistentie index n [-]
SP1		
ZVB 1	2,9	1,19
ZVB 2	3,5	1,94
ZVB 3	3,0	1,68
ZVB 6	3,4	1,51
ZVB 7	4,0	1,89
SP2		
ZVB 4	11,0	1,50
ZVB 5	8,0	-
ZVB 8	11,0	1,51
ZVB 9	18,0	1,53

Tabel 21: Hoeveelheid superplastificeerder versus consistentie index

In Tabel 21 wordt een opsplitsing gemaakt tussen de twee soorten superplastificeerders. Als betonsamenstelling 1 en 2 met SP1 apart wordt beschouwd, klopt deze stelling. De stelling

klopt niet voor alle mengelingen met SP1 omdat ZVB 6 en 7 een andere betonsamenstelling hebben met een lager gehalte aan fijne deeltjes.

Voor SP2 geldt deze stelling helemaal niet. De waarde voor de consistentie index blijft constant voor ieder mengsel ondanks dat er soms zeer grote hoeveelheden superplastificeerder aan het mengsel werd toegevoegd.

Shear thickening wordt gedefinieerd als een verhoging van de viscositeit bij toenemende afschuifsnelheid. Het resultaat hiervan is dat de afschuifspanning meer dan lineair zal toenemen bij stijgende afschuifsnelheid (Feys, 2009). De intensiteit van het shear thickening gedrag wordt uitgedrukt aan de hand van de consistentie index n.

Uit het doctoraat van Dimitri Feys zou shear thickening moeten dalen met een toename in hoeveelheid grof granulaat. De samenstelling van ZVB 1 tot en met ZVB 5 heeft een samenstelling met een hoger gehalte fijne deeltjes. ZVB 6 tot en met ZVB 9 heeft een lager gehalte aan fijne deeltjes en dus een hoger gehalte aan grove granulaten. Inderdaad, voor ZVB 6 en 7 is de consistentie index lager in vergelijking met mengsel ZVB 1 tot en met 3 rekening houdende met de hoeveelheden SP1 per mengsel. Bij SP2 wordt opnieuw geen verschil opgemerkt.

Men kan dus aannemen dat de consistentie index verhoogt bij stijgende hoeveelheid superplastificeerder voor eenzelfde betonsamenstelling met SP1. Indien het gehalte aan grof granulaat stijgt, daalt de consistentie index en bijgevolg wordt het shear thickening gedrag afgezwakt. Echter voor SP2 kunnen bovenstaande stellingen niet experimenteel worden bevestigd.

De reologische stromingscurves worden voor ieder betonmengsel (ZVB  $1 \rightarrow 9$ ) geïllustreerd in Grafiek 4 en Grafiek 5. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen twee betonsamenstellingen. De eerste betonsamenstelling (ZVB  $1 \rightarrow 5$ ) bestaat uit een groter gehalte aan fijn materiaal terwijl de tweede samenstelling (ZVB  $6 \rightarrow 9$ ) een kleiner gehalte aan fijn materiaal bevat.



Grafiek 4: Reologische stromingscurves voor betonsamenstelling 1

Men dient op te merken dat in Grafiek 4 de stromingscurve voor mengsel ZVB 5 niet wordt afgebeeld door een fout van het toestel tijdens de meting.



Grafiek 5: Reologische stromingscurves voor betonsamenstelling 2

In de bovenstaande grafieken staat de afschuifspanning  $\tau$  (= shear stress) in functie van de afschuifsnelheid  $\dot{\gamma}$  (= shear rate).

Er wordt opgemerkt dat de berekende modelparameters  $\tau_{0,HB}$ , K en n slechts geldig zijn voor het bereik van de afschuifsnelheid dat werkelijk werd getest door de T/N metingen. Voor de ConTec Viscometer 5 varieert het toerentalbereik tussen 0,06 < N < 0,63 rot/s. Gebruik makend van vergelijking 8.2 vindt men een bereik van  $1,1 < \dot{\gamma} < 11,2s^{-1}$  voor de afschuifsnelheid (Heirman et al., 2008).

$$\dot{\gamma} = \frac{R_0^2 + R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot N$$
(8.2)

Vandaar dat voor de afschuifsnelheid een maximum van  $12s^{-1}$  wordt weergegeven in de beide grafieken. Men veronderstelt dat in dit bereik het afschuifgedrag van zelfverdichtend beton tijdens het gieten het best wordt benaderd. Namelijk  $\dot{\gamma} = 10s^{-1}$  als het vloeibaar beton de truckmixer verlaat en  $\dot{\gamma} = 1s^{-1}$  op het einde van de betonstroming in de bekisting (Heirman et al., 2008).

In de grafieken valt meteen de vloeigrens op voor ieder betonmengsel. Voor de tweede betonsamenstelling liggen deze namelijk zeer dicht bij elkaar. Uit de resultaten in Tabel 20 blijkt de tweede betonsamenstelling doorgaans ook een veel lagere vloeigrens te bezitten dan de eerste samenstelling. Dit is hoogst waarschijnlijk te wijten aan het hoger gehalte aan fijn materiaal voor deze laatste. De tweede betonsamenstelling blijkt dus een veel lagere spanning nodig te hebben om de stroming van het mengsel in te leiden. Dit is logisch omdat het mengsel veel minder samen zal hangen door dit lager gehalte aan fijne deeltjes. Indien het gemiddelde genomen wordt van de vloeigrens voor iedere betonsamenstelling, blijkt de vloeigrens voor de tweede samenstelling dan ook 35% lager te liggen.

Vervolgens kan men vaststellen dat de curves voor de tweede betonsamenstelling meer consistent zijn en dichter bij elkaar liggen in tegenstelling tot de eerste samenstelling. Uit de helling van de verschillende curves, kan men ook waarnemen dat deze minder steil zijn voor de mengsels bestaande uit SP2. Dit beton zou dus sneller moeten uitvloeien omwille van de lagere plastisch viscositeit (kleinere helling). Het mengsel ZVB 1 vertoont een relatief steile helling en bezit dus een hoge plastische viscositeit en bijgevolg zal deze langzaam vloeien. Een zelfverdichtend beton vloeit namelijk sneller naarmate de plastische viscositeit geringer is.

Een hoge vloeibaarheid en een voldoende weerstand tegen ontmenging zijn twee essentiële eisen om een beton als zelfverdichtend te kunnen beschouwen. Concreet wil dit zeggen dat men de vloeigrens moet kunnen verlagen met behoud van de plastische viscositeit van het mengsel (Desmyter & Dieryck, 2009). Dit gedrag wordt het best bereikt voor de mengsels gemaakt met SP2, vooral mengsel ZVB 4 blinkt hierin uit. Later, in paragraaf '8.1.2.3 Segregatiecoëfficiënt', zal blijken dat voor dit mengsel ook de laagste segregatiecoëfficiënt wordt bekomen en dus het minst gevoelig is aan ontmenging. Anderzijds vertoont de sieve segregation ratio wel een hogere waarde, maar deze blijft nog steeds onder de grens om een goede weerstand tegen segregatie te bezitten.

### Verband met de slump flow

Om een voldoende grote slump flow te bekomen, is het logisch dat de vloeigrens geen al te hoge waarden mag aannemen. In de resultaten kan men aantonen dat de hoogste waarden voor de vloeigrens (ZVB 1 en 3) inderdaad de laagste slump flow vertonen. Een hoge slump flow (meer dan 700*mm*) heeft meestal een betrekkelijk lagere vloeigrens in vergelijking met de andere mengsels (zie schuine waarden in de Tabel 22). Deze trend kan men min of meer vaststellen in Tabel 22 hieronder. Hierbij heeft de slump flow klasse SF1 een hoge vloeigrens terwijl klasse SF2-3 een beduidend lagere vloeigrens vertoont.

Proefnumm FD_ZV	er: 12/015 /B_X	ZVB 1	ZVB 2	ZVB 3	ZVB 4	S AVB 5	ZVB 6	ZVB 7	ZVB 8	6 AVZ
Slump flow	d <sub>gem</sub> [mm]	600	770	650	780	650	710	770	680	770
	klasse	SF1	SF3	SF1	SF3	SF1	SF2	SF3	SF2	SF3
Vloeigrens $\tau_{0,}$	<sub>HB</sub> [Pa]	170,91	124,21	217,27	101,54	-	95,88	102,37	105,40	95,11

Tabel 22: Verband slumpflow en vloeigrens

## Verband met de V-funnel tijd

Hoe geringer de plastische viscositeit, hoe sneller het beton zal vloeien. Dit zou zich dus moeten uiten in de steilheid van de reologische stromingscurves. Inderdaad, indien men de waarden van de V-funnel tijd voor de eerste betonsamenstelling vergelijkt met de steilheid van de stromingscurves, kan deze stelling bevestigd worden. Mengeling ZVB 4 heeft de laagste waarde voor de V-funnel tijd en zoals te zien is op Grafiek 4 heeft deze een zeer flauwe helling, de laagste helling van alle mengsels. De laatstgenoemde mengeling heeft dan ook de grootste slump flow en een hoge hoeveelheid superplastificeerder SP2. Hetzelfde kan men vaststellen voor de tweede betonsamenstelling. Een afnemende V-funnel tijd doet de

steilheid van de curve lichtjes dalen. De waarden voor de V-funnel tijd van iedere mengeling wordt nogmaals samengevat in Tabel 23.

Proefnummer FD_ZVB	: 12/015 _X	ZVB 1	ZVB 2	ZVB 3	ZVB 4	ZVB 5	ZVB 6	ZVB 7	ZVB 8	ZVB 9
V-funnel [s]	tijd [s]	13,50	13,19	11,28	7,69	8,78	24,60	14,41	10,28	13,03
	klasse	VF2	VF2	VF2	VF1	VF1	VF2	VF2	VF2	VF2

Tabel 23: Verband met de V-funnel tijden

## Verband met de soort en de hoeveelheid superplastificeerder

Algemeen werd reeds vastgesteld, hoe meer superplastificeerder aan de mengeling werd toegevoegd, hoe groter de slump flow.

Bij SP1 kan men vaststellen, hoe hoger de hoeveelheid, hoe groter de kans op een lage vloeigrens. Dit is vrij logisch aangezien de superplastificeerder zorgt voor een hogere verwerkbaarheid en men dus een vloeibaarder mengsel verkrijgt. Voor SP2 wordt überhaupt een hogere hoeveelheid in het mengsel voorzien en ook hier kan men aantonen, hoe hoger de hoeveelheid, hoe lager de vloeigrens is. Dit fenomeen werd reeds veelvuldig in de literatuur bevestigd.

Tabel 24:	Verband met o	le vloeigrens.	de soort en	de hoeveelheid	superplastificeerd	er
					T T T T T T T T T T T T	

Proefnummer: 12/015 FD_ZVB_X	ZVB 1	ZVB 2	ZVB 3	ZVB 4	ZVB 5	ZVB 6	ZVB 7	ZVB 8	2VB 9
SP [soort]	SP1	SP1	SP1	SP2	SP2	SP1	SP1	SP2	SP2
Hoeveelheid [1/m3]	2,9	3,5	3,0	11,0	8,0	3,4	4,0	11,0	18,0
Vloeigrens $\tau_{0,HB}$ [Pa]	170,91	124,21	217,27	101,54	-	95,88	102,37	105,40	95,11

In het begin van de test, bij de hoogste afschuifsnelheid van  $11,2s^{-1}$  ziet men dat de mengsels met SP2 een lagere afschuifspanning hebben. Dit kon ook praktisch ondervonden worden. Namelijk de mengsels met SP2 bleken makkelijker verwerkbaar te zijn voor het vervaardigen van de proefstukken.

#### Opmerking

Volgens de thesis van Michiel Deneckere stijgt de vloeigrens en de plastische viscositeit met toenemend luchtgehalte door het vormen van '*bellenbruggen*'. Hierbij binden de luchtbellen zich met de cementdeeltjes. Om de vloeistof te laten vloeien moeten deze '*bruggen*' eerst verbroken worden waardoor de vloeigrens stijgt (Deneckere, 2012). Behoudens enkele uitzonderingen schommelde, in deze masterproef, het luchtgehalte voor de eerste negen betonmengsels rond 2,3%, zie Tabel 18. Het doctoraat van Dimitri Feys bevestigt mede de stelling van Michiel Deneckere in verband met de stijgende vloeigrens bij toenemend luchtgehalte. In deze masterproef kan die trend echter niet worden teruggevonden. Doordat het percentage lucht in de mengelingen vrij stabiel is, wordt het onmogelijk om dit effect goed in de verf te zetten en zo de bovenstaande stelling te kunnen bevestigen.

## 8.1.2.3 Segregatiecoëfficiënt

Met de reometer worden in totaal elf meetpunten bepaald. Het laatste punt wordt gemeten bij 2/3 van de maximale rotatiesnelheid en dient eigenlijk als controlepunt. Dit punt, het segregatiepunt, kan een indicatie geven over het al dan niet optreden van ontmenging van het betonmengsel in het vat van de reometer. Dit verschijnsel noemt men de dynamische segregatie en is niet te verwarren met de statische segregatie die wordt bepaald met de sieve segregation test bij de verse proeven.

Aan de hand van het segregatiepunt kan de segregatiecoëfficiënt worden berekend. Deze laatste geeft de relatieve verandering in helling of viscositeit gedurende het uitvoeren van de reometertest (Wallevik, 2009). De methode ter bepaling van de segregatiecoëfficiënt werd uitgebreid toegelicht in paragraaf '4.4.3.1 Segregatie' in 'Deel I: Literatuurstudie'. Bijlage C bevat de detailberekening van de segregatiecoëfficiënt. Er dient opgemerkt te worden dat deze coëfficiënt slechts kan worden bepaald aan de hand van het Bingham model en niet via het gebruikelijke Herschel-Bulkley model. Daardoor wordt voor sommige mengsels een negatieve vloeispanning weergegeven, wat uiteraard fysisch onmogelijk is.

Na het verwerken van de reologische testen op de zelfverdichtende betonmengsels worden de segregatiecoëfficiënten bepaald en deze worden in het vet weergegeven in Tabel 25.

Proefnummer: FD_ZVB_	12/015 _X	ZVB 1	ZVB 2	ZVB 3	ZVB 4	ZVB 5	ZVB 6	ZVB 7	ZVB 8	ZVB 9
SP [soort]		SP1	SP1	SP1	SP2	SP2	SP1	SP1	SP2	SP2
Hoeveelheid [l/m <sup>3</sup> ]		2,9	3,5	3,0	11,0	8,0	3,4	4,0	11,0	18,0
Segregatiecoëfficiënt [%]		6,3	11,7	9,0	4,6	-	9,4	14,0	5,9	12,1
Visuele vaststelling kleverige beton aan	g van zeer 1 de vinnen	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja
Sieve segregation	ratio [%]	1,75	0,73	6,95	14,70	26,32	0,90	5,52	2,53	4,29
	klasse	SR2	SR2	SR2	SR2	-	SR2	SR2	SR2	SR2

Tabel 25: Resultaten van de segregatiecoëfficiënt en de sieve segregation test

Praktisch wordt als volgt gewerkt:

- Segregatiecoëfficiënt < 10%: er is weinig verschil in de reologische eigenschappen;
- Segregatiecoëfficiënt  $\geq 10\%$ : er is een indicatie dat segregatie zich heeft voorgedaan.

In Tabel 25 worden ook de resultaten van de sieve segregation test weergegeven. Uit deze statische test blijkt dat alle mengsels, onderworpen aan een reometertest, een goede weerstand bezitten tegen segregatie (klasse SR2).

Hoewel de statische segregatieproef aantoont dat alle mengsels een goede weerstand bezitten tegen ontmenging, kan dit niet voor alle mengsels bevestigd worden door de segregatiecoëfficiënt. Volgens de reometertest zouden mengsel ZVB 2, 7 en 9 onstabiel zijn en zou er bijgevolg tijdens de test ontmenging zijn opgetreden. Door het tegenspreken van de resultaten tussen de dynamische en statische segregatie dringt een visuele controle zich op.

Tijdens een visuele controle werd vastgesteld dat betonsamenstelling 2 (ZVB  $6 \rightarrow 9$ ), met een lager gehalte aan fijn materiaal, uitzonderlijk aan de vinnen van de reometer kleefde. Hierbij zou de segregatiecoëfficiënt dus minstens boven 10% moeten liggen. In Figuur 59 kan men duidelijk zien dat het mengsel ZVB 9 extreem aan het schoepenrad vastkleeft na het uitvoeren van de test, dus na het opmeten van het laatste segregatiepunt. Dit verschijnsel werd voor alle mengsels van betonsamenstelling 2 opgemerkt terwijl dit bij de eerste betonsamenstelling absoluut niet het geval was. Indien men in gedachten houdt dat de tweede betonsamenstelling een lager gehalte aan fijne deeltjes bevat, kan men het verschijnsel van dynamische segregatie voor deze samenstelling als volgt verklaren. Door de optredende inertiekrachten tijdens de reometertest hebben de zwaardere granulaten de neiging om naar de buitenzijde van het vat te verschuiven. Ze worden minder bij elkaar gehouden door een lagere mortelfractie in het beton in tegenstelling tot de eerste betonsamenstelling. Hierdoor blijft, in het centrale gedeelte van

de stalen emmer, een zware pasta over die hoofdzakelijk bestaat uit cementdeeltjes en water. Inderdaad werd een zeer vloeibaar gedeelte vastgesteld in het centrum van het vat. Daarenboven kleefde een hoeveelheid dikke cementpasta aan het schoepenrad bij het omhoog bewegen na de reometerproef. Deze vinnen bevinden zich in het centrale gedeelte. Men kan dus concluderen dat de cementpasta van de tweede betonsamenstelling niet in staat was om de grovere korrels bij elkaar te houden, mede door het lager gehalte aan fijn materiaal.



Figuur 59: Gedrag van betonmengsel ZVB 9 na het uitvoeren van de reometertest

De visuele controle was enkel nodig voor de tweede betonsamenstelling. Behalve voor mengsel ZVB 8, liggen de segregatiecoëficiënten voor deze samenstelling overal vrij hoog. Dit in tegenstelling tot de sieve segregation ratio die aantoont dat deze mengsels toch een goede statische weerstand blijken te hebben tegen ontmenging.

Mengsel ZVB 7 en 9 hebben een segregatiecoëfficiënt hoger dan 10% waarbij het ontmengingsverschijnsel eveneens visueel werd vastgesteld. Voor mengsel ZVB 8 werd wel visueel ontmenging vastgesteld, maar deze heeft daarentegen een lage segregatiecoëfficiënt. Mengsel ZVB 6 toont een segregatiecoëfficiënt lager dan 10%, maar ook hier werd ontmenging vastgesteld.

Bij de eerste betonsamenstelling werd geen segregatie vastgesteld tijdens het beproeven. Niettegenstaande de segregatiecoëfficiënt voor mengsel ZVB 2 hiervoor een indicatie geeft. Er blijkt dus onzekerheid te bestaan in de waarden voor de segregatiecoëfficiënt. Een verband met de statische weerstand tegen ontmenging biedt hiervoor ook geen uitsluitsel.

Uit Tabel 26 leidt men af dat de segregatiecoëfficiënt voor de tweede betonsamenstelling 31% hoger ligt dan voor de eerste, dit werd ook visueel vastgesteld.

Betonsamenstelling 1 (ZVB $1 \rightarrow 4$ )	7,9%
Betonsamenstelling 2 (ZVB $6 \rightarrow 9$ )	10,4%

Uit de bovenstaande redeneringen kan besloten worden dat de segregatiecoëfficiënt een indicatie geeft voor ontmenging, maar geen volledige zekerheid. Daarom wordt een bijkomende visuele controle aangeraden, wat ook werd opgemerkt door Michiel Deneckere (Deneckere, 2012).

Door het lager gehalte aan fijne deeltjes in de tweede betonsamenstelling is de cementpasta, tijdens de reometertest, niet draagkrachtig genoeg om de zwaardere deeltjes bij elkaar te houden. De reologische eigenschappen zijn gewijzigd na de test. Men kan dus besluiten dat deze samenstelling minder stabiel is en dat de samenstelling niet in staat is om de verschillende componenten homogeen samen te houden. Kortom, de eerste betonsamenstelling is minder gevoelig aan dynamische segregatie.

Tenslotte kan uit Tabel 25 afgeleid worden dat de mengsels vervaardigd met SP1 telkens vrij hoge waarden voor de segregatiecoëfficiënt bezitten. Ook mengsel ZVB 1 zit nog steeds boven de 5%. Uitgaande van deze conclusie blijkt de kans voor het optreden van ontmenging groter te zijn voor deze soort van superplastificeerder.

Door de onzekerheid van de segregatiecoëfficiënt kan dynamische segregatie in toekomstig werk eventueel worden nagegaan aan de hand van de Tilting box test (T-box). In deze nieuwe methode wordt de betonstroming gesimuleerd en de homogeniteit van het mengsel geëvalueerd. Dit gebeurt door het kantelen van een rechthoekige doos gevuld met 1*6l* vloeibaar beton. De resultaten van dit recent onderzoek tonen aan dat de kans op dynamische segregatie bij zelfverdichtend beton verhoogt met de stroomafstand en verlaagt met de stroomsnelheid. Daarnaast wordt aangetoond dat een verhoging van de vloeigrens ( $\tau_0$ ) of de plastische viscositeit ( $\mu$ ) van een zelfverdichtend betonmengsel kan leiden tot een verlaging van de dynamische segregatie (Esmaeilkhanian et al., 2013). Inderdaad, in deze thesis vertoont de tweede betonsamenstelling gemiddeld een lagere vloeigrens en treedt dynamische segregatie op. Het verband met de plastische viscositeit en de dynamische segregatie uit het onderzoek kan echter niet worden aangetoond in dit werk.

## 8.1.3 Proeven op verhard beton

### 8.1.3.1 Druksterkte

In Tabel 27 worden de resultaten van de drukproeven weergegeven, alsook is de karakteristieke druksterkte bepaald volgens de methode gegeven in de literatuurstudie paragraaf '2.2.2.2 Karakteristieke druksterkte - Methode B'. Hierbij wordt  $f_{ck,cil,1}$  bepaald volgens formule 2.7 en  $f_{ck,cil,2}$  volgens formule 2.8 in de aangegeven paragraaf.

Proefnum FD_	ZVB 1.1	ZVB 1.2	ZVB 2	ZVB 3	ZVB 4	ZVB 5	ZVB 6	ZVB 7	ZVB 8	ZVB 9	
Superplastifice											
SP [soort]		SP1		SP1	SP1	SP2	SP2	SP1	SP1	SP2	SP2
Hoeveelheid	[l/m³]	2,9		3,5	3,0	11,0	8,0	3,4	4,0	11,0	18,0
	f <sub>cm,cil</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	54,7	-	55,3	53,3	56,5	55,1	55,8	55,6	52,6	52,4
	s [-]	0,8	-	0,5	2,1	1,0	1,7	1,3	0,6	1,2	0,7
	$f_{ck,cil,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	47,7	-	48,3	46,3	49,5	48,1	48,8	48,6	45,6	45,4
	$f_{ck,cil,2} \; [\text{N/mm}^2]$	57,1	-	59,0	55,7	59,9	57,1	58,8	59,1	55,2	55,6
Dmukstowkto	f <sub>ck,cil</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	47,7	-	48,3	46,3	49,5	48,1	48,8	48,6	45,6	45,4
Druksterkte	$f_{cm,cub} \; [\text{N/mm}^2]$	59,0	58,5	60,9	62,6	60,3	60,2	62,1	66,7	62,4	63,1
	s [-]	1,1	2,1	0,6	1,6	0,8	1,7	0,2	0,6	1,4	0,3
	$f_{ck,cub,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	52,0	51,5	53,9	55,6	53,3	53,2	55,1	59,7	55,4	56,1
	$f_{ck,cub,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	61,8	60,6	64,4	64,9	63,6	63,0	65,9	70,0	65,3	66,8
	f <sub>ck,cub</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	52,0	51,5	53,9	55,6	53,3	53,2	55,1	59,7	55,4	56,1

Tabel 27: Resultaten drukproeven ZVB 1 - 9

Volgens de resultaten die hier zijn weergegeven, is er geen verschil in druksterkte bij het gebruik van meer of minder superplastificeerder van eenzelfde soort. Voor een betonsamenstelling met een hoger gehalte aan grove granulaten ligt de druksterkte hoger voor de kubussen, voor de cilinders ligt de druksterkte dan weer lager. Tussen het gebruik van SP1 en SP2 is er geen eenduidig verschil in druksterkte op te merken. Deze bevindingen gelden zowel voor de cilinders als voor de kubussen.

In Tabel 28 worden de verhoudingen tussen de cilinderdruksterkte en de kubusdruksterkte gegeven. Tot hiertoe wordt steeds een gemiddelde verhouding van 0,87 a 0,88 bekomen.

Proefnummer: 12/015 FD_ZVB_X	ZVB 1.1	<b>ZVB 1.2</b>	ZVB 2	ZVB 3	ZVB 4	ZVB 5	ZVB 6	ZVB 7	ZVB 8	ZVB 9	GEM.	SD
Verhouding $f_{cm,cil}/f_{cm,cub}$	0,93	-	0,91	0,85	0,94	0,92	0,90	0,83	0,84	0,83	0,88	0,04
Verhouding $f_{ck,cil}/f_{ck,cub}$	0,92	-	0,90	0,83	0,93	0,90	0,89	0,81	0,82	0,81	0,87	0,05

Tabel 28: Verhouding druksterkte cilinders/kubussen ZVB 1 - 9

## 8.1.3.2 Treksterkte

In Tabel 29 worden de resultaten van de buigproef weergegeven. Zoals aangegeven in de literatuur is ook hier de buigtreksterkte bij een driepuntsbuigproef lichtjes hoger dan bij de vierpuntsbuigproef. Bij de vierpuntsbuigproef is het resultaat van prisma 1 geschrapt omdat die nogal sterk afwijkt van de andere resultaten. De reden hiervoor is de schrijvers onbekend. De gemiddelde buigtreksterkte bedraagt  $5,90N/mm^2$  (SD =  $0,37N/mm^2$ ).

Tabel 29: Buigtreksterkte ZVB 1

Buigtrekster	rkte	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	Gemiddelde
Driepuntsbuigproef	$f_{ct,fl} \left[ N/mm^2 \right]$	6,22	6,27	6,00	6,16
Vierpuntsbuigproef	$f_{ct,fl}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	(7,26)	5,75	5,53	5,64

De resultaten van de splijtproeven zijn weergegeven in Tabel 30. De splijtproeven worden uitgevoerd op de reststukken van de buigproeven, vandaar zijn er steeds twee resultaten. Beide waarden liggen dicht bij elkaar en de gemiddelde splijttreksterkte bedraagt  $4,34N/mm^2$  (SD =  $0,07N/mm^2$ ).

Tabel 30: Splijttreksterkte ZVB 1

Splijttrek	sterkte	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	Gemiddelde
	f [NI/mm2]	4,00	4,83	4,52	
Driepuntsbuigproef	I <sub>ct,sp</sub> [IN/IIIII <sup>2</sup> ]	4,09	3,80	4,50	
	f <sub>ct,sp,gem</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	4,05	4,32	4,51	4,29
	f [N]/	3,99	4,79	4,93	
Vierpuntsbuigproef	$I_{ct,fl} [IN/IIII1^2]$	3,82	4,46	4,33	
	f <sub>ct,sp,gem</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	3,91	4,63	4,63	4,39

## 8.2 Deel 2: ZVB 10 - 14

Bij de mengelingen ZVB 10 tot en met 13 is gepoogd om te starten met een slump flow die rond 600*mm* schommelt. Door steeds te starten met ongeveer dezelfde waarde wordt een referentiepunt gecreëerd om te kunnen vergelijken. Bij ZVB 14 is exact dezelfde samenstelling van ZVB 13 genomen, alleen is er meer superplastificeerder toegevoegd om te starten met een hogere slump flow. Op die manier kan nagegaan worden of hetzelfde verloop bekomen wordt. Alle resultaten voor deel 2 zijn samengevat in bijlage D.

## 8.2.1 Verse betonproeven

## 8.2.1.1 Slump flow

Als de verandering van de slump flow in de tijd wordt nagegaan, is er een duidelijk verschil te merken naargelang de hoeveelheid en het type superplastificeerder.

## Superplastificeerder 1

Indien als eerste superplastificeerder SP1 wordt beschouwd, zijn er twee verschijnselen waar te nemen. Vooreerst heeft de hoeveelheid superplastificeerder een invloed op de grootte van de slump flow. Dit is een logisch gevolg aangezien superplastificeerders zorgen voor een hogere verwerkbaarheid bij dezelfde W/C factor. Dit verschijnsel is duidelijk te zien in Grafiek 6 waar de punten van ZVB 12 hoger liggen dan die van ZVB 10. Na 100 minuten, op het einde van de waarneming, vallen ze praktisch samen.

Ten tweede bereikt de superplastificeerder zijn volle werking bij het begin van de proef. Na 20 minuten daalt de slump flow monotoon in de tijd. Om te kunnen uitmaken of de volle werking optreedt volledig in het begin of tussen de eerste twee waarnemingen zouden meerdere tussenpunten genomen moeten worden. Daaruit moet dan blijken of de slump flow monotoon dalend is, zoals ZVB 12 in Grafiek 6, of dat de slump flow oploopt tot een piek tussen 0 en 20 minuten en dan van daaruit gaat dalen, zoals voorgesteld in Grafiek 7. Deze piek werd in Grafiek 7 geschetst in rode symbolen, maar kan pas via proeven worden bevestigd.





Grafiek 7: Mogelijk verloop van de slump flow - SP1

### Superplastificeerder 2

Bij SP2 wordt de volledige verwerkbaarheid pas bereikt na enige tijd. Bij de proeven uitgevoerd in deze masterproef is dit steeds na ongeveer 40 minuten, dit is te zien in Grafiek 8. SP2 vertoont ook de eigenschap om het beton langer verwerkbaar te houden. Na 100



Grafiek 8: Slump flow - SP2

#### Opmerking

Bij de start van de proeven zorgt een hogere hoeveelheid superplastificeerder in beide gevallen voor een hogere slump flow. Enkel ZVB 14 wijkt hiervan af. Het verloop van de slump flow in de tijd bij mengsel ZVB 14 vertoont een afwijking ten opzichte van de andere twee mengelingen met SP2. Het verloop van de slump flow in de tijd is wel gelijkaardig voor ZVB 11 en 13, dit wordt geïllustreerd in Grafiek 9. Bij ZVB 14 blijft de slump flow ongeveer gelijk tot 60 minuten, waarna ze gaat afnemen.

Bij het mengen van ZVB 14 werd er gestart met 1900*ml* SP2, wat overeenstemt met  $10,0l/m^3$ . Dit zou normaal ruim voldoende moeten zijn om de slump flow van ZVB 13 te overstijgen. Toch werd na een eerste menging slechts een slump flow van ongeveer 550*mm* opgemeten. Na het bijvoegen van 100*ml* extra SP2, wat dan overeenstemt met  $10,5l/m^3$ , werd een slump flow van 655*mm* bekomen.

Het afwijkend gedrag van de slump flow bij de eerste menging kan een verklaring bieden voor het afwijkend resultaat bij ZVB 14. Vanwege de beperktheid aan proefmengelingen kan geen eenduidig besluit genomen worden naar de oorzaak.



Grafiek 9: Slump flow ZVB 11 en 13 - SP2

De exacte meetwaarden van de slump flow voor betonmengelingen ZVB 10 tot en met 14 zijn opgenomen in bijlage D.

## 8.2.1.2 V-funnel

De V-funnel tijd geeft een maat voor het stroomgedrag van het beton. Het verloop van de Vfunnel tijd zou tegengesteld moeten zijn aan dat van de slump flow, immers als de verwerkbaarheid afneemt dan neemt de doorstroomtijd toe. Het verschil in verloop tussen SP1 en SP2 is hier minder uitgesproken dan bij de slump flow.

Het verloop van de V-funnel tijd is vlakker bij het gebruik van SP2. Ook de slump flow toonde een vlakker verloop bij SP2, wat duidelijk maakt dat de twee weldegelijk een verband hebben. Het vlakkere verloop is duidelijk als ZVB 10 en 12 vergeleken worden met ZVB 11 en 13. Het gebruik van SP2 toont ook hier dat het beton langer verwerkbaar blijft. Het verloop van de V-funnel tijd bij ZVB 14 ligt tussen SP1 en SP2. Net zoals bij de slump flow blijft de V-funnel tijd ongeveer constant tot 60 minuten, waarna ze gaat stijgen.



Grafiek 11: V-funnel - SP2

Daarnaast is er ook een verschil tussen de twee betonsoorten. Bij de eerste betonsamenstelling met hoger poedergehalte is de V-funnel tijd steeds merkbaar lager na 20 minuten dan bij de start. Dit is te zien in Grafiek 10 en Grafiek 11 voor ZVB 10 en ZVB 11. Bij de tweede samenstelling daarentegen gaat de V-funnel tijd direct stijgen, bij gebruik van SP1, of blijft ze nagenoeg constant, bij gebruik van SP2.

De exacte meetwaarden van de V-funnel tijd voor betonmengelingen ZVB 10 tot en met 14 zijn opgenomen in bijlage D.

## 8.2.1.3 L-box

De L-box test wordt uitgevoerd bij het begin en helemaal op het einde van de proeven, dus bij 0 en 100 minuten. Hiermee wordt nagegaan hoe het beton nog wapeningstaven kan passeren. Opvallend is dat bij het gebruik van SP1 het beton niet meer tot op het einde van de L-box vloeit na 100 minuten (zie Figuur 60 en Figuur 61). Dit toont aan dat het beton niet meer werkbaar is om uit te storten. Dit werd ook waargenomen tijdens het aanmaken van het beton in het labo.

Bij SP2 is net het omgekeerde gebleken. De L-box ratio is steeds hoger na 100 minuten dan bij het begin. Dit wijst er terug op dat SP2 meer tijd nodig heeft om tot zijn volle werking te komen. In het labo werd duidelijk dat het na 100 minuten veel makkelijker werken was met het beton waarbij SP2 werd gebruikt.

Tabel 31: L-box ratio

	0 minuten	100 minuten
ZVB 10 (SP1)	0,63	0
ZVB 11 (SP2)	0,61	0,81
ZVB 12 (SP1)	0,72	0
ZVB 13 (SP2)	0,74	0,83
ZVB 14 (SP2)	0,74	0,75



Figuur 60: Beton in L-box na 100 min (ZVB 10)



Figuur 61: Beton in L-box na 100 minuten (ZVB 12)

### 8.2.1.4 Luchtgehalte

Zoals aangegeven werd bij ZVB 14 eveneens op ieder tijdstip het luchtgehalte nagegaan. Het verloop is nogal grillig. In eerste instantie gaat het beton zich ontluchten tot 60 minuten, waarna het luchtgehalte snel stijgt tot op het einde (zie Grafiek 12), maar dit vertaalt zich niet in eenzelfde verloop van de slump flow en de V-funnel tijd. Om een mogelijk verband na te gaan dienen meer proeven ter bepaling van het luchtgehalte uitgevoerd te worden.



Grafiek 12: Verloop van het luchtgehalte bij ZVB 14

Voor mengsel ZVB 14 kan het verloop van het luchtgehalte ook visueel worden nagegaan op de cilinders en de kubussen. Crouch, Pitt en Hewitt geven aan dat een verhoging van het luchtgehalte zich toont in een verhoging van de holle ruimtes op de buitenkant van het verhard beton. Het verloop vanuit Grafiek 12 zou zich dus ook moeten uiten op de proefstukken.

In de volgende figuren wordt een visuele voorstelling weergegeven van het luchtgehalte. Daarin wordt duidelijk dat het luchtgehalte inderdaad gaat dalen tot op 60 minuten, om dan terug te gaan stijgen.

## 0 minuten



Figuur 62: Luchtgehalte ZVB 14 - 0 minuten

20 minuten





Figuur 63: Luchtgehalte ZVB 14 - 20 minuten

40 minuten





Figuur 64: Luchtgehalte ZVB 14 - 40 minuten

## 60 minuten





Figuur 65: Luchtgehalte ZVB 14 - 60 minuten

80 minuten





Figuur 66: Luchtgehalte ZVB 14 - 80 minuten

## 100 minuten



Figuur 67: Luchtgehalte ZVB 14 - 100 minuten

Zoals reeds eerder aangegeven bereikt SP2 zijn volle verwerkbaarheid na ongeveer 60 minuten. Dit wordt ook duidelijk in Figuur 65 waar duidelijk het minst luchtbellen worden waargenomen. Het grootste luchtgehalte, na 100 minuten, is niet echt duidelijk zichtbaar op de figuren. Verder volgen de afbeeldingen vrij goed het verloop vanuit Grafiek 12.

## 8.2.2 Proeven op verhard beton

#### 8.2.2.1 Drukproeven

De resultaten van de drukproeven in de tijd worden uitgezet in grafieken waarbij steeds de gemiddelde waarde van de drie proefstukken is aangegeven en daarnaast de minimale en maximale waarde. De exacte meetwaarden zijn opgenomen in bijlage D. Het eerste en laatste resultaat van de drukproeven uitgevoerd op de cilinders, op 0 en 100 minuten, zijn waarden die verkregen worden na de proef voor de bepaling van de elasticiteitsmodulus.

#### Superplastificeerder 1

Indien de twee proefmengelingen met SP1 beschouwd worden, is er een licht dalende trend te zien in de resultaten. Dit is voor de cilinders wel minder duidelijk dan voor de kubussen. Deze trend wordt voor ZVB 10 weergegeven in Grafiek 13. In deze grafiek kan eigenlijk ook aangetoond worden dat de cilinderdruksterkte ongeveer constant blijft in de tijd. Om tot het dalende verloop te komen wordt het eerste resultaat buiten beschouwing gelaten. Dat dit resultaat niet wordt meegenomen om tot de trend te komen, kan erop wijzen dat SP1 inderdaad slechts tot zijn volle werking komt tussen 0 en 20 minuten zoals aangegeven bij de verse betonproeven. Op die manier wordt hetzelfde verloop verkregen voor cilinder- en kubusdruksterkte.

Grafiek 14 toont dezelfde trend voor ZVB 12. Bij de kubussen dient het eerste punt niet te worden uitgesloten om de trend te kunnen weergeven. Hierdoor kan vanuit deze twee proeven niet eenduidig besloten worden of SP1 nu direct zijn volle werking verleent aan de druksterkte, of dat er enige tijd nodig is om tot die volle werking te komen. Ook voor ZVB 12 is er dus eenzelfde verloop naar cilinder- en kubusdruksterkte.

Er dient wel opgemerkt te worden dat er bij de drukresultaten van de kubussen na 0 minuten een uitschieter zit in de metingen. In de tabel van bijlage D is dit duidelijk waar te nemen. Indien deze uitzondering wordt weggelaten zakt het eerste meetpunt, na 0 minuten, in de grafiek, waardoor de eerste kubusdruksterkte minder gaat uitschieten en terug het beeld weergeeft van ZVB 10.

Vanuit deze twee verlopen is het nogal moeilijk om een sluitend verband weer te geven, hiervoor dienen veel en veel meer proeven te worden uitgevoerd.



Grafiek 13: Verloop van de druksterkte bij ZVB 10 - SP1



Grafiek 14: Verloop van de druksterkte bij ZVB 12 - SP1

De waarden van de druksterktes zijn vrij gelijklopend voor ZVB 10 en 12. Dit is te zien in Grafiek 13 en Grafiek 14, waar ook de spreiding in is opgenomen. In Tabel 32 zijn alle resultaten weergegeven en in de laatste twee kolommen zijn de druksterktes van zowel de cilinders als de kubussen van ZVB 10 afgetrokken van ZVB 12. De waarden zijn over het algemeen positief wat er op wijst dat de druksterktes voor ZVB 12 iets hoger liggen dan voor ZVB 10, zeker als men bekijkt dat het verschil meestal groter is dan de spreiding.

		ZVI	B 10			ZVI	ZVB 12 - ZVB 10			
SP1	Cilinders [N/mm <sup>2</sup> ]		Kubussen [N/mm <sup>2</sup> ]		Cilinders [N/mm <sup>2</sup> ]		Kubussen [N/mm <sup>2</sup> ]		Cilinders	Kubussen
	Gem.	SD	Gem.	SD	Gem.	SD	Gem.	SD	[1\/111112]	[IN/IIIII <sup>2</sup> ]
0'	51,1	0,11	60,0	0,61	52,7	0,51	63,3	2,88	1,7	3,3
20'	53,5	0,75	60,4	0,19	56,2	0,50	61,1	3,38	2,6	0,8
40'	53,3	0,80	60,3	0,84	56,3	0,90	60,1	0,27	3,0	-0,2
60'	54,4	2,33	59,0	0,78	55,7	0,93	60,8	0,72	1,3	1,8
80'	53,4	1,64	58,9	0,29	55,4	1,33	60,9	1,54	1,9	2,0
100'	52,6	1,39	58,1	2,04	52,5	1,43	58,6	0,42	-0,1	0,5

Tabel 32: Vergelijking naar druksterkte tussen ZVB 10 en 12

Er is dus een klein verschil in druksterkte te merken waarbij de waarden van ZVB 12 algemeen iets hoger liggen dan ZVB 10. Bij ZVB 12 wordt  $0.5l/m^3$  meer SP1 gebruikt, dit om dezelfde slump flow te bekomen bij de start. Mogelijk zorgt deze vermeerdering van de superplastificeerder voor een verhoging van de druksterkte, anderzijds kan de tweede betonsamenstelling algemeen een hogere druksterkte geven. Om hierover te kunnen besluiten moeten meer proeven worden uitgevoerd.

### Opmerking

Zoals reeds aangegeven, wordt het eerste en laatste drukresultaat voor de cilinders bepaald tijdens de proef voor de elasticiteitsmodulus. Het is mogelijk dat de cilinderdruksterkte lager uitvalt als ze niet via een traditionele drukproef bepaald wordt. Indien dit bij ons het geval zou zijn, wat niet uit te sluiten maar ook niet te bevestigen is, dan wordt in beide gevallen een vlakker verloop van de cilinderdruksterkte verkregen. Of de cilinderdruksterkte nu dalend of ongeveer constant is in de tijd is niet eenduidig te besluiten vanuit deze proeven.

#### Superplastificeerder 2

De resultaten van het beton aangemaakt met SP2 vertonen een ander verloop dan de drukresultaten van het beton vervaardigd met SP1. Ook hier is het eerste meetpunt bij de cilinders afwijkend, terwijl dit voor het eerste meetpunt van de kubussen niet het geval is. Ook het laatste meetpunt van de cilinders ligt steeds iets lager. Daardoor wordt het vermoeden versterkt dat de bezwijklasten bepaald tijdens de elasticiteitsmodulusproef iets lager liggen dan de werkelijke bezwijklasten indien een traditionele drukproef zou worden uitgevoerd.

Het verloop van de druksterkte van ZVB 11, 13 en 14 is vrij vergelijkbaar, maar ZVB 13 geeft duidelijk lager liggende drukspanningen. Daarom worden ZVB 11 en ZVB 14 eerst met elkaar vergeleken, en later worden deze vergeleken met ZVB 13. De druksterkte van de cilinders van ZVB 11 is licht dalend in de tijd als rekening wordt gehouden met de spreiding. Dit is aangegeven met de rode lijn in de grafieken. Wordt het laatste resultaat bij de cilinders buiten beschouwing gelaten, dan wordt eerder een vlak verloop verkregen. Dit vlakke verloop wordt weergegeven met een blauwe lijn in de grafieken. De kubusdruksterkte daarentegen vertoont een licht stijgende trend. Dit is aangegeven in Grafiek 15.

Grafiek 15 toont eenzelfde verloop inzake cilinderdruksterkte voor ZVB 14. Terug is het verloop licht dalend indien enkel het eerste meetpunt wordt uitgesloten. Wordt ook het laatste meetpunt niet meegenomen dan krijgt men terug een vlak verloop. De kubusdruksterkte vertoont ook hier een stijgend verloop, die nog wat meer uitgesproken is dan bij ZVB 11.

In het deel over de verse betonproeven is reeds aangegeven dat ZVB 14 afwijkende resultaten gaf voor de slump flow en de V-funnel na de eerste menging. Alhoewel er voor ZVB 14 uiteindelijk meer SP2 is toegevoegd, vertoont het verloop van de druksterkte veel gelijkenissen met ZVB 11.



Grafiek 15: Verloop van de druksterkte bij ZVB 11 - SP2



Grafiek 16: Verloop van de druksterkte bij ZVB 14 - SP2

Net zoals bij SP1 zijn in Tabel 33 alle resultaten weergegeven en in de laatste twee kolommen zijn de druksterktes van zowel de cilinders als de kubussen van ZVB 11 afgetrokken van ZVB 14.

		ZVI	B 11			ZVI	ZVB 14 - ZVB 11			
SP2	Cilinders [N/mm <sup>2</sup> ]		Kubussen [N/mm <sup>2</sup> ]		Cilinders [N/mm <sup>2</sup> ]		Kubussen [N/mm <sup>2</sup> ]		Cilinders	Kubussen
	Gem.	SD	Gem.	SD	Gem.	SD	Gem.	SD	[IN/mm <sup>2</sup> ]	[IN/mm <sup>2</sup> ]
0'	51,0	0,41	61,5	0,92	50,4	0,37	59,0	1,42	-0,6	-2,5
20'	54,7	0,14	63,3	0,86	54,7	0,64	60,4	0,40	0,0	-2,9
40'	55,1	1,88	62,3	1,09	55,1	0,48	62,4	2,47	0,0	0,1
60'	53,4	0,96	64,7	1,14	55,1	1,82	62,5	0,80	1,7	-2,2
80'	54,6	1,21	63,3	0,52	54,7	0,55	63,5	0,64	0,1	0,2
100'	52,3	1,21	65,1	0,74	53,8	0,22	63,7	0,55	1,5	-1,4

Tabel 33: Vergelijking naar druksterktes tussen ZVB 11 en ZVB 14

De cilinderdruksterktes zijn algemeen gezien vrij gelijklopend voor ZVB 11 en 14. Waar grote verschillen opduiken in de voorlaatste kolom van Tabel 33 is er ook steeds een grote spreiding op de resultaten. De kubusdruksterktes daarentegen zijn algemeen hoger voor ZVB 11 dan voor ZVB 14. Hier is het dus de eerste betonsamenstelling, met minder SP2, die de iets hogere waarden levert.

Zoals reeds aangegeven, vertonen de druksterktes gemeten bij ZVB 13 duidelijk lagere waarden dan bij ZVB 14. Nochtans is de samenstelling identiek, enkel is er bij deze laatste meer superplastificeerder toegevoegd. De resultaten van ZVB 13 zijn weergegeven in Grafiek 17. Het verloop is terug gelijkaardig met een stijging van de kubusdruksterkte en de cilinderdruksterkte die ongeveer constant blijft. Hier is het verloop van de cilinderdruksterkte niet dalend als het laatste resultaat wordt meegenomen omdat dit te sterk afwijkt van de andere meetpunten.

Voor de cilinders van ZVB13 ten opzichte van ZVB 14 liggen de druksterktes ongeveer  $2N/mm^2$  lager, voor de kubussen loopt dit op tot ongeveer  $6N/mm^2$ . Bij de samenstelling van ZVB 13 is minder SP2 gebruikt dan bij ZVB 14, dus dit kan niet de oorzaak zijn van de lager uitvallende drukwaarden. Ook de volumemassa's nemen normale waarden aan wat erop wijst dat de betonsamenstelling correct is gevolgd. Waarom nu net deze ene mengeling lager uitvalt dan de andere is de schrijvers niet duidelijk. Alle resultaten van de drukproeven zijn terug te vinden in bijlage D.


Grafiek 17: Verloop van de druksterkte bij ZVB 13 - SP2

Algemeen gesteld wordt het vanuit de resultaten wel duidelijk dat SP2 zijn verwerkbaarheid langer aanhoudt. Bij de grafieken van het beton met SP1 is een duidelijke dalende trend te zien, terwijl dit hier niet het geval is. Voor de kubussen is een duidelijke stijgende trend waar te nemen. Vanuit dit verloop zou geconcludeerd kunnen worden dat de werking van SP2 blijft toenemen in de tijd en dus zeker niet gaat afnemen. Voor de cilinders zou men kunnen besluiten dat de werking behouden blijft in de tijd of lichtjes afneemt. Om nu de trend te bekomen, die zowel de cilinders als de kubussen volgen bij het gebruik van SP2, moeten nog meer proeven worden uitgevoerd omdat tot hiertoe het verloop voor cilinders en kubussen steeds verschillend is.

### 8.2.2.2 Elasticiteitsmodulus

De statische secanselasticiteitsmodulus bij druk wordt bepaald aan de hand van de Belgische norm NBN B 15-203 (1990). Deze norm heeft tot doel een methode te beschrijven voor het meten van langsvervormingen van een proefstuk uit verhard beton. Er worden cilindrische proefstukken gebruikt die op voorhand worden voorbereid. Het proefstuk wordt onderworpen aan een drukkracht die gelijkmatig toeneemt tijdens een proef van korte duur. De verwerking van deze vervormingen maakt het mogelijk om een secanselasticiteitsmodulus te berekenen en, indien de opname doorlopend gebeurt, een spanning-vervormingsdiagram op te stellen.

De voorbereiding van de cilindrische proefstukken en het principe van de proef wordt uitgebreid beschreven in paragraaf '2.2.3.3 Experimentele beproeving' en '7.2.3 Elasticiteitsmodulus'.

Een voorbeeld van een spanning-vervormingsdiagram, gegeneerd door de drukpers, wordt voorgesteld in Grafiek 18 voor het proefstuk ZVB 10 - 100'.



Grafiek 18: Spanning-vervormingsdiagram na uitvoering van de E-modulusproef (ZVB 10 - 100')

In de zone van de rode ovale aanduiding in Grafiek 18 wordt getoond waar de drie belastingscycli per rekstrook worden uitgevoerd tot een betonspanning van  $\sigma_{c,2} = \frac{1}{3} f_c$  [N/mm<sup>2</sup>]. Na het uitvoeren van deze drie lussen wordt het proefstuk belast tot breuk waarna het bezwijkt. Dit is ook duidelijk te zien in de grafiek. De rekken worden uitgelezen via de rekstroken die op voorhand op het proefstuk zijn aangebracht. Met deze rekken en de belasting van de drukpers op de cilinder kan de elasticiteitsmodulus worden bepaald.

Enkel de cilinders vanaf ZVB 10 tot en met 14 gestort op 0 en 100 minuten, werden onderworpen aan de E-modulusproef. Hierbij worden per tijdstip (0' of 100') drie cilinders getest. Er worden dus in totaal 30 proefstukken gebruikt om de elasticiteitsmodulus te bepalen.

Verder dienen er enkele opmerkingen vermeld te worden bij de resultaten in verband met de elasticiteitsmodulus:

- Tijdens de beproeving van de derde cilinder van ZVB 13 00' was een fout opgetreden waardoor dit resultaat niet verwerkt kon worden. Door een afwijking van het programma die de drukpers stuurt, werd de volledige programmatie ontregeld waardoor de drukpers het proefstuk in zeer snel tempo deed bezwijken.
- De aanvangsspanning van de drukpers bedraagt in de praktijk σ<sub>c,1</sub> ≈ 1,20N/mm<sup>2</sup> in plaats van 0,5N/mm<sup>2</sup> die wordt voorgeschreven in de norm. Deze kleine afwijking zal de resultaten echter niet beïnvloeden.
- Er werd getracht de elasticiteitsmodulus te bepalen bij een ouderdom van 28 dagen.
   Door de drukke planning in het Labo Magnel voor betononderzoek was dit niet steeds mogelijk door de grote bezetting van de drukpers. Tabel 34 geeft voor ieder proefstuk aan op welke leeftijd de elasticiteitsmodulus werd bepaald.

Proefstuk	Ouderdom op de dag van beproeving
ZVB 10	29 dagen
ZVB 11	28 dagen
ZVB 12	25 dagen
ZVB 13	28 dagen
ZVB 14	29 dagen

Tabel 34: Ouderdom van de proefstukken bij uitvoering van de E-modulusproef

Alle resultaten van de elasticiteitsmodulus worden weergegeven in Tabel 35. In de tabel wordt eveneens het luchtgehalte vermeld, opgemeten tijdens de verse betonproeven. Het luchtgehalte werd enkel opgemeten voor de proefstukken gestort op tijdstip 0. Enkel bij ZVB 14 werd het luchtgehalte gemeten op tijdstip 100. Verder wordt, ter vergelijking, ook de elasticiteitsmodulus vermeld, bepaald aan de hand van formule 2.12. Deze vergelijking werd reeds uitgebreid besproken in paragraaf '2.2.3.2 Theoretische benadering' in 'Deel I: Literatuurstudie' van deze thesis.

Ouderdom	Luchtgehalte	Nr	Experimentele	Theoretische
[minuten]	[%]	111.	E-modulus [MPa]	E-modulus [MPa]
ZVB 10; SP1 (2,811/m <sup>3</sup>	3)			Ι
		1	40305	35846
0	2,5	2	38772	35909
		3	39678	35888
	Gem	iddelde	39585	35881
100		1	37150	36426
100	-	2	37399	36283
		3	38304	35867
	Gem	iddelde	37618	36192
ZVB 11; SP2 (8,60l/m <sup>3</sup>	3)			
		1	38045	35803
0	2,5	2	39282	35951
		3	39316	35803
	Gem	iddelde	38881	35852
		1	39085	35867
100	-	2	40251	36345
		3	37739	36180
	Gem	iddelde	39025	36131
ZVB 12; SP1 (3,311/m <sup>3</sup>	3)			
	2,0	1	43555	36118
0		2	42305	36242
		3	42951	36324
	Gem	iddelde	42937	36228
		1	39102	35930
100	-	2	42048	36076
		3	40459	36507
	Gem	iddelde	40536	36171
ZVB 13; SP2 (9,201/m <sup>3</sup>	3)			Γ
		1	38419	35220
0	2,4	2	40193	35154
		3	-	-
	Gem	iddelde	39306	35187
100		1	39450	35374
100	-	2	38113	35718
	~	3	37684	35633
	Gem	iddelde	38416	35575
ZVB 14; SP2 (10,50l/n	<i>l</i> <sup>3</sup> )	1.1		
		1	39265	35761
0	2,5	2	37851	35803
		3	38452	35654
	Gem	iddelde	38523	35739
100		1	40384	36487
100	3,2	2	40856	36406
		3	40812	36406
	Gem	iddelde	40684	36433

De volledige verwerking van de proefresultaten per proefstuk ter bepaling van de elasticiteitsmodulus vanuit de meetfiles bevindt zich in bijlage E.

In de literatuurstudie werd reeds beschreven dat het luchtgehalte wel degelijk een invloed heeft op de elasticiteitsmodulus. Volgens het onderzoek van Crouch, Hewitt & Pitt daalt de elasticiteitsmodulus bij een stijgend luchtgehalte. Daarom wordt in Tabel 35 het percentage lucht vermeld voor de betonmengsels waarvoor dit werd opgemeten.

Het luchtgehalte schommelt voor de meeste betonmengsels rond 2,5%. Indien het gemiddelde genomen wordt van elke experimentele E-modulus bij 2,5% lucht verkrijgt men een waarde van 39000*MPa*. Bij een luchtgehalte van 2,4% wordt deze waarde inderdaad iets hoger. Het laagst gemeten percentage voor het luchtgehalte bedraagt 2%. Deze waarde zou volgens de literatuur de hoogste elasticiteitsmodulus moeten geven. In dit geval bedraagt deze 42900*MPa* wat inderdaad hoger is. Tot nu toe kan deze stelling kloppen.

Vooreerst wordt opgemerkt dat bij een luchtgehalte van 3,2% een relatief hoge waarde voor de elasticiteitsmodulus wordt verkregen, namelijk 40700*MPa*. Deze is inderdaad lager dan de E-modulus bij het laagst opgemeten luchtgehalte, namelijk 2%. Maar toch ligt deze waarde hoger dan de elasticiteitsmodulus bij een luchtgehalte van 2,5%, terwijl ze eigenlijk lager zou moeten zijn.

De gegevens worden nog eens samengevat in Tabel 36, waarbij de waarden voor de elasticiteitsmodulus worden afgerond en, bij meerder betonmengelingen, wordt ook het gemiddelde genomen.

Proefstuk	Luchtgehalte [%]	Exp. E <sub>c</sub> [MPa]	Theor. E <sub>c</sub> [MPa]
ZVB 14 (100')	3,2	40700	36400
ZVB 10 - 11 - 14 (00')	2,5	39000	35800
ZVB 13 (00')	2,4	39300	35200
ZVB 12 (00')	2,0	42900	36200

Tabel 36: Samenvatting luchtgehalte versus elasticiteitsmodulus

In de tabel wordt inderdaad duidelijk dat bij een dalend luchtgehalte de elasticiteitsmodulus stijgt met uitzondering van mengsel ZVB 14 (100'). Hoe meer lucht in het betonmengsel, hoe meer vervormbaar en bijgevolg hoe lager de elasticiteitsmodulus is.

Indien de theoretische elasticiteitsmodulus vanuit de druksterkte wordt bestudeerd, kan deze niet een trend worden waargenomen. De waarden liggen steeds dicht bij elkaar.

Het kolomdiagram weergegeven in Grafiek 19 toont een visuele voorstelling van de elasticiteitsmoduli voor alle beproefde monsters.



Grafiek 19: Kolomdiagram van de experimentele elasticiteitsmodulus

Uit Grafiek 19 kan men visueel besluiten dat de experimentele waarden voor de elasticiteitsmodulus dicht bij elkaar liggen. Voor drie mengsels kan men zien dat de elasticiteitsmodulus voor het proefstuk gestort na 100 minuten lager ligt dan na 0 minuten. Voor mengsel ZVB 11 gaat deze stelling niet op, daar liggen de waarden zeer dicht bij elkaar. Voor ZVB 14 daarentegen geldt het omgekeerde. Daar wordt een hogere elasticiteitsmodulus vastgesteld, maar dit mengsel vertoonde dan ook een onregelmatig gedrag ten opzichte van de andere.

Globaal blijken de proefstukken met een ouderdom van 100 minuten een elasticiteitsmodulus te hebben die 1,5% lager ligt. Men kan dus niet spreken van een significant verschil. Zeker als men dit fenomeen slechts bij drie betonmengsels van de vijf waarneemt.

In Tabel 37 staan de resultaten voor de experimentele en theoretische elasticiteitsmoduli. De gemiddelde elasticiteitsmodulus per tijdstip wordt weergegeven. Ter verduidelijking worden de waarden horende bij de proefstukken op tijdstip 100 minuten cursief geplaatst.

Ducofatul	Ouderdom	Experimentele	Theoretische E-modulus [MPa]	
Proeistuk	[minuten]	E-modulus [MPa]		
<b>ZVB</b> 10	0	39600	35900	
210 10	100	37600	36200	
7VR 11	0	38900	35900	
ZVDII	100	39000	36100	
ZVB 12	0	42900	36200	
	100	40500	36200	
7VB 13	0	39300	35200	
ZVB 15	100	38400	35600	
<b>7</b> VB 1/	0	38500	35700	
2 V D 14	100	40700	36400	

Tabel 37: Samenvatting van de elasticiteitsmoduli (afgeronde waarden tot op 100MPa)

De theoretische berekende waarden uitgaande van de druksterkte liggen zeer dicht bij elkaar. Niettegenstaande in de literatuur werd vermeld dat de formule uit de Eurocode mocht gebruikt worden, liggen de waarden toch relatief vrij ver van deze bepaald met de vervormingsgestuurde proef.

In Eurocode 2 wordt voor traditioneel beton een elasticiteitsmodulus gegeven van ongeveer 37000*MPa* waarbij het beton een sterkteklasse heeft van 50*N/mm*<sup>2</sup>. De elasticiteitsmoduli van traditioneel beton voor de verschillende sterkteklassen zijn te vinden in paragraaf '2.2.3.2 *Theoretische benadering*' in '*Deel I: Literatuurstudie*', Tabel 11.

In deze thesis liggen de theoretische elasticiteitsmoduli steeds lager dan de experimentele. De formule vanuit Eurocode 2, geldig voor traditioneel beton, dient dus waarschijnlijk wat bijgewerkt te worden voor zelfverdichtend beton. In dit beton zit namelijk een grotere mortelfractie die meer vervormingen toelaat. Verder vertonen de experimentele waarden op zich weinig schommelingen per betonmengeling, dus kunnen ze als vrij betrouwbaar worden aanvaard.

Ook een studie van Gómez, Parra & Valcuende vermeld dat de theoretische formule uitgaande van de druksterkte gebruikt mag worden. Bij hun onderzoek schommelde deze theoretische waarden telkens onder de experimentele indien formule 2.16 uit CEB-FIB Model Code 1990 werd toegepast. In deze thesis blijken de theoretische waarden door toepassing van formule 2.12 uit Eurocode 2 ook telkens onder de experimentele elasticiteitsmodulus te liggen, namelijk met 9% lager.

Er werden twee betonsamenstellingen gebruikt. Mengsel ZVB 10 en 11 bevatten een hoger gehalte aan fijne deeltjes, meer cement en kalksteenmeel, terwijl mengsel ZVB 12 tot en met 14 een lager gehalte bezit. Zoals reeds aangegeven is de elasticiteitsmodulus weinig verschillend voor alle proefstukken. Tenslotte kan de stelling *'hoe meer granulaten, hoe hoger de elasticiteitsmodulus'* vanuit de literatuur hier niet experimenteel bevestigd worden.

**Deel III: Besluit** 

# Hoofdstuk 9: Besluit

# 9.1 Algemeen

In dit laatste hoofdstuk worden de besluiten van het onderzoek rond de invloed van de reologie op de mechanische eigenschappen van zelfverdichtend beton samengevat. De besluiten die hier worden geformuleerd zijn gebaseerd op een beperkt proefprogramma. Indien een resultaat de trend van de anderen niet volgt wordt deze niet opgenomen in het algemeen besluit. Dergelijke afwijkingen zijn duidelijk aangegeven in het onderzoeksgedeelte van deze thesis.

Het effectieve onderzoek wordt gevoerd met behulp van twee betonsamenstellingen en twee soorten superplastificeerder. Op die manier kunnen er variaties gemaakt worden naar type superplastificeerder, hoeveelheid superplastificeerder en naar een hoger of lager gehalte aan fijne deeltjes in het beton afhankelijk van de betonsamenstelling.

In het eerste luik van het onderzoeksgedeelte worden de reologische parameters van het beton bepaald met behulp van een reometer. Na verwerking van de resultaten geeft deze de vloeigrens en de plastische viscositeit. Tegelijkertijd worden proeven uitgevoerd op het verse beton. Op die manier kan er een relatie gezocht worden tussen de resultaten van de verse betonproeven en de reologische eigenschappen van de betonmengeling. Na verharding van het aangemaakte beton worden de mechanische eigenschappen nagegaan en gecorreleerd met de bekomen verse betoneigenschappen.

In het tweede luik wordt de verandering van de eigenschappen van het beton in de tijd nagegaan. Er wordt bekeken hoe snel de verwerkbaarheid van het beton daalt tussen 0 minuten, dit is als het beton een eerste maal gemixt is, en 100 minuten. Daarna wordt onderzocht of dit ook een invloed heeft op de mechanische eigenschappen. De soort en de hoeveelheid superplastificeerder wordt telkens gevarieerd per betonsamenstelling. Op die manier worden de verschillen tussen de superplastificeerders nagegaan en eveneens de verschillen tussen hoeveelheden superplastificeerder. Na verharding worden drukproeven uitgevoerd om het verloop van de druksterkte in de tijd te analyseren. De elasticiteitsmodulus wordt bepaald na 0 en 100 minuten om te zien of ook hier verschillen optreden. Deze resultaten worden aan de verse betonproeven gelinkt.

# 9.2 Invloed van de reologische parameters op de mechanische eigenschappen (ZVB 1 - 9)

In dit eerste deel wordt het beton besproken waarbij de reometer wordt gebruikt. Behalve voor mengeling ZVB 1 wordt voor het vervaardigen van het beton de kleine betonmolen van 50*l* gebruikt. Voor ieder mengsel worden verse betonproeven uitgevoerd. De vloeigrens en de plastische viscositeit wordt bepaald met de reometertest. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de ConTec Viscometer 5. Vervolgens worden alle proefstukken onderworpen aan een drukproef ter bepaling van de druksterkte. Tenslotte wordt er opgemerkt dat voor de proefstukken van mengsel ZVB 1 bijkomende proeven worden voorzien waarbij de buigtreksterkte (drie- en vierpuntsbuigproef) en de splijttreksterkte wordt bepaald aan de hand van prisma's.

# 9.2.1 Verse betonproeven

Vooreerst wordt algemeen een hogere slump flow klasse verkregen door het verhogen van de hoeveelheid superplastificeerder. Als een vergelijking wordt gemaakt naar de V-funnel tijd bij dezelfde betonsamenstelling en hetzelfde type superplastificeerder, maar een andere slump flow klasse dan zou er verwacht worden dat de hoogste slump flow klasse de laagste V-funnel tijd zal vertonen. Uit de experimentele opnames blijkt dit gedrag niet steeds aantoonbaar te zijn en dit onafhankelijk van de soort superplastificeerder.

De V-funnel tijd bij mengsels met SP1 is steeds hoger dan bij SP2 voor ongeveer dezelfde slump flow, ongeacht de betonsamenstelling. Dit wijst erop dat SP2 een snellere uitvloeiing vertoont bij hetzelfde vloeigedrag. Vervolgens blijkt een samenstelling met een lager gehalte aan fijne materialen veel viskeuzer te zijn. Dit vertaalt zich dan ook in de V-funnel tijden die steeds groter zijn bij de betonsamenstelling met het laagste gehalte aan fijn materiaal.

Een minimale L-box ratio wordt voor een goed zelfverdichtend betonmengsel vastgelegd op minimaal 0,8. Voor de geteste betonsamenstelling bleek hiervoor telkens een slump flow klasse SF3 noodzakelijk te zijn.

Tenslotte vertonen alle mengsels een hoge statische weerstand tegen ontmenging. Voor één mengsel wordt dit niet bevestigd, maar de bekomen waarde was daar abnormaal hoog.

# 9.2.2 Reometer

De onderzochte betonsamenstellingen vertoonden allen een shear thickening gedrag waarbij de waarde voor de consistentie index n telkens hoger ligt dan 1. Deze index verhoogt bij stijgende hoeveelheid superplastificeerder voor eenzelfde betonsamenstelling met SP1. Indien het gehalte aan grof granulaat stijgt, daalt de consistentie index en bijgevolg wordt het shear thickening gedrag afgezwakt. Voor de mengsels met SP2 werden deze stellingen niet experimenteel bevestigd. Integendeel, hier blijft de consistentie index constant ongeacht de betonsamenstelling en de hoeveelheid superplastificeerder.

Uit de reologische stromingscurves kan worden afgeleid dat de betonsamenstelling met het laagste poedergehalte telkens een lagere vloeigrens heeft, gemiddeld zo'n 35% lager.

Om een voldoende grote slump flow te bekomen, dient de vloeigrens geen te hoge waarden te bezitten. Algemeen geldt, hoe lager de vloeigrens hoe groter de slump flow zal zijn. Een lagere vloeigrens kan, naast andere aanpassingen aan de samenstelling, verkregen worden door het toevoegen van een grotere hoeveelheid superplastificeerder. Voor de V-funnel geldt het volgende. Een afnemende V-funnel tijd doet de steilheid van de reologische stromingscurve lichtjes dalen en dit gaat bijgevolg gepaard met een lagere viscositeit.

In deze thesis werd voor de tweede betonsamenstelling (samenstelling met het laagste poedergehalte) telkens ontmenging vastgesteld tijdens de reometertest. Een indicatie voor deze dynamische segregatie kan gegeven worden door het bepalen van de segregatiecoëfficiënt. Deze ligt 31% hoger dan bij het zelfverdichtende beton met een poedergehalte van  $600 kg/m^3$ . Een visuele indicatie voor ontmenging blijft echter noodzakelijk aangezien er vaak onzekerheid is voor de waarden van de segregatiecoëfficiënt. Dit omdat deze bepaald wordt uitgaande van een zuiver Bingham gedrag terwijl de beschouwde mengelingen een shear thickening gedrag vertonen. De betonsamenstelling met een poedergehalte van  $520 kg/m^3$  blijkt dynamisch niet stabiel genoeg te zijn om ontmenging van het mengsel te voorkomen. Kortom deze samenstelling is het meest gevoelig aan dynamische segregatie. De kans voor het optreden van ontmenging blijkt ook groter te zijn bij gebruik van superplastificeerder SP1. Hoewel de statische segregatieproef aantoont dat alle mengsels een behoorlijke weerstand bezitten tegen ontmenging, kan dit niet voor iedere mengeling worden bevestigd door de segregatiecoëfficiënt. De dynamische segregatie kan eventueel wel in toekomstig werk beter worden nagegaan aan de hand van de Tilting box test (T-box).

# 9.2.3 Proeven op verhard beton

Er wordt geen verschil in druksterkte vastgesteld bij het gebruik van een hogere of lagere hoeveelheid superplastificeerder van eenzelfde soort. Daarnaast wordt voor dezelfde betonsamenstelling eveneens geen verschil in druksterkte opgemerkt tussen het gebruik van SP1 of SP2. Dit geldt voor de drukproeven op zowel cilinders als kubussen. De verhouding tussen de cilinderdruksterkte en de kubusdruksterkte ( $f_{ck,cil}/f_{ck,cub}$ ) bedraagt gemiddeld 0,87. Voor een betonsamenstelling met een hoger gehalte aan grove granulaten en bijgevolg een lager poedergehalte ligt de druksterkte hoger, voor de cilinders ligt de druksterkte dan weer lager. Tussen het gebruik van SP1 en SP2 is er geen eenduidig verschil in druksterkte op te merken.

In deze thesis werd voor één betonmengeling de treksterkte bepaald. Uit de proefresultaten blijkt dat de buigtreksterkte bij een driepuntsbuigproef hoger is dan bij de vierpuntsbuigproef. De gemiddelde buigtreksterkte van het betonmengsel met een poedergehalte van  $600kg/m^3$  bedraagt 5,90N/mm<sup>2</sup> (SD = 0,37N/mm<sup>2</sup>). Voor de gemiddelde splijtsterkte wordt dit 4,34N/mm<sup>2</sup> (SD = 0,07N/mm<sup>2</sup>).

# 9.2.4 Conclusie

Een betere verwerkbaarheid wordt verkregen door het toevoegen van een superplastificeerder. Dit uit zich in de resultaten ter bepaling van de slump flow. De V-funnel tijd ligt steeds hoger bij gebruik van SP1, dit werd ook opgemerkt tijdens het praktisch werken met het betonmengsel. Een betonmengsel met een lager poedergehalte blijkt veel viskeuzer te zijn en dus moeilijker verwerkbaar. Dit vertaalt zich ook in de V-funnel tijd. Door de verse betonproeven kan men besluiten dat een goed verwerkbaar beton het best wordt bereikt door toepassing van superplastificeerder SP2.

Indien het vermijden van ontmenging van primordiaal belang is, wordt het best een betonsamenstelling gebruikt met een hoger poedergehalte en wordt SP2 aangeraden als superplastificeerder. Door het toevoegen van een superplastificeerder verlaagt de waarde van de vloeigrens en hierdoor wordt bijgevolg een grotere slump flow en een grotere verwerkbaarheid verkregen.

Een significant verschil in de resultaten voor de druksterkte tussen de verschillende proefstukken kan niet worden aangetoond. De druksterkte blijkt dus onafhankelijk te zijn van de soort en hoeveelheid superplastificeerder.

# 9.3 Invloed van de reologische parameters op de mechanische eigenschappen (ZVB 10 - 14)

In dit deel wordt de verandering van de eigenschappen van het beton in de tijd nagegaan, en dit zowel in verse als verharde toestand. Voor alle mengelingen wordt op ieder tijdstip de slump flow en de V-funnel tijd gemeten. Zo kan de vloeibaarheid van het beton worden nagegaan. Om het verharde beton te karakteriseren worden drukproeven uitgevoerd op het beton vervaardigd op ieder tussentijdstip. Bij het beton vervaardigd na 0 en 100 minuten wordt de elasticiteitsmodulus bepaald.

# 9.3.1 Verse betonproeven

Indien eerst een vergelijking wordt gemaakt naar het type superplastificeerder is duidelijk dat SP1 zijn verwerkbaarheid minder lang behoudt dan SP2. Bij het gebruik van SP1 wordt de volle verwerkbaarheid bereikt bij het begin van de proef, of tussen 0 en 20 minuten. Na 20 minuten daalt de verwerkbaarheid monotoon in de tijd. Dit is duidelijk te zien in de resultaten van de slump flow testen. SP2 vertoont een ander beeld naar verwerkbaarheid, het verloop is veel vlakker. Deze superplastificeerder verleent zijn volledige werking pas na enige tijd, in dit werk steeds na ongeveer 40 minuten. Daarbij is de slump flow na 100 minuten vergelijkbaar met deze na 0 minuten, wat erop wijst dat het beton gedurende de volledige tijdsperiode een aanvaardbare verwerkbaarheid behoudt.

Naast de slump flow wordt ook de V-funnel tijd gemeten, die een maat voor het stroomgedrag weergeeft. Het verloop van de V-funnel tijd zou dus tegengesteld moeten zijn aan dat van de slump flow. Het verloop bij SP2 is ook hier vlakker dan bij SP1, wat er dus nogmaals op wijst dat SP2 zijn verwerkbaarheid langer behoudt. Globaal gezien is er ook praktisch een omgekeerd verband verkregen tussen V-funnel tijd en slump flow.

Na 0 en 100 minuten wordt nog een L-box test uitgevoerd op het verse beton. Het verschil tussen SP1 en SP2 wordt ook hier duidelijk zichtbaar. Na 100 minuten bereikt het beton aangemaakt met SP1 het einde van de L-box niet meer. Dit geeft terug het slechte vloeigedrag weer. Het beton is niet meer in staat om de wapeningstaven te passeren. Terwijl het beton met SP2 een hogere L-box ratio bereikt na 100 minuten, wat aangeeft dat het beton beter vloeit en de wapeningstaven beter kan passeren dan net na aanmaak van het betonmengsel.

Ten tweede kan een vergelijking gemaakt worden naar de hoeveelheid superplastificeerder. Hierbij is het duidelijk dat er veel minder SP1 nodig is om tot eenzelfde slump flow of Vfunnel tijd te komen dan met SP2. Algemeen zorgt een verhoging van de hoeveelheid superplastificeerder voor een hogere slump flow. Voor de V-funnel tijd kan dit niet gezegd worden, hier speelt de betonsamenstelling een voorname rol. Bij het gebruik van SP1 zorgt de betonsamenstelling met een poedergehalte van  $520kg/m^3$  voor duidelijk hogere V-funnel tijden, terwijl dit bij SP2 dan weer niet steeds het geval is. Als laatste zorgt een grotere hoeveelheid superplastificeerder ook voor een hogere L-box ratio bij de start van de proef.

ZVB 14 vertoonde niet hetzelfde patroon als hierboven beschreven. Een verhoging van de hoeveelheid superplastificeerder ten opzichte van ZVB 13 zorgde niet voor een verhoging van de slump flow, maar voor een lichte daling. Bij het toevoegen van een extra hoeveelheid superplastificeerder werd een hogere slump flow verkregen bij de start, maar het verloop van de slump flow in de tijd wijkt af van de andere betonmengelingen met SP2.

# 9.3.2 Proeven op verhard beton

In dit deel van het onderzoek werden drukproeven uitgevoerd op cilinders en kubussen. Daarnaast wordt de elasticiteitsmodulus bepaald voor de cilinders vervaardigd na 0 en 100 minuten.

Bij het gebruik van SP1 is er een dalende trend waar te nemen in het verloop van zowel de cilinderdruksterkte als de kubusdruksterkte. Om die dalende trend waar te nemen moet de spreiding op de resultaten meegerekend worden, de gemiddelde druksterktes vertonen een grilliger verloop. De dalende trend wordt meestal duidelijker als het resultaat na 0 minuten buiten beschouwing wordt gelaten. Dit kan erop wijzen dat SP1 inderdaad slechts zijn volle verwerkbaarheid bereikt tussen 0 en 20 minuten en niet bij 0 minuten. Anderzijds worden de cilinderdruksterktes na 0 en 100 minuten bepaald op de cilinders die zijn gebruikt om de elasticiteitsmodulus te onderzoeken, ook dit kan voor afwijking zorgen. Worden deze twee waarden buiten beschouwing gelaten dan wordt het verloop van de cilinderdruksterkte eerder een vlak. De getalwaarden van zowel de cilinderdruksterkte als de kubusdruksterkte liggen iets hoger voor ZVB 12 dan voor ZVB 10, dus de tweede betonsamenstelling met een hoger PCE-gehalte.

SP2 geeft een ander verloop in de tijd voor de druksterktes. De kubusdruksterkte gaat steeds stijgen in de tijd. Voor de cilinderdruksterkte ligt de waarde na 0 en 100 minuten lager dan de

andere waarden, die een quasi constant verloop kennen. Dit versterkt het vermoeden dat de bekomen druksterkte, vanuit de proef om de elasticiteitsmodulus te kennen, lager uitvalt dan wanneer deze bepaald wordt via de traditionele drukproef. Het verloop van de cilinderdruksterkte is dus constant of licht dalend, maar zeker niet stijgend zoals de kubusdruksterkte. De getalwaarden van de cilinderdruksterkte zijn gelijklopend voor ZVB 11 en 14, terwijl de kubusdruksterkte van deze laatste steeds iets hoger ligt.

Bij het aanmaken van ZVB 13 is eveneens SP2 gebruikt, maar de getalwaarden vertonen afwijking ten opzichte van ZVB 11 en 14. De cilinderdruksterktes liggen gemiddeld  $2N/mm^2$  lager en de kubusdruksterktes zelfs  $6N/mm^2$ . Het verloop van de druksterktes in de tijd daarentegen is wel gelijkaardig. Vanwaar de afwijking in de getalwaarden komt is de schrijvers niet duidelijk.

De elasticiteitsmodulus wordt steeds bepaald op de cilinders vervaardigd na 0 en 100 minuten. Voor drie van de vijf mengsels is de elasticiteitsmodulus hoger bij 0 minuten, voor één mengsel ongeveer gelijk en voor één mengsel lager. Ook hier kan dus geen eenduidig besluit genomen worden. Als de elasticiteitsmodulus vergeleken wordt met het luchtgehalte dan daalt deze met een stijgend luchtgehalte. Dit is geldig voor alle elasticiteitsmoduli bepaald na 0 minuten die vergeleken worden met het luchtgehalte. Enkel de elasticiteitsmodulus bij ZVB 14, bepaald na 100 minuten, vertoont hierop een afwijking. Dit is ook het enigste mengsel dat een hogere E-modulus bezit na 100 minuten en deze vertoonde een afwijkend verloop qua slump flow ten opzichte van de andere betonmengelingen. Al deze argumenten kunnen aangeven dat er bij de aanmaak van ZVB 14 waarschijnlijk iets is fout gelopen.

## 9.3.3 Conclusie

Tijdens de verse betonproeven uitgevoerd in de tijd wordt duidelijk dat SP1 zijn verwerkbaarheid veel sneller verliest dan SP2. SP1 bereikt zijn volle verwerkbaarheid bij het begin of tussen 0 en 20 minuten. SP2 daarentegen bereikt deze slechts na ongeveer 40 minuten. Een verhoging van de hoeveelheid superplastificeerder zorgt algemeen voor een hogere slump flow en een lagere V-funnel. SP1 is duidelijk krachtiger dan SP2, want er is minder superplastificeerder nodig om bij dezelfde betonsamenstelling tot dezelfde slump flow te komen.

159

Het verloop van de druksterkte van het beton bij het gebruik van SP1 vertoont een licht dalende trend voor de kubusdruksterkte. Voor de cilinderdruksterkte is eerder een vlak verloop waar te nemen. Bij het gebruik van SP2 daarentegen is het verloop van de kubusdruksterkte stijgend en dat van de cilinderdruksterkte eerder vlak. De getalwaarden voor de druksterkte zijn vrij gelijklopend, op een enkele uitzondering na.

De elasticiteitsmodulus is over het algemeen lager na 100 minuten dan na 0 minuten, enkel ZVB 14 vormt hierop een echte uitzondering. Zoals aangegeven in paragraaf '8.2.1.1 Slump flow - Superplastificeerder 2' vertoonde het verloop van de slump flow voor ZVB 14 een ander verloop dan bij ZVB 11 en ZVB 13. Deze wijziging vertaalt zich niet in een ander verloop inzake druksterkte, maar wel in een ander verband voor de elasticiteitsmodulus.

# 9.4 Algemeen besluit

Het doel van deze masterproef was om de invloed van de reologie op de mechanische eigenschappen van zelfverdichtend beton na te gaan. Het onderzoek is gevoerd in twee fasen. In een eerste fase wordt het beton enkel gestort op het moment van de vervaardiging. Om de reologie te bestuderen, is in deze fase gebruik gemaakt van een reometer en van verse betonproeven. De mechanische eigenschappen zijn onderzocht aan de hand van druk-, treken splijtproeven. In de tweede fase wordt het beton gestort op een verschillende ouderdom. Dit gebeurt tussen 0 en 100 minuten met tussenstappen van 20 minuten. De reologie is hier enkel nog bestudeerd aan de hand van verse betonproeven en proeven ter bepaling van de elasticiteitsmodulus.

In deze thesis wordt duidelijk dat de variatie van de vloeigrens en de plastische viscositeit, veroorzaakt door veranderingen van de samenstellende materialen, niet significant afwijken van de resultaten beschreven in de literatuur. Daarnaast werd ook ervaren dat het dupliceren van een bepaald mengsel niet zo eenvoudig lijkt te zijn. De eigenschappen van zelfverdichtend beton in zijn verse toestand zijn zeer gevoelig voor eventuele kleine variaties in de samenstelling. Uiteenlopende waarden kunnen worden bekomen en een verband zoeken wordt hierdoor bemoeilijkt.

Om tot eenduidige besluiten te komen, dienen nog verdere proeven uitgevoerd te worden. In deze masterproef zijn reeds de eerste trends beschreven die zijn waargenomen. Er zijn daarbij echter telkens uitzonderingen die de gevonden trends in twijfel trekken. Wat wel al duidelijk is waargenomen, is dat SP2 zijn verwerkbaarheid langer behoudt in vergelijking met SP1. De mechanische eigenschappen in de tijd daarentegen verschillen weinig in waarde bij het gebruik van de twee superplastificeerders. Het verloop van de kubusdruksterkte in de tijd vertoont wel een ander verloop bij het gebruik van SP1 of SP2.

Tot slot kan het voor verder onderzoek interessant zijn om de water film thickness en de paste film thickness van de betonmengelingen te bepalen om ook deze eigenschappen in relatie te kunnen brengen met de reologische parameters en de mechanische eigenschappen.

# Referenties

# Artikels, boeken en thesissen

Banfill P.F.G. (1994). Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials. *Construction and Building Materials*, 8(1), pp. 43-50. Geraadpleegd op 25 februari, 2013, via www.webofscience.com

Banfill, P.F.G. (2006). Rheology of fresh cement and concrete. *Rheology reviews*, Heriot-Watt University, School of the built environment, Edinburgh, pp. 61-130. Geraadpleegd op 13 maart, 2013, via www.scholar.google.com

Bartos, P.J.M. et al. (2008). Self-Compacting Concrete. Whittles Publishing: Caithness.

Boel, V. (2006). *Microstructuur van zelfverdichtend beton in relatie met gaspermeabiliteit en duurzaamheids aspecten*. Doctoraat, Universiteit Gent.

Burdette, E., Deatherage, J. & Oluokon, F. (1991). Elastic modulus, Poisson's ratio, and compressive strength relationships at early ages. *ACI Mater. J.*, 88(1), pp. 3-10.

Calie, B. (2007). *Onder druk verpompen van zelfverdichtend beton*. Afstudeerwerk, Universiteit Gent, Vakgroep bouwkundige constructies en civiele techniek, pp. 2-2 - 2-4.

Carrasquillo, R. & Cetin, A. (1998). High-performance concrete: Influence of coarse aggregates on mechanical properties. *ACI Mater. J.*, 95(3), pp. 252-261.

Couette, M.M. (1890). *Etudes sur le frottement des liquides*. Ann. Chim. Pheys. 21, pp. 433-510.

Crouch, L. K., Hewitt, R. & Pitt, J. (2007). Aggregate effects on pervious Portland cement concrete static modulus of elasticity. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, 7, pp. 561-568.

De Blaere, B. (2009, vijfde herziene druk). *Betontechnologie: controle en certificatie van beton*. Brussel: Belgische Betongroepering, hoofdstuk VIII, paragraaf 6, pp. 343-345.

Deneckere, M. (2012). Invloed van luchtgehalte op microstructuur en reologische eigenschappen van traditionele en zelfverdichtende mortel. Afstudeerwerk, Universiteit Gent, Vakgroep bouwkundige constructies, p. 93. De Schutter, G. (2009, vijfde herziene druk). *Betontechnologie: Eigenschappen van betonspecie en van verhardend beton*. Brussel: Belgische Betongroepering, hoofdstuk III, paragraaf 4, pp. 155-161.

De Schutter, G. & Poppe, AM. (2004). Quantification of the water demand of sand in mortar. *Construction and Building Materials*, 18(7), pp. 517-521. Geraadpleegd op 25 februari, 2013, via www.webofscience.com

De Schutter, G., Feys, D. & Verhoeven, R. (2005). *The rheology of fresh Self-Compacting Concrete: A compromise between Bingham and Herschel-Bulkley?*. Sixth FirW PhD Symposium, Faculty of Engineering, Ghent University.

De Schutter, G., Feys, D. & Verhoeven, R. (2007). Non-reversible time-dependent theological properties of fresh SCC. In G. De Schutter & V. Boel (Eds.), 5<sup>th</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete - SCC 2007, Ghent, Belgium, 3-5 september 2007, Volume 1, pp. 359-364.

Desmyter, J. & Dieryck, V. (2009, vijfde herziene druk). *Betontechnologie: Speciale betonsoorten, zelfverdichtend beton.* Brussel: Belgische Betongroepering, hoofdstuk XII.7, pp. 491-503.

Desnerck, P. (2011). Samendrukkings-, hechtings- en afschuifgedrag van poedergebasseerd zelfverdichtend beton. Doctoraat, Universiteit Gent, Vakgroep bouwkundige constructies.

De Vylder, W. et al. (2002). *Gewapend beton - Berekening volgens NBN B 15-002 (1999)*, Gent: Academia Press, hoofdstuk 1, paragraaf 1.2, pp. 1.26-1.30.

EFNARC. (2005). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete.

Esmaeilkhanian, B. et al. (2013). Characterization of Dynamic Stability of Self-Consolidating Concrete. *Proceedings of the Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, Chicago, Illinois, USA, 12-15.

Feys, D. (2009). Interacties tussen de reologische eigenschappen en het verpompen van zelfverdichtend beton. Doctoraat, Universiteit Gent, Vakgroep bouwkundige constructies, pp. 20-21,pp. 55-56, pp. 70-73 & p. 100. Gómez, F., Parra, C. & Valcuende, M. (2011). Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25, pp. 201-207. Geraadpleegd op 3 april, 2013, via www.sciencedirect.com

Gupta, A. & Reddy, B.V.V. (2008). Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil-cement block masonry. *Construction Building Materials* 22(8), pp. 1614-1623. Geraadpleegd op 25 februari, 2013 via www.webofscience.com

Heirman, G. et al. (2008). Integration approach of the Couette inverse problem of powder type self-compacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mech.*, 150, pp. 93-103. Geraadpleegd op 13 maart, 2013, via www.sciencedirect.com

Helmuth, R. (1980). Structure and rheology of fresh cement paste. *Proceedings of 7th International Congress of Chemistry of Cement*, Vol II, pp. 16-30. Geraadpleegd op 12 maart, 2013, via www.webofscience.com

http://www.contec.is. Geraadpleegd op 17 oktober 2012.

Huyghe, S. (2005). Zelfverdichtend beton volgens het aangepaste Andreasen en Andersenmodel. Afstudeerwerk, Katholieke Hogeschool Brugge–Oostende.

Kwan, A. & Li, L. (2012). Combined effects of water film thickness and paste film thickness on rheology of mortar. *Materials and structures*, 45, pp. 1359-1374. Geraadpleegd op 25 februari, 2013, via www.webofscience.com

Kwan, A. & Li, L. (2013). Concrete mix design based on water film thickness and paste film thickness. *Cement and concrete properties*. Geraadpleegd op 15 april, 2013, via www.sciencedirect.com

Kwan, A. Li, L. & Fung, W. (2011). Wet packing of blended fine and coarse aggregate. *Materials and structures*, 45, pp. 817-828. Geraadpleegd op 21 februari, 2013, via www.webofscience.com

Lesage, K. (2009). *Invloed van vulstoffen op de reologische parameters van zelfverdichtend beton*. Afstudeerwerk, Katholieke Universiteit Leuven, Faculteit Ingenieurswetenschappen, Departement Burgerlijke Bouwkunde, p. 65.

Lin, F. et al. (2012). Cracking analysis of massive concrete walls with cracking control techniques. *Construction and Building Materials*, 31, pp. 12-21. Geraadpleegd op 13 april, 2013, via www.sciencedirect.com

Macosko, C.W. (1994). *Rheology Principles, measurements and applications*. Wiley-VCH, New-York.

Magera, P. & Ployaert, C. (2009, vijfde herziene druk). *Betontechnologie: Hulpstoffen.* Brussel: Belgische Betongroepering, hoofdstuk II, paragraaf 2.2, pp. 101-104.

Manita, P. & Sideris, K. (2004). Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ratio of normal concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 26(6), pp. 623-631.

Mewis, J. & Wagner, N.J. (2009). Thixotropy. *Advances in Colloid and Interface Science*, pp. 214-227. Geraadpleegd op 13 maart, 2013, via www.sciencedirect.com

Neville, A. (1997). Aggregate and bond modulus of elasticity of concrete. *ACI Mater. J.*, 94(1), pp. 71-74.

Peirs, J. & Van Der Vurst, F. (2012). *Vormfactoren voor poedergebaseerd zelf-verdichtend beton*. Afstudeerwerk, Universiteit Gent, Vakgroep bouwkundige constructies, pp. 2-5.

Pelova, G.I. & Walraven, J.C. (1998). Verwerkbaarheid van betonmengsels. *Cement*, 9, pp. 48-52.

Ployaert, C. (2005, mei). Zelfverdichtend beton. Febelcem, 36, p3.

Ployaert, C. (2005, augustus). Zelfverdichtend beton. Febelcem, 35.

Raeymaekers, R. (2012). *Vormfactoren voor poedergebaseerd zelfverdichtend beton (in trek)*. Afstudeerwerk, Universiteit Gent, Vakgroep bouwkundige constructies.

Roussel, N. (2006). A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research*, 36, pp. 1797-1806. Geraadpleegd op 14 maart, 2013, via www.sciencedirect.com

Schaafsma, S. et al. (1998). Description of agglomerate growth. *Powder technology*, 97, pp. 183-190. Geraadpleegd op 24 februari, 2013, via www.webofscience.com

Serlet, M. (2000). *De reologie van zelfverdichtend beton*. Afstudeerwerk, Universiteit Gent, Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Vakgroep Bouwkundige constructies, pp. 38-42.

Thrane, L.N., Pade, C. & Svensson, T. (2007). Estimation of Bingham rheological parameters of SCC from slump flow measurement. In G. De Schutter & V. Boel (Eds.), 5<sup>th</sup> International *RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete - SCC 2007*, Ghent, Belgium, 3-5 september 2007, Volume 1, pp. 353-358.

Vandewalle, L. (2009, vijfde herziene druk). *Betontechnologie: Verhard beton en zijn eigenschappen*. Brussel: Belgische Betongroepering, hoofdstuk IV, paragraaf 1, 2 & 3, pp. 175-190.

Van Geysel, A. et al. (1999). Gewapend beton, Gent: Story, hoofdstuk 1, p. 14.

Wallevik, J.E. (2003). *Rheology of particle suspensions, fresh concrete, mortar and cement paste with various types of lignosulphonates.* Ph-D dissertation, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

Wallevik, O.H. (2009). *Introduction to Rheology of Fresh Concrete*. Reykjavik: Innovation Center Iceland, pp. 5.21-5.22.

Welty, J.R. et al. (2000). *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*. 4th edition, John Wiley & Sons.

WTCB. Zelfverdichtend beton: karakterisering en controle op de bouwplaats. Geraadpleegd op 4 oktober 2012 via http://www.wtcb.be.

WTCB-contact. (2005). *Stortklaar en geprefabriceerd beton*, (5). Geraadpleegd op 4 oktober 2012 via http://www.wtcb.be.

Wu, K. et al. (2001). Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of highperformance concrete. *Cem. Concr. Res.*, 31(10), pp. 1421-1425.

Zhang, C. et al. (1996). The filling role of pozzolanic material. *Cement en conrete research*,26, pp. 943-947. Geraadpleegd op 12 maart, 2013, via www.webofscience.com

## Normen

EN 1992-1-1 (2004) (E), Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.

EN 13791 (2007), Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components.

NBN 15-211 (1990) Proeven op beton - Rechtstreekse trek.

NBN 15-002 (1995), Eurocode 2 - Berekening van betonconstructies.

NBN B 15-203 (1990), Essais des bétons, Module d'élasticité statique en compression.

NBN EN 206-1 (2001), Beton - Eisen, gedraging, vervaardiging en overeenkomstigheid.

NBN EN 12350-7 (2009), Beproeving van betonspecie - Deel 7: Luchtgehalte - Drukmethode.

NBN EN 12350-8 (2010), Beproeving van betonspecie - Deel 8: Zelfverdichtend beton - Vloeimaat.

NBN EN 12350-9 (2010), Beproeving van betonspecie - Deel 9: Zelfverdichtend beton -Trechtertijd.

NBN EN 12350-10 (2010), Beproeving van betonspecie - Deel 10: Blokeringsmaat - L-box.

NBN EN 12390-3 (2009), *Beproeving van verhard beton - Deel 3 : Druksterkte van proefstukken*.

NBN EN 12390-5 (2001), Beproeving van verhard beton - Deel 5: Buigtreksterkte van de proefstukken.

NBN EN 12390-6 (2010), Beproeving van verhard beton - Deel 6: Splijttreksterkte van proefstukken.

NBN EN 12390-7 (2009), Beproeving van verhard beton - Deel 7: Volumemassa van verhard beton.

# Bijlagen

- Bijlage A: Technische fiche van Glenium<sup>®</sup> 51 con.35%, superplastificeerder 1.
- Bijlage B: Technische fiche van Glenium<sup>®</sup> 27 con.20%, superplastificeerder 2.
- Bijlage C: Detailberekening van de segregatiecoëfficiënt aan de hand van een Bingham model.
- Bijlage D: Meetresultaten ZVB  $10 \rightarrow 14$ .
- Bijlage E: Detail van de resultaten in verband met de elasticiteitsmodulus.



# GLENIUM<sup>®</sup> 51 con.35%

# Hoogwaardige hulpstof met dubbele werking.

# C 0956-CPD-1502

Superplastificeerder / Sterk waterreduceerder / Waterdichtingsmiddel in de massa (EN 934-2 T.3.1/T.3.2/T.9)

NBN EN 934-2 BENOR 22/21





#### Beschrijving

GLENIUM 51 con.35% is een hulpstof van een nieuwe generatie op basis van een chemische keten van gemodificeerde polycarboxylic ethers. Het product werd in de eerste plaats ontwikkeld voor gebruik in de prefabindustrie, in voor- en nagespannen beton, waar hoogste duurzaamheid, betonkwaliteit, hoge beginsterktes en een esthetisch afgewerkt oppervlak belangrijke vereisten zijn. Daarnaast wordt deze hoogwaardige hulpstof ook gebruikt als waterdichtingsmiddel in de massa.

GLENIUM 51 con.35% is chloridevrij en voldoet aan EN 934 deel 2.

#### Technische gegevens

Aggregatietoestar	nd	: vloeibaar		
Kleur		: bruin		
Volumemassa	bij 20°C	: 1,1 kg/liter		
pH waarde	bij 20°C	: 6 - 8		
Chloride gehalte		: max. 0,1 m/m %		
Droge stof gehalte	e	: 35 %		
Viscositeit	bij 20°C	: min. 110 mPa.s		
		: max. 160 mPa.s		
Na <sub>2</sub> O equivalent		: max. 3%		
Vriespunt		: - 2°C		
Toxiciteit		: niet van toepassing		
Kleurcode		: grijs		

#### Verpakking, opslag en houdbaarheid

GLENIUM 51 con.35% wordt geleverd in bulk, in vaten van 210 liter of in 1000 liter containers.

Vorstvrij, uit de zon en in gesloten tanks opslaan, bij een temperatuur tussen +5°C en +30°C. Indien het materiaal bevroren is, ontdooien tot een temperatuur van ongeveer +20°C en langzaam mechanisch omroeren tot een homogeen geheel.

Nooit perslucht gebruiken om te roeren.

Houdbaarheid: 12 maanden in gesloten, originele verpakking.

#### Dosering

GLENIUM 51 con.35% wordt gedoseerd tussen 400 cc en 1200 cc per 100 kg cement als superplasificeerder en tussen 800 cc en 1200 cc per 100 kg cement als waterdichtingsmiddel in de massa. Voor specifieke toepassingen kunnen andere doseringen worden gehanteerd. Raadpleeg in dit geval uw BASF-CC afgevaardigde.

GLENIUM 51 con.35% is een gebruiksklare hulpstof, die apart aan de betonspecie wordt toegevoegd.

Een optimaal plastificerend effect of waterreductie verkrijgt men indien GLENIUM 51 con.35% gedoseerd wordt na het aanmaakwater en na alle andere grondstoffen.

Gebruik van oude cement, gebroken zand met een niet correcte korrelopbouw, onvoldoende mengtijd, te veel water en/of overdosering van de hulpstof kan waterafscheiding/ korrelontmenging veroorzaken.



#### The Chemical Company

GLENIUM opslagtanken moeten grondig gereinigd worden voor gebruik, zodat er geen vermenging met enig ander product of hulpstof kan gebeuren.

#### Verenigbaarheid

GLENIUM 51 con.35% IS VERENIGBAAR en aanbevolen voor gebruik met:

- GLENIUM STREAM, hulpstof voor de productie van RHEODYNAMIC;
- MICRO-AIR, luchtbelvormer om de vries- en dooicycli te verbeteren (EN 206).
- RHEOMAC 100, uitzettingsmiddel voor de productie van krimpcompenserend beton.
- RHEOMAC SF, op basis van Silica fume voor HSB, voor onderwater- of waterdicht beton;
- RHEOMAC RICEM, kunstharsvezels, verkrijgbaar in verschillende lengtes;
- GLENIUM VEA-A, stabilisator op basis van gemicroniseerde Silica fume;
- POZZOLITH 390N en 382N, waterreducerende plastificeerders;
- MASTERKURE, nabehandelingsmiddel om een te snelle verdamping van het water te verhinderen.

GLENIUM 51 con.35% is NIET VERENIGBAAR met hulpstoffen type RHEOBUILD op basis van naftalenen of melaminen. Voor verdere informatie, raadpleeg Uw BASF-CC afgevaardigde.

#### Geschikheidsonderzoek

Geschiktheidsonderzoek uitvoeren met de grondstoffen van de betoncentrale om de vereiste dosering van de hulpstof te bepalen in functie van betonsamenstelling, bindingstijd, verwerkbaarheidsbehoud en betonspecificatie. Het verwerkbaarheidsbehoud van beton aangemaakt met GLENIUM 51 con. 35% is niet enkel afhankelijk van de omgevingstemperatuur maar ook van de cementsoort, betontemperatuur, betonsamenstelling, soort toeslagmaterialen, transportmethode en dergelijke.

#### Toepassingsgebied

Het uitstekend dispersie effect maakt dat GLENIUM 51 con.35% de ideale hulpstof is voor de transport- en prefabbetonindustrie

#### Karakteristieken en Voordelen

GLENIUM 51 con.35% verbetert aanzienlijk de eigenschappen van de betonspecie en het verhard beton:

- vloeibaar beton met lage wcf en hoge begin- en eindsterkte;
- vermindering van de nabehandelingscycli, in tijd of temperatuur;
- mogelijkheid om stoom-curing te verminderen;
- minder verdichting, zelfs bij dicht wapeningsnet;
- verbeterd betonoppervlak en uitzicht;
- waterdichtheid van beton
- door zijn lage wcf, verminderd risico op krimp en kruip;
- betere aanhechting aan wapening en voorspanstaal;
- vergeleken met de traditionele superplastificeerders, verhoogt GLENIUM 51 con.35% de fysische eigenschappen en bijgevolg ook de duurzaamheid van het beton.



The Chemical Company

#### Voorzorgsmaatregelen

GLENIUM 51 con.35% is niet schadelijk voor de gezondheid en milieu en vraagt geen speciale labels.

Contact met ogen en verlengd contact met huid vermijden. Indien materiaal in de ogen komt, overvloedig met zuiver water spoelen en een arts raadplegen. Draag handschoenen en een veiligheidsbril. Het product buiten bereik van kinderen houden. Voor verdere inlichtingen, zie veiligheidsgegevens (MSDS).

BASF Construction Chemicals Belgium NV Industrieterrein 'Ravenshout' 3711 Nijverheidsweg 89, B-3945 Ham Tel. +32 11 34 04 34. Fax +32 11 40 13 92 basf-cc-be@basf.com - www.basf-cc.be

B.T.W./T.V.A. BE 0417.791.569 RPR/RPM Hasselt





BASF Nederland B.V., Construction Chemicals Karolusstraat 2 Postbus 132, NL-4900 AC Oosterhout N.B. Tel. +31 162 47 66 60. Fax +31 162 42 96 94 basf-cc-nl@basf.com - www.basf-cc.nl B.T.W. NL 001829117B01 HR Arnhem 09022883





Deze productinformatie is gebaseerd op onze beste kennis van het product. De koper/verwerker zal, op basis van de ondergrond en projectgegevens enerzijds en de toepassings- en werkomstandigheden anderzijds, waarop BASF Construction Chemicals geen invloed heeft, op zijn verantwoordelijkheid een productgeschiktheidsproef uitvoeren, vooraleer met de uitvoering wordt gestart. Schriftelijke en mondelinge adviezen conform onze algemene leveringsvoorwaarden zijn geheel vrijblijvend. Bij herdruk komen voorgaande uitgaven te vervallen.



# GLENIUM<sup>®</sup> 27 con.20%

# Hoogwaardige hulpstof met dubbele werking.

## **C F** 0956-CPD-1502 Superplastificeer

Superplastificeerder / Sterk waterreduceerder / Waterdichtingsmiddel in de massa (EN 934-2 T.3.1/T.3.2/T.9)







#### Beschrijving

GLENIUM 27 con.20% is een hulpstof van een nieuwe generatie op basis van een chemische keten van gemodificeerde polycarboxylic ethers. Dit product werd in de eerste plaats ontwikkeld voor de productie van stortklaar/transport beton met verlengde verwerkbaarheid, uitstekende verpompbaarheid, hoge duurzaamheid en hoge druksterktes. Daarnaast wordt deze hoogwaardige hulpstof ook gebruikt als waterdichtingsmiddel in de massa GLENIUM 27 con.20% is chloridevrij en voldoet aan EN 934 deel 2.

#### Technische gegevens

Aggregatietoes	tand	: vloeibaar		
Kleur		: geelachtig / bruin		
Volumemassa	bij 20°C	: 1,050 kg/liter		
pH waarde	bij 20°C	: 6 - 8		
Chloride gehalt	е	: max. 0,1 m/m %		
Droge stof geha	alte	: 20 %		
Viscositeit	bij 20°C	: < 70 mPa.s		
Na <sub>2</sub> O equivaler	nt	: max. 1,80 %		
Vriespunt		: -2°C		
Toxiciteit		: niet van toepassing		
Kleurcode		: grijs		

#### Verpakking, opslag en houdbaarheid

GLENIUM 27 con.20% wordt geleverd in bulk, in vaten van 210 liter of in 1000 liter containers.

Vorstvrij, uit de zon en in gesloten tanks opslaan, bij een temperatuur tussen +5°C en +30°C.

Indien het materiaal bevroren is, ontdooien tot een temperatuur van ongeveer +20°C en langzaam mechanisch omroeren tot een homogeen geheel.

Nooit perslucht gebruiken om te roeren.

Houdbaarheid: 12 maanden in gesloten, originele verpakking.

#### Dosering

GLENIUM 27 con.20% wordt gedoseerd tussen 400 en 2100 cc per 100 kg cement als superplastificeerder en tussen 1600 en 2100 cc per 100 kg cement als waterdichtingsmiddel in de massa.

Voor specifieke toepassingen kunnen andere doseringen worden gehanteerd. Raadpleeg in dit geval uw BASF-CC afgevaardigde.

#### Gebruiksaanwijzing

GLENIUM 27 con.20% is een gebruiksklare hulpstof, die apart aan het betonmengsel wordt toegevoegd.

Een optimaal plastificerend effect of waterreductie verkrijgt men indien GLENIUM 27 con.20% gedoseerd



#### The Chemical Company

wordt na het aanmaakwater en na alle andere grondstoffen.

Gebruik van oud cement, gebroken zand met niet correcte korrelopbouw, onvoldoende mengtijd, te veel water en/of overdosering van de hulpstof kan waterafscheiding / korrelontmenging veroorzaken.

GLENIUM opslagtanken moeten grondig gereinigd worden voor gebruik, zodat er geen vermenging met enig ander product of hulpstof kan gebeuren.

#### Verenigbaarheid

GLENIUM 27 con.20% is VERENIGBAAR en aanbevolen voor gebruik met:

- GLENIUM STREAM, hulpstof voor de productie van RHEODYNAMIC;
- MICRO-AIR, luchtbelvormer om de vries- en dooicycli te verbeteren (EN 206).
- RHEOMAC 100, uitzettingsmiddel voor de productie van krimpcompenserend beton.
- RHEOMAC SF, op basis van Silica fume voor HSB, voor onderwater- of waterdicht beton;
- RHEOMAC RICEM, kunstharsvezels, verkrijgbaar in verschillende lengtes;
- POZZOLITH 390N, waterreducerende plastificeerder;
- POZZOLITH 130R con.20%, bindingsvertrager;
- MASTERKURE, nabehandelingsmiddel om een te snelle verdamping van het water te verhinderen.

GLENIUM 27 con.20% is NIET VERENIGBAAR met hulpstoffen type RHEOBUILD op basis van naftalenen of melaminen. Voor verdere informatie, raadpleeg Uw BASF-CC afgevaardigde.

#### Geschikheidsonderzoek

Geschiktheidsonderzoek uitvoeren met de grondstoffen van de betoncentrale om de vereiste dosering van de hulpstof te bepalen in functie van betonsamenstelling, bindingstijd, verwerkbaarheidsbehoud en betonspecificatie. Het verwerkbaarheidsbehoud van beton aangemaakt met GLENIUM 27 con.20% is niet enkel afhankelijk van de omgevingstemperatuur maar ook van de cementsoort, betontemperatuur, betonsamenstelling, soort toeslagmaterialen, transportmethode en dergelijke.

#### Toepassingsgebied

Het uitstekend cementdispersie effect maakt dat GLENIUM 27 con.20% de ideale hulpstof is voor transport- en prefabbeton.

#### Karakteristieken en Voordelen

GLENIUM 27 con.20% verbetert aanzienlijk de eigenschappen van de betonspecie en verhard beton:

- vloeibaar beton met lage wcf en hoge begin- en eindsterkte;
- vermindering van de nabehandelingcycli, in tijd of temperatuur;
- mogelijkheid om stoomcuring te verminderen;
- minder verdichting, zelfs bij dicht wapeningsnet;
- verbeterd betonoppervlak en uitzicht;
- waterdichtheid van beton
- door zijn lage wfc, verminderd risico op krimp en kruip;
- betere aanhechting aan wapening en voorspanstaal;
- vergeleken met de traditionele superplastificeerders, verhoogt GLENIUM 27 con.20% de fysische eigenschappen en bijgevolg ook de duurzaamheid van het beton.



The Chemical Company

#### Voorzorgsmaatregelen

GLENIUM 27 con.20% is niet schadelijk voor de gezondheid en milieu en vraagt geen speciale labels. Contact met ogen en verlengd contact met huid vermijden. Indien materiaal in de ogen komt, overvloedig met zuiver water spoelen en een arts raadplegen. Draag handschoenen en een veiligheidsbril. Het product buiten bereik van kinderen houden. Voor verdere inlichtingen, zie veiligheidsgegevens (MSDS).

BASF Construction Chemicals Belgium NV Industrieterrein 'Ravenshout' 3711 Nijverheidsweg 89, B-3945 Ham Tel. +32 11 34 04 34. Fax +32 11 40 13 92 basf-cc-be@basf.com - www.basf-cc.be B.T.W./T.V.A. BE 0417.791.569 RPR/RPM Hasselt





BASF Nederland B.V., Construction Chemicals Karolusstraat 2 Postbus 132, NL-4900 AC Oosterhout N.B. Tel. +31 162 47 66 60. Fax +31 162 42 96 94 basf-cc-nl@basf.com - www.basf-cc.nl B.T.W. NL 001829117B01 HR Arnhem 09022883





Deze productinformatie is gebaseerd op onze beste kennis van het product. De koper/verwerker zal, op basis van de ondergrond en projectgegevens enerzijds en de toepassings- en werkomstandigheden anderzijds, waarop BASF Construction Chemicals geen invloed heeft, op zijn verantwoordelijkheid een productgeschiktheidsproef uitvoeren, vooraleer met de uitvoering wordt gestart. Schriftelijke en mondelinge adviezen conform onze algemene leveringsvoorwaarden zijn geheel vrijblijvend. Bij herdruk komen voorgaande uitgaven te vervallen.

Deta	underekenniş	g vall ue se	gregaticeoefficient aan de nand van een Dingham model
ZVB 1	N [rps]	T [Nm]	
1	0,0593	3,0154	25
2	0,1231	4,4625	<b>T</b> [Nm] $y = 31.004x + 0.6502$
3	0,1865	6,4036	20
4	0,2506	8,0901	
5	0,3146	10,3262	15
6	0,3777	12,1261	
7	0.4407	14,1479	v = 29.058x + 0.6502
8	0.5047	16.1421	5
9	0 5681	17 8692	
10	0,6316	21 0952	
6*	0.4199	12.8515	0,00 0,10 0,20 0,30 0,40 0,50 0,60 0,70
Ū	0,1177	0 6502	
	U	0,0502	
	Rico H =	31 004	
	Rico H' =	29.058	
Segregaties	coëfficiënt –	27,050 6 3	0/
	N [mg]	U,5	70
L V D 2 1	$[1, [1, p_s]]$		
1	0,0394	1,0010	25 T [Nm]
2	0,1251	1,0850	20 +
3	0,1800	2,3937	
4	0,2307	5,2755 4 1024	v = 18.805x - 1.0155
5	0,3145	4,1924	10
6	0,3777	5,4204	
7	0,4408	6,6481	
8	0,5047	8,0968	0 y = 10,000X - 1,0155 N [rps]
9	0,5681	9,8349	0,00 0,10 0,20 0,30 0,40 0,50 0,60 0,70
10	0,6315	12,2305	-5
6*	0,4199	5,9574	
	0	-1,0155	
	D' 11	10.005	
	$R_{1CO} H =$	18,805	
a	$R_{1CO} H =$	16,606	
Segregatiec	coefficient =	11,7	%
ZVB 3	N [rps]	T [Nm]	
1	0,0594	2,1373	25
2	0,1230	2,8804	T [Nm]
3	0,1866	3,5879	20 +
4	0,2508	4,3536	15
5	0,3145	5,2051	1.5 $y = 15.506y + 0.6022$
6	0,3777	6,1394	y = 15,590x + 0,0922
7	0,4408	7,1357	
8	0,5047	8,3690	5
9	0,5682	9,7380	y = 14,195x + 0,6922 N [rns]
10	0,6315	11,2953	
6*	0,4200	6,6545	0,00 0,10 0,20 0,30 0,40 0,50 0,60 0,70
	0	0,6922	
	Rico H =	15,596	
	Rico H' =	14,195	
Segregatiec	coëfficiënt =	9,0	%

Detailberekening van de segregatiecoëfficiënt aan de hand van een Bingham model

ZVB 4	N [rps]	T [Nm]	
1	0,0594	1,1394	25
2	0,1229	1,5945	
3	0,1866	2,1123	20
4	0,2508	2,6006	
5	0,3144	3,2126	15
6	0,3776	3,8536	10
7	0.4408	4,5678	y = 10,229x + 0,2175
8	0.5047	5.2867	5
9	0.5682	6.1078	y = 0.7551 y + 0.2175 M from 1
10	0.6315	7.0616	0 = 9,7551x + 0,2175 N [rps]
6*	0.4200	4.3144	0,00 0,10 0,20 0,30 0,40 0,50 0,60 0,70
-	0	0.2175	
		-,	
	Rico H =	10.229	
	Rico H' =	9.7551	
Segregatie	coëfficiënt =	4.6	<i>%</i>
ZVB 6	N [rps]	T [Nm]	
1	0.0593	1 0835	25
2	0,0393	2 0355	$^{25}$ Tr [Nm]
3	0.1866	3 1126	20
3 4	0,1000	<i>J</i> 3//3	15
	0,2307	+,3++3 5 6804	y = 22.48x - 0.9621
5	0,3143	7 1800	10
07	0,3777	8 5082	5
/ 0	0,4408	0,3902 10.0203	y = 20,378x - 0,9621 N [rns]
0	0,5040	11,6511	
9 10	0,5082	14 2700	0,00 0,10 0,20 0,30 0,40 0,50 0,60 0,70
10 6*	0,0313	7 5047	
0.	0,4199	0.0621	
	0	-0,9021	
	Rico H -	22/18	
	Rico H' =	22,40	
Segregatie	coëfficiënt –	20,570	0%
	N [rns]	7, <del>1</del> T [Nm]	
<i>L V D 7</i>	0.0504	0.8062	
	0,0394	1 1522	25 <b>T</b> [Nm]
2	0,1250	2 2000	20
З Л	0,1000	2,2009 3 ()587	15
	0,2308	5,0562 4,0252	15 - 18264x + 1406 - 18264x
5	0,3143	4,0235	10
07	0,5777	5,1255	
/ 0	0,4409	0,2090	v = 15.698x - 1.1406 N [rps]
ð	0,5047	7,8512	
9 10	0,3082	9,2898	0,00 0,10 0,20 0,30 0,40 0,50 0,60 0,70
	0,0313	5 4525	-5
0*	0,4200	5,4525	
	0	-1,1400	
		10.064	
	$R_{\rm H} = \frac{1}{2}$	18,204	
C	$\mathbf{K}\mathbf{I}\mathbf{C}\mathbf{O}\mathbf{H}^{T} = \mathbf{I}$	13,098	07
Segregatie	= coefficient =	14,0	%

ZVB 8	N [rps]	T [Nm]	
1	0,0594	1,0741	25 т
2	0,1230	1,8076	T [Nm]
3	0,1866	2,6216	20
4	0,2508	3,4723	15
5	0,3146	4,2443	y = 15,378x - 0,2473
6	0,3777	5,2108	
7	0,4409	6,2649	5
8	0,5047	7,4154	y = 14,47x - 0,2473 N [rps]
9	0,5683	8,4643	0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70
10	0,6315	10,1216	5 1
6*	0,4200	5,8303	
	0	-0,2473	
	Rico H =	15,378	
	Rico H' $=$	14,47	
Segregatied	coëfficiënt =	5,9	$_{\%}$
ZVB 9	N [rps]	T [Nm]	
ZVB 9 1	<b>N [rps]</b> 0,0594	<b>T [Nm]</b> 1,0037	25 т
ZVB 9 1 2	<b>N [rps]</b> 0,0594 0,1230	<b>T [Nm]</b> 1,0037 1,7922	<sup>25</sup> <b>T</b> [ <b>Nm</b> ]
ZVB 9 1 2 3	<b>N [rps]</b> 0,0594 0,1230 0,1866	<b>T</b> [ <b>Nm</b> ] 1,0037 1,7922 2,6603	$\begin{array}{c} 25 \\ 20 \end{array} \begin{bmatrix} \mathbf{T} \left[ \mathbf{Nm} \right] \\ - \end{array}$
ZVB 9 1 2 3 4	<b>N [rps]</b> 0,0594 0,1230 0,1866 0,2509	<b>T</b> [ <b>Nm</b> ] 1,0037 1,7922 2,6603 3,6443	25 20 15
ZVB 9 1 2 3 4 5	N [rps] 0,0594 0,1230 0,1866 0,2509 0,3145	<b>T</b> [Nm] 1,0037 1,7922 2,6603 3,6443 4,7170	$ \begin{array}{c} 25 \\ 20 \\ 15 \\ 10 \\ \end{array} \qquad y = 17,926x - 0,6127 \\ \end{array} $
ZVB 9 1 2 3 4 5 6	N [rps] 0,0594 0,1230 0,1866 0,2509 0,3145 0,3778	<b>T</b> [ <b>Nm</b> ] 1,0037 1,7922 2,6603 3,6443 4,7170 5,7694	25 <b>T [Nm]</b> 15 $y = 17,926x - 0,6127$
ZVB 9 1 2 3 4 5 6 7	N [rps] 0,0594 0,1230 0,1866 0,2509 0,3145 0,3778 0,4409	<b>T</b> [ <b>Nm</b> ] 1,0037 1,7922 2,6603 3,6443 4,7170 5,7694 6,9070	$ \begin{array}{c} 25 \\ 20 \\ 15 \\ 15 \\ 10 \\ 5 \\ 16 \\ 16 \\ 17 \\ 10 \\ 16 \\ 16 \\ 16 \\ 16 \\ 16 \\ 16 \\ 16 \\ 16$
ZVB 9 1 2 3 4 5 6 7 8	N [rps] 0,0594 0,1230 0,1866 0,2509 0,3145 0,3778 0,4409 0,5046	<b>T</b> [Nm] 1,0037 1,7922 2,6603 3,6443 4,7170 5,7694 6,9070 8,2274	25 20 15 10 5 y = 17,926x - 0,6127 y = 15,751x - 0,6127 N [rps]
ZVB 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9	N [rps] 0,0594 0,1230 0,1866 0,2509 0,3145 0,3778 0,4409 0,5046 0,5683	<b>T</b> [ <b>Nm</b> ] 1,0037 1,7922 2,6603 3,6443 4,7170 5,7694 6,9070 8,2274 9,6111	25 20 T [Nm] 15 10 5 0 0,00 0,10 0,20 0,30 0,40 0,50 0,60 0,70
ZVB 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	N [rps] 0,0594 0,1230 0,1866 0,2509 0,3145 0,3778 0,4409 0,5046 0,5683 0,6316	<b>T</b> [ <b>Nm</b> ] 1,0037 1,7922 2,6603 3,6443 4,7170 5,7694 6,9070 8,2274 9,6111 11,5199	25 20 15 10 5 0 0,00 0,10 0,20 0,30 0,40 0,50 0,60 0,70 10 10 15 10 10 15 10 10 15 15 10 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15
ZVB 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 6*	N [rps] 0,0594 0,1230 0,1866 0,2509 0,3145 0,3778 0,4409 0,5046 0,5683 0,6316 0,4200	<b>T</b> [ <b>Nm</b> ] 1,0037 1,7922 2,6603 3,6443 4,7170 5,7694 6,9070 8,2274 9,6111 11,5199 6,0032	25 20 15 10 5 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
ZVB 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 6*	N [rps] 0,0594 0,1230 0,1866 0,2509 0,3145 0,3778 0,4409 0,5046 0,5683 0,6316 0,4200 0	<b>T</b> [ <b>Nm</b> ] 1,0037 1,7922 2,6603 3,6443 4,7170 5,7694 6,9070 8,2274 9,6111 11,5199 6,0032 -0,6127	25 20 T [Nm] 15 10 5 0 0,00 0,10 0,20 0,30 0,40 0,50 0,60 0,70
ZVB 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 6*	N [rps] 0,0594 0,1230 0,1866 0,2509 0,3145 0,3778 0,4409 0,5046 0,5683 0,6316 0,4200 0	<b>T</b> [ <b>Nm</b> ] 1,0037 1,7922 2,6603 3,6443 4,7170 5,7694 6,9070 8,2274 9,6111 11,5199 6,0032 -0,6127	$\begin{array}{c} 25 \\ 20 \\ 15 \\ 10 \\ 5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ $
ZVB 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 6*	$\begin{array}{l} \mathbf{N} \ [\mathbf{rps}] \\ 0,0594 \\ 0,1230 \\ 0,1866 \\ 0,2509 \\ 0,3145 \\ 0,3778 \\ 0,4409 \\ 0,5046 \\ 0,5046 \\ 0,5683 \\ 0,6316 \\ 0,4200 \\ 0 \\ \end{array}$	<b>T</b> [Nm] 1,0037 1,7922 2,6603 3,6443 4,7170 5,7694 6,9070 8,2274 9,6111 11,5199 6,0032 -0,6127 17,926	$\begin{array}{c} 25 \\ 20 \\ 15 \\ 10 \\ 5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ $
ZVB 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 6*	$\begin{array}{l} \mathbf{N} \ [\mathbf{rps}] \\ 0,0594 \\ 0,1230 \\ 0,1866 \\ 0,2509 \\ 0,3145 \\ 0,3778 \\ 0,4409 \\ 0,5046 \\ 0,5683 \\ 0,6316 \\ \hline 0,4200 \\ 0 \\ \hline \end{array}$ $\begin{array}{l} \mathbf{Rico} \ \mathbf{H} \ = \\ \mathbf{Rico} \ \mathbf{H} \ = \\ \mathbf{Rico} \ \mathbf{H} \ = \\ \end{array}$	<b>T</b> [Nm] 1,0037 1,7922 2,6603 3,6443 4,7170 5,7694 6,9070 8,2274 9,6111 11,5199 6,0032 -0,6127 17,926 15,751	$\begin{array}{c} 25 \\ 20 \\ 15 \\ 10 \\ 5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ $

# <u>Meetresultaten ZVB $10 \rightarrow 14$ </u>

## Slump flow

	0'	20'	40'	60'	80'	100'	Hulpstof
<b>ZVB 10</b>	610,0	620,0	530,0	520,0	460,0	420,0	SP1
<b>ZVB 11</b>	600,0	650,0	660,0	660,0	640,0	640,0	SP2
<b>ZVB 12</b>	690,0	640,0	560,0	500,0	480,0	430,0	SP1
<b>ZVB 13</b>	620,0	690,0	710,0	700,0	670,0	670,0	SP2
<b>ZVB 14</b>	660,0	660,0	660,0	660,0	630,0	610,0	SP2

# V-funnel

	0'	20'	40'	60'	80'	100'	Hulpstof
<b>ZVB 10</b>	14,40	10,53	18,02	13,72	15,62	21,22	SP1
<b>ZVB 11</b>	11,16	8,39	13,46	11,76	14,28	14,05	SP2
<b>ZVB 12</b>	24,06	25,46	30,76	33,42	31,33	-	SP1
<b>ZVB 13</b>	12,60	12,62	11,36	13,89	13,29	13,76	SP2
<b>ZVB 14</b>	15,87	17,55	18,07	18,82	23,01	23,68	SP2

Luchtgehalte - Volumemassa - Sieve segregation test

	Luchtgehalte [%]	Volumemassa [kg/m <sup>3</sup> ]	Sieve segregation test [%] / [-]	Hulpstof
<b>ZVB 10</b>	2,5	2381	6,44 / SR2	SP1
<b>ZVB 11</b>	2,5	2369	3,33 / SR2	SP2
<b>ZVB 12</b>	2,0	2381	2,70 / SR2	SP1
<b>ZVB 13</b>	2,4	2363	3,48 / SR2	SP2
<b>ZVB 14</b>	2,4	2375	3,80 / SR2	SP2

Opmerking: deze waarden zijn opgemeten na 0 minuten

#### Druksterkte

ZVB 10	Cilinders [N/mm <sup>2</sup> ]						Kubussen [N/mm <sup>2</sup> ]				
	#1	#2	#3	Gem.	SD	#1	#2	#3	Gem.	SD	
0'	50,9	51,2	51,1	51,1	0,1	59,7	59,7	60,7	60,0	0,6	
20'	54,4	52,9	53,3	53,5	0,8	60,4	60,1	60,5	60,4	0,2	
40'	54,0	53,5	52,4	53,3	0,8	59,6	61,3	60,1	60,3	0,8	
60'	55,5	56,0	51,7	54,4	2,3	59,3	58,1	59,5	59,0	0,8	
80'	51,9	53,2	55,2	53,4	1,6	58,9	58,6	59,1	58,9	0,3	
100'	53,7	53,0	51,0	52,6	1,4	57,9	60,2	56,1	58,1	2,0	

ZVB 11		Cili	nders [N	/mm <sup>2</sup> ]	Kubussen [N/mm <sup>2</sup> ]					
	#1	#2	#3	Gem.	SD	#1	#2	#3	Gem.	SD
0'	50,7	51,4	50,7	51,0	0,4	62,1	62,1	60,5	61,5	0,9
20'	54,7	54,9	54,6	54,7	0,1	62,3	63,8	63,8	63,3	0,9
40'	53,4	54,7	57,1	55,1	1,9	62,2	61,3	63,5	62,3	1,1
60'	54,3	52,4	53,4	53,4	1,0	65,7	63,4	65,0	64,7	1,1
80'	53,4	55,8	54,5	54,6	1,2	63,8	62,7	63,2	63,3	0,5
100'	51,0	52,5	53,3	52,3	1,2	64,3	65,5	65,7	65,1	0,7

<b>ZVB 12</b>		Cili	nders [N	/mm <sup>2</sup> ]	Kubussen [N/mm <sup>2</sup> ]					
	#1	#2	#3	Gem.	SD	#1	#2	#3	Gem.	SD
0'	52,2	52,8	53,2	52,7	0,5	66,6	61,7	61,6	63,3	2,9
20'	56,0	55,8	56,7	56,2	0,5	61,8	64,1	57,5	61,1	3,4
40'	57,0	55,3	56,7	56,3	0,9	60,4	59,8	60,2	60,1	0,3
60'	56,6	55,8	54,7	55,7	0,9	59,9	61,2	61,2	60,8	0,7
80'	54,3	54,9	56,9	55,4	1,3	61,0	59,3	62,4	60,9	1,5
100'	51,3	52,0	54,1	52,5	1,4	59,0	58,5	58,2	58,6	0,4

ZVB 13	Cilinders [N/mm <sup>2</sup> ]						Kubussen [N/mm <sup>2</sup> ]					
	#1	#2	#3	Gem.	SD	#1	#2	#3	Gem.	SD		
0'	48,0	47,7		47,9	0,3	52,7	51,8	50,5	51,7	1,1		
20'	51,7	52,3	51,1	51,7	0,5	55,3	52,0	55,0	54,1	1,8		
40'	53,3	52,5	52,1	52,7	0,5	56,9	55,3	51,2	54,5	2,9		
60'	52,1	52,6	52,1	52,3	0,3	55,6	57,3	54,8	55,9	1,3		
80'	52,0	51,8	52,4	52,1	0,1	55,1	55,1	56,6	55,6	0,9		
100'	48,7	50,3	49,9	49,6	1,1	57,5	57,7	57,5	57,6	0,1		

<b>ZVB 14</b>	Cilinders [N/mm <sup>2</sup> ]						Kubussen [N/mm <sup>2</sup> ]					
	#1	#2	#3	Gem.	SD	#1	#2	#3	Gem.	SD		
0'	50,5	50,7	50,0	50,4	0,4	60,7	58,3	58,2	59,0	1,4		
20'	54,7	54,2	55,4	54,7	0,6	60,4	60,8	60,0	60,4	0,4		
40'	54,6	55,6	55,0	55,1	0,5	62,8	59,8	64,7	62,4	2,5		
60'	53,1	55,7	56,6	55,1	1,8	61,7	63,3	62,5	62,5	0,8		
80'	54,1	55,0	55,0	54,7	0,6	63,0	63,2	64,2	63,5	0,6		
100'	54,0	53,6	53,6	53,8	0,2	64,1	63,1	64,0	63,7	0,6		
Detail	van	de r	esultate	en ir	ı verb	and	met	de	elast	icite	itsmo	odulus
--------	-----	------	----------	-------	--------	-----	-----	----	-------	-------	-------	--------

Proefstuk	Lus/rekstrook	Δ <b>ε</b> <sub>m</sub> [-]	Gem. $\Delta \varepsilon_{m}[-]$	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	175,72				
	1/2	546,84	445,55	1,21	18,18	38075
<b>ZVB-10</b>	1/3	614,09				
	2/1	191,12				
2 V B - 10	2/2	500,69	421,39	1,19	18,18	40297
00-1	2/3	572,35				
	3/1	204,70				
	3/2	491,56	421,21	1,19	18,17	40313
	3/3	567,37				
				E-modul	us [Mpa]	40305

Proefstuk	Lus/rekstrook	Δε <sub>m</sub> [-]	Gem. $\Delta \varepsilon_m$ [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	489,97				
	1/2	546,02	459,47	1,27	18,17	36783
	1/3	342,40				
ZVB-10	2/1	454,23		1,19	18,17	38761
	2/2	513,00	438,04			
00-2	2/3	346,89				
	3/1	449,70				38783
	3/2	508,49	437,79	1,19	18,17	
	3/3	355,17				
				E-modul	us [Mpa]	38772

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{\rm m}[-]$	<b>Gem.</b> Δε <sub>m</sub> [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	347,43			18,17	
	1/2	499,83	457,50	1,19		37122
<b>ZVB</b> -10	1/3	525,23				
	2/1	324,26		1,19	18,17	39714
2VD-10	2/2	471,50	427,53			
00-3	2/3	486,82				
	3/1	323,76				39641
	3/2	476,23	428,29	1,19	18,17	
	3/3	484,89				
				E-modul	us [Mpa]	39678

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{\rm m}[-]$	Gem. $\Delta \varepsilon_{m}[-]$	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	511,65				35726
	1/2	453,02	444,57	1,17	17,05	
	1/3	369,06				
ZVB-10	2/1	491,39	426,51	1,20	17,05	37159
	2/2	422,44				
100-1	2/3	365,70				
	3/1	480,76				37141
	3/2	426,55	426,75	1,20	17,05	
	3/3	372,95				
				E-modul	us [Mpa]	37150

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{m}[-]$	Gem. $\Delta \varepsilon_{\rm m}[-]$	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	508,87				
	1/2	553,06	474,68	1,22	18,18	35725
	1/3	362,11				
ZVB-10	2/1	472,35				
$2 \vee B - 10$	2/2	522,00	453,89	1,20	18,18	37408
100-2	2/3	367,32				
	3/1	464,22				37389
	3/2	520,91	454,07	1,20	18,18	
	3/3	377,08				
				E-modul	us [Mpa]	37399

Proefstuk	Lus/rekstrook	Δε <sub>m</sub> [-]	<b>Gem.</b> Δε <sub>m</sub> [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	746,16				
	1/2	222,00	475,29	1,17	18,18	35783
ZVB-10	1/3	457,70				
	2/1	676,22				
2 V D-10	2/2	228,06	443,01	1,20	18,18	38331
100-3	2/3	424,75				
	3/1	666,26				38278
	3/2	237,41	443,58	1,20	18,18	
	3/3	427,07				
				E-modul	us [Mpa]	38304

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{\rm m}[-]$	<b>Gem.</b> Δε <sub>m</sub> [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	438,87		1,23		
	1/2	476,80	438,23		17,03	36041
ZVB-11	1/3	399,02				
	2/1	379,17		1,18	17,03	38079
$2 \vee D - 11$	2/2	486,21	416,23			
00-1	2/3	383,31				
	3/1	380,21			17,03	38011
	3/2	484,85	416,96	1,18		
	3/3	385,82				
				E-modul	us [Mpa]	38045

Proefstuk	Lus/rekstrook	Δε <sub>m</sub> [-]	Gem. Δε <sub>m</sub> [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	192,61			17,03	
ZVB-11	1/2	582,14	436,46	1,20		36269
	1/3	534,61				
	2/1	173,14		1,18	17,03	39330
	2/2	557,70	402,99			
00-2	2/3	478,13				
	3/1	171,97				39234
	3/2	564,01	403,98	1,18	17,03	
	3/3	475,96				
				E-modul	us [Mpa]	39282

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{m}[-]$	Gem. $\Delta \varepsilon_{\rm m}$ [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	313,14				36681
7VB-11	1/2	373,68	432,77	1,16	17,03	
	1/3	611,47				
	2/1	308,82				
$2 \sqrt{D-11}$	2/2	360,83	402,87	1,18	17,03	39342
00-3	2/3	538,97				
	3/1	315,05				39290
	3/2	362,40	403,42	1,18	17,03	
	3/3	532,81				
				E-modul	us [Mpa]	39316

Proefstuk	Lus/rekstrook	Δε <sub>m</sub> [-]	Gem. $\Delta \varepsilon_m$ [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	372,73				
	1/2	477,29	425,74	1,24	17,03	37078
ZVB-11	1/3	427,21				
	2/1	352,22		1,18	17,03	39125
2 V D-11	2/2	462,26	405,04			
100-1	2/3	400,65				
	3/1	354,88				39044
	3/2	468,67	405,92	1,18	17,03	
	3/3	394,20				
				E-modul	us [Mpa]	39085

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{\rm m}[-]$	<b>Gem.</b> Δε <sub>m</sub> [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	549,43				
	1/2	195,87	413,35	1,22	17,03	38244
ZVB-11	1/3	494,77				
	2/1	538,25	393,41	1,18	17,03	40279
$2 \vee D - 11$	2/2	179,99				
100-2	2/3	462,00				
	3/1	544,11				40223
	3/2	179,65	394,03	1,18	17,03	
	3/3	458,32				
				E-modul	us [Mpa]	40251

Proefstuk	Lus/rekstrook	Δε <sub>m</sub> [-]	<b>Gem.</b> Δε <sub>m</sub> [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	309,37		1,29		35747
ZVB-11	1/2	542,22	440,13		17,03	
	1/3	468,81				
	2/1	296,99	419,87	1,18	17,03	37749
	2/2	524,44				
100-3	2/3	438,17				
	3/1	293,35				
	3/2	525,58	420,07	1,18	17,03	37729
	3/3	441,28				
				E-modul	us [Mpa]	37739

Proefstuk	Lus/rekstrook	Δε <sub>m</sub> [-]	Gem. $\Delta \varepsilon_{m}[-]$	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	561,96		1,20		40598
	1/2	261,72	389,48		17,01	
	1/3	344,75				
ZVB-12	2/1	512,23	363,82	1,16	17,01	43573
	2/2	259,10				
00-1	2/3	320,14				
	3/1	506,77				43538
	3/2	262,77	364,10	1,16	17,01	
	3/3	322,77				
				E-modul	us [Mpa]	43555

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{\rm m}[-]$	Gem. $\Delta \varepsilon_m$ [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	438,01		1,21	17,02	39086
	1/2	206,51	404,42			
ZVB-12	1/3	568,74				
	2/1	407,66	374,90	1,16	17,02	42288
	2/2	206,10				
00-2	2/3	510,95				
	3/1	408,64				42322
	3/2	212,87	374,56	1,17	17,02	
	3/3	502,17				
				E-modul	us [Mpa]	42305

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{m}[-]$	Gem. $\Delta \varepsilon_m$ [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	337,58				39964
	1/2	553,60	395,46	1,21	17,02	
	1/3	295,21				
ZVB-12	2/1	329,53	368,82	1,17	17,02	42969
	2/2	483,97				
00-3	2/3	292,97				
	3/1	329,89				
	3/2	478,45	369,16	1,17	17,02	42933
	3/3	299,13				
			E-modul	us [Mpa]	42951	

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{\rm m}[-]$	Gem. $\Delta \varepsilon_{\rm m}$ [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	338,80		1,25	17,02	37086
	1/2	541,06	425,16			
	1/3	395,63				
ZVB-12	2/1	330,08	405,15	1,17	17,02	39131
	2/2	513,81				
100-1	2/3	371,57				
	3/1	332,52				39072
	3/2	513,95	405,74	1,17	17,02	
	3/3	370,75				
				E-modul	us [Mpa]	39102

Proefstuk	Lus/rekstrook	Δε <sub>m</sub> [-]	Gem. $\Delta \varepsilon_{m}[-]$	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	374,99		1,29		39273
	1/2	547,94	400,45		17,02	
	1/3	278,41				
ZVB-12	2/1	335,55	376,97	1,17	17,02	42057
	2/2	508,18				
100-2	2/3	287,20				
	3/1	336,43				42038
	3/2	501,00	377,10	1,17	17,02	
	3/3	293,86				
				E-modul	us [Mpa]	42048

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{m}[-]$	Gem. $\Delta \varepsilon_m$ [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	503,83			17,02	36886
	1/2	565,71	428,21	1,22		
ZVB-12	1/3	215,07				
	2/1	452,02	391,90	1,17	17,02	40439
	2/2	507,40				
100-3	2/3	216,26				
	3/1	449,83				40478
	3/2	500,01	391,51	1,17	17,02	
	3/3	224,71				
-				E-modul	us [Mpa]	40459

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{\rm m}[-]$	Gem. $\Delta \varepsilon_{\rm m}[-]$	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	339,50				35063
ZVB-13	1/2	310,64	452,62	1,19	17,06	
	1/3	707,73				
	2/1	299,69	413,37	1,19	17,06	38401
	2/2	292,54				
00-1	2/3	647,89				
	3/1	302,19				
	3/2	292,99	412,93	1,19	17,06	38437
	3/3	643,62				
		E-modul	us [Mpa]	38419		

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{\rm m}[-]$	Gem. $\Delta \varepsilon_{m}[-]$	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	114,13		1,18	17,03	37389
	1/2	658,40	423,95			
	1/3	499,32				
ZVB-13	2/1	120,21	394,22	1,16	17,03	40266
	2/2	608,59				
00-2	2/3	453,86				
	3/1	124,25				
	3/2	608,99	395,64	1,16	17,03	40119
	3/3	453,69				
			E-modul	us [Mpa]	40193	

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{m}[-]$	Gem. $\Delta \varepsilon_{\rm m}$ [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	-		1,21	-	-
	1/2	-	-			
	1/3	-				
ZVB-13	2/1	-				
00'-3	2/2	-	-	-	-	-
FOUT	2/3	-				
	3/1	-				-
	3/2	-	-	-	-	
	3/3	_				
				E-modul	us [Mpa]	-

Proefstuk	Lus/rekstrook	Δ <b>ε</b> <sub>m</sub> [-]	Gem. $\Delta \varepsilon_m$ [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	533,30			17,15	36729
	1/2	586,01	434,64	1,18		
	1/3	184,61				
ZVB-13	2/1	489,91	402,47	1,27	17,14	39434
	2/2	529,88				
100-1	2/3	187,62				
	3/1	484,65				
	3/2	527,64	402,18	1,27	17,15	39467
	3/3	194,24				
			E-modul	us [Mpa]	39450	

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \epsilon_{\rm m}[-]$	Gem. Δε <sub>m</sub> [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	382,67		1,25	17,09	36397
ZVB-13	1/2	424,93	435,21			
	1/3	498,04				
	2/1	340,60	416,06	1,22	17,09	38148
	2/2	421,40				
100-2	2/3	486,17				
	3/1	341,48				38078
	3/2	422,15	416,86	1,22	17,09	
	3/3	486,96				
			E-modul	us [Mpa]	38113	

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{m}[-]$	<b>Gem.</b> Δε <sub>m</sub> [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	342,60		1,25	17,08	35282
	1/2	532,92	448,66			
	1/3	470,47				
ZVB-13	2/1	322,86	421,24	1,21	17,08	37677
	2/2	496,13				
100-3	2/3	444,72				
	3/1	329,31	421,11	1,21	17,08	37690
	3/2	489,02				
	3/3	444,98				
				E-modul	us [Mpa]	37684

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{m}[-]$	Gem. $\Delta \varepsilon_{m}[-]$	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	342,42	419,35	1,24	17,09	37791
	1/2	464,62				
	1/3	451,00				
7UD 14	2/1	330,96	403,14	1,25	17,09	39300
$2 \vee D - 14$	2/2	438,31				
00-1	2/3	440,14				
	3/1	333,13	403,89	1,25	17,09	39230
	3/2	440,15				
	3/3	438,39				
				E-modul	us [Mpa]	39265

Proefstuk	Lus/rekstrook	Δ <b>ε</b> <sub>m</sub> [-]	<b>Gem.</b> Δε <sub>m</sub> [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	495,65		1,24	17,03	36650
	1/2	346,84	430,77			
ZVB-14	1/3	449,81				
	2/1	462,21				
	2/2	343,66	418,63	1,18	17,03	37867
00-2	2/3	450,03				
	3/1	457,43	418,98	1,18	17,03	37835
	3/2	351,18				
	3/3	448,34				
				E-modul	us [Mpa]	37851

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{m}[-]$	Gem. $\Delta \varepsilon_{\rm m}$ [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	360,60		1,19	17,03	37094
	1/2	435,23	426,97			
700D 14	1/3	485,08				
	2/1	364,72	412,13	1,16	17,02	38498
$2 \vee D - 14$	2/2	416,37				
00-5	2/3	455,30				
	3/1	372,05	413,11	1,16	17,02	38406
	3/2	413,85				
	3/3	453,43				
				E-modul	us [Mpa]	38452

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{m}[-]$	<b>Gem.</b> Δε <sub>m</sub> [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	497,76		1,13	17,08	38803
	1/2	281,62	410,99			
	1/3	453,59				
ZVB-14	2/1	466,66	392,76	1,21	17,08	40409
	2/2	282,74				
100-1	2/3	428,88				
	3/1	465,65	393,13	1,21	17,08	40359
	3/2	291,79				
	3/3	421,93				
				E-modul	us [Mpa]	40384

Proefstuk	Lus/rekstrook	$\Delta \varepsilon_{m}[-]$	Gem. $\Delta \varepsilon_{\rm m}[-]$	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	447,11		1,19	17,19	39027
	1/2	394,79	409,96			
	1/3	387,98				
ZVB-14	2/1	423,39	387,91	1,32	17,19	40915
	2/2	374,49				
100-2	2/3	365,85				
	3/1	429,14	388,92	1,32	17,19	40798
	3/2	373,45				
	3/3	364,15				
				E-modul	us [Mpa]	40856

Proefstuk	Lus/rekstrook	Δε <sub>m</sub> [-]	Gem. $\Delta \varepsilon_m$ [-]	$\sigma_{c,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{c,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>cm</sub> [MPa]
	1/1	494,23		1,24	17,03	39045
	1/2	335,83	404,37			
	1/3	383,04				
ZVB-14	2/1	473,90	387,82	1,19	17,03	40860
	2/2	325,88				
100-3	2/3	363,66				
	3/1	475,70	388,74	1,19	17,03	40763
	3/2	327,85				
	3/3	362,66				
				E-modul	us [Mpa]	40812