

Invloed van de mengprocedure op de eigenschappen van ultrahogesterktebeton

Egon Braem

Promotoren: prof. dr. ir. Geert De Schutter, dr. ir. Veerle Boel

Begeleider: Jeroen Dils

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 2010-2011



Invloed van de mengprocedure op de eigenschappen van ultrahogesterktebeton

Egon Braem

Promotoren: prof. dr. ir. Geert De Schutter, dr. ir. Veerle Boel

Begeleider: Jeroen Dils

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 2010-2011



Voorwoord

Het blijft merkwaardig dat, wanneer een student in het voorlaatste jaar een oneindig lange lijst met mogelijke thesisonderwerpen voorgeschoteld krijgt, elke student er al snel zijn eigen favoriete onderwerp weet uit te kiezen. Toen ik verleden jaar voor deze keuze kwam te staan, sprong één scriptie mij meteen in het oog: “Invloed van de mengprocedure op de eigenschappen van ultrahoogsterktebeton”. Niet de titel, maar vooral de omschrijving wakkerde mijn nieuwsgierigheid aan. In labo Magnel stond namelijk de eerste grote vacuüm mixer in Europa. Met deze mixer was het mogelijk een ultrahoogsterktebeton te ontwikkelen. In de eerste plaats wil ik dan ook graag professor De Schutter en professor Boel danken om mij de kans te bieden dit onderzoek te verrichten.

Ik zou ook graag mijn begeleider ir. Jeroen Dils oprecht willen bedanken voor de vele tijd die hij in mijn begeleiding heeft gestopt in de loop van het academiejaar. Steeds was hij bereid een antwoord te geven op mijn vragen en stond hij klaar om allerhande problemen op te lossen. Ook voor het uitvoeren van de wegingen wanneer ik door omstandigheden er niet kon geraken, zou ik hem ten zeerste willen bedanken.

Mijn dank gaat eveneens uit naar de gehele technische staf van het Laboratorium Magnel. Ik kan er niet iemand in het bijzonder uitpikken, want ik kon bij allemaal, ten allen tijde, terecht voor hulp of raad.

Tevens wil ik ook mijn vriendin Josephine en mijn vrienden van harte bedanken. Gedurende mijn studies in Gent stonden ze steeds klaar om mij een verse portie moed, verstrooiing of amusement te verschaffen. Bedankt!

Tot slot ben ik vooral mijn ouders erg veel dank verschuldigd. Zonder hun steun bij het studeren en hun financiële investering waarmee ze mij de kans gaven deze studies te volgen, was dit werk niet tot stand gekomen. Hoewel ik de laatste jaren het overgrote deel van mijn tijd heb doorgebracht in Gent, was thuiskomen voor mij altijd een verademing... Dankjewel...

INVLOED VAN DE MENGPROCEDURE OP DE EIGENSCHAPPEN VAN ULTRAHOOGSTERKTEBETON

door

Egon Braem

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

Academiejaar 2010-2011

Promotoren: prof. dr. ir. Geert De Schutter

prof. dr. ir. Veerle Boel

Faculteit Ingenieurswetenschappen

Universiteit Gent

Vakgroep Bouwkundige Constructies

Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Samenvatting

Bij ultrahoogsterktebeton kunnen alle verschillende componenten nauwkeurig worden gedoseerd, behalve de lucht in het mengsel. Een vacuüm menger biedt de mogelijkheid om de lucht die tijdens de mengprocedure in het mengsel ingebracht wordt, te beperken. Het lagere luchtgehalte zal een invloed hebben op de mechanische eigenschappen in verharde toestand, maar ook op de verwerkbaarheid in vloeibare toestand.

In dit onderzoek is het beton vervaardigd onder drie verschillende drukken: vacuüm (100mbar), semivacuüm (500mbar) en atmosferische druk (1013mbar). De mengeling is gemaakt met een intensieve Eirich mixer met een capaciteit van 3,5 en 75 liter met dezelfde centrifugaal snelheid.

Daarnaast wordt ook de invloed van de mengtijd en de mengsnelheid op de druksterkte en de verwerkbaarheid onderzocht. De druksterkte wordt bepaald op kubussen met een zijde van 100mm. De verwerkbaarheid wordt bepaald door middel van een mini slump flow en een mini V-funnel.

Trefwoorden: Ultrahoogsterktebeton, mengprocedure, druksterkte, verwerkbaarheid, luchtgehalte

Influence of the mixing procedure of UHPC

Egon Braem

Supervisor(s): Prof. G. De Schutter, Prof. V. Boel, Ir. J. Dils

Abstract - This paper describes the results of a research on the influence of the mixing procedure of UHPC. The first part of the research concerns the influence of mixing time and mixing speed on workability and compressive strength of UHPC, while the second part concerns the influence of vacuum mixing.

Keywords - UHPC, workability, compressive strength, vacuum mixing, mixing time and mixing speed

I. INTRODUCTION

The paper starts from an existing composition of UHPC without the use of fibers and heat treatment (Table 1). By varying the mixing speed, mixing time and ambient pressure the largest compressive strength and workability are searched for.

According to Zain [1] the indication of flowability was more pronounced in terms of V-funnel flow than slump flow. This result suggests that the traditional slump test is not efficient to evaluate the workability and flowability of high performance concrete.

However, in recent studies, the slump flow is also frequently calculated as a measure of workability. They were therefore both measured in this thesis.

In order to obtain a good dispersion of the water and the superplasticizer, an intensive Eirich mixer, type R, is used.

Table 1 Existing composition of UHPC [2]

	by [X] l		amounts by
	kg	liter	weight
			[-]
HSR Cement	3,100	1,000	1
Silica fume	0,775	0,352	0,25
Sand M31 (125-500µm)	3,410	1,287	1,1
Superplasticizer	0,142	0,129	0,016
Water	0,581	0,581	0,15
Total	8,008	3,349	

II. EXPERIMENTAL DESIGN

A. Influence of mixing time and mixing speed

The mixing time is varied from 5 till 20 minutes and the circumferential speed of the mixing tool from 1,64 m/s to 4,91 m/s. The concrete its compressive strength is determined in 7 days (for 2 cubes) and in 28 days (for 3 cubes). All cubes have

sides of 100 mm. The workability is examined three times per mixing time and mixing speed with a mini slump flow and mini V-funnel.

B. Influence of vacuum mixing

Classical models predict these properties based on the water-to-cement ratio do not consider the effect of vacuum mixing, which is quite new. This will be even more important in the case for UHPC because of the extremely low water-to-cement ratio and the larger influence of changes in air content, as can be deduced from the law of Feret. In this research three different pressures are applied: vacuum (100mbar), semi-vacuum (500 mbar) and atmospheric pressure (1013 mbar). The mixing is performed with an intensive Eirich mixer with a capacity of 3,5 liter and 75 liter. The same circumferential speed of the mixing tool is applied in both mixers. For each mixture an air void analysis and air content measurement is performed. For the concrete compressive strength a comparison between the effect of vacuum mixing and heat treatment (90°C) is determined on cubes with side 100mm.



Figure 1 Intensive Eirich mixer type R (3,5 liter)

III. RESULTS

A. Influence of mixing time and mixing speed

At the lowest mixing speed (250 rpm) could be observed that, for both mixtures, the compressive strength increases by approximately 5% as the mixing time increases by 5 minutes. At the higher mixing speeds (500 and 750 rpm), this phenomenon disappears and the compressive strength remains roughly constant, with or without a small maximum at 15 minutes. If looking at the effect on the workability, there can be determined that the V-funnel flow (in seconds) decreases as the mixing time increases.

There couldn't be derived a clear linkage for the slump flow, except that the best slump flow generally corresponds to a mixing time of 15 minutes.

B. Influence of vacuum mixing

When air is extracted during the mixing, it will reduce the air content in the concrete. Figure 2 clearly shows the difference in air content between the different cubes. A cube fabricated vacuum will have a much greater density and therefore a greater volume weight.

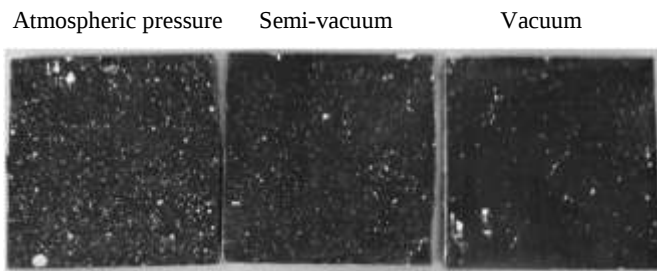


Figure 2 Section of the cubes

The higher density will also greatly increase the compressive strength (Figure 3).

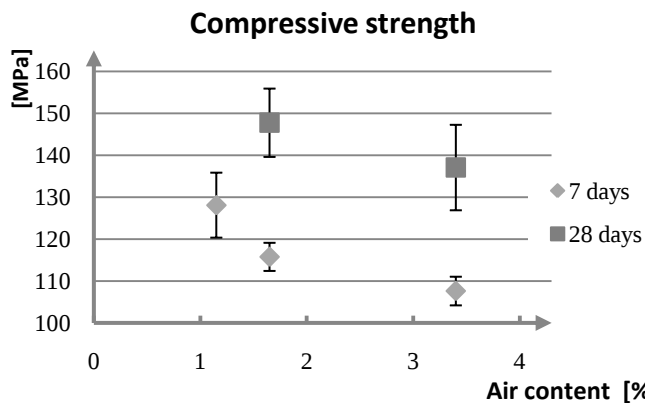


Figure 3 Compressive strength as a function of air content

The measurements show the same link as Feret's law, since the compressive strengths greater increase as the air content in concrete decreases. By developing concrete in a vacuum environment a compressive strength of 20 % higher than at atmospheric pressure can be achieved. When looking at the workability, there could be observed that the workability decreased as the ambient pressure dropped. By manufacturing concrete in a vacuum environment, the outflow time is about 4 times larger.

The cubes are then subjected to a heat treatment. They keep the same workability, because the heat treatment starts when the concrete has already hardened. Therefore only the results of the compressive strength and the air void analysis can be considered. The compressive strengths are about 40 MPa higher than without a heat treatment and the concrete is already at its full strength after 7 days. There is no noticeable

difference between concrete with or without a heat treatment concerning the air void analysis. The higher compressive strength does not derive from a lower air content, but from the fact that the microstructure of the concrete has changed.

Finally, it can be noted that the mixing amount does not give remarkable differences in compressive strength and workability.

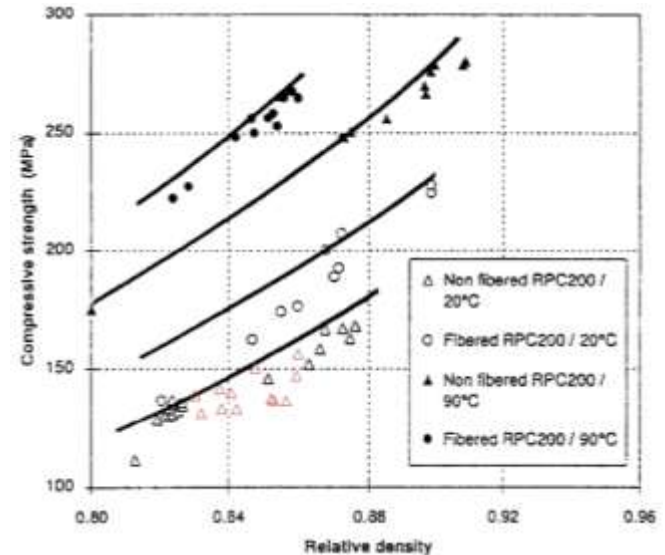


Figure 4 Compressive strength as a function of relative density [2]

IV. CONCLUSIONS

By applying a vacuum treatment the density of the concrete increases, that is why a vacuum treatment can increase pressure strength by 20 % (Figure 4).

Finally there should be noted that in this thesis, mixing times between 5 and 20 minutes are used, whereas in more recent studies a mixing time of 2 minutes is used. It can be concluded that concrete, 2 minutes after mixing, reaches a first maximum slump flow [3]. When a mixing time of 15 minutes is used, a higher slump flow is measured, but the difference is minimal. There is also a higher compressive strength measured ($\pm 10\%$). Since the differences in compressive strength and workability are limited, a mixing time of 2 minutes will be provided for economic reasons.

REFERENCES

- [1] Zain M.F.M., Saifuddin M., Yusof K.M. (1999), *A study on the properties of freshly mixed high performance concrete*, Cement and Concrete Research, Vol.29, 1427-1432
- [2] Richard P., Cheyrezy M. (1995), *Composition of reactive powder concretes*, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.7, p 1501-1511
- [3] Mazanec O., Schießl P., Lowke D. (2007), *SCC and UHPC - Effect of mixing technology on fresh concrete properties*, Advances in Construction Materials, p513-52

Inhoudsopgave

VOORWOORD	IV
INLEIDING	16
LITERATUURSTUDIE	
1. BETONSOORTEN	18
1.1 TRADITIONEEL BETON	18
1.1.1 Inleiding	18
1.1.2 Definitie	19
1.1.3 Basisproducten	19
1.1.3.1 Toeslagstoffen	19
1.1.3.2 Bindmiddel	20
1.1.3.3 Water	22
1.1.4 Betonklassen	23
1.1.4.1 Omgevingsklassen en gebruiksdomein	23
1.1.4.2 Sterkteklassen	24
1.1.5 Eigenschappen	26
1.1.5.1 Verwerkbaarheid	26
1.1.5.2 Sterkte	26
1.1.5.3 Duurzaamheid	28
1.2 (ULTRA)HOOGSTERKTEBETON	28
1.2.1 Inleiding	28
1.2.2 Definitie	28
1.2.3 Basisproducten	29
1.2.3.1 Toeslagstoffen	30
1.2.3.2 Bindmiddelen	30
1.2.3.3 Water	31
1.2.3.4 Vulstoffen	31
1.2.3.5 Hulpstoffen	36
1.2.3.6 Eigenschappen	38
1.2.4 Mengtijd & mengsnelheid	48
1.2.4.1 Inleiding	48
1.2.4.2 Definitie van de stabilisatietijd	48
1.2.4.3 Effect van betonsamenstelling	50
1.2.4.4 Effect van de mengsnelheid	53
1.2.4.5 Conclusie	55
1.2.5 Voor- en nadelen	55
1.2.6 Concrete toepassing: De tweede Stichtse brug (Nederland)	55

2.	MENGINSTALLATIES	58
2.1	TROMMELMENGERS.....	58
2.2	DWANGMENGERS	59
2.3	KLEINE VACUÛM MIXER	62
2.4	GROTE VACUÛM MIXER	63
3.	TESTPROCEDURES	66
3.1	PROEVEN OP VERS BETON.....	66
3.1.1	<i>Uitstroomtijd [sec]</i>	66
3.1.1.1	Apparatuur	67
3.1.1.2	Vullen van de kleine trechter	67
3.1.1.3	Testprocedure	67
3.1.2	<i>Vloeimaat (slump flow) [mm]</i>	67
3.1.2.1	Vullen van de Haegerman-kegel.....	68
3.1.2.2	Testprocedure	68
3.1.3	<i>Luchtgehalte [%]</i>	69
3.1.3.1	Testprocedure	69
3.2	PROEVEN OP VERHARD BETON.....	70
3.2.1	<i>Bepalen van de druksterkte aan de hand van de genormaliseerde drukproef</i>	70
3.2.2	<i>Bepalen van de druksterkte aan de hand van de ouderdomscoëfficiënt</i>	71
3.2.3	<i>Bepalen van de relatieve dichtheid d_0/d_s</i>	74
3.2.4	<i>Luchtgehalte bepalen via een air-voidanalyse</i>	75
3.2.4.1	Vorbereiding van de proefstukken	76
3.2.4.2	Uitvoering van de metingen met de RapidAir457.....	78
3.2.4.3	Instelling van de parameters	79
3.2.4.4	Resultaten uit de air-void-analyse	80
3.2.5	<i>Warmtebehandeling</i>	81

ONDERZOEK

1.	KEUZE REFERENTIEMENGSEL	84
2.	INLEIDENDE TESTEN OP EEN HET REFERENTIEMENGSEL	87
3.	PROEVEN OP EEN HOOGSTERKTE-REFERENTIEMENGSEL	97
3.1	SAMENSTELLING	97
3.2	MENGPROCEDURES	97
3.3	MENGTIJD EN MENGSNELHEID LATEN VARIËREN	99
3.4	HET LUCHTGEHALTE LATEN VARIËREN	104
3.5	VERSCHILLENDE MANIEREN VAN SUPERPLASTIFICEERDER TOEVOEGEN.....	107
4.	PROEVEN OP EEN ULTRAHOOGSTERKTE-REFERENTIEMENGSEL	110

4.1	SAMENSTELLING	110
4.2	MENGPROCEDURES	112
4.3	MENGTIJD EN DE MENGSNELHEID LATEN VARIËREN.....	112
4.4	HET LUCHTGEHALTE LATEN VARIËREN	116
4.5	HET LUCHTGEHALTE LATEN VARIËREN EN KUBUSSEN ONDERWERPEN AAN EEN WARMTEBEHANDELING.	120
4.6	EFFECT VAN DE MENGHOEVEELHEID	122
4.7	RELATIE TUSSEN DE DRUKSTERKTE EN DE RELATIEVE DICHTHEID	127
4.8	TESTEN KORTERE MENGTIJD.....	128
4.9	EFFECT VAN DE MENGKOP	131
5.	CONCLUSIES.....	132
5.1	ALGEMENE BESLUITVORMING	132
5.2	AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK.....	134
5.2.1	<i>Invloed van de mengtijd en mengsnelheid.....</i>	<i>134</i>
5.2.2	<i>Invloed door vacuüm mengen.....</i>	<i>134</i>
6.	BIBLIOGRAFIE	135
7.	BIJLAGEN	141

Lijst van figuren

Figuur 1: Samenstelling in volume (Lambotte, 2006)	19
Figuur 2: Tegengestelde ladingen op het oppervlak van de cementkorrels veroorzaken vlokvorming (De Schutter, Apers, 2007)	22
Figuur 3: Superplastificeerders verhinderen vlokvorming (De Schutter, Apers, 2007)	37
Figuur 4: Traditioneel beton (De Schutter, Apers, 2007)	41
Figuur 5: Hoogsterktebeton: ook scheuren door granulaatkorrels (De Schutter, Apers, 2007) ..	41
Figuur 6: De voornaamste types betonkrimp (Febelcem 2003)	45
Figuur 7: Betonwand na ontkisting beschermd met behulp van een zeil (Ployaert, 2010)	46
Figuur 8: Tweede Stichtse brug (De Schutter, Apers, 2007)	56
Figuur 9: Dwarsdoorsnede van een drum mixer (Ferraris, 2001)	58
Figuur 10: Verschillende configuraties van mixers (Ferraris, 2001)	59
Figuur 11: Draairichting van het beton.	60
Figuur 12: Mengen met Eirich mixer	60
Figuur 13: Planetaire mixer	61
Figuur 14: Kleine vacuümmixer	62
Figuur 15: Sterrotor	62
Figuur 16: Grote vacuüm mixer	63
Figuur 17: Display van de grote vacuüm mixer	63
Figuur 18: Vullen van de mixer	64
Figuur 19: Mengkop grote mixer	64
Figuur 20: Doorkijkluik grote mixer	65
Figuur 21: Zicht in het doorkijkluik	65
Figuur 22: Kleine V-funnel	67
Figuur 23: Vullen van de conus volgens de procedure.	68
Figuur 24: Beton volledig uitgevloeid.	68
Figuur 25: Luchtgehaltemeter	70
Figuur 26: Drukken van een kubus (100 x 100 mm)	70
Figuur 27: RapidAir 457 (foto van op www.concrete-experts.com)	75
Figuur 28: Gepolijst proefstuk met zaagmerkten	76
Figuur 29: Poeder aandrukken met rubberen stamper	76
Figuur 30: Voorbereiding gepolijst proefstuk met zwarte inktstift en BaSO ₄ -poeder	77
Figuur 31: Plaatsing van het proefstuk in de RapidAir 457 (www.concrete-experts.com)	78

Figuur 32: Afgelegd pad volgens 'linear traverse' methode	78
Figuur 33: Evenwichtig aantal 'probe lines' bij het scannen met de RapidAir 457.....	80
Figuur 34: Voorbeeld van een mengprocedure (Fehling, Schmidt, Stürwald, 2008)	98
Figuur 35: Waterbrug tussen de korrels (Schiessl, Mazanec, Lowke, 2007).....	102
Figuur 36: Doorsnede van de kubussen	119
Figuur 37: Warmtebak in labo Magnel	120

Lijst van grafieken

Grafiek 1: Korrelverdeling van fijne stoffen (De Schutter, Apers, 2007):	32
Grafiek 2: Invloed van w/c factor en het luchtgehalte op de druksterkte van beton.....	39
Grafiek 3: Verband tussen druksterkte en water-cementfactor (De Schutter, Apers, 2007).....	39
Grafiek 4: Verband tussen de w/p-factor en de ontwikkelde druksterkte in verhard beton na 28 dagen (Nanthagopalan, Santhanam, 2009).	40
Grafiek 5: Spanning-vervorming diagram (De Schutter, Apers, 2007)	42
Grafiek 6: Relatie tussen de slump flow en het luchtgehalte (Zain, 1999)	43
Grafiek 7: Relatie tussen V-Funnel en luchtgehalte (Zain, 1999)	44
Grafiek 8: Soortelijk gewicht i.f.v. het luchtgehalte	45
Grafiek 9: Definitie van de stabilisatietijd t_s (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009)	49
Grafiek 10: Definitie van de stabilisatietijd t_s (Chopin, Larrard & Cazacliu, 2004)	49
Grafiek 11: Stabilisatietijd en relatieve dichtheid i.f.v. de V_w/V_p verhouding (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009)	50
Grafiek 12: Stabilisatietijd en relatieve dichtheid i.f.v. het gehalte superplastificeerder (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).	52
Grafiek 13: De stabilisatietijd en de relatieve dichtheid i.f.v. het gehalte silica fume (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).	53
Grafiek 14: Het effect van de mengsnelheid op de stabilisatietijd t_s (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).	54
Grafiek 15: Voorbeelden van energieverbruikcurves tijdens het mixen (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009)	54
Grafiek 16: Spreiding op de resultaten i.f.v. de mengtijd (Rikken, Lighting, 2004)	60
Grafiek 17: Slump flow i.f.v. de mengsnelheid (Mazanec, Schiessl, 2008)	61
Grafiek 18: Sterkteontwikkeling in het geval van een normale verharding ($s = 0,25$) (Pollet, Dooms).....	73

Grafiek 19: De variatie van de relatieve densiteit i.f.v. het watergehalte. (Richard, Cheyrezy, 1995)	74
Grafiek 20: Verband tussen druksterkte en w/c-factor (De Schutter, Apers, 2007).	83
Grafiek 21: Druksterkte i.f.v. de w/b-factor (Jung, Kang, Kyung, Sung, 2008)	84
Grafiek 22: Druksterkte i.f.v. het gehalte silica fume (Jung, Kang, Kyung, Sung, 2008)	84
Grafiek 23: Druksterkte i.f.v. zandgehalte (Jung, Kang, Kyung, Sung, 2008)	85
Grafiek 24: De variatie van de relatieve densiteit i.f.v. het watergehalte. (Richard, Cheyrezy, 1995)	87
Grafiek 25: Druksterkte i.f.v. de relatieve densiteit. (Richard, Cheyrezy, 1995)	88
Grafiek 26: Druksterktes op verschillende mengsels (aangekruist als de bewerking is uitgevoerd)	89
Grafiek 27: Zeefkromme CEM I 52,5 en zand M31	90
Grafiek 28: Zeefkromme CEM I 52,5, zand S90 en zand M31	91
Grafiek 29: Druksterktes bij een verschillende verhouding zand M31 en zand S90	92
Grafiek 30: Slump flow i.f.v. het gehalte superplastificeerder (w/c = 0,2)	93
Grafiek 31: Uitstroomtijd i.f.v. het gehalte superplastificeerder (w/c = 0,2)	93
Grafiek 32: Druksterkte na 7 dagen i.f.v. het gehalte superplastificeerder (w/c = 0,2)	94
Grafiek 33: Uitstroomtijd i.f.v. het gehalte superplastificeerder (w/c = 0,15)	95
Grafiek 34: Slump flow i.f.v. het gehalte superplastificeerder (w/c = 0,15)	95
Grafiek 35: Druksterkte na 7 dagen i.f.v. het gehalte superplastificeerder (w/c = 0,15)	96
Grafiek 36: Druksterkte i.f.v. de mengtijd	99
Grafiek 37: Uitstroomtijd i.f.v. de mengtijd	100
Grafiek 38: Slump flow i.f.v. de mengtijd	100
Grafiek 39: Effect van de mengtijd (Schiessl, Mazanec, Lowke, 2007)	101
Grafiek 40: Effect van de mengtijd (meetwaarden) (Schiessl, Mazanec, Lowke, 2007)	101
Grafiek 41: Druksterkte i.f.v. aantal toeren nat mengen	103
Grafiek 42: Druksterkte i.f.v. het aantal toeren nat mengen	103
Grafiek 43: Luchtgehalte i.f.v. de luchtdruk	104
Grafiek 44: Volumegewicht i.f.v. luchtdruk	105
Grafiek 45: Slump flow i.f.v. het luchtgehalte	106
Grafiek 46: Uitstroomtijd i.f.v. het luchtgehalte	106
Grafiek 47: Druksterkte i.f.v. het luchtgehalte	107
Grafiek 48: Druksterkte na 3 en 7 dagen i.f.v. de manier van toevoegen van de superplastificeerder	108
Grafiek 49: Luchtgehalte i.f.v. de manier van superplastificeerder toevoegen	108

Grafiek 50: Uitstroomtijd i.f.v de manier van superplastificeerder toevoegen.....	109
Grafiek 51: Slump flow i.f.v de manier van superplastificeerder toevoegen.....	109
Grafiek 52: Vergelijking van de druksterkte tussen CEM I 52,5 N en CEM I 52,5 HSR	111
Grafiek 53: Druksterkte i.f.v. de mengtijd en de mengsnelheid	113
Grafiek 54: Luchtgehalte i.f.v. de mengtijd en de mengsnelheid	113
Grafiek 55: Volumegewicht i.f.v. de mengtijd en de mengsnelheid.....	114
Grafiek 56: Slump flow i.f.v. de mengtijd en de mengsnelheid	115
Grafiek 57: Uitstroomtijd i.f.v. de mengtijd en de mengsnelheid.....	115
Grafiek 58: Luchtgehalte i.f.v. de omgevingsdruk	116
Grafiek 59: Volumegewicht i.f.v. het luchtgehalte	116
Grafiek 60: Slump flow i.f.v. de omgevingsdruk.....	117
Grafiek 61: Uitstroomtijd i.f.v. de omgevingsdruk.....	117
Grafiek 62: Druksterkte i.f.v. het luchtgehalte.....	118
Grafiek 63: Luchtgehalte van beton in vaste toestand i.f.v. de luchtdruk.....	119
Grafiek 64: Druksterkte i.f.v. luchtgehalte in vast beton (air-voidanalyse).....	120
Grafiek 65: Druksterkte i.f.v. de luchtdruk.....	121
Grafiek 66: Vergelijking luchtgehalte met en zonder warmtebehandeling.....	122
Grafiek 67: Vergelijking van de uitstroomtijd i.f.v. de menghoeveelheid.....	123
Grafiek 68: Vergelijking van de slump flow i.f.v. de menghoeveelheid.	124
Grafiek 69: Vergelijking van de luchtgehalte in vloeibare toestand i.f.v. de menghoeveelheid.	124
Grafiek 70: Vergelijking van de luchtgehalte in vaste toestand i.f.v. de menghoeveelheid.	125
Grafiek 71: Vergelijking van de druksterke i.f.v. de menghoeveelheid.	125
Grafiek 72: Vergelijking van de slump flow i.f.v. het luchtgehalte (Zain, 1999).....	126
Grafiek 73: Vergelijking van de uitstroomsnelheid i.f.v. het luchtgehalte (Zain, 1999)	127
Grafiek 74: Druksterkte i.f.v. de relatieve densiteit. (Richard, Cheyrezy, 1995).....	128
Grafiek 75: Slump flow i.f.v. verschillende mengprocedures	129
Grafiek 76: Aangevulde grafiek van de slump flow i.f.v. de mengtijd en mengsnelheid (Schiessl, Mazanec, Lowke, 2007).....	130

Lijst van tabellen

Tabel 1: Duurzaamheidseisen voor ongewapend, gewapend en voorgespannen beton (tabel F.3 uit de norm NBN B 15-001:2004).	25
Tabel 2: Betontypes (tabel F.1 uit de norm NBN B 15-001: 2004).....	26
Tabel 3: Maximale w/c-factor en minimale druksterkte in functie van de blootstellingsklasse (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002).....	27
Tabel 4: Sterkteklassen (De Schutter & Apers, 2007)	29
Tabel 5: Materialen voor de ontwikkeling van (ultra)hoogsterktebeton (Buytaert, Ronsse, 2010).	29
Tabel 6: Types vliegask volgens norm NBN EN 197-1.	33
Tabel 7: Gemiddelde chemische samenstelling van vliegask.	33
Tabel 8: Chemische samenstelling van silica fume van ovens voor siliciumproductie uit Noorwegen (Dheedene, Maes, Masson, 2008)	35
Tabel 9: Betonsamenstelling (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).....	50
Tabel 10: Betonsamenstelling 2 ^{de} Stichtse brug (De Schutter, Apers, 2007)	56
Tabel 11: Waarden van s i.f.v. het cementtype voor de berekening van de ouderdomscoëfficiënt (De Blaere, 2006).....	72
Tabel 12: Samenstelling van het betonmengsel.	74
Tabel 13: Gewichtshoeveelheden betonsamenstelling (P. Richard en M. Cheyrezy, 1995).....	86
Tabel 14: Samenstelling van het betonmengsel	97
Tabel 15: Mengsequentie [min]	98
Tabel 16: Samenstelling UHPC betonmengsel	111
Tabel 17: Omzetten snelheid mixers.....	122
Tabel 18: Grote slump flow en grote V-funnel.....	123
Tabel 19: Verschil tussen een korte en een lange mengtijd. (*berekende waarden).....	129
Tabel 20: Verschil tussen een sterrotor en een pinrotor (*berekende waarden)	131

Inleiding

Jarenlang werden alleen granulaten, cement en water gebruikt voor het creëren van beton. Water vervult daarbij een dubbele rol: het verzekert de cementhydratatie en geeft aan de betonspecie de nodige verwerkbaarheid. Deze verwerkbaarheid vraagt echter meer water dan strikt noodzakelijk voor de hydratatie, waardoor de sterkte beperkt blijft. De ontdekking van zeer krachtige superplastificeerders zorgde ervoor dat het watergehalte sterk kon worden gereduceerd. Superplastificeerders hebben immers de eigenschap het beton vloeibaar te maken zonder toevoeging van water. Zij liggen aan de basis van de ontwikkeling van ultrahoogsterktebeton. Dit beton kan hogere lasten dragen of slanker worden uitgevoerd. Het zal ook een belangrijke rol spelen in de toekomstige betonindustrie.

Aan de hand van een uitgevoerde literatuurstudie wordt onderzocht hoever de ontwikkeling van deze betonsoort gevorderd is. Er wordt eerst een vergelijking gemaakt met traditioneel beton en vervolgens worden de samenstelling, de verwerking en de eigenschappen behandeld.

Het effectieve onderzoek wordt gestart aan de hand van een bestaande UHPC samenstelling. Deze samenstelling wordt gefabriceerd met verschillende mengprocedures en telkens wordt de verwerkbaarheid en de druksterkte gemeten. Op deze manier wordt inzicht verkregen in het opstellen van richtlijnen voor de ontwikkeling van ultrahoogsterktebeton. In het eerste deel van het onderzoek wordt de invloed van de mengtijd en de mengsnelheid onderzocht en in het tweede deel wordt getracht het luchtgehalte in het beton te beperken. Tijdens het storten van het beton is het zeer moeilijk om de opgenomen hoeveelheid lucht die in het mengsel wordt opgenomen te verminderen. Daarentegen is het wel mogelijk om gedurende het mengen een luchtdichte omgeving rond de menger te creëren. Als op dit luchtdicht geheel een pomp voorziet wordt die de lucht kan wegzuigen, dan kan ervoor gezorgd worden dat er minder lucht wordt opgenomen door het mengsel. Door het gebruik van deze machine kan de mengeling onder een, op voorhand gekozen, luchtdruk worden uitgevoerd. In dit onderzoek is het beton vervaardigd onder drie verschillende drukken: vacuüm (100mbar), semivacuüm (500mbar) en atmosferische druk (1013mbar). Op deze manier kan het verband tussen de sterkte en het luchtgehalte bepaald worden ten opzichte van de luchtdruk waaronder de menging is uitgevoerd. De mengeling is gemaakt met een intensieve Eirich mixer met een capaciteit van 3,5 en 75 liter.

Literatuurstudie

1. *Betonsoorten*

In het eerste deel van de literatuurstudie worden twee verschillende betontypes besproken. Hoofdstuk 1 handelt over traditioneel beton, terwijl hoofdstuk 2 handelt over (ultra)hoogsterktebeton.

1.1 *Traditioneel beton*

Dit hoofdstuk heeft een inleidende functie tot de hierna volgende hoofdstukken. In wat volgt wordt kort ingegaan op de samenstelling, de verschillende soorten en de voor dit onderzoek typerende eigenschappen van traditioneel beton.

1.1.1 *Inleiding*

Mortel en beton bestaan zo lang als het bouwen zelf. Op een muurschildering in Thebe, daterend van ca. 1950 voor Chr., worden de opeenvolgende fasen in het vervaardigen en het aanwenden van beton in mortel afgebeeld.

De geschiedenis loopt van het gebruik van klei en leemmortels over de luchtverhardende kalkmortels tot de ontdekking van de hydraulische eigenschappen van puzzolaanaarde, tras en andere vulkanische gesteenten, waarvan de toevoeging aan kalk maakt dat deze mortels ook onder water gaan verharderen.

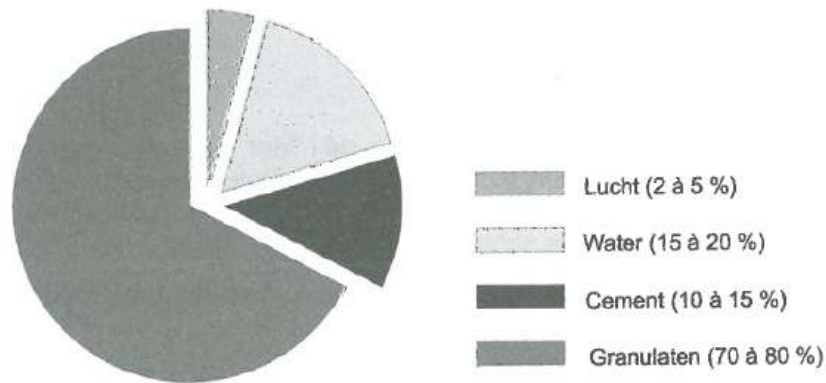
De Romeinen waren meesters in het bouwen met dit natuurlijke cement, die zij niet alleen als metselmortel, maar ook als bindmiddel bij de vervaardiging van beton gebruiken. Van hen zijn belangrijke bouwwerken bewaard, waaronder talrijke viaducten, aquaducten en gebouwen zoals het Pantheon te Rome. Zij gebruikten beton als vulwerk tussen gemetselde parementen.

Met de val van het Romeinse Rijk verdween beton als constructiemateriaal. Het verscheen slechts terug aan het begin van de 19^{de} eeuw.

(Apers, 2006)

1.1.2 Definitie

Traditioneel beton is opgebouwd uit 70 à 80 % granulaten (toeslagmateriaal), 10 à 15 % cement, 15 à 20 % water en 2 à 5 % lucht (volumepercenten)(Lambotte, 2006).



Figuur 1: Samenstelling in volume (Lambotte, 2006)

Beton bestaat zowel uit grove als uit fijne granulaten, terwijl mortel enkel is opgebouwd uit fijne granulaten. Eventueel kunnen nog vulstoffen en hulpstoffen toegevoegd worden ter verbetering van bepaalde eigenschappen van het beton (Lambotte, 2006).

1.1.3 Basisproducten

1.1.3.1 Toeslagstoffen

Daar de toeslagstoffen de grootste massa uitmaken van het beton (70 %), zijn deze zeker niet te verwaarlozen. Door het grote aandeel zijn de toeslagstoffen bepalend voor zowel de betonkwaliteit als voor de natuurlijke eigenschappen; zoals hardheid, dichtheid, elasticiteit, lineaire uitzetting en krimp ten gevolge van een temperatuurverandering (Stulemeijer, 1965; Buytaert, Ronsse, 2010).

De toeslagmaterialen kunnen worden onderverdeeld in grove en fijne granulaten. Granulaten met een diameter groter dan 2,0 mm worden geklasseerd bij de grove granulaten. Porfiersteenslag, grind, kalksteen en zandsteen behoren tot deze groep. De fijne granulaten worden aangetroffen bij de erosiematerialen. Voorbeelden hiervan zijn zeezand of natuurlijke granulaten afkomstig uit groeves, de diameter van de korrels is gelegen tussen de 0,08 mm en

2,0 mm. Er wordt gesproken van vulstof wanneer de korrels een diameter hebben die kleiner is dan 0,08 mm (Lambotte, 2006).

De maximale korreldiameter wordt bepaald door meerdere factoren: zoals de afmetingen, de vorm, de hoeveelheid en de verdeling van de wapeningsstaven in functie van de afmetingen van de te vervaardigen elementen. Toch mag de maximale korreldiameter niet te klein genomen worden omdat dit kan resulteren in een betonmengsel met een slechte verwerkbaarheid en een verminderde plasticiteit (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002; Buytaert, Ronsse, 2010).

1.1.3.2 Bindmiddel

Cement is het meest gehanteerde bindmiddel, maar er kunnen nog andere worden toegepast. Het eerste bindmiddel situeert zich in het tijdperk van de Romeinen en is gebaseerd op kalk. Met kalk kon een beton verwezenlijkt worden met een druksterkte van ongeveer 5 N/mm². In de landen rond de Middellandse Zee kunnen er nog steeds bouwwerken bewonderd worden die met behulp van dat toenmalige beton zijn geconstrueerd. Daarnaast bestaat het bindmiddel asfalt waarmee asfaltbeton kan worden vervaardigd. Dit beton wordt vooral gebruikt in de wegenbouw (Apers, 2006).

In de 18de eeuw is voor het eerst hydraulische kalk geproduceerd die erg dicht in de buurt komt van ons modern cement. Dit was vooral te danken aan de progressie die is geboekt in het bakprocédé. In 1759 vervaardigde de Engelsman John Smeaton een mortel die even hard was als steen, door hydraulische kalk te vermengen met vulkanische as. In 1817 ontdekte de Fransman Louis Vicat de principes van cement en bepaalde hij de fabricatieregels voor hydraulisch cement. Hij wordt dan ook aanzien als de grondlegger van het moderne cement. In 1824 nam de Engelsman Joseph Aspdin een patent op portlandcement, een product van het branden van kalksteen en klei in steenkoolovens. De naam Portland dankt dit materiaal aan zijn grote gelijkenis qua kleur en hardheid met portlandsteen. Portland is nog steeds een veelgebruikte naam in de cementindustrie. De eerste cementfabriek in België dateert van 1872. Sinds het eind van de 19de eeuw wordt modern beton op basis van portlandcement op grote schaal gebruikt in de bouwindustrie (Dheedene, Maes, Masson, 2008).

Cement kan worden onderverdeeld in 5 hoofdtypes:

- CEM I Portlandcement
- CEM II Samengesteld portlandcement
- CEM III Hoogovencement
- CEM IV Puzzolaancement
- CEM V Composietcement

Tegenwoordig worden in België voornamelijk portland- en hoogovencement gebruikt bij de fabricage van betonmengsels. Portlandcement wordt vooral toegepast in de prefabindustrie aangezien het materiaal de eigenschap heeft snel uit te harden en op die manier kan het slechts na één dag ontkist worden (Stulemeijer, 1965; Buytaert, Ronsse, 2010).

Portlandcement is een grijs en wordt verkregen door het malen van het hoofdbestanddeel portlandcementklinker. Het bestaat uit 90 % portlandcementklinker, maximaal 5 % gips (bindingsvertrager) en 5 % andere toeslagstoffen (Buytaert, Ronsse, 2010).

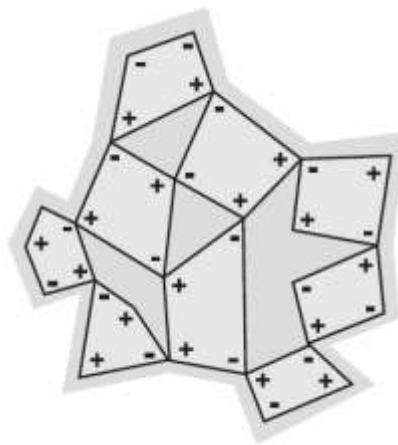
Hoogovencement is een lichtgrijs cement dat verkregen wordt door het malen van portlandcementklinker en gegraneerde hoogovenslak. Dit cementtype bevat een hoog slakgehalte waardoor het uiterst geschikt is in contact met zeewater of andere agressieve milieus. Het toevoegen van portlandcementklinker is noodzakelijk om de binding met water op gang te brengen. Hoogovencement wordt minder gebruikt voor prefabricatie omdat het langzamer verhardt dan portlandcement bij normale temperaturen (Schellingerhout, 1991; Buytaert, Ronsse, 2010).

De indeling in cementklassen (32,5; 42,5 en 52,5) gebeurt door middel van een drukproef na 28 dagen, zo moet normaalmortel van klasse 52,5 minstens een druksterkte van 52,5 MPa hebben. De mortelprisma's gaan uit van een standaard verhouding van cement, water en zand. De sterkteaanduiding van het cement heeft slechts een beperkte invloed op de te behalen sterkte van het beton. Er kan bijvoorbeeld een andere w/c-factor gebruikt worden en ook opbouw van het toeslagmateriaal zal een invloed hebben op de uiteindelijke sterkte van het beton. De cement sterkteklasse is daarom niet direct terug te voeren tot een minimale of maximale sterkteklasse voor het beton. Elke klasse wordt onderverdeeld in twee groepen

naargelang de beginsterkte. Een normale beginsterkte wordt aangeduid met de letter 'N' en een hoge beginsterkte wordt aangeduid met een letter 'R'.

1.1.3.3 Water

Water is naast toeslagmaterialen één van de belangrijkste bestanddelen in beton. In tegenstelling met de granulaten die 'inerte' componenten genoemd worden, zijn cement en water de actieve bestanddelen van beton. Het is inderdaad het cement dat de granulaten onderling moet verbinden om zo een homogeen geheel te vormen. Om zijn rol als bindmiddel te kunnen vervullen, heeft cement water nodig om te hydrateren. De hoeveelheid water die hiervoor nodig is, bedraagt ongeveer 25 % van de cementmassa. Daarenboven moet beton voldoende vloeibaar zijn om ermee te kunnen werken. Daarvoor is een extra hoeveelheid water gewenst (Magera, 2006).



Figuur 2: Tegengestelde ladingen op het oppervlak van de cementkorrels veroorzaken vlokvorming (De Schutter, Apers, 2007)

Het oppervlak van elke cementkorrel bevat vrije elektrische ladingen. Tegengestelde ladingen trekken elkaar onderling aan. In contact met water zullen de korrels zich daarom in vlokken aan elkaar rijgen. Het aanmaakwater dat zich tussen de vlokken bevindt, geraakt evenwel ingesloten (figuur 2). Vanaf dat moment draagt het niet meer bij tot de vloeibaarheid van de cementpasta. Meer aanmaakwater is daarom nodig om de gewenste verwerkbaarheid te verkrijgen (De Schutter, Apers, 2007).

Het is dus belangrijk een zekere hoeveelheid water aan het betonmengsel toe te voegen, maar bij het overschrijden van een bepaalde dosering kan het water ongewenste effecten veroorzaken. Waterafscheiding (bleeding), uitdrogingskrimp of een te groot poriënvolume, wat

een vermindering van de sterkte en de duurzaamheid van het beton tot gevolg kan hebben, zijn daar voorbeelden van (Magera, 2006).

De hoeveelheid water die noodzakelijk is, wordt eveneens bepaald door de vorm, de maximale korreldiameter en de hoeveelheid gebruikte granulaten. Grotere korreldiameters vergen een kleinere hoeveelheid aanmaakwater, waardoor ook de benodigde hoeveelheid cement kan worden gereduceerd. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002; Buytaert, Ronsse, 2010).

De hoeveelheid water wordt uitgedrukt door de w/c-factor, dit is de verhouding van de massa van het water op de massa van het cement. Voor traditioneel beton ligt die tussen de 0,4 en de 0,6. Bij juiste verhoudingen worden de holtes tussen de grove granulaten vrijwel volledig gevuld met fijne korrels waarbij het bindmiddel de verschillende korrels aan elkaar plakt (Buytaert, Ronsse, 2010).

1.1.4 Betonklassen

Beton dat geplaatst wordt in een bepaalde omgeving, wordt dikwijls aan meerdere aantastingsmechanismen blootgesteld. Het is essentieel dat voor elk beton de juiste milieuklassen worden geselecteerd, naargelang de omgeving waarin het beton zich situeert. Een aantal veel voorkomende typeomgevingen, die vaak van toepassing zijn voor de Belgische betonpraktijk, zijn in België te onderscheiden. Deze typeomgevingen worden omgevingsklassen genoemd. Beton wordt ook dikwijls gerangschikt in sterkteklassen, maar daar wordt later dieper op ingegaan. (Apers, 2006; Buytaert, Ronsse, 2010).

1.1.4.1 Omgevingsklassen en gebruiksdomein

De duurzaamheidseisen die aan het beton gesteld worden, hebben onder andere te maken met de omgevingsklassen en het gebruiksdomein. De omgevingsklasse refereert naar de omgeving waaraan het beton wordt blootgesteld. Een betonelement moet aan minder strikte duurzaamheidseisen voldoen als het aangewend wordt in een binnenomgeving, in vergelijking met een buitenelement. Het beton kan ongewapend, gewapend of voorgespannen zijn. Dit wordt duidelijk gemaakt aan de hand van het gebruiksdomein. Het verschil wordt gemaakt omdat ongewapend beton aan minder aantastingmechanismen onderworpen is dan gewapend en voorgespannen beton (Buytaert, Ronsse, 2010; Febelcem, april 2005).

In Tabel 1 wordt een overzicht gegeven van de duurzaamheidseisen voor ongewapend, gewapend en voorgespannen beton, in functie van de omgevingsklasse.

Bovendien worden de betonsoorten die voorhanden zijn gecategoriseerd in verscheidene betontypes. Dit wordt bepaald door hun maximale w/c-factor en hun minimale cementgehalte. De verschillende betontypes worden weergegeven in Tabel 2.

1.1.4.2 Sterkteklassen

De belangrijkste eigenschap van verhard beton is de druksterkte. Beton wordt naar sterkte toe verdeeld in verschillende klassen. Elke klasse wordt weergegeven door de 'C', gevolgd door de karakteristieke cilinder- en kubusdruksterkte.

$$C_{f_{ck,cyl}/f_{ck,cube}}$$

De karakteristieke cilindrische druksterkte $f_{ck,cyl}$ wordt meestal gebruikt voor het berekenen van betonconstructies, terwijl de karakteristieke kubusdruksterkte $f_{ck,cube}$ eerder wordt gebruikt bij het uitvoeren van kwaliteitscontroles (Febelcem, 2005).

$f_{ck,cub}$ wordt afgeleid uit drukproeven op kubusvormige proefstukken met een zijde van 150 mm. De proefstukken worden gedurende 28 dagen bewaard bij 20 ± 2 °C onder water of in een kamer met een relatieve vochtigheid groter dan 95 %. $f_{ck,cil}$ is gedefinieerd als de karakteristieke druksterkte op cilindervormige proefstukken met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm. Zij moeten eveneens onder water bewaard worden gedurende 28 dagen of in een kamer met een relatieve vochtigheid van 95 % (Buytaert, Ronsse, 2010). Proefstukken in dit onderzoek worden niet onder water bewaard, maar in een vochtige kamer.

Basisgegevens A : keuze van de sterkteklasse $C_{f_{a,28}}/f_{a,28}$ ⁽¹⁾ ⁽²⁾									
Klasse	C8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55
	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105	C100/115	/	/
Basisgegevens B1 : keuze van het gebruiksdomein									
OB	Ongewapend beton (toegelaten chloride-ionengehalte $\leq 1,0$ % Cl ⁻)								
GB	Gewapend beton (toegelaten chloride-ionengehalte $\leq 0,4$ % Cl ⁻)								
VB	Voorgespannen beton (toegelaten chloride-ionengehalte $\leq 0,2$ % Cl ⁻)								
Basisgegevens B2 : keuze van de omgevingsklasse									
Klasse	Beschrijving						OB Minimale sterkteklasse	GB/VB Minimale sterkteklasse	
E0	Niet schadelijk (enkel van toepassing op ongewapend beton)						C12/15	N. v. toepassing	
E1	Binnenomgeving (binnenwanden van woningen of kantoorgebouwen)						C12/15	C16/20	
EE	Buitenomgeving								
EE1	Geen vorst (fundering onder de vorstgrens, ...)						C12/15	C20/25	
EE2	Vorst, geen contact met regen (overdekte open garage, kruipruimte, open doorgang in een gebouw, ...)						C25/30	C25/30	
EE3	Vorst, contact met regen (aan regen blootgestelde buitenmuren, ...)						C25/30	C30/37	
EE4	Vorst en doolizouten (delen van verkeersinfrastructuur, ...)						C35/45 C25/30 – A ⁽³⁾	C35/45 C30/37 – A ⁽³⁾	
ES	Zeemgeving								
	Geen contact met zeewater, wel contact met zeelucht (tot 3 km van de kust) en/of met brak water								
ES1	Geen vorst (fundering onder de vorstgrens, blootgesteld aan brak water, ...)						C20/25	C30/37	
ES2	Vorst (buitenmuren van gebouwen in de kuststreek, ...)						C25/30	C30/37	
	Contact met zeewater								
ES3	Ondergedompeld						C25/30	C35/45	
ES4	Getijden- en spatzone (kaalmuren, ...)						C35/45 C25/30 – A ⁽³⁾	C35/45 C30/37 – A ⁽³⁾	
EA	Agressieve omgeving (altijd in combinatie met een van de voornoemde omgevingsklassen)								
EA1	Zwak agressieve chemische omgeving						C25/30	C25/30	
EA2	Middelmatig agressieve chemische omgeving						C30/37	C30/37	
EA3	Sterk agressieve chemische omgeving						C35/45	C35/45	
Basisgegevens C : keuze van de consistentieklasse									
Klasse	Zetmaat ('slump')			Klasse	Schudmaat ('flow')				
S1	10 - 40 mm			F1	≤ 340 mm				
S2	50 - 90 mm			F2	350 - 410 mm				
S3	100 - 150 mm			F3	420 - 480 mm				
S4	160 - 210 mm			F4	490 - 550 mm				
S5	≥ 220 mm			F5	560 - 620 mm				
-	-			F6	≥ 630 mm				
Basisgegevens D : keuze van de nominale grootste korrelafmeting D_{max}									
D_{max} moet gekozen worden uit de volgende reeks : 6 8 10 11 12 14 16 20 22 32 40 45 63									
Aanvullende gegevens E									
Eisen met betrekking tot het cementtype, de samenstelling, het verse beton, de uitvoering, het verharde beton. Voorbeelden : HSR-cement, al dan niet verpompbaar beton, weerstand tegen wateropslorping (WAI 0,50), ...									
⁽¹⁾ $f_{a,28}$ = cilinderdruksterkte (N/mm ²); cilinder met een hoogte van 300 mm en een diameter van 150 mm). $f_{a,28}$ = kubusdruksterkte (N/mm ²); kubus met een zijde van 150 mm). ⁽²⁾ Bij de keuze van de sterkteklasse dient men rekening te houden met de omgevingsklasse. ⁽³⁾ – A : beton met toevoeging van luchtbelvormers.									

Tabel 1: Duurzaamheidseisen voor ongewapend, gewapend en voorgespannen beton (tabel F.3 uit de norm NBN B 15-001:2004).

AANDUIDING	T(1,50)	T(1,00)	T(0,65)	T(0,60)	T(0,55)	T(0,55)A	T(0,50)	T(0,50)A	T(0,45)	T(0,45)A
Maximale water-cementfactor ⁽¹⁾	1,50	1,00	0,65	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45
Minimaal cementgehalte (kg/m ³ beton) ⁽²⁾	—	—	260	280	300	300	320	320	340	340
Minimale druksterkeklasse ⁽³⁾ ⁽⁴⁾	C8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C20/25	C30/37	C25/30	C35/45	C30/37
Minimum luchtgehalte ⁽⁴⁾ van vers beton in % voor de nominale maximale korrelgrootte van het granulaat										
20 mm ≤ D _{max} ≤ 31,5 mm	—	—	—	—	4 %	4 %	—	4 %	—	4 %
11,2 mm ≤ D _{max} ≤ 16 mm	—	—	—	—	5 %	5 %	—	5 %	—	5 %
5,6 mm ≤ D _{max} ≤ 10 mm	—	—	—	—	6 %	6 %	—	6 %	—	6 %

⁽¹⁾ Effectief watergehalte; voor het cementgehalte : zie bepalingen van de artikels 5.2.5.2.1, 5.2.5.2.2, 5.2.5.2.3 en 5.2.5.2.4.
⁽²⁾ Zie bepalingen van de artikels 5.2.5.2.1, 5.2.5.2.2, 5.2.5.2.3 en 5.2.5.2.4.
⁽³⁾ Aan de hand van voorafgaandelijke geschiktheidsproeven volgens bijlage J van NBN EN 206-1:2001 kan van deze eis afgeweken worden, op voorwaarde dat de betonsamenstelling wel beantwoordt aan de twee basiseisen, namelijk de maximale water-cementfactor en het minimale cementgehalte.
⁽⁴⁾ Met een afstandsfactor van de ingebrachte luchtballen kleiner dan 0,200 mm, gemeten op het verharde beton (volgens NBN EN 480-11:1999).
⁽⁵⁾ Niet van toepassing op licht beton.

Tabel 2: Betontypes (tabel F.1 uit de norm NBN B 15-001: 2004)

1.1.5 Eigenschappen

De drie hoofdeigenschappen van beton zijn de verwerkbaarheid, de sterkte en de duurzaamheid. In functie van deze eigenschappen kunnen verschillende betontypes worden bekomen.

1.1.5.1 Verwerkbaarheid

Bij traditioneel beton is het vooral de hoeveelheid water en de gebruikte hulpstoffen die de verwerkbaarheid bepalen. Daarnaast valt ook de invloed van de gebruikte granulaten niet te onderschatten (Buytaert, Ronsse, 2010; Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002).

1.1.5.2 Sterkte

De sterkte van het betonmengsel wordt hoofdzakelijk bepaald door de kwaliteit en de sterkteklasse van het cement en de w/c-factor. Samen zorgen ze ervoor dat de hydratatiereactie op gang komt. Voor een optimale sterkteontwikkeling is een constante temperatuur en luchtvochtigheid belangrijk (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002).

Variaties in de sterkte kunnen te wijten zijn aan verschillende zaken:

- Een verschil in type, oorsprong en ouderdom van het gebruikte cement.
- Een variatie in de korreldiameter, de vorm, de indeling, de oppervlaktestructuur en de sterkte van de granulaten.
- Het luchtgehalte in het betonmengsel.
- Luchtvochtigheid tijdens het uitharden.
- De variatie in uithardingstijd.
- De mengprocedure.

Zoals reeds aangehaald wordt de sterkte vooral bepaald door de w/c-factor. In tabel 3 is het verband tussen de w/c-factor en de druksterkte duidelijk waarneembaar. Als de w/c-factor stijgt, zal de druksterkte dalen. In de tabel 3 zijn ook de luchtgehalte klassen weergegeven. Hierin komt klasse 1 overeen met een beton dat wordt blootgesteld aan vorst- en dooicycli, terwijl klasse 2 refereert naar een beton dat niet wordt blootgesteld aan vorst- en dooicycli (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002).

<i>Blootstellingsklasse</i>		<i>Maximale w/c-factor</i>	<i>Minimale cilinder druksterkte na 28 dagen [MPa]</i>	<i>Luchtgehalte klassen</i>
C-1	Gewapend beton blootgesteld aan chloriden met vorst - en dooicycli	0,40	35	**
C-2	Ongewapend beton blootgesteld aan chloriden met vorst - en dooicycli	0,45	32	1
C-3	Onderwaterbeton blootgesteld aan chloriden zonder vorst – en dooicycli	0,50	30	2
C-4	Ongewapend beton blootgesteld aan chloriden zonder vorst - en dooicycli	0,55	25	2
F-1	Beton in verzadigde toestand blootgesteld aan vorst – en dooicycli, maar zonder chloriden	0,50	30	1***
F-2	Beton in onverzadigde toestand blootgesteld aan vorst – en dooicycli, maar zonder chloriden	0,55	25	2***
N	Beton dat niet is blootgesteld aan chloriden, noch aan vorst – en dooicycli	Voor constructieve ontwerpen	Voor constructieve ontwerpen	

Tabel 3: Maximale w/c-factor en minimale druksterkte in functie van de blootstellingsklasse (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002)

1.1.5.3 Duurzaamheid

De vereiste duurzaamheid wordt bepaald door een minimale cementhoeveelheid en een maximale w/c-factor.

1.2 (Ultra)hoogsterktebeton

In dit deel van de literatuurstudie wordt getracht een definitie te formuleren voor (ultra)hoogsterktebeton. Ook de producten die nodig zijn voor het vervaardigen van dit betontype worden uitvoerig beschreven. Hierna worden de eigenschappen en de voor- en nadelen van (ultra)hoogsterktebeton besproken.

1.2.1 Inleiding

Sinds de opkomst van gewapende betonconstructies richten onderzoekers zich steeds meer op het vinden van methoden om de sterkte van beton te verhogen. Dit is natuurlijk omdat de hedendaagse bouwwerken telkens hoger en slanker worden uitgevoerd. Ook kunstwerken zoals bruggen worden geconstrueerd met grotere overspanningen. Deze constructies vergen een hoge sterkte waardoor de nood aan hoogsterktebeton toeneemt (Choi, Shin, Kim, Moon, 2006; De Schutter, Apers, 2007; El-Dieb, 2009; Buytaert, Ronsse, 2010).

1.2.2 Definitie

Een exacte definitie van hoogsterktebeton is moeilijk te geven. Immers, in de loop der jaren blijft de gewenste sterkte alsmaar toenemen waardoor het niet eenvoudig is een exacte waarde vast te leggen vanaf wanneer van hoogsterktebeton wordt gesproken. Tegenwoordig kan beton hoogsterktebeton worden genoemd wanneer de kubusdruksterkte na 28 dagen 70 MPa bedraagt (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002). Echter, volgens de nieuwe Europese norm EN 206-1 wordt beton als 'hoogsterktebeton' beschouwd vanaf een sterkteklasse van C55/67 (De Schutter, Apers, 2007). In (Minne, 2006) wordt dan weer gesproken van een hoogsterktebeton vanaf een druksterkte C50/55.

		Sterkteklassen													
		I → hogesterktebeton													
f_{ck}	karakteristieke cilinderdruksterkte (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck, cube}$	karakteristieke kubusdruksterkte (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105

Tabel 4: Sterkteklassen (De Schutter & Apers, 2007)

Om te kunnen spreken van een ultrahoogsterktebeton moet er volgens (Cauberg, 2006) een minimum druksterkte van 150 N/mm^2 worden bereikt. Een andere bron verklaart dat er pas vanaf ultrahoogsterktebeton gesproken wordt vanaf een druksterkte van 200 N/mm^2 (Kaptijn, 2002). Een conventie voor de minimale druksterkte is er nog niet.

1.2.3 Basisproducten

Hoogsterktebeton wordt gefabriceerd door gebruik te maken van nauwkeurig geselecteerde producten en een geoptimaliseerde mengeling (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002). In tabel 5 wordt een overzicht gegeven van de meest gebruikte materialen voor de ontwikkeling van (ultra)hoogsterktebeton (Buytaert, Ronsse, 2010).

<i>Materialen</i>	<i>Gewenste invloed op het betonmengsel</i>
Portland cement	Binding/duurzaamheid
Samengesteld portlandcement	Binding/duurzaamheid /hoge sterkte
Vliegask	Binding/duurzaamheid /hoge sterkte
Hoogovenslak	Binding/duurzaamheid /hoge sterkte
Silica fume	Binding/duurzaamheid /hoge sterkte
Gebrande klei	Binding/duurzaamheid /hoge sterkte
Metakaolin	Binding/duurzaamheid /hoge sterkte
Gebrande leisteen	Binding/duurzaamheid /hoge sterkte
Superplastificeers	Vloeibaarheid
Sterk waterreducerende hulpstoffen	Verlaging van de w/c-factor
Hulpstoffen ter controle van de hydratatiereactie	Controle op de hydratatiereactie
Vertragers	Vertragen van de reactie
Versnellers	Versnellen van de reactie
Oxidatievertragers	Vertragen van de oxidatiereactie
Waterreducerende hulpstoffen	Verminderen van de hoeveelheid water en cement
Krimp-reducerende hulpstoffen	Verminderen van krimpverschijnselen
ASR vertragers	ASR vertragen
Polymeer/latex oplosmiddelen	Duurzaamheid
Optimale verhouding van de granulaten	Verwerkbaarheid verbeteren en de benodigde pasta hoeveelheid reduceren

Tabel 5: Materialen voor de ontwikkeling van (ultra)hoogsterktebeton (Buytaert, Ronsse, 2010).

Om een (ultra)hoogsterktebeton te ontwikkelen zijn dezelfde stoffen nodig als voor een traditioneel beton, maar ook nog enkele hulpstoffen zoals vulstoffen en superplastificeers. Er wordt ook getracht het beton zo dicht mogelijk te maken. Dit kan door de korrelopbouw van

de grove tot de uiterst kleine delen zo compact mogelijk te maken (De Schutter, Apers, 2007; Buytaert, Ronsse, 2010).

Uit experimenten blijkt dat de pakkingsdichtheid van de korrels rechtstreeks in verband staat met de verwerkbaarheid van vloeibaar beton en de sterkte van verhard beton (Nanthagopalan, Santhanam, 2009). Enkel door de holten tussen de korrels tot een minimum te beperken is het mogelijk met een minimale w/c-factor tot een (ultra)hoogsterktebeton te komen (Buytaert, Ronsse, 2010; De Schutter, Apers, 2007).

1.2.3.1 Toeslagstoffen

Bij (ultra)hoogsterktebeton is een goede selectie van de toeslagmaterialen uiterst belangrijk. Niet alleen de maximale korreldiameter, maar ook de vorm, de mineralogische samenstelling, de zuiverheid en de oppervlaktestructuur van de granulaten spelen een aanzienlijk rol. Uit de experimenten van het WTCB is gebleken dat de hoogste betonsterkte bekomen wordt met een maximale korreldiameter gelegen tussen de 10 en 14 mm (Desmyter, Dieryck, Leuridan, 2002). De sterkte van het granulaat zelf, maar ook de binding tussen de pasta en de granulaten zijn cruciale factoren bij het ontwikkelen van de sterkte (verklaring in § 1.2.3.6). Eerdere experimenten tonen aan dat gebroken granulaten hogere sterktes opleveren dan gerolde granulaten met dezelfde korreldiameter (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002; Maiti, Agarwal, 2007; Buytaert, Ronsse, 2010).

1.2.3.2 Bindmiddelen

Bij traditioneel beton wordt er enkel gebruik gemaakt van de hoofdproducten (granulaten, cement en water). Het grote verschil bij hoogsterktebeton is dat hier geen traditioneel portlandcement wordt gebruikt maar een samengestelde portlandcement. Samengesteld portlandcement verschilt van traditioneel portlandcement in die zin dat het portlandcement is vermengd met cementbindende vulstoffen zoals: hoogovenslak, vliegas of silica fume (zie § 1.2.3.4 vulstoffen). Het gebruiken van dit type portlandcement komt de sterkteontwikkeling van (ultra)hoogsterktebeton ten goede. Bovendien kan ook dit cementtype worden gecombineerd met extra vulstoffen (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002; Buytaert, Ronsse, 2010).

Zoals beschreven in § 1.1.3.2 is de betondruksterkte voor een aanzienlijk deel afhankelijk van de cementsterkte. Voor de ontwikkeling van een (ultra)hoogsterktebeton zal er uiteraard gebruik gemaakt worden van een cement van de hoogste klasse 52,5 N, of eventueel 52,5 R indien een zeer hoge aanvangssterkte vereist is. (De Schutter, Apers, 2007; Buytaert, Ronsse, 2010).

1.2.3.3 Water

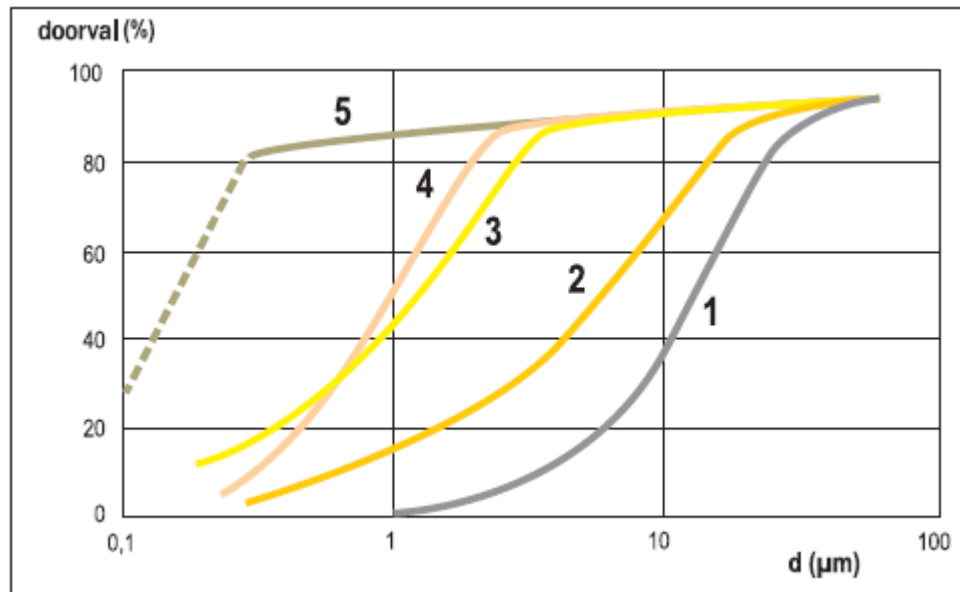
Bij een (ultra)hoogsterktebeton is het van belang de gebruikte hoeveelheid water te beperken. Dit kan op verschillende manieren (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002):

- Het laten toenemen van het luchtgehalte en de maximale korreldiameter.
- Het reduceren van de w/c-factor.
- Gebruiken van ronde granulaten.
- Waterreducerende hulpstoffen.

Verder dient erop gelet te worden dat na hydratatie van het cement geen vrij water overblijft, aangezien dit water leidt tot poriën. Het achtergebleven water zoekt een weg naar buiten wat aanleiding geeft tot interne spanningen in het verharde beton. Vandaar is het aan te raden, ervoor te zorgen dat na de cementhydratatie wat cement overblijft omdat de cementkorrels nog als vulstof kunnen optreden (Walraven, 2006; Buytaert, Ronsse, 2010).

1.2.3.4 Vulstoffen

Door het toevoegen van uiterst fijne stoffen (grafiek 1) is het mogelijk om de miniholten in die overgangszone op te vullen. De aanwezigheid van superplastificeerder is daarbij essentieel om vlokvorming te vermijden. Mogelijke stoffen zijn onder andere vliegashuis, kalksteenfiller, gemalen kwarts, gemalen hoogovenslakken en silica fume. (De Schutter, Apers, 2007)



Grafiek 1: Korrelverdeling van fijne stoffen (De Schutter, Apers, 2007):

1. Cement
2. Fijne kalksteendeeltjes
3. Ultrafijne kalksteendeeltjes
4. Ultrafijne siliciumhoudende deeltjes
5. Silica fume

Silica fume, vliegashuis en hoogovenslak zijn de meest gebruikte vulstoffen bij het fabriceren van (ultra)hoogsterktebeton. Voornamelijk hun goede eigenschappen inzake sterkteontwikkeling zijn uitermate interessant. Er dient echter opgemerkt te worden dat de sterkteontwikkeling niet enkel kan bereikt worden door uitsluitend gebruik te maken van deze materialen. Ze dienen te worden gecombineerd met cement zodat zij hun “vullende” functie optimaal kunnen vervullen. Meestal wordt een volume van 5 tot 20 % van het totale cementgehalte aan vulstof toegevoegd (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002). Deze maxima worden tegenwoordig wel al overschreden. In dit onderzoek is gewerkt met een silica fume gehalte van 25 %. In wat volgt wordt eerst vliegashuis en daarna silica fume besproken.

Vliegashuis

Door het waterreducerend vermogen van vliegashuis kan de sterkteontwikkeling verbeterd worden. Bovendien wordt ook het luchtgehalte verminderd waardoor minder holtes in het beton aanwezig zijn. Dit draagt bij tot de ontwikkeling van een hogere sterkte. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002; Buytaert, Ronsse, 2010).

Het gebruik van vliegashout gaat haast altijd gepaard met een hoeveelheid superplastificeerder. Zonder de superplastificeerder heeft het vliegashbeton een zeer slechte verwerkbaarheid. De superplastificeerder beïnvloedt vooral de slump. De slump zal dalen bij stijgende hoeveelheid vliegash (Bouzoubaâ, Fournier, 2002; Bouzoubaâ N. et al., 2001; Bilodeau, Malhotra, 2000; Dheedene, Maes, Masson, 2008).

Er bestaan twee types vliegash, namelijk het calciumhoudende type C (volgens NBN EN 197- 1: type W) en het siliciumhoudende type F (volgens NBN EN 197-1: type V), zoals weergegeven in tabel 6. De benaming in deze studie, klasse F en klasse C, gebeurt volgens de norm ASTM C 618. Type C bevat nog een belangrijke hoeveelheid CaO, waardoor het vliegash buiten de puzzolane ook nog enigszins hydraulische eigenschappen bezit. Het type F bevat een geringer CaO gehalte en heeft enkel puzzolane eigenschappen. Vliegashen gebruikt in België zijn steeds van het type F. (NBN EN 197-1; ASTM C 618; Lammertijn S., 2007; Dheedene, Maes, Masson, 2008)

	Siliciumhoudende Vliegashen (V)	Calciumhoudende vliegashen (W)	
		Laag calciumhoudend	Hoog calciumhoudend
(CaO)	< 10 %	10 tot 15 %	≥ 15 %
(SiO ₂)	> 25 %	> 25 %	-
(CaO) vrij	< 1 %	expansieproef	expansieproef
Gloeiverlies	< 5 %	< 5 %	< 5 %

Tabel 6: Types vliegash volgens norm NBN EN 197-1.

De chemische samenstelling van vliegash en de variaties hierin worden voornamelijk bepaald door de herkomst. De gemiddelde waarden met bijhorende standaardafwijking worden weergegeven in tabel 7.

Verbinding	Gemiddeld (%)	Standaardafwijking (%)
SiO ₂	51,1	1,4
Al ₂ O ₃	26,1	0,9
Fe ₂ O ₃	7,8	1,3
CaO	5,2	0,6
MgO	1,6	0,2
K ₂ O	1,4	0,2
C	4,4	0,4
< 30µm	63,1	8,3

Tabel 7: Gemiddelde chemische samenstelling van vliegash.

De fysische kenmerken van vliegas zijn:

Absolute volumieke massa	2000 à 2400 kg/m ³
Schijnbaar volumieke massa	± 1000 kg/m ³
Korrel diameter	1 à 130 µm
Specifieke oppervlakte	260 à 520 m ² /kg

Tegenwoordig is het mogelijk om hoge hoeveelheden vliegas in het beton te verwerken. Hoewel het gebruik ervan in veel normen nog beperkt wordt, zoals in norm NBN B 15-001 (vliegas < 33 % cement voor CEM I of vliegas < 25 % cement voor CEM III/A), ligt de toekomst echter in het gebruik van hoge volumes vliegas (≥ 50 %). Het gebruik van Hoog-Volume-Vliegasbeton (HVFA-beton) is niet enkel goed voor de sterkte en de duurzaamheid maar ook voor het milieu.

Er volgen nog enkele richtlijnen voor het gebruik van HVFA-beton volgens Malhotra en Mehta:

- Minimum massapercentage van 50 % vliegas van het cementgebonden materiaal.
- Cementgehalte doorgaans lager dan 200 kg/m³.
- Voor betonmengsels met een gespecificeerde druksterkte op 28 dagen van 30 MPa of hoger, slumpwaarden groter dan 150 mm en w/c gehalten tot 0,30, is het gebruik van water-reducerende toevoegmaterialen (superplastificeerders) verplicht.
- Voor betonmengsels met slumpwaarden lager dan 150 mm en een druksterkte op 28 dagen kleiner dan 30 MPa, mogen HVFA-mengsels met een w/c factor kleiner dan 0,40 gebruikt worden zonder superplastificeerders.

(Malhotra, Mehta, 2002; Dheedene, Maes, Masson, 2008)

Silica fume

In tegenstelling tot vliegas laat het duurdere silica fume de vrije waterhoeveelheid toenemen en zorgt het voor een daling van het luchtgehalte. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002). Bovendien heeft silica fume ook het beste vullende effect door haar uiterst fijne korrels en haar specifiek oppervlak. Verder bezit silica fume ook puzzolane eigenschappen waardoor zij zich bindt met de kalk die vrijkomt tijdens de hydratatiereactie van cement. Op die manier draagt deze vulstof bij tot de sterkteontwikkeling van het betonmengsel (De Schutter, Apers, 2007; Desmyter, Dieryck, Leuridan, 2002; Buytaert, Ronsse, 2010).

De chemische samenstelling van microsilica is afhankelijk van de gebruikte grondstoffen voor de siliciumproductie. Tabel 8 geeft een voorbeeldsamenstelling van silica fume uit Noorwegen.

Component	Gehalte (%)
SiO ₂	90,0 – 96,0
AlO ₃	0,5 – 3,0
Fe ₂ O ₃	0,2 – 0,8
MgO	0,5 – 1,5
CaO	0,1 – 0,5
Na ₂ O	0,2 – 0,7
K ₂ O	0,4 – 1,0
C	0,5 – 1,4
S	0,1 – 0,4
Gloeiverlies	0,7 – 2,5

Tabel 8: Chemische samenstelling van silica fume van ovens voor siliciumproductie uit Noorwegen (Dheedene, Maes, Masson, 2008)

De fysische gegevens voor silica fume zijn:

Absolute volumieke massa	2200 kg/m ³
Schijnbaar volumieke massa	150 - 300 kg/m ³
Gemiddelde korreldiameter	± 0,15 µm
Specifieke oppervlakte	20000 m ² /kg

Norm NBN EN 206-1 laat het gebruik van silica fume in beton toe, maar enkel in combinatie met CEM I ($\geq 42,5$). De massaverhouding microsilica/cement mag niet groter zijn dan 0,11. Net zoals bij vliegassen ligt de toekomst in het gebruik van hogere gehalten silica fume (Dheedene, Maes, Masson, 2008).

Volgens Bouzoubaâ vermindert de hoeveelheid ingesloten lucht met stijgende hoeveelheid silica fume, waardoor het gebruik van een luchtbelvormer stijgt. Dit zorgt ook voor een betere bescherming tegen vorst- en dooicycli. (Bouzoubaâ N. et al., 2002; Dheedene, Maes, Masson, 2008)

Zoals bij vliegass daalt ook hier de slump bij toename van het gehalte silica fume. Vooral bij lage w/c-factoren is de daling van de slump sterk voelbaar. Voor betonmengelingen met hogere

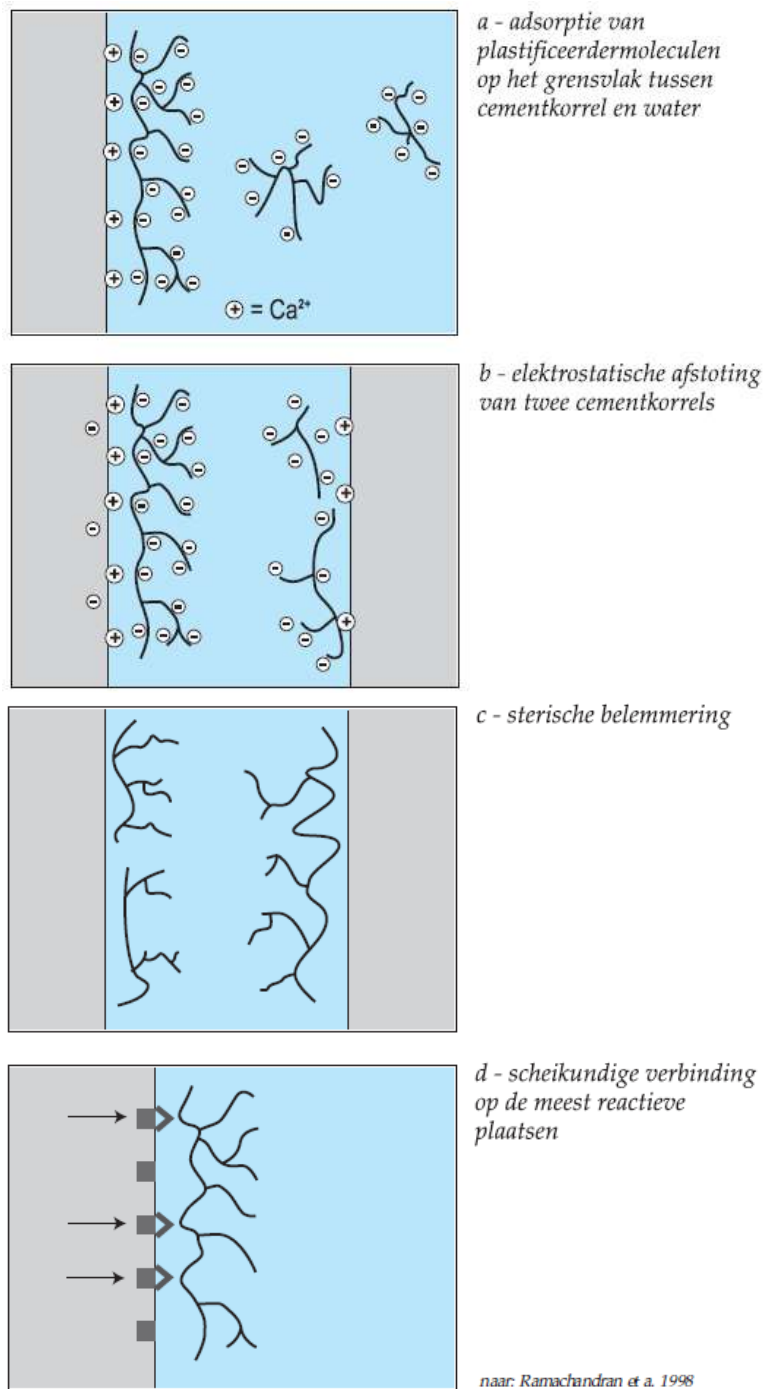
w/c-factor ($> 0,35$) is het verlies in slump minder nadrukkelijk bij een stijgende hoeveelheid silica fume. (Duval, Khadri, 1998; Dheedene, Maes, Masson, 2008)

Silica fume heeft geen noemenswaardige invloed op de totale krimp. De stijging van de autogene krimp wordt opgevangen door de vermindering van de krimp ten gevolge van de droging. (Bouzoubaâ N. et al., 2002; Mazloom M. et al., 2004; Maes & Masson, 2008)

1.2.3.5 Hulpstoffen

Zoals reeds eerder is aangehaald, zal de w/c-factor een stuk lager liggen bij hoogsterktebeton dan bij traditioneel beton. Dit heeft voor gevolg dat de verwerkbaarheid ontoelaatbaar slecht zou worden zonder het gebruik van superplastificeerders. Deze waterreducerende vloeimiddelen laten enerzijds toe het watergehalte van een gegeven betonmengsel te verminderen zonder dat de verwerkbaarheid wordt gewijzigd. Anderzijds is het mogelijk de verwerkbaarheid te verbeteren zonder het watergehalte te veranderen (Dieryck, Desmyter, & Bleiman, 2005; Buytaert, Ronsse, 2010).

De superplastificeerders verhinderen de nefaste vlokvorming doordat de moleculen van deze superplastificeerder zich vasthechten door adsorptie op het grensvlak tussen cementkorrel en aanmaakwater. Eens geadsorbeerd vormt de superplastificeerder een negatieve lading rond elk cementkorreltje (figuur 3). Hierdoor stoten de korrels zich onderling af. De dispersie die hiervan het gevolg is, verlaagt de viscositeit van de cementpasta en doet de verwerkbaarheid toenemen. Ook de moleculaire opbouw, in de vorm van lange kettingen, van de superplastificeerder draagt bij tot dit effect. Aan elkaar rijgen tot slierten met vertakkingen in verschillende richtingen slingeren de moleculen zich tussen de cementkorrels door en belemmeren zo hun onderlinge toenadering. Met moderne 'kamvormige' polymeerstructuren is het mogelijk de water-cementfactor te verlagen tot minder dan 0,3 (De Schutter, Apers, 2007).



Figuur 3: Superplastificeerders verhinderen vlokvorming (De Schutter, Apers, 2007)

Bovendien zal door de toevoeging van superplastificeerder het mengsel meer plastische eigenschappen vertonen (Felekoglu, 2008; Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002; Buytaert, Ronsse, 2010).

Buiten deze positieve eigenschappen dient te worden opgemerkt dat aan het gebruik van superplastificeerders ook een aantal nadelen verbonden zijn. Omdat een grote hoeveelheid

van de superplastificeerder wordt gebruikt voor de diffusie van het water, cement en de puzzolane vulstoffen verschilt hun werking naar gelang de gebruikte cementsoort. Er moet met andere woorden een bepaalde match zijn tussen het cement en de superplastificeerder. De fijnheid en de samenstelling van het cement zijn hiervoor bepalend (Chang, Peng, 2001). Verder dient ook opgemerkt te worden dat de hogere vloeibaarheid slechts van korte duur is en het mengsel dus snel opstijft. Er zal dus snel moeten worden gewerkt. Bovendien is de hoge kostprijs van deze hulpstof niet te onderschatten (Dieryck, Desmyter, & Bleiman, 2005; Buytaert, Ronsse, 2010).

1.2.3.6 Eigenschappen

Sterkte

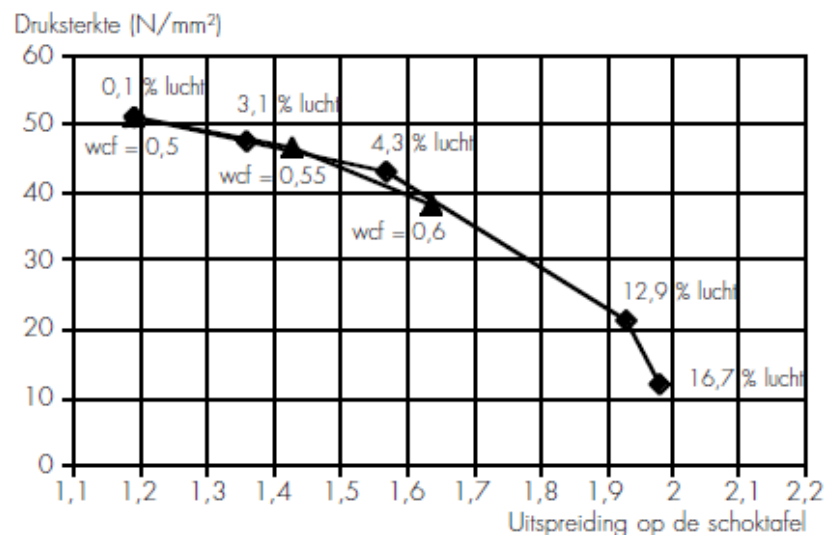
De wet van Féret kan gebruikt worden om de invloed van de porositeit op de sterkte van het beton te evalueren.

$$f_{c,cub} = K \left(\frac{c}{c+w+a} \right)^2 \text{ (Christiaens, De Schutter, 2006)}$$

$f_{c,cub}$	= druksterkte gemeten op kubussen na 28 dagen [N/mm ²];
K	= een factor afhankelijk van de kwaliteit van het cement [N/mm ²];
c	= het absoluut volume van het cement [m ³];
w	= het totale volume water [m ³];
a	= het volume lucht [m ³];

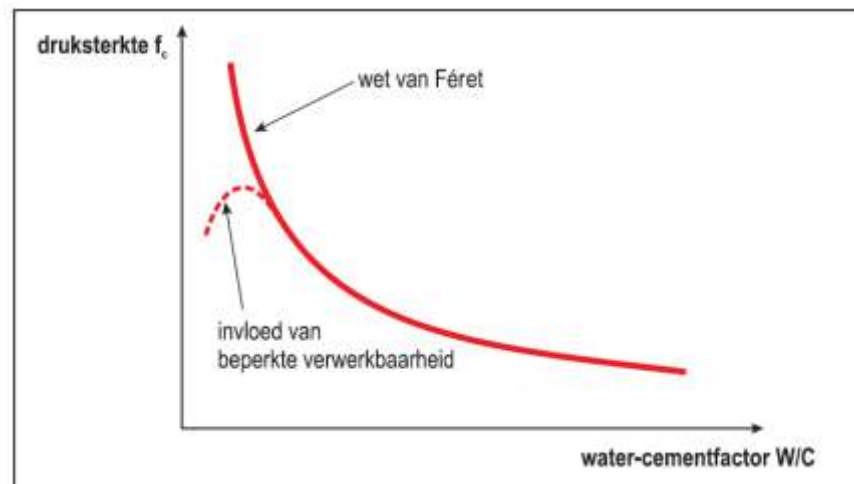
Uit deze formule kan worden afgeleid dat een afname van het luchtgehalte in beton leidt tot een verhoging van de druksterkte (WTCB, 2003) en dat de druksterktes sterker toenemen naarmate het luchtgehalte in het beton daalt.

In grafiek 2 is er duidelijk een afname van druksterkte te zien bij de toename van het luchtgehalte en bij toename van de w/c-factor (WTCB, 1993).



Grafiek 2: Invloed van w/c factor en het luchtgehalte op de druksterkte van beton

Er dient wel opgemerkt te worden dat bij een te lage w/c-factor het beton onverwerkbaar wordt. De holten en de poriën die daarvan het gevolg zijn, doen de sterkte weer verminderen, zoals aangegeven in de grafiek 3 (De Schutter, Apers, 2007).

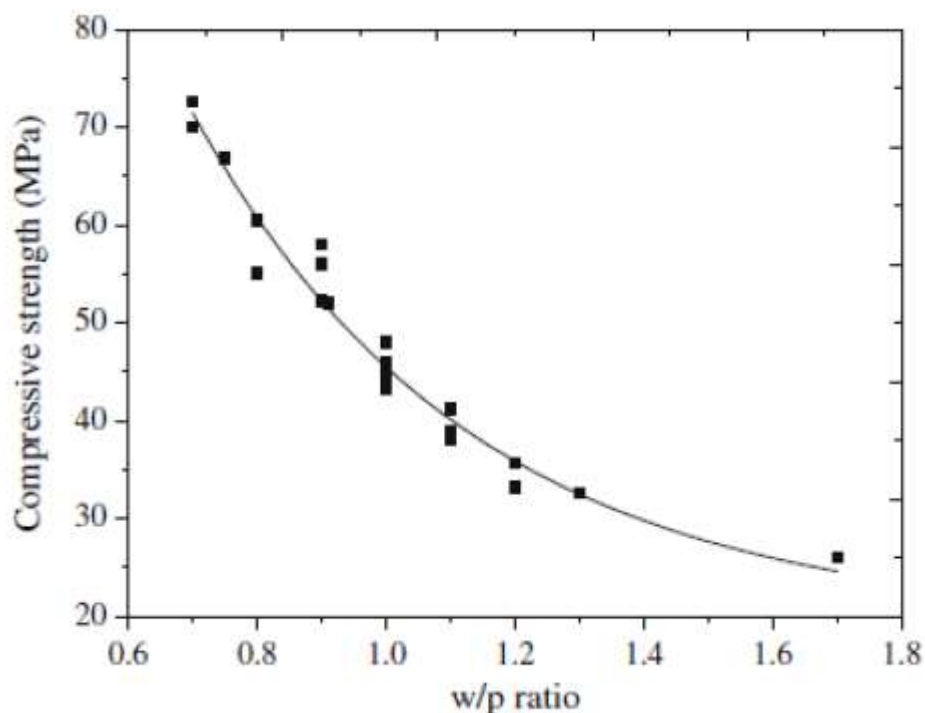


Grafiek 3: Verband tussen druksterkte en water-cementfactor (De Schutter, Apers, 2007)

Net zoals elk ander betontype wordt de sterkte van UHPC hoofdzakelijk beïnvloed door de w/c-factor. In die zin zal bij een gegeven hoeveelheid cement de sterkte aanzienlijk dalen naarmate het gehalte aanmaakwater stijgt (grafiek 3). Vandaar dat een w/c-factor van 0,20 tot

0,40 aangewezen is ter vervaardiging van (ultra)hoogsterktebeton (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002). In andere artikels wordt zelfs al een w/c-factor van 0,15 vooropgesteld (Richard, Cheyrezy, 1995).

Verder onderzoek heeft aangetoond dat de druksterkte niet enkel een relatie heeft met de w/c-factor, maar ook met de w/p-factor. Ook hier zal de druksterkte dalen naarmate de w/p-factor zal stijgen. Grafiek 4 illustreert dit fenomeen (Nanthagopalan, Santhanam, 2009 ; Buytaert, Ronsse, 2010).



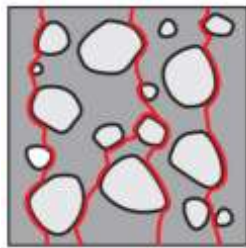
Grafiek 4: Verband tussen de w/p-factor en de ontwikkelde druksterkte in verhard beton na 28 dagen (Nanthagopalan, Santhanam, 2009).

De waterbehoefte neemt toe naarmate het gehalte aan fijne granulaten in het mengsel toeneemt. Dit effect kan worden verminderd door een gedeelte van de fijne granulaten te vervangen door vulstoffen, deze zorgen ook voor het ontwikkelen van een hogere sterkte. Door de lage w/c-factor heeft (ultra)hoogsterktebeton eveneens een zeer lage capillaire porositeit, waardoor de mate van indringing van vloeistoffen en gassen aanzienlijk lager is dan bij traditioneel beton. De duurzaamheid van het beton is daardoor een stuk hoger.

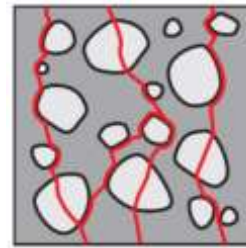
Doorgaans vereist (ultra)hoogsterktebeton niet alleen een hoge eindsterkte maar ook een hoge beginsterkte. Om een snelle sterkteontwikkeling te bereiken kan worden ingegrepen op verschillende factoren (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, Macleod, McGrath, 2002):

- Gebruik maken van cementsoorten met een vroege en snelle sterkteontwikkeling (bv. 52,5 R).
- Het cementgehalte opdrijven naar 400 tot 600 kg/m³ beton.
- Een hogere temperatuur, zowel bij de vervaardiging van het mengsel als bij de bewaring van de proefstukken.
- Het gebruiken van chemische stoffen of vulstoffen.
- Het isoleren van de elementen voor het behouden van de hydratatiereactie.

Als beton met normale sterkte op druk belast wordt, zullen de aanhechtingsscheuren tussen mortelmatrix en granulaat zich uitbreiden rondom de granulaatkorrels. Bij het benaderen van de druksterkte zullen deze hechtscheuren zich verder zetten doorheen de mortelmatrix, met de vorming van mortelscheuren tot gevolg. Uiteindelijk zal het beton bezwijken door een netwerk van doorgaande mortelscheuren, terwijl de granulaatkorrels geen schade vertonen (figuur 4)(De Schutter, Apers, 2007).



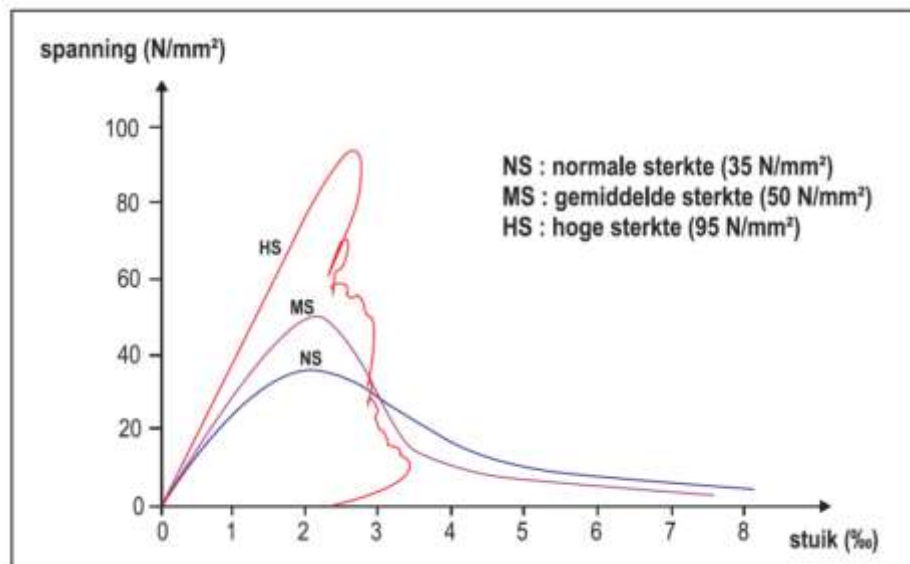
Figuur 4: Traditioneel beton (De Schutter, Apers, 2007)



Figuur 5: Hoogsterktebeton: ook scheuren door granulaatkorrels (De Schutter, Apers, 2007)

Bij hoogsterktebeton is er een verbeterde aanhechting tussen de granulaatkorrels en de cementmatrix. Bovendien benadert de matrixsterkte zo goed als de sterkte van de granulaatkorrels. Het gevolg is dat de vorming en aangroei van hechtscheuren of microscheuren wordt uitgesteld. Bij het benaderen van breuk kunnen de scheuren nu ook doorheen de granulaatkorrels lopen (figuur 5) (De Schutter, Apers, 2007).

In het spanning-vervorming diagram (grafiek 6) is bij hoogsterktebeton het lineair gedrag iets beter waarneembaar dan bij traditioneel beton. Hoogsterktebeton vertoont wel een veel sterkere terugval na het bezwijken. Na het bezwijken van het beton, zal de draagkracht bijzonder snel naar nul terugvallen. Hoogsterktebeton heeft een brosser breukgedrag dan traditioneel beton (De Schutter, Apers, 2007).

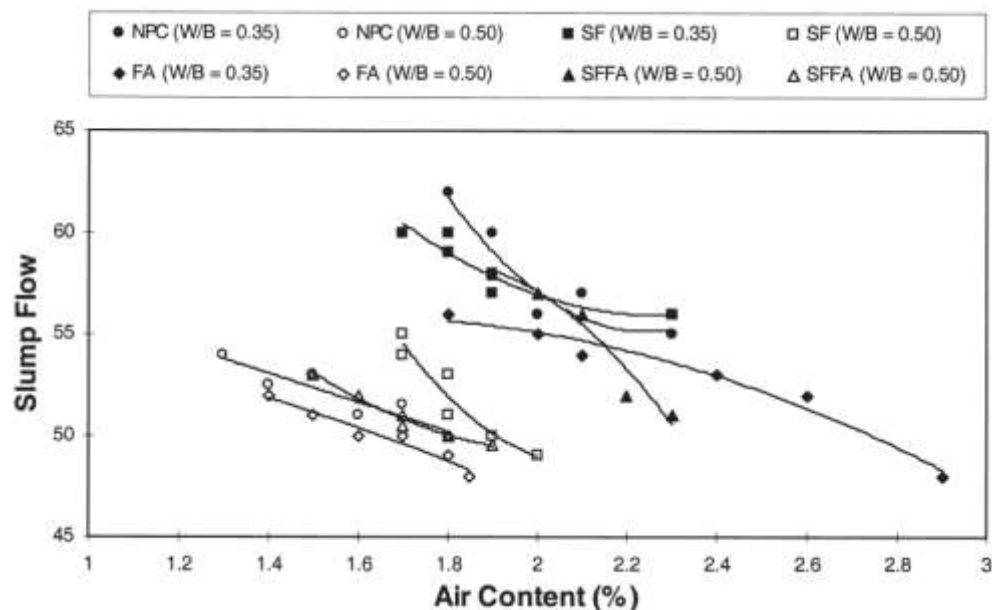


Grafiek 5: Spanning-vervorming diagram (De Schutter, Apers, 2007)

Verwerkbaarheid

De beoordeling van de verwerkbaarheid van hoogsterktebeton vereist bijzondere aandacht. Hoogsterktebeton is thixotroop en vereist een test die energie stopt in het mengsel, om vervolgens de beweging van het beton op te meten. Volgens Zain (1999) is de traditionele slump flow test (§ 3.1.2) niet geschikt voor hoogsterktebeton, omdat het beton niet naar behoren vloeit als de mal wordt opgeheven. Dit is ook gedeeltelijk waar voor de V-funnel test (§ 3.1.1), maar toch geeft die de beste resultaten. De vloeibaarheid en dus ook de verwerkbaarheid kunnen niet efficiënt worden gemeten met een traditionele slump flow test. Desondanks wordt er in recente onderzoeken veelvuldig gebruik gemaakt van de slump flow als maatstaaf voor de verwerkbaarheid. In dit afstudeerwerk is omwille van die reden zowel de slump flow als de uitstroomtijd gemeten. Er wordt vanuit gegaan dat de verwerkbaarheid toeneemt als de uitstroomtijd daalt en de slump flow stijgt. In de praktijk wordt beton met een slump flow van meer dan 700 mm aanzien als goed zelfverdichtend beton (Boel, 2006).

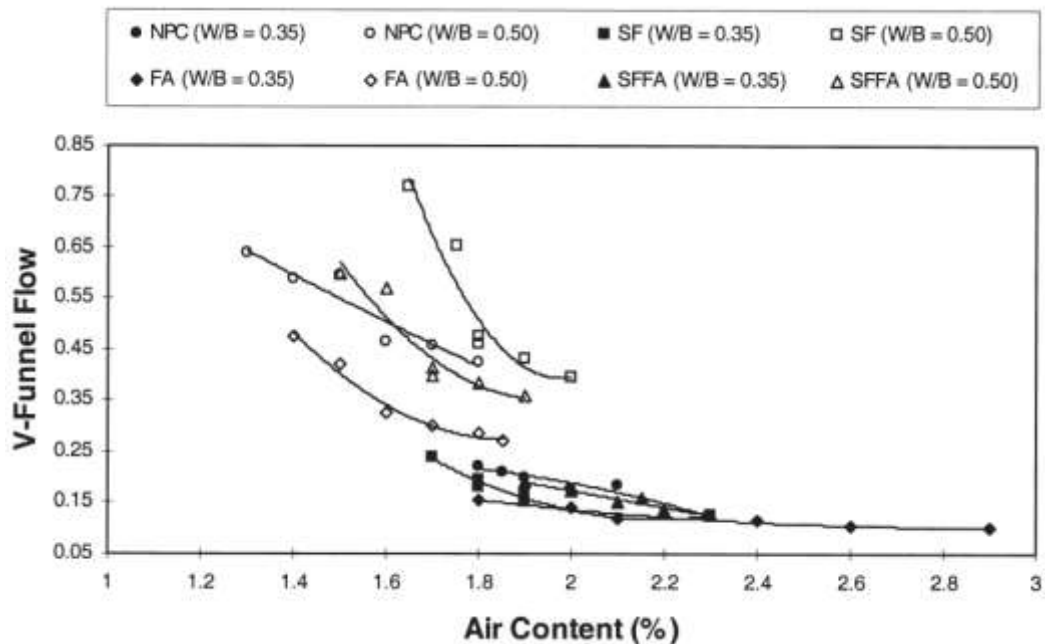
Uit experimenten naar de eigenschappen van vloeibaar beton, is gebleken dat er een relatie bestaat tussen het luchtgehalte in vloeibaar beton en de verwerkbaarheid. Grafieken 6 en 7 tonen de relatie tussen het luchtgehalte en de slump flow enerzijds en het luchtgehalte en de uitstroomsnelheid (in liter/seconde) anderzijds. Het is duidelijk dat zowel de slump flow als de uitstroomsnelheid afnemen als het luchtgehalte toeneemt (Zain, 1999). Onderzoeken in het labo Magnel (door Dimitri Feys) bevestigen dat een hoger luchtgehalte een lagere slump flow met zich meebrengt. Dat een hoger luchtgehalte leidt tot een lagere uitstroomsnelheid wordt tegengesproken. Een verklaring hiervoor kan gevonden worden door het feit dat bij een hoger luchtgehalte de viscositeit daalt, wat resulteert in een hogere uitstroomsnelheid. De slumpflow zou eerder gerelateerd zijn aan de “yield stress”, met hogere slump flow voor lagere “yield stress”. Met stijgend luchtgehalte zou dan een lagere slump flow gevonden worden. Verder onderzoek naar de invloed van lucht op de rheologische eigenschappen van beton is dus zeker noodzakelijk (De Schutter).



Grafiek 6: Relatie tussen de slump flow en het luchtgehalte (Zain, 1999)

Er kan ook opgemerkt worden dat de vloeibaarheid hoger ligt bij mengsels met een w/b-factor van 0,35 dan bij mengsels met een w/b-factor van 0,50 (grafiek 6). Dit kan verklaard worden doordat er bij een w/b-factor van 0,35 minder granulaten worden gebruikt en er dus meer cement en water aanwezig is. Er zal bijgevolg een hogere hoeveelheid cementpasta aanwezig zijn, waardoor de viscositeit zal dalen. Dit resulteert in een hogere slump en slump flow (Zain, 1999).

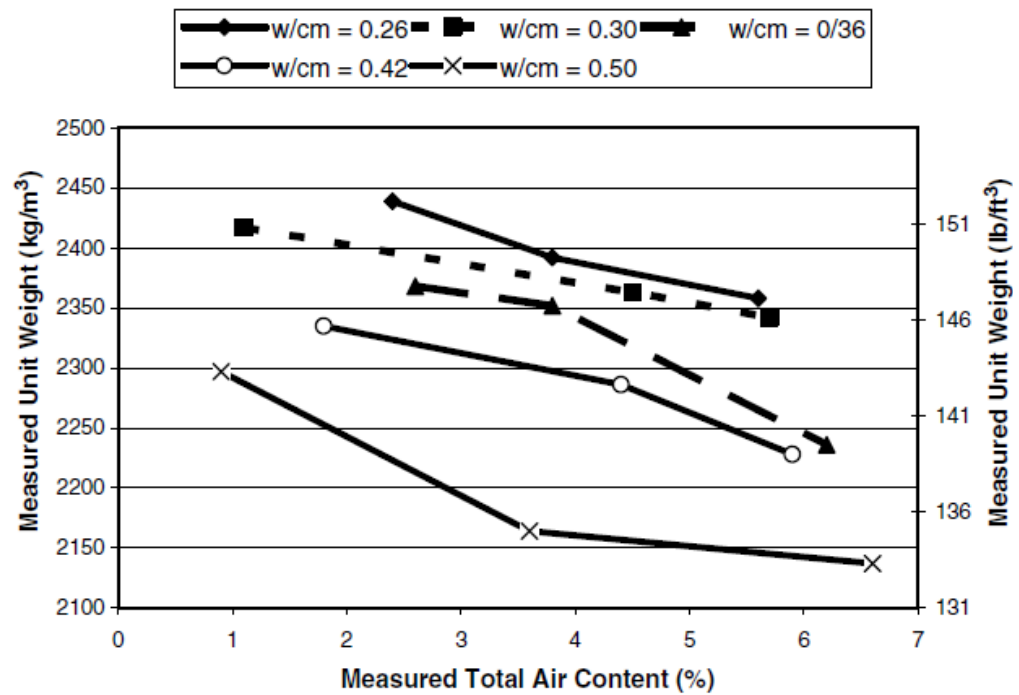
Bovendien vertoont hoogsterktebeton meestal een lijmachtig gedrag vanwege de samenhang. Dit resulteert in een kleiner debiet (grafiek 7). Toevoeging van superplastificeerder zorgt ervoor dat de vraag naar water verminderd en heeft het mengsel een betere vloeibaarheid. Beton met een w/b-factor van 0,35 bevat doorgaans meer superplastificeerder waardoor de slump en de slump flow hoger worden (Zain, 1999).



Grafiek 7: Relatie tussen V-Funnel en luchtgehalte (Zain, 1999)

Dichtheid

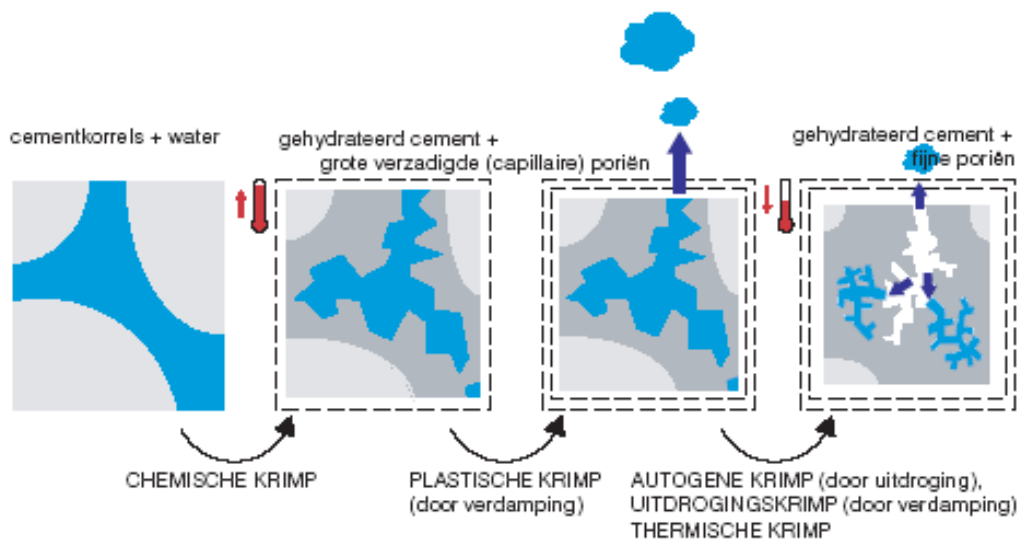
Een belangrijke parameter in het ontwikkelen van (ultra)hoogsterktebeton is de pakkingsdichtheid van de korrels. Door het toevoegen van toeslag- en vulstoffen kan een hogere dichtheid van het betonmengsel verkregen worden (grafiek 8). Die zwaardere componenten nemen dan de plaats in van de luchtholtes, waardoor het luchtgehalte daalt (Walraven, 2006; Lamond, 2006; Lanoote, Naert, 2010).



Grafiek 8: Soortelijk gewicht i.f.v. het luchtgehalte

Krimp

Zowel hoogsterktebeton als normaal beton zijn onderhevig aan plastische krimp, autogene krimp en uitdrogingskrimp.



Figuur 6: De voornaamste types betonkrimp (Febelcem 2003)

Plastische krimp

Plastische krimp wordt beïnvloed door externe factoren: een lage luchtvochtigheid, temperatuurverschillen tussen betonspecie, omringende lucht en wind. Het treedt altijd op in de eerste uren na het storten en verdichten.

Buiten de externe factoren kan ook de betonsamenstelling een grote invloed hebben op het risico van plastische krimp. Het risico is het grootst bij zeer stabiele mengsels. Vaak zijn dit mengsels waarin veel grondstoffen voorkomen met een hoog specifiek oppervlak, dus met een groot watervasthoudend vermogen. Voorbeelden daarvan zijn beton met hoge sterkte (met veel cement en silica fume), zelfverdichtend beton (met een hoog aandeel fijne vulstof) en colloïdaal beton met speciale colloïdale hulpstoffen. Bij ultrahoogsterktebeton zal de plastische krimp dus heel hoog zijn (De Schutter, Apers, 2007; Desmyter, Dieryck, Leuridan, 2002).

Plastische krimp kan worden voorkomen door een goede en tijdige nabehandeling die voldoende lang wordt volgehouden. Om de vochtigheid te handhaven moeten de blootgestelde oppervlakken beschermd worden door middel van een curing compound, een ondoorlatend membraan of een ander procédé. Voor zover de uitvoering het mogelijk maakt, moet de tijd die verstrijkt tussen het storten van het beton en het aanbrengen van de bescherming, zo kort mogelijk zijn. Het grootste waterverlies vindt immers plaats tijdens de eerste uren volgend op het verdichten van het beton. Meestal wordt het beton afgedekt met een plasticfolie, of anders wordt een curing compound verstoven (Ployaert, 2010).



Figuur 7: Betonwand na ontkisting beschermd met behulp van een zeil (Ployaert, 2010)

Autogene krimp

Wanneer cement reageert met een bepaalde hoeveelheid water, zal dit hydratatieproces gepaard gaan met een volumevermindering. Het volume dat na volledige hydratatie

ingenomen is, is ongeveer 10 % kleiner dan het oorspronkelijke volume. Autogene krimp zal altijd en in elk beton plaatsvinden aangezien het een gevolg is van het hydratatieproces.

In het begin van de hydratatie kan het plastische beton gemakkelijk de vervormingen ondergaan. Het is maar van zodra het beton stijver begint te worden, dat de vervormingen verhinderd worden. Hierdoor ontstaan trekspanningen in de met water gevulde ruimten. Deze poriën in wording zetten uit waardoor er onderdruk ontstaat die de buitenlucht doet aanzuigen. In de nu onvolledig met water gevulde ruimte ontstaan capillaire krachten die de poriën doen samentrekken. In een traditioneel beton waarin er een overschot aan water is, blijft de autogene krimp beperkt. In een hoogsterktebeton die normaal veel minder water bevat, zuigt het cement het weinige water naar zich toe. De poriën die alsmaar meer uitdrogen, geraken onderhevig aan steeds stijgend capillaire krachten, waardoor de autogene krimp begrijpelijk hogere waarden kan aannemen. Autogene krimp neemt dus toe als de sterkte toeneemt en vergt zeker bij hoogsterktebeton de nodige aandacht (De Schutter, Apers, 2007; Ma, Schneider, 2002).

Bij een lage w/c-factor ($< 0,40$) en verhinderde vervorming, is het niet altijd mogelijk scheurvorming door inwendige droging te vermijden. Wel kan de scheuropening beperkt blijven (Ployaert, 2010):

- door rekening te houden met de bijkomende spanningen eigen aan het ontwerp (wapening, voorspanning);
- door het oppervlak in een waterverzadigde toestand te houden vanaf het einde van de verwerking van het beton.

Uitdrogingskrimp

Bij uitdrogingskrimp zal er water verdampen uit de poriën, dit kan enkel als de omgeving niet met water verzadigd is. Net zoals bij de autogene krimp ontstaan er capillaire krachten die de poriën doen samentrekken met een volumevermindering als resultaat. De mate van de uitdrogingskrimp hangt in grote mate af van de hoeveelheid verdampbaar water in het beton. Een belangrijk deel van het water kan in normale omstandigheden niet verdampen omdat het chemisch verbonden is of vastzit tussen de hydratatieproducten. Bij het andere deel zal het verdampen gemakkelijker verlopen naarmate de poriën groter zijn. Typisch voor een hoogsterktebeton zijn de beperkte poriënruimten, waardoor het minder onderhevig zal zijn aan uitdrogingskrimp. De uitdrogingskrimp zal dus dalen bij toenemende sterkte en kan ook na lange tijd nog steeds toenemen. (De Schutter, Apers, 2007; De Vries, 2005).

1.2.4 Mengtijd & mengsnelheid

1.2.4.1 Inleiding

Sinds het begin van de jaren 1990 is er begonnen met de ontwikkeling van ultrahoogsterktebeton. Een beton met een goede verwerkbaarheid, hoge duurzaamheid maar vooral een heel hoge druksterkte. Naast het optimaliseren van de betonsamenstellingen moet er ook gezocht worden naar methodes om dit type beton rendabel te maken. De mengtijd speelt daarin een grote rol. Tot dan was de productie van (ultra)hoogsterktebeton slechts mogelijk bij hele lange mengtijden. In constructies gemaakt met behulp van dergelijk beton waren mengtijden van meer dan 12 minuten zeker niet ongevoel (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009). In de experimenten van Fehling, Schmidt en Stürwald (2008) worden zelfs mengtijden van 20 minuten voorgesteld.

De lange mengtijden zijn hoofdzakelijk te wijten aan de speciale samenstelling van dit beton. Er worden zeer lage w/c verhoudingen ($< 0,25$) gebruikt en er zijn hoge gehalten superplastificeerder en fijne mineralen toegevoegd. De hoge sterkte van UHPC wordt verkregen door een hoge pakingsdichtheid van de deeltjes. Deze hoge dichtheden worden verkregen door een efficiënte spreiding van de fijne deeltjes tussen het cement en de agglomeraten (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009). De tijd die nodig is om een uniforme verdeling te bereiken van een korrelvormig materiaal in een mix wordt rechtstreeks evenredig verondersteld met de gemiddelde diameter van het materiaal (Johansson, 1971). Dit impliceert dat een uniforme verdeling van de grove granulaten sneller wordt bereikt dan bij zand of fijne deeltjes. UHPC bevat meer fijne deeltjes dan traditioneel beton dus zal er een langere mengtijd nodig zijn (Chopin, Larrard & Cazacliu, 2004). De toevoeging van superplastificeerders gebaseerd op polycarboxylaat ether is essentieel omdat zij de verspreiding mogelijk maakt (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).

1.2.4.2 Definitie van de stabilisatietijd

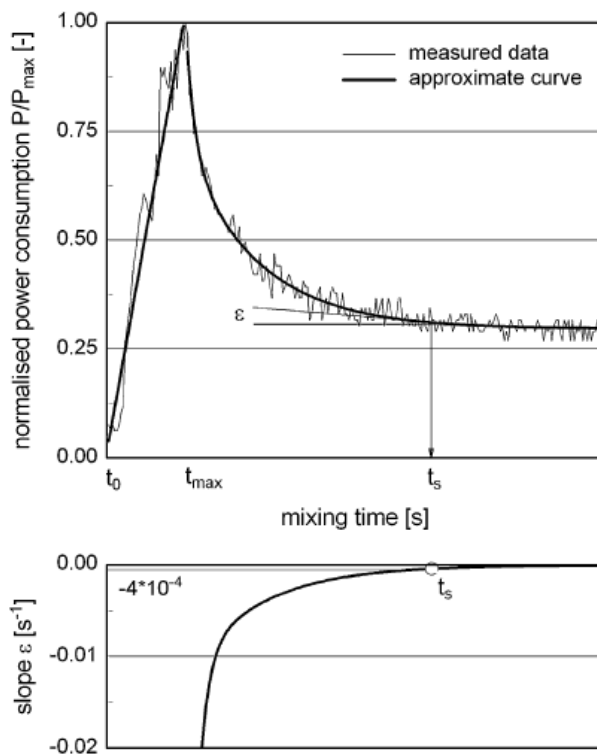
Voor de industriële productie van beton is de energieverbruikcurve in functie van de tijd vaak opgenomen om de tijd te bepalen voor het ledigen van de mixer. Als algemene regel geldt dat het beton geloosd wordt als de stabilisatietijd is bereikt. In onderzoeken (Chopin, De Larrard, Cazacliu, 2004; Mazanec, Schießl, 2008) is bewezen dat optimale beton eigenschappen worden

verkregen van zodra het aangewende vermogen daalt met een bepaald percentage. Dit maakt de berekening van de stabilisatietijd (t_s) en dus het bepalen van de kortste mengtijd mogelijk.

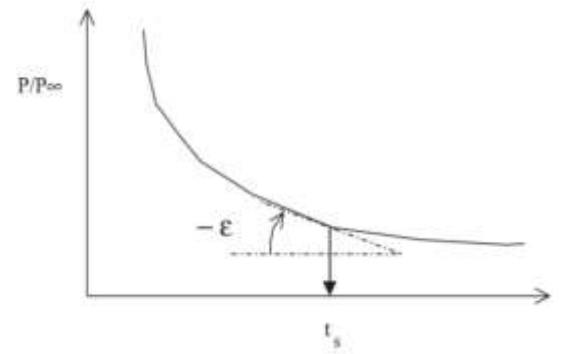
Voor het bepalen van t_s wordt de energieverbruikcurve uitgezet in functie van de tijd (grafiek 9 en 10). In de curve kunnen 2 gebieden worden opgemerkt, één voor en één na de piek. Het deel voor de piek wordt wiskundig benaderd met een lineaire functie, terwijl het deel na de piek wordt benaderd met een exponentiële functie.

$$P/P_{max} = P_0 + P_1 e^{-\frac{t}{t_1}} + P_2 e^{-\frac{t}{t_2}}$$

De parameters P_0 , P_1 en P_2 , alsook t_1 en t_2 beschrijven respectievelijk het vermogenbereik en de tijdsafhankelijkheid van de energieverbruikcurve. De stabilisatietijd wordt bepaald als de tijd waar de gradiënt $\varepsilon = dP/dt$ gelijk is aan $-4 \times 10^{-4} s^{-1}$. Na deze tijd vertonen alle betonmengelingen, ongeacht de mengsnelheid, een optimale verwerkbaarheid wat aangeeft dat alle onderdelen goed gemengd zijn (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).



Grafiek 9: Definitie van de stabilisatietijd t_s (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009)



Grafiek 10: Definitie van de stabilisatietijd t_s (Chopin, Larrard & Cazaciu, 2004)

1.2.4.3 Effect van betonsamenstelling

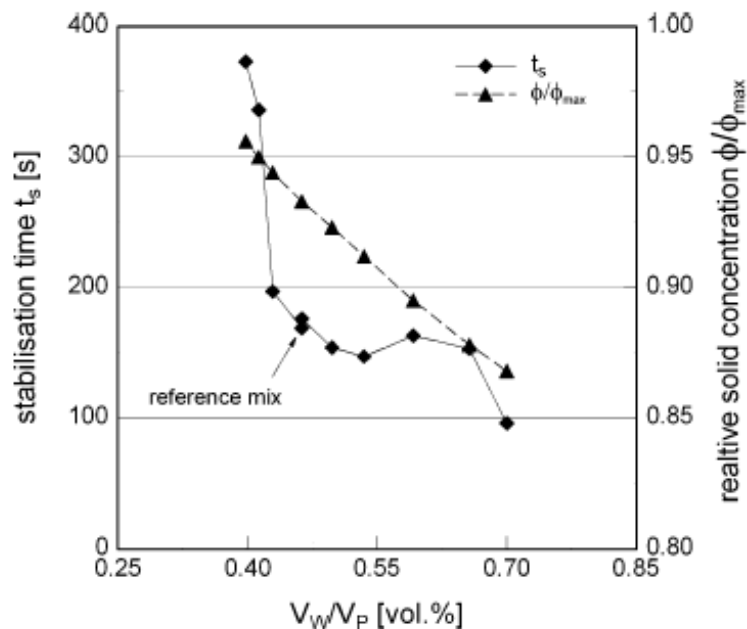
Zoals reeds vermeld is de nodige mengtijd (t_s) afhankelijk van de mengsnelheid (Lowke, Schießl, 2005) en de betonsamenstelling (Chopin, De Larrard, Cazacliu, 2004; Mazanec, Schießl, 2008).

De grafieken die volgen in dit hoofdstuk zijn gebaseerd op onderstaande mengeling (75I).

Componenten	UHPC (kg/m ³)
Cement	853
Kwarts	212
Silica fume	138
Water	167
Zand 0/0,5	999
Superplastificeerder	35

Tabel 9: Betonsamenstelling (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).

In grafiek 11 wordt de stabilisatietijd uitgezet in functie van volumetrische water-poeder verhouding (V_w/V_p). Met poeder wordt bedoeld het gehalte cement, silica fume en kwarts.



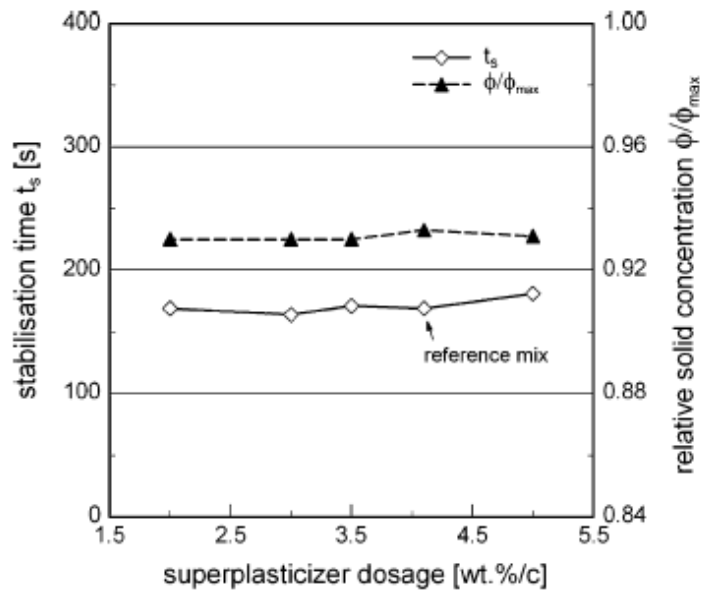
Grafiek 11: Stabilisatietijd en relatieve dichtheid i.f.v. de V_w/V_p verhouding (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009)

Het is duidelijk waarneembaar dat hoe hoger de V_w/V_p verhouding is, hoe korter de stabilisatietijd. Dit kan verklaard worden omdat er bij hoge V_w/V_p verhoudingen een dikke

waterfilm rond de deeltjes is. Die zorgt ervoor dat de wrijving lager is, waardoor de deeltjes mobieler zijn en makkelijker mengen. Dit betekent dat er minder mengenergie nodig zal zijn om de deeltjes te mengen, waardoor de stabilisatietijd korter is.

In grafiek 11 wordt ook de relatieve dichtheid uitgezet in functie van volumetische water-poeder verhouding (V_w/V_p). De relatieve dichtheid $\Phi/\Phi_{\max}$ is gelijk aan de dichtheid van ons huidige beton ten opzichte van de maximale dichtheid die je met deze samenstelling kan bereiken. $\Phi_{\max}$ wordt berekend op basis van hoeveelheid en de grootte van de deeltjes volgens Schwanda (1960). Meer water en navenant minder poeder in de mix verminderen de feitelijke concentratie van vaste stoffen, maar verandert niets aan de maximum concentraties van vaste stoffen. Dit omdat de relatieve hoeveelheden van cement, kwarts en silica fume niet veranderen. Bijgevolg daalt de relatieve dichtheid ongeveer gelijkmatig bij toenemende V_w/V_p . Het is duidelijk dat zowel de stabilisatietijd als de $\Phi/\Phi_{\max}$ dalen op een gelijksoortige wijze. Echter, bij lage waterinhoud is de t_s -curve veel steiler. Hoe dichter Φ bij de $\Phi_{\max}$ komt, hoe meer energie er nodig is om de deeltjes tot de theoretische $\Phi/\Phi_{\max}=1$ te krijgen. Anderzijds kan er ook besloten worden dat wanneer er een samenstelling gekozen is waar de pakkingsdichtheid laag is, de mengtijd veel korter zal zijn omdat er minder mengenergie nodig is. Dus de relatieve dichtheid van de vaste delen staat in verband met de stabilisatietijd t_s (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).

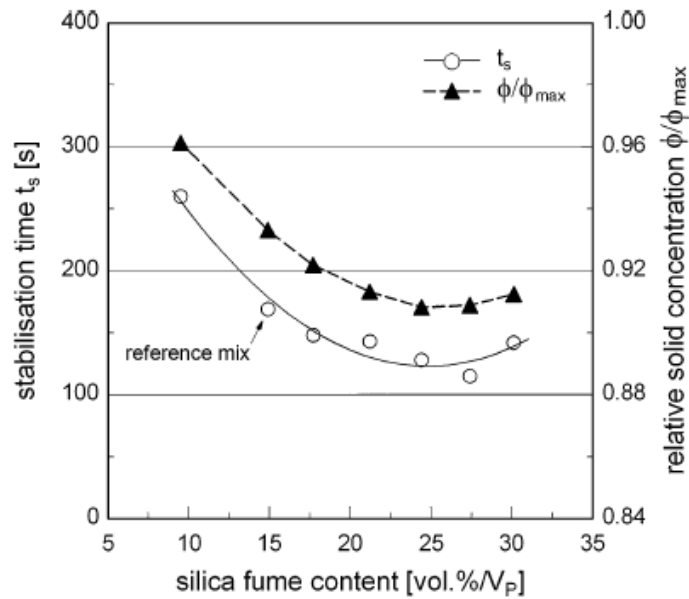
In grafiek 12 wordt er gekeken welke invloed het gehalte superplastificeerder heeft op de stabilisatietijd en de relatieve dichtheid. De hoeveelheid superplastificeerder varieert tussen de 2 en de 5 % ten opzichte van het gewicht van cement. Er wordt een minimum percentage van 2 gebruikt omdat bij lagere percentages het UHPC beton niet verwerkbaar is. Het verhogen van het gehalte superplastificeerder (boven de 2 %) heeft maar een heel klein effect op de stabilisatietijd, maar de verwerkbaarheid verhoogt wel sterk. Daaruit blijkt dat de hoeveelheid superplastificeerder voornamelijk zal afhangen van hoe verwerkbaar het beton moet zijn. Niet alleen het gehalte, maar ook de soort superplastificeerder kan een rol spelen. Zoals eerder vermeld moet er een 'match' zijn tussen het cement en de superplastificeerder (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).



Grafiek 12: Stabilisatietijd en relatieve dichtheid i.f.v. het gehalte superplastificeerder (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).

De relatie tussen de stabilisatietijd en de hoeveelheid silica fume wordt voorgesteld in grafiek 13. De hoeveelheid silica fume varieert tussen de 10 en de 30 % van de vaste delen, terwijl het gehalte vaste delen constant blijft (cement en kwarts worden vervangen door silica fume). In het eerste deel van de grafiek leidt de toevoeging van silica fume tot een verlaging van de stabilisatietijd. Het verhogen van het gehalte silica fume boven de 27,5 % leidt echter niet tot kortere maar tot lichtjes langere mengtijden. Dit gedrag kan verklaard worden door het feit dat de ruimte tussen het grovere cement en kwarts altijd maar meer gevuld wordt met het fijnere silica. Het water dat anders de gaten opvult, kan nu gebruikt worden om de wrijving tussen de deeltjes te verminderen. Daarnaast zorgt ook de sferische vorm van het silica fume ervoor dat de inwendige wrijving verkleint en dus de stabilisatietijd verkort. Naast de stabilisatietijd is in grafiek 13 ook de relatieve dichtheid uitgezet (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).

De relatieve dichtheid vertoont een verband dat gelijkaardig is aan dat van de stabilisatietijd. Dit komt omdat Φ constant blijft als we cement en kwarts vervangen door silica fume. Door de hogere hoeveelheid aan kleinere stoffen kan er een hogere maximale dichtheid bekomen worden. Dit omdat de gaten tussen de grotere korrels opgevuld worden met silica fume. Bij een silica fume gehalte van 27,5 % zijn de gaten blijkbaar exact opgevuld en leidt een toename van silica tot een verlaging van Φ_{max} en dus een langere stabilisatietijd (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).



Grafiek 13: De stabilisatietijd en de relatieve dichtheid i.f.v. het gehalte silica fume (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).

1.2.4.4 Effect van de mengsnelheid

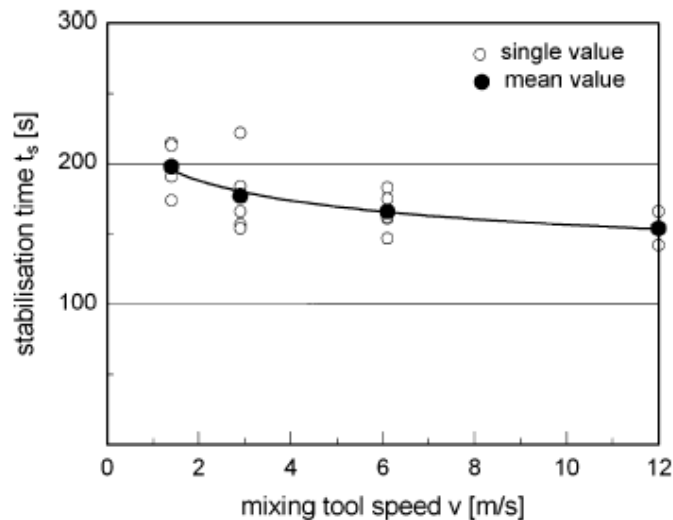
De mengsnelheid heeft ook een invloed op het mengproces en dus op de stabilisatietijd. Dit is onderzocht door bepaling van de stabilisatietijd voor mengsnelheden tussen de 1,4 en de 12 m/s. De mengsnelheid v is berekend met vergelijking:

$$v = \frac{n \times D \times \pi}{60} [m/s]$$

Met: n = rotatiesnelheid [tr/min]

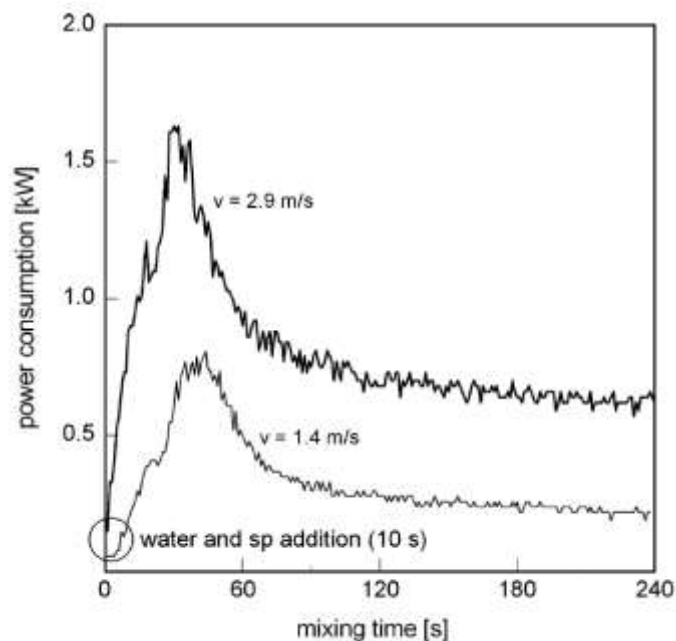
D = diameter mengtoestel = 0,32m

De rotatiesnelheid loopt dus van 83 tot 720 tr/min.



Grafiek 14: Het effect van de mengsnelheid op de stabilisatietijd t_s (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).

In de grafiek 14 is duidelijk te zien dat de stabilisatietijd daalt als de mengsnelheid toeneemt. Hoe hoger de snelheid, hoe sneller water en superplastificeerder verspreid worden. Ook wordt er vastgesteld dat de mengprocedure kan worden geoptimaliseerd door in het begin snel te mengen tot wanneer het vermogen zijn piek kent (grafiek 15) en zo het water en de superplastificeerder te verspreiden. Daarna is het beter van trager te mengen (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).



Grafiek 15: Voorbeelden van energieverbruikcurves tijdens het mixen (Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009)

1.2.4.5 Conclusie

De mengtijd kan worden verminderd met de volgende middelen:

- verhoging van de totale hoeveelheid water (de druksterkte zal dalen);
- verhoging van de mengsnelheid;
- een superplastificeerder gebruiken die goed bij het cement past;
- verhoging van de relatieve dichtheid door het optimaliseren van de korrelverdeling, vervangen van cement en kwarts door silica fume.

(Chopin, Larrard, Cazacliu, 2004; Mazanec, Lowke, Schiessl, 2009).

1.2.5 Voor- en nadelen

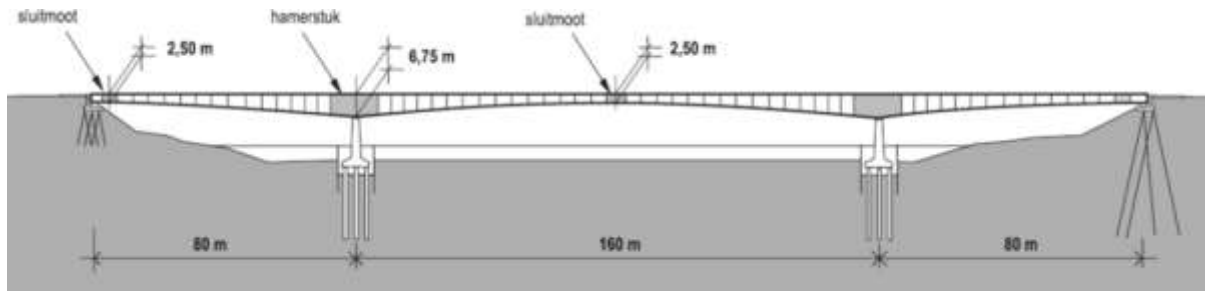
Dankzij de ontwikkeling van (ultra)hoogsterktebeton wordt het construeren van hoge en slanke gebouwen en bruggen met grote overspanningen mogelijk gemaakt. Deze constructies vereisen immers een hoge sterkte om de hoge krachten te kunnen opnemen. (Cauberg, Piérard, Wastiels, 2006). Buig- en dwarskrachtwapening zijn doorgaans niet nodig, waardoor dunne constructiedelen mogelijk zijn. Er zijn bovendien betere prefabricagemogelijkheden aangezien verdichten vaak niet nodig is. Elementen zijn gemakkelijker te transporteren vanwege de geringere massa (Kaptijn, 2002).

Inzake kostprijs is het vanzelfsprekend dat (ultra)hoogsterktebeton per m³ duurder is dan traditioneel beton. Het bevat niet alleen de basisproducten maar ook silica fume, superplastificeerder.... De langere mengtijd verhoogt ook de kostprijs van het beton (Chopin, Larrard, Cazacliu, 2004). Constructies die uit (ultra)hoogsterktebeton vervaardigd zijn, hebben meestal wel een hogere rendabiliteit en een verbeterde duurzaamheid. Bovendien heeft dit beton een hoge dichtheid en een grote slijtvastheid. Deze laatste eigenschap maakt dit betontype uiterst geschikt voor toepassing in de wegenbouw en bij zwaar belaste industievloeren (Desmyter, Dieryck, Leuridan, 2002; Buytaert, Ronsse, 2010).

1.2.6 Concrete toepassing: De tweede Stichtse brug (Nederland)

De tweede Stichtse brug die voltooid is in 1997, is de eerste grote brug in hogesterkebeton in Nederland (figuur 8). De brug heeft een totale lengte van 320 m en is opgebouwd uit drie overspanningen waarvan de hoofdoverspanning 160 m bedraagt. De constructiehoogte van de

brug varieert tussen 2,50 m en 6,75 m. De bovenbouw van de brug is gerealiseerd met een vrije uitbouwmethode. De moten met een lengte van 4 tot 5 m werden in één keer gestort. Dit stelde nogal wat eisen aan de verwerkbaarheid van het beton. De grote hoeveelheid cement en de kleine hoeveelheid aanmaakwater konden leiden tot een snelle terugloop van de verwerkbaarheid en tot fluctuaties in de consistentie.



Figuur 8: Tweede Stichtse brug (De Schutter, Apers, 2007)

De aangewende betonsamenstelling is gegeven in tabel 10. Gedurende de ontwerpfase zijn een aantal wijzigingen aangebracht door het gebruik van hoogsterktebeton. De kokerwanden en de ondervloer zouden dunner gemaakt kunnen worden en de nodige hoeveelheid voorspanstaal kon gereduceerd worden, gezien het eenvoudiger kabelbeloop en de kleinere krimp- en kruipverliezen. Wegens de snellere sterkteontwikkeling van het beton, kon de voorspanning ook spoediger aangebracht worden. De noodzakelijke druksterktes werden ook tijdens de winterperiode snel bereikt. Dit resulteerde tevens in een snellere bouwtijd. Het hoogsterktebeton heeft het voordeel dat op lang termijn er een betere resistentie van het bovendek tegen indringing van dooizouten gegarandeerd wordt.

CEM III/B 42,5 LH-HS	237 kg
CEM I 52,5 R	238 kg
silica fume (vaste stof)	25 kg
water - cement (+silica fume) factor	0,32
zand 0-4 mm	785 kg
harde steenslag 4-16 mm	960 kg
plastificeerder	0,95 kg
superplastificeerder	9,5 kg

Tabel 10: Betonsamenstelling 2^{de} Stichtse brug (De Schutter, Apers, 2007)

De praktijk bewijst dat gladde en vlakke betonoppervlakten kunnen verkregen worden met hoogsterktebeton. Er moest echter terdege aandacht besteed worden aan de juiste

consistentie van het mengsel en aan een zorgvuldig geplande en uitgevoerde stortvolgorde. Het was essentieel dat er een uitgebreide controle en opvolging plaatsvond, in samenspraak tussen alle betrokken partijen.

Het hoogsterktebeton had ook een belangrijk aandachtspunt: door de explosieve temperatuurontwikkeling konden temperaturen tot 60° bereikt worden waardoor de kans op scheuren verhoogde. De autogene krimp zorgde ervoor dat de scheurvorming nog heviger werd. In meerdere betonlaboratoria en betoncentrales werden voorbereidende praktijkproeven op grotere schaal verricht en weloverwogen geschiktheidsonderzoeken uitgevoerd op het werk, zo kon een goede scheurbeheersing bekomen worden. Krimp- en temperatuureffecten zouden geen hinderpaal mogen zijn voor een verdere succesvolle en economische toepassing van hoogsterktebeton in bruggen. Natuurlijk moet bij het ontwerpen en het uitvoeren de nodige concentratie aan deze effecten besteed worden.

(De Schutter, Apers, 2007)

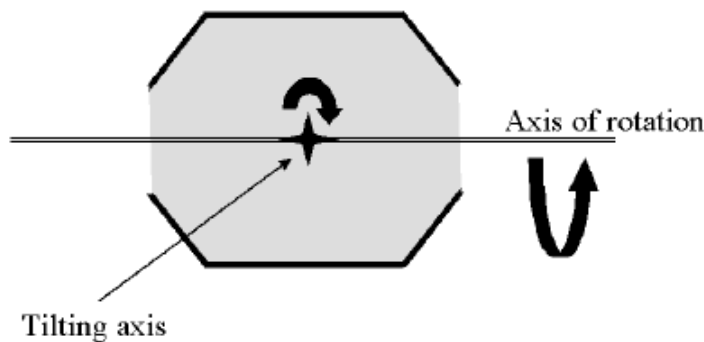
2. Menginstallaties

In de huidige menginstallaties zijn er twee grote categorieën: de continue en de niet-continue mengers. Het eerste type menger is constant in werking, terwijl het tweede type op bepaalde momenten moet worden stilgelegd vooraleer er weer verder gewerkt kan worden. Bij de continue menger worden de componenten constant bijgevuld langs de ene kant en aan de andere kant komt het afgewerkte beton eruit. Bij het andere type moet na elke cyclus de menger volledig leeggemaakt en schoongemaakt (indien mogelijk) worden, dan pas kunnen de componenten voor een nieuwe mengeling toegevoegd worden. De twee menginstallaties die in dit onderzoek gebruikt worden, zijn beide niet-continue mengers. Rond de menger is een luchtdichte omgeving gecreëerd waarop een pomp gemonteerd is die lucht kan wegzuigen. Door het gebruik van deze machine kan de mengeling onder een, op voorhand gekozen, luchtdruk worden uitgevoerd (Lanoote, Naert, 2010).

Verder dient er ook een onderscheid gemaakt te worden tussen mixers met een horizontale of schuine as (trommelmengers) en mixers met een verticale as (dwangmengers) (Ferraris, 2001).

2.1 Trommelmengers

De mengkuip van trommelmengers hebben een vergelijkbare doorsnede als deze afgebeeld in figuur 9. De mengbladen, die bevestigd zijn aan de rotatie as, zorgen ervoor dat het beton opgetild wordt bij elke draaibeweging. Dit proces wordt herhaald tot een voldoende homogeen mengsel wordt bekomen (Ferraris, 2001).

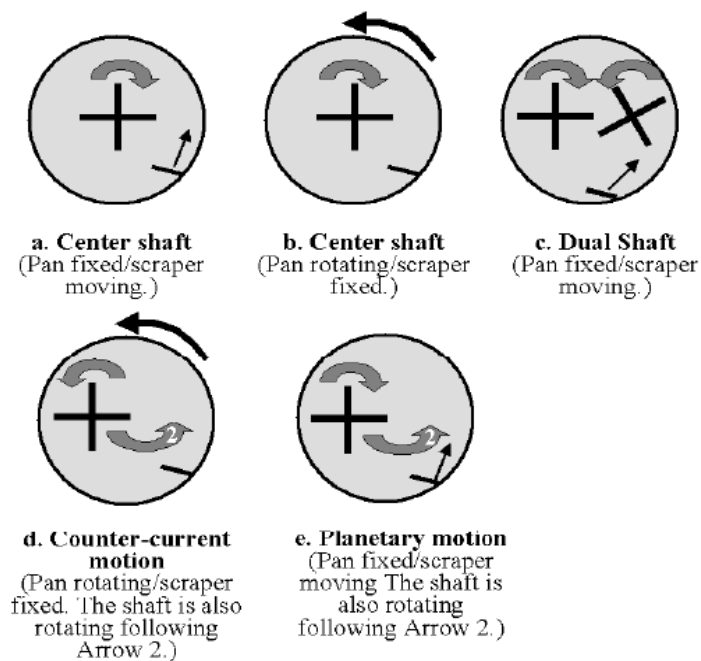


Figuur 9: Dwarsdoorsnede van een drum mixer (Ferraris, 2001)

De parameters die kunnen worden ingesteld tijdens het mengproces zijn de draaisnelheid en de hellingshoek van de draai as.

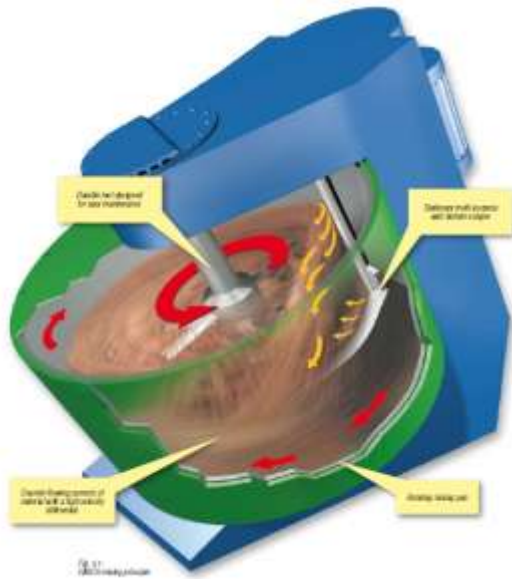
2.2 Dwangmengers

Dwangmengers werken op dezelfde manier als trommelmengers; een cilindrische mengkuip met één of twee sets messen draait in de kuip om het beton te mengen, een ander mes dient om het beton van de randen schrapen. De vorm van de mengbladen en de as van rotatie kunnen verschillen. Alle types dwangmengers worden weergegeven in figuur 10 (Buytaert, Ronsse, 2010).



Figuur 10: Verschillende configuraties van mixers (Ferraris, 2001)

In dit onderzoek wordt een intensieve Eirich mixer type R gebruikt (figuur 10 d). De mengbak en de rotor draaien rond in een verschillende richting. Er is ook een mes aanwezig dat het beton die aan de rand blijft kleven terug naar het midden brengt (figuur 11).

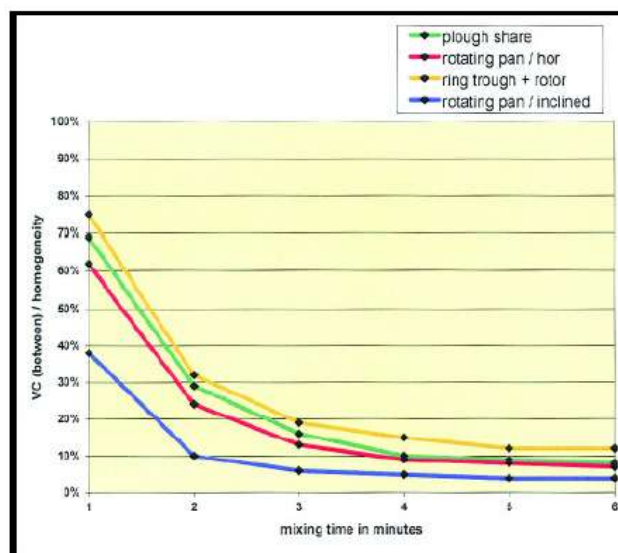


Figuur 11: Draairichting van het beton.



Figuur 12: Mengen met Eirich mixer

Hieronder volgen nog enkele voordelen van dwangmengers. Een eerste voordeel is dat er geen ontmenging kan optreden, omdat 100 % van de producten in de mixer aan het ronddraaien is (figuur 12). Bijgevolg is ook de spreiding op de resultaten het kleinst (grafiek 16: blauwe curve) (Rikken, Lighting, 2004).



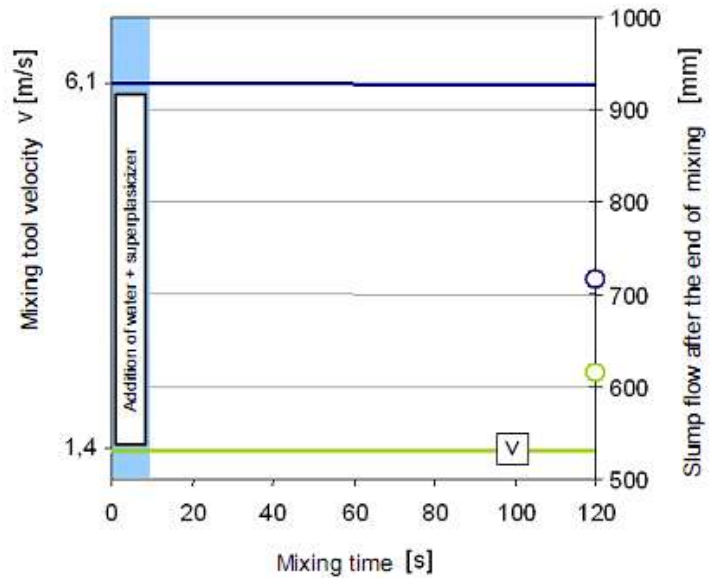
Grafiek 16: Spreiding op de resultaten i.f.v. de mengtijd (Rikken, Lighting, 2004)

Tot slot wordt een goede planetaire menger (mengsnelheid van 1,4 m/s, groen) vergeleken met een intensieve Eirich mixer, waar de mengsnelheid veel hoger kan liggen (in dit geval 6,1 m/s, blauw). De intensieve Eirich mixer bereikt een veel een hogere slump (grafiek 17). Uit de

grafiek kan eveneens opgemerkt worden dat hier de mengsnelheid constant gehouden wordt gedurende het mengproces, die slechts 2 minuten duurt. Dit is een veel kortere mengtijd dan de mengtijden die gebruikt zijn in dit onderzoek.



Figuur 13: Planetaire mixer



Grafiek 17: Slump flow i.f.v. de mengsnelheid (Mazanec, Schießl, 2008)

In dit onderzoek is er gebruikt gemaakt van een kleine vacuüm Eirich mixer type R met een limiet van 3,5 liter en een grote vacuüm Eirich mixer met een limiet van 75 liter. Door betonmengelingen te maken op een kleine en een grote menginstallatie kan de invloed van de menghoeveelheid onderzocht worden.

2.3 *Kleine vacuüm mixer*



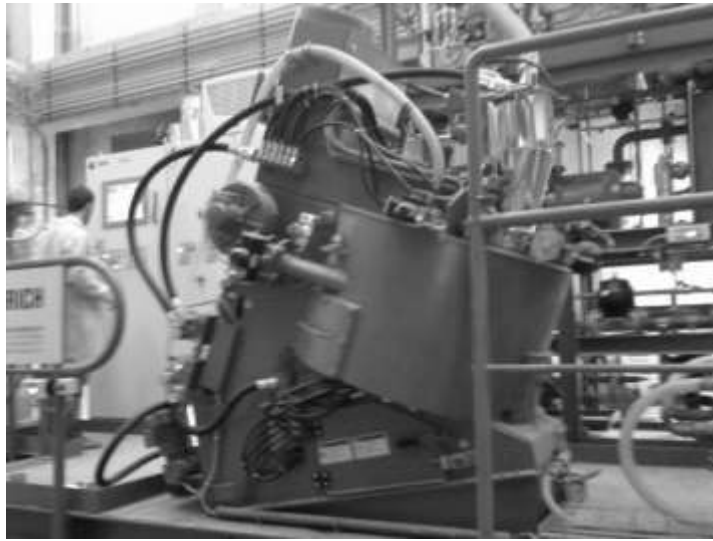
Figuur 14: Kleine vacuümmixer



Figuur 15: Sterrotor

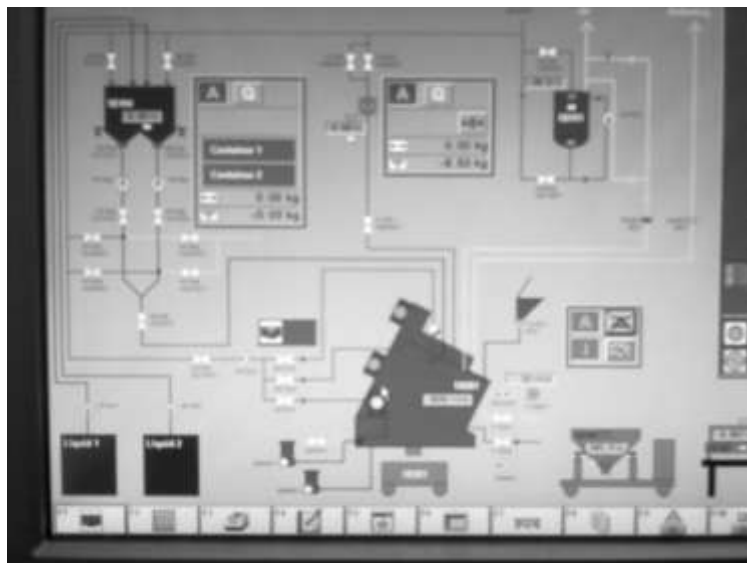
Bij de kleine vacuümmixer kan het toerental van de sterrotor (figuur 15) variëren tussen de 250 tr/min en de ± 1000 tr/min. Het toerental van de mengbak kan ingesteld worden op 42 tr/min of op 83 tr/min. De luchtdruk wordt geregeld tussen atmosferische druk (± 1013 mbar) en 80mbar. Het water en de superplastificeerder dienen bovenaan manueel te worden toegevoegd.

2.4 Grote vacuüm mixer



Figuur 16: Grote vacuüm mixer

De grote mixer werkt volgens hetzelfde principe maar hier is alles computer gestuurd. Via onderstaande display (figuur 17) kan de volledige machine worden bestuurd.



Figuur 17: Display van de grote vacuüm mixer

De gewichten van de componenten worden vooraf ingelezen in de computer. Alle componenten met hun bijhorende gewicht verschijnen dan achtereenvolgens op de display van de mobiele weegschaal. De producten worden achtereenvolgens in de mobiele weegschaal geplaatst. Slechts als alle producten in de mobiele weegschaal aanwezig zijn, kan

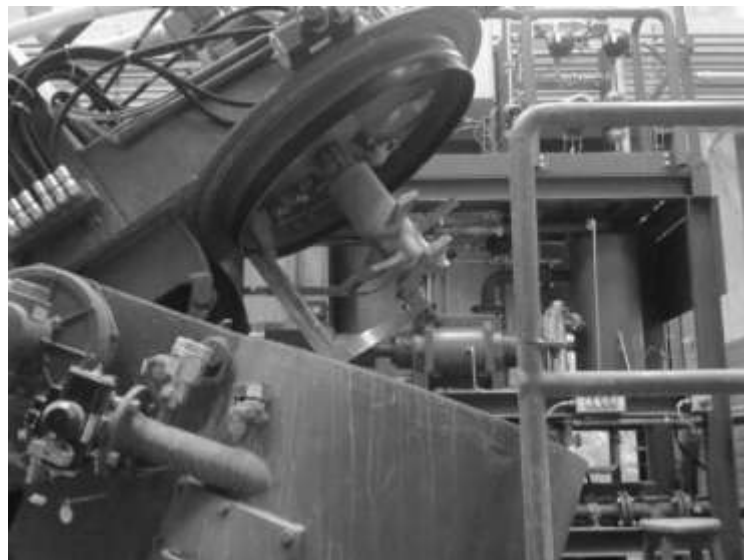
het mengproces worden gestart. De mobiele weegschaal wordt dan met een heftruk boven de mixer geplaatst en via een verticale buis verdwijnen de producten in de mixer (figuur 18).



Figuur 18: Vullen van de mixer

De vloeibare elementen (water en superplastificeerder) kunnen automatisch worden toegevoegd tijdens het mengen.

Bij de grote mixer wordt dezelfde mengkop (sterrotor) gebruikt als bij de kleine mixer (figuur 19).

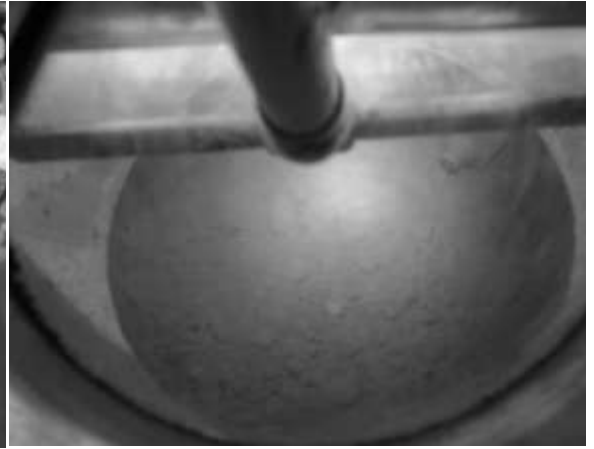


Figuur 19: Mengkop grote mixer

Tijdens het mengen is het mogelijk om via het kijkraampje in de mixer te kijken. Zo kan er duidelijk gevolgd worden wat er binnenin de mengbak gebeurt (figuur 20 en 21).



Figuur 20: Doorkijkluk grote mixer



Figuur 21: Zicht in het doorkijkluk

3. Testprocedures

In dit deel worden zowel de proeven op vers beton als deze op verhard beton besproken. Bij de vervaardiging van beton wordt de uitstroomtijd bepaald met een V-funnel om zo een maat van de viscositeit te verkrijgen. Daarnaast wordt de slump flow bepaald om de vloeibaarheid van het beton na te gaan. Verder is het belangrijk om het luchtgehalte in vers beton te bepalen door gebruik te maken van de drukmethode of de volumetrische methode. Op proefstukken van het verhard beton worden drukproeven uitgevoerd om de druksterkte na te gaan op kubussen van 100 mm x 100 mm.

3.1 Proeven op vers beton

In de loop der jaren werden talloze testen ontwikkeld om vloeibaar beton te analyseren en te karakteriseren. Door middel van deze proeven zijn wetenschappers in staat het gedrag van beton beter te beschrijven (Buytaert, Ronsse, 2010).

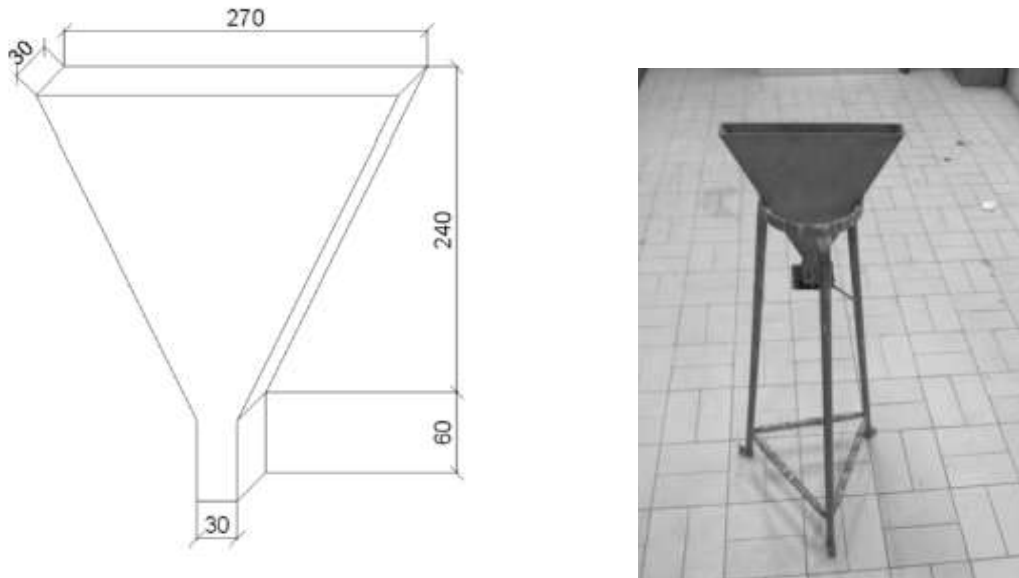
Toch valt op te merken dat deze eenvoudige, empirische proeven hun beperkingen hebben, waardoor fundamentele testen hun opgang maken. Deze proeven worden voornamelijk in bevoegde laboratoria uitgevoerd en minder op de bouwplaats (Buytaert, Ronsse, 2010).

3.1.1 Uitstroomtijd [sec]

De V-Funnel proef biedt de mogelijkheid de uitstroomtijd van beton doorheen een trechter te beoordelen. Deze uitstroomtijd is een maat voor de viscositeit van het beton en geeft tevens de mate van samenhang en dus de stabiliteit van het mengsel weer. De proef vertoont een toelaatbare reproduceerbaarheid en een middelmatig tot goede correlatie met de viscositeitswaarden (Buytaert, Ronsse, 2010). Het is eveneens een maat voor de “passing ability” van het beton, wat belangrijk is, wanneer het beton gebruikt wordt in een dicht wapeningsnet.

3.1.1.1 Apparatuur

De afmetingen van deze trechter zijn terug te vinden op figuur 22.



Figuur 22: Kleine V-funnel

3.1.1.2 Vullen van de kleine trechter

Voor deze proef wordt gebruik gemaakt van de zogenaamde kleine V-funnel of V-trechter. Deze wordt eerst bevochtigd om hem dan tot bovenaan te vullen en onder een hoek van 60° met een zigzagbeweging af te strijken.

3.1.1.3 Testprocedure

Na het vullen van de trechter wordt de klep geopend en de chronometer gestart. De chronometer wordt gestopt wanneer het eerste daglicht doorheen de trechter waargenomen wordt.

3.1.2 Vloeimaat (slump flow) [mm]

In deze test wordt de slump flow gemeten op twee loodrecht op elkaar staande diagonalen. Voor de interpretatie van de proefresultaten dient kritisch te worden omgegaan met (externe) beïnvloedingsfactoren zoals, de vlakheid, het materiaaltype, de vochtigheid van de gebruikte plaat en de uitvoerder (Buytaert, Ronsse, 2010).

3.1.2.1 Vullen van de Haegerman-kegel

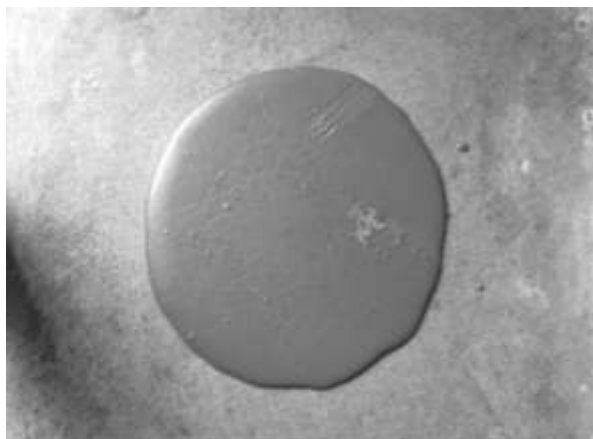
- De conus en de plaat worden bevochtigd zonder dat er water achterblijft;
- De conus wordt gevuld met het beton door deze in één werkgang uit te gieten via de kom van de menger of met behulp van een pollepel, zoals geïllustreerd in figuur 23;
- Het beton wordt met dwarse bewegingen vlak afgestreken. Hiervoor wordt de smalle zijde van een spatel gebruikt die schuin gehouden wordt onder een hoek van $\pm 60^\circ$.



Figuur 23: Vullen van de conus volgens de procedure.

3.1.2.2 Testprocedure

- De conus wordt verticaal, traag, voorzichtig en zonder schokken opgeheven;
- Als het beton volledig uitgevloeid is wordt op de millimeter na de grootste diameter opgemeten en de haaks daarop liggende diameter. De gemiddelde diameter kan nu bepaald worden.



Figuur 24: Beton volledig uitgevloeid.

3.1.3 Luchtgehalte [%]

Bij het fabriceren van een ultrahoogsterktebeton is de controle van het luchtgehalte belangrijk omdat het een indicatie geeft van de dichtheid van het mengsel. Bovendien staat het rechtstreeks in verband met de sterkte en de verwerkbaarheid (Buytaert, Ronsse, 2010).

De gebruikte methode voor het meten van het luchtgehalte van vers beton gaat als volgt. Eerst wordt er water toegevoegd om de luchtlaag boven de mortel te verwijderen. Vervolgens wordt er in een aparte drukkamer druk opgebouwd. Eens deze druk een genormeerde waarde bereikt, kan de kamer in contact worden gesteld met de mortel. De luchtbellens zullen door deze druk samengedrukt worden en de druk in de kamer zal verlagen (communicerende vatten). De drukval is een maat voor het luchtgehalte en kan op een gekalibreerde meter afgelezen worden.

3.1.3.1 Testprocedure

De toegepaste testprocedure is een aangepaste versie van de norm EN 12350-70:

- Het recipiënt wordt gevuld met de verse beton. Omdat het beton voldoende zelfverdichtend is, wordt er niet verdicht.
- Het oppervlak van het beton wordt afgestreken en de horizontale wanden van de recipiënt worden proper gemaakt.
- De luchtklep, gelegen tussen de luchtkamer en de proefbeker, wordt afgesloten en de luchtspace onder het deksel wordt met water gevuld. Het water stroomt via een kraan toe en de lucht wordt via een andere kraan verdreven totdat het water uit de tweede kraan overloopt.
- Lucht wordt in de luchtkamer geïnjecteerd totdat de geijkte meetnaald is gestabiliseerd.
- De twee kranen worden gesloten en de luchtklep geopend.
- Wanneer het evenwicht bereikt wordt, zal het luchtgehalte genoteerd worden tot op 0,1 % nauwkeurig.



Figuur 25: Luchtgehaltemeter

3.2 *Proeven op verhard beton*

3.2.1 *Bepalen van de druksterkte aan de hand van de genormaliseerde drukproef*



Figuur 26: Drukken van een kubus (100 x 100 mm)

Zoals reeds eerder vermeld is de druksterkte de belangrijkste eigenschap van verhard beton. Hierop steunt de sterkteberekening en de dimensionering van betonconstructies. Bij proeven op kubussen die vervaardigd zijn op de kleine vacuümmixer wordt $f_{ck,cub}$ berekend op kubussen met een zijde van 100 mm, in plaats van de 150 mm uit de norm (§ 1.1.4.2 Sterkteklassen). Er wordt geopteerd voor een kleiner formaat. Op die manier kunnen er twee kubussen, in de plaats van één kubus, worden ontwikkeld. De druksterkte f_{ck} wordt bepaald door een

genormaliseerde drukproef, welke beschreven is in de norm 'NBN EN 12390-3 Beproeving van verhard beton – Deel 3: Druksterkte van de proefstukken'. Bij het uitvoeren van drukproeven dient er te worden op toegezien dat de vlakken van het proefstuk die in contact komen met de drukplaten voldoende effen zijn, anders ontstaan er spanningsconcentraties. De belasting wordt continue en zonder schokken aangebracht om zo een gelijkmatige toename van de spanning tussen 0,4 en 0,8 N/mm² per seconde te veroorzaken. De maximale drukkracht $F_{\max}$ wordt bekomen op het ogenblik dat het proefstuk breekt (Buytaert, Ronsse, 2010).

De druksterkte op de proefstukken van verhard beton wordt bepaald op basis van de verhouding tussen de maximale breukbelasting bij axiale druk en de oppervlakte van het monster loodrecht op de richting van de drukkracht. In formulevorm is dat:

$$f_c = \frac{F_{\max}}{A_c} \quad \text{en is uitgedrukt in N/mm}^2 \text{ tot op 0,1 N/mm}^2 \text{ nauwkeurig.}$$

Met:

- $F_{\max}$: de maximumkracht, in N.
- A_c : de dwarsoppervlakte waarop de drukkracht wordt uitgeoefend. Deze wordt berekend op basis van de nominale afmetingen van het proefstuk tenzij de reële dimensies van het proefstuk te sterk hiervan afwijken.

(EN 12390-3 Beproeving van verhard beton – Deel 3: Druksterkte van de proefstukken)

3.2.2 Bepalen van de druksterkte aan de hand van de ouderdomscoëfficiënt

Wanneer de druksterkte van het beton gewenst is op een andere dag dan wanneer de druksterkte bepaald is, kan gebruik gemaakt worden van ouderdomscoëfficiënten.

Het verband tussen de druksterkte op een tijdstip t en de leeftijd van 28 dagen wordt gegeven door volgende formule:

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

met $\beta_{cc}(t)$ = de ouderdomscoëfficiënt [-]

f_{cm} = de gemiddelde druksterkte op 28 dagen [N/mm²]

$f_{cm}(t)$ = de gemiddelde druksterkte op ouderdom t [N/mm²]

De coëfficiënt $\beta_{cc}(t)$ kan berekend worden aan de hand van de volgende formule:

$$\beta_{cc}(t) = e^{s \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t/t_1}} \right]}$$

Met: t = de ouderdom van het beton [dagen];

$t_1 = 1$ dag;

s = coëfficiënt in functie van het cementtype [-].

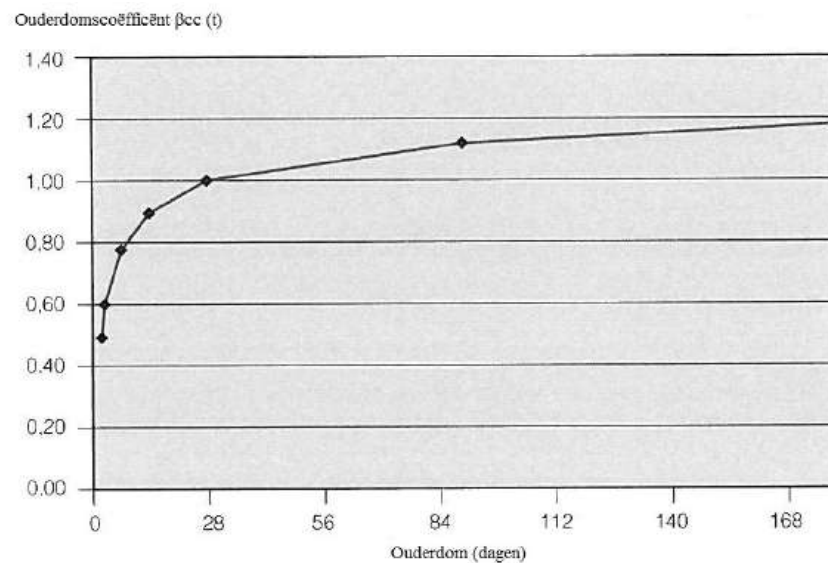
(De Blaere, 2006)

In tabel 11 worden de ouderdomscoëfficiënten uitgedrukt in functie van het gekozen cementtype.

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

Tabel 11: Waarden van s i.f.v. het cementtype voor de berekening van de ouderdomscoëfficiënt (De Blaere, 2006)

De sterkteontwikkeling van een beton met een normale verharding wordt weergegeven in functie van het aantal dagen in grafiek 18.

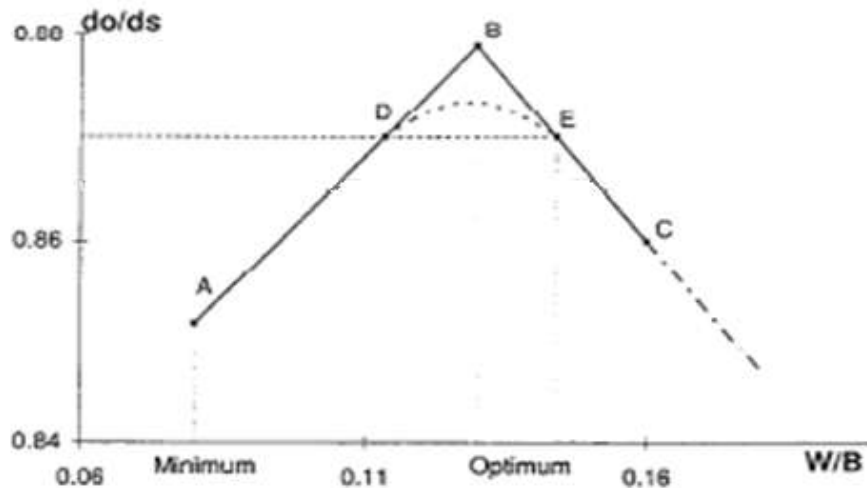


Grafiek 18: Sterkteontwikkeling in het geval van een normale verharding ($s = 0,25$) (Pollet, Doods)

Volgens (De Blaere, 2006) zijn de $\beta_{cc}(t)$ coëfficiënten enkel bruikbaar voor beton waar geen toevoegsels of hulpstoffen zijn toegevoegd die de verhardingsnelheid beïnvloeden. In dit onderzoek wordt er gebruik gemaakt van hoge hoeveelheden silica fume en superplastificeerder. De $\beta_{cc}(t)$ coëfficiënt zou dus niet mogen overeenkomen met de waarde uit tabel 11. Omdat tijdens dit afstudeerwerk de druksterkte op 7 en 28 dagen is bepaald kan de s coëfficiënt berekend worden. De gemiddelde waarde voor s is gelijk aan 0,221 met een standaarddeviatie van 0,0294. Dit resultaat ligt onder de 0,23 uit de tabel 11, waardoor de sterkteontwikkeling iets sneller gebeurt.

3.2.3 Bepalen van de relatieve dichtheid d_0/d_s

In het eerste deel van het onderzoek wordt de d_0/d_s bepaald door middel van onderstaande grafiek, waardoor het enkel afhankelijk wordt gesteld van de w/b-factor.



Grafiek 19: De variatie van de relatieve dichtheid i.f.v. het watergehalte. (Richard, Cheyrezy, 1995)

In de praktijk zal de relatieve dichtheid van meer dan alleen de w/b-factor afhankelijk zijn, daarom wordt in het tweede deel van het onderzoek de relatieve dichtheid berekend voor ieder mengsel. De relatieve dichtheid wordt bepaald uit de verhouding van d_0 op d_s . Met:

- d_0 = dichtheid bij ontkisten;
- d_s = dichtheid op volle sterkte (het gewogen gemiddelde van dichtheden van de vaste bestanddelen).

De dichtheid d_s wordt bepaald uit de vaste delen van de samenstelling van het beton.

	kg	liter	ρ_c [kg/m ³]
Portland cement	3,100	1,000	3100
Silica fume	0,775	0,352	2200
Nano silica fume	0,000	0,000	
Zand M31 (125-500 μ m)	3,410	1,287	2650
Zand S90	0,000	0,000	2650
Crushed quartz d50=10 μ m	0,000	0,000	
Superplastificeerder	0,142	0,129	1100
Water	0,581	0,581	1000

Tabel 12: Samenstelling van het betonmengsel.

$$d_s = \frac{m_{cem} \times \rho_{cem} + m_{sil} \times \rho_{sil} + m_{zand} \times \rho_{zand}}{m_{cem} + m_{sil} + m_{zand}} = 2793,62 \text{ kg/m}^3$$

De dichtheid d_0 wordt berekend door de massa van het beton te delen door het volume. Voor de massa nemen we het gewicht na 1 dag. Het volume wordt berekend door het gewicht van een met water verzadigde kubus (2 dagen onder water) te verminderen met het onderwatergewicht van diezelfde verzadigde kubus. Deze methode is nauwkeuriger dan indien het volume zou worden bepaald aan de hand van de traditionele methode waar de zijden van de kubus worden vermenigvuldigd.

3.2.4 Luchtgehalte bepalen via een air-voidanalyse

Luchtgehalte kan niet enkel worden bepaald op vers beton, maar ook op verhard beton. De analyse van de poriënstructuur wordt mogelijk gemaakt via een air-voidanalyse (AVA) en in het labo Magnel wordt voor die analyse gebruik gemaakt van een RapidAir 457. Met dit toestel is het mogelijk om in overeenstemming met ASTM C457 het luchtgehalte en de luchtbedistributie te bepalen. Enkel de resultaten van het luchtgehalte worden vergeleken in dit afstudeerwerk. Dit wordt automatisch bepaald via de 'lineair traverse methode' met het toestel RapidAir 457. Dezelfde handelingen en interpretaties worden uitgevoerd als bij de manuele methode, maar het gaat wel veel sneller. De analyse neemt ongeveer 10 minuten in beslag op de automatische manier in vergelijking met 4 à 6 uur bij de manuele methode (Furniere, 2010).

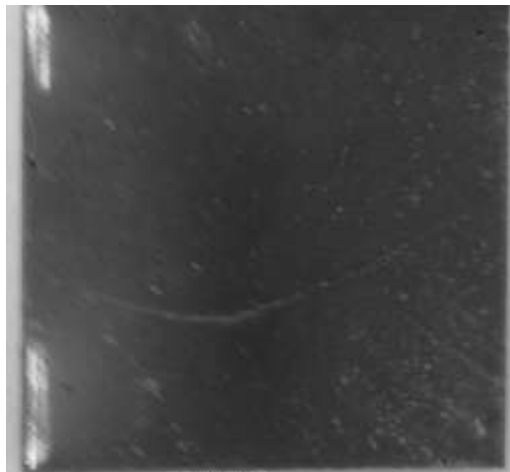
Het gehele systeem bestaat uit een PC dat alles controleert, een videocamera, een microscooplenz, een beweegbaar platform en een gebruiksvriendelijk softwareprogramma. Een foto van de RapidAir 457 is getoond op figuur 27 (Furniere, 2010).



Figuur 27: RapidAir 457 (foto van op www.concrete-experts.com)

3.2.4.1 Voorbereiding van de proefstukken

De proefstukken dienen goed voorbereid te worden, alvorens de air-voidanalyse kan gestart worden. Eerst worden de proefstukken glad gepolijst. Het polijsten neemt ongeveer 30 minuten in beslag en er gaat een oppervlak af met een dikte van ongeveer 1mm. Goed polijsten geeft oppervlakken zonder reliëf, zonder zaagmerktekens en waarbij de luchtbellen scherpe randen vertonen (Annerel, 2006; Furniere, 2010). In dit afstudeerwerk was dit niet altijd het geval waardoor er rekening moet gehouden worden met slechtere resultaten (figuur 28).



Figuur 28: Gepolijst proefstuk met zaagmerktekens

Het proefstuk wordt na het polijsten door middel van een dikke viltstift zwart gemaakt. Dit wordt gedaan omdat er een contrastverschil gecreëerd moet worden. Nadat het proefstuk volledig zwart gemaakt is, strooit men er een droog, wit bariumsulfaatpoeder (BaSO_4) overheen. Het poeder die een deeltjesgrootte heeft dat kleiner is dan $2\text{ }\mu\text{m}$, zorgt ervoor dat de luchtbellen voorzien worden van een goede vulling. Door het poeder zacht aan te drukken met een rubberen stamper, worden de luchtbellen voldoende opgevuld (figuur 29) (Furniere, 2010).



Figuur 29: Poeder aandrukken met rubberen stamper

Het overtollige poeder wordt achteraf verwijderd. Dit dient met uiterste zorg te gebeuren zodat geen poeder terug wordt meegesleurd uit de luchtholtes enerzijds, en de zwarte inktlaag mag noch gekrast, noch verwijderd worden anderzijds. Het is de bedoeling dat de witte luchtbellens in scherp contrast komen te staan met de zwart gekleurde cementpasta en granulaten. De 'transformatie' van het proefstuk is getoond op figuur 30 (Furniere, 2010).



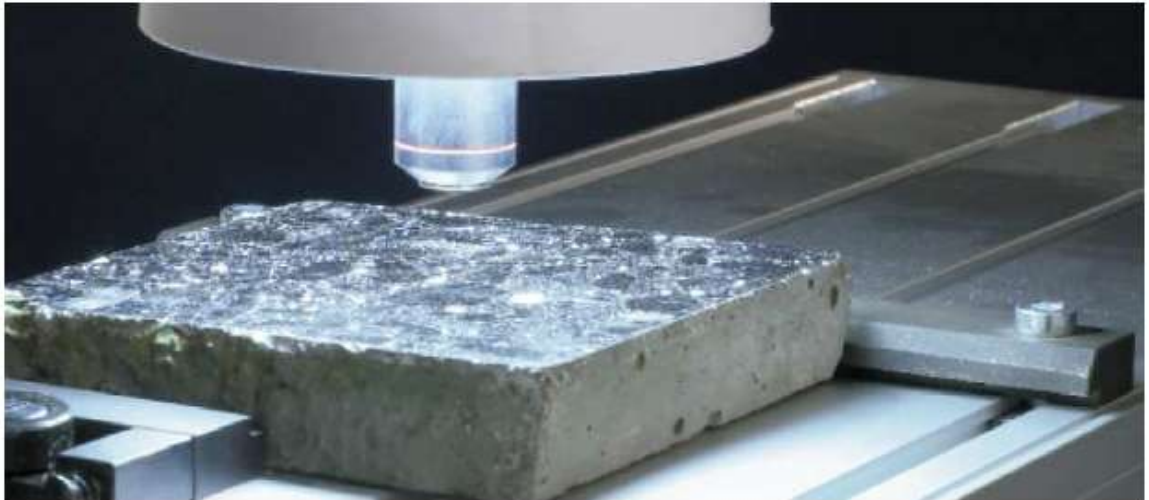
Figuur 30: Voorbereiding gepolijst proefstuk met zwarte inktstift en BaSO₄-poeder

Tot slot moeten de holtes die aanwezig zijn in de granulaten bijgekleurd worden met een zwarte viltstift, evenals de kleine barsten in de granulaten. Een verkeerd beeld in de analyse zou geschetst kunnen worden door de poreuze granulaten, omdat de kleine luchtholtes daarin ook opgevuld worden met het poeder en daarom beschouwd worden als kleine luchtbellens. In dit afstudeerwerk is dit niet van toepassing omdat het grootste granulaat zand is (Furniere, 2010).

Het niet bijkleuren van de granulaten levert volgens een case-study op de website van de RapidAir 457 (www.concrete-experts.com) slechts een fout op van 1,6 a 10% van het gemeten luchtgehalte (Furniere, 2010).

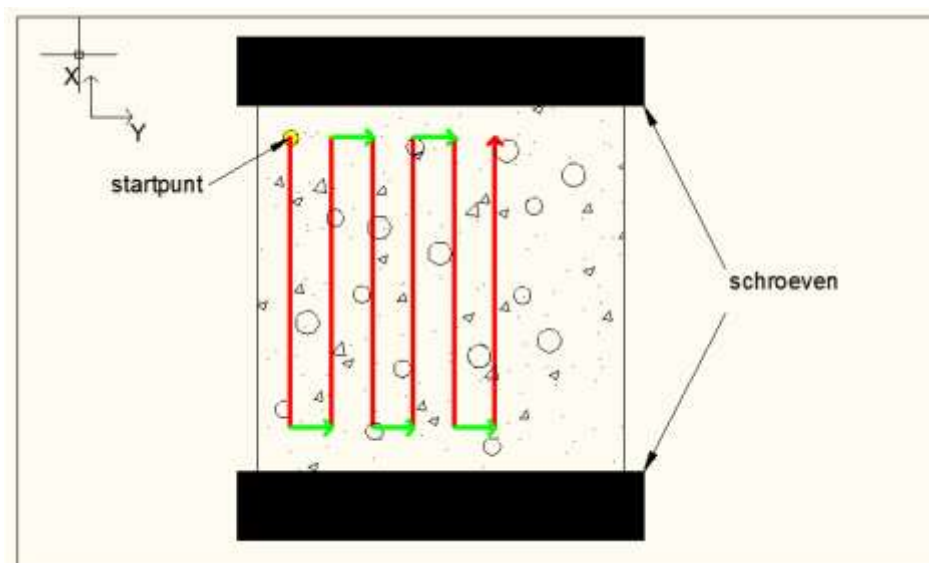
3.2.4.2 Uitvoering van de metingen met de RapidAir457

Na de voorbereidingsfase wordt het proefstuk tussen de twee schroeven van de tafel geplaatst op een veer. De veer zorgt ervoor dat het proefstuk waterpas wordt gezet onder de microscoop lens.



Figuur 31: Plaatsing van het proefstuk in de RapidAir 457 (www.concrete-experts.com)

Voor aanvang van de analyse wordt de lens boven de linkerbovenhoek van het proefstuk geplaatst. Vanuit die positie zal de microscoop in X en Y- richting het monster doorlopen volgens de 'lineair traverse methode' (figuur 32).



Figuur 32: Afgelegd pad volgens 'linear traverse' methode

In X-richting (rood) wordt er gemeten om dan telkens volgens de Y-richting (groen) naar rechts op te schuiven. De analyse van het aantal lineaire paden, wordt bepaald door het invoeren van drie parameters in het programma: de te onderzoeken oppervlakte van het monster (traverse area), de te onderzoeken totale lengte (traverse length) en het aantal lijnen waarmee de analyse per beeld wordt uitgevoerd (probe lines). Over de in te voeren parameters wordt verdergegaan in de volgende paragraaf (Furniere, 2010).

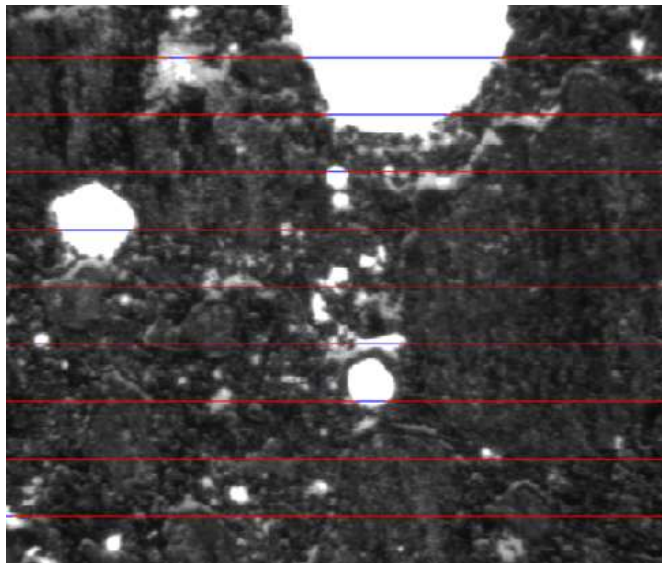
De camera keert terug naar zijn beginpositie als het monster volledig gescand is. Tijdens de analyse beweegt de tafel in de X-richting volgens zorgvuldig bepaalde staplengtes zodat twee opeenvolgende videobeelden elkaar mooi opvolgen (een overlapping van de beelden van 20 pixels is voorzien). Doordat videosignalen dikwijls verstoord kunnen zijn, worden 20 pixels, van het in totaal 768 pixels brede scannend kader, niet gebruikt voor analyse. Het actieve beeld is dus slechts 748 pixels. Het meten van de luchtbellen (chord length) gebeurt met een lijn van 1 pixel breedte (de probe line). Het onthouden van het programma van het vorige beeld zorgt ervoor dat op die manier zonder problemen luchtbellen gemeten worden die zich verspreiden over verschillende beelden. Zowel witte als zwarte zones die kleiner zijn dan 4 pixels lengte worden automatisch als verstoring beschouwd door het programma. Er wordt geen rekening gehouden met luchtbellen die kleiner zijn dan $8,4\text{ }\mu\text{m}$, omdat een pixel circa $2,1\text{ }\mu\text{m}$ is. (Furniere, 2010).

Van elke betonmengeling waar de variatie van de luchtdruk onderzocht werd, wordt 1 kubus met zijde $100 \times 100\text{ mm}$ vervaardigd en gepolijst langs 1 zijde. Zo ontstaat er voor elke betonmengeling 1 proefoppervlak. Wanneer de uitvoering van de air-voidanalyse voltooid is, wordt het proefstuk 90° gedraaid en wordt dit opnieuw uitgevoerd. In totaal wordt het proefstuk drie maal over 90° gedraaid. Op die manier is er voor elke betonmengeling in totaal vier analyses gebeurd.

3.2.4.3 Instelling van de parameters

Over het algemeen is het totaal gescande oppervlak zeer laag (rond de 1 %). Dit komt door de gehanteerde ASTM C457 "Linear Traverse"-methode, aangezien met deze methode worden geen oppervlaktes worden berekend, maar luchtbellengtes. Op basis van deze koordlengtes wordt er een extrapolatie naar oppervlaktes en volumes verondersteld. Dit heeft echter als nadeel dat de plaats en het aantal lijnen op het te onderzoeken monster van belang is. De keuze van het aantal lijnen is essentieel. Bij een te groot aantal lijnen zal meerdere keren door

dezelfde luchtbel worden gegaan, terwijl een te klein aantal als gevolg heeft dat luchtbellens tussen de lijnen vallen en dus niet worden opgemeten. Dit beïnvloedt de keuze voor het aantal 'probe lines' of 'traverse lines' (figuur 33). Er kunnen ook meetfouten uit voortkomen doordat er van uitgegaan wordt dat de luchtbellens cirkelvormig zijn. Langwerpige luchtbellens zullen dan ofwel meerdere keren als kleine luchtbellens gemeten worden, ofwel als 1 zeer grote, waarbij met de extrapolatie een te grote cirkelvormige luchtbel bekomen wordt (Furniere, 2010; Annerel, 2006).



Figuur 33: Evenwichtig aantal 'probe lines' bij het scannen met de RapidAir 457

3.2.4.4 Resultaten uit de air-void-analyse

Na de analyse wordt een printklaar verslag gegenereerd met als belangrijkste airvoid-parameters:

- luchtgehalte A_a [%],
- specifieke oppervlakte α [mm^{-1}],
- spacing factor L_s [mm],
- gemiddelde koordelengte l_{gem} [mm].

In dit afstudeerwerk wordt enkel het luchtgehalte A_a [%] gebruikt. Deze wordt berekend met de formule $A_a = \frac{T_a}{T_{tot}} \times 100$.

Met:

- T_a = de totaal doorlopen afstand (chord length) aan luchtbelllen;
- T_{tot} = de totaal doorlopen afstand.

Voor deze waarde wordt op het gebied van vorstbestandheid een minimaal percentage vereist. Een te hoog percentage is dan weer nadelig voor de druksterkte.

(Furniere, 2010)

3.2.5 Warmtebehandeling

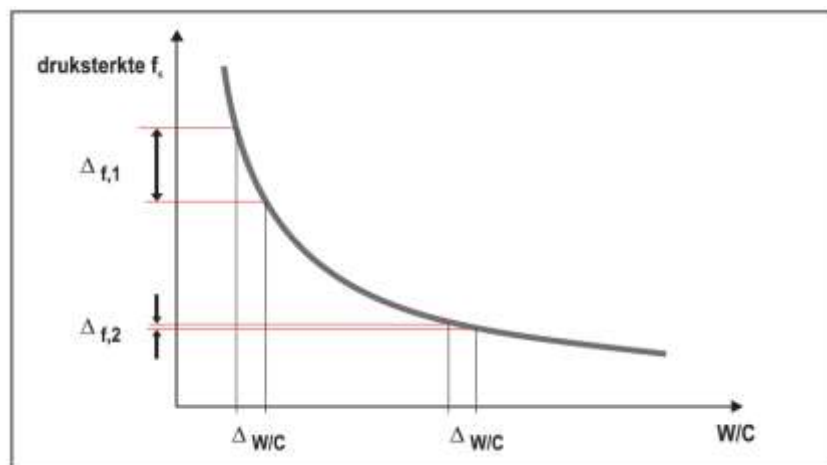
De aard van de hydratatieproducten verandert nauwelijks tijdens de warmtebehandeling wanneer de temperatuur beperkt blijft tot 100°C. De temperatuur beïnvloedt echter wel in enige mate de microstructuur, en meer in het bijzonder de poriënstructuur. Doorgaans wordt bij een hogere temperatuur een meer poreuze structuur gevormd. Door de warmtebehandeling versnelt ook de puzzolane reactie aanzienlijk. Er worden ook meer hydratatieproducten gevormd, waardoor meer cement en superplastificeerder reageren. Deze effecten zijn van groot praktisch belang voor de sterkte en de duurzaamheid van het beton (De Schutter, 2006). Een warmtebehandeling met een hogere temperatuur (250 - 400°C) wordt enkel toegepast voor beton met vezelversterking (Richard, Cheyrezy, 1995).

Onderzoek

Het eerste hoofdstuk beschrijft de keuze van de samenstelling van het referentiemengsel. In het tweede hoofdstuk worden inleidende testen uitgevoerd op het referentiemengsel, om zo tot hoogsterktebeton te komen. In het derde hoofdstuk worden er proeven gedaan op de tijdens de zoektocht bekomen samenstelling, namelijk een hoogsterktebeton met een goede verwerkbaarheid. De mengtijd, mengsnelheid en het luchtgehalte variëren tijdens de proeven. In het laatste hoofdstuk worden de proeven herhaald, maar dan op ultrahogsterktebeton.

Proeven op hoogsterktebeton zijn veel gevoeliger dan proeven op traditioneel beton. Samenstellingen en eigenschappen van de verschillende bestanddelen zijn niet constant, maar variëren binnen een bepaald tolerantiegebied. Kleine afwijkingen of onregelmatigheden bij het afwegen, mengen, vervoeren, storten en trillen zijn eveneens onvermijdelijk. Afhankelijk van de grootte van die verschillen en hun interacties, variëren de eigenschappen van het verse en het verharde beton in mindere of meerdere mate rond een gemiddelde waarde (De Schutter, Apers, 2007).

De voornaamste veranderlijken zijn het watergehalte en de cementhoeveelheid. De werkelijke w/c-factor zal verschillen van de vooropgestelde w/c-factor en variëren binnen een bepaald gebied, het zogenaamde variatiegebied $\Delta_{w/c}$. Tussen de w/c-factor en de druksterkte is er een verband zoals voorgesteld in figuur 20 (wet van Féret). Uit de figuur blijkt eveneens dat voor een bepaalde $\Delta_{w/c}$ het overeenstemmend variatie-interval van de druksterkte groter wordt voor een kleinere w/c-factor. Met andere woorden: verschillen in watergehalte en cementdosering zorgen voor een grotere sterktevariatie bij een lage w/c-factor. Hoogsterktebeton is hieraan dus veel gevoeliger dan beton met een normale sterkte. Het afwegen, mengen en storten moet dus uiterst nauwkeurig gebeuren binnen een zo klein mogelijke tolerantie marges (De Schutter, Apers, 2007).

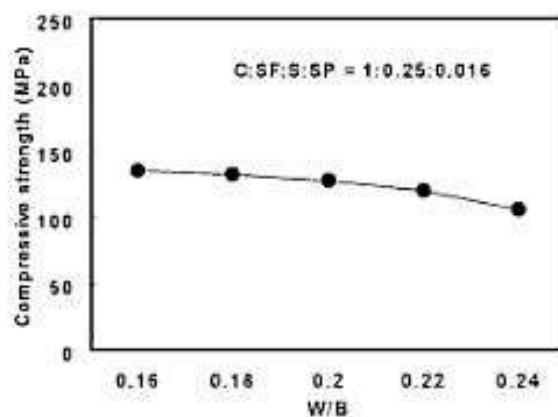


Grafiek 20: Verband tussen druksterkte en w/c-factor (De Schutter, Apers, 2007).

1. Keuze referentiemengsel

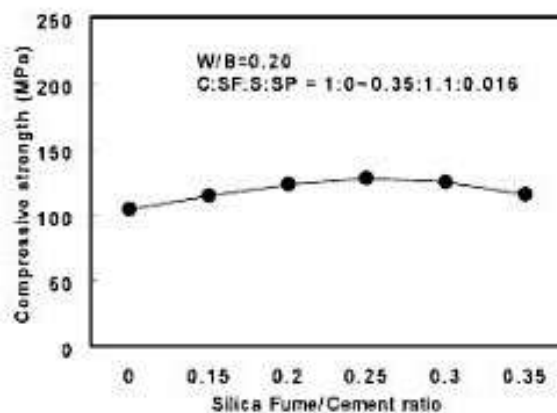
In het artikel "Influence of the Ingredients on the Compressive Strength of UHPC as a Fundamental Study to Optimize the Mixing Proportion" worden proeven uitgevoerd om tot ultrahoogsterktebeton te komen.

In eerste instantie wordt gekeken naar de invloed van de w/b-factor (grafiek 21). Zoals reeds meerdere keren vermeld, verhoogd de druksterkte als het watergehalte afneemt. In dit onderzoek wordt een watergehalte van 0,15 als het minimum aanzien.



Grafiek 21: Druksterkte i.f.v. de w/b-factor (Jung, Kang, Kyung, Sung, 2008)

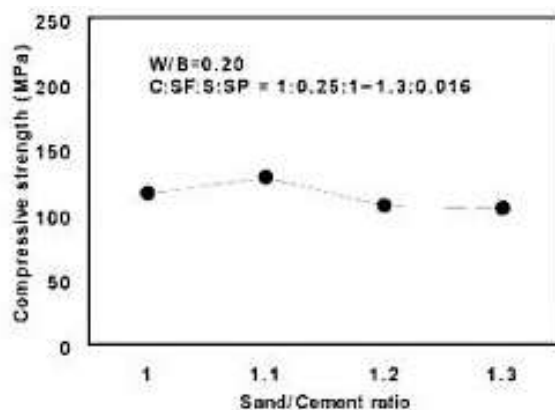
In tweede instantie wordt bij een w/b-factor van 0,20 de invloed van het silica fume gehalte bekeken (figuur 22). Er wordt een maximale druksterkte vastgesteld bij een silica fume cement verhouding van 0,25.



Grafiek 22: Druksterkte i.f.v. het gehalte silica fume (Jung, Kang, Kyung, Sung, 2008)

Dit kan verklaard worden aan de hand van de chemische en fysische aspecten van silica fume. Er is calciumhydroxide nodig zodat silica fume zou bijdragen tot de puzzolane reactie. Die wordt gegenereerd uit de hydratatiereactie van het cement. Er wordt dus verondersteld dat bij een silica fume gehalte van 0,25 er net genoeg calciumhydroxide is. Ten slotte speelt, zoals reeds eerder vermeld, het fysische aspect ook een rol. Bij een silica fume gehalte van meer dan 0,25 zal het vullende effect verdwijnen.

Tot slot wordt er gekeken naar het gehalte toeslagstoffen. In dit onderzoek worden fijne toeslagstoffen ($< 5 \text{ mm}$) gebruikt, om een zo homogeen mogelijk beton te kunnen ontwikkelen. Uit grafiek 23 is af te leiden dat de hoogste sterkte bekomen wordt bij een zandgehalte van 1,1.



Grafiek 23: Druksterkte i.f.v. zandgehalte (Jung, Kang, Kyung, Sung, 2008)

In de paper “Composition of reactive powder concretes” is er een samenstelling te vinden die beantwoordt aan alle bovenstaande criteria.

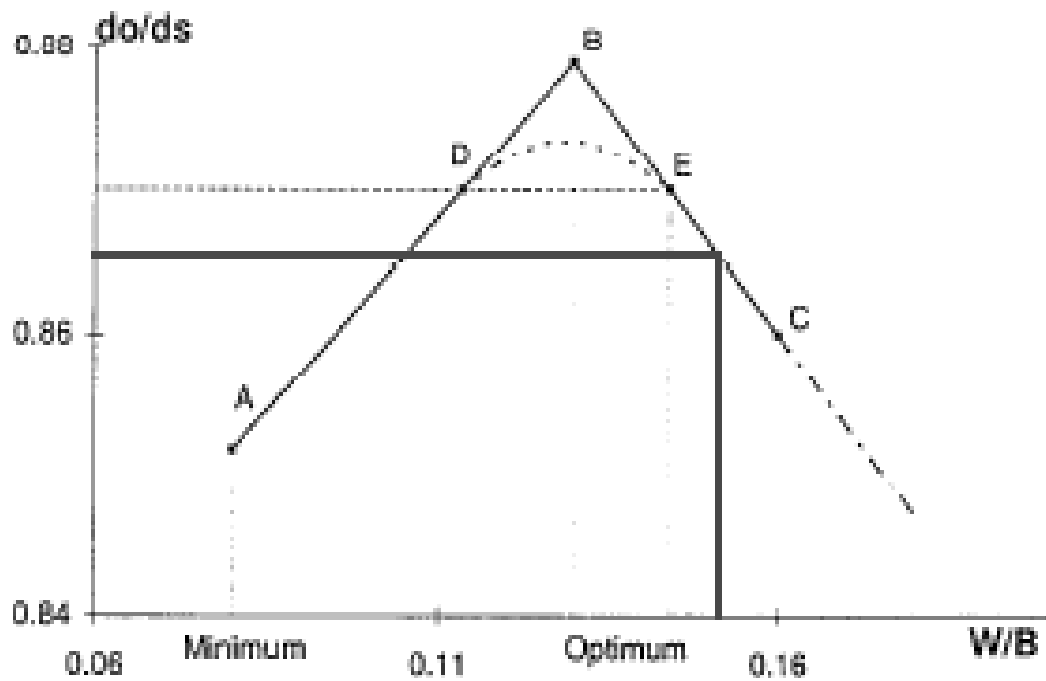
De gewichtsverhoudingen van de stoffen zijn terug te vinden in tabel 13. Voor portland cement en zand wordt respectievelijk CEM I 52,5N en M31 gebruikt, tenzij anders vermeld. GLENIUM® 51 con.35% wordt gebruikt als superplastificeerder (technische fiche in bijlage 1).

	RPC 200				RPC 800	
	Non fibered		Fibered		Silica aggregates	Steel aggregates
Portland Cement	1	1	1	1	1	1
Silica fume	0.25	0.23	0.25	0.23	0.23	0.23
Sand 150 - 600 μm	1.1	1.1	1.1	1.1	0.5	-
Crushed quartz $d_{50}=10\mu\text{m}$	-	0.39	-	0.39	0.39	0.39
Superplasticizer	0.016	0.019	0.016	0.019	0.019	0.019
(Polyacrylate)						
Steel fiber L=12 mm	-	-	0.175	0.175	-	-
Steel fiber L=3 mm	-	-	-	-	0.63	0.63
Steel aggregates <800 μm	-	-	-	-	-	1.49
Water	0.15	0.17	0.17	0.19	0.19	0.19
Compacting pressure	-	-	-	-	50 MPa	50 MPa
Heat treatment temperature	20°C	90°C	20°C	90°C	250-400°C	250-400°C

Tabel 13: Gewichtshoeveelheden betonsamenstelling (P. Richard en M. Cheyrezy, 1995)

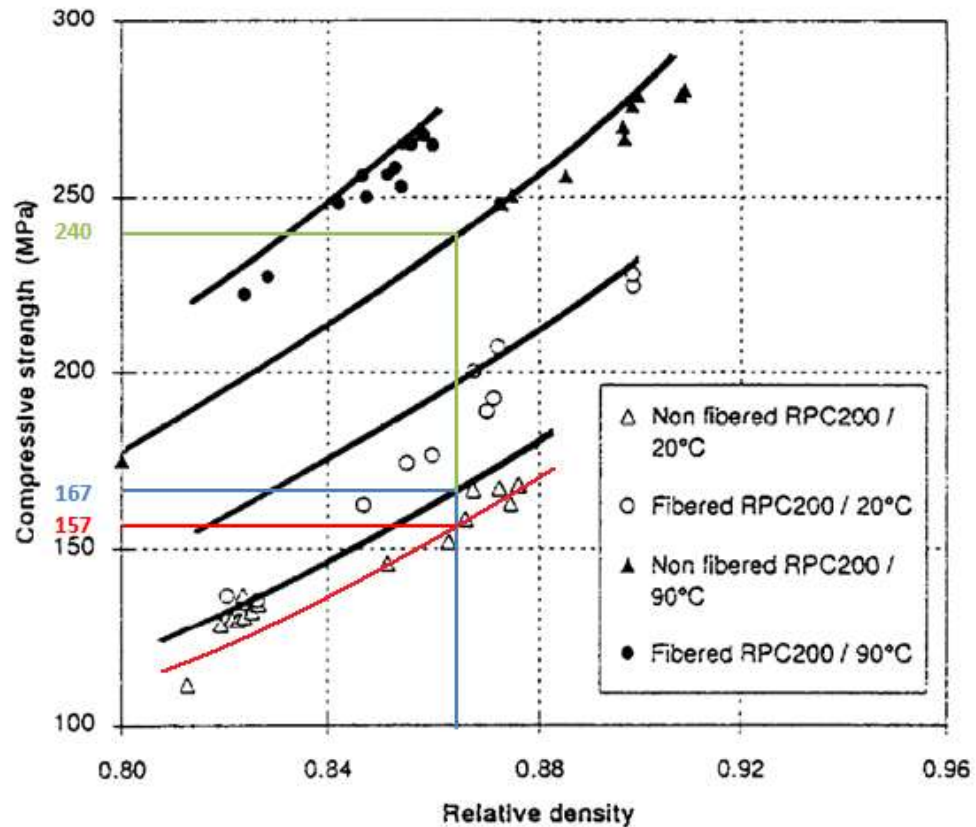
2. Inleidende testen op een het referentiemengsel

Aan de hand van het watergehalte (15 %) kan via onderstaande grafiek de relatieve densiteit d_0/d_s worden bepaald. Die wordt geschat op een waarde van 0,865.



Grafiek 24: De variatie van de relatieve densiteit i.f.v. het watergehalte. (Richard, Cheyrezy, 1995)

Omdat de relatieve densiteit volgens Richard en Cheyrezy (1995) rechtstreeks in verband staat met de druksterkte, kan via onderstaande grafiek al een eerste idee verkregen worden van de druksterkte van het referentiemengsel.

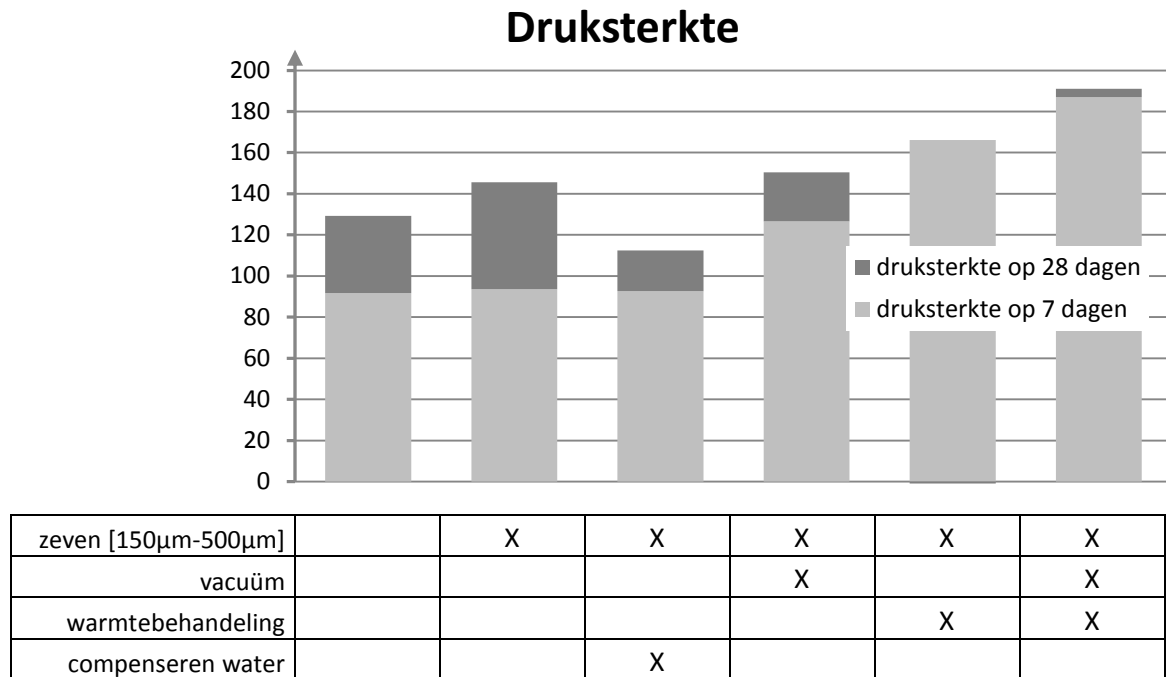


Grafiek 25: Druksterkte i.f.v. de relatieve densiteit. (Richard, Cheyrezy, 1995)

Voor de samenstelling (Non fibered RPC200 / 20°C) zou er een druksterkte van 167 MPa moeten kunnen worden bereikt. De meetpunten liggen weliswaar allemaal onder de zwarte curve en daarom werd ook de gemiddelde curve geschetst (rode kleur). Een relatieve densiteit van 0,865 komt op de gemiddelde curve overeen met een druksterkte van 157 MPa. Als er op het verharde beton een warmtebehandeling (zie § 3.2.5) wordt uitgevoerd, zou er een druksterkte van ongeveer 240 MPa moeten worden bereikt. Deze sterkte bleef ook hier veel lager.

Na elektronisch contact met de auteur van het artikel, bleek dat de druksterktes meestal gemeten zijn op cilinders met een diameter van 7 cm en een hoogte van 14 cm (of cilinders met diameter van 11 cm en een hoogte van 22 cm). Omdat de hoogte (h) van de cilinder groter is dan de vierkantswortel van de doorsnede ($h > \sqrt{A}$) zouden de kubusdruksterktes, in dit onderzoek gemeten, nog iets hoger moeten uitvallen.

In een eerste reeks mengelingen wordt nagegaan of deze sterktes ook effectief bekomen worden.



Grafiek 26: Druksterktes op verschillende mengsels (aangekruist als de bewerking is uitgevoerd)

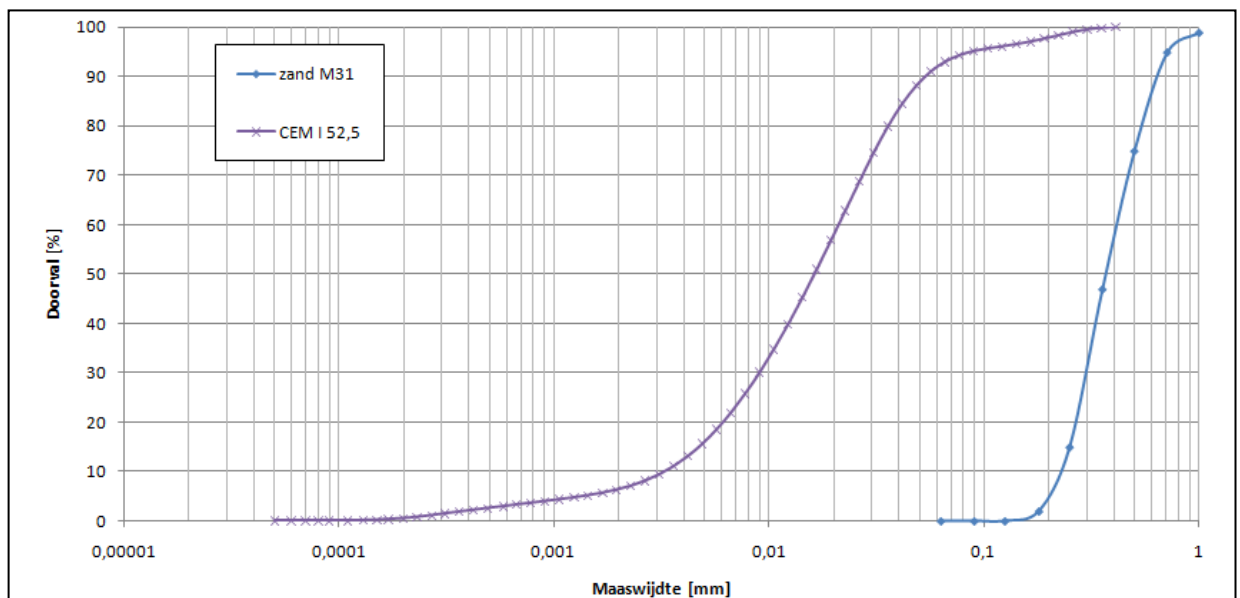
In bovenstaande grafiek worden de druksterktes van verschillende mengsels uitgezet op 7 en 28 dagen. In eerste instantie wordt er gekeken of het noodzakelijk is om het zand te zeven, want volgens tabel 13 moet zand gezeefd worden tussen de 150 µm en de 600 µm. Zeven van die grootte zijn in labo Magnel niet aanwezig, daarom wordt geopteerd om te zeven tussen de 125 µm en de 500 µm. In grafiek 26 is duidelijk te zien dat de druksterkte van het beton waar het zand vooraf gezeefd wordt, een stuk hoger is dan wanneer er niet gezeefd wordt. Er wordt een verschil van ongeveer 17 MPa geconstateerd. Toch heeft de druksterkte van de tweede kolom, exact dezelfde samenstelling als die van tabel 13, een lagere waarde dan de vooropgestelde 157 MPa, namelijk 146 MPa.

Omdat er in het artikel niet duidelijk vermeld wordt of er een watercompensatie gebeurt bij het toevoegen van de superplastificeerder, is er bij de derde kolom een watercompensatie uitgevoerd. Er is gebruik gemaakt van een superplastificeerder die maar voor 35 % geconcentreerd is, waardoor er ongeveer 65 % water wordt toegevoegd bij het toedienen van de superplastificeerder. In grafiek 26 is duidelijk te zien dat dit beton een veel slechtere druksterkte heeft. Dit zal vooral te wijten zijn aan de slechte verwerkbaarheid, waardoor het

beton moeilijk te verdichten is. Er wordt dus vanuit gegaan dat er in het artikel geen watercompensatie is doorgevoerd.

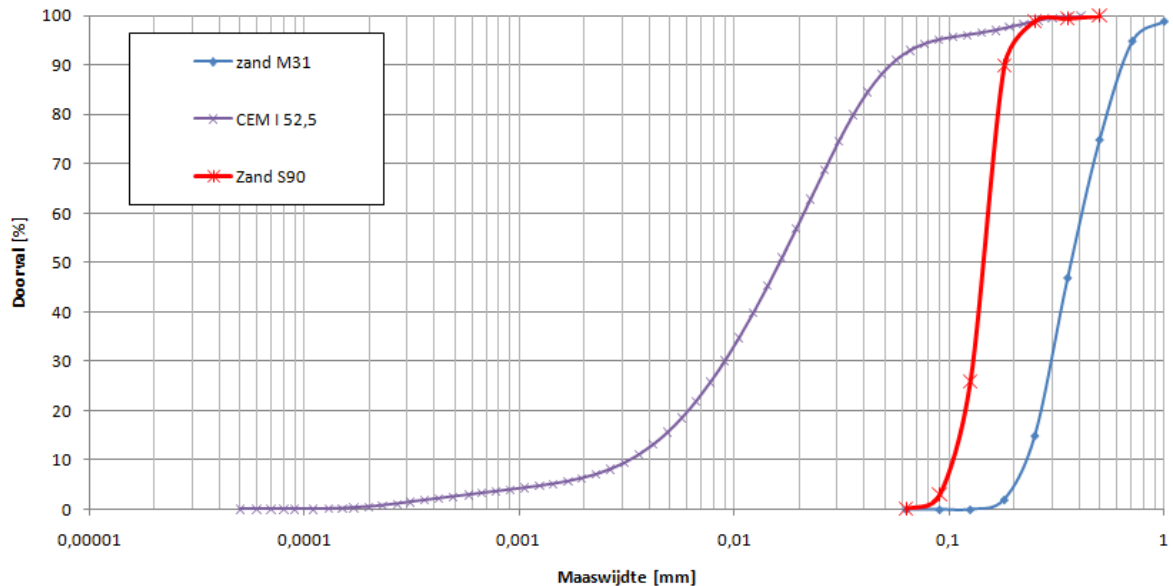
Bij de laatste drie kolommen is voor het eerst gebruik gemaakt van een vacuümbehandeling tijdens het mengen en van een warmtebehandeling op het verharde beton. Er wordt vastgesteld dat de druksterkten voor het eerst de 150 MPa overschrijden en er voor het eerst van ultrahoogsterktebeton kan worden gesproken. Toch zijn ook hier de druksterktes een stuk lager dan de druksterke volgens tabel 13.

In tweede instantie wordt gekeken of er betere resultaten (naar druksterkte) te verkrijgen zijn, als de leegte (grafiek 27) tussen de zeefkromme van cement en zand M31 opgevuld wordt.



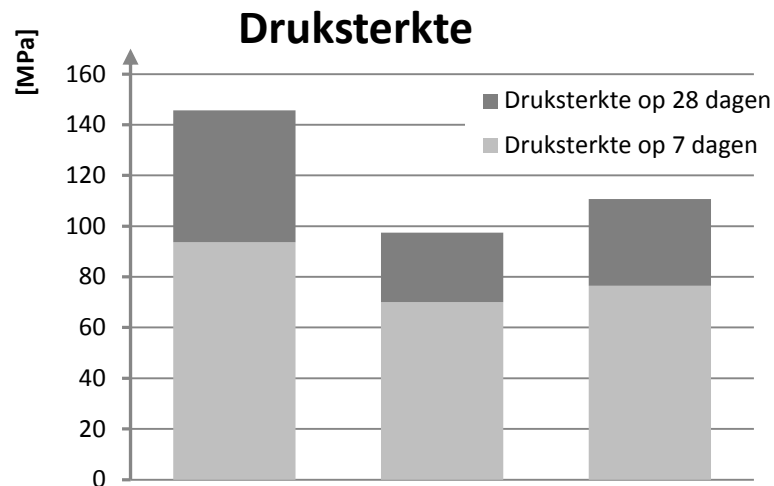
Grafiek 27: Zeefkromme CEM I 52,5 en zand M31

Het zand S90 ligt tussen zeefkrommes van het cement en het zand M31 (grafiek 28). Door een bepaalde hoeveelheid zand S90 toe te voegen, wordt getracht een compacter beton te verkrijgen.



Grafiek 28: Zeefkromme CEM I 52,5, zand S90 en zand M31

Via “trail and error” voegen we achtereenvolgens 20 en 30 % zand S90 toe (zie bijlage 2 voor een grafiek met alle zeefkrommes). Als de druksterktes uitgezet worden op grafiek 29, is duidelijk te zien dat de hoogste druksterkte bekomen wordt met het zand M31. De druksterkte is lager als er een hoeveelheid zand S90 is toegevoegd. De verklaring hiervoor is dat de grootste cementdeeltjes (80-100 μm) dan interfereren met de kleine zandkorrels (< 150 μm). Dit is nefast voor de sterkteontwikkeling van het beton (Richard, Cheyrezy, 1995).

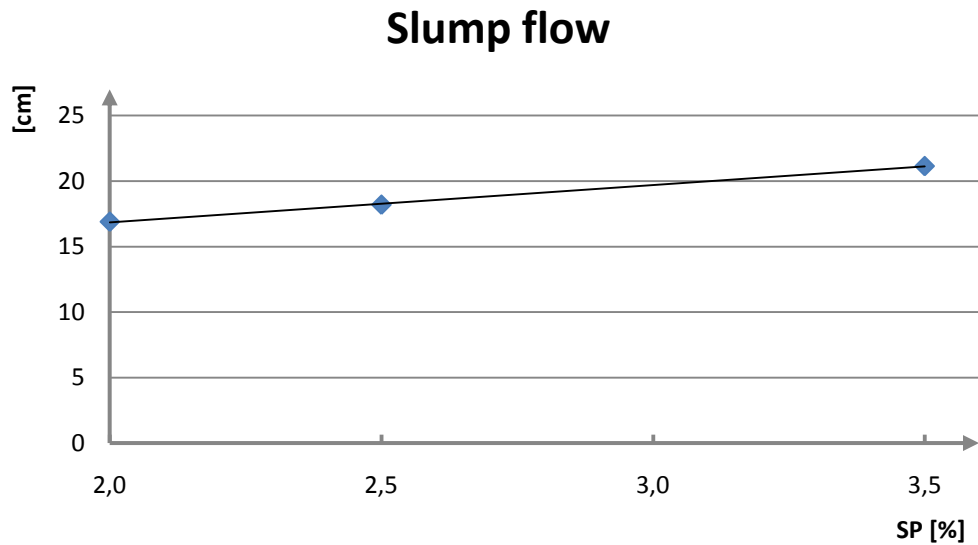


Grafiek 29: Druksterktes bij een verschillende verhouding zand M31 en zand S90

Ten derde wordt er niet enkel meer gekeken naar de druksterkte, maar ook naar de verwerkbaarheid. De verwerkbaarheid wordt bepaald aan de hand van de uitstroomtijd op een kleine V-funnel en de vloeimaat (minislump flow). Goed verwerkbaar hoogsterktebeton wordt beschouwd als beton met een slump flow van $26 \pm 0,5$ cm (Fehling, Schmidt, Stürwald, 2008).

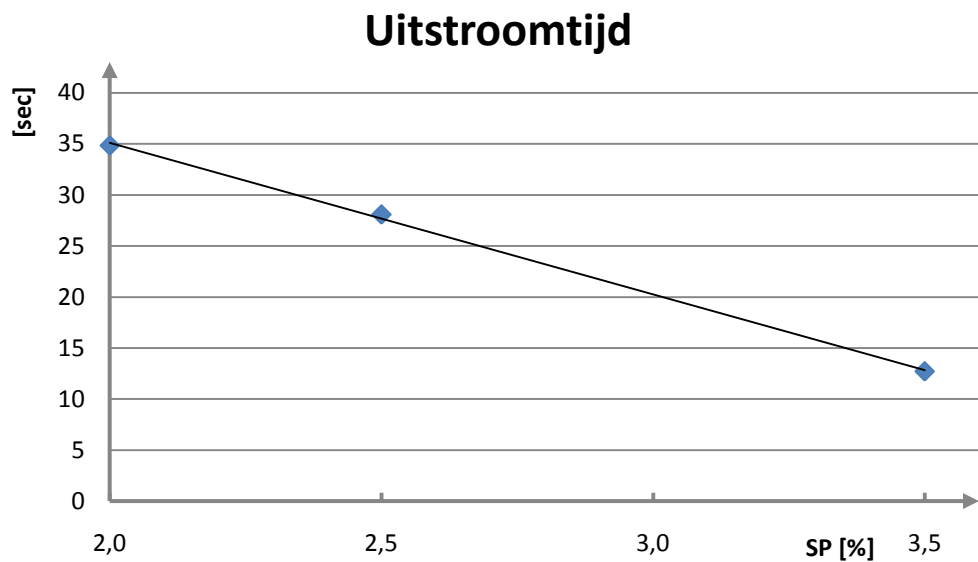
Uit proeven op het mengsel met de samenstelling van tabel 13 is vastgesteld dat de uitstroomtijd oneindig groot is en dat het beton bij het bepalen van de slump flow niet beweegt zonder schokken op de schoktafel. De slump flow na 15 slagen is slechts 12,1 cm. Daaruit kan worden geconcludeerd dat de verwerkbaarheid heel slecht is en er dus zeker verdicht dient te worden.

Om een betere verwerkbaarheid te verkrijgen zijn er twee mogelijkheden, enerzijds het watergehalte verhogen en anderzijds het gehalte superplastificeerder laten toenemen. Er wordt geopteerd om het watergehalte van 0,15 te verhogen naar 0,20 en het gehalte superplastificeerder te laten variëren.



Grafiek 30: Slump flow i.f.v. het gehalte superplastificeerder (w/c = 0,2)

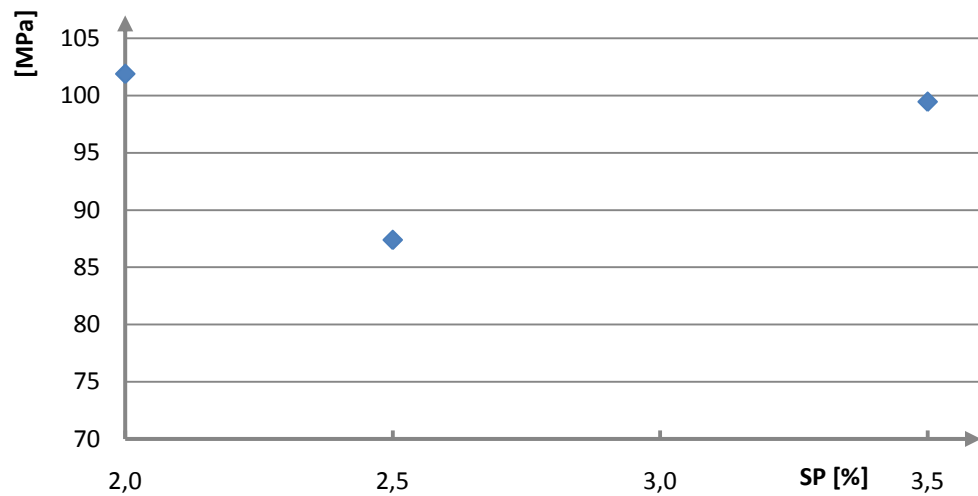
De slump flow neemt ongeveer lineair toe als het gehalte superplastificeerder toeneemt. Het gehalte superplastificeerder zou nog meer moeten toenemen om een slump flow van $26 \pm 0,5$ cm te verkrijgen.



Grafiek 31: Uitstroomtijd i.f.v. het gehalte superplastificeerder (w/c = 0,2)

De uitstroomtijd daalt ongeveer lineair als het gehalte superplastificeerder toeneemt.

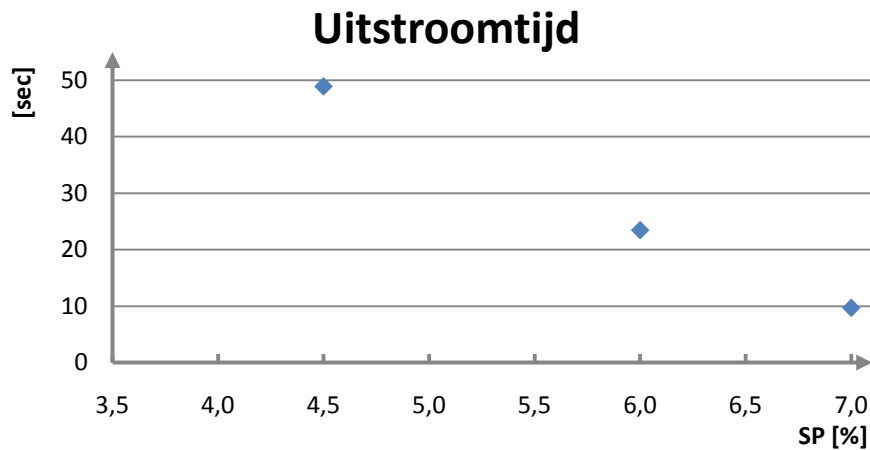
Druksterkte na 7 dagen



Grafiek 32: Druksterkte na 7 dagen i.f.v. het gehalte superplastificeerder (w/c = 0,2)

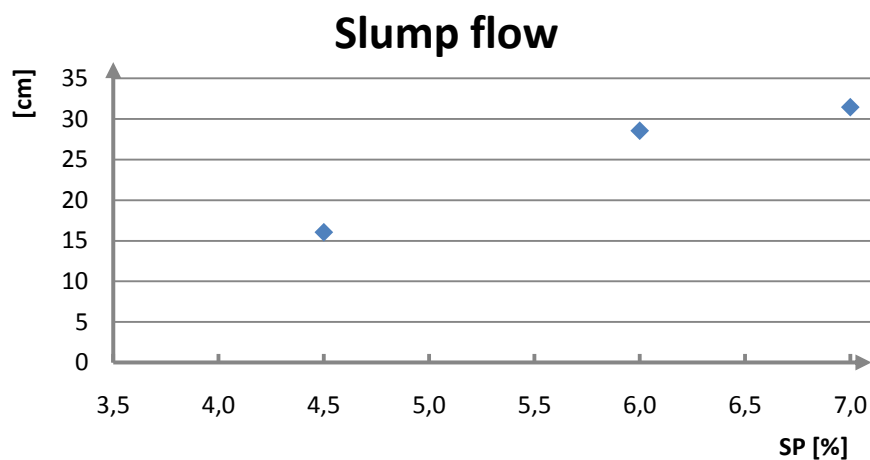
Uit de druksterkte na 7 dagen kan geen besluit getrokken worden. Volgens Dieryck, Desmyter en Bleiman (2005) zou de druksterkte lichtjes afnemen bij het toenemen van het gehalte superplastificeerder, omdat er in de superplastificeerder een gedeelte water zit. Dit kan via deze metingen niet bevestigd worden omdat de druksterkte bij een gehalte superplastificeerder van 2,5 % veel lager uitvalt dan voorspeld.

Omdat er geen sterke daling is van de druksterkte bij het toenemen van het gehalte superplastificeerder, zal getracht worden de vereiste verwerkbaarheid te verkrijgen met nog hogere gehalten superplastificeerder. De w/c-factor wordt teruggebracht naar de oorspronkelijke 0,15.



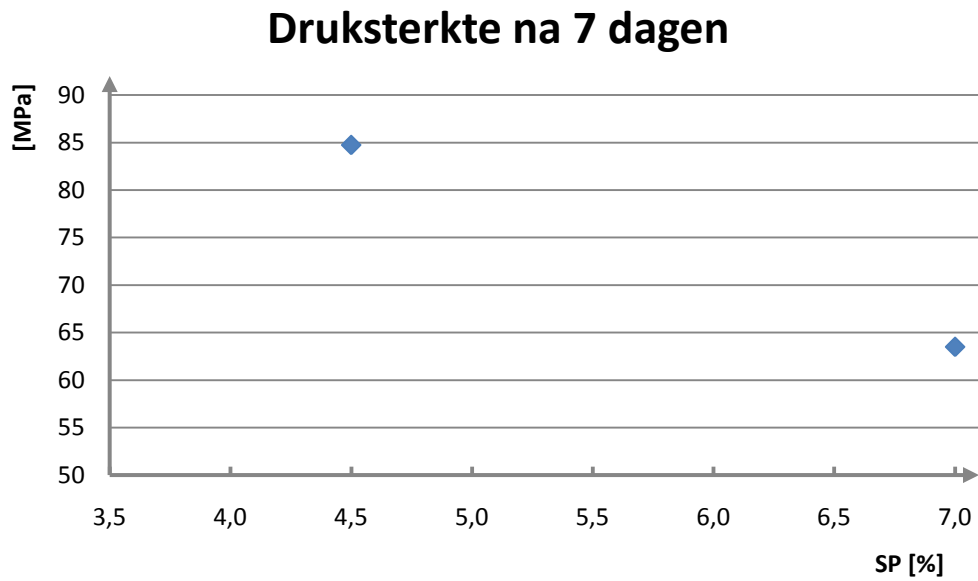
Grafiek 33: Uitstroombtijd i.f.v. het gehalte superplastificeerder (w/c = 0,15)

Bij een superplastgehalte van 3,5 % is de uitstroombtijd oneindig groot. Uit grafiek 33 kan eveneens worden opgemerkt dat de uitstroombtijd snel afneemt, als het gehalte superplastificeerder toeneemt. Bij een gehalte superplastificeerder van 7 % is de uitstroombtijd maar 10 seconden meer.



Grafiek 34: Slump flow i.f.v. het gehalte superplastificeerder (w/c = 0,15)

De slump flow bereikt een waarde van meer dan 30 cm bij een gehalte superplastificeerder van 7 %. Deze waarde ligt iets boven de vooropgestelde $26 \pm 0,5$ cm.



Grafiek 35: Druksterkte na 7 dagen i.f.v. het gehalte superplastificeerder ($w/c = 0,15$)

Bij zeer hoge concentraties superplastificeerder wordt een sterke daling van de druksterkte vastgesteld. Toch zal dit mengsel gebruikt worden als referentie voor het volgende hoofdstuk en dit omwille van zijn goede verwerkbaarheid.

3. Proeven op een hoogsterkte-referentiemengsel

In dit hoofdstuk wordt gekeken wat de invloed is op de druksterkte en de verwerkbaarheid als:

- De mengtijd en de mengsnelheid varieert.
- Het luchtgehalte varieert.
- De superplastificeerder op verschillende manieren wordt toegevoegd.

Er dient opgemerkt te worden dat elke mengeling slechts 1 maal is uitgevoerd.

3.1 Samenstelling

	per [X] l		gewichtshoeveelheden
	[kg]	[liter]	[-]
Portland cement	2,950	0,952	1
Silica fume	0,738	0,335	0,25
Zand M31 (125-500µm)	3,245	1,225	1,1
Zand S90	0,000	0,000	0
Crushed quartz $d_{50}=10\mu\text{m}$	0,000	0,000	0
Superplastificeerder	0,590	0,536	0,07
Water	0,553	0,553	0,15
Totaal	8,076	3,601	

Tabel 14: Samenstelling van het betonmengsel

3.2 Mengprocedures

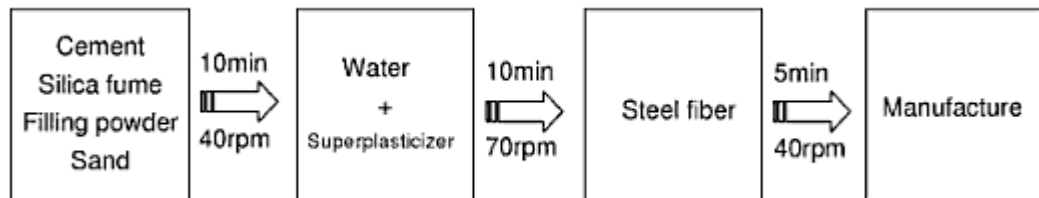
Er zijn heel wat verschillende instellingen die aan de kleine vacuümmixer kunnen worden gewijzigd. In dit onderzoek:

- varieert het toerental van de rotor van 250 tr/min (laag) tot 500 en 750 tr/min (hoog);
- varieert de luchtdruk van atmosferische druk (1013 mbar) tot 500 mbar en 100 mbar.

Het toerental van de mengbak blijft vast op 83 tr/min.

Mengsequentie [min]:

De mengtijden voor dit onderzoek zijn gebaseerd op het boek 'Ultra high performance concrete (UHPC)'.



Figuur 34: Voorbeeld van een mengprocedure (Fehling, Schmidt, Stürwald, 2008)

Uit figuur 34 kan besloten worden dat een mengtijd van 20 minuten vooropgesteld wordt voor een hoogsterktebeton zonder vezelversterking. Omdat in dit afstudeerwerk gebruik gemaakt wordt van hogere mengsnelheden, 250 tr/min en meer, wordt verondersteld dat de ideale mengtijd onder de 20 minuten zal liggen. Beton wordt daarom ontwikkeld met mengtijden van 5, 10, 15 en 20 minuten.

	droog /v _{laag}	nat /v _{laag}	nat /v _{hoog}
5 minuten	1	1	3
10 minuten	2	2	6
15 minuten	3	3	9
20 minuten	4	4	12

Tabel 15: Mengsequentie [min]

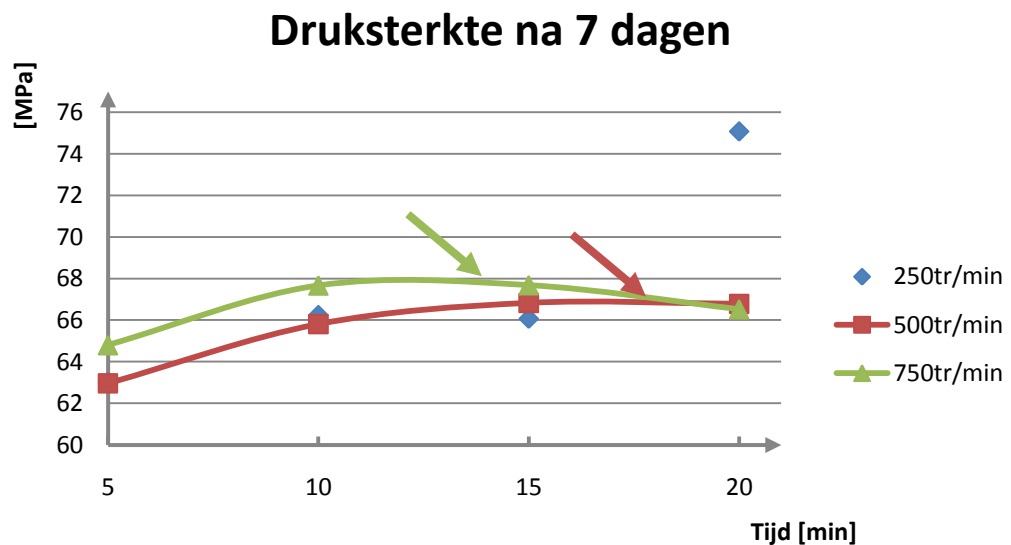
Mengmethode voor 15min:

1. zand, cement en silica fume afwegen, in de kuip doen en handmatig mixen;
2. 3 minuten traag mengen (250 tr/min);
3. tijd stoppen en water toedienen;
4. 1 minuut zand, cement, SF en water mengen (250 tr/min);
5. tijd stoppen en superplastificeerder bijvoegen;
6. 2 minuten zand, cement, SF, water en SP traag mengen (250 tr/min);
7. vacuüm eerst laten instellen en dan snelheid rotor verhogen;
8. 9 minuten snel mengen (500/750 tr/min);
9. mengbak, rotor en vacuümmachine stilleggen.

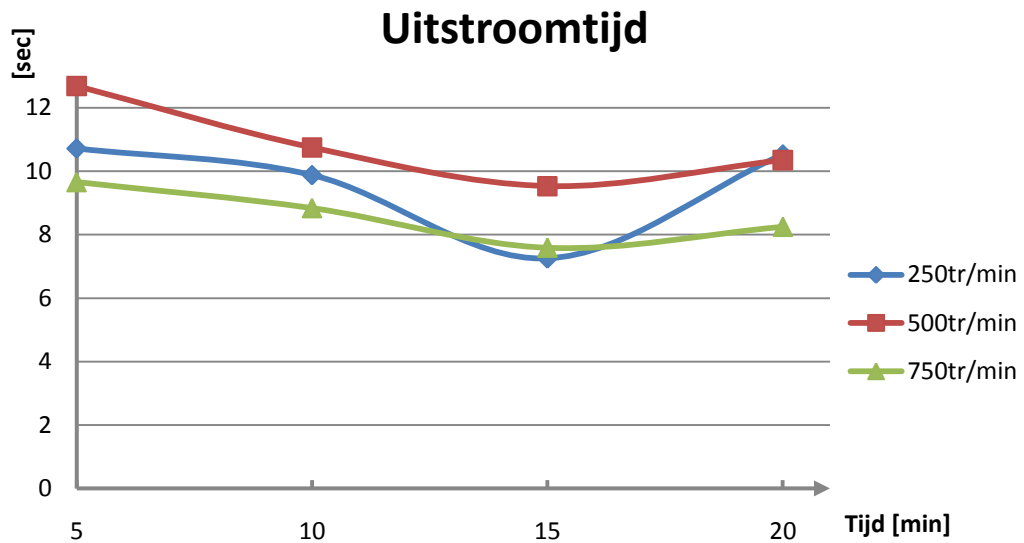
In § 1.2.4 kunt u zien dat de mengtijden heel wat korter kunnen, maar die informatie was er nog niet bij de start van het onderzoek.

3.3 *Mengtijd en mengsnelheid laten variëren*

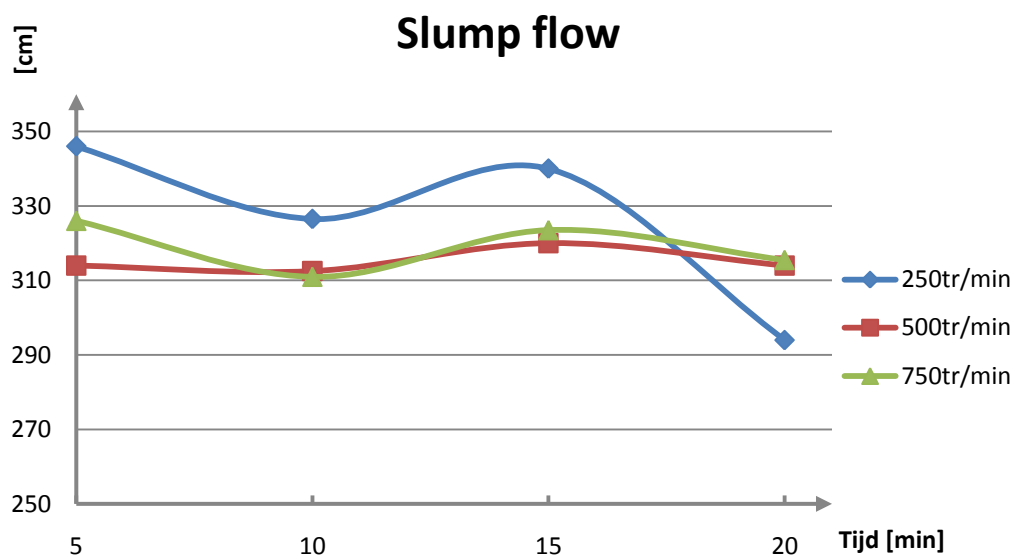
In grafiek 36 kan bij de laagste mengsnelheid (250 tr/min) worden vastgesteld dat de druksterkte toeneemt als de mengtijd toeneemt. Alleen de druksterkte bij 15 minuten is wat aan de lage kant. Ook kan er geconstateerd worden dat bij een toerental van 500 en 750 tr/min een maximale sterkte bereikt wordt. Hier is het maximum rond de 15 minuten. Er kan eveneens worden opgemerkt dat het maximum naar links verschuift als er met een hogere snelheid gemengd wordt. De verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat er ontmenging optreedt als er te lang gemengd wordt. Ten slotte kan ook worden vastgesteld dat er telkens een hogere sterkte wordt bereikt bij 750 tr/min dan bij 500 tr/min, maar de verschillen zijn heel miniem.



Grafiek 36: Druksterkte i.f.v. de mengtijd

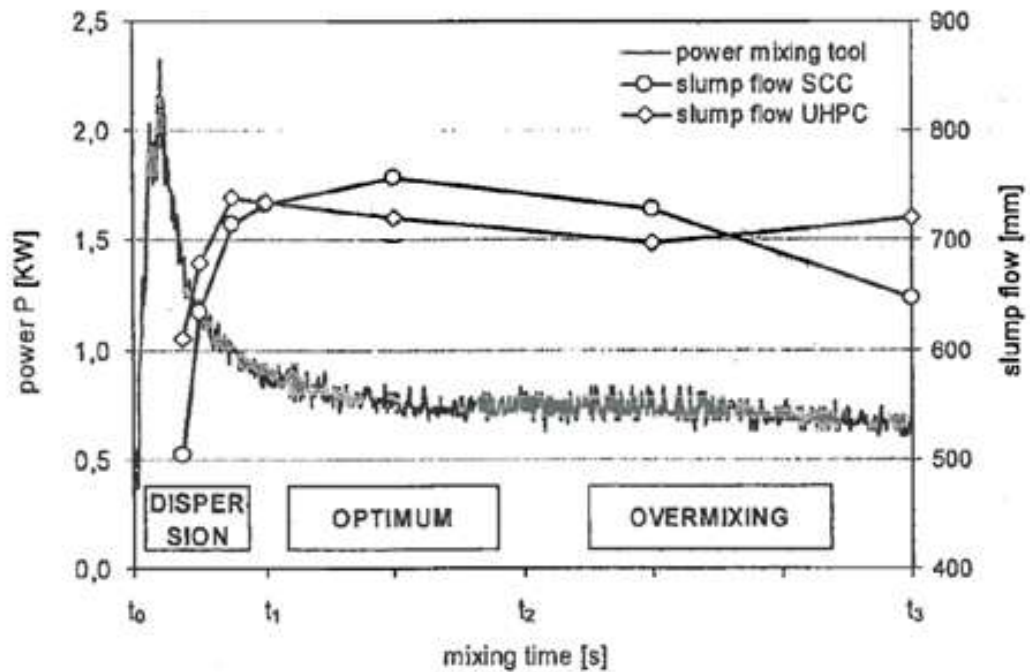


Grafiek 37: Uitstroomtijd i.f.v. de mengtijd

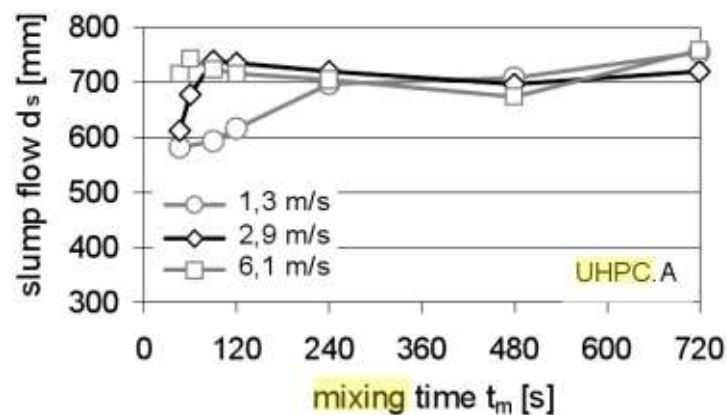


Grafiek 38: Slump flow i.f.v. de mengtijd

Uit grafiek 37 en 38 kan er besloten worden dat niet alleen de hoogste druksterkte wordt bereikt bij 15 minuten, maar de verwerkbaarheid daar ook het best is. Als de bekomen resultaten worden vergeleken met de reeds uitgevoerde studie van Schiessl, Mazanec en Lowke (2007), zou men in eerste instantie denken dat 15 minuten zou overeenstemmen met het optimum (grafiek 39). Niets is minder waar, want als er gekeken wordt hoe grafiek 39 wordt bekomen, via de testresultaten van grafiek 40, kan er besloten worden dat het optimum zich voordoet rond de 2 minuten (120 seconden). Wat wil zeggen dat bij een mengtijd van 15 minuten een tweede maximum bereikt wordt, die in de “overmixing”-zone ligt.



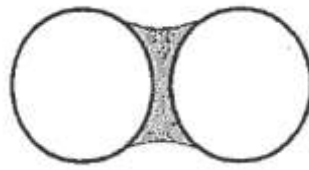
Grafiek 39: Effect van de mengtijd (Schiessl, Mazanec, Lowke, 2007)



Grafiek 40: Effect van de mengtijd (meetwaarden) (Schiessl, Mazanec, Lowke, 2007)

Hieronder wordt er verklaard hoe de 3 verschillende fases in grafiek 39 bekomen worden. De eerste fase is de dispersie fase, dit is de fase waarin water wordt toegevoegd en die een brug begint te vormen tussen de deeltjes (figuur 35). Als gevolg van de spanning en de capillaire druk in het wateroppervlak zullen de krachten tussen de deeltjes verhogen. De eerste fase wordt dus gekenmerkt door een aanzienlijke toename van de kracht die de menginstallatie zal nodig hebben om het water te verdelen. Als water en superplastificeerder meer en meer gelijkmatig verdeeld zijn, zal de kracht afnemen. De capillaire krachten verminderen immers wanneer de ruimten rond de deeltjes met water verzadigd zijn. Tijdens deze eerste fase zal de

vloeibaarheid van de mix toenemen naarmate de verdeling van het materiaal verbetert (Schiessl, Mazanec, Lowke, 2007).

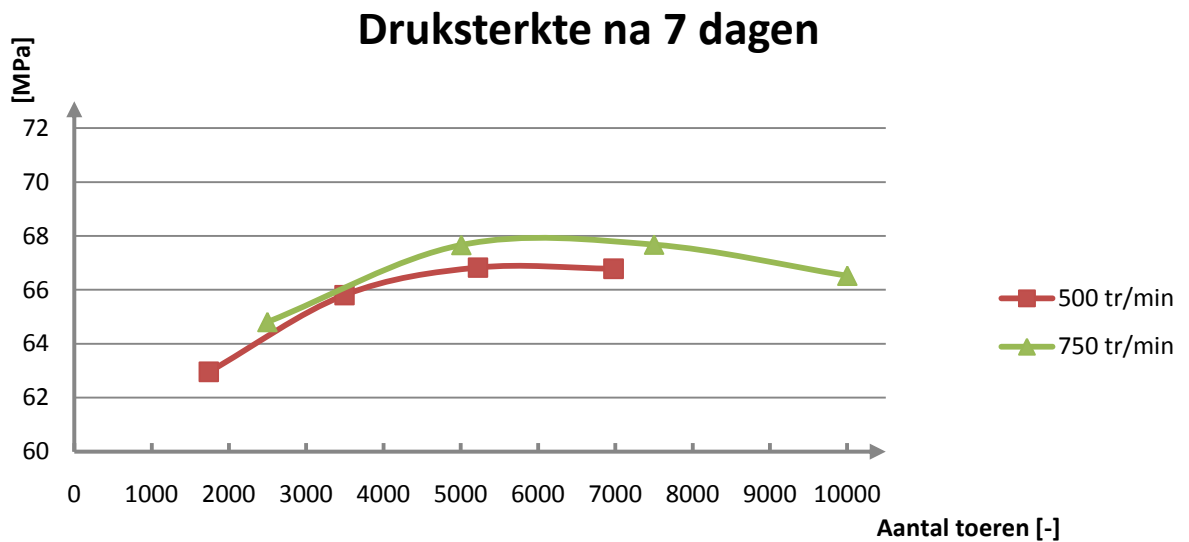


Figuur 35: Waterbrug tussen de korrels (Schiessl, Mazanec, Lowke, 2007)

In de tweede fase, als het mixen verdergaat, zal de kracht die de mixer ontwikkelt blijven afnemen tot een punt waar de kracht ongeveer constant blijft. Daaruit kan worden besloten dat de componenten homogeen gemengd zijn en de superplastificeerder volledig verdeeld is. De vloeibaarheid bereikt dan ook zijn maximale waarde (Schiessl, Mazanec, Lowke, 2007).

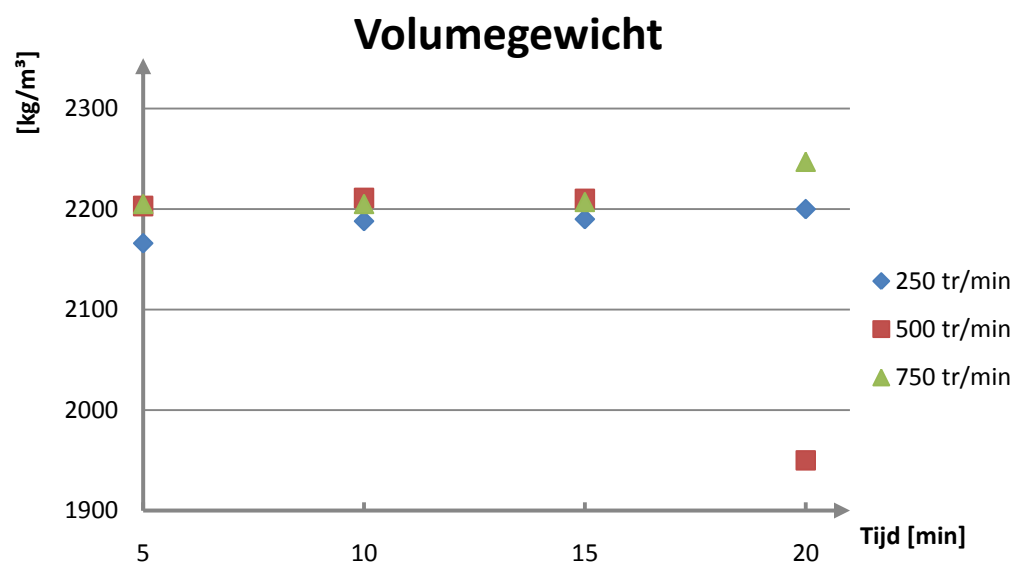
Tot slot wordt er opgemerkt dat in de laatste fase (overmixing-fase) de slump flow van het UHPC-mengsel lichtjes daalt na het maximum. Bij zelfverdichtend beton (SCC) daarentegen is er een grotere reductie van de slump flow. Door het voortzetten van het mengproces zullen de posities van de verspreide deeltjes nauwelijks veranderen binnen het grootste deel van de suspensie, waardoor het extra mengen veel energie vraagt en geen verbetering van de homogeniteit oplevert. Tegelijkertijd zorgen botsingen tussen de deeltjes ervoor dat de deeltjes verder van elkaar komen te liggen. Het aantal fijne deeltjes in de mix wordt verhoogd door slijtage van het grof aggregaat. Dit proces resulteert in een geleidelijke toename van de oppervlakte van de deeltjes in de mix, wat automatisch resulteert in een grotere vraag naar water en superplastificeerder. Uiteindelijk is er daardoor een lagere vloeibaarheid (Schiessl, Mazanec, Lowke, 2007).

De ontmenging heeft niet enkel een effect op de verwerkbaarheid, maar ook op de druksterkte. In grafiek 41 is duidelijk te zien dat een maximum bereikt wordt bij ongeveer 6000 toeren nat mengen, waarna de druksterkte terug afneemt.



Grafiek 41: Druksterkte i.f.v. aantal toeren nat mengen

Uit de grafiek omtrent de volumegewichten (grafiek 42) kan geen besluit worden getrokken. De verschillen zijn heel miniem. Dit werd ook verwacht, aangezien de druksterktes niet veel verschillen.

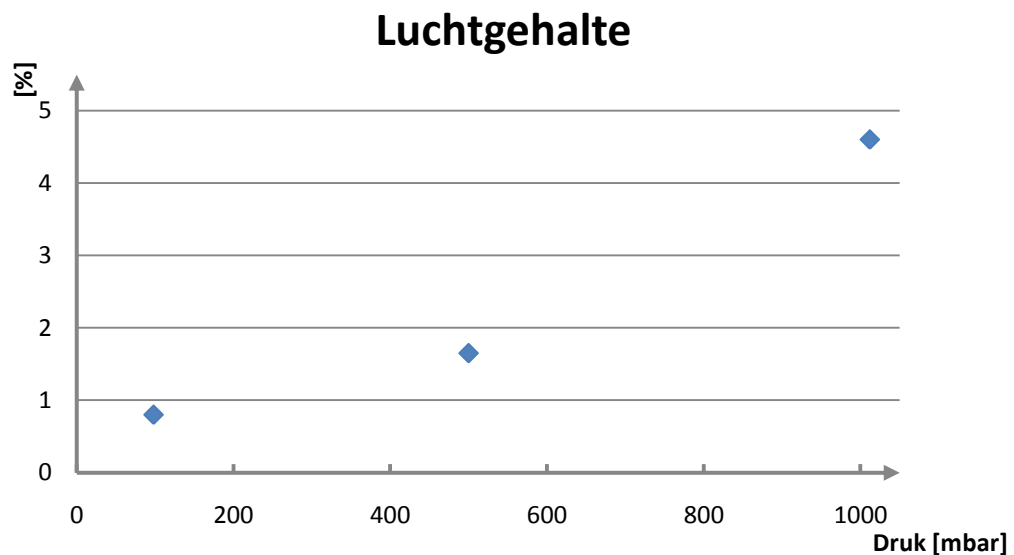


Grafiek 42: Druksterkte i.f.v. het aantal toeren nat mengen

3.4 *Het luchtgehalte laten variëren*

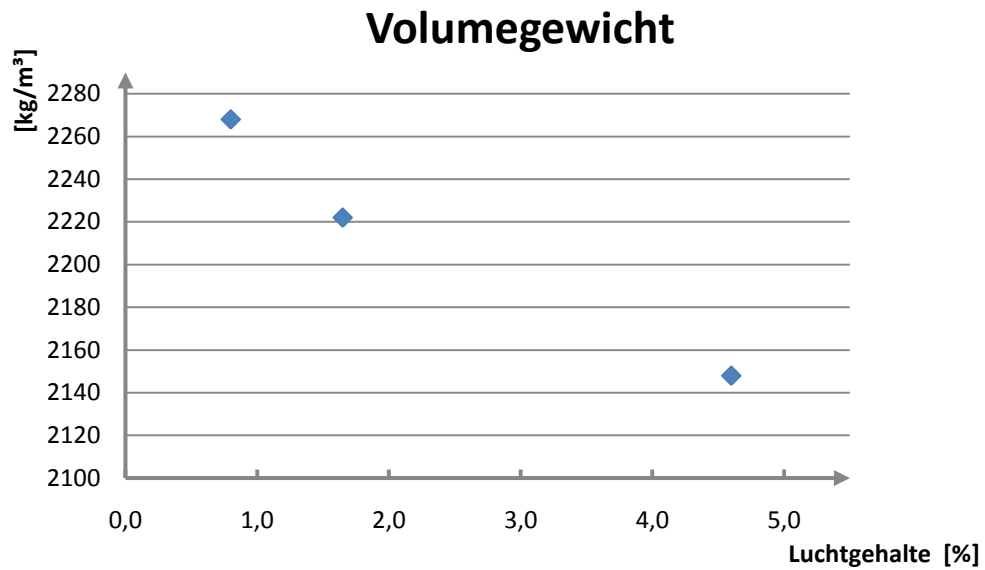
Het gebruik van een vacuümmenger laat toe om mengsels te maken onder verschillende luchtdrukniveaus. Deze menginstallatie en mengmethode zijn vrij recent ontwikkeld. Er is nog maar weinig geweten over de invloeden die het zal hebben op de mengsels die ermee gemaakt worden.

In dit onderzoek worden de mengsels ontwikkeld onder 3 verschillende luchtdrukniveaus. Eerst onder atmosferische druk, (1013 mbar) dan onder 500 mbar en ten laatste onder 100 mbar.



Grafiek 43: Luchtgehalte i.f.v. de luchtdruk

Het is logisch dat het luchtgehalte in het beton zal afnemen als de luchtdruk afneemt. Dit is duidelijk waarneembaar op grafiek 43. Met een vacuümbehandeling kan de luchtdruk ongeveer 5 maal worden verkleind.

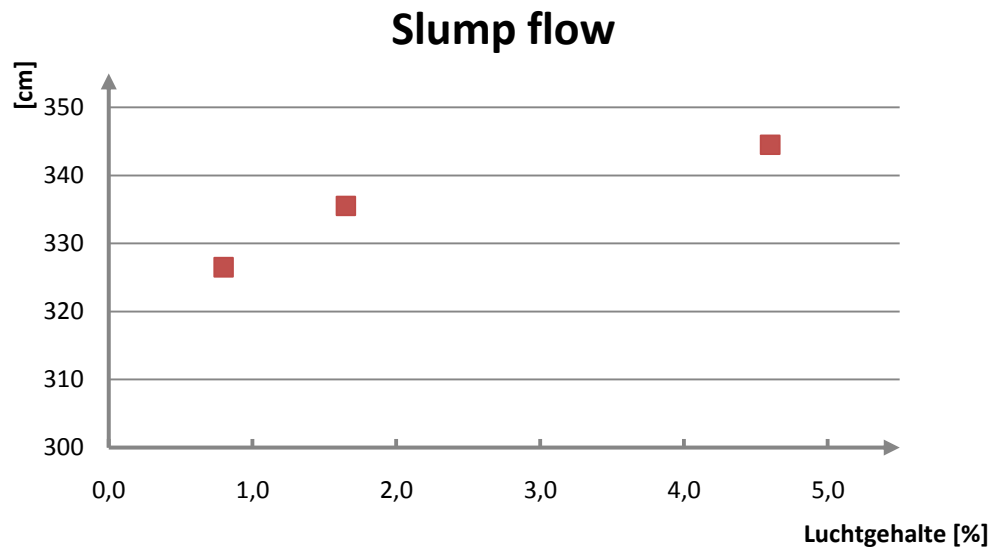


Grafiek 44: Volumegewicht i.f.v. luchtdruk

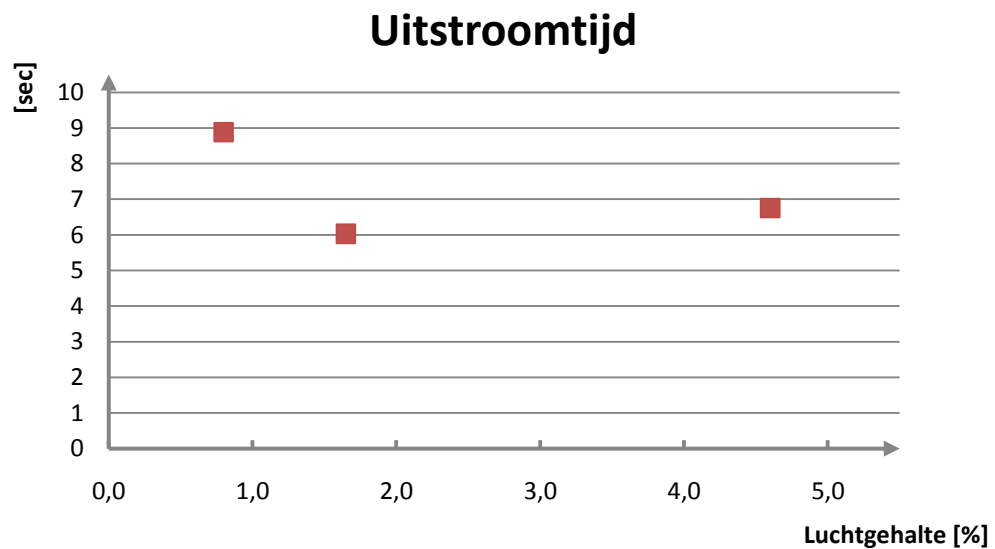
Uit grafiek 44 kan worden vastgesteld dat het volumegewicht afneemt als het luchtgehalte toeneemt. Luchtholtes in beton nemen immers de plaats in van zwaardere componenten en hierdoor zal de dichtheid van het beton verkleinen als het luchtgehalte toeneemt (Lamond, 2006)¹.

¹ § 1.2.3.6 Eigenschappen

Volgens Zain² (1999) leidt een hoger luchtgehalte tot een betere uitstroombijtijd, maar een lagere slump flow. Geen van beiden kan door dit onderzoek bevestigd worden (grafiek 45 en 46).

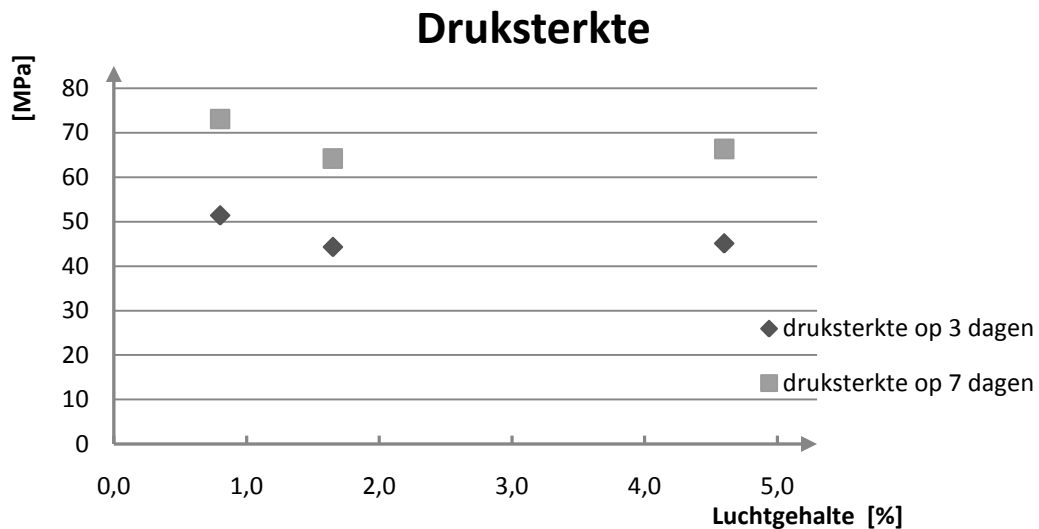


Grafiek 45: Slump flow i.f.v. het luchtgehalte



Grafiek 46: Uitstroombijtijd i.f.v. het luchtgehalte

² § 1.2.3.6 Eigenschappen



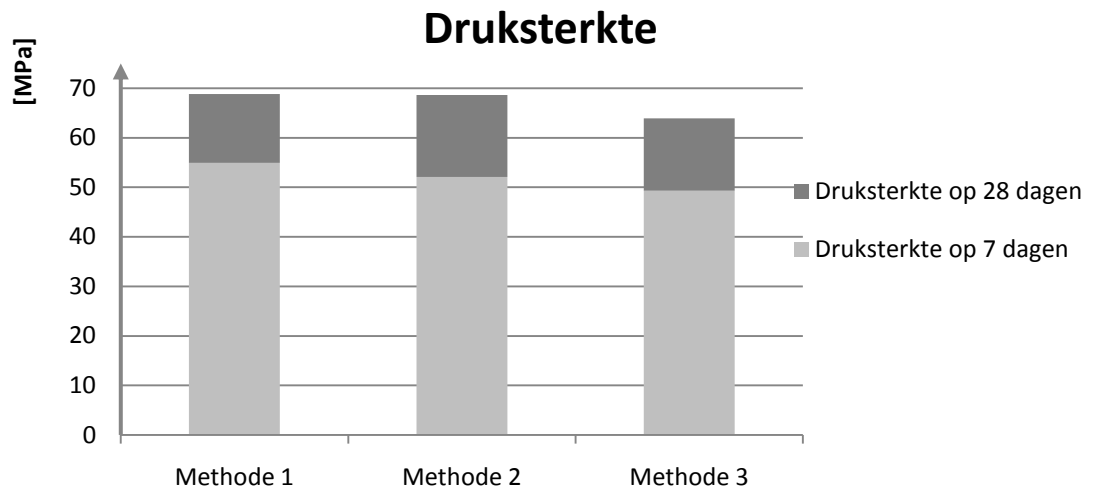
Grafiek 47: Druksterkte i.f.v. het luchtgehalte

Als het luchtgehalte toeneemt met 1 %, is er een verlaging van de druksterkte van ongeveer 2 à 5 % (Halea, 2009). Dit kan niet bevestigd worden omdat de druksterkte bij een luchtdruk van 500 mbar laag uitvalt. Het is wel duidelijk dat de druksterkte sneller zal toenemen bij lage luchtgehaltes dan bij hoge luchtgehaltes. Dit verband is ook terug te vinden in de formule van Féret.

3.5 *Verschillende manieren van superplastificeerder toevoegen.*

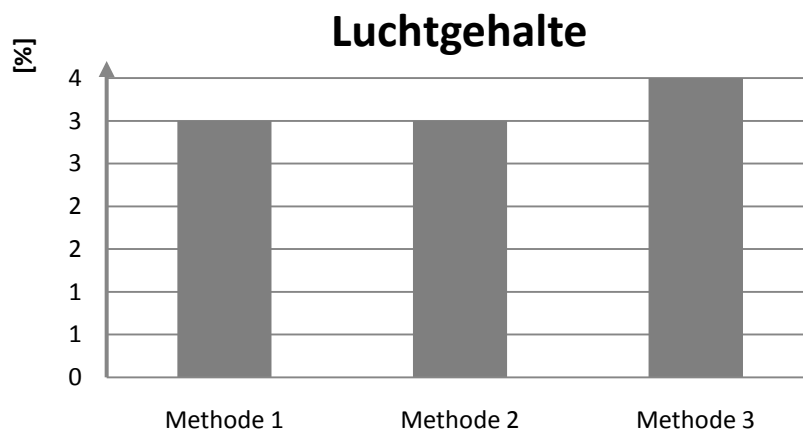
Er worden 3 verschillende methodes gebruikt om superplastificeerder toe te voegen:

- Methode 1: SP en water eerst mengen en daarna in de mengbak gieten.
- Methode 2: eerst water en onmiddellijk daarna SP in de mengbak gieten.
- Methode 3: water in de mengbak, minuut mengen en daarna SP toevoegen.



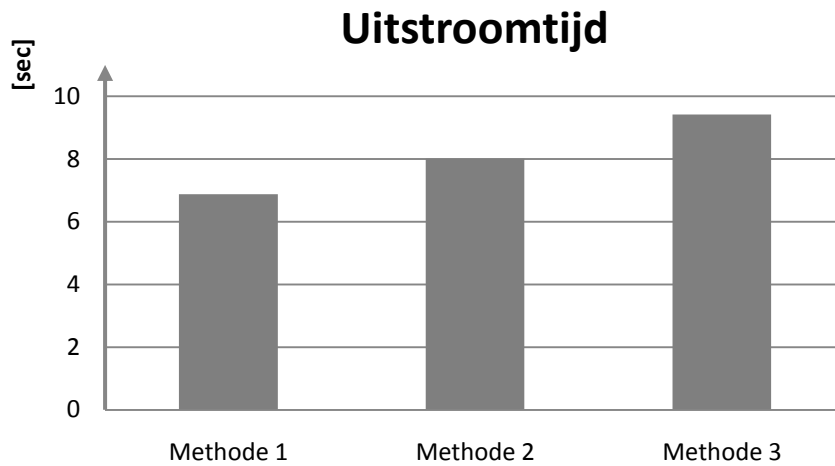
Grafiek 48: Druksterkte na 3 en 7 dagen i.f.v de manier van toevoegen van de superplastificeerder

Uit de grafiek van de druksterktes op 3 en 7 dagen wordt er waargenomen dat de verschillen heel miniem zijn. Toch kan er worden vastgesteld dat het toepassen van methode 1 en 2 een hogere druksterkte oplevert dan die van methode 3. Een verklaring hiervoor kan worden gevonden door het feit dat het luchtgehalte bij de eerste 2 methodes lager ligt dan bij methode 3 (grafiek 49). Daardoor is een compacter beton gevormd.

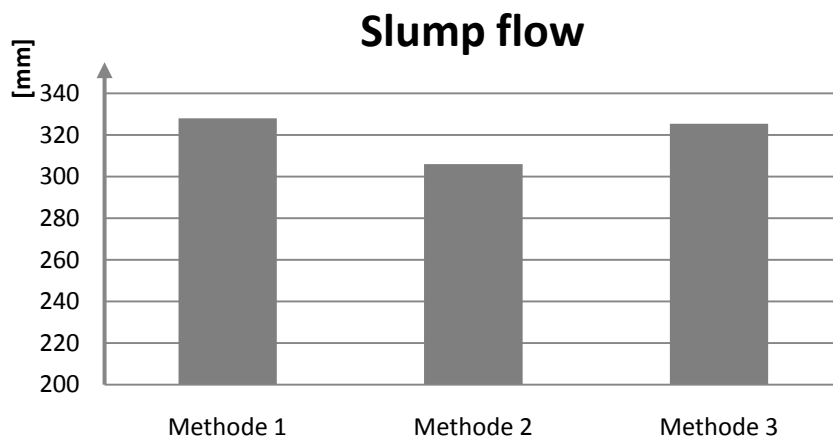


Grafiek 49: Luchtgehalte i.f.v de manier van superplastificeerder toevoegen

Uit de grafieken 50 en 51 kan worden geconcludeerd dat de beste verwerkbaarheid wordt bekomen als de superplastificeerder en het water eerst worden gemengd, vooraleer ze in de mengbak worden gegoten. Wel dient opgemerkt te worden dat de waarden heel dicht bij elkaar liggen en het slechts gaat over één meting.



Grafiek 50: Uitstroomtijd i.f.v de manier van superplastificeerder toevoegen



Grafiek 51: Slump flow i.f.v de manier van superplastificeerder toevoegen

4. Proeven op een ultrahoogsterkte-referentiemengsel

In dit hoofdstuk wordt gekeken wat de invloed is op de druksterkte en de verwerkbaarheid van ultrahoogsterktebeton als we de:

- Mengtijd en de mengsnelheid laten variëren.
- Het luchtgehalte laten variëren.
- Het luchtgehalte laten variëren en kubussen onderwerpen aan een warmtebehandeling.
- De menghoeveelheid laten variëren.
- Kortere mengtijden toepassen.
- Verschillende mengkoppen gebruiken.

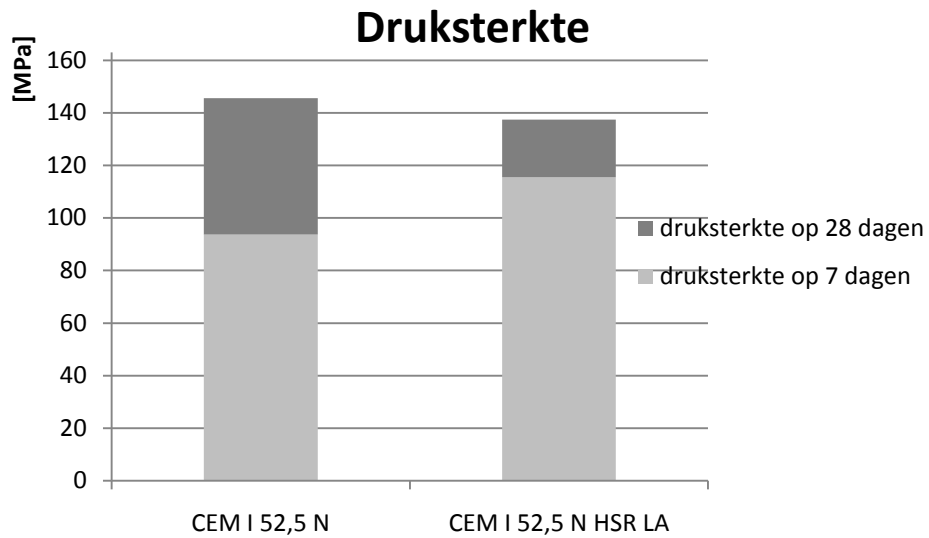
Ten slotte wordt getracht de relatie tussen de druksterkte en de relatieve dichtheid grafisch voor te stellen.

4.1 Samenstelling

In het vorige hoofdstuk werd omwille van de slechte verwerkbaarheid, van het mengsel uit tabel 13, de hoeveelheid superplastificeerder verhoogd van 0,016 naar 0,070. Naar verwerkbaarheid heeft dit zeer goede resultaten, maar de druksterktes bevinden zich aan de lage kant. Daarom wordt in dit hoofdstuk getracht de verwerkbaarheid te verhogen zonder het water- en superplastgehalte te wijzigen.

Dit gebeurt door in plaats van het normale CEM I 52,5 N cement, een cement met een hoog silica gehalte te nemen. De rheologische en de mechanische eigenschappen worden daardoor verbeterd. Ook is vastgesteld dat cement met een laag gehalte C_3A betere resultaten geeft (Richard, Cheyrezy, 1995).

Omwille van bovenstaande redenen wordt geopteerd om het cement CEM I 52,5 N HSR LA (technische fiche in bijlage 3) te gebruiken. Zoals geïllustreerd in onderstaande grafiek is de druksterkte na 7 dagen veel hoger dan die van CEM I 52,5 N. De druksterkte na 28 dagen valt iets lager uit.



Grafiek 52: Vergelijking van de druksterkte tussen CEM I 52,5 N en CEM I 52,5 HSR

De belangrijkste reden voor het gebruik van een HSR-cement, is de veel betere verwerkbaarheid. Zonder de w/c-factor en het superplastgehalte te verhogen, verkrijgen we toch een voldoende verwerkbaar beton. Door gebruik te maken van dit nieuwe cement wordt getracht hogere druksterktes te verwezenlijken.

De nieuwe samenstelling ziet er als volgt uit:

	per [X] l		gewichtshoeveelheden
	kg	liter	[-]
HSR cement	3,100	1,000	1
Silica fume	0,775	0,352	0,25
Zand M31 (125-500µm)	3,410	1,287	1,1
Zand S90	0,000	0,000	0
Crushed quartz d ₅₀ =10µm	0,000	0,000	0
Superplastificeerder	0,142	0,129	0,016
Water	0,581	0,581	0,15
Totaal	8,008	3,349	

Tabel 16: Samenstelling UHPC betonmengsel

4.2 *Mengprocedures*

De gevolgde mengprocedures zijn identiek aan die van het vorige hoofdstuk. Enkel wordt hier geen mengtijd van 5 minuten meer toegepast. De druksterkte bij 5 minuten was namelijk telkens de laagste. In tegenstelling tot het vorige hoofdstuk worden hier alle mengelingen 3 maal uitgevoerd zodat de representativiteit van de resultaten verhoogd. Als de volledige menghoeveelheid gebruikt zou worden om kubussen te vervaardigen, zouden er in totaal 9 dezelfde kubussen zijn. Dit is niet het geval omdat we tweemaal het luchtgehalte meten en zo 2 kubussen verliezen. Op 1 kubus wordt een air-voidanalyse gedaan en er gaat ook 1 kubus verloren door het bepalen van de relatieve dichtheid. Dit resulteert dat er telkens 2 kubussen over zijn om te drukken op 7 dagen en 3 op 28 dagen.

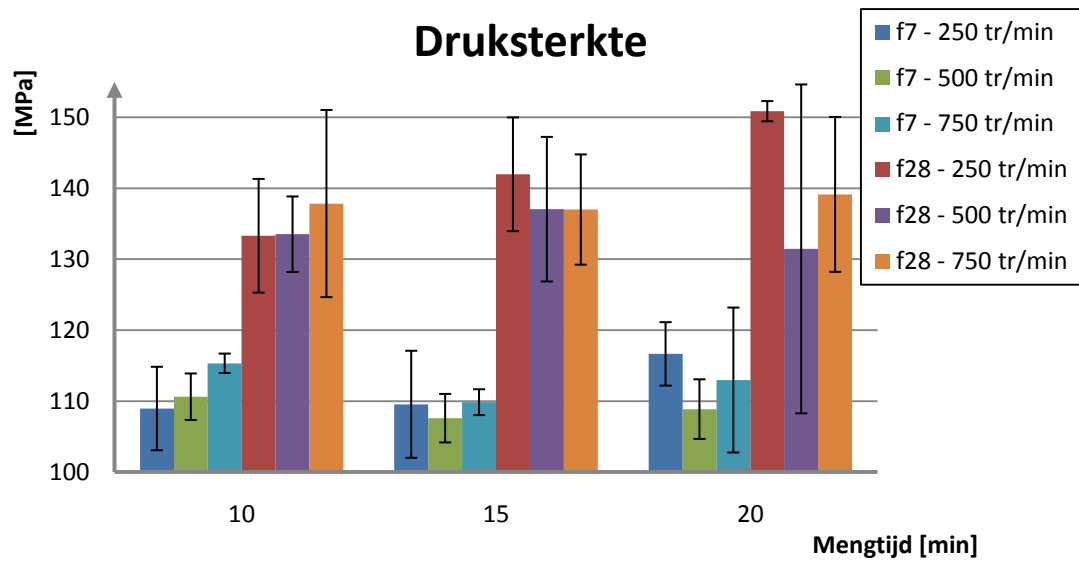
4.3 *Mengtijd en de mengsnelheid laten variëren*

In eerste instantie werden alle mengelingen uitgevoerd met een toerental van 250 tr/min. Dit gebeurde met restanten van een HSR-cement uit het labo Magnel. Alle mengelingen daarna werden gefabriceerd met een nieuwe levering HSR-cement, maar de verwerkbaarheid van het beton van de nieuwe levering lag veel lager. De slump flow bij het nieuwe cement is ongeveer 6 cm kleiner en ook de uitstroomtijd is gemiddeld 8 seconden trager. Omdat de tijd te kort was om alle mengelingen opnieuw te maken, is er geopteerd om de verwerkbaarheid opnieuw te bepalen, weliswaar slechts 1 keer in plaats van 3 keer.

Op grafiek 53 kan bij de laagste mengsnelheid (250 tr/min) worden vastgesteld dat de sterkte blijft toenemen naarmate we langer mengen. De hoogste druksterkte wordt duidelijk bereikt als er met een toerental van 250 tr/min lang wordt gemengd. Dit kon eveneens worden vastgesteld bij het hoogsterktebeton van het vorige hoofdstuk³. Bij een toerental van 500 tr/min en 750 tr/min blijft de druksterkte min of meer gelijk. Er wordt geen maximale druksterkte vastgesteld zoals in het voorgaande hoofdstuk⁴. De representativiteit van deze metingen ligt een stuk hoger dan die van het vorige hoofdstuk. Daardoor moet het besluit (een maximale druksterkte bij 15 minuten) uit het voorgaande hoofdstuk sterk worden genuanceerd.

³ § 3.3 Mengtijd en mengsnelheid laten variëren

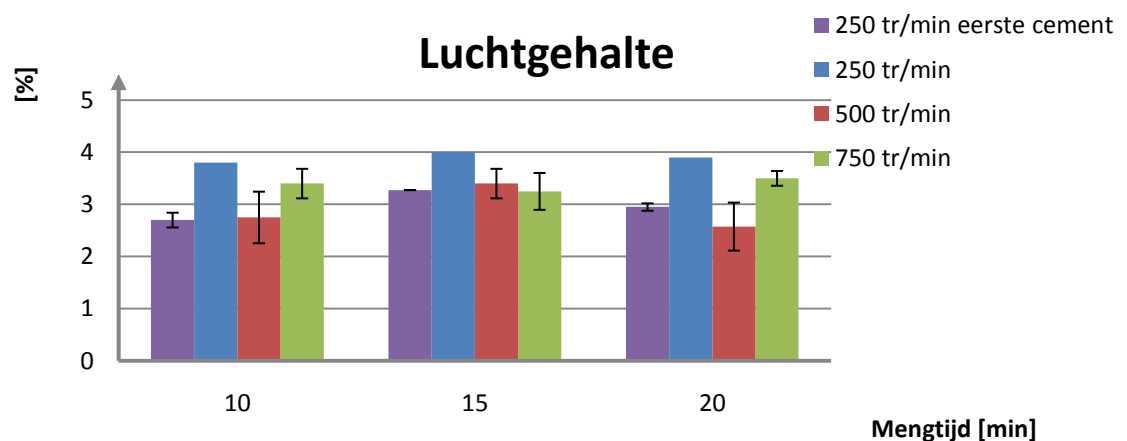
⁴ § 3.3 Mengtijd en mengsnelheid laten variëren



Grafiek 53: Druksterkte i.f.v. de mengtijd en de mengsnelheid

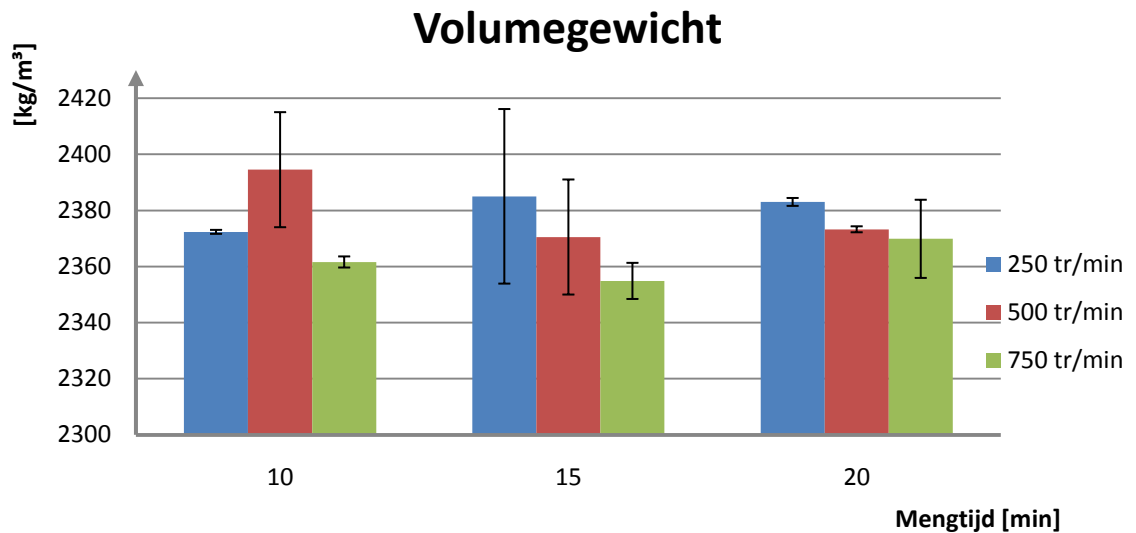
Omdat de druksterktes niet ver uit elkaar liggen, zouden ook de luchtgehaltenes in het beton niet veel mogen variëren (grafiek 54). Dit is hier het geval, maar toch is er geen verband tussen de twee grafieken waar te nemen.

Zoals eerder opgemerkt is de verwerkbaarheid van de eerste levering beton veel beter dan de tweede levering, logischerwijs zou het luchtgehalte dan ook moeten groter zijn, maar hier wordt net het omgekeerde geconstateerd.



Grafiek 54: Luchtgehalte i.f.v. de mengtijd en de mengsnelheid

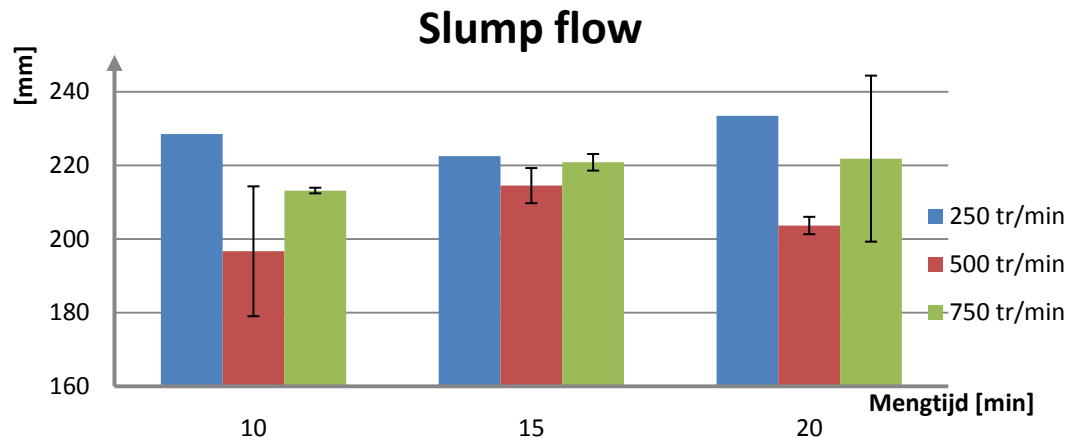
De relatie tussen het volumegewicht en het luchtgehalte van het beton uit de theorie, is in de grafieken 54 en 55 niet merkbaar. De verschillen qua volumegewicht zijn immers heel beperkt.



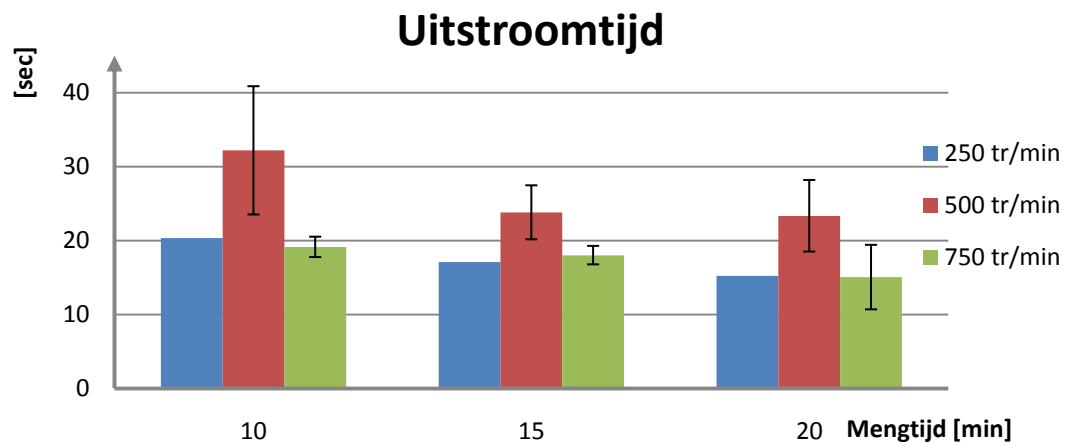
Grafiek 55: Volumegewicht i.f.v. de mengtijd en de mengsnelheid

Verder wordt er ook gekeken naar de verwerkbaarheid (grafieken 56 en 57). Er wordt vastgesteld dat:

- Door de grote spreiding op de resultaten van de slump flow is er geen conclusie mogelijk.
- De uitstroomtijd verkort naarmate de mengtijd toeneemt. Volgens Zain (1999) wordt de verwerkbaarheid het best gemeten via de uitstroomtijd. Er kan worden besloten dat de verwerkbaarheid toeneemt als de mengtijd stijgt.
- Bij een toerental van 500 tr/min wordt telkens de slechtste verwerkbaarheid vastgesteld, zowel qua slump flow als qua uitstroomtijd.
- Bij het hoogsterktebeton uit het vorige hoofdstuk werd vastgesteld dat de beste slump flow overeenstemt met een mengtijd van 15 minuten, weliswaar reeds in de 'overmixing'-zone. Dit komt hier ook terug bij 500 tr/min en 750 tr/min, maar in veel mindere mate.



Grafiek 56: Slump flow i.f.v. de mengtijd en de mengsnelheid

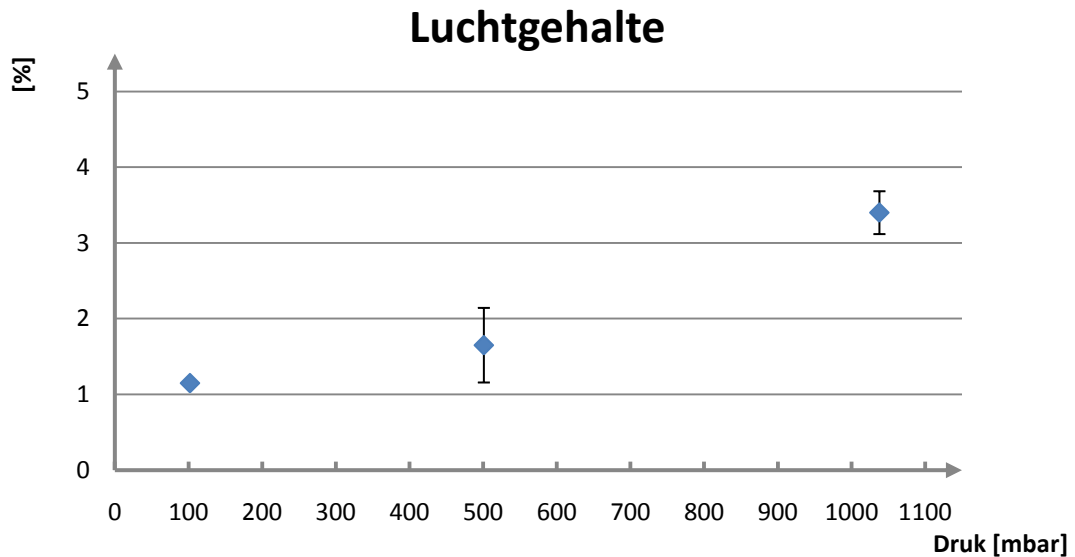


Grafiek 57: Uitstroombtijd i.f.v. de mengtijd en de mengsnelheid

Tot slot worden in bijlage 4 de uitstroombtijd en de slump flow uitgezet in functie van het luchtgehalte in vers beton. De trends zijn net omgekeerd dan die van het onderzoek van Zain (tabel 6 en 7). Door het gebruik van silica fume en superplastificeerder gecombineerd met lage w/c-factoren wordt er een dichter beton verkregen. Vermoedelijk is lucht bijgevolg essentiëler voor de verwerkbaarheid. Zoals in § 1.2.3.6 beschreven staat, is er nog veel onduidelijkheid omtrent de invloed van lucht op de rheologische eigenschappen van beton.

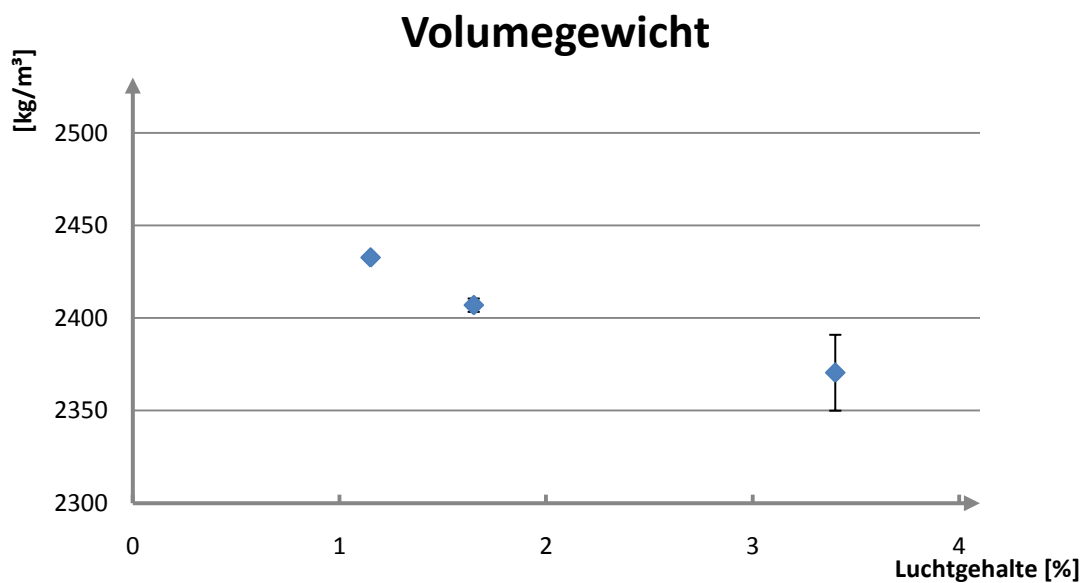
4.4 *Het luchtgehalte laten variëren*

In dit hoofdstuk wordt beton ontwikkeld bij dezelfde 3 verschillende drukniveaus als voor het hoogsterktebeton. Eerst bij atmosferische druk (1013 mbar) dan bij 500 mbar en ten laatste bij 100 mbar.



Grafiek 58: Luchtgehalte i.f.v. de omgevingsdruk

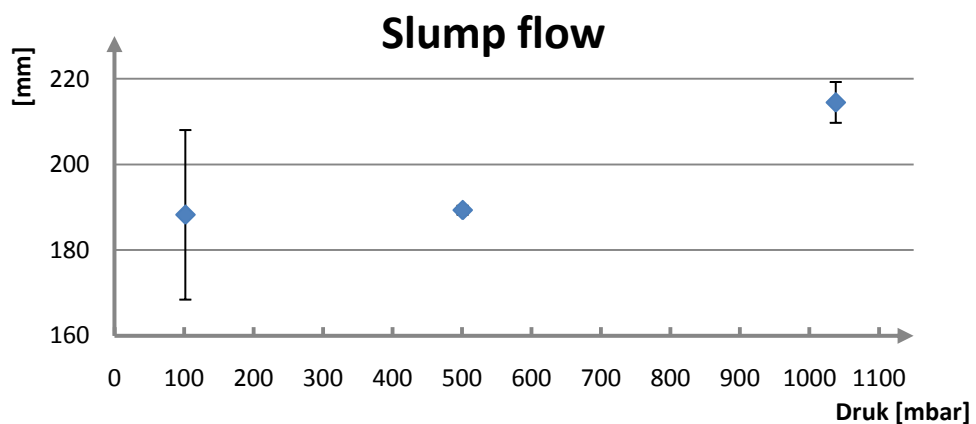
Het is vanzelfsprekend dat het luchtgehalte zal afnemen als de omgevingsdruk afneemt. Dit is duidelijk waarneembaar op grafiek 58. Het luchtgehalte wordt ongeveer 1/3 gereduceerd als de luchtdruk vermindert met 900 mbar.



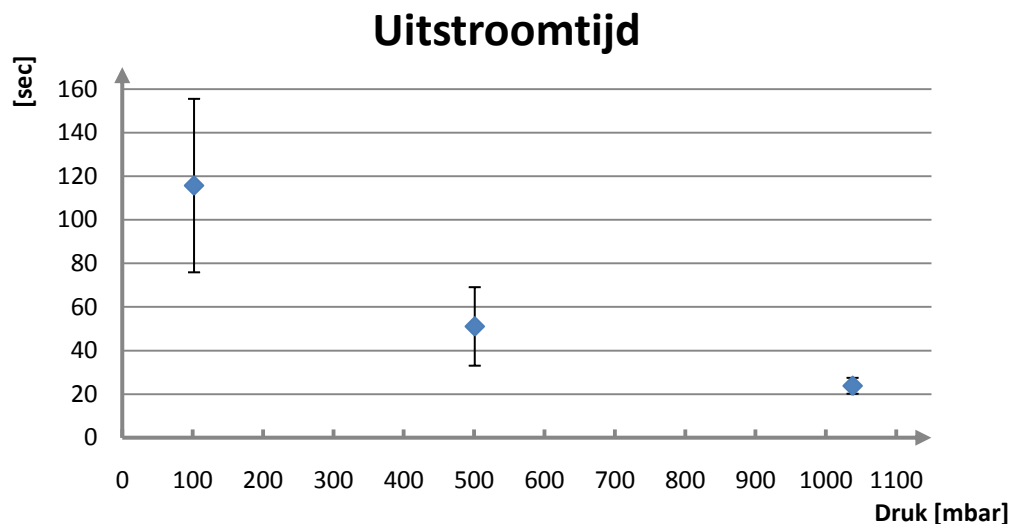
Grafiek 59: Volumegewicht i.f.v. het luchtgehalte

Uit grafiek 59 kan worden geconcludeerd dat het volumegewicht afneemt als het luchtgehalte toeneemt. Dit is volledig in overeenstemming met Lamond⁵ (2006); zwaardere componenten nemen de plaats in van de luchtbelletjes in het beton en hierdoor zal de dichtheid van het beton verkleinen als het luchtgehalte toeneemt.

Uit grafiek 60 en 61 blijkt dat de verwerkbaarheid zal dalen als er een vacuüm behandeling wordt toegepast tijdens het mengen. Bij de slump flow blijft de invloed eerder beperkt, maar bij de uitstroomtijd is er een duidelijk verschil merkbaar. De uitstroomtijd is vijf maal hoger waar een vacuüm behandeling is toegepast.



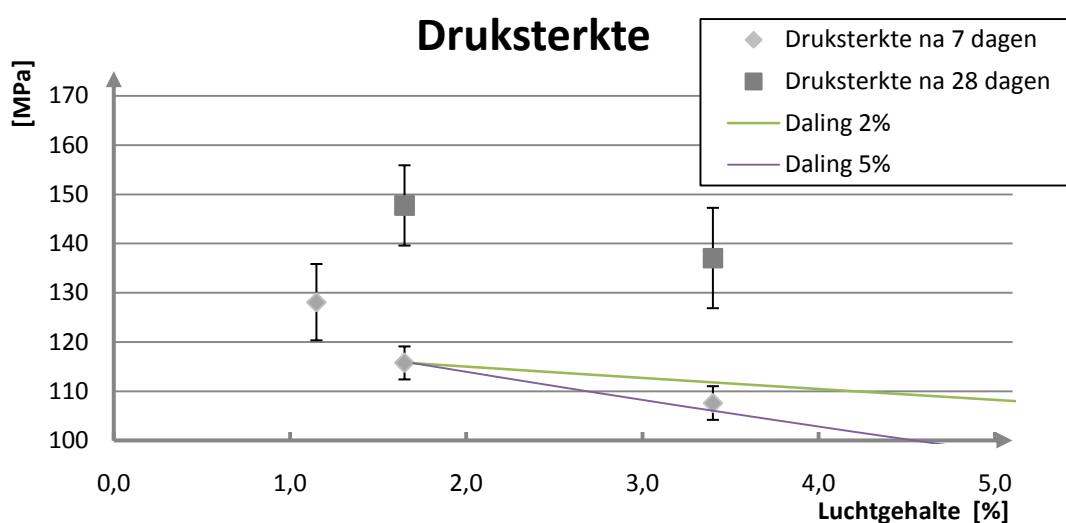
Grafiek 60: Slump flow i.f.v. de omgevingsdruk



Grafiek 61: Uitstroomtijd i.f.v. de omgevingsdruk

⁵ § 1.2.3.6 Eigenschappen

In bijlage 5 zijn de uitstroomtijd en de slump flow uitgezet in functie van het luchtgehalte in vers beton. Hoe hoger het luchtgehalte, hoe hoger de slump flow en hoe lager de uitstroomtijd. Dit verband is net het omgekeerde van wat Zain (1999) beweerde. Een verklaring hiervoor kan gevonden worden in de volledig nieuwe mengprocedure. De lucht wordt immers weggezogen tijdens het mengproces waardoor er minder lucht wordt opgenomen door het mengsel. In het beton zullen dus poriën voorkomen waar geen lucht meer inzit. Dit fenomeen zorgt ervoor dat poriën niet meer kunnen beschouwd worden als kleine luchtkussentjes die de wrijving tussen de vaste deeltjes verminderen.



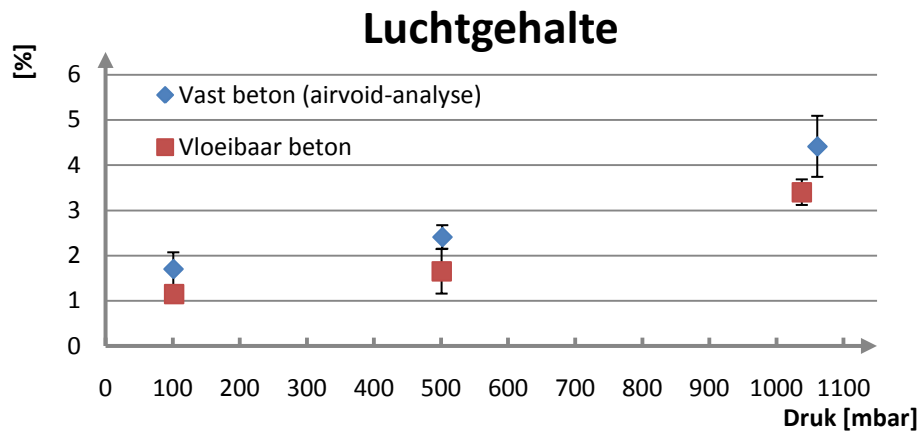
Grafiek 62: Druksterkte i.f.v. het luchtgehalte

In grafiek 62 is het duidelijk dat de druksterkte afneemt als het luchtgehalte toeneemt. Volgens Halea (2009) daalt de druksterkte ongeveer 2 à 5 %, als het luchtgehalte toeneemt met 1 %. Volgens de uitgevoerde proeven in dit onderzoek is de daling van de druksterkte echter niet lineair en zal de druksterkte sterker dalen bij lage luchtgehaltes. Dit verband is ook terug te vinden in formule van Féret. Een daling van de druksterkte tussen de 2 en 5 % wordt enkel bereikt bij hogere luchtgehaltes (> 1,5 %).

Het ziet er ook naar uit dat het verloop tussen de druksterkte op 7 en 28 dagen min of meer gelijk is. Een kubus ontwikkeld bij een omgevingsdruk van 100 mbar zal na 28 dagen een druksterkte hebben die hoger is dan 150 MPa.

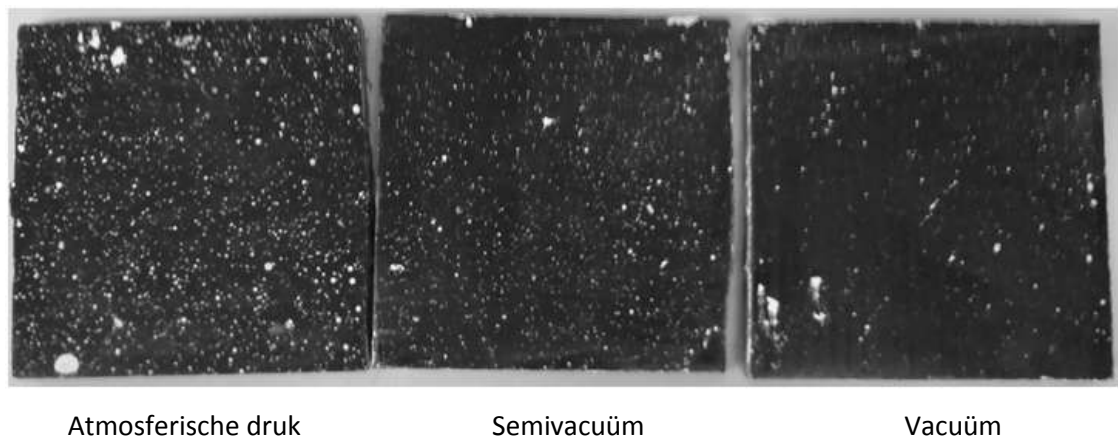
Ten slotte is ook het luchtgehalte op vast beton door middel van een air-vodanalyse gemeten. Het verband is gelijkaardig aan dat van vloeibaar beton. Het luchtgehalte daalt als de luchtdruk

daalt. De luchtgehaltenes gemeten op het vaste beton liggen wel telkens iets hoger. Dit kan te wijten zijn aan het feit dat er te veel meetlijnen gebruikt zijn in de air-voidanalyse. Daardoor wordt dezelfde luchtbel soms verschillende keren gemeten⁶. Natuurlijk kan het ook zijn dat het luchtgehalte in vloeibaar beton niet hetzelfde is als in vast beton.



Grafiek 63: Luchtgehalte van beton in vaste toestand i.f.v. de luchtdruk.

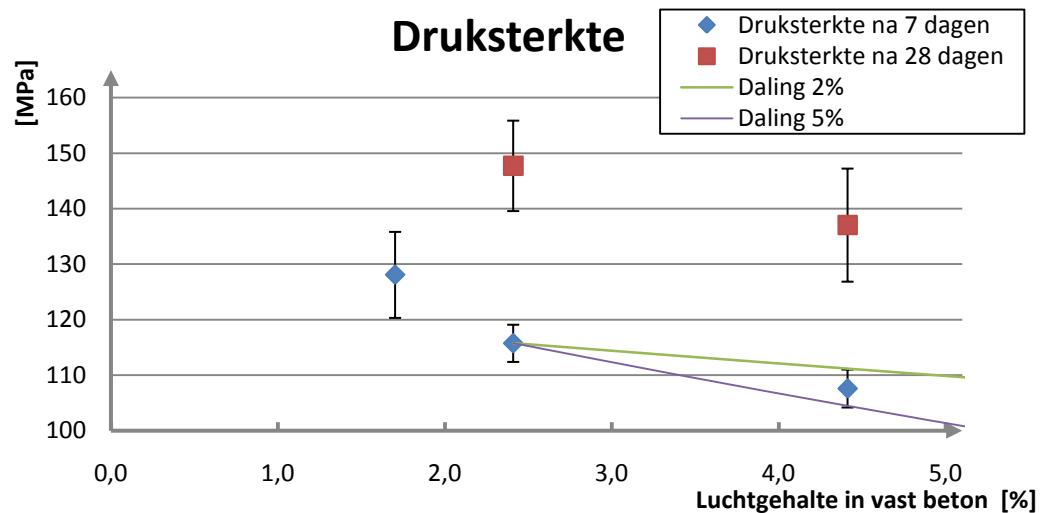
Op figuur 36 is duidelijk het verschil in luchtgehalte waarneembaar tussen de verschillende kubussen. Een kubus die gefabriceerd is onder vacuüm, zal een veel grotere dichtheid hebben en bijgevolg ook een groter volumegewicht. In bijlage 6 is een doorsnede van traditioneel beton terug te vinden. Daar wordt een veel hoger luchtgehalte vastgesteld.



Figuur 36: Doorsnede van de kubussen

⁶ § 3.2.4.3 Instelling van de parameters

In onderstaande grafiek worden de druksterktes uitgezet in functie van de luchtgehaltes in vast beton. Het verloop is identiek aan dat van grafiek 62.



Grafiek 64: Druksterkte i.f.v. luchtgehalte in vast beton (air-voidanalyse).

4.5 *Het luchtgehalte laten variëren en kubussen onderwerpen aan een warmtebehandeling.*

Daar er geen vezelversterking aanwezig is in het beton, wordt er geopteerd om een warmtebehandeling bij 90°C toe te passen (§ 3.2.5). De procedure gaat als volgt:

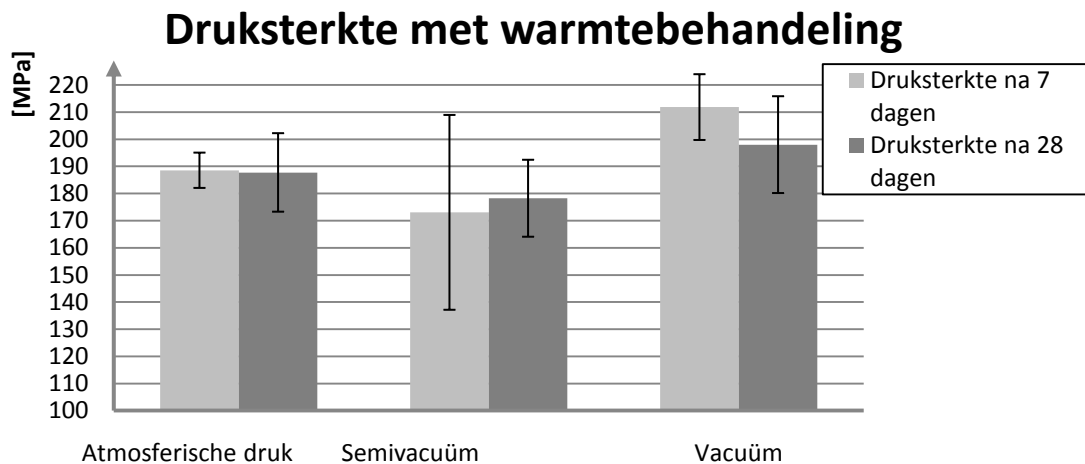
- 1 dag in een vochtige kamer (in bekisting);
- ontkisten;
- 2 dagen warmtebehandeling bij 90°C.



Figuur 37: Warmtebak in labo Magnel

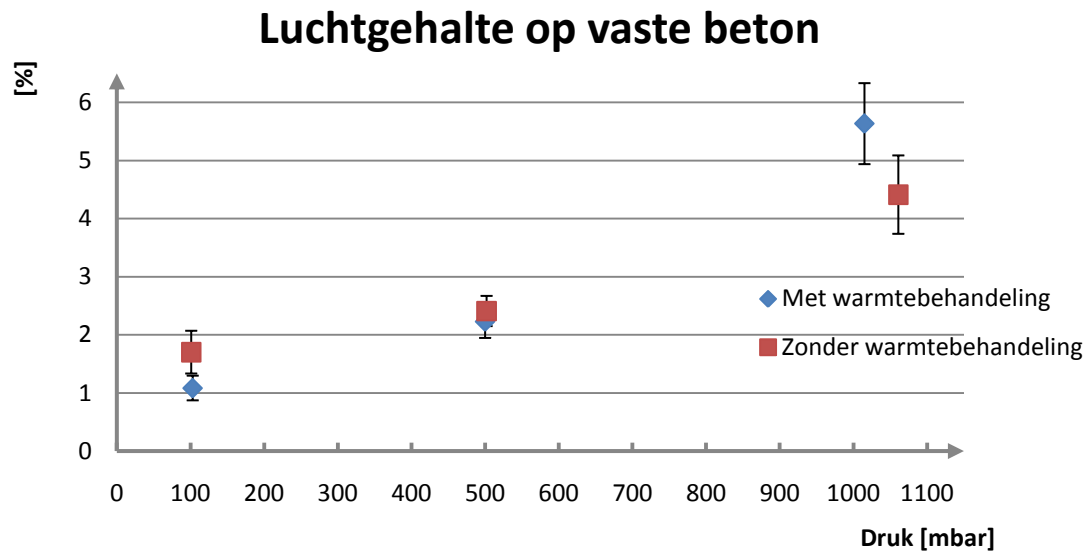
De kubussen worden net boven het water op een rooster geplaatst (figuur 37), daardoor zijn ze blootgesteld aan een damp van 90°C.

De verwerkbaarheid van dat beton is natuurlijk hetzelfde als dat van het vorig hoofdstuk, daar de warmtebehandeling start als het beton al is verhard. Daarom kan er enkel gekeken worden naar de druksterkte en de resultaten van de air-voidanalyses.



Grafiek 65: Druksterkte i.f.v. de luchtdruk

Het valt meteen op dat de druksterkte met warmtebehandeling veel hoger uitvalt dan zonder warmtebehandeling. De minimale druksterkte is 170 MPa (grafiek 65). Het beton is ook al op volle sterkte na 7 dagen, waardoor het veel vroeger kan worden toegepast. Dat de druksterkte stijgt als de luchtdruk afneemt, is door de grote spreiding op de resultaten niet waarneembaar. De hoogste druksterkte (220,4 MPa) in dit onderzoek is bereikt door het beton onder vacuüm (100mbar) te mengen en te onderwerpen aan een warmtebehandeling. Dit is tevens de hoogste druksterkte die in labo Magnel ooit is ontwikkeld.



Grafiek 66: Vergelijking luchtgehalte met en zonder warmtebehandeling.

Bij de air-voidanalyses is er geen verschil merkbaar tussen beton met of zonder warmtebehandeling (figuur 66). De hogere druksterkte komt niet voor uit een lager luchtgehalte, maar wel uit het feit dat de microstructuur van het beton verandert.

4.6 Effect van de menghoeveelheid

Om het effect van de menghoeveelheid te kunnen onderzoeken, moet de snelheid in beide mengers gelijk zijn. Bij de kleine menger wordt eerst 6 minuten traag (250 tr/min) gemengd, om daarna 9 minuten snel (500 tr/min) te mengen. Er wordt gezorgd dat de snelheid aan het uiterste punt van het mixblad gelijk is.

	kleine	grote		kleine	grote
Ø [cm]	12,5	35	Ø [cm]	12,5	35
r [cm]	6,25	17,5	r [cm]	6,25	17,5
omtrek [cm]	39,3	110	omtrek [cm]	39,3	110
v_{rotoras} [tr/min]	250	89	v_{rotoras} [tr/min]	500	179
$v_{\text{uiterstepunt mixblad}}$ [m/s]	1,64	1,64	$v_{\text{uiterstepunt mixblad}}$ [m/s]	3,27	3,27

Tabel 17: Omzetten snelheid mixers

Bij de grote mixer moet een rotorsnelheid van 89 tr/min worden ingesteld voor de eerste 6 minuten om dan over te gaan naar een rotorsnelheid van 179 tr/min voor de volgende 9

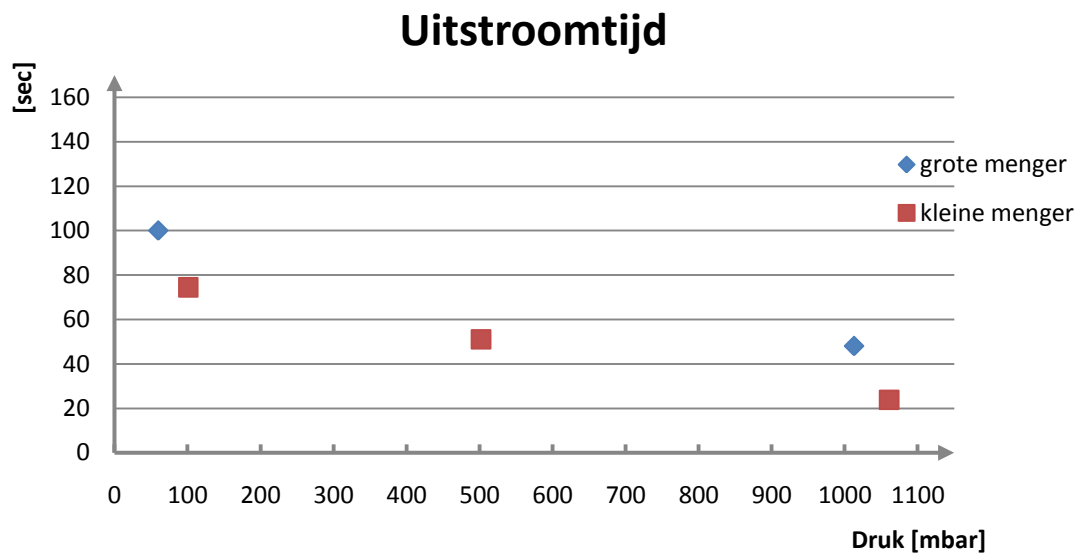
minuten. Op die manier kan de verwerkbaarheid en de druksterkte tussen de 2 mixers vergeleken worden.

Eerst wordt er gekeken naar de verwerkbaarheid (grafiek 67 en 68). Het beton gemaakt in de kleine mixer is iets meer verwerkbaar dan beton gemaakt in de grote mixer. Door de grotere hoeveelheid beton bij de grote mixer, kan ook de grote slump flow en de grote V-funnel worden bepaald.

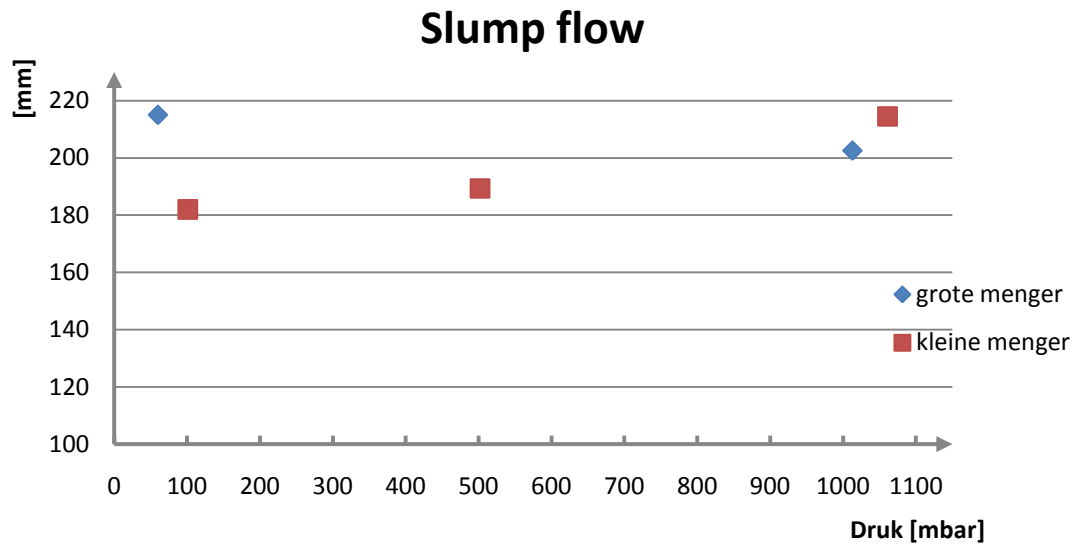
Luchtdruk [mbar]	1013	60
Grote slump flow [mm]	785	650
Grote V-funnel [sec]	7,125	21,69

Tabel 18: Grote slump flow en grote V-funnel

Eerder onderzoek heeft aangetoond dat een goed zelfverdichtend beton bekomen wordt als de slump flow tussen 650 en 850 mm ligt en de uitstroomtijd 6 tot 12 seconden bedraagt (De Schutter, 2005). Dit wil zeggen dat er bij atmosferische druk zeker sprake is van een goed zelfverdichtend hoogsterktebeton en dat de verwerkbaarheid bij 60 mbar net boven die grenswaarden ligt.

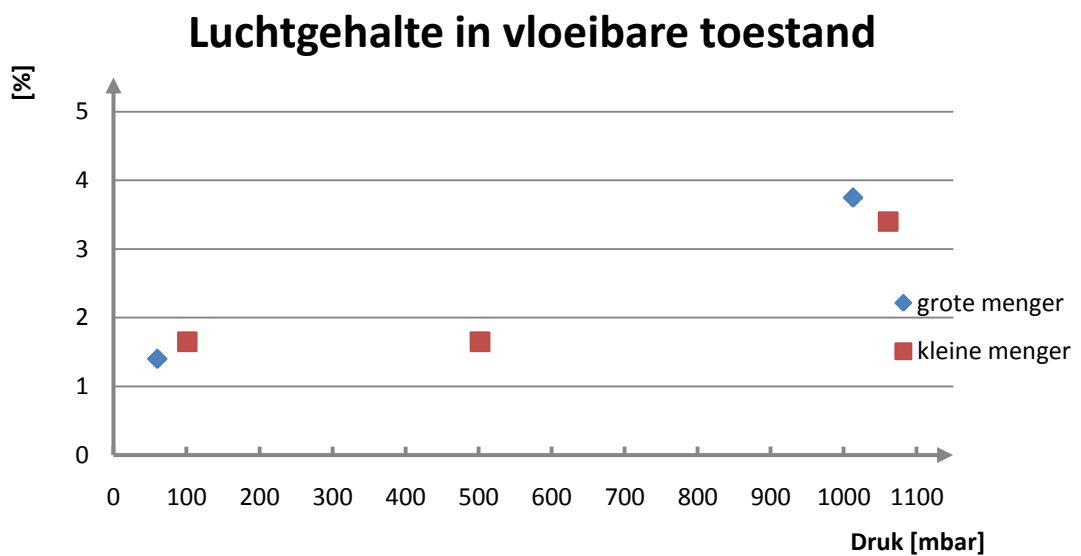


Grafiek 67: Vergelijking van de uitstroomtijd i.f.v. de menghoeveelheid.

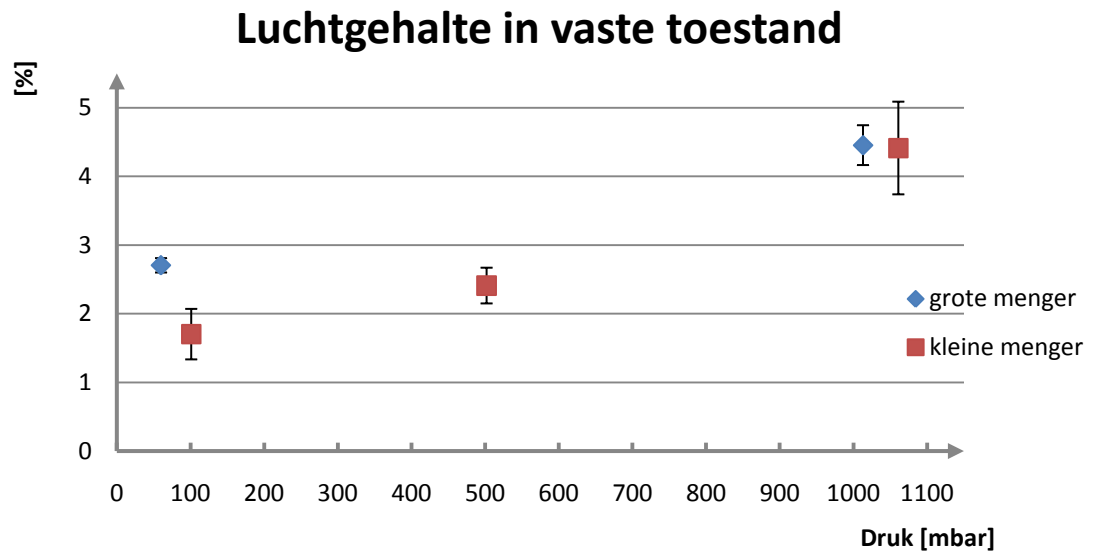


Grafiek 68: Vergelijking van de slump flow i.f.v. de menghoeveelheid.

In de grafieken 69 en 70 is er weinig verschil op te merken naar luchtgehalte toe.

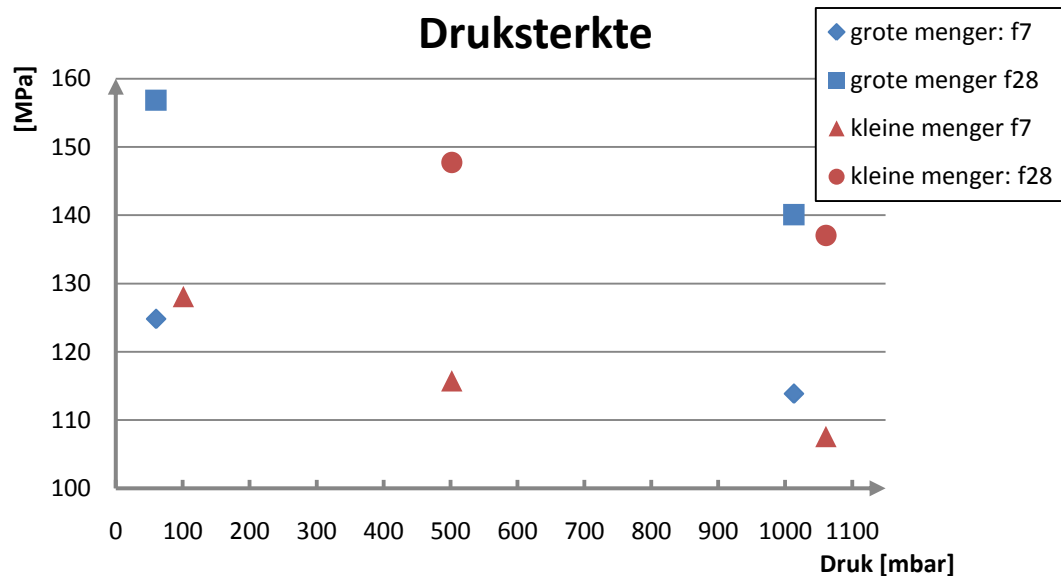


Grafiek 69: Vergelijking van de luchtgehalte in vloeibare toestand i.f.v. de menghoeveelheid.



Grafiek 70: Vergelijking van de luchtgehalte in vaste toestand i.f.v. de menhoeveelheid.

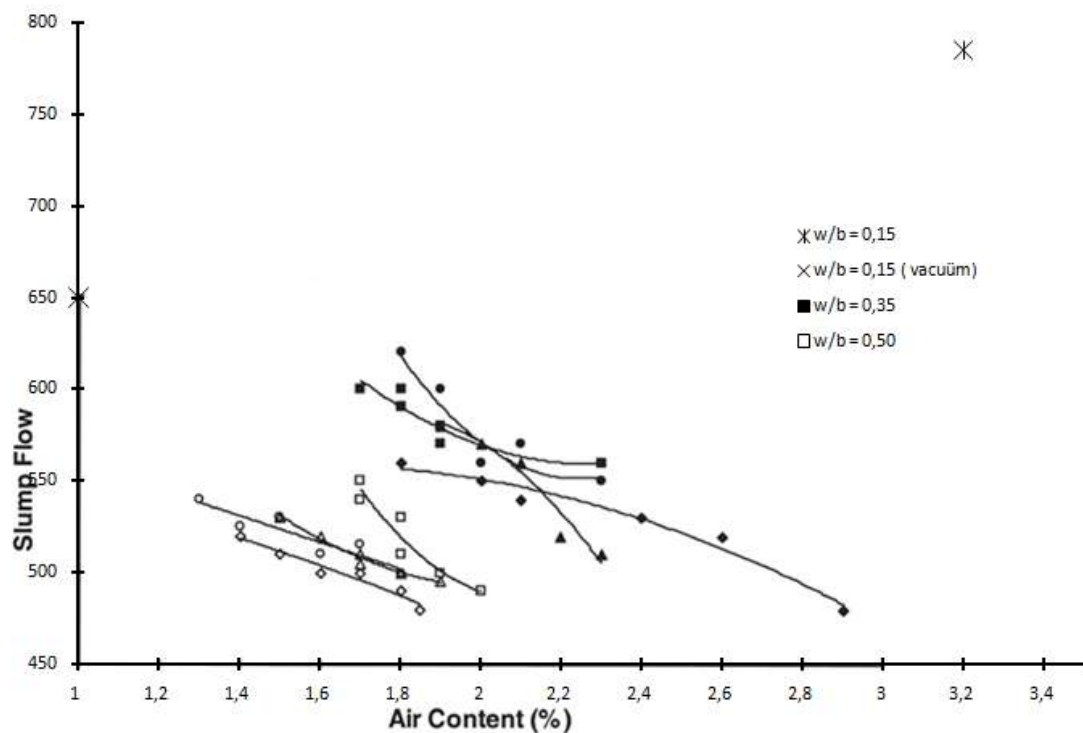
Op 7 en 28 dagen is er geen verschil op te merken tussen de druksterkte op de grote en de kleine mixer.



Grafiek 71: Vergelijking van de druksterke i.f.v. de menhoeveelheid.

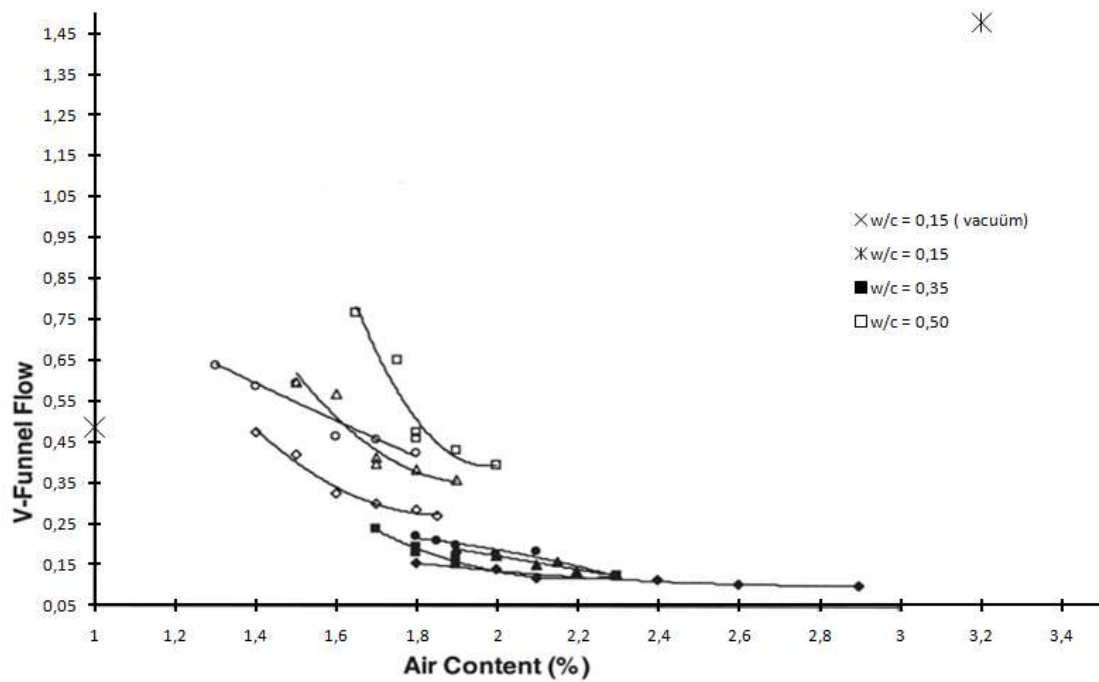
Er kan besloten worden dat er geen of toch bijna geen verschillen merkbaar zijn naar verwerkbaarheid en druksterkte toe. Dit toont aan, dat de omzetting van de snelheid tussen de grote en de kleine mixer goed is uitgevoerd.

Ten slotte worden de meetgegevens van de slump flow en de uitstroomsnelheid aangevuld in de grafiek van Zain (1999).



Grafiek 72: Vergelijking van de slump flow i.f.v. het luchtgehalte (Zain, 1999)

Zoals vermeld in §1.2.3.6, stijgt de vloeibaarheid als de w/b -factor daalt. De bekomen slump flow uit dit onderzoek bij een w/b -factor van 0,15, is een stuk hoger dan die bij een w/b -factor van 0,35 en 0,50. De verwerkbaarheid van het mengsel gemaakt onder vacuüm heeft telkens een lager luchtgehalte en een lagere verwerkbaarheid.

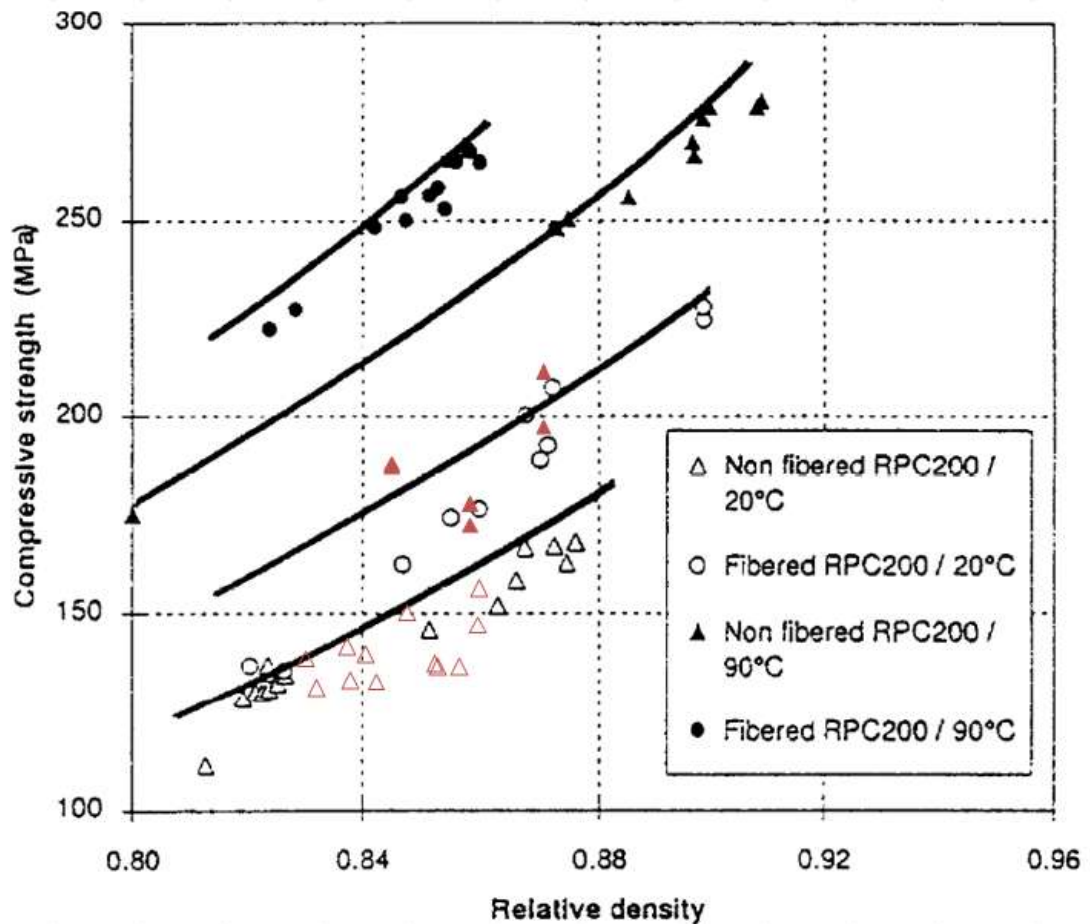


Grafiek 73: Vergelijking van de uitstroomsnelheid i.f.v. het luchtgehalte (Zain, 1999)

De bekomen uitstroomsnelheid bij een w/c -factor van 0,15 ligt veel hoger dan die uit het onderzoek van Zain (1999). De uitstroomsnelheid van het mengsel gemaakt onder vacuüm ligt een stuk lager, maar nog altijd in de grote orde van de resultaten van Zain (1999).

4.7 Relatie tussen de druksterkte en de relatieve dichtheid

Zoals er in § 3.2.3 vermeldt staat, wordt de relatieve dichtheid bepaald voor elk mengsel. Daardoor kan de grafiek van Richard en Cheyrezy (1995) worden aangevuld met eigen waarden (grafiek 74). De druksterktes van het beton zonder warmtebehandeling liggen in hetzelfde gebied als deze van Richard en Cheyrezy (1995). Ze illustreren ook dat de curve op deze grafiek een stuk te hoog ligt.



Grafiek 74: Druksterkte i.f.v. de relatieve dichtheid. (Richard, Cheyrezy, 1995)

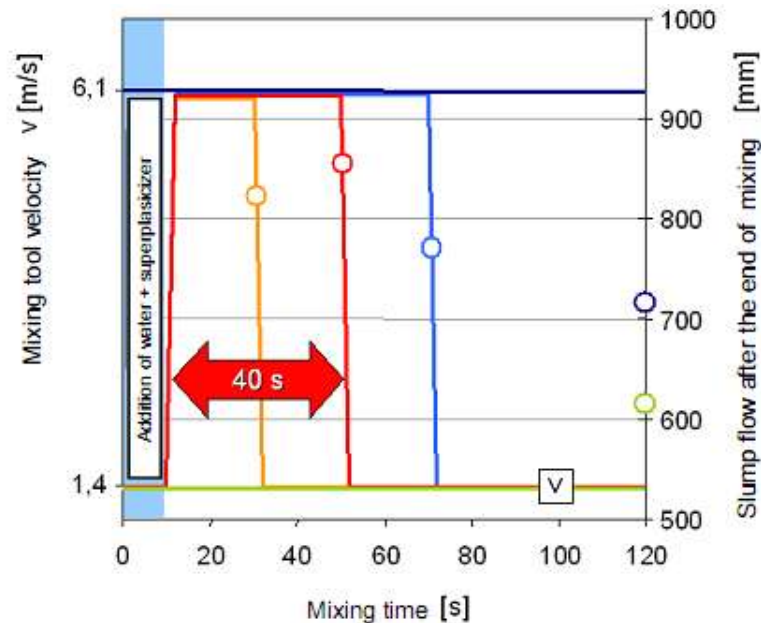
De waarden van het beton die een warmtebehandeling hebben ondergaan zijn een heel stuk lager dan die uit Richard en Cheyrezy (1995). Uit het artikel is niet af te leiden wanneer de warmtebehandeling start en eindigt, er wordt ook niet vermeld hoe de temperatuur van 90°C wordt verwezenlijkt. Er wordt vermoed dat de kubussen volledig ondergedompeld werden in water van 90°C, terwijl de kubussen hier onderhevig zijn aan lucht van 90°C (§ 3.2.5). Waarschijnlijk moet daar de verklaring worden gezocht voor de lagere waarden.

4.8 Testen kortere mengtijd

Zoals een paar keer is aangehaald, worden in de recentere onderzoeken kortere mengtijden gebruikt. In dit afstudeerwerk worden mengtijden tussen de 5 en de 20 minuten toegepast, terwijl in de recentere onderzoeken 2 minuten wordt vooropgesteld. Een onderzoek van Oliver Mazanec in de Universiteit van München wees uit dat de hoogste slump flow bekomen wordt door eerst 40 seconden intens en daarna 70 seconden traag te mengen (grafiek 75), zo wordt

een slump flow gerealiseerd van 885 mm (rood). Er kan ook worden geconcludeerd dat bij een snelle fase van 20 seconden (oranje) het opgenomen vermogen onvoldoende is, terwijl bij een snelle fase van 60 seconden het opgenomen vermogen te hoog is (blauw).

Het verdelen van de mengprocessen in snelle en langzame fases resulteert in een significante toename van de slump flow, en daardoor kan er minder superplastificeerder gebruikt worden.



Grafiek 75: Slump flow i.f.v. verschillende mengprocedures

De optimale mengprocedure verloopt dus als volgt:

- 15 seconden droog mengen,
- 10 seconden om water en SP toe te dienen,
- 40 seconden intensief mengen,
- 70 seconden traag mengen + (eventuele vacuümbehandeling).

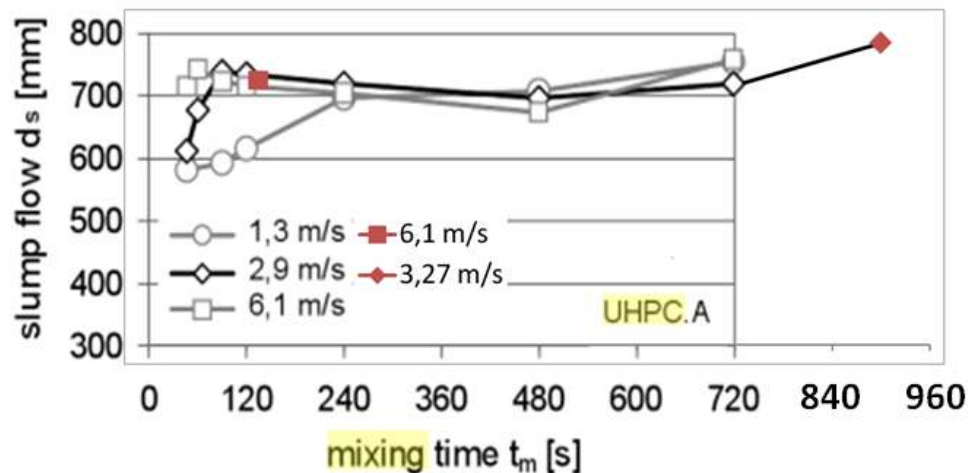
In wat volgt zal de druksterkte en slump flow, bekomen met de nieuwe mengprocedure, vergeleken worden met de standaard mengprocedure van 15 minuten⁷.

Mengtijd	korte	lange
Slump flow [mm]	725	785
Druksterkte 7 dagen [MPa]	100,2*	113,9
Druksterkte 28 dagen [MPa]	127,3*	140,1

Tabel 19: Verschil tussen een korte en een lange mengtijd. (*berekende waarden)

⁷ § 3.2 Mengprocedures

De slump flow bij een lange mengtijd is iets hoger dan de slump flow bij een korte mengtijd, maar beide bevinden zich in het gebied van een goed zelfverdichtend beton.



Grafiek 76: Aangevulde grafiek van de slump flow i.f.v. de mengtijd en mengsnelheid (Schiessl, Mazanec, Lowke, 2007).

In grafiek 76 zijn de bekomen slump flows toegevoegd aan de grafiek van Schiessl, Mazanec en Lowke (2007). De slump flow bij een mengtijd van 120 seconden komt goed overeen met de resultaten uit het onderzoek van Schiessl, Mazanec en Lowke. De slump flow bij een mengtijd van 15 minuten is hoger dan die na 12 minuten, wat erop wijst dat de slump flow nog toeneemt na 12 minuten.

Er kan ook geconcludeerd worden dat de slump flow nog hogere waarden kan aannemen dan die bij een mengtijd van 2 minuten, maar het verschil is niet zeer groot, waardoor het niet economisch is om langer te mengen.

Ten slotte wordt ook de druksterkte vergeleken. Daaruit blijkt dat de druksterkte bij een lange mengtijd een stuk hoger ligt dan bij een korte mengtijd. Er moet wel opgelet worden bij de veralgemening van deze resultaten, want bij de korte mengtijd is enkel een druksterkte op 6 dagen (98,5 MPa) gemeten. Deze waarde is geïnterpoleerd met een ouderdomscoëfficiënt die gebaseerd is op een s gelijk aan 0,221. Die s -waarde is een gemiddelde waarde van gedrukte kubussen uit dit onderzoek.

4.9 *Effect van de mengkop*

Volgens Loebe en Nold (2006) is de sterrotor, tot nu toe telkens gebruikt, meer voor traditioneel beton. Terwijl de pinrotor beter gebruikt wordt voor hoogsterktebeton.

Type rotor	ster	pin
Slump flow [mm]	725	625
Druksterkte 7 dagen [Mpa]	100,2*	95,2*
Druksterkte 28 dagen [Mpa]	127,3*	106,1*

Tabel 20: Verschil tussen een sterrotor en een pinrotor (*berekende waarden)

Uit de gevonden resultaten blijkt dit niet het geval te zijn. Er wordt duidelijk een slechtere verwerkbaarheid bekomen en ook de druksterkte is veel lager dan normaal. Ook hier gaat het om geëxtrapoleerde resultaten. Bij de sterrotor is enkel een gemeten druksterkte na 6 dagen van 98,5 MPa geweten. Bij de pinrotor enkel een druksterkte na 29 dagen van 106,5 MPa. Beide werden met een korte mengtijd ontwikkeld.

5. Conclusies

5.1 Algemene besluitvorming

Het doel van dit afstudeerwerk was om inzicht te verkrijgen in de invloed die de mengprocedure heeft op de verwerkbaarheid en de druksterkte van ultrahoogsterktebeton. Deze invloeden werden geanalyseerd bij twee mengsels met een verschillend gehalte superplastificeerder. Zain (1999) stelde vast dat de verwerkbaarheid enkel kon worden gemeten door middel van de uitstroomtijd. Toch werd er in recente onderzoeken veelvuldig gebruik gemaakt van de slump flow om de verwerkbaarheid te bepalen. Ze werden bijgevolg beide geanalyseerd in dit afstudeerwerk.

In eerste instantie werd gekeken naar de invloed van de mengtijd en de mengsnelheid. Bij de laagste mengsnelheid (250 tr/min) kon voor beide mengsels worden opgemerkt dat de druksterkte ongeveer toeneemt met 5 % als de mengtijd toeneemt met 5 minuten. Bij de hogere mengsnelheden (500 en 750 tr/min) verdwijnt dit fenomeen en blijft de druksterkte quasi constant, met al dan niet een klein maximum bij 15 minuten. Als er gekeken werd naar de invloed op de verwerkbaarheid door middel van de uitstroomtijd, kon besloten worden dat de verwerkbaarheid stijgt als de mengtijd toeneemt. De hoogste slump flow komt doorgaans overeen met een mengtijd van 15 minuten.

Ten tweede werd het beton gemaakt onder verschillende luchtdrukken. Vervolgens werd er gekeken welke invloed de luchtdruk heeft op de eigenschappen van het beton. Het is vanzelfsprekend dat het luchtgehalte afnam als de omgevingsdruk verminderde. Er werd een reductie van ongeveer $1/3$ vastgesteld als de luchtdruk verminderde met 900 mbar. Het volumegewicht van het beton steeg omdat zwaardere componenten de plaats innamen van de luchtbellens in het beton. Door het hogere volumegewicht, nam de druksterkte sterk toe. De bekomen meetresultaten vertoonden hetzelfde verband als de wet van Féret, aangezien de druksterktes sterker toenamen naarmate het luchtgehalte in het beton daalde. Door beton te ontwikkelen in een vacu  momgeving, kan een druksterkte bereikt worden die 20 % hoger is dan deze bij atmosferedruk. Er werd eveneens gekeken naar de verwerkbaarheid. Daar kon worden opgemerkt dat de verwerkbaarheid verminderde als de omgevingsdruk daalde. Door beton te ontwikkelen in een vacu  momgeving wordt de uitstroomtijd ongeveer 4 maal groter.

Vervolgens werden de kubussen onderworpen aan een warmtebehandeling. De verwerkbaarheid van het beton is natuurlijk identiek aan dat zonder warmtebehandeling, daar de warmtebehandeling pas startte als het beton reeds verhard was. De druksterkte van het beton die een warmtebehandeling onderging was tussen de 20 en de 40 % hoger dan deze zonder warmtebehandeling. De hoogste druksterkte (220,4 MPa) in dit onderzoek is dan ook bereikt door het beton onder vacuüm (100mbar) te mengen en te onderwerpen aan een warmtebehandeling. Daar er uit de resultaten van de air-voidanalyses geen verschillen tussen beton met of zonder warmtebehandeling merkbaar zijn, kan besloten worden dat de hogere druksterkte niet voortkomt uit een lager luchtgehalte, maar wel uit het feit dat de microstructuur van het beton veranderde.

Een vierde punt dat onderzocht werd is het effect van de menghoeveelheid. Tussen een menger van 3,5 liter en een menger van 75 liter werden geen of toch bijna geen verschillen opgemerkt naar verwerkbaarheid en druksterkte. Hieruit kan besloten worden dat de menghoeveelheid niet echt een rol zal spelen.

Daarna werd het verband tussen de druksterkte en de relatieve dichtheid geanalyseerd. Uit de resultaten blijkt dat de relatieve dichtheid toeneemt als de druksterkte toeneemt. Dit is volledig in overeenstemming met het onderzoek van Richard en Cheyrezy (1995).

Tot slot dient er opgemerkt te worden dat in dit afstudeerwerk mengtijden tussen de 5 en de 20 minuten worden toegepast, terwijl in recentere onderzoeken 2 minuten wordt vooropgesteld. Er kan worden geconcludeerd dat beton na 2 minuten mengen een eerste maximale slump flow bereikt (Schiessl, Mazanec, Lowke, 2007). Bij een mengtijd van 15 minuten wordt echter nog een hogere slump flow gemeten, maar het verschil is miniem. Bij een mengtijd van 15 minuten is evenzeer een hogere druksterkte opgemeten ($\pm 10\%$). Daar de verschillen in druksterkte en vloeibaarheid beperkt blijven, zal omwille van economische redenen, een mengtijd van 2 minuten vooropgesteld worden.

5.2 *Aanbevelingen voor verder onderzoek*

Daar dit een verkennende studie is kunnen nog vele zaken onderzocht worden. In dit hoofdstuk worden enkele aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek.

5.2.1 *Invloed van de mengtijd en mengsnelheid*

Zoals vermeldt in § 4.4, worden in recentere onderzoeken kortere mengtijden gebruikt. In dit afstudeerwerk werden mengtijden tussen de 5 en de 20 minuten toegepast, terwijl in de recentere onderzoeken 2 minuten wordt vooropgesteld. Het zou interessant zijn om de invloed van de mengtijd te onderzoeken bij kortere mengtijden.

5.2.2 *Invloed door vacuüm mengen*

Daar vacuüm mengen nog maar recent wordt toegepast, zijn er nog vele zaken niet onderzocht. Uit dit onderzoek blijkt dat de verwerkbaarheid toeneemt als het luchtgehalte toeneemt. Dit dient zeker nog verder onderzocht te worden, aangezien in het onderzoek van Zain (1999) net het omgekeerde wordt beweerd.

In dit onderzoek werd enkel de druksterkte gemeten op een kubus met zijde 100 mm. Het zou interessant zijn om ook de druksterkte op een cilinder te meten, zodat de vormfactor kan worden bepaald. Ook het nagaan van de buig en splijtsterkte kan in het onderzoek opgenomen worden.

Verder kan ook de hechting met de wapening worden onderzocht. Door het lagere luchtgehalte zullen er minder holtes zijn tussen het beton en de staven waardoor er een groter contactoppervlak is. Dit zou een grotere onderlinge hechting kunnen opleveren.

Tot slot kan het ook interessant zijn om de invloed van vorst en dooi cycli na te gaan. Door het lage luchtgehalte bij vacuüm mengen, zou het kunnen dat het beton minder zal bestand zijn tegen vries en dooi aantasting.

6. Bibliografie

Normen:

NBN EN 197-1, *Cement – Deel 1: Samenstelling, specificatie en overeenkomstigheidscriteria voor gebruikelijke cementsoorten*, 2000

NBN EN 1015-7, *Proeven voor metselmortel - Deel 7: Bepaling van het luchtgehalte van verse mortel*.

NBN EN 1015-3, *Proeven voor metselmortel - Deel 3: Bepalen van de consistentie van verse mortel (met de schoktafel)*.

NBN EN 196-1, *Beproevingmethoden voor cement – Deel 1: Bepaling van de sterkte*.

NBN B 14-219, *Proeven op mortel - Luchtgehalte van verse mortel - Methode met veranderlijke druk*.

ASTM C 457, *Standard Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*

Boeken, thesissen en artikels

Annerel E. (2006), *Structuur en uitzicht van zelfverdichtend beton*, Scriptie, Universiteit Gent.

Apers J. (2006), *Betontechnologie*, Brussel: De Bouwkroniek, p. 195-250

Boel V. (2006). *Microstructuur van zelfverdichtend beton in relatie met gaspermeabiliteit en duurzaamheidsaspecten*, 119-136.

Bouzoubaâ N., Bilodeau A., Sivasundaram V., Fournier B. & Golden D.M. (2002), *Development of Ternary Blends for high-Performance Concrete*, Centre for Sustainable Development of Cement and Concrete (ICON), CANMET/Natural Resources Canada, Canada.

Buytaert A., Ronsse S. (2010), *Ontwikkeling van Hogesterkte Zelfverdichtend Beton*, Scriptie, Hogeschool Gent.

Cauberg N., Piérard J., & Wastiels J. (2006), *Ultrahogesterktebeton: een veelbelovende technologie*, WTCB-dossiers, p 1-6.

Choi Y. W., Shin H. C., Kim Y. J., & Moon H. Y. (2006). *An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete*, Cement and Concrete Research, p 1595-1602.

Chopin D., B. Cazacliu, F. de Larrard, et al. (2007), *Monitoring of concrete homogenisation with the power consumption curve, submitted to Nordic Concrete Research*, Materials and structures, Vol. 40, p 897-907

Chopin D., de Larrard F., Cazacliu B. (2004). *Why do HPC and SCC require a longer mixing time?*, Cement & Concrete Composites, p 2237-2243.

Christiaens L., De Schutter G. (2006), *Betontechnologie*, Brussel: De Bouwkroniek, p. 265

De Blaere B. (2006), *Betontechnologie*, Brussel: De Bouwkroniek, p. 350

de Larrard F. (1999), *Concrete mixture proportionning—A scientific approach*, Modern Concrete Technology, vol. 9, p 441.

de Larrard F., Bosc F., Catherine C., Deflorenne F. (1997), *The AFREM method for the mix design of High Performance Concrete*, Materials and structures, vol. 30, No. 201, p 439-446.

De Schutter G., Apers J. (2007), *Hoogwaardig beton*, Dossier Cement , p 40.

De Vries P. (2005). *Uitdrogingskrimpen en craquelé*, Cement.

Desmyter J., Dieryck V., & Leuridan A. (2002), *Speciale betonsoorten*, WTCB-dossiers, p 3-19.

Dheedene W., Maes M., Masson S. (2008), *Vervangproducten van cement*, Scriptie, Hogeschool Gent.

Duval R. & Khadri E.H.(1998), *Influence of Silica Fume on the Workability and the Compressive Strength of High-Performance Concretes*, Cement and Concrete Research, V. 28, No. 4, p 533-547

El-Dieb A. S. (2009). *Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultrahighstrength self-compacting concrete incorporating steel fibres*. Materials & Design, p 4286-4292.

Febelcem F. (2005), *Voorschrijven van beton volgens de normen NBN EN 206-1:2001 & NBN B15-001:2004*. Dossier Cement.

Fehling E., Schmidt M., Stürwald S. (2008), *Ultra high performance concrete*, Kassel: Kassel University press GmbH, p. 385

Furniere J.(2010), *Het effect van luchtbelvormers op de duurzaamheid van beton met vliegias*, Scriptie, Universiteit Gent.

Halea M., Freyneb F., Russell B. (2009), *Examining the frost resistance of high performance concrete*, Construction and Building Materials, Vol. 23, Issue 2, p 878-888.

Huyghe S. (2005), *Zelfverdichtend licht beton volgens het aangepaste Andreasen en Andersenmodel*, Scriptie, Hogeschool Brugge Gent.

Johansson (1971), *The relationship between mixing time and type of concrete mixer*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Proceedings HANDLINGAR, Stockholm.

Kaptijn N. (2002), *Toekomstige ontwikkelingen van zeer-hogesterktebeton*, Cement.

Kosmatka S., Kerkhoff B., Panarese W., Macleod N., & McGrath R. (2002). *Designing and proportioning normal concrete mixtures*, Design and Control of Concrete Mixtures, p 151-170.

Kosmatka S., Kerkhoff B., Panarese W., Macleod N., & McGrath R. (2002), *High- Performance Concrete*, Design and Control of Concrete Mixtures, p 297-312.

Kwan A., Fung W. (2009). *Packing density measurement and modelling of fine aggregate and mortar*, Cement & Concrete Composites, p 349-357.

Lambotte H., (2006). *Betontechnologie*. Brussel: Belgische Betongroepering.

Lammertijn S. (2007), *Carbonatatie en Chloride-Indringing bij Hoog-Volume-Vliegasbeton (HVFA-beton)*, Scriptie, Universiteit Gent.

Lanoote R., Naert H. (2010), *Invloed van de mengprocedure bij cement gebonden materialen*, Scriptie, Hogeschool Gent.

Lowke D., Schießl P. (2005), *Effect of mixing energy on fresh properties of SCC*, Proceedings of the 4th international RILEM symposium on self-compacting concrete, Chicago. Hanley Wood Publication 2005, Addison, ISBN 0-924659-64-5

Ma J., Schneider H. (2002), *Properties of Ultra-High-Performance Concrete*, Lacer, p 25-32.

Magera, C. P. (2006). *Betontechnologie*. Brussel: Belgische Betongroepering.

Malhotra V.M., Mehta P.K. (2002), *High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete*, Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., p 101

Mazanec O, Schießl P (2008), *Mixing time optimisation for UHPC*. In: *Ultra high performance concrete (UHPC)*, Second international symposium on ultra high performance concrete, p 401-408.

Mazanec O, Schießl P. (2008), *Mixing Time Optimisation for UHPC*, International Symposium on Ultra High Performance Concrete, p 401 - 408

Mazanec O., Schießl P., Lowke D. (2007), *SCC and UHPC - Effect of mixing technology on fresh concrete properties*, Advances in Construction Materials 2007, p 513-522

Mazloom M., Ramezaniapour A.A. & Brooks J.J. (2004), *Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High-Strength Concrete*, Cement & Concrete Composites, 26, p 347-357

Minne, P. (2006). *Betontechnologie*, 439-443. Brussel: De Bouwkroniek.

Nanthagopalan P., Santhanam M. (2009), *Experimental investigations on the influence of paste composition and content on the properties of Self-Compacting Concrete*, Construction and building materials, p 3443-3449.

Park J. J., Kang S. T., Kim S. W., Koh K. T. (2006), *Influence of the ingredients on the compressive strength of UHPC as a fundamental study to optimize the mixing proportion*.

Ployaert C. (2010), *Scheurvorming beperken: noodzakelijke voorwaarde voor de duurzaamheid beton*, Febelcem.

Richard P., Cheyrezy M. (1995), *Composition of reactive powder concretes*, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.7, p 1501-1511

Rikken F., Lighting P. (2004), *Focus on mixer performance and glass batch quality*, Glass international, p 76 - 77

Schellingerhout N. (1991), *Materialen in het Bouwbedrijf*.

Schwanda F. (1959), *Der Hohlraumgehalt von Korngemischen. Ein Vergleich rechnerisch gewonnener Werte mit versuchsmäßig ermittelten*, beton 9, Heft 1, p 12 - 19

Schwanda F. (1960), *Das rechnerische Verfahren zur Bestimmung des Hohlraums und Zementleimanspruchs von Zuschlägen und seine Bedeutung für den Spannbetonbau*, Zement und Beton, p 8 - 17

Stulemeijer J. (1965), *Inleiding tot de betontechnologie*.

Vandanjon P.O., de Larrard F., Dehousse B., Villain G., Maillot R., Laplante P. (2003), *Homogenisation of concrete in a batch plant: Influence of mixing time and method on the introduction of mineral admixtures*, Mag. Concr. Res. 55, p 105 - 116.

Walraven J. (2006), *Ultra-hogesterktebeton: een materiaal in ontwikkeling*, Cement.

Windels C. (2010), *Optimale samenstelling en duurzaamheid van volledig recycleerbaar beton*, Scriptie, Universiteit Gent.

Zain M.F.M., Saifuddin M., Yusof K.M.(1999), *A study on the properties of freshly mixed high performance concrete*, Cem. Concr. Res, Vol.29, p 1427 - 1432

7. Bijlagen

Bijlage 1: Technische fiche van de superplastificeerder



The Chemical Company

GLENIUM® 51 con.35%

Hoogwaardige hulpstof met dubbele werking.



0956-CPD-1502

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



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

Aggregatietoestand	: 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	: 35 %
Viscositeit	bij 20°C : min. 110 mPa.s
	: max. 160 mPa.s
Na ₂ 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 superplastificeerder 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 plastificeerend 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, nabehandelmiddel 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.

Geschiktheidsonderzoek

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 prefab-betonindustrie

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 nabehandelscycli, 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, vermindert 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



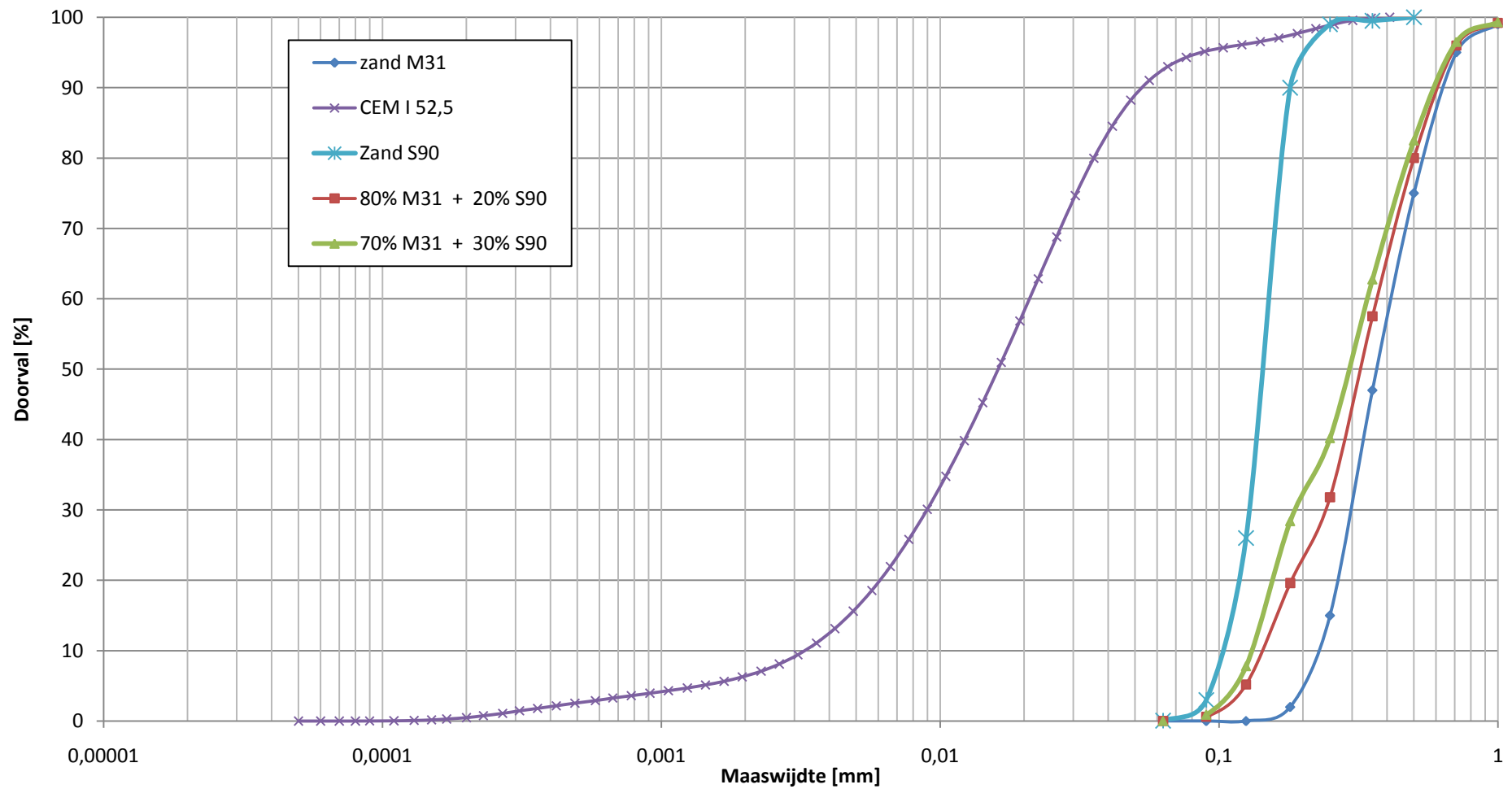
BASF Nederland B.V., Construction Chemicals

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, waar op 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.

Bijlage 2: Zeefkrommes



Bijlage 3: Technische fiche van het gebruikte HSR cement

CEM I 52,5 N HSR LA (CIBELCOR)



Toepassingsgebieden

Deze Portlandcement is geschikt voor alle toepassingen.

Sinds enkele jaren werd deze cement op de Belgische markt gebracht als gevolg van de Europese normering.

Tussen de CEM I 42,5 R HSR LA en de CEM I 52,5 R HSR LA (respectievelijk met oude benaming P40 Cibekor en P50 Cibekor), bezit deze cement de beste kenmerken om gebruikt te worden in prefabricatie, ongewapend of gewapend beton, zowel in de winter als in de zomer, wanneer een weerstand tegen chemische inwerking vereist is.

De cement CEM I 52,5 N HSR LA (CIBELCOR) wordt gebruikt voor gewapende betonconstructies, constructies die hoge initiele weerstanden vragen en voor betonnering bij koud weer en alle milieus waarbij het beton in aanraking komt met afvalwater, landbouwtoepassingen en zeewater.

De cement CEM I 52,5 N HSR LA (CIBELCOR) wordt speciaal aanbevolen voor :

- Prefabricatie.
- Toepassing in chemisch agressieve milieus.
- Landbouwtoepassingen.



Touzihtsput voor riolering



VOORZORGSMAATREGELEN

Deze cement is niet geschikt voor :

- grote massieve betonwerken

Fysische en mechanische karakteristieken

Maalfijnheid Blaine		4100 cm ² /g
Volumieke massa		3.17 g/cm ³
Waterbehoefte		26 %
Bindingtijd		4 h 00
Drukweerstand		
	* Gemiddeld	* Normen
1 dag	15 MPa	
2 dagen	28 MPa	> 20 MPa
7 dagen	45 MPa	
28 dagen	60 MPa	> 52,5 MPa
Kleurindex		56 W*

Chemische karakteristieken

	Gemiddeld	*Normen*
SiO ₂	21.3 %	
Al ₂ O ₃	3.4 %	< 5 %
Fe ₂ O ₃	4.0 %	
CaO	63.3 %	
MgO	2.5 %	
SO ₃	2.7 %	< 4 %
K ₂ O	0.58 %	
Na ₂ O	0.14 %	
Cl-	0.03 %	< 0.1 %
% Na ₂ O eq	0.53 %	
% C ₃ A	2.0 %	< 3 %
Gloeiverlies	1.0 %	< 5 %
Onoplosbaar résidu	0.1 %	< 5 %

Bijkomende karakteristieken

- Deze cement wordt bekomen door het simultaan malen van minimum 95% Portlandklinker en een kleine hoeveelheid calciumsulfaat, gebruikt als bindingsregulator (conform NBN EN 197-1).
- Dankzij het lage gehalte aan aluminium en dus ook aan tricalcium aluminaat, biedt deze cement een hoge weerstand tegen sulfaten gegarandeerd door de karakteristiek HSR (NBN B12-108).
- Deze Portlandcement bezit ook een beperkt alkali-gehalte door de karakteristiek LA (NBN B12-108) die hem geschikt maakt om gebruikt te worden in constructies met granulaten die gevoelig zijn voor alkali-silica reactie.

Aanbevelingen

- Vermijden van het onderdosereren van cement, hetgeen schadelijk is voor de duurzaamheid van beton.
- Beperken van de W/C factor, hetgeen ten goede komt aan de weerstanden en aan de vermindering van de porositeit.
- Nazien van de compatibiliteit tussen cement en de gebruikte hulpstoffen (Rheologie, weerstanden).
- Aanpassen van de trilling van het beton naar de consistentie om een maximale verdichting zonder segregatie te bekomen.
- Alle voorzorgsmaatregelen nemen om vroegtijdige uitdroging van het beton door warm weer of uitdrogende wind te vermijden door het aanbrengen van een aangepaste curing (afdekken met stromat, besprenkelen met water, curing-product, etc...)

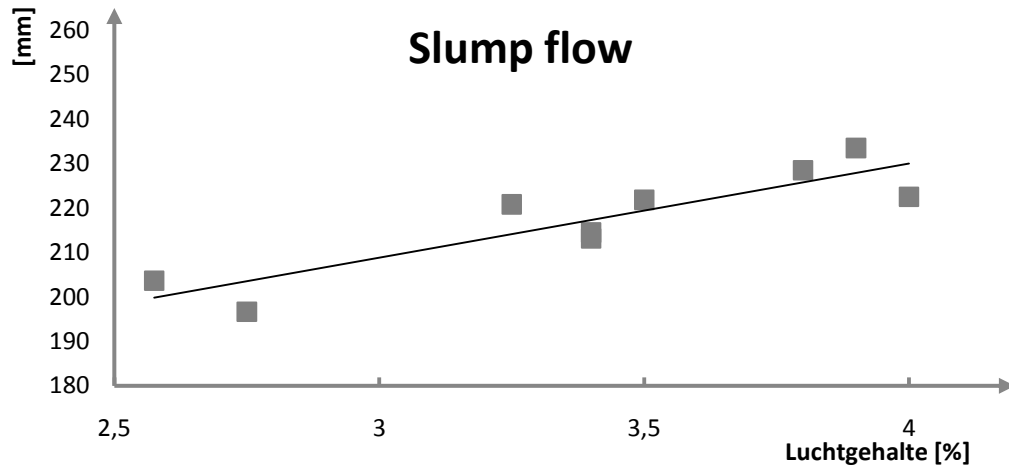
**Ons Technisch-Commercieel Departement staat te uwer beschikking
voor alle bijkomende informatie die u wenst**

CCB

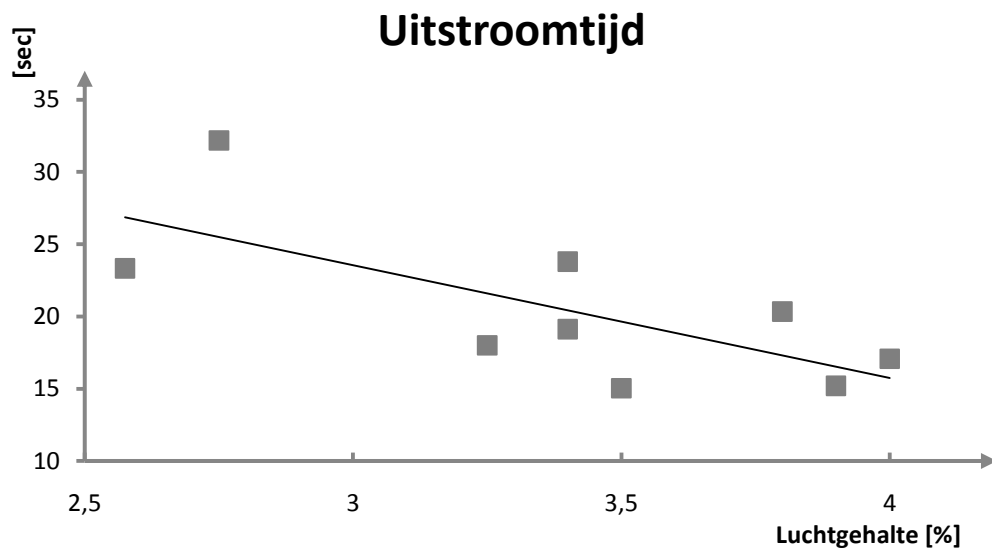
Grand-Route 260
B - 7530 Gaurain Ramecroix
Tel : (32) 69.25.25.11 - Fax : (32) 69.25.25.90
www.ccb.be - E-mail : info@ccb.be

Technisch-Commercieel Departement :
Tel : (32) 69.25.26.26 - Fax : (32) 69.25.26.41

Bijlage 4: Extra grafieken bij § 4.3

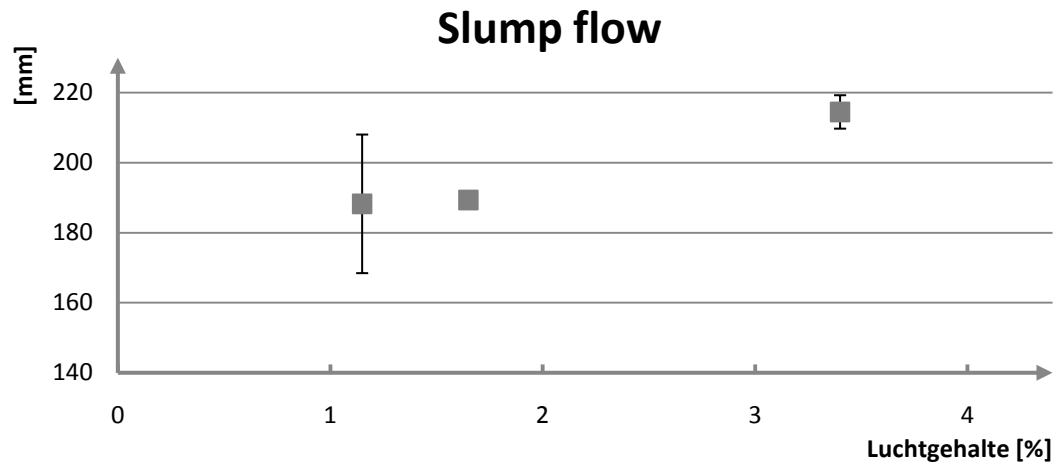


Slump flow i.f.v. het luchtgehalte

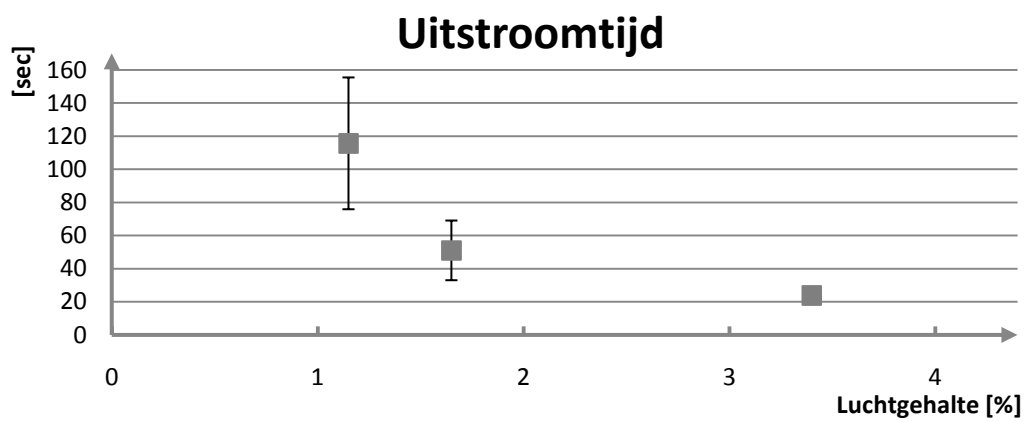


Uitstroomsnelheid i.f.v. het luchtgehalte

Bijlage 5: Extra grafieken bij § 4.4

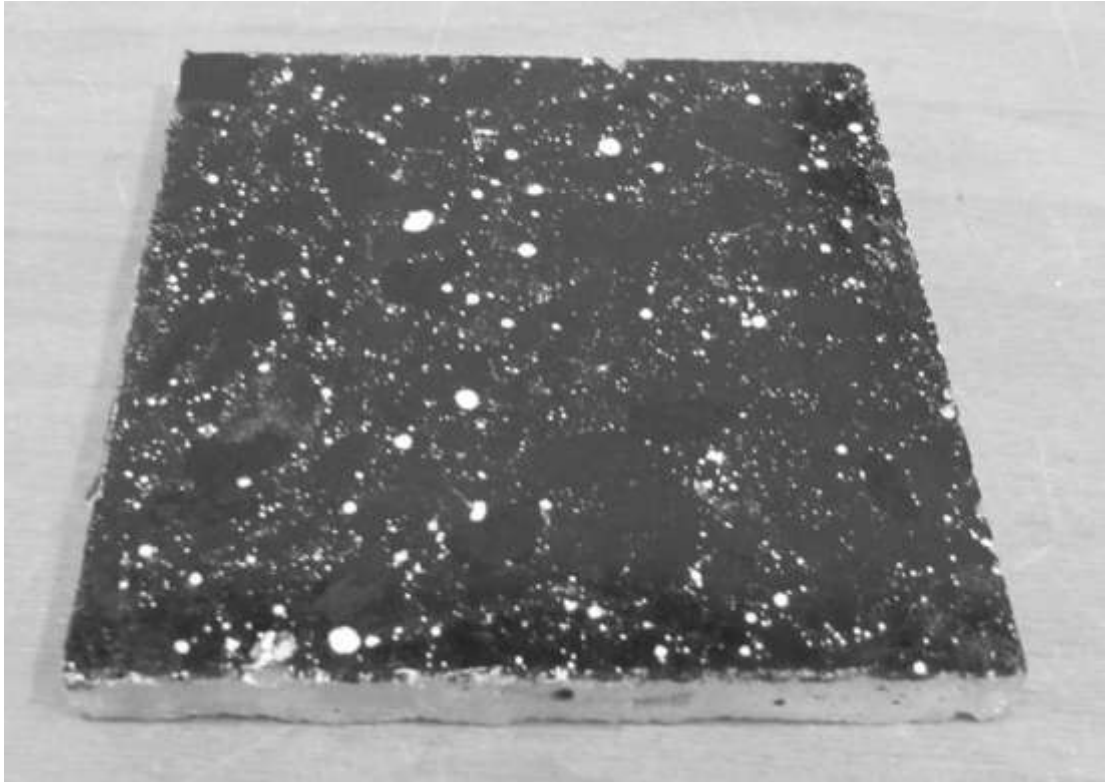


Slump flow i.f.v. het luchtgehalte



Uitstroombtijd i.f.v. het luchtgehalte

Bijlage 6: Doorsnede kubus van traditioneel beton



Doorsnede van een kubus (traditioneel beton)