

Opstellen van interactiekrommen ter verificatie van het compressible packing model

Tom Bosmans, Jolien Van Der Putten

Promotoren: prof. dr. ir. Geert De Schutter, prof. dr. ir. Veerle Boel
Begeleider: ir. 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 2013-2014



Opstellen van interactiekrommen ter verificatie van het compressible packing model

Tom Bosmans, Jolien Van Der Putten

Promotoren: prof. dr. ir. Geert De Schutter, prof. dr. ir. Veerle Boel
Begeleider: ir. 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 2013-2014



Woord vooraf

Graag hadden wij enkele woorden van dank gericht aan personen die ons geholpen hebben bij het realiseren van deze masterproef.

Allereerst willen wij onze promotoren prof. dr. ir. G. De Schutter en prof. dr. ir. V. Boel bedanken voor de goede raad die zij ons verstrekten en de vlotte samenwerking.

Daarnaast willen wij zeker en vast ook onze dank betuigen aan onze begeleider ir. J. Dils die ons gedurende het academiejaar met raad en daad bijstond en er altijd was om ons te helpen.

Verder willen wij ook ing. P. Minne bedanken voor de begeleiding en het inzicht dat hij ons gaf tijdens het uitvoeren van de proeven.

We willen dhr. W. Van Compernelle en dhr. F. De Reu bedanken voor het verschaffen van de nodige informatie voor het uitvoeren van het proefprogramma.

Vervolgens bedanken wij ook het technisch personeel van het Laboratorium Magnel voor Betononderzoek, met name dhr. N. Lampens, dhr. T. Strulemeijer en dhr. N. Coppieters, voor de hulp tijdens het uitvoeren van de proeven.

Tenslotte richten wij een woord van dank aan onze vrienden en familieleden voor de vele steun die wij van hen kregen tijdens het schrijven van dit eindwerk.

*Tom Bosmans
Jolien Van Der Putten
Juni 2014*

De auteurs geven de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

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

Gent, 2 juni 2014

Tom Bosmans & Jolien Van Der Putten

Overzicht

Details masterproef

Opstellen van interactiekrommen ter verificatie van het *compressible packing model* door Tom Bosmans & Jolien Van Der Putten

Promotoren: prof. dr. ir. Geert De Schutter & prof. dr. ir. Veerle Boel
Begeleider: ir. Jeroen Dils

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

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

Abstract

In deze masterproef wordt, op basis van de droge en natte pakking van materialen, het *compressible packing model* (CPM) gevalideerd. Het opstellen van de droge pakking van granulaten gebeurt met behulp van de zwaartekrachtspoor en de verdichtingsproef. De validatie van de experimentele waarden, verkregen uit de zwaartekrachtspoor, gebeurt met een K-waarde gelijk aan 4. De validatie van de verdichtingsproef gebeurt met een hogere K-waarde, namelijk 9, omdat er tijdens het trillen meer energie aan het mengsel wordt toegevoegd. Uit de analyse van de resultaten blijkt dat de errorwaarden van de zwaartekrachtspoor groter zijn dan deze van de verdichtingsproef. De natte pakking van poeders wordt vervolgens bepaald door gebruik te maken van centrifugale consolidatie. Hierbij wordt cement in eerste instantie gecombineerd met drie soorten silica fume, namelijk SF 940U, SF 940D en SF MWE. Nadien wordt cement gecombineerd met kwartsmeel M800 en vliegias. In het CPM-model worden verschillende combinaties van zeefkrommen ingevoerd. Per combinatie wordt het CPM-model gevalideerd voor drie verschillende K-waarden, namelijk 7, 9 en 12 aangezien de waarde van de energieoverdracht, bij uitvoering van centrifugale consolidatie, op voorhand niet gekend is. Uit de analyse van de resultaten blijkt dat voor de meeste combinaties de validatie met een K-waarde gelijk aan 7 resulteert in de kleinste errorwaarde. Als laatste wordt de druksterkte van de combinaties CEM – SF940U en CEM – SF MWE bepaald. Hieruit blijkt dat de hoogste druksterkte wordt verkregen bij de combinatie van poeders die ook aanleiding geeft tot de hoogste pakkingsdichtheid.

Sleutelwoorden

pakkingsdichtheid, interactiekrommen, *compressible packing model*

Determination of packing profiles for the verification of the compressible packing model

Tom Bosmans & Jolien Van Der Putten

Supervisors: prof. dr. ir. G. De Schutter, prof. dr. ir. V. Boel & ir. J. Dils

Abstract – In this paper the results of a research on the packing density of binary mixtures and the validation of the compressible packing model (CPM) is presented. In the first part of the research the dry packing density of coarse aggregates is determined. The second part revolves around the wet packing density of powders. Both types of packing density are evaluated through the use of the CPM.

I. INTRODUCTION

In concrete technology, the design of concrete mixtures is of growing importance. New types of concrete like high performance concrete (HPC) are a result of the high standards which are required nowadays. An important property of HPC is the very low water/cement ratio [1] while obtaining a good flowability. In order to achieve this, the packing density of the concrete mixture can be optimized. A packing model, like the compressible packing model [2], can be a useful tool in the determination of the maximum packing density for a certain combination of materials. The aim of this research is to confirm the validity of the CPM by determining packing profiles of binary mixtures.

II. MATERIALS

a) Coarse aggregates

In this research four different coarse aggregates are used: two rounded aggregates R 4/16 and sand M31 and two angular aggregates B 4/16 and P 2/4. From these aggregates different monosize classes are sieved.

b) Powders

Next to cement CEM I 52.5 N – HS/LA three different silica fumes, a quartz powder M800 and fly ash are used in the research. Two grey silica fumes, 940D and 940U, and one white silica fume, microwhite, are tested. All three are delivered by Elkem.

III. TESTING PROGRAM

The testing program can be split into two parts. In the first part the dry packing density of several binary mixtures of coarse aggregates is determined by using two methods. In the next phase the experimental values of the packing density are evaluated by the use of the CPM. In the second part of the research the wet packing density of binary mixtures containing powders is determined and evaluated using the CPM.

a) Dry packing density

Two different dry packing methods are used to determine the packing density of coarse aggregates. In the first method, called the gravity test, a binary mixture is poured into a cylinder with a fixed volume. The packing density is calculated by dividing the mass of the binary mixture in the cylinder by the volume of the cylinder. For the second method, titled the compaction test, a binary mixture is poured into a cylinder and vibrated during 2 min at a frequency of 50 Hz while being compressed under a load of 5,30 kPa. The packing density of the binary mixture is calculated from the volume change of the mixture. Both test setups are presented in Figure 1.



Figure 1: Test setup gravity test (on the left) and compaction test (on the right)

b) Wet packing density

To determine the packing density of powders two methods can be recommended: determining the water demand by mixing energy (Marquardt test) and centrifugal consolidation [3]. In this

research the technique of centrifugal consolidation is performed, while the first method is executed at the Katholieke Hogeschool Sint-Lieven.

c) Compressible packing model

The aim of the compressible packing model is to determine the actual packing density of polydisperse mixtures. To following properties are needed as an input for the CPM:

- the size distribution of the aggregates;
- the value of the compaction index and;
- the individual packing densities of the aggregates.

The results of the CPM can be used in the design of a concrete mixture to assess its properties with regard to strength and durability.

III. RESULTS

a) Dry packing density

To determine the dry packing density of the coarse aggregates different monosize classes are combined with the fraction Z .25/.5. Table 1 presents the individual packing density of the monosize classes for the gravity and compaction tests. At equal size, rounded aggregates are more compact than angular aggregates. When the size of the aggregates decreases, the packing density will also decrease.

Table 1: Individual packing density according to the gravity test

Fraction [mm]	PD _{actual}	
	Gravity test [-]	Compaction test [-]
R 4/8	0,587	0,633
R 2/4	0,550	0,623
B 4/8	0,493	0,567
B 2/4	0,451	0,534
P 2/4	0,497	0,582
Z .5/1	0,542	0,633
Z .25/.5	0,544	0,647
Z .125/.25	0,528	0,647

When two monosize classes are combined an interaction between the two aggregates is observed and the packing density of the mixture increases. The increase of the packing density is larger for mixtures where the difference in the size of the particles is bigger.

Next the experimental values are evaluated by using the CPM. Two approaches are used for the input of the size distribution:

- Approach 1:
The fractions are divided into 4 subclasses of equal importance between the upper and lower limit of the size range.
- Approach 2:
The actual size distribution of the monosize classes is used.

According to Fennis [3] the value of the compaction-index K is equal to 4,1 for the gravity test. A mean of 2,33 % is found when first approach of the size distribution is considered. For the second approach a mean error of 1,91 % is calculated. For the compaction test a K-value of 9 is recommended by Larrard [2]. The mean error for the first approach of the size distribution is equal 1,59 % and 1,71 % for the second approach. In both cases the value of the mean error is larger than the ones found by Fennis [3] and Larrard [2]. Both of these studies only investigated binary mixtures with particles of the same shape (round or angular). However in this research the combination of round and angular aggregates was also included which leads to a higher value of the mean error.

b) Wet packing density

The technique of centrifugal consolidation is used to determine the packing density of powders. Figure 2 presents the actual packing density for the different combinations of cement plus a certain powder. The shape of the packing profile for the different types of silica fume and the quartz powder look alike. By adding the powder to the cement the packing density increases to an optimal value. Afterwards the packing density decreases until a minimum is achieved for a mixtures which only contains silica fume or quartz. The increase in packing density is attributed to the filler effect of silica fume and quartz powder M800 [1]. In case fly ash is added to cement, the situation is different. The value of the packing density keeps on increasing until a maximum is reached for a mixture that only contains fly ash. The larger value of the individual packing density of fly ash can be explained by the beneficial spherical shape of the particles [1].

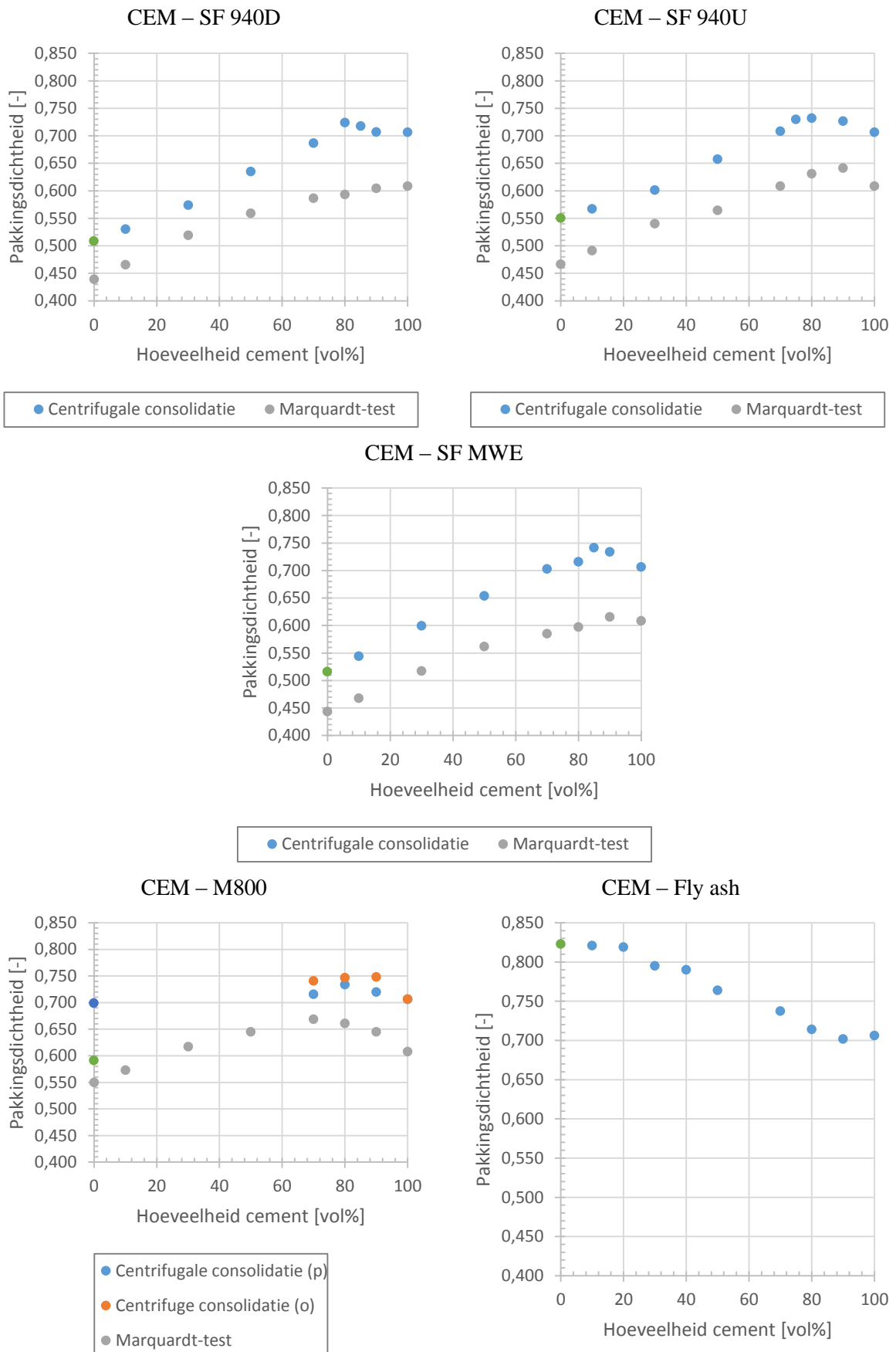


Figure 2: Packing profiles - Centrifugal consolidation

Next the experimental values are evaluated by using the CPM. The size distribution of the different powders was taken into account with different methods. For cement the size distribution was determined by a wet and dry laser light scattering method (wLLS and dLLS). The size distribution of silica fume was determined by wLLS with the addition of superplasticizer (wLLS+SP) and by a dynamic light scattering method (DLS) also with the addition of a superplasticizer. For quartz powder M800 and fly ash the size distribution was obtained by wLLS. Different combinations of size distributions are taken as input for the CPM. Three different K-values are used, i.e. 7, 9 and 12. In general a K-value of 7 gives the best correlation between the theoretical values and the experimental values. This value for the compaction-index of the centrifugal consolidation test is slightly higher than the one Sedran [4] obtains by performing a Marquardt test, i.e. 6,7.

IV. CONCLUSIONS

From the results in the first part of the research it can be concluded that the CPM provides a reliable approximation of the actual packing density for mixtures containing coarse aggregates.

For binary mixtures consisting of powders the technique of centrifugal consolidation was used to determine the experimental values of the packing density. When these were evaluated by the use of the CPM, the best correlation was obtained for a K-value of 7.

REFERENCES

- [1] Kwan, A.K.H & Wong, H.H.C. (2008). Packing density of cementitious materials: part 2 – packing and flow of OPC + PFA + CSF. *Materials and Structures*, 41(4), pp. 773-784.
- [2] Larrard, F. de (1999). *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. Londen, Verenigd Koninkrijk: Routledge, Taylor & Francis Group.
- [3] Fennis, S.A.A.M. (2010). *Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimazation*. Doctoral thesis, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen.
- [4] Sedran, T. (1999). *Rheologie et rheometrie des bétons. Appllication aux bétons autonivalants*. Doctoral thesis, Université Laval.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	4
Overzicht	6
Extended abstract	7
Inhoudsopgave	11
Lijst met afkortingen en symbolen	15
DEEL I Inleiding	18
DEEL II Literatuurstudie	20
1 Inleiding	21
2 Pakkingsdichtheid	23
2.1 Definitie.....	23
2.2 Factoren die een invloed hebben op de pakkingsdichtheid	24
2.2.1 Grootte van de korrels.....	24
2.2.2 Vorm van de korrels.....	25
2.2.3 Pakkingsmethode.....	26
3 Bepalen van de pakkingsdichtheid	27
3.1 Droge pakkingsdichtheid.....	27
3.2 Natte pakkingsdichtheid.....	29
3.2.1 Algemeen.....	29
3.2.2 Marquardt-test.....	30
3.2.3 Centrifugale consolidatie.....	32
3.3 Effect van oppervlaktekrachten	34
3.4 Gevolgen voor de korrelstructuur.....	35
3.4.1 Geometrische interactie.....	35
3.4.2 Agglomeratie.....	37
3.4.3 Segregatie.....	38
4 Pakkingsmodellen	39
4.1 Furnas-model.....	39
4.2 Linear packing density model (LPDM).....	40
4.3 Compressible packing model (CPM).....	42
<hr/>	
Opstellen van interactiekrommen ter verificatie van het compressible packing model	11

4.3.1	Theoretisch model	42
4.3.2	Parameterstudie voor binaire mengsels	45
4.4	<i>Compaction-interaction packing model (CIPM)</i>	48
4.4.1	DVLO-theorie	50
4.4.2	HADES-simulatie	51
5	Materialen	53
5.1	<i>Cement</i>	53
5.2	<i>Silica fume</i>	54
5.3	<i>Kwartspoeders</i>	55
5.4	<i>Superplastificeerder</i>	55
DEEL III	Experimenteel onderzoek	57
6	Droge pakkingsdichtheid	60
6.1	<i>Keuze van de materialen</i>	60
6.1.1	Grove granulaten	60
6.1.2	Fijne granulaten	60
6.2	<i>Eigenschappen van de materialen</i>	60
6.2.1	Bepalen van de dichtheden	60
6.2.2	Opstellen van de droge zeefkrommes	61
6.3	<i>Zwaartekrachtspreef</i>	62
6.3.1	Samenstelling van de mengsels	62
6.3.2	Procedure	62
6.3.3	Analyse van de resultaten	63
6.4	<i>Verdichtingspreef</i>	67
6.4.1	Eigenschappen van het toestel	67
6.4.2	Samenstelling van de mengsels	67
6.4.3	Procedure	67
6.4.4	Analyse van de resultaten	69
6.4.5	Segregatie	73
6.5	<i>Vergelijking zwaartekrachtspreef en verdichtingspreef</i>	75
6.6	<i>Besluit in verband met het compressible packing model</i>	76

7	Natte pakkingsdichtheid – Centrifugale consolidatie	77
7.1	<i>Keuze van de materialen</i>	77
7.1.1	Cement	77
7.1.2	Silica fume	77
7.1.3	Vulstof	77
7.1.4	Hulpstof	78
7.2	<i>Eigenschappen van de materialen</i>	78
7.2.1	Bepalen van de dichtheden	78
7.2.2	Opstellen van de natte zeefkrommes	79
7.3	<i>Extra zeefkrommes</i>	87
7.4	<i>Eigenschappen van de toestellen</i>	87
7.4.1	Menger	87
7.4.2	Centrifuge	88
7.5	<i>Samenstelling van de mengsels</i>	89
7.5.1	Verhouding poeders	89
7.5.2	Hoeveelheid superplastificeerder	90
7.5.3	W/P-factor	91
7.6	<i>Mengprocedure en centrifugeren</i>	92
7.7	<i>Actuele pakkingsdichtheid</i>	93
7.7.1	Bepalen van de actuele pakkingsdichtheid	93
7.7.2	Reeks CEM – SF	97
7.7.3	Reeks CEM – M800	102
7.7.4	Reeks CEM – Vliegas	104
7.8	<i>Validatie van pakkingsdichtheid aan de hand van het compressible packing model</i>	106
7.8.1	Reeks CEM – SF	106
7.8.2	Reeks CEM – M800	107
7.8.3	Reeks CEM – vliegas	108
7.8.4	Conclusie	108
7.9	<i>Verwerkbaarheid van de cementpasta</i>	110
7.9.1	Procedure	110

7.9.2	Analyse van de resultaten	110
7.10	<i>Druksterkte</i>	111
7.10.1	Eigenschappen van het toestel.....	111
7.10.2	Procedure.....	111
7.10.3	Analyse van de resultaten.....	113
DEEL IV	Conclusie en aanbevelingen voor verder onderzoek	114
	Conclusie.....	115
	Aanbevelingen voor verder onderzoek.....	118
	Bijlage A : Technische fiches van de materialen.....	119
	Bijlage B : Droge zeefkrommes	135
	Bijlage C : Interactiekrommen zwaartekrachtsproef volgens CPM	137
	Bijlage D : Interactiekrommen verdichtingsproef volgens CPM.....	145
	Bijlage E : Extra zeefkrommes.....	153
	Bijlage F : Interactiekrommen centrifugale consolidatie.....	154
	Bijlage G : Slump flow	173
	Referenties.....	175
	Normen.....	179
	Lijst met figuren	180
	Lijst met tabellen	183

Lijst met afkortingen en symbolen

<i>Afkorting</i>	<i>Betekenis</i>	
CEM	cement	
CIPM	<i>compaction-interaction packing model</i>	
CPM	<i>compressible packing model</i>	
dLLS	<i>laser light scattering – droge methode</i>	
DLS	<i>dynamic light scattering</i>	
FWO	Fonds Wetenschappelijk Onderzoek	
LLS	<i>laser light scattering</i>	
LPDM	<i>linear packing density model</i>	
PD	pakkingsdichtheid	
rpm	rotaties per minuut	
SF	silica fume	
SP	superplastificeerder	
SSM	<i>solid suspension model</i>	
UHPC	<i>Ultra-high performance concrete</i>	
wLLS	<i>laser light scattering – natte methode</i>	
W/C-factor	water-cementfactor	
W/P-factor	water-poederfactor	
<i>Symbol</i>	<i>Betekenis</i>	<i>Eenheid</i>
a_{ij}	factor die het <i>loosening effect</i> beschrijft dat door klasse j wordt uitgeoefend op klasse i	[-]
b_{ij}	factor die het <i>wall effect</i> beschrijft dat door klasse j wordt uitgeoefend op klasse i	[-]
d_1	korreldiameter van de grootste fractie	[m]
d_2	korreldiameter van de kleinste fractie	[m]
d_c	diameter die het effect van verdichten in rekening brengt bij de overgang van CPM naar CIPM	[m]
d_i	diameter van de i-de klasse korrels in een mengsel	[m]
d_j	diameter van de j-de klasse korrels in een mengsel	[m]
e	poriëngehalte	[%]
ik	imaginaire deel van de refractie-index	[-]
m_p	massa van de deeltjes in een mengsel	[kg]
m_{pasta}	massa pasta aanwezig in de proefbuis	[g]
m_{poeder}	massa poeder die aanwezig is in de pasta	[g]
m_{pdr}	massa van de beschouwde combinatie poeders	[g]
m_w	massa water die na het centrifugeren bovenop de pasta aanwezig is en met een pipet wordt verwijderd	[g]

m_{water}	massa water nog aanwezig in de pasta na het centrifugeren	[g]
m_{wtr}	massa van het water dat bij de beschouwde poedercombinatie wordt toegevoegd	[g]
$m_{\text{wtr,na centr}}$	massa water dat na centrifugeren nog tussen de korrels aanwezig is	[g]
n	reële deel van de refractie-index	[-]
r_i	volumefractie van de i -de klasse korrels in een mengsel	[-]
s	afstand gemeten tussen twee korrels	[m]
s_0	<i>cut-off</i> waarde van s	[m]
$w_{0,a}$	functie die het maximaal bereik van het <i>loosening effect</i> aanduidt	[-]
$w_{0,b}$	functie die het maximaal bereik van het <i>wall effect</i> aanduidt	[-]
w_a	constante die het maximaal bereik van het <i>loosening effect</i> weergeeft	[-]
w_b	constante die het maximaal bereik van het <i>wall effect</i> weergeeft	[-]
y_i	volumefractie van de i -de klasse korrels in een mengsel	[vol%]
$A(s)$	Hamaker factor	[Nm]
C_a	interactieconstante die rekening houdt met de invloed van het verdichten bij optreden van het <i>loosening effect</i>	[-]
C_b	interactieconstante die rekening houdt met de invloed van het verdichten bij optreden van het <i>wall effect</i>	[-]
C_7	constante	[-]
F_{el}	afstootkracht	[N]
F_{totaal}	totale cohesiekracht	[N]
F_{vdw}	van der Waalskracht	[N]
K	compactatiefactor	[-]
K_i	bijdrage van de i -de klasse korrels in een mengsel aan de compactatiefactor	[-]
N	refractie-index	[-]
PD	pakkingsdichtheid	[-]
PD_{actueel}	actuele pakkingsdichtheid	[-]
PD_{initieel}	initiële pakkingsdichtheid	[-]
$PD_{\text{na centr}}$	pakkingsdichtheid na centrifugale consolidatie	[-]
$V_{\text{container}}$	volume van het vat	[m ³]
V_{pdr}	volume van de beschouwde combinatie poeders	[ml]
V_{wtr}	volume van het water	[ml]

$V_{wtr,na\ cent}$	volume water dat na centrifugeren nog tussen de korrels aanwezig is	[ml]
W/P	water-poederfactor	[-]
$W/P_{initieel}$	initiële water-poederfactor	[-]
$W/P_{na,centr}$	Water-poederfactor na centrifugeren	[-]
α	actuele pakkingsdichtheid van een monodispers mengsel	[-]
β	virtuele pakkingsdichtheid van een monodispers mengsel	[-]
β_i	residuele pakkingsdichtheid van een enkele korrelverdelingsklasse met korreldiameter d_i in een mengsel	[-]
γ_i	virtuele pakkingsdichtheid van een mengsel wanneer de i -de korrelverdelingsklasse dominant is	[-]
π	porositeit	[-]
ρ_{gem}	gemiddelde massadichtheid van de beschouwde verhouding van poeders	[kg/m ³]
ρ_p	dichtheid van de deeltjes	[kg/m ³]
φ_i	partieel volume	[-]
Φ	volume van de vaste massa van een mengsel in een eenheidsvolume	[-]

DEEL I Inleiding

Deze thesis vormt een onderdeel van het FWO-project waarin de invloed van vacuüm mengen op de eigenschappen van cementgebonden materialen wordt onderzocht. Vorig academiejaar werd getracht de samenstelling van het ultra-hogesterktebeton te optimaliseren. Als basis werd vertrokken van een mengsel met enkel cement waaraan verschillende bestanddelen werden toegevoegd. Na het optimaliseren van de mortelmatrix werd basalt als grof granulaat toegevoegd. Door deze toevoeging werd een daling in de druksterkte van het beton vastgesteld. Deze conclusie leidt tot een voorstel om de pakkingsdichtheid van zand en andere granulaten te bepalen. Op die manier wordt het mogelijk de combinatie van twee zanden, of de combinatie van zand en een granulaat te optimaliseren. Daarom wordt in deze thesis de pakkingsdichtheid bepaald op basis van de zwaartekrachtspreef en de verdichtingspreef en worden er interactiekrommen opgesteld. Door deze krommen wordt het mogelijk na te gaan bij welke combinatie de hoogste pakkingsdichtheid wordt verkregen.

Een ander fenomeen zichtbaar in het onderzoek van Breye & De Vos [2013] is dat de druksterkte van pasta's en mortels met silica fume 940U opmerkelijk hoger ligt dan bij 940D, wat door hun niet kon verklaard worden door de pakkingsdichtheid van de materialen. Daarom wordt in het tweede deel van deze thesis verder ingegaan op het bepalen van de pakkingsdichtheid van poeders door gebruik te maken van centrifugale consolidatie.

In de literatuurstudie wordt besproken wat wordt verstaan onder pakkingsdichtheid en wordt dieper ingegaan op enkele invloedsfactoren. Vervolgens worden theoretische pakkingsmodellen besproken waarvan het *compressible packing model* (CPM) later zal worden toegepast in het experimenteel onderzoek. Daarna wordt uitgelegd op welke manieren de pakkingsdichtheid in de praktijk kan worden bepaald. Zowel droge methoden, voor granulaten, als natte methoden, voor poeders, komen aan bod. Tevens wordt besproken welke factoren, afhankelijk van de gebruikte pakkingsmethode, een invloed kunnen hebben op de verkregen pakkingsdichtheid. Tenslotte wordt de algemene werking van de bestanddelen die nodig zijn voor het aanmaken van een ultra-hogesterktebeton besproken.

In het experimentele onderzoek worden de droge en de natte pakkingsdichtheid van verschillende combinaties van materialen bepaald. Daarna wordt met de verkregen data het *compressible packing model* gevalideerd.

DEEL II Literatuurstudie

1 Inleiding

Met het oog op hedendaagse en toekomstige toepassingen van beton wordt in de betontechnologie naar nieuwe oplossingen gezocht die voldoen aan de gestelde mechanische en structurele eisen. *High performance concrete* (HPC), dat naast een hoge sterkte ook op andere punten sterk presteert, wint de laatste jaren aan populariteit. Dit soort beton dankt zijn sterke prestaties aan de zeer lage water/cementverhouding (W/C-factor) die wordt toegepast. Er moet echter rekening gehouden worden met het feit dat deze verlaging van de W/C-factor een fysische ondergrens kent. Dit is zeker het geval wanneer enkel portlandcement wordt gebruikt voor het maken van het beton. Het water dat wordt toegevoegd moet op zijn minst de holtes tussen de cementdeeltjes opvullen. Indien enkel portlandcement wordt gebruikt, is het gehalte aan holle ruimtes over het algemeen zeer groot. Bijgevolg moet een grote hoeveelheid water aan het cement worden toegevoegd en kan het beton niet als hogesterktebeton worden geclassificeerd. Door een supplementaire hoeveelheid aan cementachtige materialen, zoals bijvoorbeeld vliegas of silica fume die fijnere deeltjes bevatten dan het portlandcement, toe te voegen, kunnen de holtes worden opgevuld. Hierdoor zal het gehalte aan holle ruimtes verminderen en kan de W/C-factor verlaagd worden om een beton met betere eigenschappen te maken. De voorgestelde werkwijze komt overeen met het verbeteren van de pakkingsdichtheid van het mengsel.

Door de pakkingsdichtheid van een cementpasta te verhogen kan de nodige hoeveelheid water voor het opvullen van de holle ruimtes gereduceerd worden. Hierdoor is een grotere hoeveelheid aan overtollig water aanwezig dat kan gebruikt worden om de vloeibaarheid van de pasta te verbeteren. Voor de productie van een *high performance concrete*, dat steeds een lage W/C-factor en een hoge verwerkbaarheid vergt, komt het er op aan de pakkingsdichtheid van het korrelskelet te maximaliseren [Kwan & Wong, 2008]. Hierbij mag echter niet uit het oog worden verloren dat er steeds een minimale hoeveelheid water nodig is voor het hydratatieproces. Hydratatie is eveneens een belangrijk aspect, maar valt buiten het toepassingsgebied van deze masterproef.

Niet alleen de mechanische en structurele eisen zijn tegenwoordig van belang. In de huidige maatschappij moet, sinds de economische crisis, steeds meer rekening worden gehouden met de kosten dat een productieproces met zich meebrengt. Daarnaast wordt ook meer aandacht geëist voor de milieuproblematiek. Bij het maken van beton is cement immers verantwoordelijk voor meer dan 50 % van de CO₂-emissie. Door een gedeelte van het cement te vervangen kan het energieverbruik en de CO₂-uitstoot worden verminderd [Fennis, 2010]. De samenstelling van het mengsel aanpassen door het cementgehalte te verminderen en de hoeveelheid granulaten te verhogen is niet wenselijk. Hierdoor zou het beton niet meer voldoen aan de gestelde eisen in verband met sterkte en duurzaamheid, maar ook de verwerkbaarheid van het verse beton zou in het gedrang komen. Daarom worden rest- of bijproducten van andere industrieën zoals vliegas en

silica fume toegevoegd omwille van hun gunstige gedrag in combinatie met cement en hun effect op de binding met de granulaten [Bleek, 2011]. Om de mechanische eigenschappen van een dergelijk ecologisch beton te kunnen voorspellen kunnen pakkingsmodellen worden gebruikt. Op deze manier kan het cementgehalte in het beton op een veilige wijze worden verlaagd [Fennis, 2010].

Bij het produceren van *ultra-high performance concrete* (UHPC) mag het duurzaamheidsaspect niet uit het oog verloren worden. De duurzaamheid van een betonmengsel is zeer afhankelijk van de dichtheid en de poriënstructuur van de cementmatrix. Deze eigenschappen hangen af van het gebruikte fijn materiaal en de korrelverdeling van deze materialen. De duurzaamheidseigenschappen van een beton moeten voor elke samenstelling afzonderlijk geëvalueerd worden [Fennis, 2010].

Bij de aanwending van UHPC moet bijgevolg steeds worden afgewogen of het economisch, het ecologisch of het duurzaamheidsaspect prioriteit krijgt.

2 Pakkingsdichtheid

2.1 Definitie

De pakkingsdichtheid van een mengsel van verschillende granulaten wordt gedefinieerd als het volume aan vast materiaal Φ in een eenheidsvolume. Anders gezegd kan de verdichting beschreven worden met behulp van de porositeit van het mengsel:

$$\pi = 1 - \Phi \quad (2.1)$$

Of door middel van het poriëngehalte:

$$e = \frac{\pi}{\Phi} = \frac{1}{\Phi} - 1 \quad (2.2)$$

Het voorspellen van de pakkingsdichtheid van een mengsel van verschillende granulaten is een heel belangrijk probleem in de betonwereld, maar ook in andere sectoren is het een zeer relevant vraagstuk. Vele composietmaterialen, zoals beton, bestaan uit granulaten die worden samengehouden met behulp van een binder. Het is vaak de bedoeling om deeltjes met een verschillende grootte samen te voegen om de porositeit te minimaliseren. Hierdoor zal de hoeveelheid binder die nodig is in het mengsel afnemen. De pakkingsdichtheid van een mengsel van granulaten met verschillende korrelafmetingen is afhankelijk van [Larrard, 1999]:

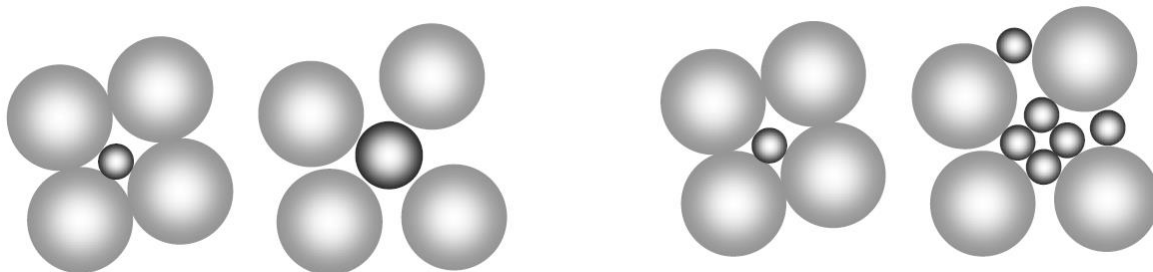
- de grootte van de korrels;
- de vorm van de korrels;
- de pakkingsmethode.

Afhankelijk van de korrelverdeling en van de vorm van de granulaten kan de pakkingsdichtheid variëren tussen 55 % en 85 %, terwijl de afwijking van de corresponderende porositeit ligt tussen 45 % en 15 %. Aangezien voor beton de holten tussen de granulaten moeten opgevuld worden door cementpasta zal de porositeit het minimale volume van deze cementpasta bepalen. Een hogere pakkingsdichtheid leidt, volgens formule (2.1), tot een lagere porositeit en bijgevolg is een kleinere hoeveelheid cementpasta nodig voor de aanmaak van het beton. Vanuit het standpunt van de betonproducenten is het economisch voordeliger een beton aan te maken waarin minder cement verwerkt zit. Vanuit een ingenieursstandpunt is een betere pakking van belang om de warmte ten gevolge van de hydratatiereactie in het beton te verminderen en om de krimp tijdens het uitharden te reduceren. Deze twee fenomenen kunnen scheuren in het beton veroorzaken en zijn proportioneel met de hoeveelheid cement aanwezig in het beton [Kwan & Mora, 2001].

2.2 Factoren die een invloed hebben op de pakkingsdichtheid

2.2.1 Grootte van de korrels

Voor een mengsel bestaande uit granulaten met grote korrels is de absolute grootte van de deeltjes niet belangrijk voor de pakkingsdichtheid. Grote partikels zijn immers enkel onderhevig aan granulometrische interactiekrachten. Maar bij kleine deeltjes ($< 100 \mu\text{m}$) zal de pakkingsdichtheid dalen ten gevolge van de grotere specifieke oppervlakte van de deeltjes, de kleinere massa van de deeltjes en de zwakke korte-afstandskrachten zoals de van der Waalskrachten, krachten ten gevolge van een elektrochemische dubbellaag en sterische krachten. Algemeen kan gesteld worden dat de pakkingsdichtheid vergroot als kleine deeltjes de holle ruimten tussen de grotere korrels opvullen. Daarom zal de pakkingsdichtheid van een mengsel met een uniforme korrelverdeling verbeteren indien de korrelverdeling zich verbreedt. Niet alleen het aantal verschillende korrelklassen maar ook de korrelverdeling zelf heeft een invloed op de optimale waarde van de pakkingsdichtheid. Zo zal een teveel aan kleine deeltjes of deeltjes die te groot zijn om de holtes op te vullen ervoor zorgen dat de grotere korrels uit elkaar gedruwd worden. Hierdoor zal de pakkingsdichtheid beïnvloed worden [Fennis, 2010]. De verstoring van de pakking van de grote partikels door de kleinere deeltjes wordt het *loosening effect* genoemd [Fennis, Walraven & Uijl, 2013]. Figuur 2.1 geeft weer hoe dit *loosening effect* tot stand komt.



Figuur 2.1: Invloed van de grootte van de deeltjes en de hoeveelheid korrels op de pakkingsdichtheid [Fennis, 2010]

De doeltreffendheid waarmee een supplementair materiaal de holle ruimtes van het basismateriaal kan opvullen of de pakkingsdichtheid van het geheel kan verbeteren is afhankelijk van de fijnheid van het toegevoegde materiaal. Algemeen kan gesteld worden dat een materiaal met een bredere korrelverdeling tot een hogere pakkingsdichtheid kan leiden. Dat komt omdat voor dit materiaal de deeltjes van gemiddelde grootte de holtes tussen de grote deeltjes kunnen opvullen, de kleine deeltjes kunnen de holtes tussen de korrels met een gemiddelde grootte opvullen en de zeer fijne deeltjes zullen de holtes tussen de kleine korrels opvullen. Door deze opeenvolgende vullingseffecten zal het gehalte aan holle ruimtes zeer sterk afnemen. Bijgevolg neemt de pakkingsdichtheid van het geheel toe [Kwan & Wong, 2008].

2.2.2 Vorm van de korrels

De vorm van een korrel wordt gekarakteriseerd door zijn algemene vorm, zijn rondheid (gladheid op grote schaal) en zijn oppervlaktetextuur (gladheid op kleine schaal). Deze eigenschappen zijn grotendeels onafhankelijk van elkaar, maar een natuurlijke correlatie is niet uitgesloten omwille van de gemeenschappelijke fysische factoren die deze eigenschappen bepalen.

De algemene vorm van de korrels kan beschreven worden met behulp van vormfactoren die de verhouding zijn van de drie dimensies van het deeltje, namelijk de lengte, de breedte en de dikte. De pakkingsdichtheid van een mengsel vermindert wanneer de vorm van de deeltjes afwijkt van de sferische vorm en bijgevolg platter en langer wordt.

De rondheid van een korrel is geen maat voor de sfericiteit van een deeltje. Er zijn twee aspecten aan het begrip rondheid van een korrel, namelijk de rondheid van de hoeken van het deeltje en de rondheid van de contour van het deeltje. De rondheid van de hoeken van een korrel is het tegenovergestelde van de scherpte van de hoeken van een deeltje en is belangrijk wanneer het gaat over de schurende en perforerende eigenschappen van de deeltjes. De rondheid van de omtrek van de korrel wordt algemeen uitgedrukt in termen van convexiteit en is belangrijker wanneer het gaat om de interlockingeigenschappen en pakkingsdichtheid van de deeltjes.

De oppervlaktetextuur beschrijft de gladheid of de ruwheid van het oppervlak van een korrel. Deze eigenschap kan uitgedrukt worden als functie van de grootte en de scherpte van uitsteeksels en inkepingen, op kleine schaal, op de rand van de korrel. Aangezien de kenmerken van de oppervlaktetextuur een grootteorde kleiner zijn dan deze van de rondheid van de korrels zal de oppervlaktetextuur weinig tot geen invloed hebben op de pakkingsdichtheid [Kwan & Mora, 2001].

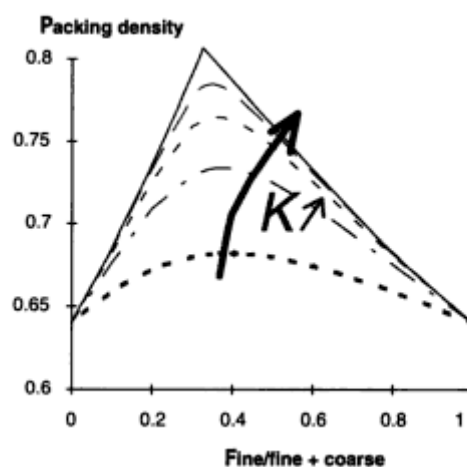
Bij het mengen van de deeltjes zullen hoekige korrels het proces storen, maar deze deeltjes zullen er eveneens voor zorgen dat het mengsel beter gehomogeniseerd is door de segregatie van de deeltjes te bemoeilijken. Op dezelfde wijze zullen gladde sferische korrels de wrijving tussen de deeltjes tot een minimum herleiden en daardoor de pakkingsdichtheid vergroten. De hoge pakkingsdichtheid wordt in dit geval verkregen doordat de ronde granulaten de verwerkbaarheid van het mengsel verbeteren waardoor minder verdichtingsenergie moet toegevoegd worden om de maximale pakkingsdichtheid te bekomen. Hoekige granulaten daarentegen geven aanleiding tot een sterkere en meer stabiele korrelstructuur maar veroorzaken eveneens een lagere pakkingsdichtheid van de deeltjes [German, zoals geciteerd in Fennis, 2010].

2.2.3 Pakkingsmethode

De compactatie-energie die wordt toegevoegd aan een mengsel is afhankelijk van de wijze waarop de deeltjes worden gepakt. Zo is het verkregen pakkingsniveau verschillend indien de deeltjes enkel gegoten worden of indien deze ook vermengd en getrild worden. Bijgevolg kan de pakkingsdichtheid beschreven worden in functie van de hoeveelheid energie die aan het mengsel toegevoegd wordt.

Indien de deeltjes gegoten worden, wordt de losse pakkingsdichtheid van het mengsel bekomen. In deze situatie bezit het mengsel een grote hoeveelheid holtes. Door meer energie toe te voegen tijdens het pakkingsproces kan de pakkingsdichtheid verhoogd worden. Als het mengsel met zijn losse pakkingsdichtheid getrild wordt, zal het geheel onder zijn eigengewicht dichter bij elkaar gepakt worden. Door de vibraties zullen de holle ruimtes zich openen en kunnen naburige deeltjes deze holtes opvullen ten gevolge van de inwerkende zwaartekracht. Wanneer naast het trillen van een mengsel ook een externe belasting wordt aangebracht, waardoor inwerking van de zwaartekracht nog meer wordt onderstreept, zal de pakkingsdichtheid van het mengsel nog verhogen [Fennis, 2010].

Als de pakkingsdichtheid wordt uitgezet in functie van de hoeveelheid fijn materiaal dat een mengsel bevat, dit wordt een interactiekromme genoemd, dan wordt bij een bepaalde combinatie van fijne en grove deeltjes een maximale pakkingsdichtheid gevonden. Op de onderstaande figuur wordt aangetoond dat de piek in de pakkingsdichtheid stijgt naarmate meer energie aan het mengsel wordt toegevoegd. Daarnaast blijkt dat het optimum in de interactiekromme verschuift naar samenstellingen waarbij meer grove granulaten aanwezig zijn. Dit is een gevolg van het feit dat wanneer meer energie wordt toegevoegd aan het mengsel, de pakking van de grote deeltjes verbetert. Hierdoor is minder fijn materiaal noodzakelijk om de holtes tussen de grote partikels op te vullen.



Figuur 2.2: Invloed van het verdichtingsproces op de pakkingsdichtheid [Larrard, 1999]

3 Bepalen van de pakkingsdichtheid

3.1 Droge pakkingsdichtheid

De maximale pakkingsdichtheid van droge granulaten kan worden bepaald volgens de norm NBN EN 1097-3:1998 voor het opmeten van de dichtheid van een onverdicht materiaal [Fennis, 2010]. Hiervoor wordt een vat met gekend volume gevuld met het te beproeven materiaal. Zonder dit materiaal te verdichten wordt het vat tot aan de rand gevuld en afgestroken. De verhouding tussen de massa aan granulaten en het volume van het vat geeft de dichtheid van het onverdicht materiaal [NBN EN 1097-3, 1998]. Hieruit kan vervolgens de pakkingsdichtheid bepaald worden door de voorgaande verhouding te delen door specifieke dichtheid van het materiaal. Formule (3.1) geeft de pakkingsdichtheid bepaald volgens de bovenstaande regels.

$$\alpha = \frac{m_p}{\rho_p V_{\text{container}}} \quad (3.1)$$

Deze methode kan uitgebreid worden om de maximale pakkingsdichtheid bij een gegeven verdichtingsniveau te bepalen. Deze methode is geschikt voor deeltjes groter dan 1 mm. Hiervoor zijn gravitatiekrachten en dwarskrachten immers dominant. Voor fijnere deeltjes worden de oppervlaktekrachten tussen de korrels van groter belang. Deze krachten kunnen bijvoorbeeld het agglomereren van de deeltjes in de hand werken. Hierdoor zal de pakkingsdichtheid lager uitvallen. Omdat de interactiekrachten tussen de deeltjes afhankelijk zijn van de omstandigheden (droog of nat) van de pakkingsstechniek zal ook de pakkingsdichtheid hierdoor beïnvloed worden. Daarom is het van belang dat de pakkingsdichtheid van de deeltjes wordt bepaald onder dezelfde omstandigheden als deze die optreden indien de granulaten worden gebruikt in beton en in het pakkingsmodel [Fennis, 2010]. Aangezien de grove granulaten in een betonmengsel ook onder natte omstandigheden voorkomen, volgt hieruit dat de pakkingsdichtheid van deze granulaten eveneens met behulp van een natte pakkingsstechniek kan bepaald worden. Deze natte pakkingsmethoden worden echter gebruikt om bij verzadigde mengsels de optredende oppervlaktekrachten zoveel mogelijk te reduceren. Aangezien grote partikels niet onderhevig zijn aan deze oppervlaktekrachten, is ook het gebruik van een droge pakkingsmethode gerechtvaardigd.

De droge pakking van een mengsel van aggregaten kan op verschillende manieren worden bepaald. Elke wijze leidt tot een maximale pakkingsdichtheid die afhankelijk is van de hoeveelheid energie die aan de granulaten wordt overgedragen tijdens het pakkingsproces. Om het *compressible packing model* te kalibreren voert Larrard [1999] een serie proeven uit met behulp van binaire mengsels.

Hiervoor worden twee soorten aggregaten geselecteerd en gezeefd:

- ronde granulaten uit de Loire met een bijna sferische vorm;
- gemalen hoekige granulaten uit de Pont de Colonne mijn nabij Arney Le Duc.

Deze materialen worden gekozen omdat ze het hele aanbod aan materialen uit de civiele ingenieurspraktijken behandelen. Voor elke soort worden vijf klassen met een verschillende korreldiameter gezeefd. De gemiddelde diameters van de verschillende klassen worden zodanig gekozen dat ze tot de verhoudingen 1/2, 1/4, 1/8 en 1/16 leiden. Een zesde klasse met een kleinere gemiddelde diameter wordt toegevoegd om ook polydisperse mengsels van granulaten te kunnen behandelen. Hierdoor wordt een grotere verdeling van de granulaten verkregen en wordt de maximale pakkingsdichtheid verhoogd.

Nadat de granulaten van twee verschillende klassen worden afgewogen om een mengsel van 7 kg te bekomen, wordt het mengsel gehomogeniseerd. Indien de verhouding van de gemiddelde korreldiameters kleiner is dan vier, wordt het mengsel van granulaten in een Deval-machine, uitgerust met een aangepaste cilindrisch vat, gegoten. Dit vat wordt gedurende 2 minuten geroteerd onder een bepaalde hoek tegenover de symmetrieas van het vat. De cilinder heeft een diameter van 160 mm en een hoogte van 320 mm. Deze cilinder wordt hierna gebruikt voor het bepalen van de pakkingsdichtheid.

De binaire mengsels waarbij segregatie kan optreden, worden manueel gehomogeniseerd. De granulaten worden na het mengen in horizontale lagen gegoten en dan met behulp van een schopje verticaal verwijderd en in opeenvolgende lagen in de cilinder geplaatst.

Daarna wordt de cilinder met het mengsel van granulaten afgesloten met een stalen gewicht van 20 kg waardoor een gemiddelde druk van 10 kPa wordt uitgeoefend op de bovenzijde van het mengsel. Het geheel wordt op een triltafel geplaatst en onderworpen aan een reeks trillingen: 2 min bij een amplitude van 4 mm, 40 s bij 0,2 mm en 1 min bij 0,8 mm. De hoogte van het mengsel wordt continue opgemeten met behulp van een ultrasone afstandsmeter met een precisie van 0,001 mm. De verdichtingsmethode wordt vastgelegd om de resultaten voor verschillende mengsels met elkaar te kunnen vergelijken en zodoende ook de duur van het proces binnen redelijke grenzen te houden. Bijgevolg wordt niet de uiteindelijke stabiele waarde van de hoogte van het mengsel opgemeten. Dit bevestigt dat de actuele pakkingsdichtheid geen materiaaleigenschap is, maar eerder afhankelijk is van het mengsel zelf en de pakkingsmethode. De pakkingsdichtheid van het mengsel wordt berekend door de massa van het monster te delen door de gemiddelde dichtheid van het aggregaat en door het totale volume van het mengsel.

3.2 Natte pakkingsdichtheid

3.2.1 Algemeen

Bij materialen waarvan de deeltjes kleiner zijn dan 125 μm moet een andere werkwijze gebruikt worden omdat de oppervlaktekrachten (zie paragraaf 3.3) tussen de deeltjes belangrijker worden [Fennis, 2010]. Deze krachten kunnen ervoor zorgen dat de deeltjes gaan agglomereren met als gevolg dat de pakkingsdichtheid van het mengsel zal dalen. Aangezien de oppervlaktekrachten tussen de deeltjes afhankelijk zijn van de omstandigheden (droog, nat, gebruik van superplastificeerder, ...) zal dit ook een invloed hebben op de pakkingsdichtheid. Daarom is het belangrijk dat de maximale pakkingsdichtheid van de deeltjes wordt bepaald onder dezelfde omstandigheden als wanneer deze materialen in beton worden toegepast. De methoden die voor handen zijn om de natte pakkingsdichtheid te bepalen zijn echter niet algemeen aanvaard. Bijgevolg wordt in verschillende landen gebruik gemaakt van eigen testmethodes om de pakkingsdichtheid en/of watervraag van materialen met fijne deeltjes te bepalen. De meest gebruikte technieken zijn [Fennis & Walraven, 2011]:

- Watervraag – Frankrijk;
- Watervraag – Duitsland;
- Watervraag door het bepalen van de mengenergie – Marquardt-test;
- Proctortest;
- Centrifugale consolidatie;
- Watervraag – Japan;
- Reologie metingen – Krieger en Dougherty;
- (Gas)druk filtratie;
- Vicat test.

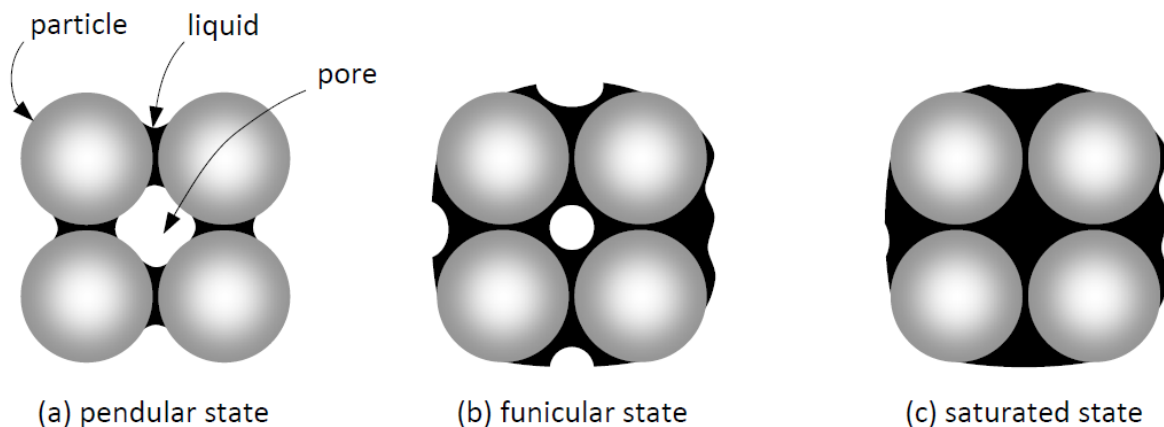
In de meeste methodes wordt de minimale hoeveelheid water die nodig is om de holtes op te vullen bepaald. Op deze wijze wordt de maximale pakkingsdichtheid verkregen wanneer alle holle ruimtes net gevuld worden met water. Dit betekent dat er geen overmaat aan water aanwezig is als film rond de deeltjes [Fennis, 2010]. Hierbij wordt echter wel verondersteld dat er geen lucht aanwezig is in de holtes tussen de korrels [Dils, 2013].

Geen van de bovenstaande methoden blijkt echter duidelijk aan te geven of de maximale pakkingsdichtheid daadwerkelijk is bereikt [Fennis, 2010].

In deze literatuurstudie wordt dieper ingegaan op de Marquardt-test en de centrifugale consolidatie. Deze twee procedures worden in Fennis [2011] aangeraden voor het bepalen van de pakkingsdichtheid van poeders. Voor een beschrijving van de overige proeven wordt verwezen naar [Fennis, 2010] en [Breye & De Vos, 2013].

3.2.2 Marquardt-test

De maximale pakkingsdichtheid van een nat mengsel van poeders kan bepaald worden aan de hand van de mengenergie die aan het mengsel wordt toegevoegd. Bij deze methode wordt water op een constante en rustige wijze aan de poeders toegevoegd. Wanneer dit water in contact komt met het oppervlak van de droge deeltjes, kunnen capillaire bruggen (pendulaire bindingen) ontstaan tussen de contactpunten van de partikels. Op deze manier worden agglomeraten gevormd. Door meer water toe te voegen aan het mengsel worden de bindingen tussen de deeltjes verstevigd. De agglomeraten bereiken hun maximale sterkte wanneer de korrels volledig omhuld worden door een waterfilm en de poriën ertussen nog niet helemaal gevuld zijn met water, dit wordt de funiculaire toestand genoemd. Indien nog meer water wordt toegevoegd aan het mengsel, zodat de poriën volledig gevuld worden met water, zal de sterkte van de bindingen afnemen [German, zoals geciteerd in Fennis, Walraven & Uijl, 2009]. Omdat de korrels door het te veel aan water uiteen worden geduwd, zodat de capillaire krachten en de schuifspanningen verminderen, zal het energieverbruik afnemen [Breye & De Vos, 2013]. Op Figuur 3.1 wordt de vorming van agglomeraten in verschillende stadia weergegeven.



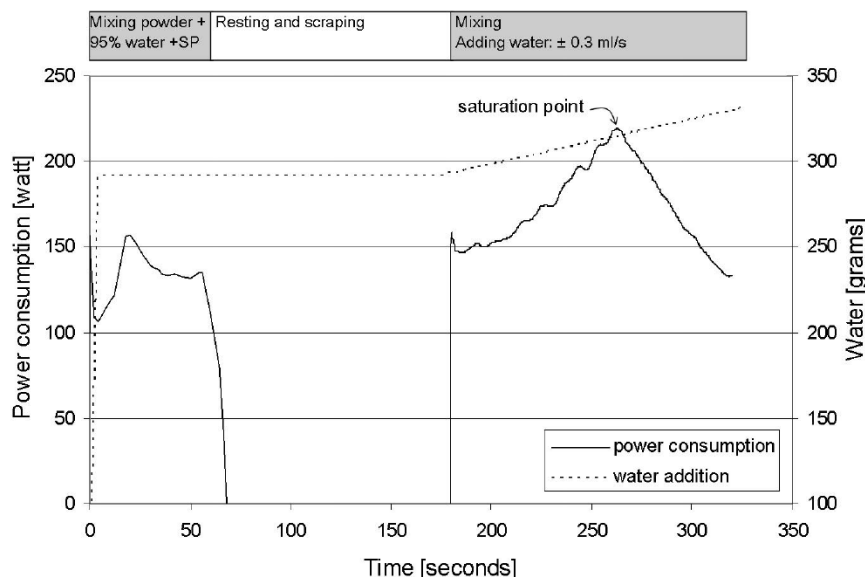
Figuur 3.1: Verschillende stadia in de vorming van agglomeraten [Fennis, 2010]

De basisgedachte van de methode van de mengenergie veronderstelt dat de verschillen in de sterkte van de pendulaire bindingen kunnen worden opgemeten door het bepalen van het vermogen dat tijdens het mixen van een mengsel van poeders wordt verbruikt. De methode werd vastgelegd door Marquardt en verloopt als volgt. Een poedervolume van ongeveer 200 cm^3 wordt gemengd in een mortelmixer met een watertoevoer van $1,5 \text{ ml/s}$ en een mengsnelheid gelijk aan 140 rpm . De watertoevoer wordt constant gehouden gedurende het volledige mengproces. Tijdens het mixen worden het voltage, de verbruikte hoeveelheid energie en de faseverschuiving tussen deze beide opgemeten om het vermogen te bepalen. Daarnaast wordt ook de hoeveelheid water die wordt toegevoegd geregistreerd [Marquardt, zoals geciteerd in Fennis, 2010].

Fennis [2011] heeft een aantal veranderingen doorgevoerd in vergelijking met de hierboven geschetste methode. De procedure wordt gestart door een bepaalde hoeveelheid poeder gedurende een minuut te mengen met reeds 95 % van de nodige hoeveelheid water en superplastificeerder aanwezig in het mengsel. Vervolgens wordt de menger, een Hobart-menger met een inhoud van 3 liter, gedurende twee minuten stilgelegd. Tijdens deze periode is het mogelijk de pasta die zich aan de wand van de menger heeft gehecht, af te schrapen. Nadien wordt het mengproces hervat en wordt de resterende hoeveelheid water toegevoegd met een constante snelheid van 3 ml/s om ervoor te zorgen dat de vermogenspiek binnen de twee minuten zal optreden.

Door het toevoegen van 95 % van de hoeveelheid water en superplastificeerder aan de start van de mengprocedure en door het opleggen van een tijdslijm waarbinnen de vermogenspiek moet worden bereikt, worden de effecten van het hydratatieproces van het cement gereduceerd.

Op Figuur 3.2 worden het vermogen dat nodig is voor het aanmaken van het mengsel en de hoeveelheid water die wordt toegevoegd aan het mengsel weergegeven in functie van de tijd. Het saturatiepunt wordt bepaald als de verhouding van de hoeveelheid water tot de hoeveelheid poeder op het tijdstip dat het vermogen maximaal wordt [Fennis, Walraven & Uijl, 2009]. Dit betekent dat op dat ogenblik de maximale pakkingsdichtheid bereikt is in de veronderstelling dat er geen lucht meer aanwezig is in de holtes tussen de korrels. Dit kan enkel bewerkstelligd worden door te mengen onder vacuüm [Dils, 2013].

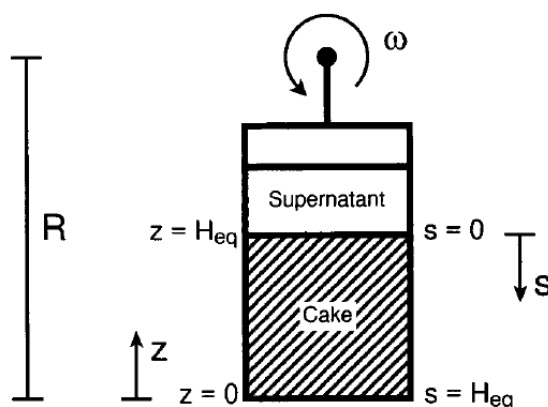


Figuur 3.2: Correlatie vermogen - watertoevoer gedurende mengproces
[Fennis, Walraven & Uijl, 2009]

3.2.3 Centrifugale consolidatie

Om de maximale pakkingsdichtheid van een pasta te bepalen kan gebruik gemaakt worden van een techniek die centrifugale consolidatie wordt genoemd. Door een monster van het mengsel te centrifugeren worden de deeltjes op een mechanische wijze dicht tegen elkaar gedrukt en zal het overtollige water zich afscheiden bovenop de samengedrukte deeltjes [Miller, Melant & Zukoski, 1996]. Door de massa's van de hoeveelheid poeder en water te bepalen, kan vervolgens de pakkingsdichtheid bepaald worden.

Het bepalen van de pakkingsdichtheid door middel van de techniek van centrifugale consolidatie kan op verschillende manieren worden toegepast. Kjeldsen, Bergström & Geiker [2004] gaan als volgt te werk. Van een suspensie met een gekende samenstelling wordt twee keer ongeveer 30 g in proefbuizen¹ (met een diameter van 25 mm en een lengte van 80 mm) aangebracht. De proefmonsters worden vervolgens gedurende 3 uren aan 400 rpm gecentrifugeerd. De centrifuge wordt stilgezet wanneer het consolidatieproces een evenwichtstoestand bereikt. Deze evenwichtstoestand wordt bepaald door het opmeten van de hoogte van de geconsolideerde massa in de proefbuis. Dit principe wordt weergegeven op Figuur 3.3. Eenmaal de evenwichtstoestand is bereikt worden de proefmonsters uit de centrifuge verwijderd en wordt de ronde onderkant van de proefbuizen afgezaagd. Op die manier kan de geconsolideerde massa met behulp van een piston uit de proefbuizen worden geduwd. Nadien wordt de geconsolideerde massa in schijfjes met een dikte van 2 à 3 mm gesneden en worden deze schijfjes gedroogd bij een temperatuur van 105 °C. Uit het massaverlies van de schijfjes kan de hoeveelheid water die aanwezig is in de geconsolideerde massa bepaald worden. Hieruit kan vervolgens de pakkingsdichtheid bepaald worden.



Figuur 3.3: Schema van de evenwichtstoestand van consolidatie bij centrifugeren [Miller, Melant & Zukoski, 1996]

¹ De proefbuizen hebben een ronde onderkant die wordt opgevuld met een epoxy om een vlakke bodem te verkrijgen. Hierdoor zal de radiale spanning die werkt op de suspensie, en bijgevolg op de geconsolideerde massa, gelijkmatig verdeeld zijn [Kjeldsen, Bergström & Geiker, 2004].

Een andere methode wordt toegepast door Fennis [2011]. Een pasta met een gekende samenstelling wordt vervaardigd in een Hobart-menger met een inhoud van 3 liter. De droge poeders worden eerst gedurende 10 seconden onder elkaar gemengd waarna de nodige hoeveelheid water en superplastificeerder wordt toegevoegd. Vervolgens wordt gedurende een minuut verder gemengd op een lage snelheid. Daarna wordt de menger gedurende een minuut stilgelegd. Tijdens deze pauze wordt de pasta die zich aan de wand heeft gehecht, afgeschraapt. Nadien wordt het mengen hervat. Opnieuw wordt gemengd bij een lage snelheid. Eenmaal de pasta klaar is, wordt deze in proefbuizen met een diameter van 22 mm en een lengte van 90 mm gegoten. Door het gewicht van de hoeveelheid pasta in de proefbuizen te wegen, kan aan de hand van de samenstelling van het mengsel de initiële hoeveelheid poeder en water bepaald worden. Vervolgens worden de proefbuizen gedurende 10 min gecentrifugeerd² aan een snelheid van 4000 rpm. Ten gevolge van de centrifugale krachten zullen de deeltjes in de pasta samengedrukt worden en zal de hoeveelheid water die nodig is om de poriën op te vullen verminderen. Bijgevolg is er een overmaat aan water aanwezig tussen de partikels. Dit overtollige water zal zich na het centrifugeren als een waterlaagje bovenop de samengedrukte pasta bevinden. In een volgende stap wordt dit waterlaagje met behulp van een pipet verwijderd. Door de overtollige hoeveelheid water te wegen, kan de hoeveelheid water en poeder die nog aanwezig is in de pasta bepaald worden. Met deze gegevens kan vervolgens de pakkingsdichtheid van het poeder bepaald worden.

De techniek van de centrifugale consolidatie levert goede resultaten op indien deze wordt toegepast bij pasta's met een lage W/P-verhouding. Hierbij kan segregatie van de partikels worden vermeden door de *interlock* tussen de deeltjes. Wanneer meerdere middelgrote deeltjes rond een groot partikel zitten kunnen deze voorkomen dat het grote deeltje zal bezinken. Kleinere deeltjes zullen op hun beurt de middelgrote deeltjes stabiliseren [Wallevik, zoals geciteerd in Breye & De Vos, 2013]. Indien de techniek van de centrifugale consolidatie toch wordt toegepast om de pakkingsdichtheid van een pasta met een hoge W/P-ratio te bepalen zal deze pakkingsdichtheid onderschat worden. Dit is het gevolg van het feit dat niet al het overtollige water uit het proefmonster kan gedruwd worden [Breye & De Vos, 2013].

De pakkingsdichtheid van een pasta kan, via de techniek van de centrifugale consolidatie, slechts bepaald worden door verschillende mengsels met elk een andere W/P-factor te beproeven. Hierdoor is deze werkwijze zeer accuraat maar ook tijdrovend. Daarnaast zijn de resultaten van de proeven afhankelijk van het verkregen compactatieniveau [Fennis, 2010].

² Fennis [2011] maakt gebruik van een Dumeet Jouan Centrifuge. Deze centrifuge heeft een interne diameter van ± 300 mm.

3.3 Effect van oppervlaktekrachten

Bij combinaties van materialen die grote partikels bevatten, zoals grove granulaten in een betonmengsel, wordt de pakking vooral gedomineerd door externe krachten, zoals de zwaartekracht en mechanische impact, die aangrijpen op het mengsel. Onder de gegeven omstandigheden wordt deze invloed bepaald door twee factoren, namelijk de korrelgrootte en de vorm van de deeltjes [German, zoals geciteerd in Yu et al., 2003]. Voor de combinaties van materialen die grote deeltjes bevatten, kunnen oppervlaktekrachten tussen de deeltjes verwaarloosd worden [Kjeldsen, 2007].

Bij kleinere deeltjes daarentegen is de verhouding van de korreloppervlakte tegenover het volume veel hoger waardoor de oppervlaktekrachten tussen de deeltjes van groter belang zijn. Volgens Kjeldsen [2007] kan verondersteld worden dat de verhouding van de externe krachten tot de deeltjesgrootte kwadratisch verloopt terwijl de verhouding van de oppervlaktekrachten tussen de deeltjes tot de deeltjesgrootte een lineair verloop kent. Daarom beginnen oppervlaktekrachten pas een rol te spelen van zodra de korrels kleiner zijn dan 1 mm [Reschke, zoals geciteerd in Fennis, 2010].

De belangrijkste oppervlaktekrachten in cement en beton zijn [Fennis, 2010]:

- de van der Waalskrachten;
- de elektrostatische afstootkrachten ten gevolge van een dubbellaag;
- de sterische krachten.

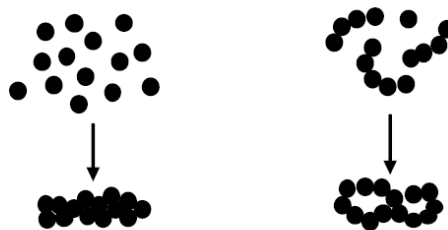
De van der Waalskracht is steeds een aantrekkingskracht tussen deeltjes. Deze is afkomstig uit de interactie tussen atomaire en moleculaire elektrische dipolen waarvan de onderlinge afstand zodanig klein is dat ze elkaar, ten gevolge van een gunstige oriëntatie, aantrekken. Bij deeltjes in oplossing kan een elektrische dubbellaag gevormd worden [Kjeldsen, Bergström & Geiker, 2004].

Elektrostatisch geladen deeltjes vormen, samen met de omringende tegengesteld geladen ionen, een elektrische dubbellaag waarin de lading in evenwicht wordt gehouden. Hierdoor ontstaat een afstootkracht rond de korrel [Fennis, 2010].

Door de adsorptie van oppervlakte-actieve stoffen en polymeren op het oppervlak van de korrel kan een interactie geïnduceerd worden. Deze interactie kan zowel een aantrekkings- als een afstootkracht zijn. Het in elkaar doordringen van de polymeerlagen die aanwezig zijn op naburige deeltjes geeft aanleiding tot een afstoting, dit wordt sterische hindering genoemd [Kjeldsen, Bergström & Geiker, 2004]. Afhankelijk van de grootte van de geadsorbeerde laag zullen de deeltjes deels of volledig gestabiliseerd worden.

Ten gevolge van deze verschillende oppervlaktekrachten bestaat de kans dat een netto-aantrekkingskracht tussen de deeltjes actief. Hierdoor kunnen de deeltjes agglomereren of afgestoten worden zodat het water niet bindt en beschikbaar is voor de verwerkbaarheid van het mengsel [Fennis, 2010].

De oppervlaktekrachten tussen de deeltjes hebben een belangrijke invloed op de pakking van fijne deeltjes. Wanneer deeltjes in suspensie vlokken vormen, en ze bijgevolg samenklitten van zodra ze met elkaar in contact komen, kunnen ze zich niet meer herschikken tijdens het consolideren. Colloïdaal stabiele suspensies, die worden gekarakteriseerd door een afstotende totale oppervlaktekracht met een voldoende groot bereik om de deeltjes te dispergeren, zorgen gewoonlijk voor het ontstaan van een homogeen mengsel. Hierdoor is de pakkingsdichtheid van een mengsel met volkvorming meestal niet zo goed als bij een mengsel waarin de deeltjes gedispergeerd blijven [Kjeldsen, Bergström & Geiker, 2004]. Beide situaties worden weergegeven op Figuur 3.4.



Figuur 3.4: Consolidatiegedrag van suspensies met gedispergeerde deeltjes (links) en volkvorming (rechts) [Kjeldsen, Bergström & Geiker, 2004]

3.4 Gevolgen voor de korrelstructuur

Ten gevolge van de krachten die op de korrels werken, zullen de partikels elkaar aantrekken en samenklitten of elkaar afstoten. Op deze manier wordt een willekeurige korrelstructuur gevormd waarin verschillende effecten kunnen voorkomen die pakkingsdichtheid van het geheel beïnvloeden [Fennis, 2010].

3.4.1 Geometrische interactie

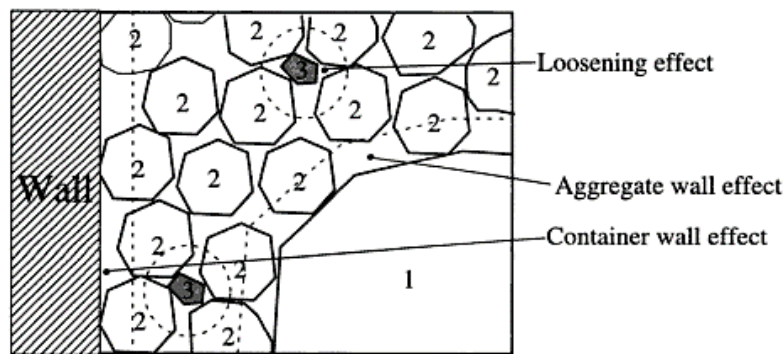
De geometrische interactie die optreedt in een mengsel is afhankelijk van de verhouding van de korrelgroottes en de korrelvorm van de verschillende aanwezige korrelklassen. Er kunnen zich twee verschijnselen voordoen, namelijk het *loosening effect* en het *wall effect* [Fennis, Walraven & Uijl, 2013].

Zoals reeds aangehaald in paragraaf 2.2.1 treedt het *loosening effect* op wanneer er zich te veel kleine deeltjes of te grote kleine deeltjes tussen de grove partikels bevinden. Hierdoor worden de grote deeltjes uit elkaar geduwd met een vermindering van de pakkingsdichtheid als gevolg.

De nabijheid van de wand van een container heeft een invloed op de manier waarop de pakking van deeltjes tot stand komt. Dit wordt het *wall effect* genoemd [Suzuki et al., 2008]. Afhankelijk van de deeltjes en de vorm van de container wordt de pakking

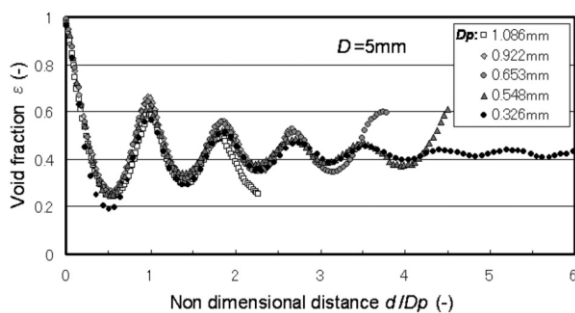
beïnvloed over een afstand van 1 tot 10 keer de korreldiameter. Pas vanaf dit punt zal de pakking van de deeltjes werkelijk willekeurig verlopen.

Ook rond de grote deeltjes die aanwezig zijn in een mengsel treedt dit *wall effect* op aangezien deze kunnen beschouwd worden als een soort wand voor de kleinere deeltjes. Het *wall effect* wordt belangrijker wanneer het gaat om een mengsel met een grote pakkingdichtheid en dat bestaat uit gladde, platte sferische deeltjes [Fennis, 2010]. Op Figuur 3.5 worden beide plaatsen waar het *wall effect* kan optreden afgebeeld. Daarnaast wordt ook afgebeeld hoe het *loosening effect* de pakkingdichtheid beïnvloedt.

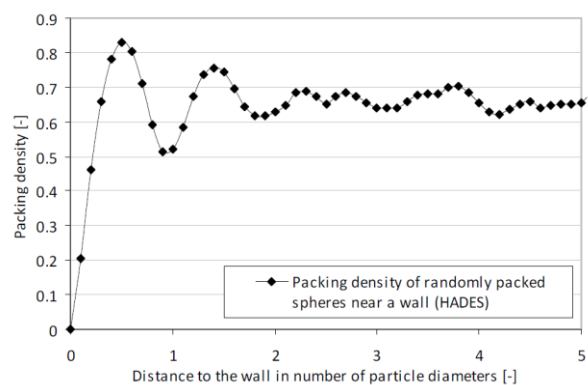


Figuur 3.5: Wall en loosening effect bij een ternair mengsel met een dominante intermediaire korrelverdelingsklasse [Larrard, 1999]

Op de Figuur 3.6 wordt weergegeven hoe het gehalte aan holle ruimtes in de buurt van de wand van een container wordt beïnvloed door de nabijheid van deze wand. De inverse van de afgebeelde grafiek levert de pakkingdichtheid in functie van de afstand tot de wand en wordt weergegeven in Figuur 3.7.



Figuur 3.6: Invloed van het wall effect op het gehalte aan holle ruimtes [Suzuki et al., 2008]

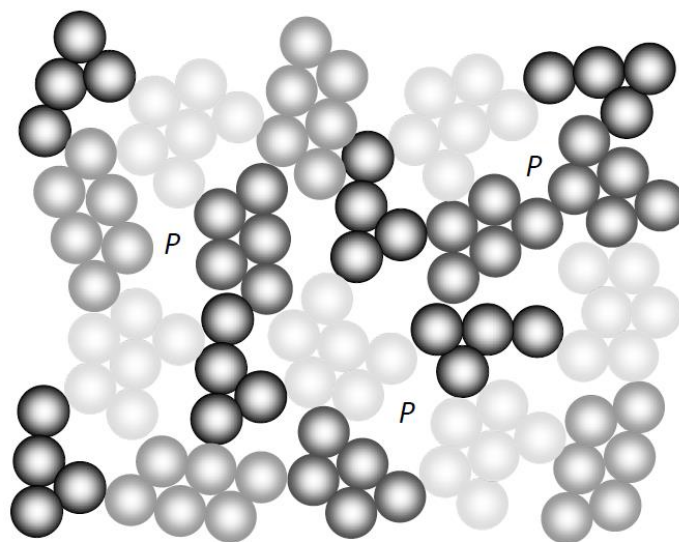


Figuur 3.7: Invloed van het wall effect op de pakkingdichtheid [Fennis, 2010]

3.4.2 Agglomeratie

Aantrekkingskrachten, zoals de van der Waalskracht, beperken de relatieve beweging van de partikels tegenover elkaar en resulteren meestal in de vorming van agglomeraten die de pakkingsdichtheid danig beïnvloeden [Yu et al., 2003]. Bij fijne deeltjes (waarvoor natte pakkingsmethoden worden gebruikt) kunnen de optredende cohesiekrachten zo groot zijn dat de gevormde clusters niet meer kunnen verbroken worden door krachten zoals de zwaartekracht of de mengenergie. De grootte van de agglomeraten is afhankelijk van de korrelverdeling van de partikels, de vorm en de oppervlakteruwheid en het bevochtigingsvermogen van de deeltjes en de viscositeit en verdeling van de vloeistof waarin de deeltjes aanwezig zijn.

Ten gevolge van agglomeratie wordt het mengen en het compacteren van een mengsel bemoeilijkt en zal de pakkingsdichtheid van het geheel verlagen. Dit komt doordat de agglomeraten van elkaar gescheiden worden door grote poreuze zones, zoals wordt weergegeven op Figuur 3.8. [Fennis, 2010]



Figuur 3.8: Agglomereren van deeltjes verlaagt de pakkingsdichtheid omwille van de grote holle ruimtes (P) tussen de agglomeraten [Fennis, 2010]

Agglomeraten kunnen verbroken worden door het mengsel met een voldoende hoeveelheid energie te mixen of te verdichten of door gebruik te maken van een superplastificeerder³. [Fennis, 2010]

³ Zie paragraaf 5.4 voor meer informatie over de werking van superplastificeerders.

3.4.3 Segregatie

Bij het behandelen van poeders en granulaten, zoals bij het aanmaken van beton, kan segregatie optreden ten gevolge van het dynamisch gedrag van het productieproces. Dit kan leiden tot een niet-homogene korrelstructuur [Abreu, Tavares & Castier, 2003]. Dit is niet wenselijk vanwege de nadelige gevolgen voor de mechanische eigenschappen van het beton.

Een onregelmatige korrelvorm zorgt ervoor dat segregatie minder kans heeft om op te treden. Segregatie wordt daarnaast ook verminderd indien meer fijne partikels aanwezig zijn [Fennis, 2010]. Hierdoor verhoogt de viscositeit van het mengsel en zullen de grotere korrels meer weerstand ondervinden, waardoor de kans op segregatie kleiner is.

Ten gevolge van segregatie kan de pakkingsdichtheid van een mengsel van punt tot punt verschillen en zal de pakkingsdichtheid van het geheel verlagen [Fennis, 2010].

4 Pakkingsmodellen

Pakkingsmodellen worden vaak gebruikt om de maximale pakkingsdichtheid voor verschillende combinaties van grove granulaten ($\geq 125 \mu\text{m}$) te voorspellen [Fennis, 2010]. De meeste pakkingsmodellen, zoals deze van Larrard (1999), Schwanda (1996) en Dewar (1999), geven voor deze deeltjes goede resultaten [Breye & De Vos, 2013]. Sommige pakkingsmodellen kunnen ook de pakking van cement en fillers, materialen met deeltjes $< 125 \mu\text{m}$, in rekening brengen. Er is echter nog veel onderzoek nodig om deze modellen op punt te stellen [Fennis, 2010].

In dit hoofdstuk worden enkele belangrijke theoretische modellen voor het bepalen van de pakkingsdichtheid beschreven.

4.1 Furnas-model

Het Furnas-model is enkel geldig voor twee groepen van even grote deeltjes, zonder dat er interactie optreedt tussen de deeltjes onderling ($d_1 \gg d_2$). Aangezien de meeste hedendaagse modellen gebaseerd zijn op deze methode, wordt in onderstaande sectie een overzicht gegeven van de hoofdgedachte.

Het volume van elke klasse, bestaande uit even grote deeltjes, kan uitgedrukt worden aan de hand van zijn partieel volume ϕ_i . Dit is met andere woorden het volume dat klasse i inneemt in een eenheidsvolume. Het relatieve volume kan uitgedrukt worden aan de hand van de volumefractie r_i , met behulp van formule (4.1) en (4.2).

$$r_i = \frac{\phi_i}{\sum_{i=1}^n \phi_i} \quad (4.1)$$

$$\sum_{i=1}^n r_i = 1 \quad (4.2)$$

Uitgaande van de volumefractie van de fijne en grove granulaten, kan men twee gevallen onderscheiden. In het eerste geval is de volumefractie van de grove deeltjes groter dan de volumefractie van de kleine deeltjes ($r_1 \gg r_2$). Wanneer fijne granulaten toegevoegd worden aan een volume grove deeltjes, dan vullen zij de holtes op die aanwezig zijn tussen de grove partikels. Op die manier vergroot niet alleen het totaal ingenomen volume, maar ook de pakkingsdichtheid. In het tweede geval is de volumefractie van de kleine deeltjes veel groter dan de volumefractie van de grovere deeltjes ($r_1 \ll r_2$). Wanneer grove deeltjes worden toegevoegd aan een matrix van fijn materiaal, dan vullen de grote partikels het volume dat ze innemen voor 100 %. Hun bijdrage aan de pakkingsdichtheid is vervolgens gelijk aan hun partieel volume ϕ_i . De kleine deeltjes vullen de rest van het eenheidsvolume ($1 - \phi_i$) met hun maximale pakkingsdichtheid [Fennis, 2010].

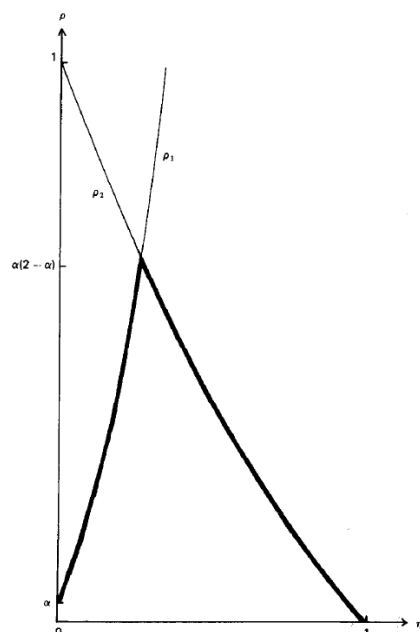
Deze twee gevallen zijn enkel en alleen maar mogelijk wanneer $d_1 \gg d_2$, met hierin d_1 en d_2 de diameters van de beschouwde deeltjes. Wanneer aan deze voorwaarde niet is voldaan, zal de pakkingsdichtheid van het binaire mengsel ook afhankelijk zijn van de verhouding d_1/d_2 . Zo blijkt dat wanneer $d_1 \approx d_2$ er ook effecten ten gevolge van interactie optreden, zoals het *wall effect* en het *loosening effect* [Mangulkar & Jamkar, 2013].

4.2 Linear packing density model (LPDM)

Het *linear packing density model* verbetert het Furnas-model in twee opzichten. Het twee-componentenmodel van Furnas wordt uitgebreid zodanig dat het mogelijk is het model te gebruiken voor een mengsel bestaande uit meerdere componenten met geometrische interactie tussen de verschillende onderdelen. Deze geometrische interactie wordt ingevoerd in de modelering als invloed van een enkele korrelverdelingsklasse op de dominante korrelverdelingsklasse [Fennis, 2010].

Het *linear packing density model* is in staat de pakkingsdichtheid te voorspellen voor verschillende korrelverdelingsklassen, waardoor dit model ook kan gebruikt worden voor werkelijke betonmengsels [Fennis, 2010].

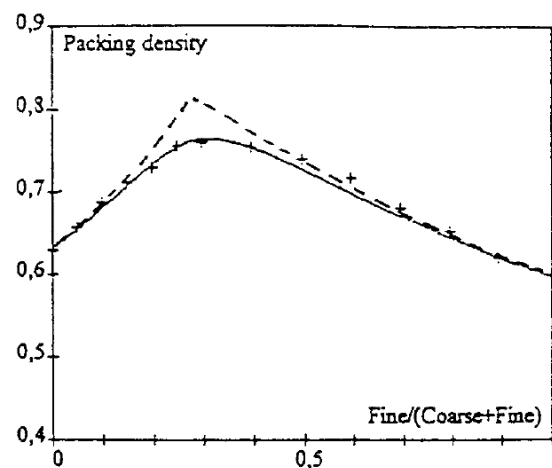
De basishypothese van het *linear packing density model* gaat uit van een lineair verlopende pakkingsdichtheid in functie van het volume aan vaste stoffen van de verschillende gebruikte materialen [De Ruyck & Eeckhout, 2006]. Een voorbeeld van een interactiekromme die via dit model bekomen wordt, wordt weergegeven in Figuur 4.1.



Figuur 4.1: Pakkingsdichtheid van een binair mengsel in functie van het gehalte aan fijne deeltjes volgens het *linear packing density model* [Stovall, Larrard & Buil, 2006]

Toch zijn er enkele nadelen verbonden aan dit theoretisch model. Zo wordt geen rekening gehouden met de wijze waarop het mengsel wordt samengesteld [De Ruyck & Eeckhout, 2006]. In paragraaf 2.2.3 wordt echter aangetoond dat de energie die wordt toegevoegd tijdens het aanmaken van een mengsel wel degelijk invloed heeft op de verkregen pakkingsdichtheid.

Daarnaast wordt de waarde van de optimale pakkingsdichtheid overschat [De Ruyck & Eeckhout, 2006]. Deze overschatting is te wijten aan de basishypothese van dit model, namelijk de lineariteit van de curves. De interactiekrommen, die de pakkingsdichtheid in functie van de samenstelling van de beschouwde combinatie van materialen weergeeft, vertoont een hoekpunt in de nabijheid van de optimale pakking [Larrard & Sedran, 1994]. Deze waarde van de pakkingsdichtheid kan in de praktijk echter nooit bereikt worden. [Kjeldsen, Stang & Geiker, 2006] Bijgevolg is er nood aan een nieuw en beter model [Larrard & Sedran, 1994].



Figuur 4.2: Pakkingsdichtheid in functie van het gehalte aan fijne deeltjes volgens het linear packing density model en het solid suspension model [Larrard & Sedran, 1994]

In Figuur 4.2 wordt de overschatting van de pakkingdichtheid ten gevolge van een fout in de basisgedachte van het *linear packing density model* aangetoond. De stippellijn stelt de interactiekromme voor die wordt verkregen via het *linear packing density model*. De volle lijn is een betere benadering van het werkelijke gedrag, aangeduid met de kruisjes, van de materialen. Deze interactiecurve wordt opgesteld aan de hand van het recentere *solid suspension model* (SSM) [Larrard & Sedran, 1994].

4.3 Compressible packing model (CPM)

4.3.1 Theoretisch model

Het *compressible packing model* is een uitbreiding van het *linear packing density model* dat rekening houdt met de verdichtingsenergie die aan het mengsel wordt overgedragen tijdens het pakkingsproces. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van de virtuele pakking β van de verschillende deeltjes. β wordt gedefinieerd als de maximale pakkingsdichtheid van een mengsel indien de korrels een voor een in een volume zouden geplaatst worden zodanig dat ze een minimum aan ruimte in beslag nemen [Fennis, 2010].

De modelvergelijking voor de virtuele pakkingsdichtheid van een mengsel met n korrelverdelingsklassen waarvan de i -de dominant is, wordt gegeven door [Larrard, 1999]:

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{ij} \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=i+1}^n \left(1 - a_{ij} \frac{\beta_i}{\beta_j} \right) y_j} \quad (4.3)$$

Voor een mengsel dat bestaat uit deeltjes van dezelfde korrelverdelingsklasse kan de β -waarde bepaald worden aan de hand van de volgende vergelijking, die het verband aanduidt tussen de pakkingsmethode, de virtuele en werkelijke pakkingsdichtheid:

$$K = \frac{1}{\frac{\beta_j}{\alpha_j} - 1} \quad (4.4)$$

In vergelijking (4.4) stelt α_j de actuele pakkingsdichtheid van de beschouwde korrelverdelingsklasse voor. Dit is de pakkingsdichtheid die experimenteel bepaald wordt [Fennis, 2010].

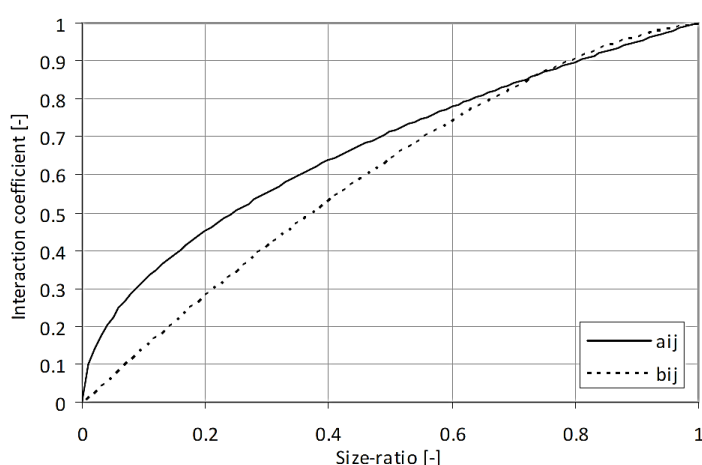
De factoren a_{ij} en b_{ij} in vergelijking (4.3) stellen de interactie tussen de verschillende korrelverdelingsklassen voor, respectievelijk het *loosening* en *wall effect*. Beide zijn afhankelijk van de verhouding tussen de korreldiameter van klasse i en deze van klasse j [Haleerattanawattana & Limsuwan, 2004]. De twee vergelijkingen (4.5) en (4.6) voor deze coëfficiënten worden in Larrard [1999] opgesteld door het evalueren van het CPM voor binaire mengsels⁴.

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i} \right)^{1,02}} \quad (4.5)$$

⁴ Een binair mengsel is een mengsel dat slechts twee verschillende korrelverdelingsklassen bevat.

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1,50} \quad (4.6)$$

In Figuur 4.3 worden de vergelijkingen (4.5) en (4.6) grafisch weergegeven. Hieruit blijkt dat de factor a_{ij} , die het *loosening effect* beschrijft, groter is dan de waarde van b_{ij} behalve wanneer de verhouding d_j/d_i van de korrelgroottes groter is dan 0,72 [Fennis, 2010]. Dit betekent dat voor mengsels die materialen bevatten waarvan de korrels ongeveer even groot zijn, het *loosening effect* van iets minder belang is. Dit is logisch aangezien het *loosening effect* zich vooral voordoet in het geval er zich te veel fijn materiaal tussen de grotere deeltjes bevindt, zoals wordt aangetoond in paragraaf 2.2.1.



Figuur 4.3: Interactiefuncties a_{ij} en b_{ij} in functie van de verhouding van korrelgroottes [Fennis, 2010]

De K-waarde stelt de verdichtingsfactor voor. Deze parameter is afhankelijk van de compactatie-energie die wordt toegediend aan het mengsel van granulaten. Bijgevolg moet deze waarde voor elke pakkingsmethode afzonderlijk bepaald worden [Fennis, 2010]. In de onderstaande tabel wordt voor enkele van deze methoden een K-waarde weergegeven.

Tabel 4.1: K-waarden voor verschillende pakkingsmethoden [Fennis, 2010]

Pakkingsmethode		K-waarde
droog	gieten	4,1
	steken met een staaf	4,5
	trillen	4,75
	trillen onder druk van 10 kPa	9
nat	gladde dikke pasta	6,7
	Proctortest	12
virtueel	-	∞

Deze tabel kan nog aangevuld worden. Fennis [2010] vindt bij het uitvoeren van een Marquardt-test een goede correlatie tussen de experimentele waarden van de pakkingsdichtheid en de theoretische waarden bepaald aan de hand van het *compressible packing model* wanneer K wordt gelijk gesteld aan 12,2. In dit onderzoek wordt gebruikt gemaakt van een Hobart-menger met een inhoud van 3 liter.

Voor een mengsel met n verschillende korrelverdelingsklassen kan de K -waarde aan de hand van de volgende formule worden bepaald [Larrard, 1999]:

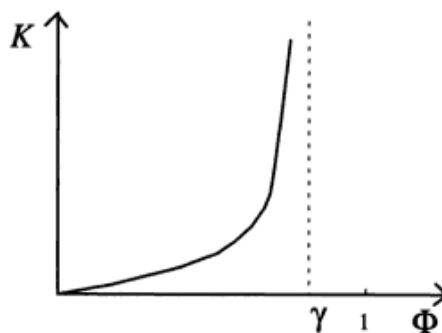
$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{\gamma_i}} \quad (4.7)$$

Hierin kan worden aangenomen dat:

$$\Phi = \alpha_t \quad (4.8)$$

De waarde van de werkelijke pakkingsdichtheid α_t kan bijgevolg indirect bepaald worden aan de hand van vergelijking (4.7) [Fennis, 2010].

Aangezien de waarde van K afhankelijk is van de pakkingsmethode wordt de pakkingsdichtheid impliciet gegeven door de parameter Φ in vergelijking (4.7). Daar de verdichtingsfactor toeneemt in functie van de waarde van Φ , kan een unieke waarde van Φ gevonden worden waarvoor K positief is (zie Figuur 4.4) [Larrard, 1999].



Figuur 4.4: Variatie van K in functie van Φ [Larrard, 1999]

Uit Figuur 4.4 kan tevens worden afgeleid dat de waarde van de verdichtingsfactor K asymptotisch naar oneindig gaat bij het benaderen van de virtuele pakkingsdichtheid γ van het beschouwde mengsel. Dit betekent dat een oneindig grote hoeveelheid energie aan het mengsel moet worden toegevoegd om de virtuele pakkingsdichtheid te kunnen bereiken. Dit is in de praktijk onmogelijk te verwezenlijken.

Met behulp van het *compressible packing model* kan de pakkingsdichtheid van een mengsel voorspeld worden aan de hand van de korrelverdeling en de experimentele pakkingsdichtheden van de verschillende korrelverdelingsklassen afzonderlijk. Door deze laatste factor, namelijk de α -waarde van de verschillende klassen, worden de korrelvorm en oppervlaktestructuur indirect in rekening gebracht. De nauwkeurigheid van dit model is afhankelijk van de interactieparameters a_{ij} en b_{ij} en van de waarde van K . Door het in rekening brengen van de verdichtingsenergie is het model meer accuraat voor het voorspellen van de pakkingsdichtheid dan het *linear packing density model*. De opzet van het model en de gebruikte vergelijkingen maken het model mathematisch consistent en robuust [Fennis, 2010].

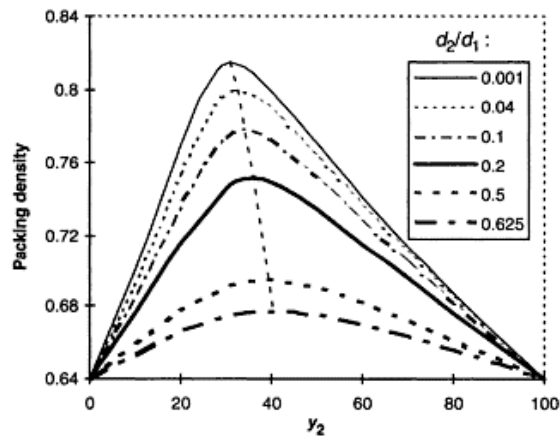
4.3.2 Parameterstudie voor binaire mengsels

4.3.2.1 Invloed van de korrelgrootte

Uit Figuur 4.5 blijkt dat de optimale pakkingsdichtheid stijgt indien de verhouding van de fijne deeltjes tegenover de grove deeltjes (d_2/d_1) afneemt. Dit is te verwachten aangezien de granulaire interactie progressief daalt bij een afname van de korreldiameter van de fijne deeltjes [Larrard, 1999]. Voor het geval $d_1 = d_2$ heffen de interactiecoëfficiënten a_{ij} en b_{ij} elkaar zelfs op [De Ruyck & Eeckhout, 2006]. Dit betekent dat de interactie tussen de verschillende partikels wegvalt met een lage waarde voor de pakkingsdichtheid als gevolg.

Daarnaast kan ook een verschuiving van de top van de interactiekrommen worden waargenomen [Larrard, 1999]. De hoeveelheid fijne deeltjes waarvoor de pakkingsdichtheid optimaal wordt, neigt naar 50 % wanneer de verhouding d_2/d_1 gelijk wordt aan de eenheid. Dit is het gevolg van de uitwisselbaarheid tussen de deeltjes van dezelfde grootteorde.

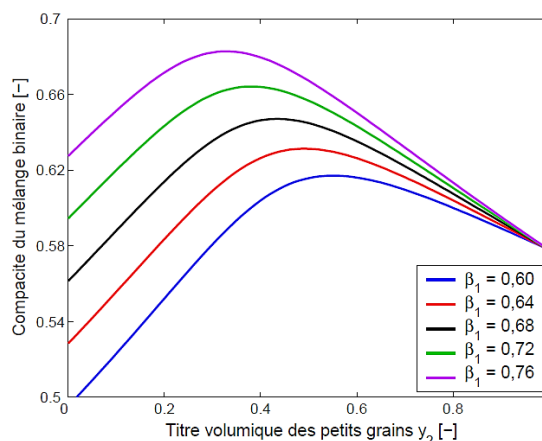
Wanneer de verhouding d_2/d_1 zeer klein is, geeft een kleine verandering in de hoeveelheid van een van de materialen in het mengsel aanleiding tot een grotere variatie in de waarde van de pakkingsdichtheid. In dit geval is de keuze van de verhouding d_2/d_1 zeer belangrijk [De Ruyck & Eeckhout, 2006].



Figuur 4.5: Invloed van de korrelgrootte op de werkelijke pakkingsdichtheid van een binair mengsel. $K = 9$ en $\beta_1 = \beta_2 = 0,71$ [Larrard, 1999]

4.3.2.2 Invloed van de pakkingsdichtheid van de verschillende samenstellende materialen

Zoals reeds wordt voorspeld aan de hand van het *Appolinian model*⁵ stijgt de waarde van de maximale pakkingsdichtheid wanneer de virtuele pakking β_1 of β_2 van de verschillende materialen toeneemt [Larrard, 1999]. Verder blijkt dat wanneer dit gebeurt de hoeveelheid fijne deeltjes, bij het optimum, afneemt. [De Ruyck & Eeckhout, 2006]. Dit is het gevolg van het feit dat wanneer de pakkingsdichtheid van de grove granulaten stijgt, de grootte van de holle ruimtes tussen de korrels kleiner wordt. Bijgevolg is minder fijn materiaal nodig om deze holtes op te vullen. Deze verschuiving van het optimum is duidelijk zichtbaar op Figuur 4.6.



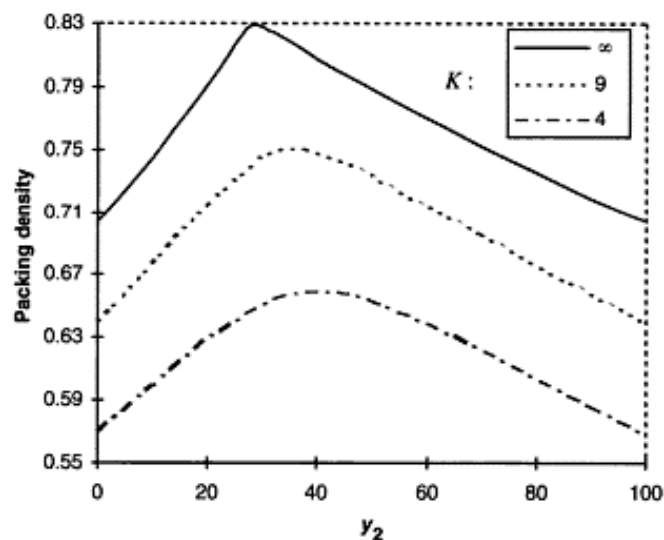
Figuur 4.6: Invloed van de virtuele pakkingsdichtheden van de verschillende samenstellende delen op de pakkingsdichtheid van het binaire mengsel. $K = 4,75$, $\beta_2 = 0,70$ en $d_2/d_1 = 0,30$ [De Ruyck & Eeckhout, 2006]

⁵ Het *Appolinian model* is een vereenvoudigd pakkingsmodel dat geldig is voor mengsels met een wijde korrelverdeling en een hoge compactatie-index. Er wordt uitgegaan van een intuïtieve manier voor het samenstellen van het optimale mengsel zoals dit voor het eerst werd voorgesteld in het oude Griekenland door Appolonios de Perga [Larrard, 1999].

4.3.2.3 Invloed van de pakkingsmethode

In paragraaf 4.3.1 wordt aangehaald dat de wijze waarop een mengsel wordt gepakt de pakkingsdichtheid beïnvloedt. In de vergelijkingen van het *compressible packing model* wordt dit aangeduid door middel van de verdichtingsfactor K . Hoe hoger de waarde van deze factor is, des te hoger zal de waarde van de pakkingsdichtheid zijn en des te scherper zal de top van de interactiekromme zijn [Larrard, 1999].

Uit Figuur 4.7 kan tevens worden afgeleid dat, voor de optimale pakkingsdichtheid, het aandeel van de fijne korrels afneemt wanneer de toegevoegde hoeveelheid verdichtingsenergie toeneemt. Dit is een gevolg van het feit dat de porositeit van een compacter mengsel van grove deeltjes lager is. Hierdoor is er minder plaats tussen de grove korrels die kan worden ingenomen door de fijnere deeltjes [De Ruyck & Eeckhout, 2006].



Figuur 4.7: Invloed van de K -waarde op de pakkingsdichtheid van een binair mengsel. $\beta_1 = \beta_2 = 0,71$ en $d_2/d_1 = 0,20$ [Larrard, 1999]

4.4 Compaction-interaction packing model (CIPM)

De traditionele pakkingsmodellen, zoals beschreven in paragraaf 4.1 tot en met 4.3, houden enkel rekening met de geometrische interactie die optreedt tussen de partikels. Deze modellen houden echter geen rekening met de effecten die optreden wanneer partikels kleiner dan 125 μm in het mengsel zijn vervat. Hierbij denken we bijvoorbeeld aan agglomeratie, of de effecten die voorkomen tijdens het mengen en verdichten van de partikels. Het invoeren van deze bijkomende effecten is echter complex, voornamelijk omdat het al dan niet optreden van agglomeratie sterk afhankelijk is van de meng- en verdichtingswijze, en van het feit of al dan niet een superplastificeerder is gebruikt. Deze complexiteit zorgt ervoor dat een uitbreiding van het CPM noodzakelijk is [Fennis, Walraven & Uijl, 2013].

Een uitbreiding van *compressible packing model* naar *compaction-interaction packing model (CIPM)* wordt mogelijk door de interactiefuncties a_{ij} en b_{ij} , die gebruikt worden om de interactie tussen twee korrelverdelingsklassen te bepalen, te herschalen [Fennis, Walraven & Uijl, 2013]. De noodzaak voor het herschalen volgt uit Figuur 4.3. Hierop is duidelijk te zien dat interactiefunctie b_{ij} groter wordt dan a_{ij} wanneer de verhouding van de korrelgroottes de waarde 0,72 overschrijdt. Dergelijke *crossover* is ongewenst, aangezien dit kan leiden tot onverwachte veranderingen in de interactie [Fennis, 2010]. De oorspronkelijke vergelijkingen (4.5) en (4.6) worden aangepast met behulp van de functies $w_{0,a}$ en $w_{0,b}$. Deze functies zijn constant wanneer er enkel geometrische interactie optreedt, of kunnen optreden in de vorm van een functie wanneer men naast interactie ook het effect van oppervlaktekrachten of de invloed van verschillende PCE's wil bestuderen.

De vernieuwde parameterfuncties a_{ij} en b_{ij} worden uitgedrukt aan de hand van formule (4.9) en (4.11).

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{\log(d_i/d_j)}{w_{0,a}} & \log(d_i/d_j) < w_{0,a} \\ 0 & \log(d_i/d_j) > w_{0,a} \end{cases} \quad (4.9)$$

$$w_{0,a} = \begin{cases} w_a \cdot C_a & d_j < d_c \\ w_a & d_j \geq d_c \end{cases} \quad (4.10)$$

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{\log(d_j/d_i)}{w_{0,b}} & \log(d_j/d_i) < w_{0,b} \\ 0 & \log(d_j/d_i) > w_{0,b} \end{cases} \quad (4.11)$$

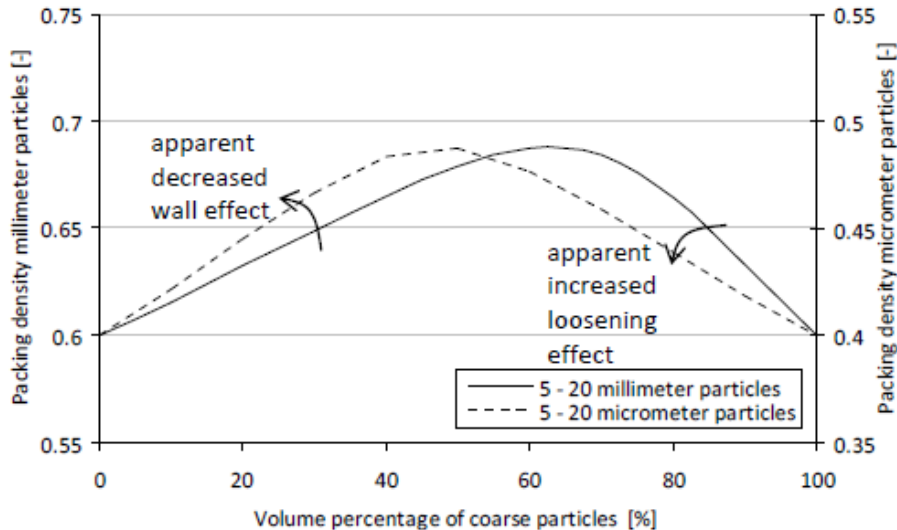
$$w_{0,b} = \begin{cases} w_b \cdot C_b & d_i < d_c \\ w_b & d_i \geq d_c \end{cases} \quad (4.12)$$

Met:

- a_{ij} [-], factor die het *loosening effect* beschrijft, veroorzaakt door de deeltjes van klasse i op de pakkingsdichtheid van de deeltjes in klasse j ;
- b_{ij} [-], factor die het *wall effect* beschrijft, veroorzaakt door de deeltjes van klasse j op de pakkingsdichtheid van de deeltjes in klasse i ;
- d_i [m], diameter van klasse i . In het CIPM is $i = 1$ voor de grootste diameter;
- d_j [m], diameter van klasse j ;
- d_c [m], diameter die het effect van verdichten in rekening brengt bij de overgang naar het uitgebreide CIPM;
- $w_{0,a}$ [-], functie die het maximaal bereik van het *loosening effect* aanduidt;
- $w_{0,b}$ [-], functie die het maximaal bereik van het *wall effect* aanduidt;
- w_a [-], constante die het maximaal bereik van het *loosening effect* weergeeft;
- w_b [-], constante die het maximaal bereik van het *wall effect* weergeeft;
- C_a [-], interactieconstante die rekening houdt met de invloed van het verdichten bij het optreden van het *loosening effect*;
- C_b [-], interactieconstante die rekening houdt met de invloed van het verdichten bij het optreden van het *wall effect*

Agglomererende deeltjes oefenen een invloed uit op de pakkingsdichtheid van het mengsel. Om deze invloed op gepaste manier te kunnen duiden, wordt een vergelijking gemaakt tussen een mengsel bestaande uit grote deeltjes (5 mm/20 mm) en een mengsel bestaande uit kleine deeltjes (5 μ m/20 μ m).

De kleinste partikels in het fijnste mengsel vertonen steeds de meeste neiging om te agglomereren en samen te klitten tot grotere deeltjes. Deze samengeklitte partikels zijn daardoor minder in staat om de holtes tussen de grovere deeltjes van het mengsel op te vullen, waardoor het *loosening effect* vergroot. Dit effect wordt geïllustreerd met behulp van Figuur 4.8. Wanneer de grote partikels van het mengsel kleinere deeltjes aantrekken, worden deze geordend langs het oppervlak van de grotere deeltjes. Indien de kleine deeltjes een lage pakkingsdichtheid vertonen ten gevolge van de aanwezige agglomeraten, zal door de ordening van de partikels het *wall effect* verminderen. Dit fenomeen wordt geïllustreerd aan de hand van Figuur 4.8 [Fennis, 2010].



Figuur 4.8: Vergelijking van het pakkingsprofiel voor een mengsel bestaande uit millimeterpartikels en micrometerpartikels [Fennis, 2010]

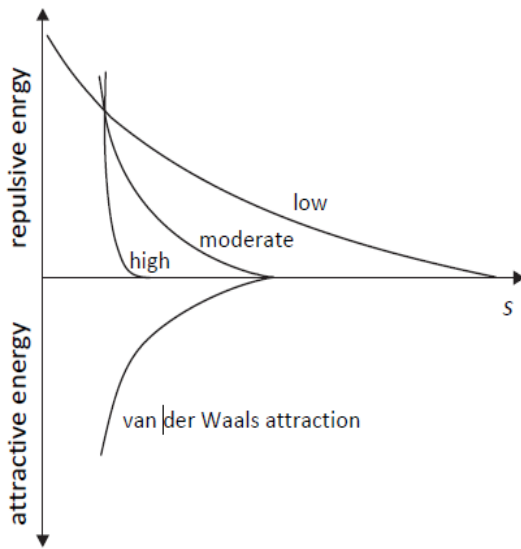
Een andere manier om de interactie-effecten door oppervlaktekrachten van de kleine korrels in rekening te brengen is door gebruik te maken van de DLVO theorie of door het discrete elementen model Hades. Discrete modellen zijn in staat de maximale pakkingsdichtheid van een mengsel te berekenen, maar door de beperkte computersnelheden vergt het aanbrengen van aanpassingen de nodige uren. Daarom zijn op dit moment de analytische modellen nog steeds de beste oplossing.

4.4.1 DVLO-theorie

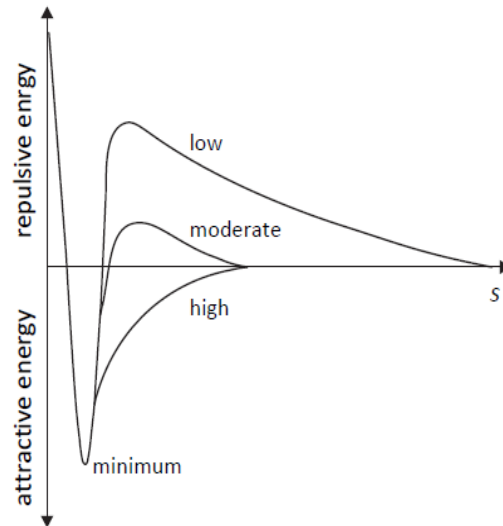
Volgens de DVLO-theorie hangt de stabiliteit voornamelijk af van de van der Waalskrachten en de elektrostatische afstootkrachten, zoals blijkt uit formule (4.13). Als de korrels in een mengsel elkaar benaderen, dan wordt de elektrisch dubbele laag van deze korrels door elkaar beïnvloed. De elektrisch dubbele laag is de laag die aanwezig is rond een korrel in de dispersie fase. Een elektrisch dubbele laag omvat drie belangrijke onderdelen. De eerste laag is de oppervlaktelading, het tweede deel is de sternlaag en het derde deel is de diffusie laag. Het elektrisch potentiaal is het hoogst op het korreloppervlak, en neemt af naarmate de afstand tot het korreloppervlak toeneemt. Het elektrisch potentiaal wordt 0 op de grens van de elektrisch dubbele laag.

De ionen in elke laag worden verplaatst en de vrije energie neemt toe. Daardoor ontstaat afstoting tussen de verschillende korrels. Tegelijkertijd nemen de van der Waalskrachten omgekeerd evenredig toe met de korrelafstand in het kwadraat [Kopeliovich zoals geciteerd in Breye & De Vos, 2013].

Figuur 4.9 toont de aantrek- en afstootkrachten in het geval van hoge, gemiddelde en lage ionenconcentraties in functie van de korrelafstand. Figuur 4.10 geeft de resultante van de aantrek- en afstootkracht weer. Hieruit blijkt dat voor kleine korrelafstanden de aantrekkingskrachten veel groter zijn, terwijl in het geval van grote korrelafstanden de elektrostatische energie domineert [Kordts; Stephen et al; Tattersall & Banfill, zoals geciteerd in Fennis, 2010].



Figuur 4.9: Aantrek- en afstootkrachten in het geval van hoge, gemiddelde en lage ionenconcentraties [Fennis, 2010]



Figuur 4.10: Resultante van de aantrek- en afstootkrachten [Fennis, 2010]

4.4.2 HADES-simulatie

Een andere manier om de invloed van de oppervlaktekrachten te bestuderen, is door gebruik te maken van het eindige-elementenmodel HADES, wat werkt op basis van het Hertz-model. Het model berekent wanneer een cohesiekracht werkt op een korrel en maakt gebruik van formule (4.13).

$$F_{\text{totaal}} = F_{\text{el}} - F_{\text{vdw}} \quad (4.13)$$

De totale cohesiekracht F_{totaal} , die op een korrel werkt, bevat de afstootkracht (F_{el}) en de van der Waalskracht (F_{vdw}). Als een korrel een andere korrel nadert, dan is het mogelijk om de krachten op beide korrels te berekenen. De van der Waalskrachten kan men berekenen met formule (4.14).

$$F_{\text{vdw}} = A(s) \cdot \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2} \frac{1}{2s^2} + \frac{d_1 + d_2}{2d_1 d_2} - \frac{1}{s} \right) \quad (4.14)$$

Met:

- $A(s)$ [Nm], de Hamaker factor. Deze is afhankelijk van het materiaal van de deeltjes en de afstand tussen de partikels onderling [Flatt, 2004];
- d [m], de korreldiameter;
- s [m], de afstand gemeten tussen twee korrels

De elektrostatische afstootkracht is afhankelijk van de korreldiameter, de permeabiliteit en de ionische compositie. Dit wordt weergegeven met formule (4.15) [Flatt, 1999].

$$F_{el} = \frac{C_7}{|s - s_0|^{f(d_1, d_2)}} \quad (4.15)$$

De functie $f(d_1, d_2)$ kan gelijk zijn aan een constante, maar kan ook afhankelijk zijn van de diameters van de deeltjes die elkaar benaderen. Hierdoor zal de functie ook een constante waarde bezitten, maar wordt het wel mogelijk de elektrostatische krachten voor variërende korrelgroottes in te voeren. De parameter s_0 creëert op zijn beurt de mogelijkheid om het gedrag, veroorzaakt door het gebruik van superplastificeerders, in de simulatie in te voeren aan de hand van een *cut-off* waarde [Fennis, 2010].

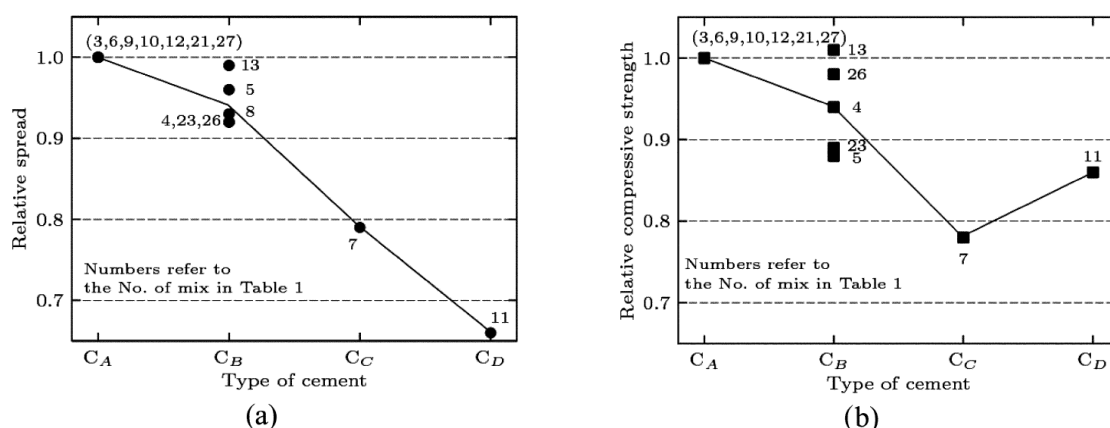
Kjeldsen [2007] stelde ook verschillende formules op voor de elektrische krachten en de van der Waalskrachten. In deze formules zijn de repulsiekrachten van de superplastificeerder ook in rekening gebracht.

5 Materialen

5.1 Cement

Wanneer cement wordt gebruikt in UHPC, moet dit een gepaste chemische samenstelling bezitten. Wille, Naaman & Parra-Montesinos [2011] onderzochten verschillende cementsoorten, namelijk C_A en C_B . Deze bevatten weinig C_3A en veel C_3S . De reden waarom cement met een laag C_3A gehalte wordt gebruikt, is omwille van het snelle hydratatieproces van C_3A . Dit proces gaat gepaard met een vergroting van de korreloppervlakte, het nodige volume water om de korrels te omhullen tijdens het mengproces en het verbruik aan superplastificeerder. Met andere woorden de superplastificeerder wordt geabsorbeerd door het C_3A en is daardoor minder bruikbaar om het mengsel te dispergeren. Hierdoor zal het beton minder verwerkbaar zijn. Wanneer het cement minder dan 8 % C_3A bezit, zal de invloed op de viscositeit klein zijn. Figuur 5.1 zet de resultaten van de proeven uit. Hieruit blijkt dat C_A , met een hoog gehalte C_3S en een hoeveelheid C_3A die gelijk is aan 5 %, de beste resultaten vertoont met betrekking tot de verwerkbaarheid en druksterkte.

Er moet ook een gepaste hoeveelheid SO_3 aanwezig zijn in het cement. In opgeloste toestand zal SO_4^{2-} concurreren met de superplastmoleculen om zich op het cement te binden. Bij een te grote hoeveelheid SO_4^{2-} zal de superplastificeerder onvoldoende hechten op het cement, waardoor de verwerkbaarheid laag is. Anderzijds wanneer de hoeveelheid SO_4^{2-} onvoldoende is, zal de superplastificeerder te snel hechten op C_3A , en is de verwerkbaarheid kortstondig. De reactiviteit van C_3A wordt ook beïnvloed door het alkaligehalte. Een grote hoeveelheid alkaliën zorgt immers voor veel SO_4^{2-} en verandert de normale structuur van C_3A in een meer reactieve vorm. Hierdoor moet het alkaligehalte beperkt worden [Dils, Boel & De Schutter, 2013].



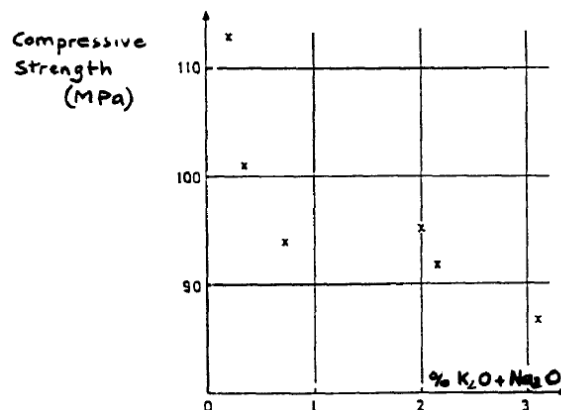
Figuur 5.1: Invloed van de cementsoort op de vloeimaat en druksterkte [Wille et al, 2012]

5.2 Silica fume

Silica fume is een restproduct, verkregen tijdens de productie van silicium en ferrosiliciumlegeringen, en bevat 80 à 95 % SiO_2 [Belgische betongroepering, 2009]. Het is alom gekend dat silica fume de duurzaamheid verbetert door de porositeit van het materiaal te reduceren. Geometrisch kan dit verklaard worden uitgaande van de grootte van de silica fume deeltjes. Deze zijn ongeveer 100 keer kleiner dan die van cement, waardoor silica fume in staat is de holtes op te vullen tussen de cementkorrels. Chemisch kan dit effect verklaard worden door de uitgesproken puzzolane reactie, zodat het in staat is een C-S-H gel te vormen.

Hoewel de geometrie van de deeltjes gunstig is, zijn ze ook zeer gevoelig voor agglomeratie. Agglomeratie wordt veroorzaakt door de aantrekking van de van der Waalskracht en het effect ervan neemt toe wanneer de deeltjes kleiner worden [Kjeldsen & Geiker, 2005], zoals ook wordt beschreven in paragraaf 3.4.2. Het toevoegen van silica fume aan cement zorgt ook voor een mix die veel minder verwerkbaar is. De verwerkbaarheid kan worden verbeterd door het toevoegen van water, maar op die manier vergroot ook de porositeit. Hierdoor creëert het gebruik van silica fume de nood aan superplastificeerders [Kjeldsen, Stang & Geiker, 2006].

Wille, Naaman & Parra-Montesinos [2011] onderzochten verschillende soorten silica fume. Hun conclusie is, dat wanneer de hoeveelheid aan Na_2O en K_2O kleiner is, dit een gunstige invloed heeft op de verwerkbaarheid en de druksterkte van het mengsel. Larrard [1989] vindt dat een lagere hoeveelheid koolstof minder superplastificeerder absorbeert, waardoor naast de verwerkbaarheid ook de druksterkte verbetert. Het verschijnsel van die hogere druksterkte is geïllustreerd met behulp van Figuur 5.2. Verder is er ook nog een verschil merkbaar tussen witte en grijze silica fume. De witte soort bevat minder koolstof in vergelijking met de grijze. Hieruit volgt dat een betere verwerkbaarheid kan bekomen worden door gebruik te maken van witte silica fume.



Figuur 5.2: Druksterkte in functie van de hoeveelheid alkaliën [Larrard, 1989]

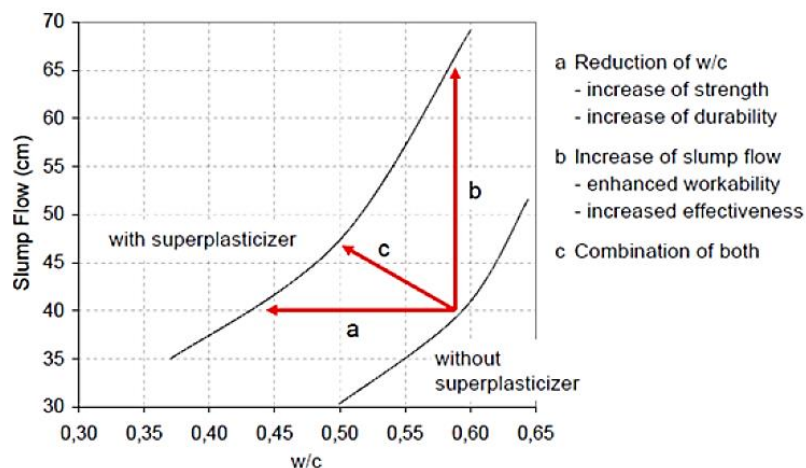
5.3 Kwartspoeders

Kwartspoeder speelt de rol van vulstof en vult met andere woorden de holtes tussen de partikels op. Het gebruik ervan zorgt voor een mogelijke verhoging van de pakkingsdichtheid. Door de lage W/C – factor die in UHPC wordt gehanteerd, is er slechts een beperkt gedeelte van het cement gehydrateerd. De niet-gehydrateerde cementdeeltjes blijven als fijne deeltjes achter in de matrix. Deze deeltjes kunnen op hun beurt vervangen worden door kwartspoeders. Deze vervanging van cement, die kan oplopen tot 30 %, kan uitgevoerd worden zonder verlies van druksterkte.

Het vervangen van cement door poeder zal verder de doorstroomcapaciteit van het beton verbeteren. Dit verbetert omdat de toevoeging van een gepast poeder, de holten vermindert in het oorspronkelijke mengsel van cement en silica fume. Tijdens de eerste minuten worden er ook minder hydraten gevormd, waardoor het aantal vrije beweegbare deeltjes toeneemt. De poeders laten dus een mogelijke vermindering toe van de hoeveelheid superplastificeerder [De Ruyck & Eeckhout, 2006]. Dit effect dient bestudeerd te worden via interactiekrommes of pakkingsmodellen.

5.4 Superplastificeerder

Superplastificeerders zijn hulpstoffen die, voor een gegeven betonmengeling, toelaten het watergehalte sterk te verminderen zonder de verwerkbaarheid te wijzigen of die, bij een gelijk blijvend watergehalte, tot een belangrijke verhoging van de verwerkbaarheid leiden. Dit wordt verduidelijkt in Figuur 5.3. Bij toevoeging van water zou de W/C-factor toenemen en zou de sterkte afnemen [Belgische BetonGroepering, 2009].

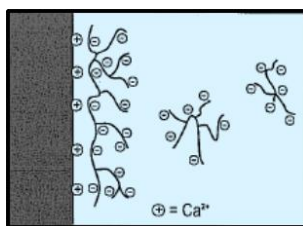


Figuur 5.3: Slump flow in functie van de W/C-factor [Breye & De Vos, 2013]

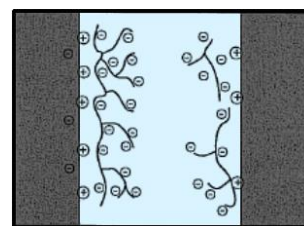
De werking is als volgt. De moleculen van de superplastificeerders hechten zich door adsorptie vast aan het grensvlak tussen de cementdeeltjes en het aanmaakwater. Deze

cementdeeltjes zijn oorspronkelijk negatief geladen door de aanwezigheid van geïoniseerde SiO₂-groepen. Maar de aanwezigheid van calciumionen in het poriënwater zorgt ervoor dat het oppervlak van het cementdeeltje lokaal overgaat van een negatieve naar een positieve lading. Dit maakt de binding van superplastmoleculen op het cement mogelijk [Lesage, 2014]. De adsorptie is veroorzaakt door de elektrostatische aantrekkingskracht van de elektrisch geladen groepen in de superplastmoleculen. De manier waarop de superplastificeerder adsorbeert hangt af van drie factoren. Ten eerste is er de vorm en grootte van de moleculen, samen met de ionische lading van de desbetreffende molecule. Een tweede factor is het sulfaatgehalte in de oplossing. Ten slotte speelt ook de temperatuur van het beton een rol.

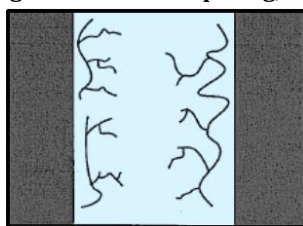
Eens geadsorbeerd vormen de superplastificeerders rond elk cementdeeltje, dat positief geladen is, een laag met negatieve lading. Twee naburige cementdeeltjes hebben dus dezelfde oppervlaktelading en stoten elkaar bijgevolg af. Dit is met andere woorden de elektrostatische afstoting. Het gevolg hiervan is een dispersie van de cementdeeltjes, een afname van de viscositeit en een verhoging van de verwerkbaarheid van het beton. Deze fenomenen kunnen aan de hand van twee redenen verklaard worden. De eerste reden is dat het cement niet bindt, en er dus met andere woorden geen structuur wordt opgebouwd. Een tweede reden ligt aan het feit dat het water kan gebruikt worden voor de dispersie van de deeltjes. Naast de elektrostatische afstoting leidt de sferische plaatsinname van de superplastificeerders eveneens tot een afstotingskracht die op korte afstand werkt. In feite vormen de superplastificeerders lussen en staarten die, door hun plaatsinname, aanleiding kunnen geven tot ruimtelijke afstoting wanneer deeltjes naar elkaar toe komen [Belgische BetonGroepering, 2009].



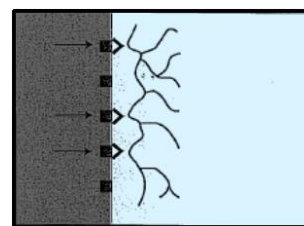
Figuur 5.4: Adsorptie van superplastificeermoleculen op het grensvlak tussen de cementkorrel en het aanmaakwater
[Belgische BetonGroepering, 2009]



Figuur 5.5: Elektrostatische afstoting van twee cementkorrels
[Belgische BetonGroepering, 2009]



Figuur 5.6: Sferische belemmering
[Belgische BetonGroepering, 2009]



Figuur 5.7: Scheikundige verbinding op de meest reactieve plaatsten
[Belgische BetonGroepering, 2009]

DEEL III Experimenteel onderzoek

In deze inleiding op het experimenteel onderzoek wordt het proefprogramma kort geschetst, zodat een goed overzicht voor het verdere verloop van de thesis wordt bekomen. Algemeen kan het onderzoek onderverdeeld worden in twee grote blokken. Het eerste blok situeerde zich voornamelijk in het eerste semester en omvatte het bepalen van de droge pakking van granulaten. Tijdens het tweede semester werd voornamelijk gefocust op de natte pakking van poeders. De verkregen data werden in beide gevallen gevalideerd met behulp van het *compressible packing model*.

De eerste stap in het bepalen van de droge pakking is het afzeven van de verschillende korrelfracties. Dit gebeurt voor de granulaten basalt, porfier, rolgrind en zand. Deze afzonderlijke fracties zijn van belang in een later stadium, namelijk voor het opstellen van interactiekrommen. Na het scheiden van de korrelfracties worden de droge zeefkrommes opgesteld en wordt voor elk materiaal tevens ook de dichtheid bepaald. Nadien kan het opstellen van de interactiekrommes van start gaan. Dit gebeurt op basis van de zwaartekrachtspreef en de verdichtingspreef. Tijdens elke preef worden verschillende combinaties gemaakt tussen grove en fijne granulaten, waarvan later de pakkingsdichtheid wordt bepaald.

De tweede stap in het proefprogramma met de granulaten is het valideren van de verkregen data met het *compressible packing model*. Om een goede simulatie met dit model te verkrijgen speelt de verdichtingsfactor (K-waarde) een zeer belangrijke rol. Deze is namelijk een maat voor de energie die tijdens de preef wordt overgedragen. In het geval van de zwaartekrachtspreef wordt gewerkt met een $K = 4,1$. Wanneer de verdichtingspreef wordt uitgevoerd, verhoogt de toegevoegde energie en dus ook de K-waarde van 4,1 naar 9. De validatie met het *compressible packing model* gebeurt op twee manieren. Een eerste simulatie gebeurt door het invoeren van vier klassen, gelegen tussen de onder- en bovengrens van de korrelfractie, waaraan een gelijk gewicht wordt toegekend. Een tweede simulatie gebeurt op basis van de zeefkrommes die in het onderzoek worden opgesteld.

Het tweede semester is voornamelijk gericht op het bepalen van de natte pakkingsdichtheid met behulp van centrifugale consolidatie. Ook bij deze preeven was het in eerste instantie van belang de zeefkrommes van de gebruikte poeders op te stellen. Dit gebeurt met behulp van de laserdiffractometer Mastersizer 2000, inclusief natte eenheid. De natte eenheid zorgt er namelijk voor dat het agglomereren van de kleine poederdeeltjes zoveel mogelijk wordt voorkomen.

In een volgende stap worden verschillende pasta's gemaakt op basis van cement. Aan het cement wordt zowel SF 940U, SF 940D, SF Microwhite, M800 als vliegas toegevoegd. De hoeveelheid superplastificeerder, nodig om bovenstaande mengsels te verzadigen, wordt bepaald door Willem Van Compernelle & Frederic De Reu van KAHO Sint – Lieven.

De verse pasta wordt in buisjes geplaatst, die op hun beurt in de centrifuge terechtkomen en gedurende 15 min met 3500 rpm ronddraaien. Na het centrifugeren vormt zich bovenaan de pasta een waterlaag, die nadien wordt verwijderd met behulp van een naald. Op basis van deze hoeveelheid water is het mogelijk de pakkingsdichtheid te bepalen voor de verschillende combinaties. Net als bij de droge pakking worden ook deze data gevalideerd met behulp van het *compressible packing model*. Opnieuw is de verdichtingsfactor een belangrijke parameter. In tegenstelling tot voorgaande proeven is deze factor niet gekend. Het valideren van de verkregen proefresultaten gebeurt met verschillende K-waarden waarna de beste waarde wordt vastgesteld.

Naast de pakkingsdichtheid wordt voor elk mengsel ook de slump flow bepaald. Deze is een maat voor de verwerkbaarheid van het mengsel en wordt in dit proefprogramma begrensd op 30 cm. Door de proefbuisjes te laten uitharden en vervolgens te bewaren onder water was het ook mogelijk de druksterkte te bepalen van de combinaties CEM – SF 940U en CEM – SF MWE.

6 Droge pakkingsdichtheid

6.1 Keuze van de materialen

6.1.1 Grove granulaten

Als grove granulaten worden rolgrind 4/16, basalt 4/16 en porfier 2/4 gebruikt. Deze materialen zijn aanwezig in het laboratorium Magnel voor Betononderzoek te Zwijnaarde. De korrels van het rolgrind hebben een ronde vorm dit in tegenstelling tot deze van basalt en porfier, die hoekig van vorm zijn. Voor het bepalen van de pakkingsdichtheden van verschillende combinaties van granulaten worden op voorhand verschillende fracties uit de granulaten gezeefd. Voor rolgrind 4/16 en basalt 4/16 worden de fracties van 2 tot 4 mm en van 4 tot 8 mm uit de geleverde granulaten gezeefd. Bij porfier 2/4 wordt, voor het bepalen van de pakkingsdichtheid, enkel gewerkt met de fractie van 2 tot 4 mm. Deze fracties worden van de rest van de korrels gescheiden door gebruik te maken van stalen zeven die gekalibreerd zijn volgens de ISO 3310-2-standaard.

6.1.2 Fijne granulaten

Er wordt gebruik gemaakt van het zand M31 dat wordt geleverd door Sibelco. Het betreft een kwartzand met een grove korrel. De vorm van de korrels is overwegend rond. De technische fiche van dit zand kan worden teruggevonden in 0. Ook hier worden enkele fracties uit de volledige korrelverdeling gezeefd, namelijk de fractie van 0,125 tot 0,25 mm, de fractie van 0,25 tot 0,5 mm en de fractie van 0,5 tot 1 mm.

6.2 Eigenschappen van de materialen

6.2.1 Bepalen van de dichtheden

Van alle materialen die in paragraaf 6.1 vermeld worden, wordt de dichtheid bepaald met behulp van een pyknometer. Deze proef wordt uitgevoerd zoals wordt beschreven in de norm NBN EN 1097-7:2008. In de onderstaande tabel worden de resultaten van deze test weergegeven.

Tabel 6.1: Dichtheden gebruikte materialen

Materiaal	Dichtheid [kg/m³]
Rolgrind	
fractie 4/8	2662
fractie 2/4	2660
Basalt	
fractie 4/8	2920
fractie 2/4	2937
Porfier	
fractie 2/4	2690
Zand M31	
volledig	2640
fractie 0,5/1	2672
fractie 0,25/0,5	2661
fractie 0,125/0,25	2666

6.2.2 Opstellen van de droge zeefkrommes

De droge zeefkrommes van de verschillende fracties die uit de grove granulaten worden gezeefd, worden bepaald met behulp van gestandaardiseerde zeven. De procedure die wordt gehanteerd is in overeenstemming met de norm NBN EN 933-1:2012. Een overzicht van deze zeefkrommes kan teruggevonden worden in Bijlage B.

Omdat de afmetingen van de zandkorrels vele malen kleiner zijn dan deze van de grove granulaten wordt overgestapt op een andere techniek om de droge zeefkrommes van dit materiaal te bepalen. De zeefkrommes van de verschillende fracties die uit het zand gezeefd worden, worden bepaald met behulp van de droge eenheid van een laserdiffractometer, namelijk de Malvern Mastersizer 2000⁶. De zeefkrommes van de verschillende zandfracties worden eveneens in Bijlage B weergegeven.

⁶ Voor informatie over de werking van Malvern Mastersizer 2000 wordt verwezen naar paragraaf 7.2.2.1.

6.3 Zwaartekrachtsproef

6.3.1 Samenstelling van de mengsels

Bij het samenstellen van een mengsel wordt er steeds getracht de massa van het mengsel zodanig te bepalen dat de trechter (zie Figuur 6.1) die wordt gebruikt in deze proef volledig gevuld wordt. Uitgaande van het volume van deze trechter, van de dichtheid van elk granulaat en van het volumepercentage is het mogelijk de massa per mengsel van elk aggregaat afzonderlijk te bepalen.

6.3.2 Procedure

Onder een trechter met een inhoud van 2,59 l waarvan de opening aan de onderzijde zich op een hoogte van ongeveer 37 cm boven het vlak van een tafel bevindt, wordt een beker geplaatst. Deze beker heeft een diameter van 114,76 mm, een hoogte van 180,13 mm en een inhoud van 1,86 l. Deze proefopstelling wordt weergegeven op Figuur 6.1.



Figuur 6.1: Proefopstelling zwaartekrachtsproef

Na het wegen van de nodige hoeveelheid granulaten, om de trechter volledig te vullen, worden deze manueel vermengd. Daarna wordt het mengsel in horizontale lagen in de trechter aangebracht. De onderzijde van de trechter wordt tijdens het vullen afgedekt zodanig dat er geen korrels verloren gaan. Wanneer de trechter volledig gevuld is, wordt de onderkant van de trechter vrijgemaakt waardoor het mengsel onder invloed van de zwaartekracht uit de trechter stroomt. Het mengsel dat de trechter verlaat wordt opgevangen in de beker die zich onder de trechter bevindt. Aangezien het volume van de trechter groter is dan dat van de opvangbeker zal het mengsel over de rand van de trechter stromen. Wanneer het mengsel volledig uit de trechter is, wordt de overmaat aan

granulaten die aanwezig zijn buiten het volume van de beker voorzichtig afgeschraapt. Als laatste stap wordt de massa van het mengsel in de opvangbeker gewogen.

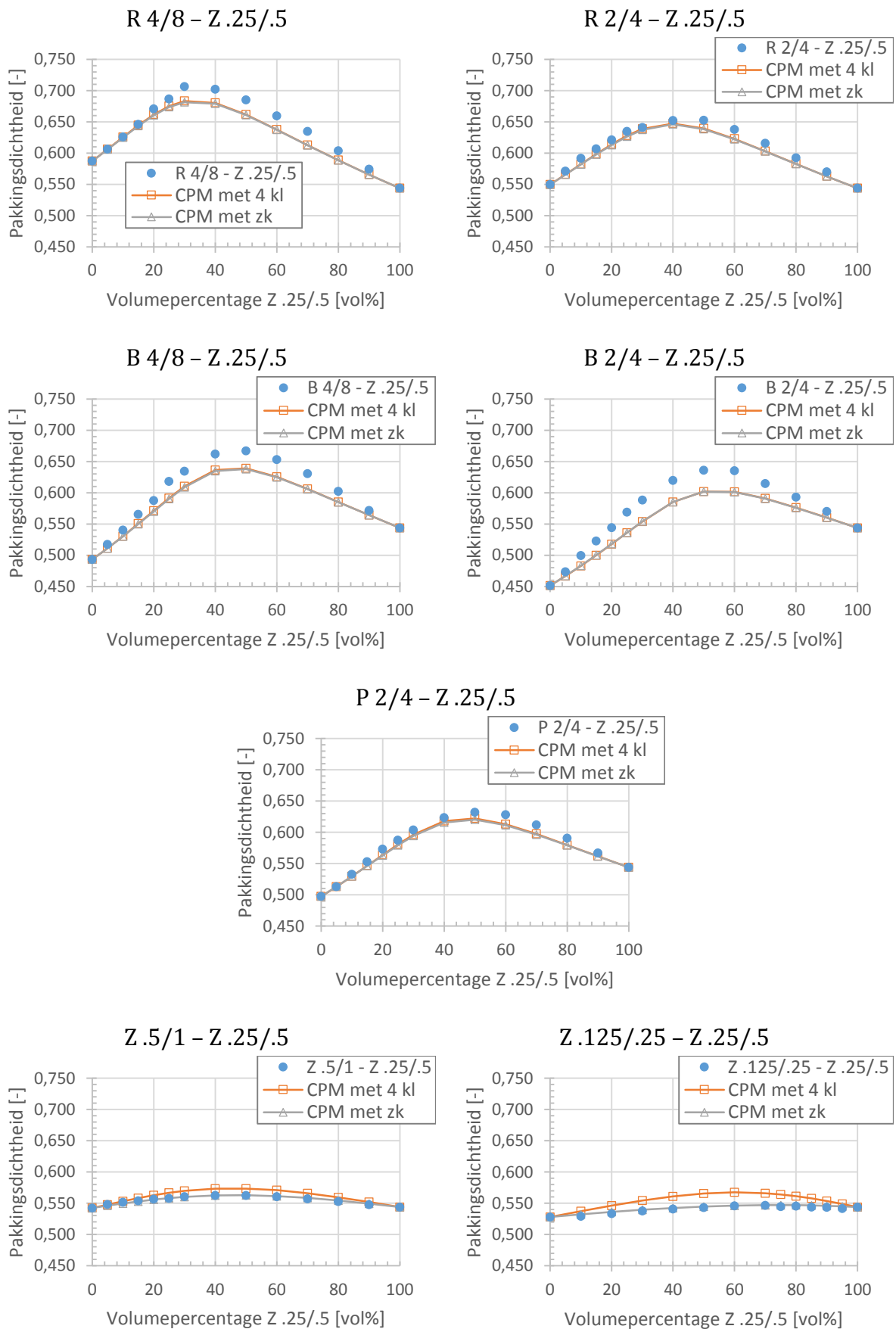
Vervolgens kan de losse pakkingsdichtheid bepaald worden door de massa van het mengsel in de opvangbeker te delen door de gemiddelde dichtheid van het mengsel en door het volume van de opvangbeker. Deze berekening is in overeenstemming met vergelijking (3.1) welke wordt ontleend aan de norm NBN EN 1097-3:1998. Elke experimentele waarde van de pakkingsdichtheid is het gemiddelde van vijf metingen, die telkens uitgevoerd worden op hetzelfde mengsel.

6.3.3 Analyse van de resultaten

Volgens de in paragraaf 6.3.2 beschreven procedure wordt van zeven verschillende korrelfracties de pakkingsdichtheid bepaald. In Tabel 6.2 worden de individuele pakkingsdichtheden van deze fracties weergegeven. Hieruit blijkt dat voor eenzelfde korreldiameter de pakkingsdichtheid van ronde granulaten groter is dan deze van hoekige granulaten. Daarnaast zijn ook de pakkingsdichtheden van de korrelfracties met een grotere korreldiameter groter dan deze die worden gekenmerkt door kleinere afmetingen. Volgens Fennis [2010] is dit te verklaren door het feit dat bij kleinere partikels de optredende oppervlaktekrachten mogelijk groter zijn met als gevolg dat de pakkingsdichtheid lager ligt. Dit laatste wordt echter niet vastgesteld bij de verschillende korrelfracties van het zand M31. Daarbij is de pakkingsdichtheid voor de fracties Z .5/1 en Z .25/.5 ongeveer gelijk.

Tabel 6.2: Individuele pakkingsdichtheid van de korrelfracties volgens de verdichtingsproef

Fractie [mm]	PD _{actueel} [-]
R 4/8	0,587
R 2/4	0,550
B 4/8	0,493
B 2/4	0,451
P 2/4	0,497
Z .5/1	0,542
Z .25/.5	0,544
Z .125/.25	0,528



Figuur 6.2: Interactiekrommen voor binaire mengsels van grove granulaten inclusief validatie CPM

Uit Tabel 6.2 blijkt dat er een groot verschil bestaat tussen de pakkingsdichtheid van de korrelfractie B 2/4 en P 2/4. Beide granulaten zijn hoekig en hebben een gemiddelde korreldiameter van respectievelijk 3,29 mm en 3,02 mm. Tijdens het beproeven van de monsters wordt opgemerkt dat de basaltkorrels een langwerpige vorm hebben. In het werk van Kwan & Mora [2001] wordt de invloed van de vorm van aggregaten op de pakkingsdichtheid bestudeerd. Hieruit blijkt dat de langwerpigheid van een korrel een beperkte invloed heeft op de pakkingsdichtheid.

Door het combineren van de verschillende hoeveelheden van twee (of meer) korrelfracties kunnen interactiekrommen worden opgesteld. In dit onderzoek wordt gekozen om de fractie Z .25/.5 met alle andere korrelfracties te combineren.

Uit het werk van Larrard [1999] en Fennis [2010] blijkt dat de interactie tussen de deeltjes het grootst is wanneer de fractie, gekenmerkt door een grote korrelafmeting, dominant is. Om die reden wordt gekozen meer mengsels te maken waarbij de hoeveelheid granulaten van de korrelfractie met de grootste korrelafmetingen meer dan 50 vol% bedraagt.

In Figuur 6.2 worden de interactiekrommen voor de verschillende combinaties van korrelfracties weergegeven. Uit deze interactiekrommen kunnen enkele verschijnselen worden afgeleid. Zo blijkt dat de pakkingsdichtheid hoger is bij combinaties van fracties waar de verhouding van de korrelafmetingen d_2/d_1 klein is. Dit is het geval bij de combinaties R 4/8 – Z .25/.5 en B 4/8 – Z .25/.5. Wanneer de verhouding d_2/d_1 toeneemt, zal de pakkingsdichtheid dalen. In de grafieken van Figuur 6.2 wordt dit verschijnsel gekenmerkt door een minder scherpe en lagere piek in de interactiekromme. Bij de combinatie Z .5/1 – Z .25/.5 en Z .125/.25 – Z .25/.5 is bijna geen sprake van interactie tussen de deeltjes omdat het verschil tussen de korrelafmetingen van de verschillende fracties zeer klein is. Deze vaststellingen komen overeen met wat Larrard [1999] en Fennis [2010] opmerken.

Uit de interactiekrommen van Figuur 6.2 blijkt dat de maximale pakking bij een combinatie van ronde granulaten zich voordoet wanneer de fractie met een grotere korreldiameter dominant is. Bij een combinatie van hoekige en ronde granulaten treedt de piek in de interactiekromme op wanneer de volumepercentages van beide fracties gelijk zijn. Bijgevolg is de veronderstelling om meer combinaties te maken waarbij de hoeveelheid granulaten van de grote korrelfractie groter is dan 50 % ten dele gegrond. Hierdoor kan de optimale pakking beter bepaald worden.

Na het uitvoeren van de proeven worden de experimentele data geëvalueerd aan de hand van het *compressible packing model*. Om de berekening volgens het CPM te kunnen aanvangen, moeten enkele factoren worden vastgelegd.

Een belangrijk gegeven zijn de korrelafmetingen die in het model worden opgenomen. Om te starten worden de fracties van de beschouwde mix van granulaten onderverdeeld in verschillende subklassen met elk een eigen kenmerkende korreldiameter. Deze

korreldiameters worden bepaald als zijnde logaritmische gemiddelden tussen de grenzen van de verschillende fracties. Een eerste benadering wordt gemaakt door aan te nemen dat de korrelfracties van de beschouwde granulaten elk bestaan uit vier subklassen die even belangrijk zijn. In een tweede benadering wordt de zeefkromme van de beschouwde korrelfracties (zoals bepaald in paragraaf 6.2.2) gekoppeld aan de logaritmische gemiddelden. In Larrard [1999] wordt op een andere wijze met de korrelafmetingen rekening gehouden. In dat werkstuk wordt aangenomen dat de gemiddelde waarde van de korreldiameter van de beschouwde fractie representatief is voor de volledige fractie en bijgevolg wordt enkel met deze waarde rekening gehouden.

Een tweede belangrijke factor die in het *compressible packing model* moet worden opgegeven, is de verdichtingsfactor. In deze proef wordt het mengsel enkel onder invloed van de zwaartekracht in een opvangbeker gegoten. Volgens Larrard [1999] kan de K-waarde van een degelijk experiment gelijk worden gesteld aan 4,1. Ook Fennis [2010] vindt een goede correlatie tussen de experimentele en theoretische waarden voor een losse pakking wanneer K gelijk is aan 4,1.

Aan de hand van deze gegevens kunnen de theoretische waarden voor verschillende verhoudingen van de beschouwde fracties worden bepaald.

De theoretische waarden voor de pakkingsdichtheden worden eveneens in Figuur 6.2 weergegeven. Wanneer de theoretische waarden worden vergeleken met de experimentele waarden blijkt dat voor de eerste benadering, van de korrelafmetingen, de gemiddelde errorwaarde gelijk is aan 2,33 % terwijl voor de tweede benadering de gemiddelde errorwaarde gelijk is aan 1,91 %. In het onderzoek van Fennis [2010] is de gemiddelde errorwaarde gelijk aan 0,7 % met een maximale waarde van 2,3 %. Een belangrijke opmerking die hierbij moet gemaakt worden is dat in dat werkstuk enkel combinaties worden gemaakt van korrelfracties met ronde granulaten.

Uit de gemiddelde errorwaarden die uit deze berekening volgens het CPM volgen, zou kunnen geconcludeerd worden dat, wanneer de werkelijke korrelverdeling van de fracties beter wordt benaderd, de gemiddelde afwijking tegenover de experimentele waarden kleiner is. Maar wanneer wordt gekeken naar de afzonderlijke interactiekrommen blijkt deze stelling enkel waar te zijn voor combinaties van zanden.

Wanneer naar de afzonderlijke interactiekrommen wordt gekeken blijkt dat de gemiddelde errorwaarde bij een combinatie van hoekige en ronde granulaten groter is dan deze voor de combinaties die enkel ronde granulaten bevatten. Bij de kalibratie van het *compressible packing model* heeft Larrard [1999] echter enkel rekening gehouden met combinaties die alleen ronde of alleen hoekige granulaten bevatten.

Voor een overzicht van de exacte waarden van de actuele pakkingsdichtheden, de theoretische waarden volgens het *compressible packing model* en de errorwaarden wordt verwezen naar Bijlage C.

6.4 Verdichtingsproef

6.4.1 Eigenschappen van het toestel

Bij het uitvoeren van deze proeven wordt gebruik gemaakt van een lichtgewicht triltafel van de Duitse fabrikant Testing. In Tabel 6.3 worden enkele eigenschappen van deze triltafel opgesomd.

Type	Lichtgewicht triltafel met Aan/Uit-schakelaar (2.0268)
Effectieve oppervlakte	350 x 350 x 225 mm
Toerental motor	3000 rpm
Frequentie	50 Hz

6.4.2 Samenstelling van de mengsels

Bij het samenstellen van een mengsel wordt er steeds getracht de massa van het mengsel in de cilinder gelijk te houden aan 1,5 kg. Uitgaande van deze massa, van de dichtheid van elk aggregaat (zoals bepaald in paragraaf 6.2.1) en van het volumepercentage is het mogelijk de massa per mengsel van elk granulaat afzonderlijk te bepalen.

6.4.3 Procedure

De testprocedure begint met het correct afwegen van de twee granulaten, die vervolgens manueel met elkaar worden vermengd. Het mengsel wordt nadien, door gebruik te maken van een schopje, in opeenvolgende horizontale lagen aangebracht in een stalen cilinder. Deze heeft een hoogte van 128,52 mm en een diameter van 153,28 mm. Het mengsel in de cilinder wordt met behulp van een gewicht van 8,253 kg afgesloten. Dit betekent dat er een gemiddelde druk van 4,39 kPa op het mengsel wordt uitgeoefend. Omdat het gewicht een kleinere diameter bezit dan de stalen cilinder, bestaat de kans dat tijdens het trillen het gewicht ongelijkmatig zakt en vast komt te zitten. Wanneer dit gebeurt, is het niet mogelijk een correcte meting uit te voeren of om een correcte pakkingsdichtheid te bepalen.

Om ervoor te zorgen dat het gewicht enkel verticaal kan bewegen, wordt een extra ring op het gewicht voorzien. Dit zorgt ervoor dat de massa van het gewicht met 1,723 kg stijgt. De totale druk op het mengsel bedraagt nu 5,30 kPa. Om tijdens de proef een goede energieoverdracht te realiseren tussen de triltafel en de cilinder wordt deze extra vastgezet met behulp van klemmen. Figuur 6.3 geeft een beeld van de proefopstelling weer.



Figuur 6.3: Proefopstelling verdichtingsproef

Het geheel wordt vervolgens gedurende 2 minuten getrild aan een frequentie van 50 Hz. Dit in tegenstelling tot de proefmethode gehanteerd door Larrard [1999], waarbij drie verschillende frequenties worden gebruikt. Hierbij wordt het mengsel gedurende de eerste twee minuten onderworpen aan amplitude van 0,4 mm, om nadien over te gaan naar een amplitude van 0,2 mm gedurende 40 s. De proefprocedure wordt afgesloten door één minuut te trillen met een amplitude van 0,08 mm. In de uitgevoerde proefprocedure wordt de vibratietijd vastgelegd op 2 minuten. Deze vibratietijd wordt gekozen op basis van eerder onderzoek, uitgevoerd door ing. P. Minne. Daarin wordt vastgesteld dat langer trillen geen effect meer heeft op de metingen en dus ook de pakkingsdichtheid niet beïnvloedt.

De laatste stap omvat het bepalen van het volume dat na het trillen wordt ingenomen door het mengsel. Hiervoor wordt de hoogte opgemeten vanaf de bovenkant van de cilinder tot aan het gewicht en dit op vier verschillende plaatsten. Vervolgens wordt het gemiddelde van deze vier metingen bepaald. Het opmeten op meer dan één locatie is noodzakelijk omdat het gewicht niet in staat is volledig homogeen te zakken. Indien de hoogte enkel maar op één bepaalde locatie wordt vastgelegd, is de waarde die hieruit wordt berekend voor de pakkingsdichtheid mogelijks niet representatief. Op basis van deze hoogtemetingen en de afmetingen van de cilinder, inclusief stalen ring, is het mogelijk het volume te bepalen dat ingenomen wordt door de granulaten na het verdichten van het mengsel. Na deze hoogtemetingen wordt de cilinder telkens volledig geleegd.

De pakkingsdichtheid wordt berekend door de massa van mengsel te delen door de gemiddelde dichtheid van de aggregaten en door het totaal volume ingenomen door het mengsel, berekend uitgaande van de hoogteverandering. Elke experimentele waarde is het gemiddelde van vijf metingen, die telkens uitgevoerd worden op hetzelfde mengsel.

6.4.4 Analyse van de resultaten

Van dezelfde zeven korrelfracties die worden gebruikt voor de verdichtingsproef wordt de pakkingsdichtheid volgens de procedure uit paragraaf 6.4.3 bepaald. Tabel 6.4 geeft een overzicht van de individuele pakkingsdichtheden van deze fracties.

Tabel 6.4: Individuele pakkingsdichtheid van de korrelfracties volgens de verdichtingsproef

Fractie [mm]	PD _{actueel} [-]
R 4/8	0,633
R 2/4	0,623
B 4/8	0,567
B 2/4	0,534
P 2/4	0,582
Z .5/1	0,633
Z .25/.5	0,647
Z .125/.25	0,633

Uit deze resultaten blijkt dat de pakkingsdichtheid stijgt wanneer de korreldiameter toeneemt en dit voor zowel de ronde als de hoekige granulaten. Volgens Larrard [1999] is dit te wijten aan het feit dat grove granulaten makkelijker te verdichten zijn dan fijne granulaten omdat er minder contactpunten tussen de deeltjes aanwezig zijn. De zandfracties vormen hierop echter een uitzondering. Hierbij is de pakkingsdichtheid voor de korrelfractie Z .25/.5 en Z .125/.25 respectievelijk groter dan en gelijk aan de pakkingsdichtheid van de grootste zandfractie. Ook uit de data van Larrard [1999], die worden weergegeven in Figuur 6.4, blijkt dat de individuele pakkingsdichtheid van de kleinste fracties niet meer afneemt voor ronde granulaten en zelfs in grote mate stijgt voor de hoekige granulaten.

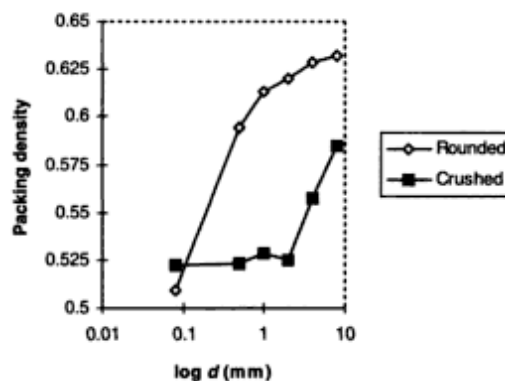
Names	d_{min} (mm)	d_{max} (mm)	Packing density	Corrected packing density
R < 05	0.08	0.5	0.593	–
R05	0.5	0.63	0.592	0.594
R1	1	1.25	0.609	0.613
R2	2	2.5	0.616	0.620
R4	4	5	0.6195	0.629
R8	8	10	0.628	0.632

Table 1.2 Characteristics of crushed aggregate used in the packing experiments.

Names	d_{min} (mm)	d_{max} (mm)	Packing density	Corrected packing density
C < 05	0.08	0.5	0.630	–
C05	0.5	0.63	0.516	0.523
C1	1	1.25	0.507	0.528
C2	2	2.5	0.529	0.525
C4	4	5	0.537	0.557
C8	8	10	0.572	0.585

Figuur 6.4: Experimentele data van de verdichtingsproef uit het onderzoek van Larrard [1999]

Wanneer daarnaast wordt gekeken naar korrelfracties bestaande uit korrels met dezelfde afmetingen blijkt dat de pakking van ronde granulaten hoger ligt dan deze van hoekige granulaten. Dit wordt ook opgemerkt in het werkstuk van Larrard [1999]. In Figuur 6.5⁷ wordt de experimentele waarde van de individuele pakkingsdichtheid weergegeven in functie van de gemiddelde diameter van de verschillende korrelfracties zoals deze werden bepaald in Larrard [1999]. Hieruit concludeert Larrard [1999] dat er geen algemene regel bestaat die het verband tussen de grootte van de deeltjes en pakkingsdichtheid van dezelfde deeltjes beschrijft in het geval van individuele korrelfracties.

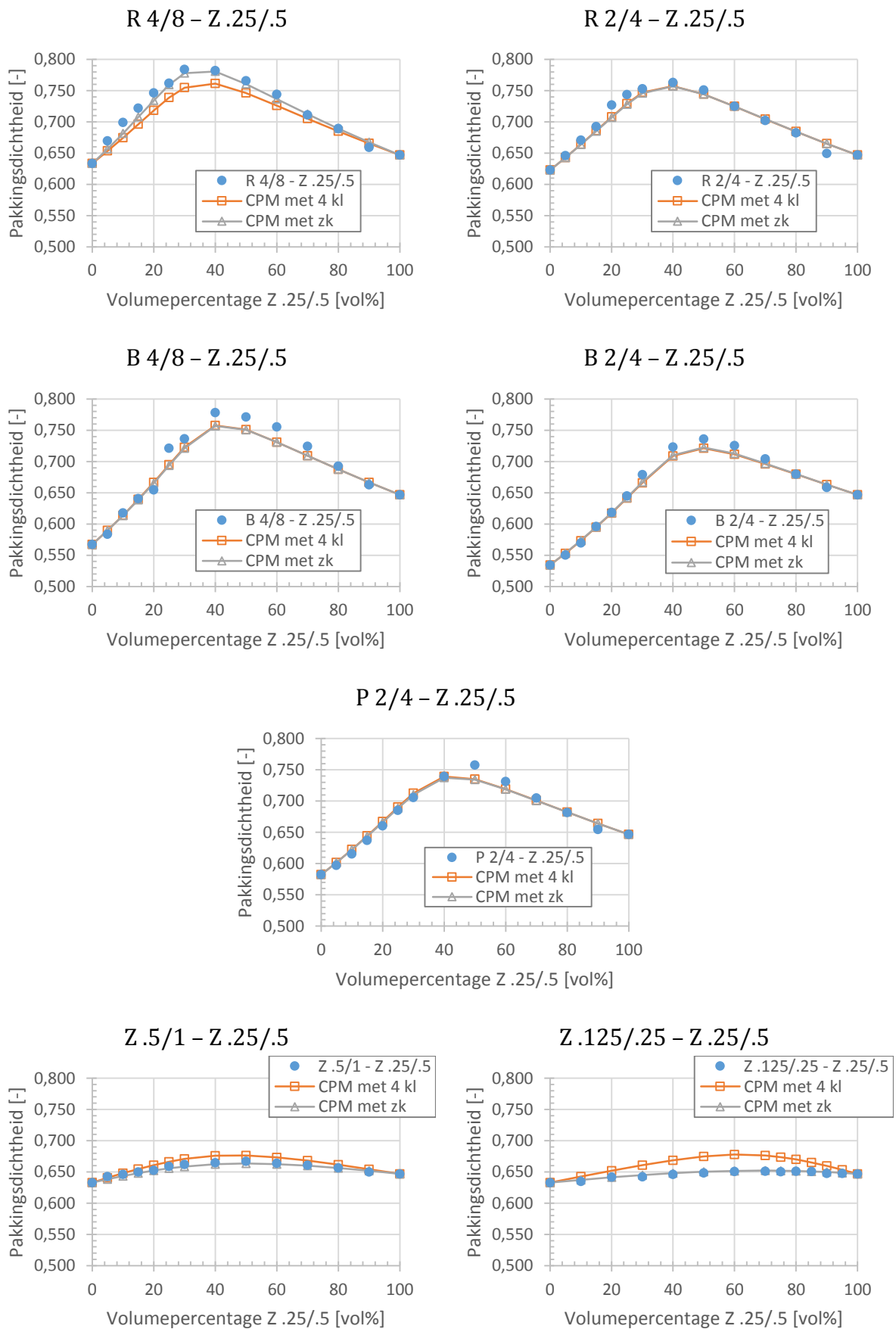


Figuur 6.5: Grafische voorstelling van de individuele pakkingsdichtheid bepaald volgens verdichtingsproef uit het onderzoek van Larrard [1999]

Door combinaties te maken van verschillende hoeveelheden van twee (of meer) korrelfracties kunnen interactiekrommen worden opgesteld. De combinaties die met deze proefprocedure worden bestudeerd zijn dezelfde als deze die worden gebruikt bij de verdichtingsproef.

Figuur 6.6 geeft de interactiekrommen van de verschillende combinaties van granulaten weer. Hieruit blijkt dat de pakkingsdichtheid hoger is bij combinaties waar de verhouding van de korrelafmetingen d_2/d_1 klein is. Dit is het geval bij de combinaties R 4/8 – Z .25/.5, R 2/4 – Z .25/.5, B 4/8 – Z .25/.5, B 2/4 – Z .25/.5 en P 2/4 – Z .25/ waarbij in het geval van rolgrind de pakkingsdichtheid van de combinatie met de grootste korrelafmetingen maar net boven deze van de combinatie met de kleinste korrelafmetingen uitkomt. Wanneer de verhouding d_2/d_1 toeneemt, daalt de waarde van de pakkingsdichtheid. In de grafieken van Figuur 6.6 wordt deze vaststelling gekenmerkt door een vlakkere interactiecurve zoals deze van de combinatie Z .5/1 – Z .25/.5 en Z .125 – Z .25/.5. Omdat de korrelafmetingen van deze fracties zeer dicht bij elkaar liggen, treedt er weinig interactie op wanneer deze met elkaar worden vermengd. Dit wordt ook vastgesteld in het onderzoek van Larrard [1999]

⁷ De waarden van de eerste punten van elke curve uit Figuur 6.5 komen niet overeen met de werkelijke opgemeten waarden die worden weergegeven in Figuur 6.4.



Figuur 6.6: Interactiekrommen voor binaire mengsels van grove granulaten inclusief validatie CPM

Als bij eenzelfde korreldiameter wordt gekeken naar combinaties van ronde en hoekige grove granulaten, dan blijkt dat het toevoegen van fijne granulaten een grotere impact heeft op de pakkingsdichtheid van de hoekige granulaten dan op deze van de ronde granulaten. Dit kan worden vastgesteld wanneer de combinaties R 2/4 – Z .25/.5 en B 2/4 – Z.25/.5 met elkaar worden vergeleken.

Wanneer dat de experimentele waarden van de pakkingsdichtheid zijn bepaald, worden deze geëvalueerd aan de hand van het *compressible packing model*. Bij deze proef worden in dit model dezelfde benaderingen voor de korrelafmetingen gebruikt als bij de evaluatie van de experimentele data van de zwaartekrachtproef (zie paragraaf 6.3.3).

De waarde van de verdichtingsfactor wordt gelijk gesteld aan 9. Deze K-waarde wordt in Larrard [1999] voorgesteld wanneer het mengsel wordt getrild onder een externe druk van 10 kPa.

Aan de hand van deze gegevens en uitgaande van de experimentele pakkingsdichtheden van de individuele fracties kunnen de theoretische waarden voor de verschillende combinaties van korrelfracties bepaald worden. Deze theoretische waarden van de pakkingsdichtheid worden eveneens op Figuur 6.6 afgebeeld.

Wanneer deze worden vergeleken met de experimentele waarden blijkt dat de gemiddelde errorwaarde voor de eerste benadering van de korrelafmetingen gelijk is aan 1,59 % en voor de tweede benadering gelijk is aan 0,92 %. In het onderzoek van Larrard [1999] wordt voor een K-waarde van gelijk aan 9 een goede correlatie tussen de experimentele en theoretische waarden gevonden. De gemiddelde errorwaarde in dat onderzoek bedraagt 0,77 % voor combinaties van korrelfracties met enkel ronde granulaten en 1,71 % voor combinaties met enkel hoekige granulaten in het mengsel.

Ook bij deze proef blijkt dat de correlatie tussen de experimentele en theoretische waarden het best is voor de combinaties van zandfracties wanneer rekening wordt gehouden met de volledige korrelverdeling van de beschouwde fracties. Voor de andere combinatie, behalve voor R 4/8 – Z .25/.5 is er weinig verschil tussen de eerste en de tweede benadering van de korrelafmetingen.

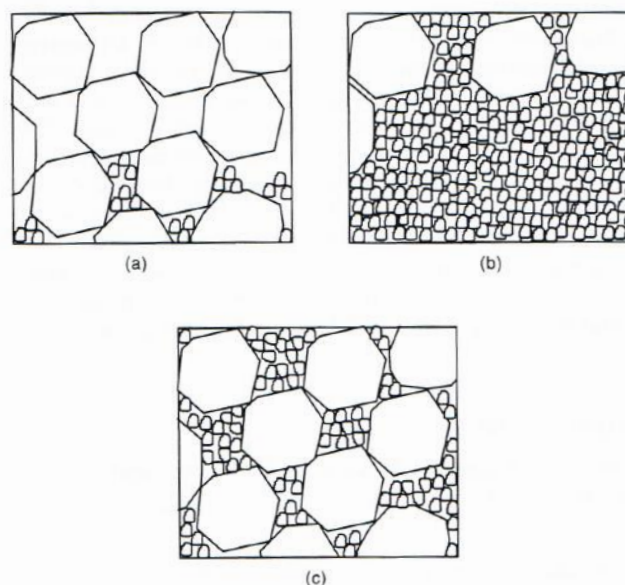
De piekwaarde in de interactiekrommen wordt, behalve voor de combinatie P 2/4 – Z .25/.5, steeds goed voorspeld wanneer de tweede benadering van de korrelafmetingen wordt toegepast. Bij de combinatie P 2/4 – Z .25/.5 ligt de piek volgens de experimentele data bij een 50-50 vol%-verhouding terwijl het model een maximale pakkingsdichtheid voorspelt wanneer de verhouding 60-40 vol% bedraagt waarbij het porfier de dominante hoeveelheid is.

Voor een overzicht van de exacte waarden van de actuele pakkingsdichtheden, de theoretische waarden volgens het *compressible packing model* en de errorwaarden wordt verwezen naar Bijlage D.

6.4.5 Segregatie

Bij het uitvoeren van de proeven wordt gezocht naar een goede verhouding van de granulaten om een zo hoog mogelijke pakkingsdichtheid te bekomen. Wanneer zo'n verhouding gevonden wordt, betekent dit niet onmiddellijk dat dit de beste combinatie is. Zo wordt na het trillen van verschillende mengsels vaak vastgesteld dat deze gesegregeerd zijn. In beton zal segregatie leiden tot een niet-homogeen mengsel. Hierdoor kunnen de eigenschappen van het beton nadelig worden beïnvloed waardoor de duurzaamheid in het gedrang kan komen. Bij het bepalen van de samenstelling van een betonmengsel is het daarom ook belangrijk om ervoor te zorgen dat segregatie niet kan optreden [Larrard, 1999].

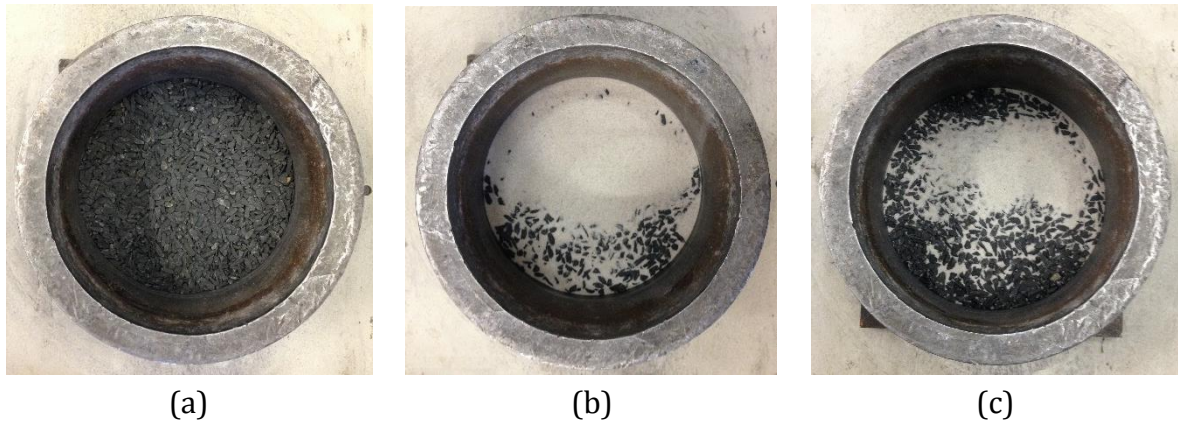
In het geval van een binair mengsel waarbij de verhouding d_2/d_1 zeer klein is, zullen de fijne granulaten zich tussen de grote partikels vestigen indien er een overmaat aan grove granulaten aanwezig is (zie Figuur 6.7(a)). Wanneer de dominante fractie bestaat uit fijne granulaten zullen de grote korrels zich steeds in een bepaalde zone accumuleren. Bij een nat mengsel zullen de grootste deeltjes naar de bodem zinken. Maar bij een droogmengsel dat wordt getrild, hebben de grootste partikels de neiging om naar boven de stijgen (zie Figuur 6.7(b)) [Rosato et al., zoals geciteerd in Larrard, 1999]. Figuur 6.7(c) wil aantonen dat, bij de optimale pakkingsdichtheid van het beschouwde mengsel, de kans op segregatie quasi onbestaande is [Larrard, 1999].



Figuur 6.7: Optreden van segregatie bij verschillende verhoudingen van granulaten van een binair mengsel [Larrard, 1999]

Het bovenstaande wordt ook vastgesteld in het uitgevoerde onderzoek. In Figuur 6.8 wordt voor verschillende verhoudingen van de combinatie B 2/4 – Z .25/.5 een beeld weergegeven van het mengsel na het trillen. Bij de verhouding 80-20 vol% (zie Figuur

6.8(a)) is aan het bovenoppervlak van het mengsel geen enkel spoor van de kleine hoeveelheid fijn materiaal dat in het mengsel aanwezig is. Wanneer de verhoudingen worden omgedraaid, met andere woorden bij de combinatie 20-80 vol% (zie Figuur 6.8(b)) is een zeker aantal basaltkorrels naar het bovenoppervlak gestegen tijdens het trillen van het mengsel. Bij een verhouding van aggregaten in de buurt van de optimale pakkingsdichtheid (zie Figuur 6.8(c)) treedt in de meeste gevallen geen segregatie meer op.



Figuur 6.8: Combinatie B 2/4 - Z .25/.5 in verhoudingen 80-20 vol% (a), 20-80 vol% (b) en 40-60 vol% (c)

6.5 Vergelijking zwaartekrachtsproof en verdichtingsdichtingsproef

Wanneer Tabel 6.2 en Figuur 6.2 worden vergeleken met Tabel 6.4 en Figuur 6.6 blijkt dat de waarden van de pakkingsdichtheid bepaald volgens de verdichtingsproef hoger zijn dan deze die bepaald worden volgens de zwaartekrachtsproof. Dit is logisch aangezien bij de verdichtingsproef meer energie aan het mengsel wordt toegevoegd.

Voor beide proefprocedures stijgt de absolute waarde van de individuele pakkingsdichtheid van de fracties indien de korreldiameter van de granulaten toeneemt. Wanneer wordt gekeken naar de toename van de pakkingsdichtheid ten gevolge van de grotere hoeveelheid energie die wordt toegevoegd bij de verdichtingsproef (zoals wordt weergegeven in Tabel 6.5) blijkt dat, voor eenzelfde granulaat, deze toename relatief gezien groter is voor de korrelfracties met kleinere afmetingen. In het werkstuk van Larrard [1999] wordt vermeld dat compactatie, verkregen door middel van trillingen, efficiënter is voor het verdichten van mengsels met enkel grote korrels. Dit wordt ook in dit onderzoek vastgesteld wanneer enkel naar de absolute waarde van de pakkingsdichtheid wordt gekeken. Wanneer echter de procentuele toename van de individuele pakkingsdichtheden vergeleken worden, blijkt dat de stijging relatief gezien groter is bij fracties met kleinere korrelafmetingen. Bij een gelijke korreldiameter is de stijging van de pakkingsdichtheid het grootst bij de hoekige granulaten.

Tabel 6.5: Vergelijking individuele pakkingsdichtheden zwaartekrachtsproof (ZP) en verdichtingsproef (VP)

Fractie [mm]	PD _{actueel}		Toename [%]
	ZP [-]	VP [-]	
R 4/8	0,587	0,633	7,84
R 2/4	0,550	0,623	13,27
B 4/8	0,493	0,567	15,01
B 2/4	0,451	0,534	18,40
P 2/4	0,497	0,582	17,10
Z .5/1	0,542	0,633	16,79
Z .25/.5	0,544	0,647	18,93
Z .125/.25	0,528	0,633	19,89

In de meeste gevallen ligt de maximale pakkingsdichtheid van eenzelfde combinatie van granulaten voor beide proefmethodes bij dezelfde verhouding van granulaten. Enkel bij de combinatie R 2/4 – Z .25/.5 en B 4/8 – Z .25/.5 verschuift de piek in de interactiekrommen, wanneer extra energie wordt toegevoegd, naar de zijde waar de grove granulaten dominant zijn. Ten gevolge van de grotere hoeveelheid energie die aan het mengsel wordt toegevoegd zullen de grote partikels beter gepakt worden. Hierdoor zijn de holle ruimtes tussen de grote deeltjes kleiner waardoor er minder fijn materiaal noodzakelijk is om deze op te vullen [De Ruyck & Eeckhout, 2006].

In het *compressible packing model* wordt met de grotere hoeveelheid energie die aan het mengsel wordt toegevoegd, rekening gehouden door de waarde van de verdichtingsfactor K aan te passen. De K -waarde wordt verhoogd van 4,1 voor de zwaartekrachtsproef naar 9 voor de verdichtingsproef.

Bij de verdichtingsproef wordt gemiddeld een betere correlatie vastgesteld tussen de experimentele en theoretische waarden van de pakkingsdichtheid dan bij de zwaartekrachtsproef. Een mogelijke verklaring hiervoor ligt in de uitvoering van de zwaartekrachtsproef. Bij deze proef wordt een zekere hoeveelheid van het mengsel die zich buiten het volume van de opvangbeker bevindt, afgeschraapt. Deze beweging wordt zo rustig mogelijk uitgevoerd om te voorkomen dat extra energie aan het mengsel in de opvangbeker wordt toegevoegd. Toch kan dit niet volledig worden geëlimineerd waardoor de deeltjes in de opvangbeker iets dichter op elkaar gepakt zullen worden. Hierdoor kunnen zich meer deeltjes in de opvangbeker bevinden na het afschrapen met als gevolg dat de pakkingsdichtheid van het beschouwde mengsel iets zal overschat worden.

6.6 Besluit in verband met het *compressible packing model*

Het *compressible packing model* geeft een goede benadering van de experimentele waarden van de pakkingsdichtheid wanneer wordt uitgegaan van een K -waarde gelijk aan 4,1 voor de zwaartekrachtsproef en gelijk aan 9 voor de verdichtingsproef. De gemiddelde errorwaarde uit dit onderzoek ligt iets hoger dan in de werken van Larrard [1999] en Fennis [2010] wordt gevonden. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat in deze onderzoeken geen rekening wordt gehouden met combinaties die zowel ronde als hoekige granulaten bevatten. Uit de tabellen in Bijlage C en Bijlage D blijkt immers dat de gemiddelde afwijking voor deze combinaties het grootst is.

7 Natte pakkingsdichtheid – Centrifugale consolidatie

7.1 Keuze van de materialen

In de onderstaande paragraaf worden de gebruikte poeders voor het bepalen van de pakkingsdichtheid met de techniek van de centrifugale consolidatie beschreven. Deze materialen worden gekozen op basis van het eindwerk van Breye & Devos [2013]. In deze masterthesis wordt getracht een optimale samenstelling voor ultra-hogesterktebeton te bekomen.

7.1.1 Cement

Er wordt een cement CEM I 52,5 N-HS/LA gebruikt dat wordt geleverd door Heidelberg. De technische fiche van dit cementtype is terug te vinden in Bijlage A. Uit de naamgeving van het cement kunnen enkele eigenschappen worden afgeleid [HeidelbergCement Group, 2007]:

- De aanduiding CEM I duidt op de samenstelling van het cement. Dit wil zeggen dat het hier een portlandcement betreft dat verkregen wordt door het malen van portlandcementklinker als hoofdcomponent.
- De term 52,5 N heeft betrekking op de mechanische en fysische eigenschappen van het cement. In dit experimenteel onderzoek wordt gebruik gemaakt van een cement met een normsterkte van 52,5 N/mm². Deze normsterkte is de minimale druksterkte die wordt gemeten na 28 dagen op normprisma's. De N duidt aan dat het om een cement met een normale beginsterkte gaat.
- Als laatste worden de speciale eigenschappen van het cement weergegeven in de naamgeving. HS duidt op een verhoogde weerstand tegen sulfaten. Het cement heeft tevens een laag alkaligehalte, dit wordt weergegeven door de term LA.

7.1.2 Silica fume

Tijdens de proeven worden verschillende soorten silica fume (SF) gebruikt. Drie soorten grijze silica fume, namelijk 940D, 940U en 920D, en een microwhite silica fume afkomstig van de fabrikant Elkem. Van Condensil worden twee soorten silica fume gebruikt, namelijk een grijze silica fume S95 DS en microwhite. De technische fiches en de chemische samenstellingen van deze materialen zijn terug te vinden in Bijlage A.

7.1.3 Vulstof

Bij de proeven worden vijf melen, namelijk M4, M400, M800, P2 en B25, en een vliegas gebruikt. De technische fiches en chemische samenstellingen van deze materialen zijn terug te vinden in Bijlage A. P2 en B25 zijn beide kalksteenmelen, in tegenstelling tot de andere melen die behoren tot de categorie van de kwartsmelen.

7.1.4 Hulpstof

Als hulpstof wordt de PCE-superplastificeerder (SP) Glenium 51 van BASF gebruikt. Het droge stofgehalte van deze SP is gelijk aan 35 %. De technische gegevens kunnen teruggevonden worden in Bijlage A.

De werking van SP als hulpstof wordt uitgelegd in paragraaf 5.4. De hoeveelheid SP, die per mengsel wordt toegevoegd, wordt verduidelijkt in paragraaf 7.5.2.

7.2 Eigenschappen van de materialen

7.2.1 Bepalen van de dichtheden

Van alle materialen die in hoofdstuk 7.1 vermeld worden, wordt de dichtheid bepaald met behulp van een pyknometer. Deze proef wordt uitgevoerd zoals beschreven in de norm NBN EN 1097-7:2008. Voor deze proef wordt isopropanol gebruikt als vloeistof om de dichtheid van poeders te bepalen. Hierdoor wordt een reactie tussen de vloeistof en het poeder vermeden [NBN EN 1097-7, 2008]. Van de geteste poeders is echter enkel cement reactief in combinatie met water. In de onderstaande tabel worden de resultaten van deze test weergegeven.

Tabel 7.1: Dichtheden gebruikte materialen

Materiaal	Dichtheid [kg/m ³]
Cement CEM I 52,5 N-HS-LA*	3137
Silica fume	
940D	2217
920D	2187
940U	2128
Microwhite – Elkem	2204
S95 DS	2192
Microwhite – Condensil	2084
Meel	
M4*	2650
M400*	2650
M800*	2650
P2*	2650
B25	2650
Vliegas**	2136

* Waarden ontleend aan Breye & Devos [2013].

** Waarde verkregen van ir.-arch. P. Van den Heede.

7.2.2 Opstellen van de natte zeefkrommes

7.2.2.1 Eigenschappen van het toestel

Voor het opstellen van de natte zeefkrommes wordt de laserdiffractometer Malvern Mastersizer 2000 gebruikt. Tabel 7.2 geeft een overzicht van de eigenschappen van deze laserdiffractometer, terwijl Tabel 7.3 op zijn beurt de eigenschappen van de natte eenheid, de Hydro SM, opsomt. Het volledige toestel, inclusief natte eenheid, wordt afgebeeld in Figuur 7.1.

Tabel 7.2: Eigenschappen Mastersizer 2000

Type	Mastersizer 2000
Meetbereik	0,02 – 2000 μm
Meetprincipe	Mie-methode

Tabel 7.3: Eigenschappen Hydro SM

Pompsnelheid	350 – 3500 rpm
Maximaal debiet	2,3 l/min
Maximaal volume	50 – 120 ml
Maximale deeltjesgrootte	600 μm
Tijd tussen twee metingen	< 60 s



Figuur 7.1: Malvern Mastersizer 2000, inclusief natte eenheid Hydro SM

7.2.2.2 Werking en invloedsfactoren

De eerste stap in het bepalen van de natte pakkingsdichtheid is het opstellen van de zeefkrommes van de individuele poeders. Aan de hand van deze zeefkrommes is het mogelijk de materialen te karakteriseren op basis van de kenmerkende diameter (d_{50}) en de specifieke oppervlakte die hieruit wordt berekend.

De zeefkrommes van de poeders worden opgesteld met behulp van de laserdiffractometer (Malvern Mastersizer 2000), inclusief natte eenheid. Het gebruik van deze natte eenheid heeft als doel agglomeratie van de kleine partikels zoveel mogelijk te vermijden [Fennis, 2010]. Met de *laser light scattering*-techniek (LLS), waarop het werkingsprincipe van dit toestel is gebaseerd, kunnen korreldiameters in een bereik van 0,02 μm tot 2000 μm gemeten worden. Deze techniek berust op het feit dat de diffractiehoeken van de laserstralen op het oppervlak van de deeltjes omgekeerd evenredig zijn met de deeltjesgrootte. Uit een analyse van de projectie van deze gediffracteerde lichtgolf kunnen de korrelgroottes berekend worden [Hunger, 2010]. Deze berekening gebeurt op basis van het Lorenz – Mie model [Breye & De Vos, 2013]. Dit model houdt naast de gediffracteerde lichtstraal, ook rekening met de gebroken en gereflecteerde lichtgolf. Een goede kennis van de optische eigenschappen van de materialen is voor dit model uitermate belangrijk. Deze eigenschappen worden uitgedrukt aan de hand van het reële en imaginaire deel van de refractie-index, die bekomen wordt uitgaande van formule (7.1).

$$N = n - ik \quad (7.1)$$

Met:

- $N [-]$, de refractie-index;
- $n [-]$, het reële deel van de refractie-index, afhankelijk van de aard van het materiaal;
- $ik [-]$, het imaginaire deel van de refractie-index. Dit gedeelte karakteriseert de totale absorptie van de partikels. Net als het reële gedeelte is ook dit afhankelijk van de aard van het gebruikte materiaal.

Zoals hierboven reeds vermeld, is de refractie-index afhankelijk van de aard van het materiaal. Tabel 7.4 geeft voor elk materiaal een overzicht van het reële en imaginaire gedeelte van deze index, die later in het programma van de laserdiffractometer wordt ingevoerd. Een belangrijke opmerking hierbij is dat de waarde vermeld voor silica fume, geldig is voor een silica fume met een grijze kleur zoals bijvoorbeeld SF 940U of SF 940D. Het gebruik van een witte silica fume, zoals bijvoorbeeld Microwhite, vraagt een verlaging van de absorptie-index van 0,001 naar 0,0001. De reden hiervoor ligt in het verschillend absorptiegedrag van de twee kleuren. Wit zal in vergelijking met grijs veel minder licht absorberen. De keuze van de absorptie-index voor een witte silica fume gebeurt op aanraden van ir. E. Arvaniti.

Tabel 7.4: Optische eigenschappen van poedervormige materialen
[Cyr & Tagnit - Hamou]

Materiaal	Reëel deel	Imaginair deel
Cement	1,73	0,003
Meel	1,55	0,001
Vliegas	1,73	0,100
Silica fume	1,53	0,001

Naast de optische eigenschappen is ook de geometrie van de partikels een belangrijke factor bij het opstellen van de zeefkrommes. Tabel 7.5 geeft de partikelvorm weer van de poeders waarmee in deze proefopstelling wordt gewerkt.

Tabel 7.5: Overzicht partikelvorm
[Mindess, 2006]

Materiaal	Partikelvorm
Portland cement	onregelmatig
Vliegas	sferisch
Silica fume	sferisch

Opmerking

In deze testreeks wordt de partikelvorm van meel als onregelmatig aangenomen.

7.2.2.3 Testprocedure

De testprocedure start met het opstellen van de zeefkrommes van cement, vliegas en verschillende melen. Er worden in totaal drie verschillende types melen gebruikt. M4, M400 en M800 behoren tot de kwartsmelen, P2 wordt aangeduid als een kalksteenmeel en B25 is een bauxietmeel. De testprocedure van al deze materialen verloopt analoog en gaat van start met het afwegen van 1 g poeder, waaraan 50 ml isopropanol wordt toegevoegd. Het gebruik van isopropanol als dispersiemedium is aangewezen wanneer men werkt met een reactief poeder, zoals bijvoorbeeld cement. Het medium moet er namelijk voor zorgen dat het poeder geen reacties kan uitlokken [Hunger, 2010]. In tegenstelling tot het cement zijn de melen niet reactief, maar er wordt toch gekozen om ook in dit geval isopropanol te gebruiken. Aangezien tijdens de testen geen problemen worden vastgesteld bij het oplossen van de deeltjes, wordt dit medium voor alle melen en vliegas toegepast.

Om de dispersie van de deeltjes volledig tot stand te laten komen, wordt het mengsel van poeder en isopropanol gedurende 5 minuten gesonificeerd in een ultrasoon bad met frequentie 35 kHz, dat op zijn beurt gevuld is met isopropanol. Het gedispergeerde mengsel wordt in de natte eenheid van het meettoestel gepipetteerd tot wanneer de obscuratielimiet is bereikt. Deze limiet is een maat voor de concentratie aan deeltjes die

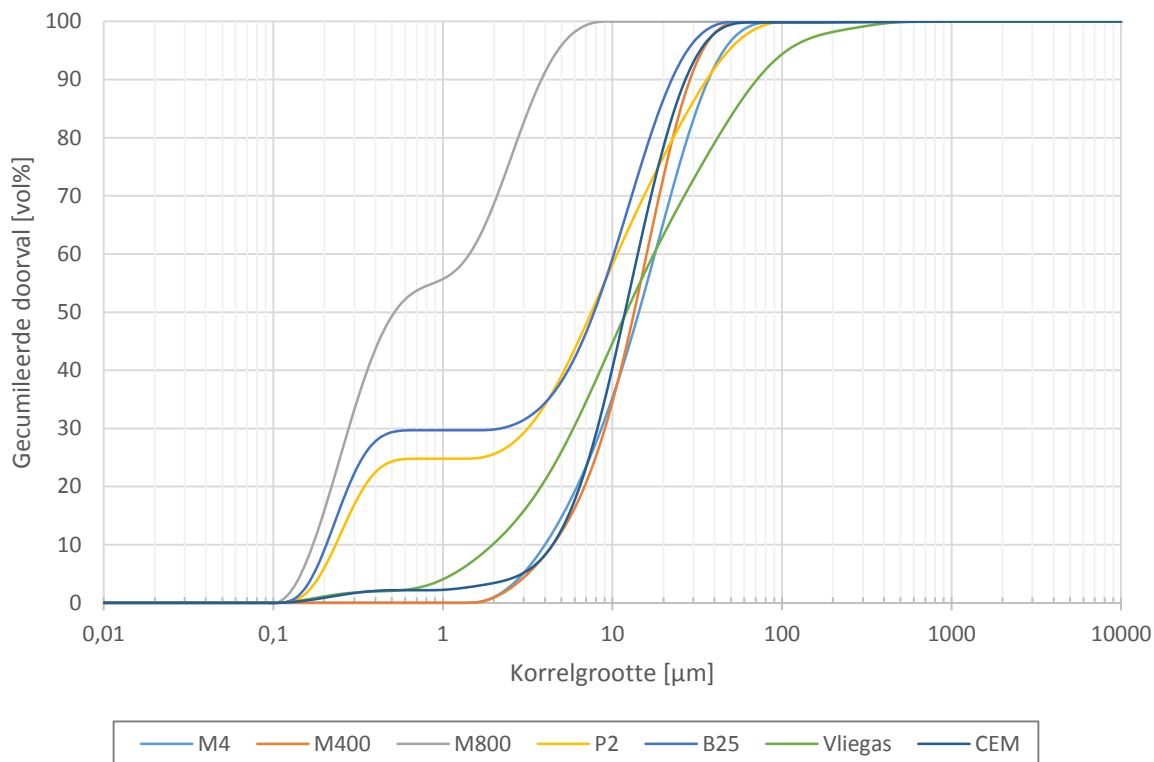
zich voor de laser bevindt en ligt voor deze materialen tussen de 12 % en 15 %. Het volume in de natte eenheid wordt voor elke proef constant gehouden op 90 ml isopropanol en de pompsnelheid bedraagt 800 rpm.

Na de analyse van de materialen wordt de kwaliteit van de meting voorgesteld aan de hand van de *residual*- en de *residual weighted*-waarde. Bij een goede meting liggen deze waarden onder de eenheid en dicht bij elkaar. Een klein verschil tussen deze waarden wijst op een goede fit tussen de experimentele en theoretische zeefkromme. De metingen worden een aantal keer herhaald, al dan niet met hetzelfde monster, afhankelijk van de kwaliteit van de meetresultaten. Tussen elke meting in wordt de natte eenheid gereinigd. Uit de verkregen data worden telkens drie kwaliteitsvolle metingen behouden. Hiervan worden de gemiddelde waarden berekend, wat het mogelijk maakt de waarden voor d_{10} , d_{50} en d_{90} per poeder vast te leggen.

Tabel 7.6 geeft een overzicht van de verkregen data, terwijl Figuur 7.2 de gecumuleerde zeefkrommes van de materialen voorstelt. Uit de grafiek blijkt duidelijk dat M800 veruit het fijnste materiaal is. Dit verschijnsel wordt kracht bijgezet door de waarden uit Tabel 7.6. Hieruit blijkt dat de karakteristieke korreldiameters ongeveer 25 keer kleiner zijn dan in het geval van cement. Wanneer cement wordt gecombineerd met M800, zullen de deeltjes van het kwartsmeel in staat zijn de holtes tussen de cementpartikels op te vullen. Dit in tegenstelling tot het gebruik van M4, dat grover is dan cement. Hierbij zal het cement de holtes tussen de partikels van het meel moeten opvullen. M400 is dan weer heel gelijkaardig aan cement. Niet alleen M800, maar ook P2 en B25 vertonen grote verschillen op het vlak van de kleine partikels. Bij deze poeders zijn veel meer kleinere deeltjes aanwezig dan in het geval van cement. De afmetingen van de grotere deeltjes zijn dan weer zeer gelijkaardig. Bij de vergelijking tussen vliegias en cement is een grote gelijkenis op het vlak van de kenmerkende diameter zichtbaar.

Tabel 7.6: Karakteristieke korreldiameters melen, vliegias en cement

Materiaal	d_{10} [μm]	d_{50} [μm]	d_{90} [μm]
M4	4,012	14,320	36,881
M400	4,498	13,426	28,626
M800	0,171	0,522	3,812
P2	0,234	7,523	36,083
B25	0,206	7,803	22,360
Vliegias	1,967	12,187	71,371
Cement	4,449	11,876	26,911



Figuur 7.2: Gecumuleerde zeefkrommes melen, vliegias en cement

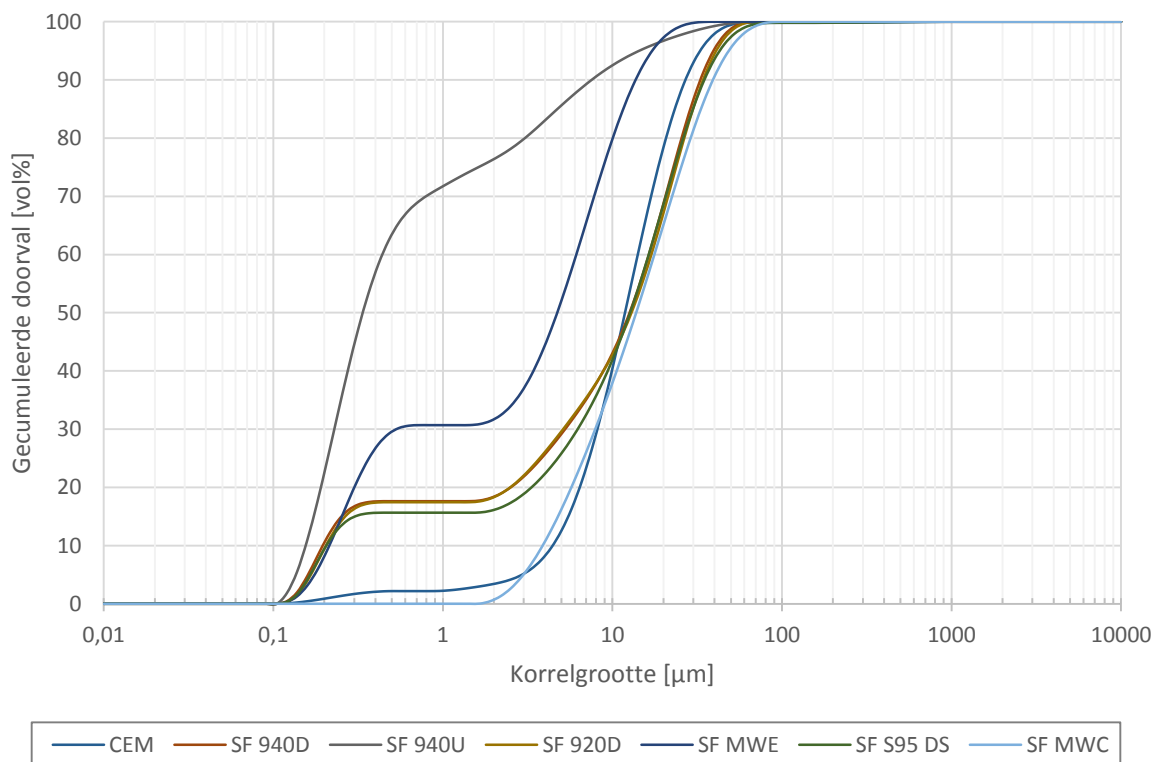
Een tweede reeks zeefkrommen wordt opgesteld met verschillende soorten silica fume, waarbij ook de invloed van het al dan niet toevoegen van SP wordt onderzocht. In eerste instantie wordt geprobeerd een analoge testprocedure als bij cement te hanteren. Aangezien hierbij veel problemen zijn met het dispergeren van de deeltjes, wordt overgeschakeld op gedestilleerd water. Silica fume behoort immers tot de niet-reactieve poeders, waardoor het gebruik van gedestilleerd water meer aangewezen is als dispersiemedium [Hunger, 2010].

In eerste instantie worden de zeefkrommes zonder toevoeging van SP opgesteld. Hierbij wordt 1 g silica fume gemengd met 50 ml gedestilleerd water. Om de dispersie van het mengsel tot stand te brengen wordt opnieuw gedurende 5 min gesonificeerd in een ultrasoon bad met een frequentie van 35 kHz. Het verdere verloop van de proef wordt, in vergelijking met de testprocedure gehanteerd bij cement, aangepast op aanraden van ir. E. Arvaniti. Zo wordt eerst en vooral de obscuratielimitet verlaagd naar 5 % tot 10 %. Deze verlaging is noodzakelijk om te vermijden dat sommige lichtstralen tweemaal worden gebroken op de deeltjes van het materiaal. De pompsnelheid wordt verhoogd van 800 rpm naar 2000 rpm. Het volume in de natte eenheid, die nu wordt voorzien van gedestilleerd water, wordt ook in deze testreeks constant gehouden op 90 ml. Tabel 7.7 geeft een overzicht van de meetresultaten. Figuur 7.3 stelt de gecumuleerde zeefkrommes van de verschillende soorten silica fume voor. Hieruit blijkt dat de verschillende types silica fume, die in het verdere proefprogramma worden aangewend zoals 940U, 940D en MWE allemaal fijner zijn dan cement. Zoals besproken in paragraaf 5.2 doet silica fume

dienst als vuller en zullen de partikels bijgevolg de holtes tussen de cementdeeltjes opvullen.

Tabel 7.7: Karakteristieke korreldiameters silica fume zonder toevoeging SP

Materiaal	d ₁₀ [μm]	d ₅₀ [μm]	d ₉₀ [μm]
SF 940D	0,196	12,627	32,988
SF 940U	0,155	0,336	7,553
SF 920D	0,205	12,980	34,141
SF MW E	0,214	4,724	13,695
SF S95 DS	0,205	12,754	34,817
SF MW C	3,881	13,810	39,142
Cement	4,449	11,876	26,911



Figuur 7.3: Gecumuleerde zeefkrommes silica fume zonder toevoeging van SP

Tijdens de laatste testreeks wordt het effect van het toevoegen van SP aan een mengsel van silica fume en gedestilleerd water onderzocht. Er wordt in totaal 10 % (m_{sol}/m_{poeder}) SP toegevoegd. Dit houdt in dat zowel de hoeveelheid silica fume als de hoeveelheid water moet vergroten, wil men een nauwkeurige hoeveelheid SP kunnen toevoegen. Het mengsel wordt nu samengesteld met 20 g silica fume en 1 l gedestilleerd water. In deze testreeks wordt onmiddellijk gewerkt met gedestilleerd water, om problemen zoals besproken in voorgaande paragraaf uit de weg te gaan. De obscuratielimit en pompsnelheid blijven onveranderd. Het mengsel wordt tijdens deze proeven eerst 5 min

gesonificeerd, daarna wordt de hoeveelheid SP nauwkeurig toegevoegd om tenslotte af te sluiten met opnieuw 5 min in een ultrasoon bad. Dit bad sonificeert met een frequentie van 35 kHz. Net als in voorgaande testreeks, treedt hier een analoog probleem op. De dispersie van de deeltjes gebeurt onvolledig en de deeltjes bezinken in de pipet. Hierdoor bestaat de kans dat het mengsel in de natte eenheid niet representatief is voor de samenstelling van het gebruikte silica fume. Dit verschijnsel treedt zowel op bij witte als grijze silica fume, waardoor het onmogelijk wordt een correcte meting uit te voeren. Om die reden wordt bijkomend gesonificeerd tussen de verschillende metingen en dat telkens gedurende 5 min. Dit levert weinig zichtbaar resultaat. Het onvoldoende dispergeren van de partikels wordt geïllustreerd met Figuur 7.4.

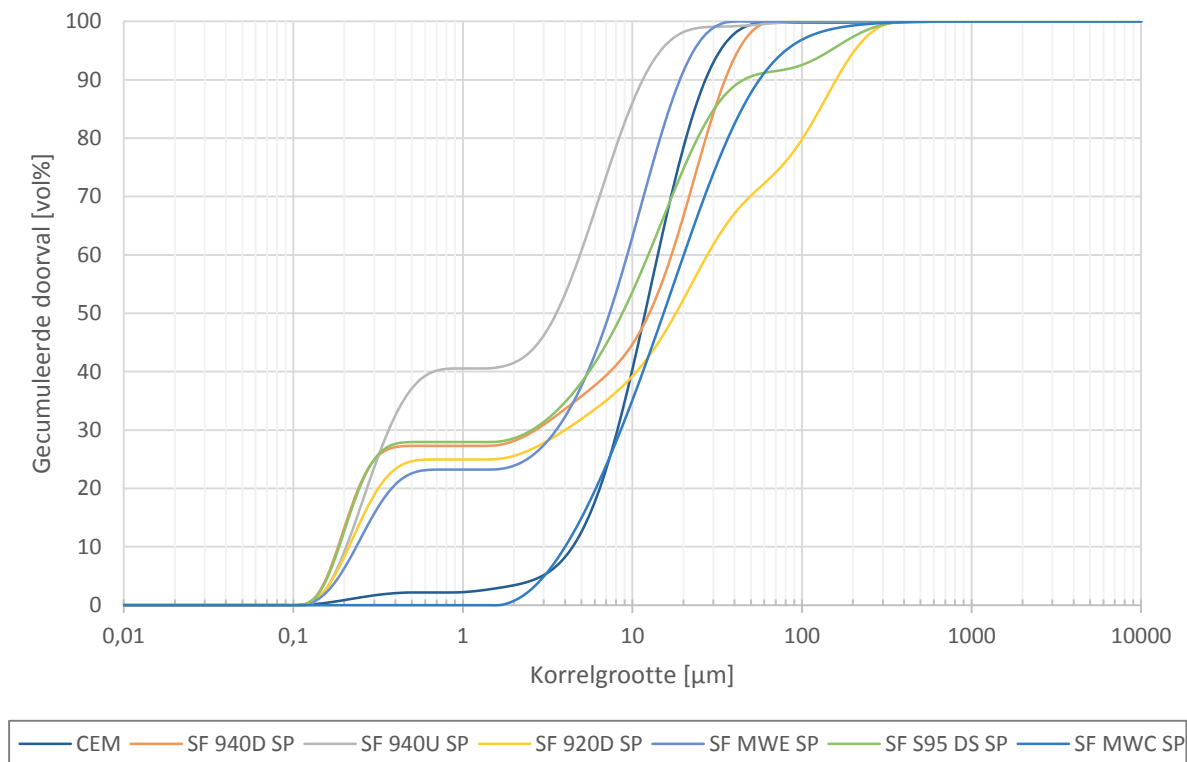


Figuur 7.4: Onvolledige dispersie van de SF-partikels

Tabel 7.8 geeft een overzicht van de resultaten. Figuur 7.5 stelt de gecumuleerde zeefkrommes voor van de verschillende soorten silica fume, met toevoeging van SP.

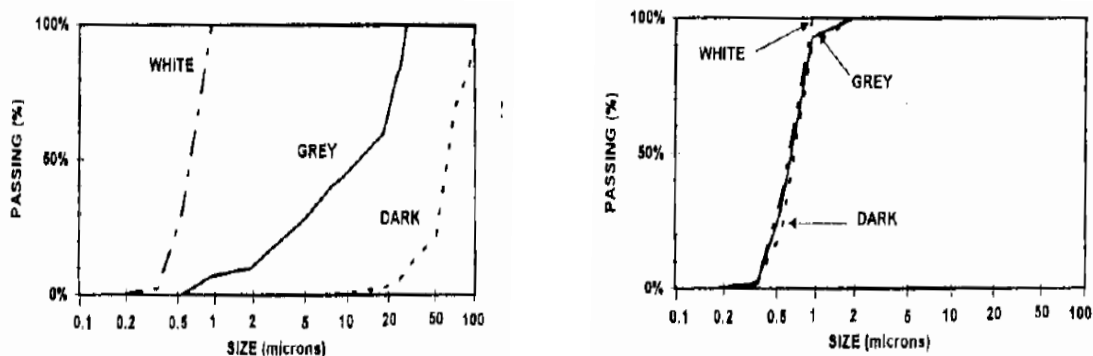
Tabel 7.8: Karakteristieke korreldiameters silica fume met toevoeging van SP

Materiaal	d₁₀ [μm]	d₅₀ [μm]	d₉₀ [μm]
SF 940D	0,184	12,574	35,128
SF 940U	0,179	3,115	10,168
SF 920D	0,218	17,950	158,884
SF MW E	0,235	7,322	19,029
SF S95 DS	0,186	8,787	73,013
SF MW C	4,009	15,286	56,079
Cement	4,449	11,876	26,911



Figuur 7.5: Gecumuleerde zeefkrommes silica fume met toevoeging van SP

Coppola et al. [1996] onderzochten reeds eerder het effect van SP en kwamen tot het besluit dat de lasergranulometrie van de witte deeltjes niet afhangt van het al dan niet aanwezig zijn van SP. Dit in tegenstelling tot de grijskleurige silica fume, waarvan de kenmerkende diameter veel kleiner wordt door de toevoeging van een bepaalde hoeveelheid SP. De kenmerkende diameter wordt in het geval van grijze silica fume verlaagd van 13,87 μm naar 0,76 μm . Dit effect wordt geïllustreerd op Figuur 7.6. Staquet & Espion [2002] komen tot hetzelfde resultaat. In tegenstelling tot deze onderzoeken treedt dergelijk fenomeen in deze testreeks niet op. De d_{50} blijft zowel bij witte als grijze silica fume ongeveer gelijk. De onvolledige dispersie van de deeltjes is een mogelijke verklaring. Ook de ouderdom van de materialen zal een zekere invloed uitoefenen op de verkregen resultaten.



Figuur 7.6: Invloed SP op witte en grijze silica fume [Coppola et al, 1996]

7.3 Extra zeefkrommes

Voor het bepalen van de theoretische waarden van de pakingsdichtheid worden naast de in paragraaf ... bepaalde zeefkrommes enkele extra zeefkrommes gebruikt. Het gaat om de volgende zeefkrommes waarvan de grafiek in Bijlage E kan worden teruggevonden:

- De natte zeefkrommes van SF 940D, SF 940U en SF MWE bepaald met behulp van de Malvern Zetasizer Nano ZS. Deze laserdiffractometer maakt gebruik van de *dynamic light scattering*-techniek (DLS). Deze worden bepaald door ir. J. Dils.
- De droge zeefkromme van cement. Deze werd in het onderzoek van uit Breye & De Vos [2013] bepaald met de droge eenheid van de Mastersizer 2000.

7.4 Eigenschappen van de toestellen

7.4.1 Menger

De proeven worden uitgevoerd met behulp van een Eirich-intensiefmenger. Dit toestel bevindt zich in het labo Magnel te Zwijnaarde. Deze menger is ook in staat onder variërende luchtdruk te mengen, waardoor het mogelijk is om onder vacuüm of onder semivacuüm omstandigheden te mengen. Tabel 7.9 geeft de verschillende eigenschappen van de menger weer. Figuur 7.7 en Figuur 7.8 geven een beeld van de menger.

Tabel 7.9: Eigenschappen Eirich-menger

Type	R 02 VAC
Snelheid mengbak	42 – 83 rpm
Snelheid rotor	70 – 4535 rpm
Mengbakdiameter	235 mm
Mengbakhoogte	230 mm



Figuur 7.7: Menger in open toestand



Figuur 7.8: Menger in gesloten toestand

7.4.2 Centrifuge

De centrifugale consolidatie wordt uitgevoerd met behulp van de Heraeus Labofuge 400. Dit toestel bevindt zich in het laboratorium Magnel voor Betononderzoek te Zwijnaarde en wordt gebruikt om aan de gemaakte pasta een bepaalde hoeveelheid energie over te dragen en deze te verdichten. Tabel 7.10 somt de verschillende eigenschappen van de centrifuge op terwijl Figuur 7.9 het gebruikte toestel weergeeft.

Tabel 7.10: Eigenschappen centrifuge

Type	Heraeus Labofuge 400
Maximum capaciteit	4 x 100 ml
Snelheid	300 – 3500 rpm



Figuur 7.9: Heraeus Labofuge 400

De buisjes die gebruikt worden in de centrifuge zijn vervaardigd uit plastic en hebben een binnendiameter van 25 mm en een totaal volume van 50 ml. Ze zijn onderaan voorzien van een conische punt. Deze conische punt moet normaal gezien opgevuld worden met een epoxy om een vlakke bodem te verkrijgen. Door die vlakke bodem zal de radiale spanning die werkt op de cementpasta gelijkmatig verdeeld worden. Aangezien de epoxy tijdens het centrifugeren los komt en zich na het centrifugeren bovenop de cementpasta bevindt, is het gebruik hiervan niet mogelijk en worden de proeven uitgevoerd zonder een epoxy. Het positioneren van de buisjes in de centrifuge gebeurt door gebruik te maken van *buckets* met als diameter 35 mm.

7.5 Samenstelling van de mengsels

7.5.1 Verhouding poeders

Voor het maken van de cementpasta's wordt voorgesteld om het totale volume aan poeders aanwezig in het mengsel constant te houden. Dit volume bedraagt 0,968 l en wordt overgenomen uit het eindwerk van Breye & De Vos [2013]. Aan de hand van dit totale volume kan de nodige hoeveelheid cement, silica fume, meel en vliegas worden berekend.

De keuze van de verhoudingen van de twee gebruikte poeders wordt bepaald op basis van de opgemeten natte zeefkrommes van de verschillende materialen. In Sedran [1999] en Fennis [2010] blijkt dat de pakkingsdichtheid steeds het grootst is voor mengsels waar de grove fractie dominant is.

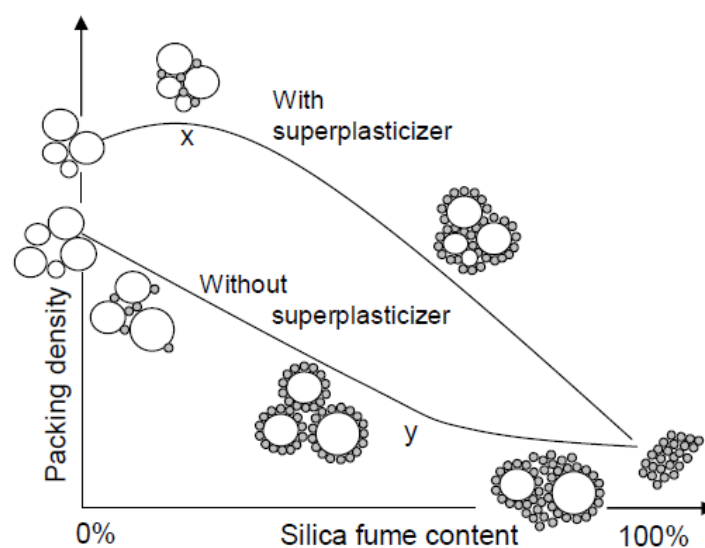
Aangezien uit Figuur 7.3 blijkt dat de deeltjes van de verschillende soorten silica fume, die in deze proefmethode aangewend worden, kleiner zijn dan de deeltjes van cement, zal de piek in de interactiekromme zich voordoen bij grotere volumepercentages cement. Om deze reden wordt er gekozen een groter aantal punten te bepalen in de ene helft van de interactiekromme, waar het volumepercentage van cement groter is dan 50 %, dan in de helft waar het volumepercentage van cement kleiner is dan 50 %. Dezelfde werkwijze kan toegepast worden in het geval van M800.

Voor vliegas ligt de situatie evenwel anders. Zoals blijkt uit Figuur 7.3, vertoont de cumulatieve zeefkromme van vliegas grote gelijkenissen met deze van cement. Hierdoor is het niet mogelijk om op een eenduidige manier een grove en fijne fractie aan te duiden. Bij het opstellen van de interactiekromme zal het daardoor in eerste instantie noodzakelijk zijn in beide helften van de grafiek evenveel punten te bepalen. Eenmaal het ontstaan van een piek zichtbaar wordt, kan rond deze verhouding van cement en vliegas meer in detail worden nagegaan waar de maximale pakkingsdichtheid zich precies bevindt.

Een belangrijke opmerking moet gemaakt worden in verband met de individuele pakkingsdichtheden van de poeders. In Breye & De Vos [2013] wordt bij het bepalen van de individuele pakkingsdichtheid van 100 % silica fume een grote spreiding op de resultaten waargenomen. Om deze reden wordt beslist om de pakkingsdichtheid te bepalen van een mengsel bestaande uit 10 % CEM + 90 % SF. Ook Sedran [1999] ondervindt bij het maken van zijn mengsels dat de pakkingsdichtheid van 100% niet in lijn ligt met de opgestelde interactiekrommen. De individuele pakkingsdichtheden liggen enerzijds veel te hoog, in andere gevallen dan weer veel te laag. De te lage waarde van de pakkingsdichtheid kan verklaard worden door het gebrek aan een binder, of met andere woorden het gebrek aan cement, waardoor de SP niet in staat is een binding te realiseren.

De te hoge waarde van de individuele pakkingsdichtheid kan anderzijds verklaard worden door de watervraag van silica fume die minder makkelijk te bepalen is dan in het geval van cement, waardoor het moeilijk wordt een homogeen mengsel te creëren. De beste oplossing om de individuele pakkingsdichtheid te bepalen is door ze te extrapoleren uit de pakkingsdichtheid van het mengsel 90 % poeder + 10 % CEM en het mengsel bestaande uit 70 % poeder + 30 % CEM.

Het gebruik van lineaire extrapolatie om de individuele pakkingsdichtheid te bepalen volgt ook uit Kjeldsen [2007]. Figuur 7.10 toont het effect van een SP op de pakkingsdichtheid van silica fume. Hieruit volgt dat wanneer de maximale pakkingsdichtheid is bereikt, de interactiekromme een lineair verloop vertoont tot aan de individuele pakkingsdichtheid van silica fume.



Figuur 7.10: Effect van de toevoeging van SP op de pakkingsdichtheid van silica fume [Kjeldsen, 2010]

7.5.2 Hoeveelheid superplastificeerder

Het gehalte aan SP dat in dit onderzoek nodig is om de gebruikte mengsels te verzadigen, wordt bepaald met behulp van een Funneltest. Deze test wordt uitgevoerd aan de Katholieke Hogeschool Sint – Lieven Campus Gent. Voor meer informatie over deze test wordt verwezen naar De Reu & Van Compernelle [2014].

De hoeveelheid SP (m_{sol}/m_{poeder}) wordt telkens bepaald voor de mengsels 100 % CEM en 90 % poeder + 10 % CEM en dit bij twee verschillende W/P-factoren, waarvan de waarden terug te vinden zijn in Tabel 7.11. Voor de overige mengverhoudingen en bij de gekozen W/P-factor wordt de toe te passen hoeveelheid SP geïnterpoleerd tussen de waarden bekomen uit de Funneltest.

Tabel 7.11: Overzicht gehalte SP bepaald via Funneltest

Mengverhouding	W/P-factor [-]	SP-gehalte Funneltest [%]	Toegepast SP-gehalte [%]
100 % CEM	0,25 en 0,30	0,48 en 0,31	1,25 en 0,85
10 % CEM + 90 % SF 940D	0,50 en 0,60	2,10 en 1,06	5,50 en 2,78
10 % CEM + 90 % SF 940U	0,50 en 0,60	1,53 en 1,21	4,02 en 3,16
10 % CEM + 90 % SF MWE	0,50 en 0,60	1,09 en 0,66	2,87 en 1,74
10 % CEM + 90 % M4	0,40 en 0,50	0,10 en 0,04	0,27 en 0,11
10 % CEM + 90 % M400	0,50 en 0,60	0,12 en 0,08	0,33 en 0,22
10 % CEM + 90 % M800	0,50 en 0,60	0,25 en 0,23	0,66 en 0,62
10 % CEM + 90 % vliegas	0,50 en 0,60	1,53 en 1,21	4,02 en 3,16

Opmerking

Het gehalte SP van de combinatie CEM – vliegas is niet bepaald uitgaande van een Funneltest. Aangezien vliegas zich meer gaat gedragen als een silica fume dan als een cement [Hunger, 2010], worden de waarden van SF 940U aangenomen als SP-gehalte voor vliegas.

Zoals blijkt uit Tabel 7.11, is de toegepaste hoeveelheid SP groter dan de waarden verkregen uit de Funneltest. Het toepassen van een veiligheidsfactor op het SP-gehalte is analoog aan de methode gehanteerd door Sedran [1999]. Deze veiligheidsfactor zorgt er namelijk voor dat het toepassen van onverzadigde mengsels tot een minimum wordt beperkt. De veiligheidsfactor voor de combinatie CEM – SF is gelegen tussen de 1,57 en 1,71. In het geval van M800 is deze veiligheidsfactor gelegen tussen de 1,54 en 1,70. In het geval van vliegas ligt deze waarde tussen de 1,57 en 1,71.

7.5.3 W/P-factor

De W/P-factor die wordt toegepast voor het bepalen van de maximale pakkingsdichtheid van de mengsels wordt zodanig gekozen dat:

- Er zich na het centrifugeren van de proefmonsters een waterlaagje heeft afgescheiden van de cementpasta (ondergrens). Dit waterlaagje kan bijgevolg gepipetteerd worden.
- De mix na het mengen niet gesegregeerd is en de slump flow kleiner is dan 30 cm (bovengrens).

7.6 Mengprocedure en centrifugeren

Allereerst wordt de nodige hoeveelheid van elk poeder in de combinatie afgewogen en wordt het juiste volume SP en water klaargezet. De poeders worden vervolgens in de mixer gedeponerd, waarna ze gedurende 15 seconden droog worden gemengd aan een snelheid van 250 rpm. Vervolgens wordt de exacte hoeveelheid water aan het mengsel toegevoegd en wordt het geheel 10 sec gemengd. Nadien wordt de nodige hoeveelheid SP toegevoegd. Na het verwijderen van eventuele klonters tussen de bewegende delen van de menger, wordt de snelheid van het mengsel opgedreven naar 910 rpm gedurende 2 min 30 s. De mengprocedure wordt afgesloten door de snelheid gedurende 2 min te verlagen naar 250 rpm alvorens de menger uit te schakelen.

Na het uitvoeren van een controle op segregatie, wordt in eerste instantie een slump flow-test verricht op de verse pasta. Deze test wordt uitgevoerd met behulp van een afgeknotte kegel en wordt uitvoerig besproken in paragraaf 7.9. Met het overige gedeelte van het mengsel worden vervolgens vier proefbuisjes gevuld. Deze buisjes worden gewogen en nadien in centrifuge geplaatst, waarin ze gedurende 15 min aan een snelheid van 3500 rpm gecentrifugeerd worden.

Wanneer de centrifuge tot stilstand komt wordt het waterlaagje, dat zich bovenop de pasta heeft gevormd, uit de proefbuis gepipetteerd en gewogen. Deze proef wordt voor elke combinatie drie keer herhaald, waarbij steeds een andere waarde voor de W/P-factor wordt aangenomen.

In vergelijking met de proefmethode gehanteerd door Fennis [2011], zijn een aantal verschillen merkbaar, zowel bij het mengen als op het vlak van centrifugeren. De proefmethode start met het droog mengen van de poeders op een lage snelheid gedurende 10 s, waarna de nodige hoeveelheid SP en water wordt toegevoegd. Vervolgens wordt het mengsel op dezelfde lage snelheid verder gemengd. Dit in tegenstelling tot de procedure die in dit onderzoek wordt gehanteerd, waarbij na het toevoegen van de juiste hoeveelheid bindmiddel en water het toerental wordt opgedreven. Nadien wordt de menger gedurende 1 min stopgezet. Deze pauze wordt gebruikt om de pasta, die zich aan de wand heeft gehecht, af te schrapen. De testprocedure wordt afgesloten door het mengen gedurende 1 min te hervatten op lage snelheid. Het grootste verschil op vlak van centrifugeren is zichtbaar in het gebruikte toerental. Fennis [2011] centrifugeert op 4000 rpm gedurende 10 min, terwijl in dit onderzoek een toerental van 3500 rpm wordt toegepast. Met dit toerental is de maximale capaciteit van het toestel bereikt. Om toch een vergelijkbare energieoverdracht te realiseren wordt er 5 min langer gecentrifugeerd. Het bepalen van de pakkingsdichtheid gebeurt in beide proefmethoden op analoge manier.

7.7 Actuele pakkingsdichtheid

7.7.1 Bepalen van de actuele pakkingsdichtheid

De pakkingsdichtheid die hoort bij een mengsel met een bepaalde verhouding van poeders kan bepaald worden aan de hand van de techniek van de centrifugale consolidatie. Het nadeel van deze techniek is dat deze meerdere malen moet uitgevoerd worden om de actuele pakkingsdichtheid van een bepaalde verhouding van poeders te kunnen bepalen [Fennis, 2010].

Na het uitvoeren van de mengprocedure en het centrifugeren van het mengsel, zoals wordt beschreven in paragraaf 7.6, zijn de volgende gegevens beschikbaar:

- de dichtheden van de gebruikte poeders en van het aanmaakwater;
- de massa m_{pasta} van de cementpasta die in het proefbuisje is aangebracht;
- de W/P-factor van het mengsel;
- de massa m_w van de hoeveelheid water die zich in het proefbuisje bovenop de cementpasta bevindt na het centrifugeren;

Met deze gegevens kan de pakkingsdichtheid van het beschouwde mengsel aan de hand van de formule (7.2) bepaald worden:

$$PD = \frac{1000}{1000 + \rho_{\text{gem}} \frac{m_{\text{water}}}{m_{\text{poeder}}}} \quad (7.2)$$

Met:

- PD [-], de pakkingsdichtheid;
- ρ_{gem} [kg/m³], de massadichtheid van het poeder. Indien het om een mengsel van meerdere poeders gaat wordt de massadichtheid van het mengsel bepaald als een lineaire combinatie van de massadichtheden van de verschillende poeders in functie van hun respectievelijke volumepercentages;
- m_{water} [g], de massa water nog aanwezig in de pasta na het centrifugeren

$$m_{\text{water}} = W/P \cdot m_{\text{poeder}} - m_w \quad (7.3)$$

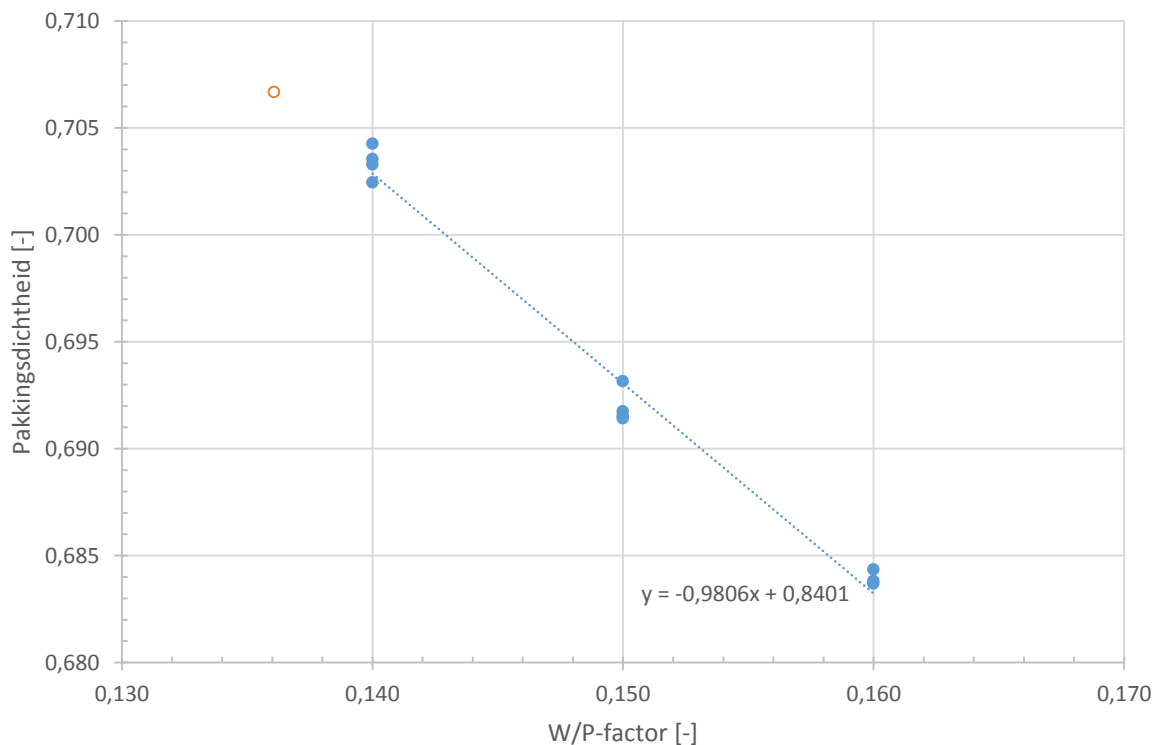
- m_{poeder} [g], de massa poeder die aanwezig is in de pasta

$$m_{\text{poeder}} = \frac{m_{\text{pasta}}}{1 + W/P} \quad (7.4)$$

- W/P [-], de water-poederfactor van het mengsel;

- m_w [g], de massa water die na het centrifugeren bovenop de pasta aanwezig is en met een pipet wordt verwijderd;
- m_{pasta} [g], de massa pasta aanwezig in de proefbuis.

Deze berekening wordt uitgevoerd voor drie verschillende mengsels die per verhouding van poeders worden gemaakt. De drie waarden voor de pakkingsdichtheid zijn telkens het gemiddelde van de resultaten verkregen uit de vier proefbuisjes, die per poederverhouding worden gemaakt⁸. Vervolgens worden de berekende waarden van de pakkingsdichtheid uitgezet in functie van de W/P- factoren. Door de verschillende punten wordt de best passende rechte bepaald met behulp van een rekenblad. Figuur 7.11 geeft een voorbeeld van dergelijke grafiek. Het gaat hier om de combinatie 90 % CEM + 10 % SF 940D waarbij drie mengsels zijn gemaakt met een W/P-factor van respectievelijk 0,14, 0,15 en 0,16.



Figuur 7.11: Best passende rechte tussen de resultaten van de centrifugale consolidatieproef

Wanneer wordt verondersteld dat de pakkingsdichtheid lineair verloopt in functie van de W/P-factor kan met behulp van de vergelijking van de best passende rechte de maximale pakkingsdichtheid het beschouwde poedermengsels worden bepaald. De maximale pakkingsdichtheid wordt aan de hand van het onderstaande iteratieproces bepaald. Elke

⁸ Wanneer een van deze vier waarden te veel afwijkt van de overige wordt deze waarde niet opgenomen in de bepaling van de gemiddelde pakkingsdichtheid van het beschouwde mengsel. Op deze wijze wordt ernaar gestreefd de standaarddeviatie van de meetresultaten te beperken tot 0,004. Deze waarde is gebaseerd op Fennis [2011].

stap wordt verduidelijkt aan de hand van een voorbeeld met het mengsel 90 % CEM + 10 % SF 940D.

Iteratieproces:

1. Kies een waarde voor de initiële W/P-factor. Om te vermijden dat het iteratieproces onmiddellijk vastloopt, wordt gekozen om te starten met de hoogste W/P-factor van de gemaakte mengsel.

Voor het mengsel 90 % CEM + 10 % SF 940D is de hoogste waarde van de gebruikte W/P-factoren gelijk aan 0,16.

2. Bepaal de massa van het poeder en de hoeveelheid water van een fictief mengsel bij de opgegeven verhouding van poeders en de W/P-factor die wordt gekozen in stap 1. Als massa van de poeders wordt standaard steeds 1000 g aangenomen.

Voor het mengsel 90 % CEM + 10 % SF 940D dat een massa van 1000 g poeder bevat dient 160 g water te worden toegevoegd.

3. Zet de massa's uit stap 2 om in volumes met behulp van de in paragraaf 7.2.2 bepaalde dichtheden van de poeders.

Bij het mengsel 90 % CEM + 10 % SF 940D betekent dit:

$$V_{pdr} = \frac{m_{pdr}}{\rho_{gem}} = \frac{1000 \text{ g}}{3045 \text{ kg/m}^3} = 328 \text{ ml}$$

$$V_{wtr} = \frac{m_{wtr}}{\rho_w} = \frac{160 \text{ g}}{998,2 \text{ kg/m}^3} = 160 \text{ ml}$$

4. Bepaal de initiële waarde van de pakkingsdichtheid. Dit wil zeggen de pakkingsdichtheid van het fictief mengsel alvorens het verdicht wordt door centrifugeren. Deze waarde van de pakkingsdichtheid kan als volgt bepaald worden:

$$PD_{initieel} = \frac{V_{pdr}}{V_{pdr} + V_{wtr}}$$

Voor het mengsel 90 % CEM + 10 % SF 940D betekent dit is de waarde van $PD_{initieel}$ gelijk aan 0,672.

5. Bepaal de pakkingsdichtheid van het fictieve mengsel na centrifugeren. Hiervoor wordt de vergelijking van de best passende rechte gebruikt.
Bij het mengsel 90 % CEM + 10 % SF 940D komt dit neer op:

$$PD_{na\ cent} = -0,9806 \cdot W/P + 0,8401 = 0,683$$

6. Bepaal het volume water dat na centrifugeren nog tussen de korrels van het poeder aanwezig is. Dit volume kan bepaald worden aan de hand van de volgende formule:

$$V_{wtr,na\ cent} = \frac{V_{pdr}}{PD_{na\ cent}} - V_{pdr}$$

Voor het mengsel 90 % CEM + 10 % SF 940D is de hoeveelheid water na centrifugeren gelijk aan 152 ml.

7. Zet het volume dat wordt berekend in stap 6 om in een massa water.
In het voorbeeld wordt dit als volgt bepaald:

$$m_{wtr,na\ cent} = \rho_w \cdot V_{wtr,na\ cent} = 998,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 152 \text{ ml} = 152 \text{ g}$$

8. Bepaal de W/P-factor van de cementpasta na centrifugeren.
Voor het mengsel 90 % CEM + 10 % SF 940D betekent dit:

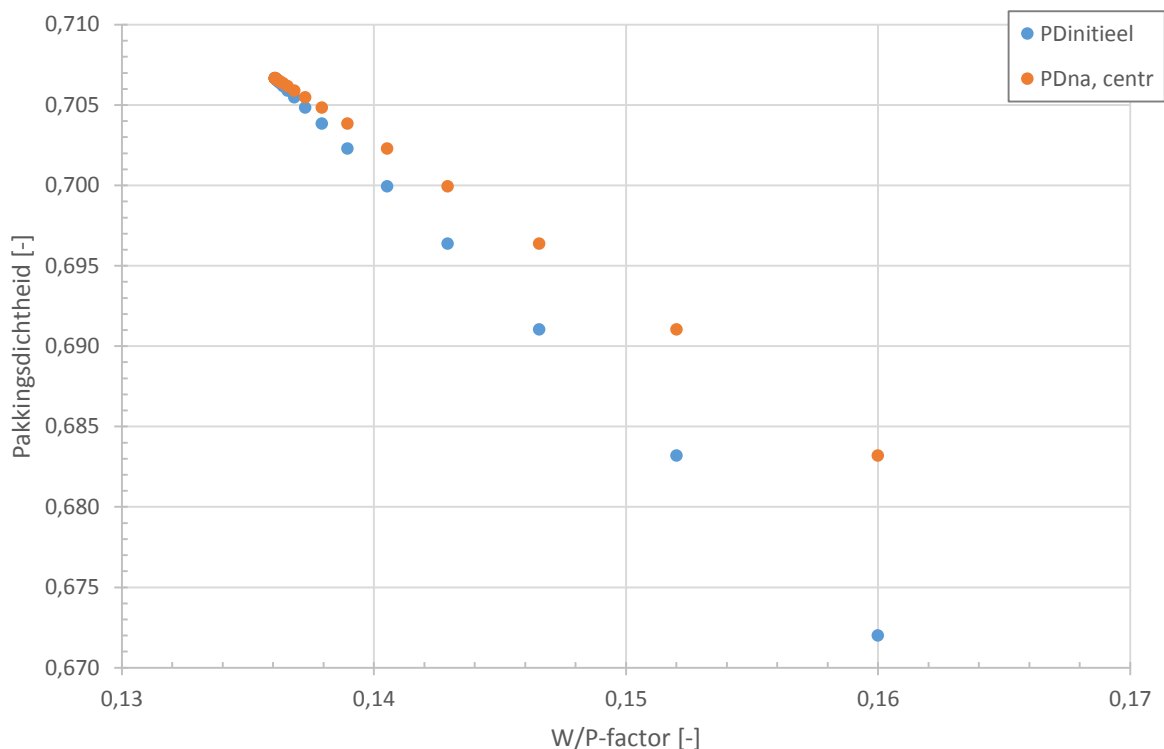
$$W/P_{na,cent} = \frac{m_{wtr,na\ cent}}{m_{pdr}} = \frac{152 \text{ g}}{1000 \text{ g}} = 0,152$$

9. Controle:

Wanneer het verschil tussen de waarde van $PD_{initieel}$ uit stap 4 en $PD_{na,cent}$ uit stap 5 voldoende klein is, is de maximale waarde van de pakkingsdichtheid voor het beschouwde mengsel gevonden en kan het iteratieproces worden gestopt. Indien dit niet het geval is moet het iteratieproces herhaald worden, maar ditmaal wordt de waarde van $W/P_{initieel}$ uit stap 1 gelijkgesteld aan de waarde van $W/P_{na,cent}$ uit stap 9. Door de verschillende stappen te blijven herhalen zal de waarde van $PD_{initieel}$ steeds dichter naderen tot deze van $PD_{na,cent}$.

In het voorbeeld van het mengsel 90 % CEM + 10 % SF 940D wordt de berekening stopgezet wanneer het verschil tussen $PD_{initieel}$ en $PD_{na,cent}$ kleiner is dan 10^{-6} . Dit gebeurt na 26 iteratiestappen. De gevonden waarde voor de maximale pakkingsdichtheid is gelijk aan 0,707. Deze waarde wordt bereikt bij een W/P-factor van 0,136 na centrifugeren.

In Figuur 7.12 wordt het iteratieproces grafisch weergegeven. Door middel van het iteratieproces wordt het snijpunt van de twee curven bepaald. Dit punt geeft de waarde van de maximale pakkingsdichtheid en de bijhorende W/P-factor van het beschouwde mengsel.



Figuur 7.12: Grafische voorstelling van het iteratieproces ter bepaling van de pakkingsdichtheid

Wanneer het iteratieproces voor alle verhoudingen van een bepaalde combinatie wordt gemaakt kan de bijhorende interactiekromme opgesteld worden.

7.7.2 Reeks CEM – SF

Van de zes soorten silica fume worden drie soorten geselecteerd, namelijk SF 940D, SF 940U en SF MWE, waarvan de pakkingsdichtheid wordt bepaald. In Tabel 7.12 worden de individuele pakkingsdichtheden van deze poeders weergegeven. Als referentie wordt ook de waarde van de pakkingsdichtheid van een mengsel met 100 % cement weergegeven. Hieruit blijkt dat de pakkingsdichtheid van het gebruikte silica fume in alle gevallen lager ligt dan deze van cement. Nochtans hebben de deeltjes van het silica fume een sferische vorm, deze heeft een gunstiger effect op de pakking van de deeltjes dan de onregelmatige vorm van de partikels van het cement. In het onderzoek van Kwan & Wong [2008] is de lagere waarde voor de pakkingsdichtheid van silica fume te wijten aan de grootte van de korrels. Zowel bij cement als silica fume zullen de oppervlaktekrachten tussen de deeltjes, zoals onder andere de van der Waalskracht, bijdragen tot het *loosening effect* van de korrelstructuur. Aangezien de deeltjes van het silica fume vele malen kleiner zijn dan deze

van cement zijn de bindende krachten tussen te deeltjes groter, waardoor het *loosening effect* meer uitgesproken is en aanleiding geeft tot een lagere waarde van de pakkingsdichtheid [Yu et al., zoals geciteerd in Kwan & Wong, 2008].

Van de verschillende soorten silica fume heeft SF 940U de grootste individuele pakkingsdichtheid. Als de natte zeefkrommes van de soorten silica fume worden vergeleken dan blijkt dat het gebied van aanwezige korreldiameters in de drie beproefde soorten silica fume gelijk is, maar dat de hoeveelheid fijne deeltjes met diameter kleiner dan 1 μm bij SF 940U ongeveer 13 % hoger ligt dan bij SF 940D en ongeveer 17 % hoger is dan bij SF MWE. Hierdoor worden de holtes tussen de grotere partikels beter opgevuld bij SF 940U waardoor de individuele pakkingsdichtheid hoger ligt dan bij de overige soorten silica fume.

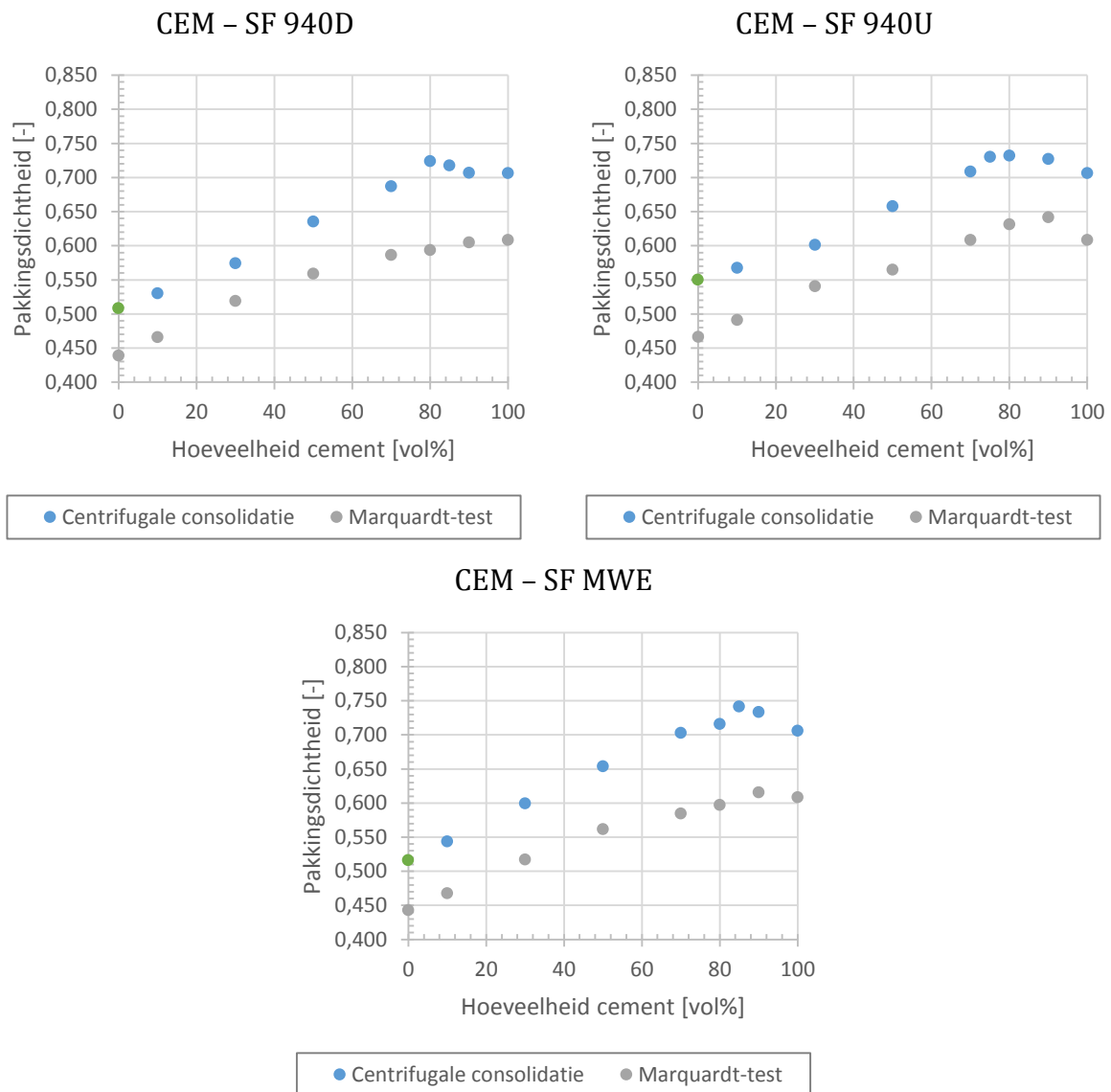
Tabel 7.12: Individuele pakkingsdichtheid silica fume en cement

Poeder	PD _{actueel} [-]	W/P _{min} [-]
SF 940D	0,508	0,426
SF 940U	0,550	0,376
SF MWE	0,516	0,412
Cement	0,706	0,132

Wanneer aan het basismengsel, dat enkel cement als poeder bevat, stelselmatig silica fume wordt toegevoegd, stijgt de waarde van de pakkingsdichtheid van de cementpasta. Deze blijft tot een piekwaarde wordt bereikt bij een zekere hoeveelheid silica fume en daalt vervolgens lineair tot het mengsel voor 100 % uit silica fume bestaat. In Figuur 7.13 wordt deze trend voor de drie gebruikte soorten silica fume afgebeeld, in Tabel 7.13 wordt de piekwaarde van de pakkingsdichtheid en de bijbehorende verhouding van poeders voor elke combinatie van cement en silica fume weergegeven.

Tabel 7.13: Maximale pakkingsdichtheid reeks CEM - SF

Mengsel	Mengverhouding		PD _{actueel} [-]	W/P _{min} [-]
	Cement [vol%]	Silica fume [vol%]		
CEM – SF 940D	80	20	0,724	0,129
CEM – SF 940U	80	20	0,732	0,125
CEM – SF MWE	85	15	0,742	0,116



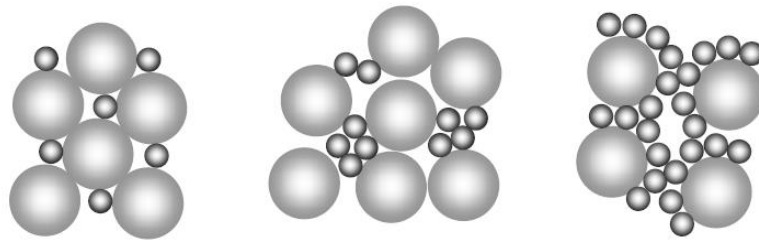
Figuur 7.13: Interactiekrommen voor de combinatie cement en silica fume verkregen uit de centrifugale consolidatie en de Marquardt-test

De stijging van de pakkingsdichtheid is volgens Kwan & Wong [2008] te wijten aan de sferische vorm van de silica fume-deeltjes en aan het gunstige vuleffect van deze silica fume-partikels op het cement. Aangezien de afmetingen van de korrels van het silica fume vele malen kleiner zijn dan deze van het cement, vestigen de silica fume-deeltjes zich in de holle ruimtes tussen de cementpartikels. De piek in de interactiekromme wordt bereikt wanneer de holle ruimtes volledig gevuld zijn met silica fume. Wanneer nog meer silica fume aan het mengsel wordt toegevoegd, daalt de pakkingsdichtheid van het mengsel. Door de overmaat aan silica fume deeltjes die aanwezig zijn tussen de cementpartikels worden deze laatste uit elkaar geduwd.

Volgens Fennis [2010] kan de daling van de pakkingsdichtheid ook verklaard worden door het agglomereren van de deeltjes ten gevolge van de grotere oppervlaktekrachten die werken op kleinere partikels. Hierdoor gaan de kleinere silica fume-deeltjes aan het oppervlak van de cementpartikels kleven, waardoor naburige cementkorrels uit elkaar

geduwd worden. Daarnaast kunnen de kleinere silica fume-deeltjes onderling agglomeraten vormen, die de holtes tussen de cementdeeltjes minder goed kunnen opvullen. Dit verschijnsel wordt verduidelijkt aan de hand van Figuur 7.14.

In dit onderzoek wordt, bij het samenstellen van de mengsels, gezorgd dat steeds verzadigd wordt gewerkt door een zekere overmaat aan SP toe te voegen tijdens het mengen van de poeders. Hierdoor wordt getracht de vorming van agglomeraten te voorkomen en kan de daling van de pakingsdichtheid eerder verklaard worden door de besluiten uit het werk van Kwan & Wong [2008].

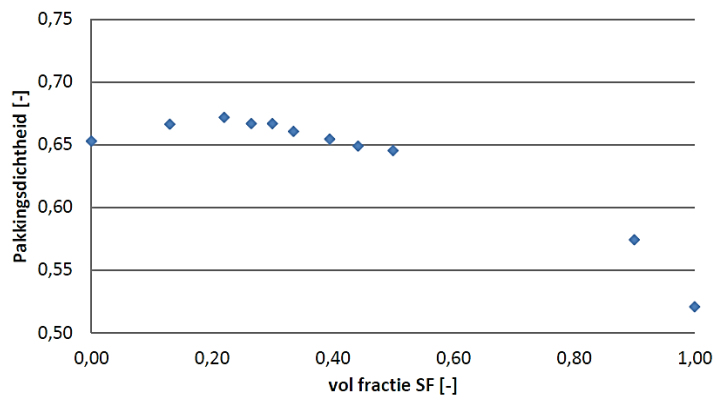


Figuur 7.14: Verhoging van het *loosening effect* ten gevolge van agglomeratie [Fennis, 2010]

In Figuur 7.13 worden naast de resultaten uit dit onderzoek ook de resultaten uit het onderzoek van De Reu & Van Compennolle [2014] weergegeven. In dat onderzoek wordt de invloed van de toevoeging van silica fume aan cement onderzocht met behulp van een Marquardt-test. Uit Figuur 7.13 blijkt dat de waarde van de individuele pakingsdichtheden voor de verschillende soorten silica fume eveneens lager ligt dan deze van het cement. Van de drie beproefde soorten silica fume heeft ook SF 940U de hoogste individuele pakingsdichtheid.

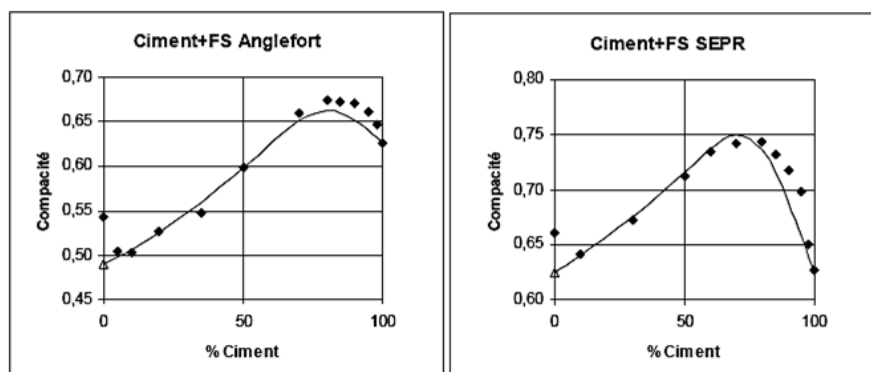
Wanneer de combinaties van verschillende verhoudingen van de poeders wordt vergeleken, kunnen enkele verschillen aangeduid worden. Zo blijkt bij de combinatie CEM – SF 940D helemaal geen gunstige interactie op te treden door silica fume toe te voegen aan het cement. Bij de twee andere combinaties van cement en silica fume wordt wel een gunstig effect op de pakking van de deeltjes vastgesteld. De piek in de interactiekromme treedt echter in beide gevallen vroeger op, dit wil zeggen bij een mengsel waar een grotere hoeveelheid cement aanwezig is.

Bij de resultaten moet echter wel een belangrijke opmerking worden gemaakt. Na het uitvoeren van de proeven is vastgesteld dat de gemaakte mengsels niet volledig verzadigd zijn. Dit betekent dat de oppervlaktekrachten tussen de deeltjes niet volledig worden geëlimineerd waardoor de pakingsdichtheid van het mengsel nadelig wordt beïnvloed. In Breye & De Vos [2013] wordt eveneens de invloed van het toevoegen van silica fume aan cement bestudeerd aan de hand van een Marquardt-test. De resultaten uit dat onderzoek worden in Figuur 7.15 weergegeven. In dat onderzoek wordt het silica fume SF 940D gebruikt als vulstof voor de cementpasta. Er wordt vastgesteld dat de piekwaarde van de pakingsdichtheid zich bevindt bij een mengsel dat 22 vol% silica fume bevat. Daarna daalt de waarde van de pakingsdichtheid.



Figuur 7.15: Resultaten pakkingsdichtheid Breye & De Vos [2013]

Ook Sedran [1999] onderzoekt de pakkingsdichtheid van verschillende combinaties van cement en silica fume door het toepassen van een Marquardt-test. De resultaten van dat onderzoek worden afgebeeld in Figuur 7.16. In dat werkstuk worden twee soorten silica fume, namelijk Angelort en SEPR bestudeerd. Van deze soorten silica fume vertoont Anglefort qua samenstelling de meeste gelijkenissen met SF 940D. Sedran [1999] stelt vast dat de maximale pakkingsdichtheid wordt bereikt bij een mengsel dat 20 massa% silica fume bevat, dit komt overeen met 26 vol% aan silica fume. Dit mengsel bevat bijgevolg iets meer silica fume dan in dit onderzoek wordt vastgesteld. Na het bereiken van de piek daalt de waarde van de pakkingsdichtheid tot een minimum bij een mengsel dat enkel nog uit silica fume bestaat. In de grafieken van Figuur 7.16 worden naast de experimentele waarden ook de theoretische waarden van de pakkingsdichtheid weergegeven die worden bepaald aan de hand van het *compressible packing model*. In dit model wordt voor de verdichtingsfactor K een waarde van 6,7 gekozen. Het andere silica fume SEPR vertoont in combinatie met cement een hogere pakkingsdichtheid. Dit is te wijten aan het hoge SiO_2 -gehalte en de minimale hoeveelheid koolstof in dit silica fume waardoor de toegevoegde SP efficiënter wordt gebruikt en het *ball bearing effect* beter benut wordt [Breye & De Vos, 2013].

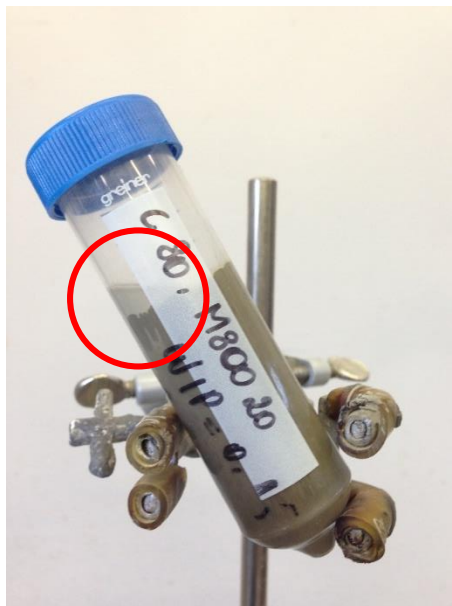


Figuur 7.16: Resultaten pakkingsdichtheid Sedran [1999]

7.7.3 Reeks CEM – M800

Van de vijf types meel wordt de techniek van de centrifugale consolidatie enkel toegepast op het meel M800. Wanneer dit meel aan het cement wordt toegevoegd, wordt na het centrifugeren, steeds een vloeibare laag teruggevonden op de geconsolideerde cementpasta. Normaal gezien zou deze laag enkel waterdeeltjes mogen bevatten, maar bij het gebruik van M800 bevinden zich ook meelpartikels in suspensie in deze afgescheiden laag. Op Figuur 7.17 wordt dit verschijnsel aangeduid. Indien dit afgescheiden volume van meel- en waterdeeltjes volledig in rekening wordt gebracht bij de bepaling van m_{water} , wordt de pakkingsdichtheid van het mengsel overschat. Daarom wordt op twee verschillende manieren de massa m_w opgemeten:

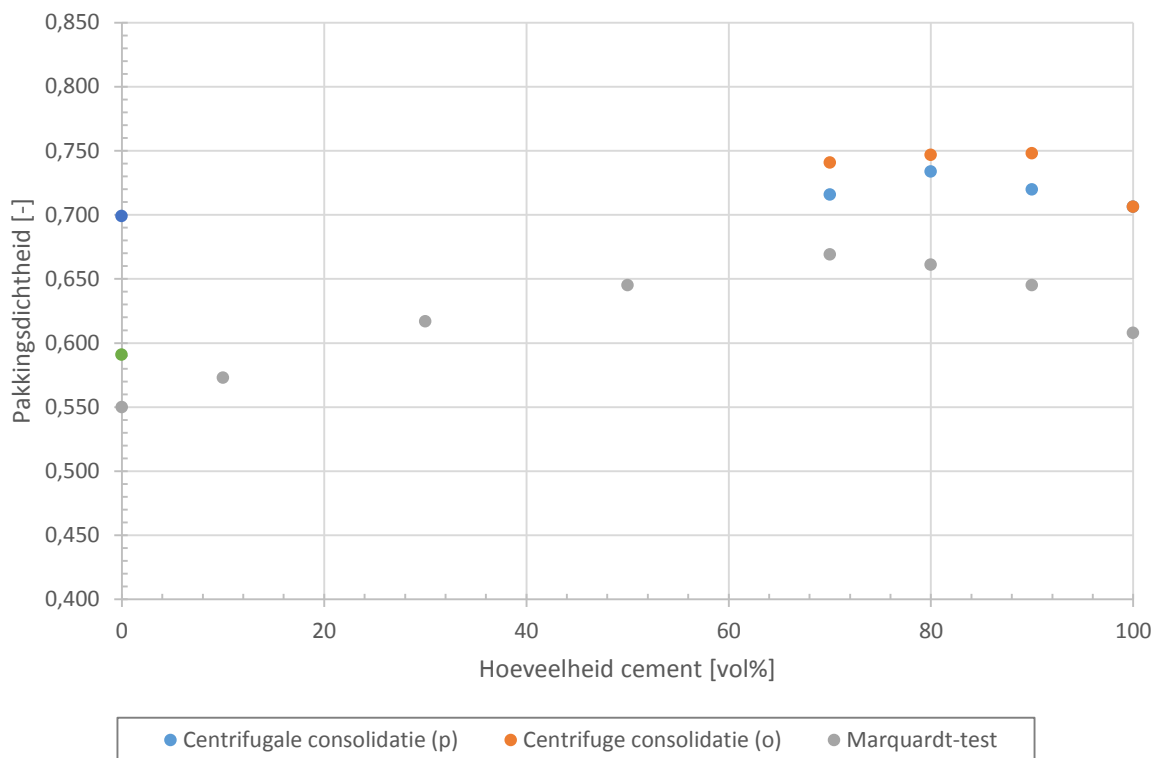
1. Met een naald wordt geprobeerd het water uit de afgescheiden suspensie te verwijderen. Dit gebeurt tot wanneer visueel wordt vastgesteld dat de hoeveelheid water in het afgescheiden volume klein genoeg is om de pakkingsdichtheid voldoende nauwkeurig te bepalen. De massa van de hoeveelheid water die zich in de naald bevindt, wordt gebruikt als waarde voor m_w bij het bepalen van de pakkingsdichtheid van het mengsel.
2. Het afgescheiden volume van meel- en waterdeeltjes wordt volledig uit de proefbuis verwijderd en gedurende 24 uur gedroogd bij een temperatuur van 40 °C. Het massaverlies van het opgedroogde afgescheiden volume wordt gebruikt als waarde voor m_w bij het bepalen van de pakkingsdichtheid van het mengsel.



Figuur 7.17: Meelpartikels in suspensie na centrifugale consolidatie

Eenmaal de proeven uitgevoerd zijn kan de actuele pakkingsdichtheid van de verschillende mengsels berekend worden. Op Figuur 7.18 worden de interactiekrommen van deze combinatie van poeders weergegeven. De punten die worden aangeduid met de letter (p), zijn bepaald volgens de eerste wijze die hierboven wordt beschreven, de punten

aangeduid met de letter (o), zijn bepaald met behulp van de tweede manier voor het bepalen van de afgescheiden hoeveelheid water.



Figuur 7.18: Interactiekrommes voor de combinatie cement en M800 verkregen uit de centrifugale consolidatie en de Marquardt-test

Net zoals bij silica fume stijgt de pakkingsdichtheid van het mengsel wanneer meel wordt toegevoegd. De piek wordt voor de eerste methode bereikt bij een verhouding 80 % CEM + 20 % M800 en bedraagt 0,734. Voor de tweede methode wordt een piekwaarde van 0,748 bereikt bij de combinatie 90 % CEM + 10 % M800. Na het bereiken van de piekwaarde neemt de pakkingsdichtheid af tot een minimale waarde, die verkregen wordt bij een mengsel dat enkel bestaat uit meel M800. De individuele pakkingsdichtheid van het meel is gelijk aan 0,591 en 0,699 respectievelijk voor de eerste en de tweede methode gehanteerd voor het bepalen van m_w . De stijging van de pakkingsdichtheid door toevoeging van meel kan net zoals bij de combinatie cement en silica fume verklaard worden door het vuleffect van de meelkorrels. Uit een vergelijking van de natte zeefkrommes van cement en meel M800 blijkt dat de afmetingen van de deeltjes van het meel vele malen kleiner zijn dan deze van het cement. Hierdoor zullen de meeldeeltjes de holle ruimtes tussen de cementkorrels opvullen waardoor de pakkingsdichtheid van het mengsels toeneemt bij een stijging van de hoeveelheid meel. Aan het vuleffect is echter wel een limiet gekoppeld. Wanneer de holle ruimtes tussen de cementdeeltjes volledig opgevuld zijn, wordt de maximale pakkingsdichtheid bereikt. Bij een verdere verhoging van de hoeveelheid meel zal de overmaat aan meelkorrels de cementdeeltjes uit elkaar duwen waardoor de pakkingsdichtheid zal dalen.

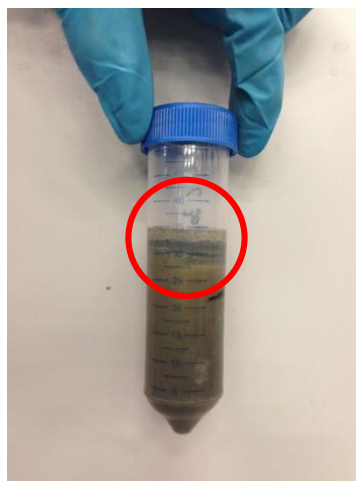
Uit Figuur 7.18 blijkt dat de wijze waarop de hoeveelheid water m_w is bepaald ook een invloed heeft op de pakkingsdichtheid. Zo geeft het drogen van de suspensie, bestaande uit van meel- en waterdeeltjes, aanleiding tot een hogere pakkingsdichtheid.

In Figuur 7.18 wordt ook de pakkingsdichtheid van de combinatie van cement en meel M800 weergegeven die bepaald wordt door het uitvoeren van een Marquardt-test. Deze waarden zijn afkomstig uit het onderzoek van De Reu & Van Compernelle [2014]⁹. Uit Figuur 7.18 blijkt dat de piekwaarde van de pakkingsdichtheid wordt bereikt bij een mengsel met samenstelling 70 % CEM + 30 % M800.

7.7.4 Reeks CEM – Vliegias

Ook voor de combinatie van cement en vliegias wordt de pakkingsdichtheid met behulp van de techniek van de centrifugale consolidatie bepaald. Wanneer het vliegias aan het cement wordt toegevoegd, wordt na het centrifugeren, steeds een vloeibare laag teruggevonden die bestaat uit water- en vliegiasdeeltjes in suspensie. Vanaf de combinatie 60 % CEM + 40 % vliegias tot 10 % CEM + 90 % vliegias worden drie verschillende laagjes van elkaar onderscheiden zoals op Figuur 7.19 wordt weergegeven. Onderaan bevindt zich de geconsolideerde massa. Het middelste laagje is vloeibaar en bevat zowel vliegias- als waterdeeltjes. Uit een visuele inspectie van het bovenste laagje blijkt dit laagje zeer korrelig te zijn. Daarnaast wordt geconstateerd dat de dikte van het bovenste laagje toeneemt wanneer de hoeveelheid vliegias groter wordt.

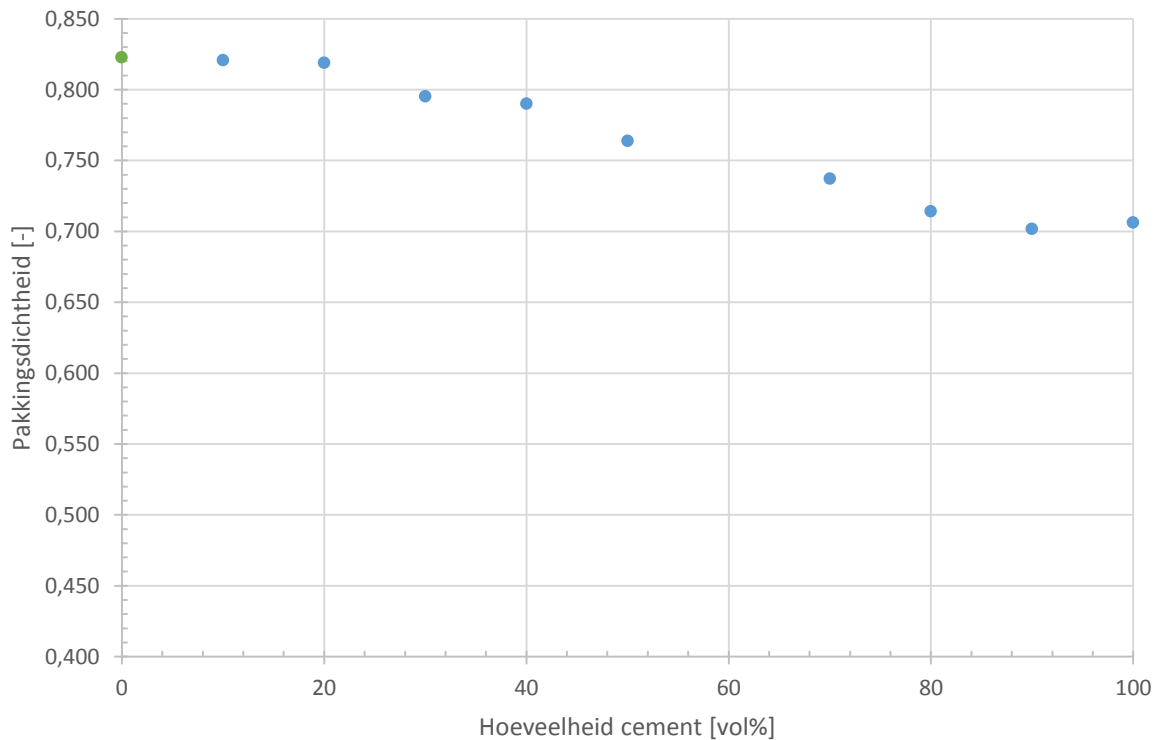
Door de aanwezigheid van de twee afzonderlijke lagen bovenop de geconsolideerde massa, wordt ervoor gekozen de deze twee laagjes uit de proefbuis te verwijderen en het geheel gedurende 24 uur te drogen bij een temperatuur van 40 °C. Uit het massaverlies van het opgedroogde volume kan vervolgens de verdampte hoeveelheid water bepaald worden die in de berekening van de actuele pakkingsdichtheid wordt gebruikt als waarde voor m_w .



Figuur 7.19: Laagvorming na centrifugeren

⁹ Er moet echter wel worden vermeld dat door het uitvoeren van een bijkomende proef wordt vastgesteld dat de gemaakte mengsels niet volledig verzadigd zijn.

In Figuur 7.20 wordt de interactiekromme van een mengsel van cement en vliegas weergegeven. Hieruit blijkt dat door het toevoegen van vliegas aan cement de pakkingsdichtheid stijgt. In tegenstelling tot de mengsels met silica fume en meel blijft de pakkingsdichtheid stijgen bij een toename van de hoeveelheid vliegas tot de maximale waarde van 0,823 bereikt wordt bij een mengsel dat enkel vliegas als poeder bevat. De grotere waarde van de individuele pakkingsdichtheid van vliegas kan volgens Kwan & Wong [2008] verklaard worden door de gunstigere sferische vorm van de vliegaspartikels.



Figuur 7.20: Interactiekromme voor de combinatie cement en vliegas verkregen uit de centrifugale consolidatie

7.8 Validatie van pakkingsdichtheid aan de hand van het *compressible packing model*

7.8.1 Reeks CEM – SF

Na het berekenen van de actuele pakkingsdichtheid van elke combinatie CEM – SF, is het net zoals bij het uitvoeren van de droge pakking, mogelijk de resultaten te valideren met het *compressible packing model*. In tegenstelling tot de zwaartekrachts- en de verdichtingsproef, is in dit geval de waarde voor de energieoverdracht niet gekend. Om die reden worden de experimentele resultaten voor verschillende K-waarden geëvalueerd. Een eerste simulatie gebeurt met een K-waarde gelijk aan 7. Deze waarde is ongeveer gelijk aan deze gebruikt door Sedran [1999], die zijn interactiekrommen opstelt door gebruik te maken van een Marquardt-test. Een tweede simulatie gebeurt met een K-waarde van 9, die bij het uitvoeren van de verdichtingsproef gehanteerd wordt. Een laatste validatie gebeurt met een K-waarde van 12. Deze waarde is het resultaat bekomen door Fennis [2010] tijdens het uitvoeren van de Marquardt-test.

Niet alleen de verdichtingswaarde is een belangrijke parameter in de validatie van de experimentele waarden, ook de ingevoerde zeefkrommes zijn van het grootste belang. Aangezien er verschillende zeefkrommes voorhanden zijn kunnen er ook op dit vlak verschillende combinaties worden gemaakt. In eerste instantie zijn er van cement twee zeefkrommes beschikbaar. Een eerste kromme is opgesteld met de natte eenheid van de laserdiffractometer en wordt voorgesteld op Figuur 7.2. Een tweede zeefkromme is opgesteld met behulp van de droge eenheid van de laserdiffractometer. Ook in het geval van silica fume zijn twee zeefkrommes beschikbaar. De eerste kromme is opgesteld met behulp van de natte eenheid van de laserdiffractometer en wordt voorgesteld op Figuur 7.5. De tweede kromme is verkregen door gebruik te maken van de *dynamic light scattering*-methode. De zeefkrommes van silica fume zijn telkens inclusief de toevoeging van SP. De krommes opgesteld met behulp van de natte eenheid van de laserdiffractometer worden in grafieken van de interactiekrommen telkens aangeduid met de indicatie wLLS (*wet laser light scattering*), terwijl krommes opgesteld met de droge eenheid als indicatie dLLS (*dry laser light scattering*) bezitten. De krommes opgesteld met de *dynamic light scattering*-methode krijgen als indicatie DLS.

De hierboven beschreven zeefkrommes leiden tot vier combinaties die per reeks van cement in combinatie met silica fume kunnen worden gerealiseerd. Per combinatie van zeefkrommes wordt telkens een validatie gemaakt met $K = 7$, $K = 9$ en $K = 12$. Dit leidt tot 12 interactiekrommes die kunnen opgesteld worden per reeks CEM – SF. Deze interactiekrommes zijn terug te vinden in Bijlage F, samen met de theoretische waarden uit de simulatie en hun bijhorende errorwaarden.

Uit de opgestelde interactiekrommes blijkt dat voor de reeks CEM – SF 940D de kleinste errorwaarde wordt verkregen bij de combinatie CEM dLLS – SF DLS+SP en dit bij een K-waarde van 7. De maximale errorwaarde bedraagt in dit geval 2,87 %. Ook voor de reeksen CEM – SF 940U en CEM – SF MWE wordt bij deze combinatie de kleinste errorwaarde bekomen. Bij SF 940U treedt deze op bij een K-waarde van 7 en bij SF MWE op bij een K-waarde van 12, al is het verschil in errorwaarde tussen de drie gehanteerde K-waarden bijzonder klein. De maximale errorwaarde in het geval van SF 940U bedraagt 4,47 %, in het geval van SF MWE bedraagt de maximale errorwaarde 2,69 %.

Bij het analyseren van de opgestelde krommen kunnen twee algemene zaken opgemerkt worden. In eerste instantie blijkt dat bij gebruik van de zeefkromme van silica fume, opgesteld met behulp van de *wet laser light scattering*-methode, geen interactie optreedt tussen de gecombineerde materialen. Mogelijk is dit te wijten aan het feit dat de dispersie van de deeltjes bij het opstellen van de natte zeefkrommes niet volledig heeft plaatsgevonden, waardoor de verkregen resultaten mogelijk niet representatief zijn. Een ander fenomeen is dat de ligging van de piek, wanneer de combinatie van zeefkrommes wel interactie weergeeft, telkens goed wordt voorspeld voor elke K-waarde.

7.8.2 Reeks CEM – M800

Het opstellen van de interactiekrommes voor de reeks CEM – M800 gebeurt op analoge manier als hierboven vermeld en de validatie wordt opnieuw uitgevoerd voor een K-waarde gelijk aan 7, 9 en 12. In dit geval is het aantal beschikbare zeefkrommes beperkter. Voor het kwartsmeel M800 is enkel de zeefkromme, opgesteld met de *wet laser light scattering*-methode voorhanden. Zowel de experimentele waarden verkregen door het pipetteren van de waterlaag als door het drogen van de waterlaag worden gevalideerd, waardoor er in totaal 12 zeefkrommes gesimuleerd worden. De interactiekrommes zijn in Bijlage F terug te vinden.

Bij het valideren van de experimentele waarden, bekomen door het pipetteren van het waterlaagje, wordt de beste benadering bekomen wanneer de droge zeefkromme van cement wordt gecombineerd met de natte zeefkromme van M800, en dit bij een K-waarde gelijk aan 7. Hier bedraagt de maximale errorwaarde namelijk 1,28 %. Opnieuw wordt bij beide simulaties de positie van de piek goed voorspeld.

Bij het valideren van de waarden, bekomen door het drogen van het waterlaagje, blijkt duidelijk dat de experimentele waarden veel minder goed benaderd worden. De piek in theoretische waarden is, in vergelijking met de experimentele waarden, veel meer uitgesproken. De beste benadering wordt opnieuw verkregen wanneer de droge zeefkromme van cement wordt gecombineerd met de natte zeefkromme van M800, en dit bij een K-waarde gelijk aan 7. De maximale errorwaarde bedraagt in dit geval 3,31 %.

7.8.3 Reeks CEM – vliegas

Het opstellen van de interactiekromme voor de reeks CEM – vliegas gebeurt op analoge manier als beschreven in paragraaf 7.8.1. De validatie gebeurt opnieuw voor een K-waarde gelijk aan 7, 9 en 12. Net als bij M800, is het door het beperkte aantal zeefkrommen, niet mogelijk een groot aantal combinaties te voorzien. Voor vliegas is enkel de zeefkromme, opgesteld met de *wet laser light scattering*-methode voorhanden. De opgestelde interactiekrommes zijn terug te vinden in Bijlage F.

Uit de validatie blijkt dat de beste benadering van de experimentele waarden wordt bekomen wanneer de droge zeefkromme van cement wordt gecombineerd met de natte zeefkromme van vliegas, en dit bij een K-waarde gelijk aan 7. De maximale errorwaarde bedraagt in dit geval 2,39 %.

7.8.4 Conclusie

Uit de validatie aan de hand van het *compressible packing model* is het mogelijk een aantal zaken te concluderen. In eerste instantie blijkt dat het invoeren van de natte zeefkrommes niet tot goede resultaten leidt. Dit is mogelijk te wijten aan het feit dat de dispersie van de deeltjes niet volledig is gebeurd, waardoor de waarden van de gecumuleerde zeefkrommes mogelijk niet representatief zijn. De beste fit wordt in het geval van silica fume telkens bekomen wanneer de droge zeefkromme van cement wordt gecombineerd met de natte zeefkrommes van silica fume die worden bepaald door middel van de *dynamic light scattering*-methode. In het geval van M800 en vliegas wordt de beste fit verkregen bij combinatie van de droge zeefkromme van cement met de zeefkromme van M800 en vliegas verkregen door gebruik te maken van de *wet laser light scattering*-methode.

Vervolgens blijkt dat in de meeste gevallen de beste fit tussen experimentele en theoretische waarden wordt bekomen, wanneer de waarde voor de verdichtingsfactor 7 bedraagt. Dit is niet het geval bij SF MWE, maar de verschillen tussen $K = 7$ en $K = 12$ zijn bijzonder klein. Een K-waarde van 7 zou inhouden dat de energieoverdracht bij toepassing van de centrifugale consolidatietechniek ongeveer gelijk is aan de energieoverdracht die plaatsvindt wanneer de Marquardt-test, zoals beschreven in Sedran [1999], wordt uitgevoerd.

Uit de analyse van de resultaten kan aangenomen worden dat er, door gebruik te maken van het *compressible packing model*, een goede fit bestaat tussen de experimentele waarden en de theoretische waarden wanneer cement met silica fume wordt gecombineerd. In tegenstelling tot Fennis [2010] bekomt ook Sedran [1999] door toepassing van dit model een goede benadering van de experimentele data.

Hierbij is het belangrijk op te merken dat de proefmethode van beide onderzoekers niet volledig analoog is. Het verschil is voornamelijk merkbaar in de gebruikte hoeveelheid superplastificeerder. Sedran [1999] gebruikt in het onderzoek een te grote hoeveelheid superplastificeerder, waardoor de mengsels in alle omstandigheden verzadigd zijn. Door het gebruik van een te grote hoeveelheid superplastificeerder, verdwijnen de oppervlaktekrachten en kan teruggevallen worden op geometrische pakking. Dit in tegenstelling tot het onderzoek van Fennis [2010] waar het SP-gehalte voor de verschillende mengsels constant wordt gehouden. Door het gehalte aan superplastificeerder constant te houden, is het niet mogelijk met zekerheid te concluderen dat in alle omstandigheden met een verzadigd mengsel wordt gewerkt.

Het werken met niet verzadigde mengsels kan een invloed hebben op de pakkingsdichtheid. De pakking voor de verschillende poederfracties kan dan verschillend worden beïnvloedt aangezien de mate waarin het mengsel verzadigd is, niet gekend is. Een mengsel van 40 % silica fume en 60 % cement heeft dan misschien meer superplastificeerder nodig dan een mengsel dat bestaat uit 30 % silica fume en 70 % cement. In het geval dat hier geen rekening mee wordt gehouden, kan dit de agglomeratie en de pakking van de kleine deeltjes beïnvloeden.

7.9 Verwerkbaarheid van de cementpasta

7.9.1 Procedure

Van de verse pasta wordt de slump flow bepaald. Dit is een maat voor de verwerkbaarheid van het mengsel. De slump flow of met andere woorden de vloeimaat, wordt bepaald volgens de norm NBN EN 12350-8:2010. De consistentie wordt bepaald door een zetmaatkegel te vullen met pasta. De kegel wordt op een vochtig en glad oppervlak geplaatst. Een minuut na het mengen van de pasta wordt de kegel langzaam verticaal omhoog getild en vloeit de pasta uit. De diameter van de uitgevloeide pasta wordt na vier minuten in twee loodrecht op elkaar staande richtingen gemeten. Het gemiddelde van deze twee waarden geeft vervolgens de slump flow. Hoe vloeibaarder het mengsel is, hoe groter deze waarde zal zijn. Een voorbeeld van een slump flow-proef is weergegeven in Figuur 7.21. De zetmaatkegel die voor deze proefopstelling gebruikt wordt, heeft de volgende afmetingen:

- diameter bovenaan: 7 cm;
- diameter onderaan: 10 cm;
- hoogte: 6 cm;
- inhoud: 344 cm³.



Figuur 7.21: Slump flow opstelling

7.9.2 Analyse van de resultaten

Aangezien de W/P-factor en het SP-gehalte van de verschillende mengsels steeds varieert kunnen absolute waarden van de slump flow niet met elkaar vergeleken worden. Wat wel wordt opgemerkt tijdens de proeven is dat bij de combinatie CEM – M800 grote verschillen in de waarde slump flow voorkomen wanneer de W/P-factor van een mengsel met dezelfde poederverhoudingen met 0,01 wordt verhoogd. Bij de andere mengsels verloopt de stijging van de slump flow-waarde lineair bij een toename van de W/P-factor. Voor overzicht van de slump flow-waarden wordt verwezen naar Bijlage G.

7.10 Druksterkte

7.10.1 Eigenschappen van het toestel

Voor het bepalen van druksterkte van de verharde cementpasta's wordt gebruik gemaakt van een drukmachine uit de DB-serie van het merk w + b. Deze machine heeft een maximale drukcapaciteit van 250 kN en een maximale buigcapaciteit van 15 kN.

7.10.2 Procedure

Het testen van de druksterkte gebeurt telkens op 28 dagen. Per mengeling worden er vier buisjes gevuld met pasta die, na het centrifugeren in de natte kamer, worden bewaard. Deze kamer heeft een gemiddelde vochtigheid van $93 \pm 5 \%$ en een temperatuur van ongeveer $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Het onder water bewaren van de proefstukken is noodzakelijk om het uitdrogen van de pasta te voorkomen. Anders krimpt de pasta en ontstaan er trekspanningen. Die trekspanningen zouden de pasta laten scheuren (krimpscheuren). Te snelle uitdroging kan ook voorkomen worden door de pasta nat te houden [Breye & De Vos, 2013]. Na 28 dagen worden de proefstukken getest op druksterkte. Hiervoor is het noodzakelijk uit de proefmonsters cilinders te zagen met diameter en hoogte gelijk aan 25 mm. Dit was enkel mogelijk voor de combinaties CEM – SF 940U en CEM – SF MWE. Door het hoge SP-gehalte in de combinatie CEM – SF 940D zijn de proefbuisjes na 28 dagen nog steeds niet volledig uitgehard en is het bijgevolg onmogelijk om deze te ontkisten en te beproeven.

Het drukken van de cilinders gebeurt met een drukmachine die wordt gebruikt voor het testen van verharde cementpasta's. Het beproeven van de monsters is gebaseerd op de norm NEN EN 196-1. Deze norm vermeldt de proefmethode voor het beproeven van cement. Figuur 7.22 geeft een beeld van de drukmachine. Het linkergedeelte wordt aangewend om buigproeven uit te voeren, wat voor deze procedure niet van toepassing is. Het rechtergedeelte wordt gebruikt om de druksterkte van proefstukken te bepalen. De druksterkte f_c [N/mm^2] wordt samen met de maximale breuklast F [N] afgelezen op het scherm naast de proefopstelling en op de computer. De druksterkte wordt bepaald op basis van de verhouding tussen de maximale breukbelasting bij axiale druk en de oppervlakte A [mm^2] van het proefstuk loodrecht op de richting van de drukkracht. De proefstukken zijn in dit geval cilindervormig met diameter 25 mm.

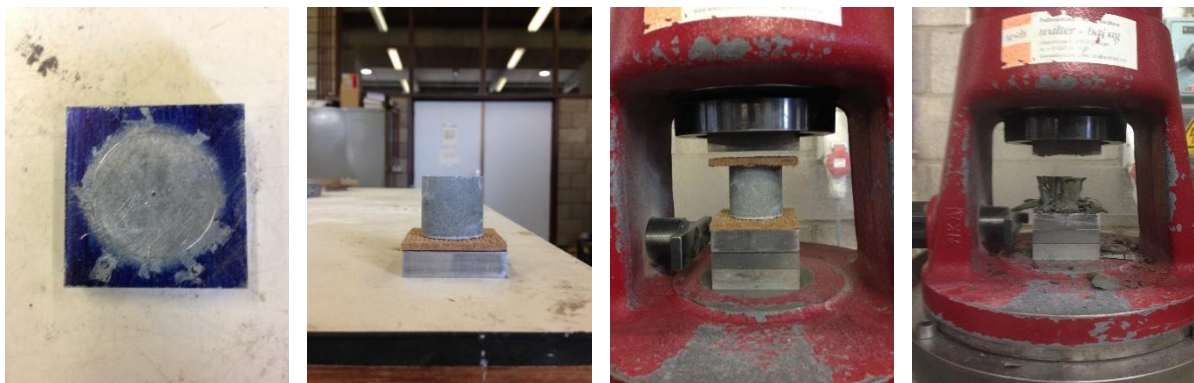
$$f_c = \frac{F}{A} \quad (7.5)$$



Figuur 7.22: Walter + bai ai druckmachine (Serie DB)

Het verkrijgen van representatieve waarden van de druksterkte is in grote mate afhankelijk van twee parameters. Eerst en vooral is de nauwkeurigheid waarmee de proefstukken gezaagd zijn uitermate belangrijk. Hoe kleiner de spreiding op de afmetingen van de cilinders, hoe kleiner de spreiding op de meetresultaten bedraagt. Om die reden worden de proefstukken na het zagen telkens geëffend om een zo recht mogelijk boven- en ondervlak te creëren. Een tweede belangrijke parameter is de plaats waar de cilinders uit de proefmonsters worden gezaagd. Het is van belang telkens een monster te nemen op ongeveer dezelfde afstand van de onderkant.

Om de spreiding op de resultaten tot een minimum te beperken en de eerste oneffenheden, veroorzaakt door het zagen, weg te nemen, wordt tijdens de drukproeven gebruik gemaakt van hardboard. De volledige proefopstelling wordt geïllustreerd met behulp van Figuur 7.23. Het eerste deel van de figuur toont het hulpstuk dat gebruikt wordt bij het uitvoeren van drukproeven op kleine monsters. Het tweede gedeelte toont aan hoe het proefstuk gepositioneerd wordt op het hulpstuk, dat op zijn beurt voorzien is van hardboard, terwijl de derde figuur een voorstelling geeft van de gehele constructie, net voor het begin van de drukproef. De laatste figuur toont een proefstuk dat zijn breuklast heeft bereikt.



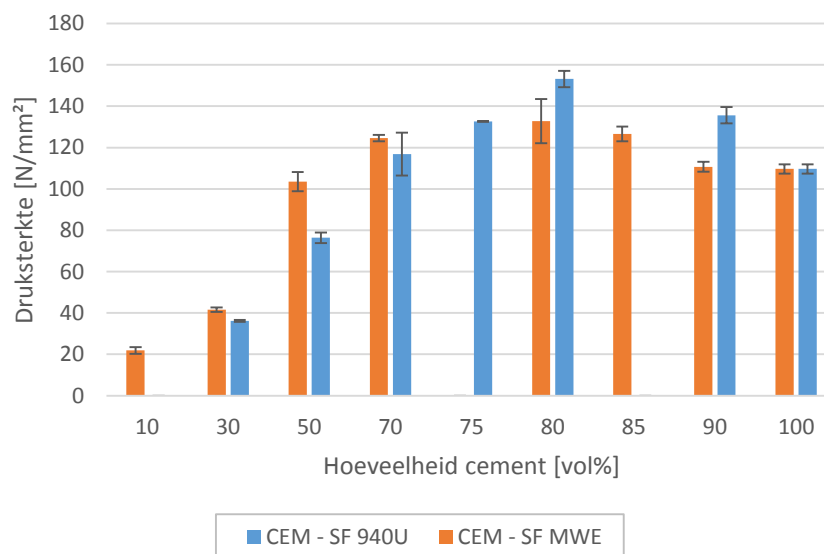
Figuur 7.23: Testprocedure cilinders

7.10.3 Analyse van de resultaten

Zoals reeds aangehaald in de proefmethode, is het voor de uitvoering van de drukproeven noodzakelijk dat de proefmonsters gezaagd worden tot cilinders, met een diameter en hoogte gelijk aan 25 mm. Het zagen van deze monsters is enkel mogelijk voor de combinaties CEM – SF MWE en CEM – SF 940U. Door het hoge SP-gehalte in de combinatie CEM – 940D zijn deze proefbuisjes na 28 dagen nog steeds niet volledig uitgehard en is het bijgevolg onmogelijk deze mengsels te ontkisten en te beproeven.

Aangezien de afmetingen van de cilinders klein zijn, volgt hieruit dat ook de spreiding op de afmetingen beperkt moet worden tot een minimum. Zoals reeds eerder vermeld, wordt de maximale spreiding beperkt door het effenen van de proefmonsters en het gebruik van hardboard tijdens de drukproeven. Dit hardboard neemt de eerste oneffenheden weg en zorgt ervoor dat de drukbelasting aangrijpt als een verdeelde belasting. Indien deze oneffenheden niet grotendeels worden weggenomen bestaat de kans dat de drukbelasting aangrijpt als een puntlast. Een paar proefstukjes zijn in dit proefprogramma ook zonder hardboard getest. De spreiding op deze resultaten is in eerste instantie zeer groot en het proefmonster vertoont ook onmiddellijk een scheur wanneer het in contact komt met de drukbelasting.

Figuur 7.24 geeft een overzicht van de resultaten, verkregen door het uitvoeren van drukproeven op de reeksen CEM – SF 940U en CEM – SF MWE. Wanneer deze waarden worden vergeleken met de opgestelde interactiekrommen, blijkt hieruit dat er tussen beide figuren een goede correlatie aanwezig is. Beide grafieken kennen namelijk een analoog verloop. De maximale druksterkte treedt in beide reeksen op bij de combinatie van poeders die ook de maximale pakkingsdichtheid vertoont. Hieruit volgt dat, aangezien het CPM-model een goede voorspelling maakt van de maximale pakkingsdichtheid, op basis van dit model kan geconcludeerd worden welke combinatie de hoogste druksterkte levert.



Figuur 7.24: Druksterkte voor de combinaties CEM – SF 940U en CEM – SF MWE

DEEL IV Conclusie en aanbevelingen voor verder onderzoek

Conclusie

Het doel van deze masterproef is nagaan of het mogelijk is experimentele interactiekrommen te valideren aan de hand van het *compressible packing model*. Hiervoor wordt een volledig proefprogramma opgesteld dat bestaat uit twee delen. Het eerste deel is voornamelijk gericht op het bepalen van de droge pakking van grove granulaten. Het tweede deel daarentegen is voornamelijk gericht op het bepalen van de natte pakking van poeders. Deze natte methode is noodzakelijk om de oppervlaktekrachten, die optreden bij partikels kleiner dan 125 μm , te elimineren.

Voor het bepalen van de droge pakking worden combinaties gemaakt van verschillende korrelfracties, afkomstig van rolgrind, basalt, porfier en zand. De droge pakking van deze materialen wordt bepaald met behulp van een zwaartekrachtsproef en een verdichtingsproef. Bij het uitvoeren van de zwaartekrachtsproef wordt vastgesteld dat voor eenzelfde korreldiameter de individuele pakkingsdichtheid van granulaten met een ronde vorm, zoals rolgrind en zand, groter is dan deze van granulaten met hoekige korrels zoals basalt en porfier. De individuele pakkingsdichtheid neemt af bij een afname van de korreldiameter. Volgens Fennis [2010] is dit te verklaren door het feit dat bij kleinere partikels de optredende oppervlaktekrachten mogelijk groter zijn, waardoor ook de pakkingsdichtheid lager kan liggen. Dit fenomeen wordt echter niet waargenomen bij vergelijking van de grootste korrelfracties van zand.

In de volgende stap worden verschillende hoeveelheden van twee (of meer) korrelfracties met elkaar vermengd zodat het mogelijk wordt interactiekrommen op te stellen. Hierbij wordt gekozen om de fractie Z.25/.5 met alle andere korrelfracties te combineren. Uit die interactiekrommen blijkt dat de maximale pakking bij een combinatie van ronde granulaten zich voordoet wanneer de grotere korreldiameter dominant is. Bij een combinatie van hoekige en ronde granulaten treedt de piek in de interactiekromme op wanneer de volumepercentages van beide fracties aan elkaar gelijk zijn.

De experimentele data worden vervolgens gevalideerd met behulp van het *compressible packing model*. Hierbij wordt de K-waarde gelijkgesteld aan 4,1. Er worden telkens twee simulaties gemaakt. De eerste simulatie maakt gebruik van vier klassen, gelegen tussen de onder- en bovengrens van de korrelfractie, waaraan een gelijk gewicht wordt toegekend. De tweede simulatie maakt gebruik van de opgestelde zeefkrommen. Wanneer de experimentele waarden worden vergeleken met de theoretische waarden wordt voor de eerste simulatie een gemiddelde errorwaarde van 2,33 % bekomen. De gemiddelde errorwaarde van de tweede simulatie is gelijk aan 1,91 %. Als deze worden vergeleken met de gemiddelde errorwaarden uit het onderzoek van Larrard [1999] en Fennis [2010] blijkt dat deze groter zijn. In deze onderzoeken wordt echter geen rekening gehouden met de combinatie van ronde en hoekige granulaten. Voor deze combinatie wordt echter in dit onderzoek de grootste gemiddelde errorwaarde verkregen.

Een tweede manier om de droge pakking van granulaten te bepalen is op basis van de verdichtingsproef. Voor eenzelfde korreldiameter is de individuele pakkingsdichtheid van granulaten met een ronde vorm groter dan deze van granulaten met hoekige korrels. De individuele pakkingsdichtheid stijgt wanneer de korreldiameter toeneemt. Dit fenomeen is zowel bij de ronde als de hoekige granulaten zichtbaar. Volgens Larrard [1999] is dit te wijten aan het feit dat grove granulaten makkelijker te verdichten zijn dan fijne granulaten omdat er minder contactpunten tussen de korrels aanwezig zijn. Opnieuw vormen de zandfracties hierop een uitzondering.

Het opstellen van interactiekrommen gebeurt opnieuw door de zandfractie .25/.5 te combineren met alle andere korrelfracties. De pakkingsdichtheid is hoger wanneer de verhouding van de korrelafmetingen d_2/d_1 klein is. Wanneer deze verhouding toeneemt, daalt de pakkingsdichtheid. Voor de combinaties van ronde en hoekige grove granulaten blijkt, dat voor eenzelfde korreldiameter, het toevoegen van fijne granulaten een grotere invloed heeft op de pakkingsdichtheid van de hoekige granulaten.

De experimentele data worden vervolgens gevalideerd met behulp van het *compressible packing model*. Hierbij wordt de K-waarde gelijkgesteld aan 9. Deze hogere waarde is te wijten aan de grotere hoeveelheid energie die aan het mengsel wordt toegevoegd tijdens het verdichten. Dezelfde simulaties worden gemaakt als bij de zwaartekrachtsproef. Wanneer de experimentele waarden worden vergeleken met de theoretische waarden wordt voor de eerste simulatie een gemiddelde errorwaarde van 1,59 % bekomen. Voor een combinatie die enkel ronde granulaten bevat, bedraagt de gemiddelde errorwaarde in het onderzoek van Larrard [1999] 0,77 %. Voor een combinatie met enkel hoekige granulaten wordt een gemiddelde errorwaarde van 1,71 % bekomen. Aangezien in dit proefprogramma opnieuw een combinatie wordt gemaakt van ronde en hoekige granulaten, waarvoor de gemiddelde errorwaarde steeds het grootst is, kunnen de theoretische interactiekrommen als aanvaardbaar worden beschouwd.

Uit een vergelijking tussen de zwaartekrachts- en de verdichtingsproef blijkt, dat ten gevolge van het trillen, de absolute waarde van de pakkingsdichtheid voor eenzelfde granulaat groter is voor de korrelfractie die gekenmerkt wordt door een grotere korreldiameter. Wanneer echter wordt gekeken naar de efficiëntie van verdichten, blijkt dat de procentuele toename groter is bij korrelfracties met een kleinere korreldiameter. Bij de combinaties R 2/4 - Z .25/.5 en B 4/8 - Z .25/.5 verschuift de piek in de interactiekromme wanneer extra energie wordt toegevoegd naar de zijde waar de grove granulaten dominant zijn. Volgens De Ruyck & Eeckhout [2006] wordt dit verklaard doordat de grotere hoeveelheid energie ervoor zorgt dat de grote partikels beter gepakt worden waardoor er minder fijn materiaal nodig is om de holtes tussen de grote deeltjes op te vullen.

In het tweede deel van het proefprogramma wordt de natte pakkingsdichtheid van poeders bestudeerd. Hiervoor wordt cement gecombineerd met SF 940D, SF 940U, SF MWE, M800 en vliegas.

Een eerste stap hierbij is het bepalen van de natte zeefkrommes van de verschillende materialen. Uit deze analyse volgt dat cement de grootste partikels bezit in vergelijking met de verschillende soorten silica fume en het kwartsmeel M800. Bij het vliegas doet zich evenwel een andere situatie voor. Hier is het verloop van de zeefkromme zeer gelijklopend aan dat van cement.

Een tweede stap is het opstellen van de interactiekrommen door gebruik te maken van centrifugale consolidatie. Om de actuele pakkingsdichtheid van een bepaalde poederverhouding te bepalen, worden steeds drie mengsels met een verschillende W/P-factor gemaakt. Door aan te nemen dat de pakkingsdichtheid van deze drie mengsels lineair verloopt in functie van de W/P-factor, kan de maximale waarde van de pakkingsdichtheid van de beschouwde poederverhouding bepaald worden. De individuele pakkingsdichtheid van silica fume ligt, ondanks de gunstigere sferische vorm, lager dan deze van cement. Volgens Kwan & Won [2008] is dit te wijten aan de grootte van de silica fume deeltjes. Aangezien deze deeltjes vele malen kleiner zijn dan deze van de cementdeeltjes, zijn de oppervlaktekrachten veel groter waardoor het *loosening effect* meer uitgesproken is en aanleiding geeft tot een lagere pakkingsdichtheid.

Bij toevoeging van silica fume aan cement stijgt de pakkingsdichtheid tot een maximale waarde en neemt daarna lineair af tot een minimum bereikt wordt bij een mengsel dat enkel nog silica fume bevat. Volgens Kwan & Won [2008] is deze daling te wijten aan het feit dat een overmaat aan silica fume, na het bereiken van de piek, de cementdeeltjes uit elkaar duwt. De piek in de interactiekromme wordt, in het geval van de combinatie CEM – SF 940D en CEM – SF 940U bereikt bij 20 vol% silica fume. Bij de combinatie CEM – SF MWE treedt de piekwaarde vroeger op, namelijk bij een mengsel dat 15 vol% silica fume bevat.

Bij toevoeging van M800 aan cement, blijkt dat na het bereiken van de piekwaarde, de pakkingsdichtheid lineair afneemt tot een minimale waarde. Wanneer de pakkingsdichtheid wordt bepaald door het pipetteren van de waterlaag, wordt de maximale waarde bereikt bij 20 vol% M800. Indien de pakkingsdichtheid wordt bepaald door het drogen van de suspensie, bestaande uit meel en waterdeeltjes, wordt de piek vroeger bereikt, namelijk bij 10 vol% M800.

Door het toevoegen van vliegas aan cement blijft de pakkingsdichtheid stijgen tot een maximale waarde van 0,823 voor een mengsel dat uitsluitend bestaat uit vliegas. Aangezien de korrelverdeling van cement en vliegas gelijklopend is, kan de grotere waarde van de individuele waarde van vliegas volgens Kwan & Won [2008] verklaard worden door de gunstigere sferische vorm van de vliegaspartikels.

De experimentele waarden worden opnieuw gevalideerd met *het compressible packing model*. Hierbij worden verschillende combinaties van zeefkrommes ingevoerd, waarbij de K-waarde gelijkgesteld wordt aan 7, 9 en 12. Uit de vergelijking van al deze combinaties blijkt dat de kleinste gemiddelde errorwaarde in de meeste gevallen verkregen wordt bij een K-waarde gelijk aan 7. Deze waarde is ongeveer gelijk aan de waarde die door Sedran [1999] wordt gehanteerd bij het uitvoeren van de Marquardt-test.

Naast de pakkingsdichtheid wordt ook de druksterkte van de combinaties CEM – SF 940U en CEM – SF MWE bepaald. Voor beide soorten silica fume wordt de maximale druksterkte bekomen bij de combinatie van poeders waar ook de maximale pakkingsdichtheid wordt waargenomen.

Aanbevelingen voor verder onderzoek

In een volgend onderzoek kan verder nagegaan worden of de pakkingsdichtheid van een mengsel bestaande uit cement kan verbeterd worden door de overige soorten silica fume (SF 920D, SF S95 DS en SF MWC) en de overige melen (M4, M400, P2 en B25). Wanneer de pakkingsdichtheden van deze mengsel bepaald worden, kan uit de verworven data worden bepaald welk poeder de beste invloed heeft op het cement. Daarbij kan ook rekening gehouden worden met de druksterkte die de verschillende samenstellingen opleveren.

Indien een goede samenstelling van cement en silica fume wordt gevonden kan overgestapt worden op het bepalen van de samenstelling van een mortelmatrix door het toevoegen van zand aan de cementpasta. Ook hier kan de invloed van verschillende soorten zand worden bekeken. In een volgende stap kan een grof granulaat, zoals rolgrind, basalt of porfier, worden toegevoegd om een betonmengsel te verkrijgen.

Bijlage A: Technische fiches van de materialen

Zand M31

SILICA SAND OF MOL M31 - M32 - M34

Technical Data

After mining, the silica sands of Mol - **M31**, **M32** and **M34** - are industrially processed: sieved, washed and classified. These qualities are available moist or dried; by truck, wagon or ship; in bulk or bagged (dried sands).

The silica sands of Mol are an excellent raw material for the glass-, crystal- and ceramic industry, for foundries, for tile glues, plasters, mortars, coatings etc...

GRANULOMETRIC DATA AND PHYSICAL CHARACTERISTICS

Method : ISO-sieving

	M31	M32	M34		
D50	370	280	170	µm	
AFS	45	50	75		
> 1000 µm	1			%	
> 710 µm	5			%	
> 500 µm	25			%	
> 355 µm	53	7		%	
> 250 µm	85	57	3	%	
> 180 µm	98	93	30	%	
> 125 µm			91	%	
< 63 µm	traces	≤ 0.1	≤ 0.3	%	
density	2.65	2.65	2.65	kg/dm ³	
bulk density	1.6	1.5	1.4	kg/dm ³	
hardness	7	7	7	Mohs	
pH	7	7	7		
loss on ignition	0.15	0.15	0.15	%	
colour	L* a* b*	70 2.63 9.58	70 2.79 9.82	72 1.93 7.76	Minolta CM-3610 D65/10°

TD8.03.05.10 2010-12-09 1/2

Sibelco Benelux
De Zate 1 - BE-2480 Dessel
tel. +32 14 83 72 11 - fax +32 14 83 72 12
www.sibelco.be

SILICA SAND OF MOL M31 - M32 - M34

Technical Data

CHEMICAL ANALYSIS (XRF) %

	M31	M32	M34
SiO ₂	99.5	99.5	99.0
Fe ₂ O ₃	0.04	0.03	0.07
Al ₂ O ₃	0.20	0.20	0.60
TiO ₂	0.03	0.03	0.06
K ₂ O	0.03	0.05	0.30
CaO	0.01	0.01	0.02



SIBELCO
BENELUX

The above given information is based on mean values. The typical properties and chemical analyses are intended as examples and are not to be considered as substitutes for actual testing and analyses in those situations where properties and chemical compositions are critical factors. Sales and supplies will always be according to our general sales conditions.

CAS-Nr.: 14808-60-7

EINECS-Nr.: 238-878-4

MSDS available on request

ed.08

TDS.03.05.10 2010-12-09 2/2

Sibelco Benelux
De Zate 1 - BE-2480 Dessel
tel. +32 14 83 72 11 - fax +32 14 83 72 12
www.sibelco.be

Technische fiche CEM 52,5 N – HSR/LA



Prüfungszeugnis

Art und Bezeichnung des Materials:	Portlandzement CEM I 52,5 N - HS/NA
Herkunft bzw. Hersteller:	HeidelbergCement AG, Zementwerk Paderborn 33106 Paderborn
Auswertungszeitraum:	01.01.2012 bis 31.03.2012

Bindemittelprüfung gem. DIN 1164/EN 196/EN 197/EN 413/EN 459 und nach werksinternen Prüfvorschriften:

Mahlfineinheit Rücket. 630 µm	%	Eindringmaß	mm
Mahlfineinheit Rücket. 200 µm	0,0 %	LP - Gehalt %	%
Mahlfineinheit Rücket. 90 µm	0,3 %	Raumbest. - Kochprobe	
Mahlfineinheit Rücket. 63 µm	%	Raumbest. - Le Chatelier	0,0 mm
Feinheit	3975 cm ² /g	H ₂ S/Traub/FA/K'stein	%
Spez.-Gewicht	g/cm ³	Hydratationswärme	J/g
Schüttgewicht	kg/dm ³	Weißgehalt	26,5 %
Wasseranspruch (NST)	31,0 %	Glühverlust	1,3 %
Erstarren - Anfang	325 Min.	CO ₂	0,7 %
Erstarren - Ende	380 Min.	SO ₃	3,0 %
f. Erstarren - W/B	cm		
Wasser zum Mörtel	%		
Ausbreitmaß	mm	Bedarfsmenge	kg/m ³

Festigkeiten:

Biegezugfestigkeiten in MPa nach					Druckfestigkeiten in MPa nach				
	1 Tag	2 Tage		28 Tage		1 Tag	2 Tage		28 Tage
	3,4	6,0		9,1		13,9	31,1		67,1

Bemerkungen:

Vorgenannte Werte sind Mittelwerte, die den üblichen Produktionsschwankungen unterliegen.

68820 Ennigerloh, den 22.05.2012



Chemische samenstelling CEM I 52,5 N –HSR/LA (CBR)

GEOS
constructive testing

Laboratorium Magnel voor
Betononderzoek
Technologiepark Zwijnaarde 9
9052 Gent (Zwijnaarde)
Aan de heer ir. Jeroen Dils

30/05/2012

Hertenstraat 30
B-3830 Wellen

Tel +32(0)12 67 09 09
Fax +32(0)12 74 54 05

www.geos.be

Beproeversrapport : 627071

Opdrachtgever : Laboratorium Magnel voor
Betononderzoek
Technologiepark Zwijnaarde 9
9052 Gent (Zwijnaarde)

Referentie : 12/446

Materiaal : Drie stalen Portlandcement (ref. 12/446): CEM I 52.5 N HSR LA (CBR),
CEM I 52.5 N HSR LA (HOLCIM), CEM I 42.5 N HSR LA (HOLCIM)

Afgeleverd door : post op 15/05/2012

Proefmethoden : ■ Sulfaatgehalte(NBN EN196-2)(2005)
■ Chemische analyse (WD-XRF)(ISO/DIS 29581-2)(2007)
■ : Proef uitgevoerd onder BELAC ISO 17025 accreditatie

Behandeld door : Marc Jeuris (techn.), Greet Vanstreels (adm.).



ir. J. Soers
Directeur

De keuzes van de resultaten vermeld in de verslagen hebben uitsluitend betrekking op de beproefde objecten. Dit verslag mag slechts worden verspreid of anderszins openbaar gemaakt in zijn geheel of gedeeltes. Het verslag is het auteursrecht van het laboratorium. Het verslag is niet te kopiëren of te verspreiden.



RESULTATEN

CEM I 52.5 N HSR LA (CBR)

Sulfaatgehalte (SO ₂) (%)	3,03
SiO ₂ (%)	20,90
Al ₂ O ₃ (%)	3,64
Fe ₂ O ₃ (%)	5,19
CaO (%)	63,68
MgO (%)	0,77
Na ₂ O (%)	0,17
K ₂ O (%)	0,63

CEM I 52.5 N HSR LA (HOLCIM)

Sulfaatgehalte (SO ₂) (%)	2,30
SiO ₂ (%)	21,24
Al ₂ O ₃ (%)	3,87
Fe ₂ O ₃ (%)	5,18
CaO (%)	64,11
MgO (%)	0,95
Na ₂ O (%)	0,18
K ₂ O (%)	0,52

CEM I 42.5 N HSR LA (HOLCIM)

Sulfaatgehalte (SO ₂) (%)	1,75
SiO ₂ (%)	21,03
Al ₂ O ₃ (%)	4,06
Fe ₂ O ₃ (%)	5,06
CaO (%)	63,86
MgO (%)	1,06
Na ₂ O (%)	0,25
K ₂ O (%)	0,59

Elkem Microsilica®

Grade 940

Product

General

Elkem Microsilica® Grade 940 is dry silica fume available in two main forms:

- **Undensified - 940 U** with a typical bulk density of 200 - 350 kg/m³
- **Densified - 940 D** with a typical bulk density of 500 - 700 kg/m³

Packaging

The products are supplied in a range of packaging:

- 25 kg paper bags
- Big bags in a variety of designs and sizes depending on product and production plant.
- Bulk in road tanker

Special packaging can be supplied on request.

Storage & Handling

Elkem Microsilica® Grade 940 should be kept in dry storage. Products that have been subjected to moisture and allowed to dry again may result in inferior performance.

For advice on handling the products in an industrial set-up, reference is made to our Data sheet C1-01 'Handling of Microsilica Powder'.

Quality Control

Elkem Materials is certified according to ISO 9001.

The chemical composition and physical properties are regularly tested.

Elkem Microsilica® Grade 940		
Chemical and physical requirements	Specification (characteristic values)	Frequency
SiO ₂ (%)	> 90	Weekly
H ₂ O (moisture content when packed, %)	< 1,0	Weekly
Loss on Ignition, LOI (%)	< 3,0	Weekly
Retained on 45 micron sieve (tested on Undensified, %)	< 1,5	Weekly
Bulk Density - Undensified (when packed, kg/m ³)	200 - 350	Weekly
Bulk Density - Densified (when packed, kg/m ³)	500 - 700	Weekly

The above Elkem specification refers to analysis performed using the Elkem Standard Test Methods for Microsilica. Elkem Standard Test Methods for Microsilica are available upon request.

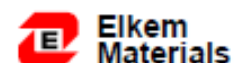
The information given on this datasheet is accurate to the best knowledge of Elkem Materials. The information is offered without guarantee, and Elkem Materials accepts no liability for any direct or indirect damage from its use. The information is subject to change without notice. For latest update or further information or assistance, please contact your local representative, the Internet address or the e-mail address given on this datasheet.

PRODUCT

APRIL 2005

Elkem Microsilica® is a registered trademark and belongs to Elkem ASA Materials

Contact representative:



Internet: www.materials.elkem.com
e-mail: microsilica.materials@elkem.no

Elkem Microsilica®

CONCRETE

Grade 920 for construction

C2-01
Product

General

Elkem Microsilica® Grade 920 is dry silica fume available in two main forms:

- Undensified - 920 U, with a typical bulk density of 200 - 350 kg/m³
- Densified - 920 D, with a typical bulk density of 500 - 700 kg/m³

Packaging

The products are supplied in a range of packaging:

- 25 kg paper bags
- Big bags in a variety of designs and sizes depending on product and production plant.
- Bulk in road tanker

Special packaging can be supplied on request.

Quality Control

Elkem Materials is certified according to ISO 9001.

The chemical composition and physical properties are regularly tested in accordance with ASTM standards.

Conformance to Standards

Elkem Microsilica® Grade 920 conforms to the mandatory requirements of ASTM C1240 from American Society for Testing and Materials

Mandatory chemical and physical requirements	ASTM C1240	
	Spec.	Frequency
SiO ₂ (%)	> 85,0	400 MT
Alkalies (as equivalent Na ₂ O, %)	Report	400 MT
Moisture (%)	< 3,0	400 MT
Loss on Ignition, LOI (%)	< 6,0	400 MT
Specific surface (BET - m ² /gram)	> 15	3200 MT/3 months
Bulk density (kg/m ³)	Report	400 MT
Pozz. Activity Index (%) - 7 days accelerated curing	> 105	3200 MT/3 months
Retained on 45 micron sieve (%)	< 10	400 MT
Variation from avg. retained on 45 micron (%-points)	< 5	avg. of last 10 tests
Density (kg/m ³)	Report	400 MT

The information given on this datasheet is accurate to the best knowledge of Elkem Materials. The information is offered without guarantee, and Elkem Materials accepts no liability for any direct or indirect damage from its use. The information is subject to change without notice. For latest update or further information or assistance, please contact your local representative, the internet address or the e-mail address given on this datasheet.

CONCRETE

PRODUCT

SEPTEMBER 2008

C2-01

Elkem Microsilica® is a registered trademark and belongs to Elkem ASA Materials

Contact/representative:



Internet: www.concrete.elkem.com
e-mail: microsilica.materials@elkem.no

Elkem Microwhite®

Property	Typical Value**
SiO ₂ (Silicon dioxide, amorphous)	> 90 %
Colour Measurement (Reflection)*	> 75 %
Loss on ignition, LOI	< 3.0 %
Coarse Particles (>45 µm, 325 mesh)*	< 1.5 %
Specific Surface Area (BET)	> 15 m ² /g
Bulk Density	400 – 700 kg/m ³ (when packed)
H ₂ O (Moisture)	< 1 % (when packed)

* Tested on undensified material

** Typical values are for indicational use only. Test methods are available upon request from microwhite@elkem.com

All data listed are typical values for information only and are subject to production related tolerances. Although reasonable care has been taken in the preparation of the information contained herein, it remains the duty of the user to prove the suitability of this material for their application.

www.concrete.elkem.com/microwhite

Technische fiche silica fume S95 DS



Notice technique
Edition 01.2014
CONDENSIL® S95 DS

CONDENSIL® S95 DS

Fumée de silice densifiée, addition pour bétons haute durabilité et hautes, très hautes et ultra hautes performances

Conforme à la Norme **NF EN 13263-1,2 : 2009, Marquage CE**

N° d'enregistrement **REACH 01-2119486866-17-0005**

Code **CAS 69012-64-2**

Code **EINECS 273-761-1**

CARACTERISTIQUES GENERALES	
Présentation	CONDENSIL® S95 DS est une fumée de silice ultrafine obtenue lors de la fabrication du silicium.
Domaines d'application	<p>La fumée de silice CONDENSIL® S95 DS permet de fabriquer des :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Bétons à haute durabilité résistants en milieux agressifs : <ul style="list-style-type: none"> - domaines agricoles : ensilage, stockage d'engrais, aires de stabulation... - milieu industriel : industries chimiques et agro-alimentaires, sucreries, conserveries, laiteries, bacs de rétention... - stations-service : béton en contact d'huiles et de carburants - milieu marin : digue, aménagement portuaire ... - zone de montagne : présence d'eau pure, d'eau séléniteuse + gel dégel ou de sels de déverglaçage - stations d'épuration, égouts, caniveaux... ■ Bétons à hautes résistances (BHP, BTHP et BUHP) ■ Bétons pompables ■ Bétons projetés
Caractères généraux	<p>CONDENSIL® S95 DS confère aux bétons les propriétés suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ améliore les performances mécaniques à long terme : résistances en compression, flexion et traction ■ augmente le module d'élasticité ■ réduit le fluage ■ améliore la résistance à l'abrasion et à l'érosion ■ améliore la durabilité en milieux agressifs ■ diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes d'alcali-réaction et de la réaction sulfatique interne (RSI) ■ diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides ■ facilite le pompage de tous les bétons même peu dosés en ciment ■ réduit le risque de ségrégation du béton
CARACTERISTIQUES TECHNIQUES	
Coloris	■ Gris
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sacs de 25 kg et 30 kg – palette de 36 sacs ■ Sacs de 15 kg – palette de 60 sacs
Stockage	■ Dans un local à l'abri de l'humidité.
Conservation	■ Dans son emballage d'origine intact, le produit se conserve 3 ans.

DONNEES TECHNIQUES		
	EN 13263 - 1,2 : 2009*	Valeurs observées**
Densité apparente	0.60 (0.58 à 0.62)	0.60 ± 0.01
Densité réelle	2.24	
Surface spécifique BET (m ² /g)	Entre 15 et 35	22 ± 2
Teneur en SiO ₂	≥ 85 %	95 % ± 2
Teneur en Si élémentaire	≤ 0.4 %	0.09 % ± 0.02
Teneur en Na ₂ O équivalent	≤ 1.0 %	0.50 % ± 0.5
Teneur en SO ₃	≤ 2.0 %	0.35 % ± 0.50
Teneur en Cl ⁻	≤ 0.1%	0.01 % ± 0.01
Indice d'activité à 28 j	≥ 100	≥ 105
Perte au feu	≤ 4.0 %	2 % ± 0.5
Teneur CaO	≤ 1.0%	0.8 % ± 0.1
	<i>* Valeurs contractuelles</i>	<i>** Valeurs non contractuelles</i>
CONDITIONS D'UTILISATION		
Consommation / Dosage	Le dosage peut être compris entre 5 à 10 % du poids du ciment. Le dosage le plus courant est de 8 % du poids du ciment.	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> ■ CONDENSIL® S95 DS doit être pesé dans la bascule à ciment avec le ciment pour le vrac ou introduit avec le ciment. ■ Afin d'obtenir toutes les performances de CONDENSIL® S95 DS, il est indispensable de défloculer complètement les micro-particules de silice. Pour cela, CONDENSIL® S95 DS doit être systématiquement associé avec un superplastifiant, haut réducteur d'eau. 	
Précautions d'emploi	<ul style="list-style-type: none"> ■ L'emploi d'un masque est obligatoire lors de son utilisation ■ Fiche de données de sécurité fournie sur demande. 	
Mentions légales	<p>Produit réservé à un usage strictement professionnel. Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.</p> <p>«Les informations sur la présente notice et, en particulier, les recommandations relatives à l'utilisation finale des produits sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société CONDENSIL a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et utilisés dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nous sommes à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une utilisation non conforme à nos renseignements. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande».</p>	



CONDENSIL
 265 RUE DES EPINETTES
 ZONE DES LANDIERS NORD
 73000 CHAMBERY

Tél. 00 33 4 79 62 74 03
 Fax 00 33 4 79 96 35 94
 E-mail condensil@vicat.fr

Chemische samenstelling van de verschillende soorten silica fume



Laboratorium Magnel voor
Betononderzoek
Technologiepark Zwijnaarde 9
9052 Gent (Zwijnaarde)
Aan de heer Jeroen Dils

16/11/2012

Hertenstraat 30
B-3830 Wellen

Tel +32(0)12 67 09 09
Fax +32(0)12 74 54 05

www.geos.be

Beproeversrapport : 652151

Opdrachtgever : Laboratorium Magnel voor
Betononderzoek
Technologiepark Zwijnaarde 9
9052 Gent (Zwijnaarde)

Referentie : 12/446

Materiaal : Vijf stalen Silica Fume. Gemerkt : S95 DS CONDENSIL ;
Microwhite CONDESIL; MS 920D ELKEM, MS 940U ELKEM en
Microwhite ELKEM

Afgeleverd door : post op 31/10/2012

Proefmethoden : Chemische analyse (ICP-AES)(Methode Geos)
■ Koolstof gehalte (gebaseerd op ISO 15350 (2000)
■ : Proef uitgevoerd onder BELAC ISO 17025 accreditatie

Behandeld door : Marc Jeuris (techn.), Greet Vanstreels (adm.).

RESULTATEN

	S95 DS CONDENSIL	Microwhite CONDESIL	MS 920D ELKEM	MS 940U ELKEM	Microwhite ELKEM
SiO ₂ (%)	96.10	97.88	95.07	94.97	96.53
Fe ₂ O ₃ (%)	1.37	1.11	1.29	1.88	1.11
Al ₂ O ₃ (%)	0.05	0.08	0.95	0.35	0.32
CaO (%)	0.64	0.36	0.19	0.19	0.19
MgO (%)	0.28	0.13	0.44	0.62	0.30
Na ₂ O (%)	0.29	0.14	0.37	0.41	0.26
K ₂ O (%)	0.94	0.18	1.52	1.45	0.84
Totaal Koolstof (%)	0.80	0.25	0.57	0.56	0.19



ir. J. Soers
Directeur

De kopertekst (resultaten vermeld in de verslagen) hebben uitsluitend betrekking op de kopertekst afgelezen. De verslagen (met uitsluiting) worden vervaardigd in zijn oorspronkelijke vorm. Gedrukte of gereproduceerde verslagen worden niet geaccepteerd. De verslagen (met uitsluiting) worden vervaardigd in zijn oorspronkelijke vorm. De verslagen (met uitsluiting) worden vervaardigd in zijn oorspronkelijke vorm. De verslagen (met uitsluiting) worden vervaardigd in zijn oorspronkelijke vorm.

Technical Data



Description	MICROSIL® M is produced by iron-free grinding and accurate sieving by means of air-separators. A selected silica sand with a SiO ₂ content of over 99% is used as raw material. The purity, controlled particle size distribution, chemical inertness, optical properties and hardness make MICROSIL® M the performance standard in ceramics, tile-glues, special mortars and coatings.		
Properties	Specific density	: 2.65 kg/dm ³	
	Loose bulk density	: 1.15 kg/dm ³	
	Hardness	: > 7 Mohs	
	pH	: 7	
	colour	:	
	L*	89.5	Minolta CM-3610d
	a*	1.1	D65/10°
	b*	3.8	
	Refractive index	1,55	
	Oil absorption	14,5 g/100g	
	Specific surface	1950 cm ² /g	Blaine
Chemical Composition (Indication only)	SiO ₂	: 99.40 %	
	Fe ₂ O ₃	: 0.03 %	
	Al ₂ O ₃	: 0.10 %	
	TiO ₂	: 0.07 %	
	Loss on ignition	0.15 %	
Sieve analysis Sieves as per (ISO-3310-1)	>100 µ	: 16,0% (control-sieve)	D10 : 7 µm D50 : 50 µm D90 : 170 µm
Packing	<ul style="list-style-type: none"> - Plastic bags of 25 kg, on shrink foiled export pallets. - Strong woven polypropylene big bags, with 4 lifting loops. 		
Cas-Nr.:	14808-60-7		
EINECS-Nr.:	238-878-4		

The above given information is based on mean values. The typical properties and chemical analyses are intended as examples and are not to be considered as substitutes for actual testing and analyses in those situations where properties and chemical compositions are critical factors. Sales and supplies will always be according to our general sales conditions.

TDS. 2011-Microsil M4 (UK) 1/1



Eurogrit bv
Address:
Noordhoek 7
3351 LD Papendrecht
The Netherlands

Mall:
P.O. Box 184
3350 AD Papendrecht
The Netherlands

Tel.: +31 (0)78-6546770
Fax: +31 (0)78-6609494
E-mail: info@eurogrit.com
Internet: www.eurogrit.com

FEATURES AND BENEFITS

DESSEL, BELGIUM

SILVERBOND® crystalline silica is produced from high purity quartz feed stock for manufacturing and formulation of applications which require structurally sound, chemically pure or non-reactive fine mineral fillers.

Completely inert and pH neutral, SILVERBOND® will not alter or initiate when incorporated in catalysed or multi-component chemical systems, and will not degrade when employed in extreme temperatures or harsh environments. SILVERBOND offers formulators a low surface area, minimal oil absorption option to achieve high loading in coatings and cementitious systems and stiffening in elastomeric and high performance epoxy. Chemically pure SILVERBOND also serves as an excellent nonconductor in electrical assemblies and potting compounds, and non-combustible filler in thermal insulating.

All SILVERBOND® grades are processed with adherence to ISO and Internal quality assurance programs. The result is chemical purity and consistently uniform particle size distributions for predictable results supported by reliable services.

GRANULOMETRIC DATA AND PHYSICAL CHARACTERISTICS

Mean values. These do not represent a specification.

	M400	M500	M600	M800		Method
control sieve						
> 40 µm	0.1	0.012	0.004		%	Alpine
5 µm				95	% passing	Malvern MS2000
D10	3	2	2	0.6	µm	Malvern MS2000
D50	12	4	4	1.8	µm	Malvern MS2000
D90	26	10	9	4.1	µm	Malvern MS2000
density	2.65	2.65	2.65	2.65	kg/dm ³	
bulk density	0.7	0.65	0.6	0.4	kg/dm ³	
specific surface	1.9	4.2	4.2	7.8	m ² /g	BET
	6500	12000	13000	21500	cm ² /g	Blaine
oil absorption	20	23	24	32	g/100 g	
hardness	7	7	7	7	Mohs	
pH	7	7	7	7		
loss on ignition	0.12	0.3	0.3	0.3	%	
colour						
L*	93	94	94	96		Minolta CM-3610d
a*	0.55	0.46	0.46	0.4		D65/10°
b*	3.00	2.78	2.78	0.8		
refractive index	1.55	1.55	1.55	1.55		

CHEMICAL ANALYSIS (XRF) %

Mean values. These do not represent a specification.

	M400	M500	M600	M800
SiO ₂	99.5	99.2	99.2	99.0
Fe ₂ O ₃	0.03	0.05	0.05	0.01
Al ₂ O ₃	0.20	0.40	0.40	0.80
TiO ₂	0.03	0.03	0.03	0.03
K ₂ O	0.05	0.05	0.05	0.05
CaO	0.02	0.02	0.02	0.02



Please feel free to contact us for further information.

www.sibelco.be

The given information is based on mean values. The typical properties and chemical analyses are intended as examples and are not to be considered as substitutes for actual testing and analyses in those situations where properties and chemical compositions are critical factors.

Sales and supplies will always be according to our general sales conditions.

MSDS available on request • TDS.03.05.51 • 2010-04-23 • ed.02

The Globe mark and Silverbond are trademarks of SCR Sibelco, its subsidiaries and affiliates.

CAS-Nr.: 14808-60-7
EINECS-Nr.: 238-878-4

De Zate 1, BE-2480 DESSEL, Belgium
Tel: +32 14 83 72 11 Fax: +32 14 83 72 12 email: sales@sibelco.be

Technische fiche superplastificeerder Glenium 51



The Chemical Company

GLENIUM® 51

A high performance concrete superplasticiser based on modified polycarboxylic ether

Description

GLENIUM® 51 has been primarily developed for applications in the ready mixed and precast concrete industries where the highest durability and performance is required.

GLENIUM® 51 is free from chlorides and complies with ASTM C494 Types A and F.

GLENIUM® 51 is compatible with all Portland cements that meet recognised international standards.

Chemistry and mechanism of action of GLENIUM® 51

Conventional superplasticisers, such as those based on sulphonated melamine and naphthalene formaldehyde condensates, at the time of mixing, become absorbed onto the surface of the cement particles. This absorption takes place at a very early stage in the hydration process. The sulphonic groups of the polymer chains increase the negative charge on the surface of the cement particle and dispersion of the cement occurs by electrostatic repulsion.

GLENIUM® 51 is differentiated from conventional superplasticisers in that it is based on a unique carboxylic ether polymer with long lateral chains. This greatly improves cement dispersion. At the start of the mixing process the same electrostatic dispersion occurs as described previously but the presence of the lateral chains, linked to the polymer backbone, generate a steric hindrance which stabilises the cement particles capacity to separate and disperse.

This mechanism provides flowable concrete with greatly reduced water demand.

Typical applications

The excellent dispersion properties of GLENIUM® 51 make it the ideal admixture for precast and readymixed concrete where low water cement ratios are required. This property allows the production of very high early and high ultimate strength concrete with minimal voids and therefore optimum density. Due to the strength development characteristics the elimination or reduction of steam curing in precast works may be considered as an economical option.

GLENIUM® 51 can be used to produce very high early strength floor screeds. For screed mix designs consult BASF Technical Services.

- high workability without segregation or bleeding
- less vibration required
- can be placed and compacted in congested reinforcement
- reduced labour requirement
- improved surface finish

Packaging

GLENIUM® 51 is available in 208 litre drums and in bulk tanks upon request.

Typical properties

Properties listed are only for guidance and are not a guarantee of performance

Form	viscous liquid
Colour	light brown
Relative density	1.1 @ 20°C
pH	6.6
Viscosity	128 +/- 30 cps @ 20°C
Transport	Not classified as dangerous
Labelling	No hazard label required

Adding Value to Concrete



The Chemical Company

GLENIUM[®] 51

Effect on hardened concrete properties

- Increased early and ultimate compressive strengths
- Increased flexural strength
- higher E modulus
- Improved adhesion to reinforcing and stressing steel
- better resistance to carbonation
- lower permeability
- better resistance to aggressive atmospheric conditions
- reduced shrinkage and creep
- increased durability

Compatibility of GLENIUM[®] 51

GLENIUM[®] 51 must not be used in conjunction with any other admixture unless prior approval is received from BASF Technical Services.

GLENIUM[®] 51 is suitable for mixes containing:

- microsilica
- pulverised fuel ash
- ground granulated blast furnace slag cement

Dosage

The normal dosage for GLENIUM[®] 51 is between 0.5 and 1.6 litres per 100 kg of cement (cementitious material). Dosages outside this range are permissible subject to trial mixes.

Directions for use

GLENIUM[®] 51 is a ready to use admixture that is added to the concrete at the time of batching.

The maximum effect is achieved when the GLENIUM[®] 51 is added after the addition of 50 to 70 % of the water. GLENIUM[®] 51 must not be added to the dry materials.

Thorough mixing is essential and a minimum mixing cycle, after the addition of the GLENIUM[®]

51, of 60 seconds for forced action mixers is recommended.

Storage

GLENIUM[®] 51 should be stored in original containers and at above 5 Centigrade. If frozen gradually thaw and agitate until completely reconstituted.

Failure to comply with the recommended storage conditions may result in premature deterioration of the product or packaging. For specific storage advice consult BASF's Technical Services Department.

Safety precautions

GLENIUM[®] 51 contains no hazardous substances requiring labelling. For further information refer to the Material Safety Data Sheet.

Note

Field service, where provided, does not constitute supervisory responsibility. For additional information contact your local BASF representative.

BASF reserves the right to have the true cause of any difficulty determined by accepted test methods.

Quality and care

All products originating from BASF's Dubai, UAE facility are manufactured under a management system independently certified to conform to the requirements of the quality, environmental and occupational health & safety standards ISO 9001, ISO 14001 and OHSAS 18001.

06/07 BASF_CC-UAE revised 04/2004

Whilst any information contained herein is true, accurate and represents our best knowledge and experience, no warranty is given or implied with any recommendations made by us, our representatives or distributors, as the conditions of use and the competence of any labour involved in the application are beyond our control.

As all BASF technical datasheets are updated on a regular basis it is the user's responsibility to obtain the most recent issue.

BASF Construction Chemicals UAE LLC

P.O. Box 37127, Dubai, UAE

Tel: +971 4 8090800

www.basf-cc.ae

Fax: +971 4 8851002

e-mail: marketingcc.mideast@basf.com



Certificate No.
983980

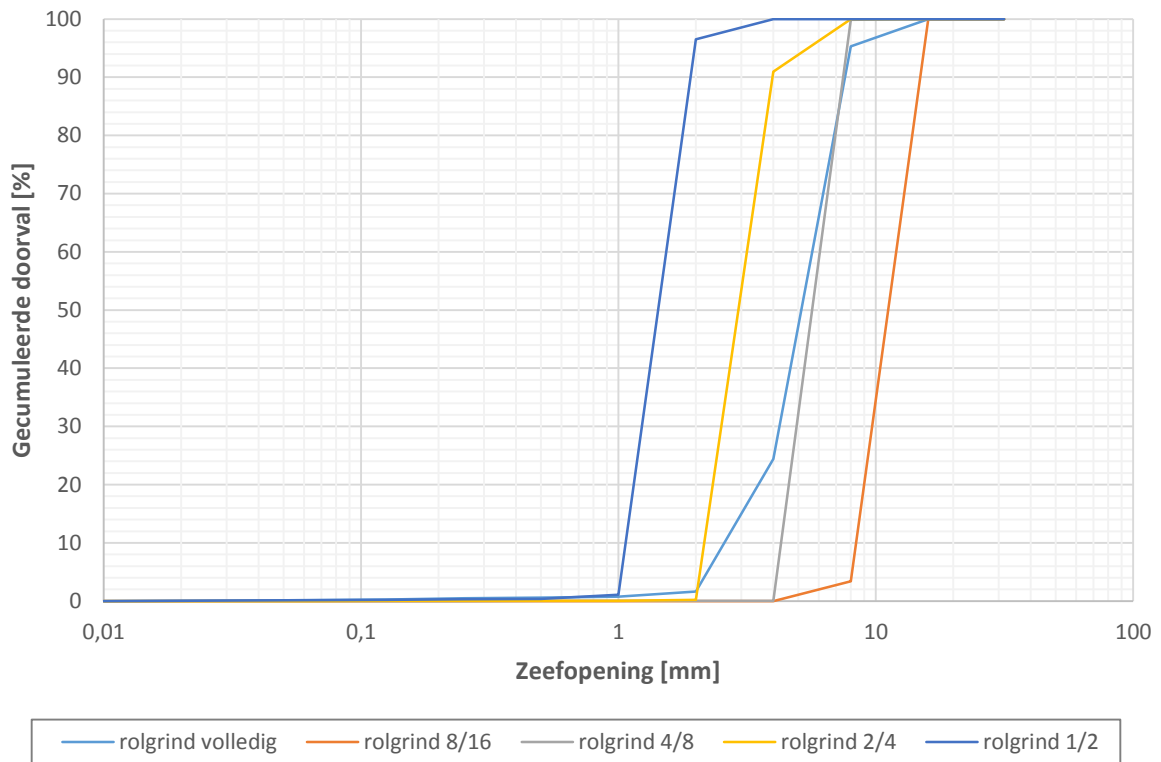


Certificate No.
945787

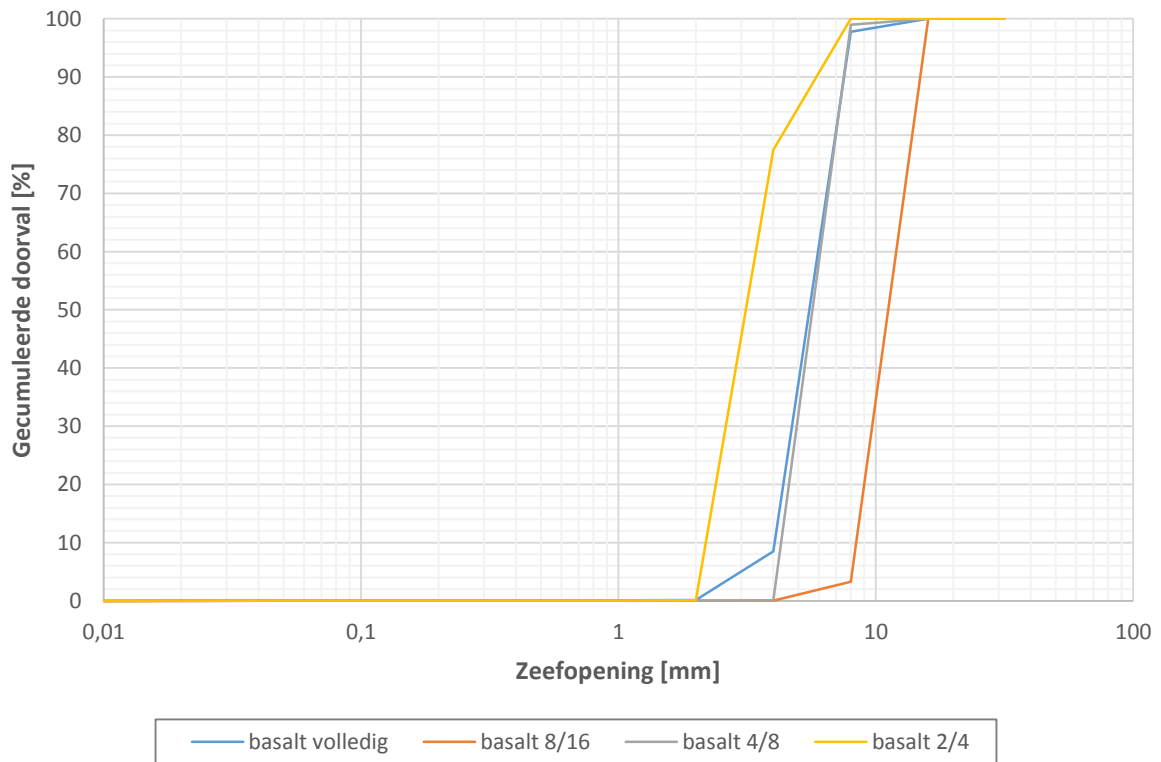


Certificate No.
772556

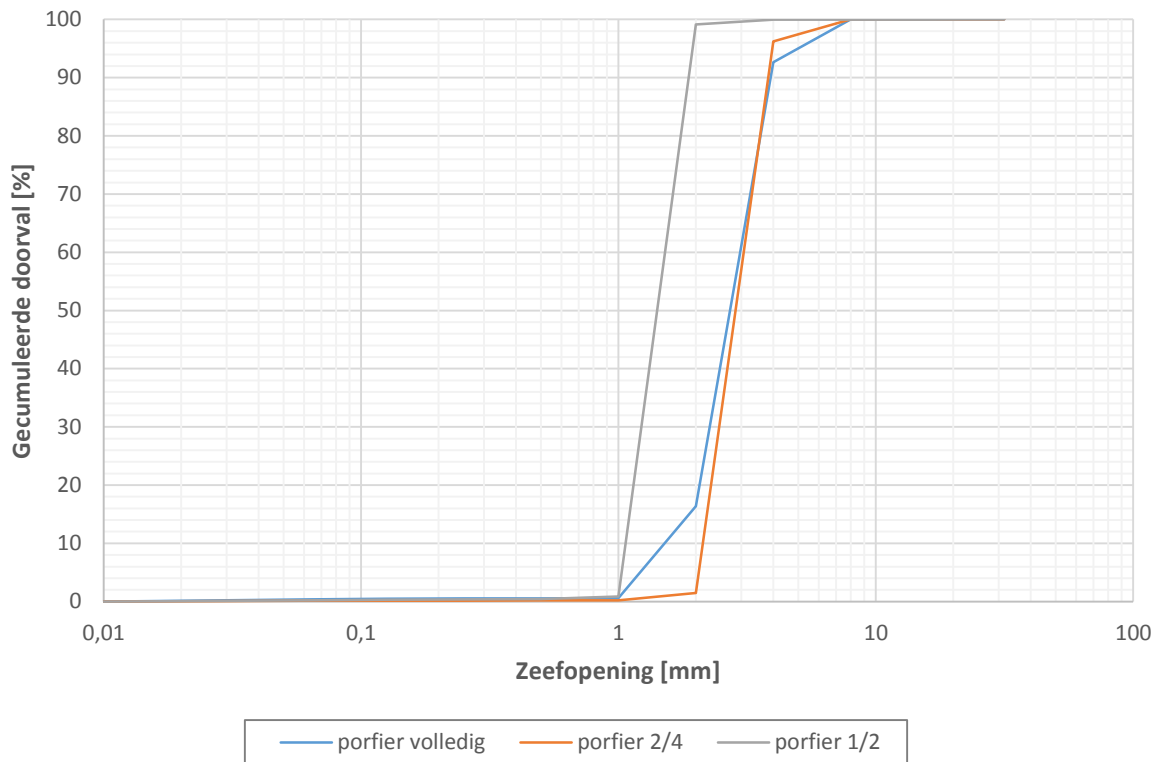
Bijlage B: Droge zeefkrommes



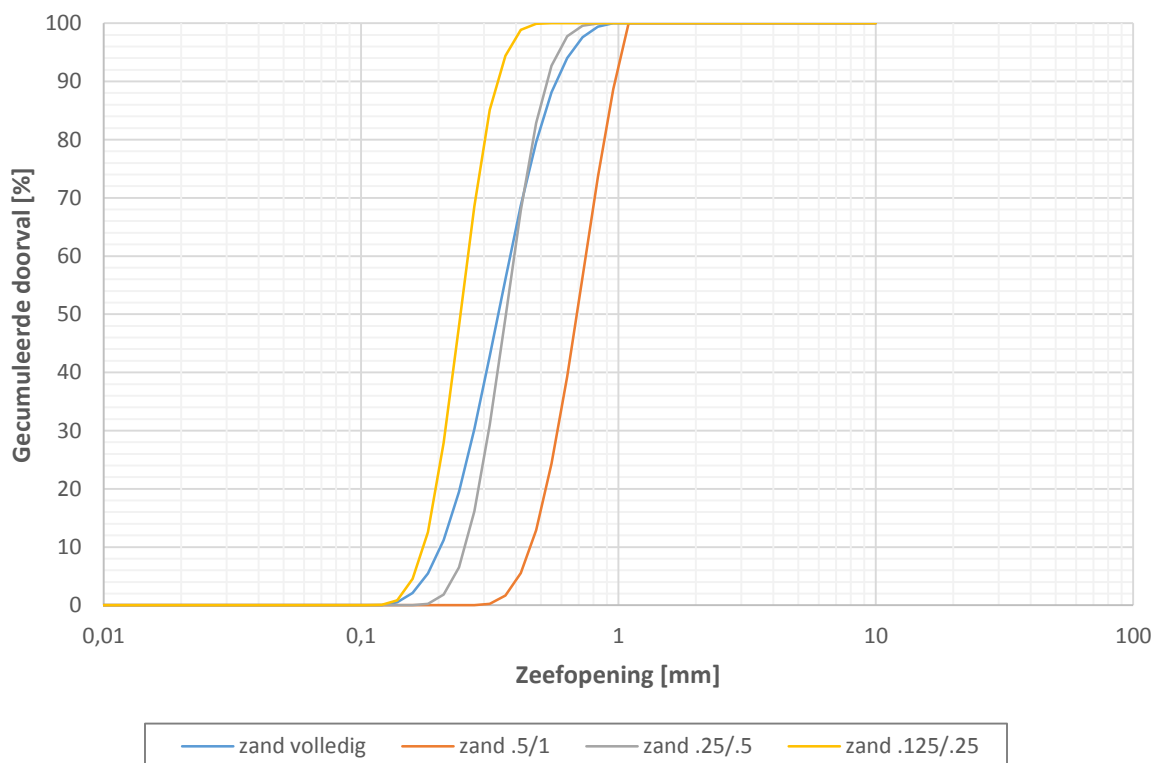
Figuur B.1: Zeefkromme rolgrind 4/16 (inclusief fracties)



Figuur B.2: Zeefkromme basalt 4/16 (inclusief fracties)



Figuur B.3: Zeefkromme porfier 2/4 (inclusief fracties)



Figuur B.4: Zeefkromme zand M31 (inclusief fracties)

Bijlage C: Interactiekrommen zwaartekrachtspreef volgens CPM

Individuele pakkingsdichtheid van de afzonderlijke korreelfracties

Tabel C.1: Individuele pakkingsdichtheid van de korreelfracties volgens de zwaartekrachtspreef

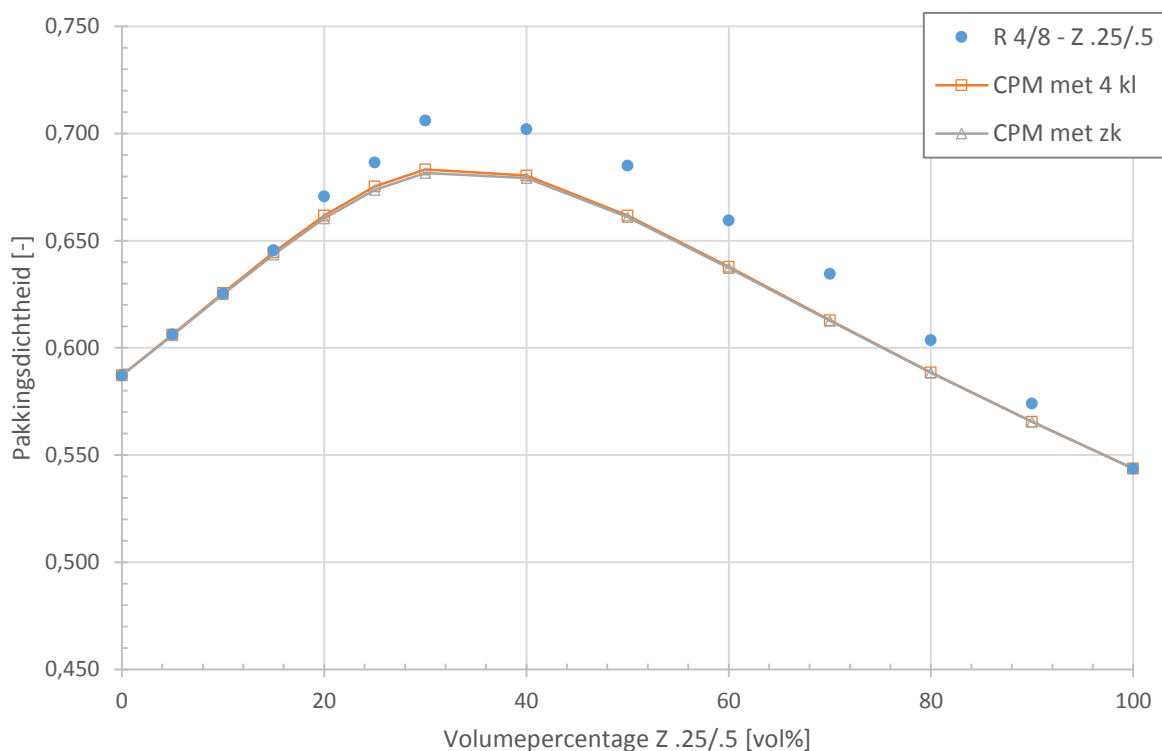
Fractie [mm]	PD _{actueel} [-]
R 4/8	0,587
R 2/4	0,550
B 4/8	0,493
B 2/4	0,451
P 2/4	0,497
Z .5/1	0,542
Z .25/.5	0,544
Z .125/.25	0,528

Pakkingsprofielen zwaartekrachtspreef

In de onderstaande tabellen en grafieken worden de experimentele waarden van de pakkingsdichtheid vergeleken met de waarden die uit het *compressible packing model* volgen. In de kolom **PD_{actueel}** wordt de actuele pakkingsdichtheid weergegeven. Deze waarde is het gemiddelde van vijf metingen die worden uitgevoerd met hetzelfde mengsel. In de kolom **CPM met 4 kl** worden de waarden weergegeven die worden gevonden wanneer elke fractie vier korrelverdelingsklassen met elk een voorkomenspercentage van 25 % wordt toebedeeld. Deze vier klassen liggen tussen de grenzen die in de benaming van de granulaten wordt weergegeven. In de kolom **CPM met zk** wordt in het CPM met de volledige zeefkromme van het granulaat rekening gehouden.

Tabel C.2: Pakkingsprofiel R 4/8 - Z .25/.5

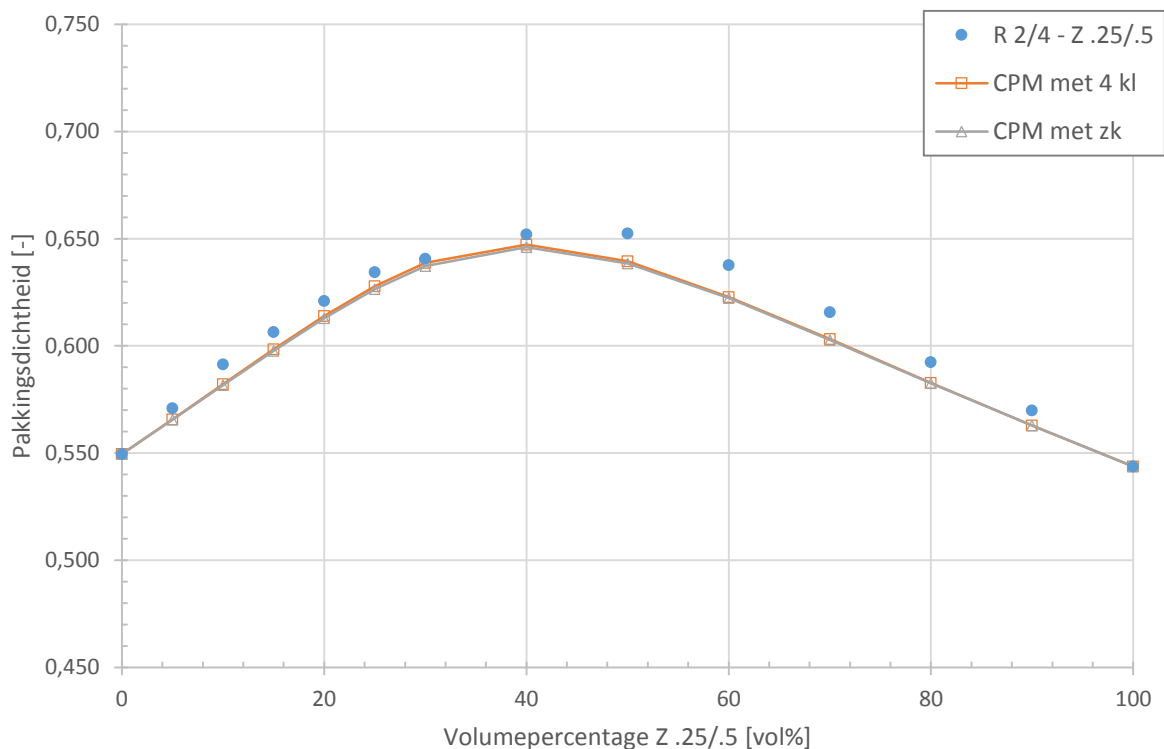
R 4/8	PD _{actueel}	CPM met 4 kl	Error	CPM met zk	Error
[vol%]	[-]	[-]	[%]	[-]	[%]
100	0,587	0,587	-	0,587	-
95	0,606	0,606	0,02	0,606	0,07
90	0,626	0,626	0,02	0,625	0,08
85	0,646	0,645	0,18	0,644	0,33
80	0,671	0,662	1,36	0,660	1,57
75	0,687	0,675	1,66	0,674	1,91
70	0,706	0,683	3,35	0,682	3,61
60	0,702	0,680	3,17	0,679	3,37
50	0,685	0,662	3,50	0,661	3,62
40	0,659	0,638	3,39	0,637	3,47
30	0,635	0,613	3,53	0,613	3,59
20	0,604	0,589	2,54	0,588	2,57
10	0,574	0,566	1,51	0,566	1,52
0	0,544	0,544	-	0,544	-
Gemiddelde error			2,02	2,14	
Maximale error			3,53	3,62	



Figuur C.1: Interactiekromme R 4/8 - Z .25/.5 volgens zwaartekrachtspreef

Tabel C.3: Pakkingsprofiel R 2/4 - Z .25/.5

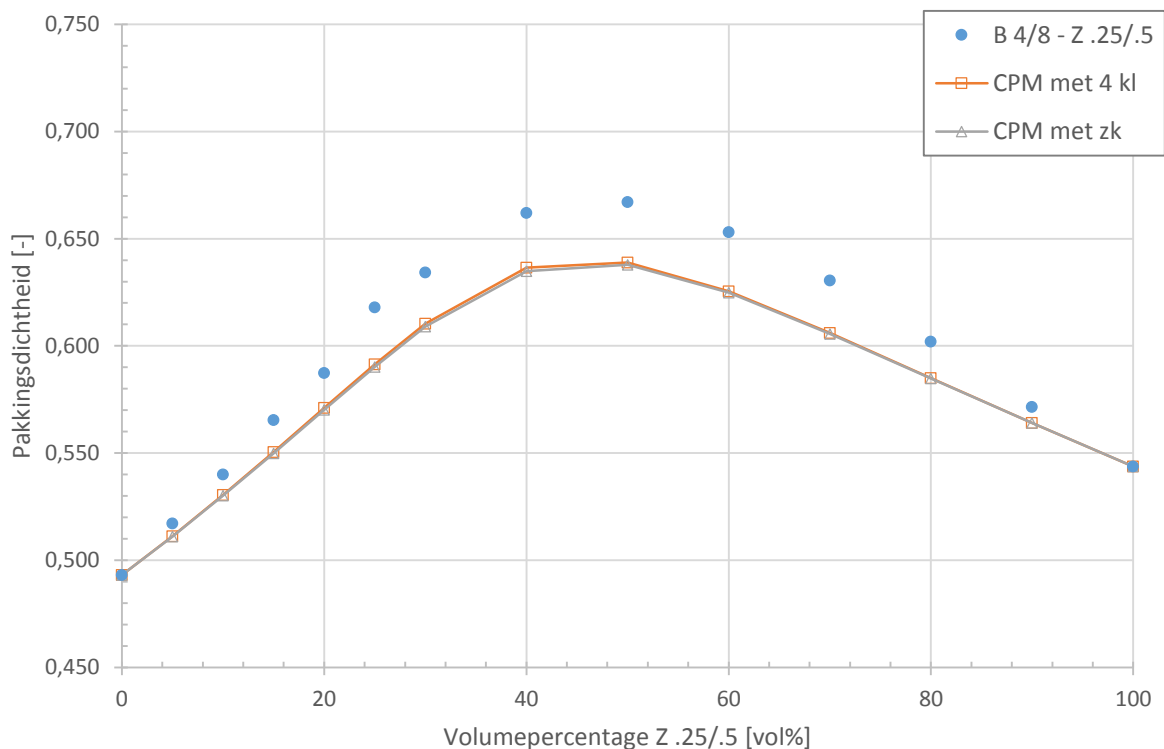
R 2/4 [vol%]	PD _{actueel} [-]	CPM met 4 kl [-]	Error [%]	CPM met zk [-]	Error [%]
100	0,550	0,550	-	0,550	-
95	0,571	0,566	0,92	0,566	0,96
90	0,591	0,582	1,60	0,582	1,69
85	0,607	0,598	1,36	0,598	1,49
80	0,621	0,614	1,13	0,613	1,30
75	0,634	0,628	1,06	0,627	1,27
70	0,641	0,639	0,31	0,637	0,55
60	0,652	0,647	0,73	0,646	0,93
50	0,652	0,639	2,04	0,638	2,20
40	0,638	0,623	2,39	0,622	2,48
30	0,616	0,603	2,09	0,603	2,15
20	0,592	0,583	1,65	0,583	1,68
10	0,570	0,563	1,26	0,563	1,27
0	0,544	0,544	-	0,544	-
Gemiddelde error			1,38	1,50	
Maximale error			2,39	2,48	



Figuur C.2: Interactiekromme R 2/4 - Z .25/.5 volgens zwaartekrachtspreef

Tabel C.4: Pakkingsprofiel B 4/8 - Z .25/.5

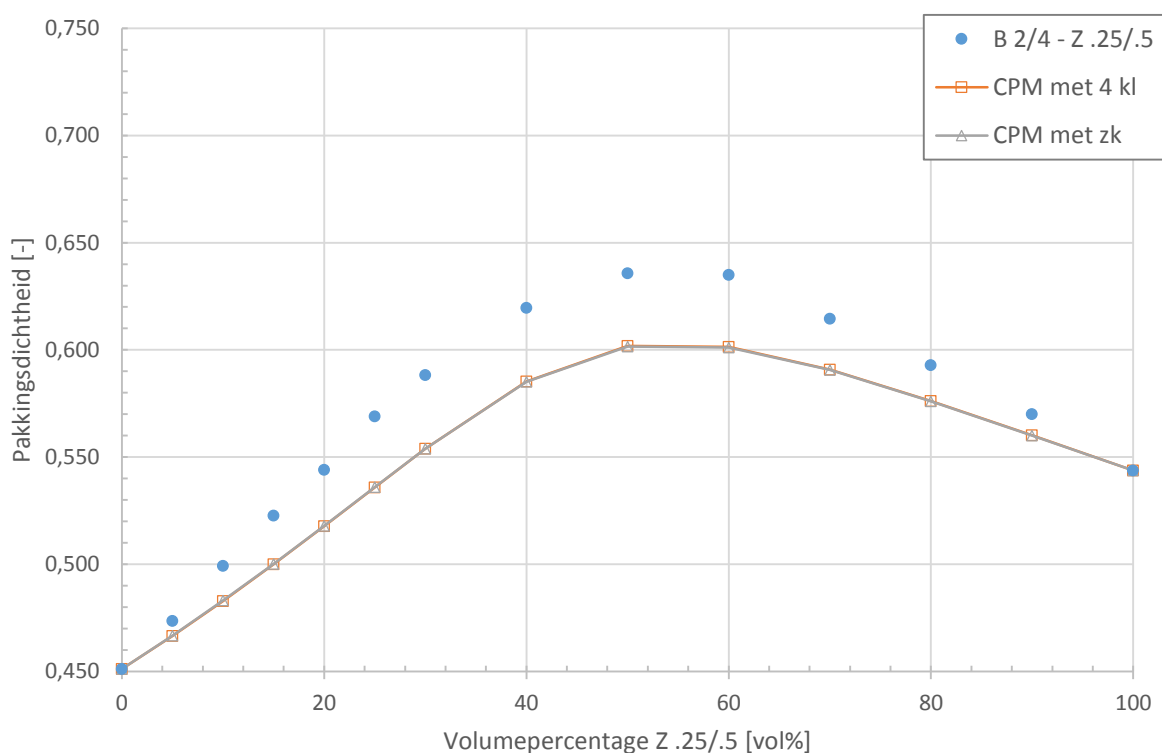
B 4/8 [vol%]	PD _{actueel} [-]	CPM met 4 kl [-]	Error [%]	CPM met zk [-]	Error [%]
100	0,493	0,493	-	0,493	-
95	0,517	0,511	1,16	0,511	1,19
90	0,540	0,531	1,79	0,530	1,86
85	0,565	0,551	2,71	0,550	2,83
80	0,587	0,571	2,86	0,570	3,02
75	0,618	0,591	4,47	0,590	4,69
70	0,634	0,610	3,89	0,609	4,14
60	0,662	0,636	4,03	0,635	4,30
50	0,667	0,639	4,40	0,638	4,59
40	0,653	0,626	4,40	0,625	4,51
30	0,631	0,606	4,06	0,606	4,12
20	0,602	0,585	2,92	0,585	2,95
10	0,572	0,564	1,31	0,564	1,33
0	0,544	0,544	-	0,544	-
Gemiddelde error			3,17	3,29	
Maximale error			4,47	4,69	



Figuur C.3: Interactiekromme B 4/8 - Z .25/.5 volgens zwaartekrachtsproef

Tabel C.5: Pakkingsprofiel B 2/4 - Z .25/.5

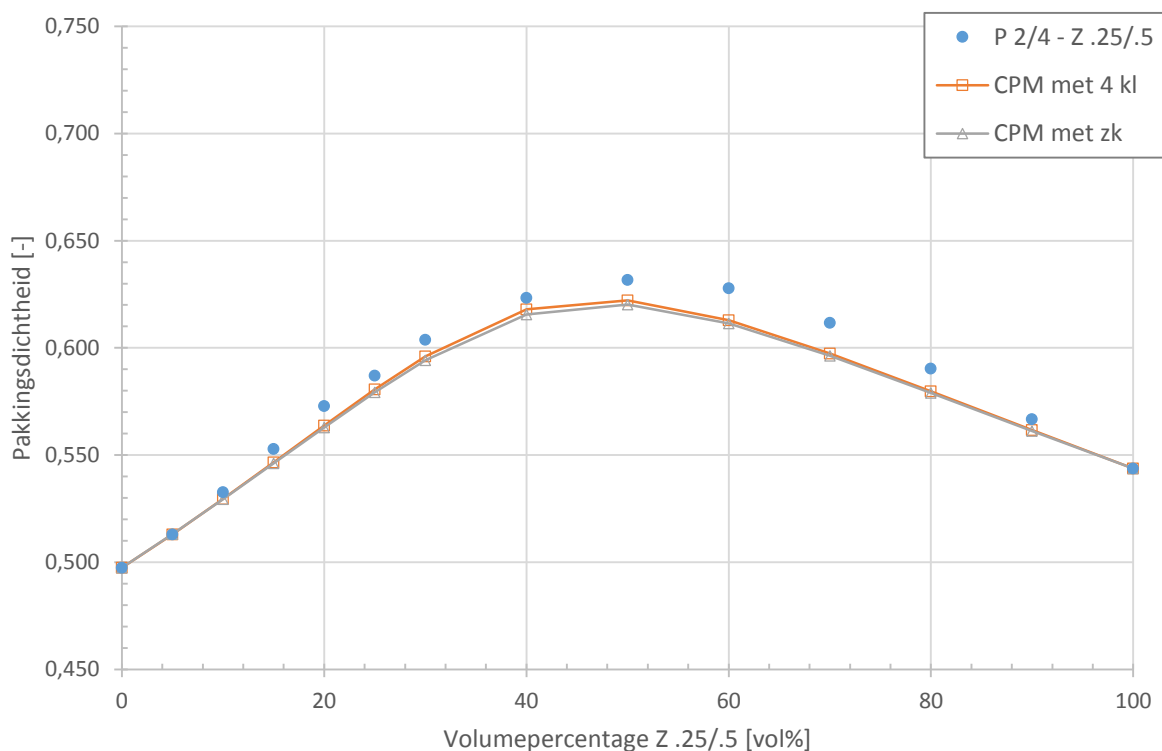
B 2/4	PD _{actueel}	CPM met 4 kl	Error	CPM met zk	Error
[vol%]	[-]	[-]	[%]	[-]	[%]
100	0,451	0,451	-	0,451	-
95	0,474	0,467	1,52	0,467	1,47
90	0,499	0,483	3,40	0,483	3,35
85	0,523	0,500	4,54	0,500	4,49
80	0,544	0,518	5,09	0,518	5,05
75	0,569	0,536	6,18	0,536	6,15
70	0,588	0,554	6,23	0,554	6,21
60	0,620	0,585	5,87	0,585	5,90
50	0,636	0,602	5,63	0,602	5,69
40	0,635	0,601	5,61	0,601	5,64
30	0,615	0,591	4,03	0,591	4,05
20	0,593	0,576	2,91	0,576	2,94
10	0,570	0,560	1,76	0,560	1,79
0	0,544	0,544	-	0,544	-
Gemiddelde error			4,40	4,39	
Maximale error			6,23	6,21	



Figuur C.4: Interactiekromme B 2/4 - Z .25/.5 volgens zwaartekrachtspoor

Tabel C.6: Pakkingsprofiel P 2/4 - Z .25/.5

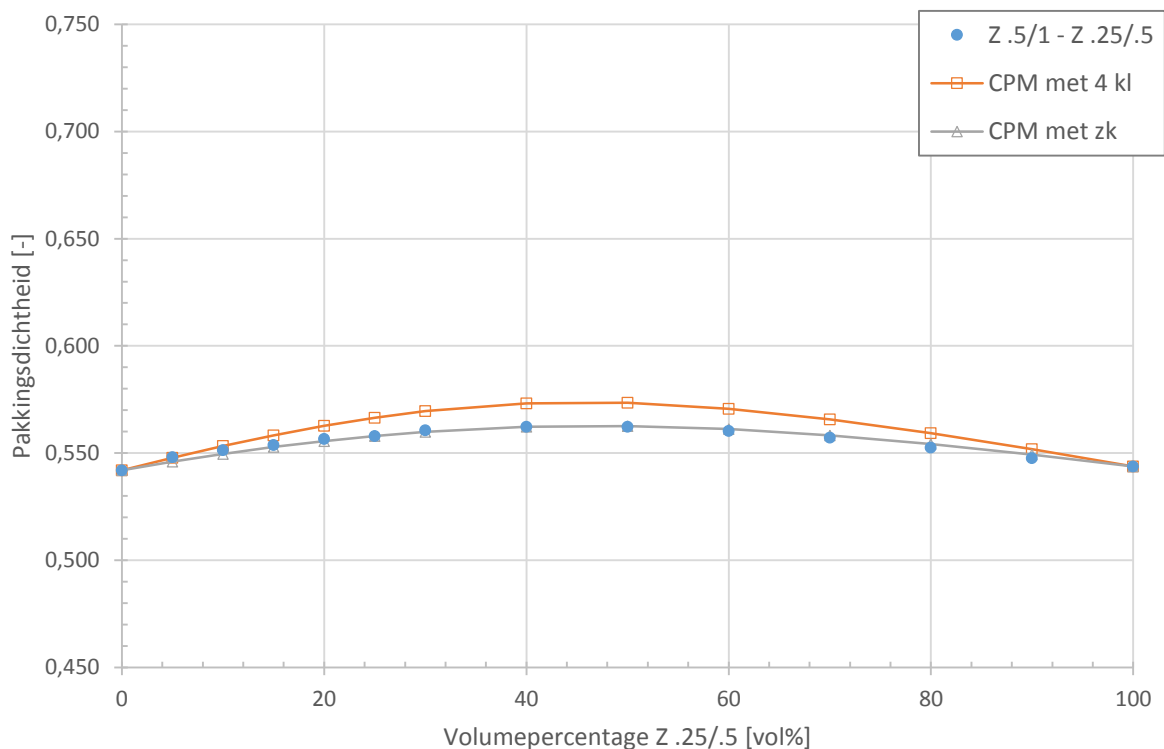
P 2/4 [vol%]	PD _{actueel} [-]	CPM met 4 kl [-]	Error [%]	CPM met zk [-]	Error [%]
100	0,497	0,497	-	0,497	-
95	0,513	0,513	0,01	0,513	0,04
90	0,533	0,530	0,59	0,529	0,61
85	0,553	0,547	1,15	0,546	1,24
80	0,573	0,564	1,61	0,563	1,77
75	0,587	0,581	1,12	0,579	1,36
70	0,604	0,596	1,29	0,594	1,60
60	0,623	0,618	0,88	0,616	1,26
50	0,632	0,622	1,53	0,620	1,87
40	0,628	0,613	2,44	0,611	2,69
30	0,612	0,597	2,41	0,596	2,58
20	0,590	0,580	1,83	0,579	1,95
10	0,567	0,562	0,89	0,561	0,97
0	0,544	0,544	-	0,544	-
Gemiddelde error			1,31	1,50	
Maximale error			2,44	2,69	



Figuur C.5: Interactiekromme P 2/4 - Z .25/.5 volgens zwaartekrachtspreef

Tabel C.7: Pakkingsprofiel Z .5/1 - Z .25/.5

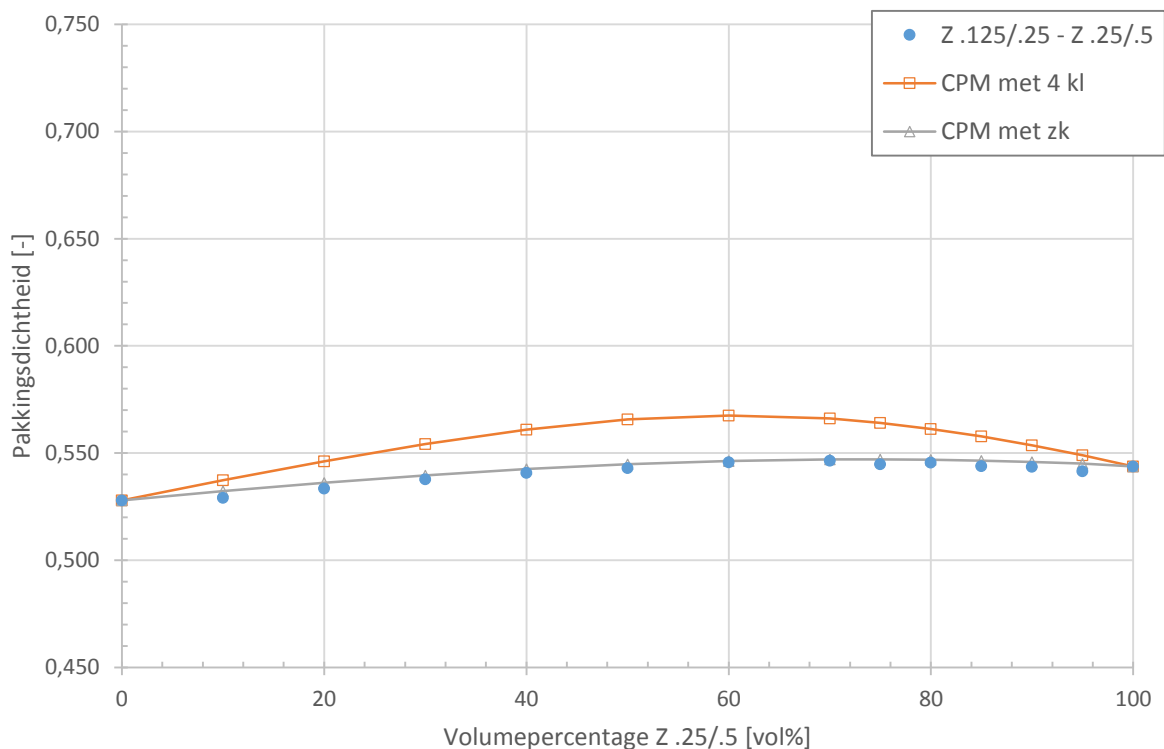
Z .5/1 [vol%]	PD _{actueel} [-]	CPM met 4 kl [-]	Error [%]	CPM met zk [-]	Error [%]
100	0,542	0,542	-	0,542	-
95	0,548	0,548	0,04	0,546	0,38
90	0,551	0,553	0,33	0,550	0,34
85	0,554	0,558	0,81	0,553	0,17
80	0,557	0,563	1,10	0,556	0,16
75	0,558	0,567	1,52	0,558	0,02
70	0,561	0,570	1,57	0,560	0,12
60	0,562	0,573	1,89	0,562	0,01
50	0,562	0,573	1,93	0,563	0,05
40	0,560	0,571	1,81	0,561	0,14
30	0,557	0,566	1,53	0,558	0,21
20	0,553	0,559	1,20	0,554	0,31
10	0,548	0,552	0,76	0,549	0,31
0	0,544	0,544	-	0,544	-
Gemiddelde error			1,21	0,18	
Maximale error			1,93	0,38	



Figuur C.6: Interactiekromme Z .5/1 - Z .25/.5 volgens zwaartekrachtspreef

Tabel C.8: Pakkingsprofiel Z .125/.25 - Z .25/.5

Z .125/.25	PD _{actueel}	CPM met 4 kl	Error	CPM met zk	Error
[vol%]	[-]	[-]	[%]	[-]	[%]
100	0,544	0,544	-	0,544	-
95	0,542	0,549	1,37	0,545	0,64
90	0,544	0,554	1,80	0,546	0,40
85	0,544	0,558	2,50	0,546	0,48
80	0,545	0,561	2,81	0,547	0,25
75	0,545	0,564	3,43	0,547	0,42
70	0,546	0,566	3,47	0,547	0,10
60	0,546	0,568	3,86	0,546	0,11
50	0,543	0,566	4,01	0,545	0,33
40	0,541	0,561	3,59	0,543	0,32
30	0,538	0,554	2,97	0,540	0,34
20	0,533	0,546	2,33	0,536	0,51
10	0,529	0,537	1,53	0,532	0,60
0	0,528	0,528	-	0,528	-
Gemiddelde error			2,81	0,38	
Maximale error			4,01	0,64	



Figuur C.7: Interactiekromme Z .125/.25 - Z .25/.5 volgens zwaartekrachtsproef

Bijlage D: Interactiekrommen verdichtingsproef volgens CPM

Individuele pakkingsdichtheid van de afzonderlijke korrelfracties

Tabel D.1: Individuele pakkingsdichtheid van de korrelfracties volgens de verdichtingsproef

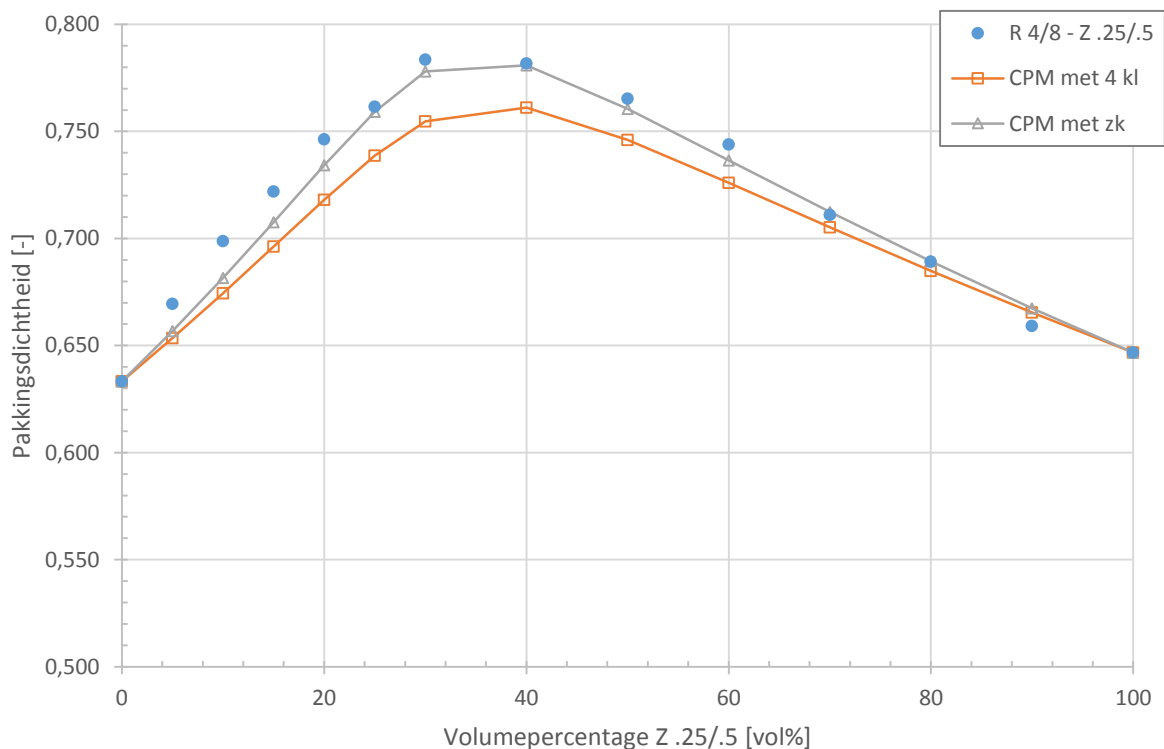
Fractie [mm]	Pakking [-]
R 4/8	0,633
R 2/4	0,623
B 4/8	0,567
B 2/4	0,534
P 2/4	0,582
Z .5/1	0,633
Z .25/.5	0,647
Z .125/.25	0,633

Pakkingsprofielen verdichtingsproef

In de onderstaande tabellen en grafieken worden de experimentele waarden van de pakkingsdichtheid vergeleken met de waarden die uit het *compressible packing model* volgen. In de kolom **PD_{actueel}** wordt de actuele pakkingsdichtheid weergegeven. Deze waarde is het gemiddelde van vijf metingen die worden uitgevoerd met hetzelfde mengsel. In de kolom **CPM met 4 kl** worden de waarden weergegeven die worden gevonden wanneer elke fractie vier korrelverdelingsklassen met elk een voorkomenspercentage van 25 % wordt toebedeeld. Deze vier klassen liggen tussen de grenzen die in de benaming van de granulaten wordt weergegeven. In de kolom **CPM met zk** wordt in het CPM met de volledige zeefkromme van het granulaat rekening gehouden.

Tabel D.2: Pakkingsprofiel R 4/8 - Z .25/.5

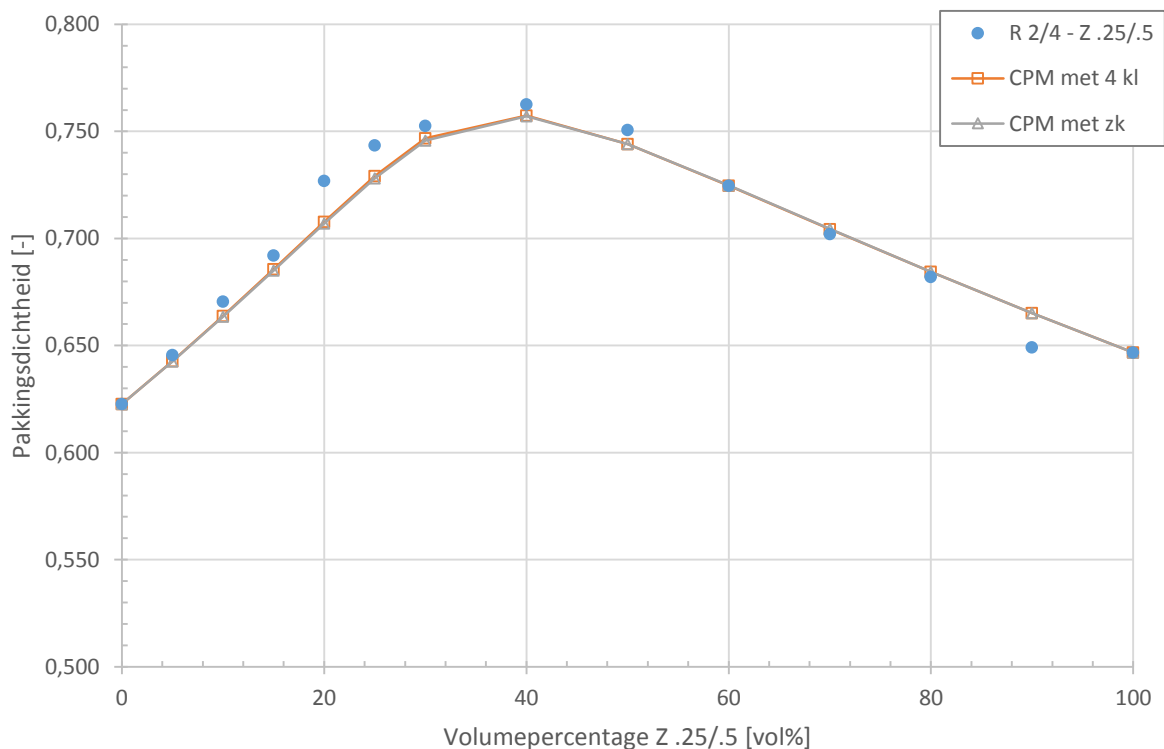
R 4/8	PD _{actueel}	CPM met 4 kl	Error	CPM met zk	Error
[vol%]	[-]	[-]	[%]	[-]	[%]
100	0,633	0,633	-	0,633	-
95	0,669	0,653	2,45	0,657	1,93
90	0,699	0,674	3,60	0,682	2,52
85	0,722	0,696	3,69	0,708	2,02
80	0,746	0,718	3,93	0,734	1,66
75	0,762	0,739	3,10	0,759	0,31
70	0,784	0,755	3,82	0,778	0,72
60	0,782	0,761	2,69	0,781	0,12
50	0,765	0,746	2,59	0,761	0,63
40	0,744	0,726	2,48	0,736	1,02
30	0,711	0,705	0,83	0,712	0,20
20	0,689	0,685	0,64	0,689	0,01
10	0,659	0,665	0,94	0,667	1,25
0	0,647	0,647	-	0,647	-
Gemiddelde error			2,56	1,03	
Maximale error			3,93	2,52	



Figuur D.1: Interactiekromme R 4/8 - Z .25/.5 volgens verdichtingsproef

Tabel D.3: Pakkingsprofiel R 2/4 - Z .25/.5

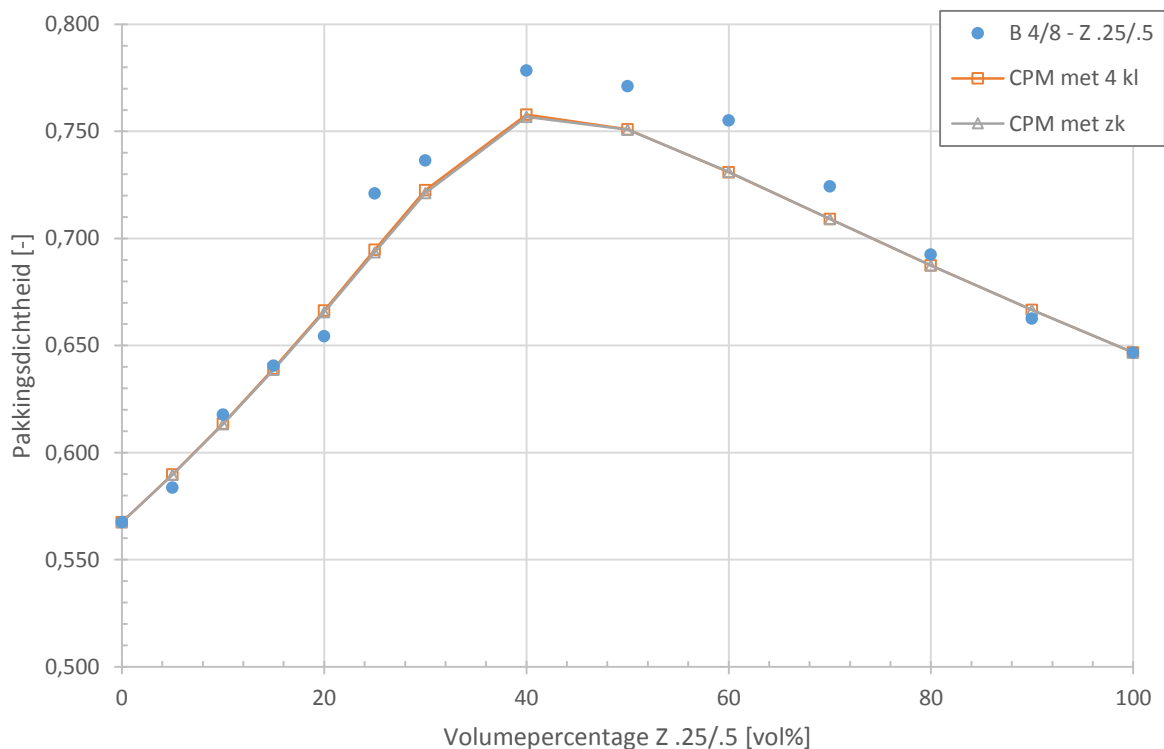
R 2/4	PD _{actueel}	CPM met 4 kl	Error	CPM met zk	Error
[vol%]	[-]	[-]	[%]	[-]	[%]
100	0,623	0,623	-	0,623	-
95	0,646	0,643	0,43	0,643	0,46
90	0,671	0,664	1,01	0,663	1,07
85	0,692	0,686	0,94	0,685	1,03
80	0,727	0,708	2,70	0,707	2,82
75	0,743	0,729	1,96	0,728	2,11
70	0,753	0,747	0,78	0,746	0,93
60	0,763	0,757	0,70	0,757	0,74
50	0,751	0,744	0,90	0,744	0,89
40	0,725	0,725	0,00	0,725	0,02
30	0,702	0,704	0,32	0,705	0,34
20	0,682	0,684	0,34	0,685	0,36
10	0,649	0,665	2,40	0,665	2,41
0	0,647	0,647	-	0,647	-
Gemiddelde error			1,04	1,10	
Maximale error			2,70	2,82	



Figuur D.2: Interactiekromme R 2/4 - Z .25/.5 volgens verdichtingsproef

Tabel D.4: Pakkingsprofiel B 4/8 - Z .25/.5

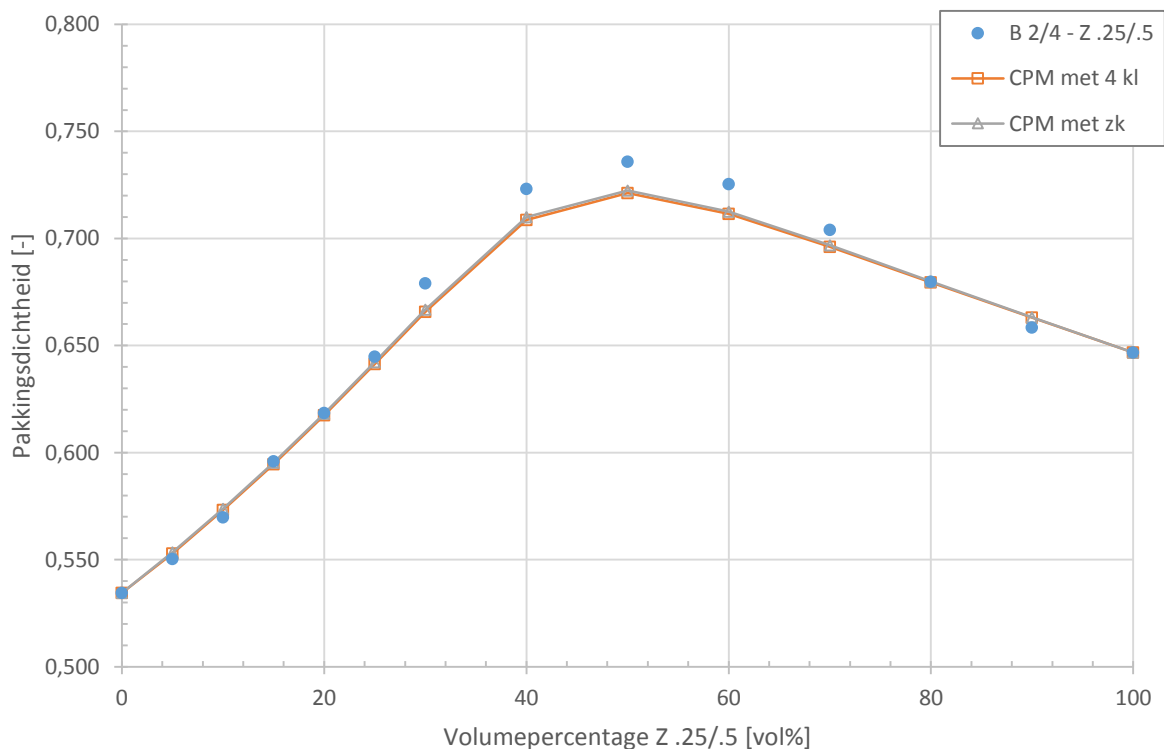
B 4/8	PD _{actueel}	CPM met 4 kl	Error	CPM met zk	Error
[vol%]	[-]	[-]	[%]	[-]	[%]
100	0,567	0,567	-	0,567	-
95	0,584	0,590	1,03	0,590	1,00
90	0,618	0,614	0,67	0,613	0,72
85	0,641	0,639	0,22	0,639	0,31
80	0,654	0,666	1,80	0,666	1,67
75	0,721	0,695	3,79	0,694	3,97
70	0,736	0,723	1,91	0,721	2,11
60	0,778	0,758	2,71	0,757	2,85
50	0,771	0,751	2,68	0,751	2,71
40	0,755	0,731	3,30	0,731	3,30
30	0,724	0,709	2,16	0,709	2,15
20	0,693	0,687	0,75	0,687	0,74
10	0,663	0,667	0,60	0,667	0,60
0	0,647	0,647	-	0,647	-
Gemiddelde error			1,80	1,84	
Maximale error			3,79	3,97	



Figuur D.3: Interactiekromme B 4/8 - Z .25/.5 volgens verdichtingsproef

Tabel D.5: Pakkingsprofiel B 2/4 - Z .25/.5

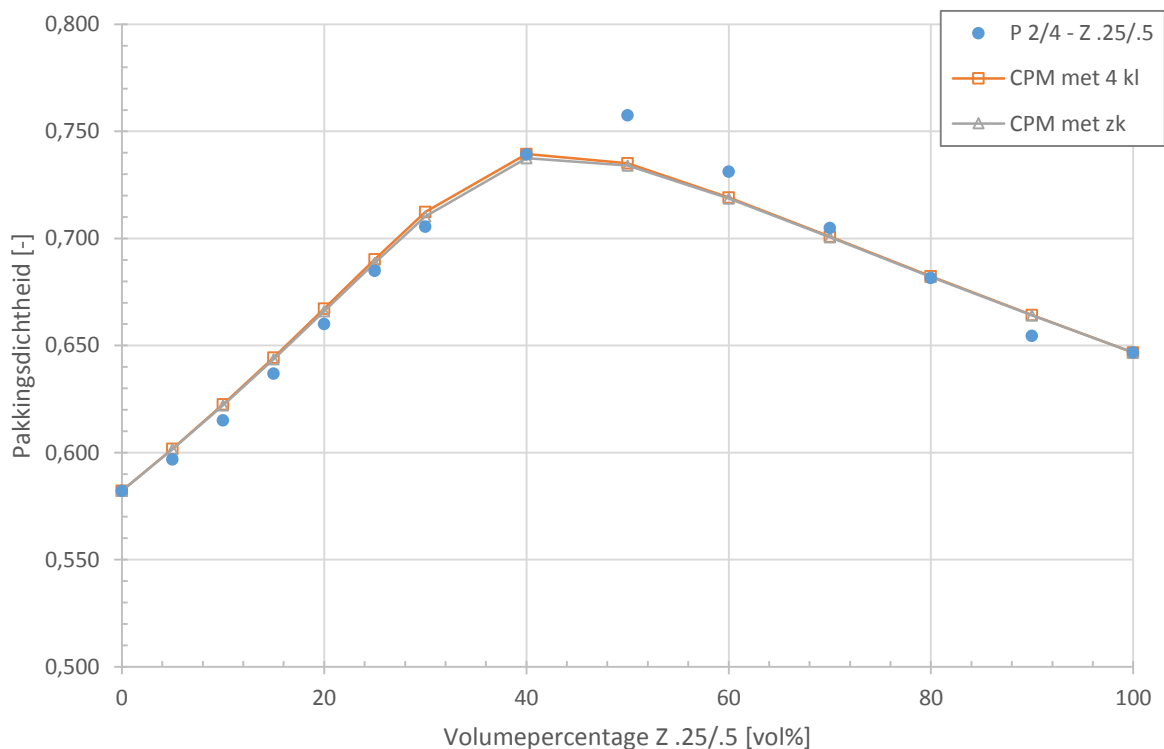
B 2/4 [vol%]	PD _{actueel} [-]	CPM met 4 kl [-]	Error [%]	CPM met zk [-]	Error [%]
100	0,534	0,534	-	0,534	-
95	0,550	0,553	0,46	0,554	0,56
90	0,570	0,573	0,60	0,574	0,71
85	0,596	0,595	0,23	0,595	0,10
80	0,618	0,617	0,17	0,618	0,03
75	0,645	0,641	0,54	0,642	0,39
70	0,679	0,666	2,00	0,667	1,84
60	0,723	0,709	2,03	0,710	1,86
50	0,736	0,721	2,04	0,722	1,85
40	0,725	0,711	1,97	0,713	1,81
30	0,704	0,696	1,14	0,697	1,03
20	0,680	0,680	0,04	0,680	0,01
10	0,658	0,663	0,70	0,663	0,72
0	0,647	0,647	-	0,647	-
Gemiddelde error			0,99	0,91	
Maximale error			2,04	1,86	



Figuur D.4: Interactiekromme B 2/4 - Z .25/.5 volgens verdichtingsproef

Tabel D.6: Pakkingsprofiel P 2/4 - Z .25/.5

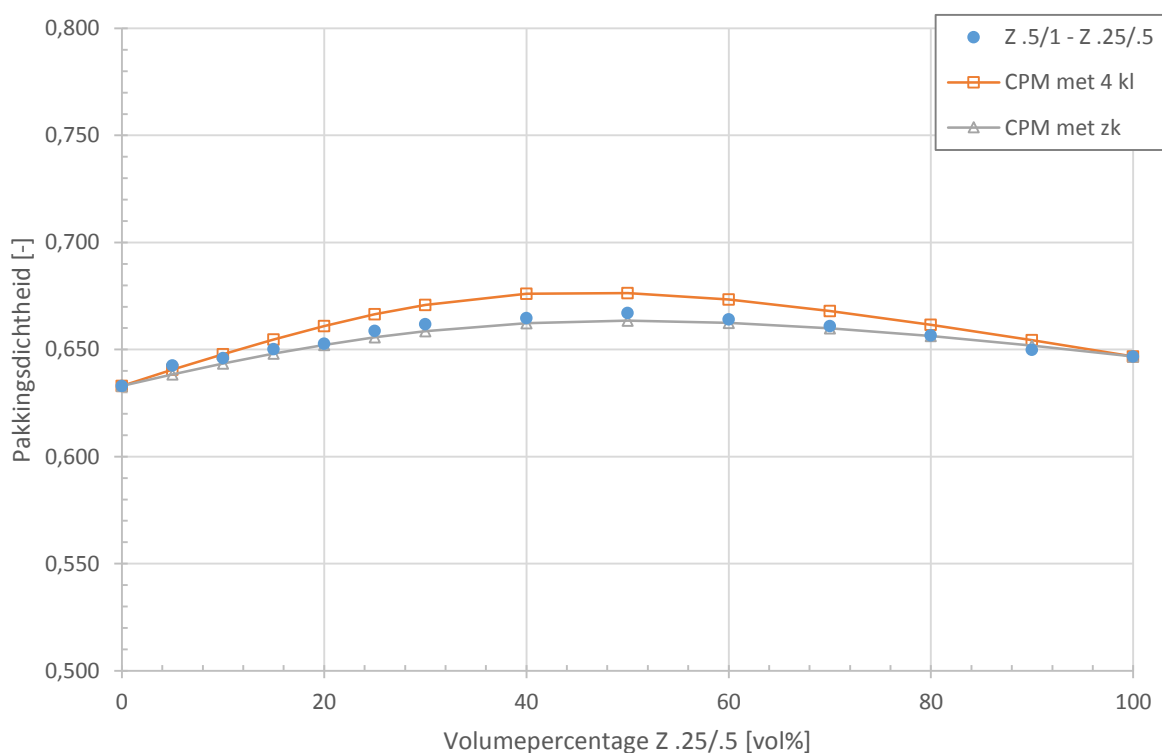
P 2/4 [vol%]	PD _{actueel} [-]	CPM met 4 kl [-]	Error [%]	CPM met zk [-]	Error [%]
100	0,582	0,582	-	0,582	-
95	0,597	0,602	0,83	0,602	0,79
90	0,615	0,623	1,19	0,622	1,11
85	0,637	0,644	1,18	0,644	1,05
80	0,660	0,667	1,07	0,666	0,89
75	0,685	0,690	0,80	0,689	0,56
70	0,705	0,712	0,96	0,710	0,67
60	0,739	0,739	0,01	0,737	0,26
50	0,757	0,735	3,04	0,734	3,19
40	0,731	0,719	1,69	0,719	1,77
30	0,705	0,701	0,58	0,701	0,63
20	0,682	0,682	0,10	0,682	0,07
10	0,654	0,664	1,47	0,664	1,45
0	0,647	0,647	-	0,647	-
Gemiddelde error			1,08	1,04	
Maximale error			3,04	3,19	



Figuur D.5: Interactiekromme P 2/4 - Z .25/.5 volgens verdichtingsproef

Tabel D.7: Pakkingsprofiel Z .5/1 - Z .25/.5

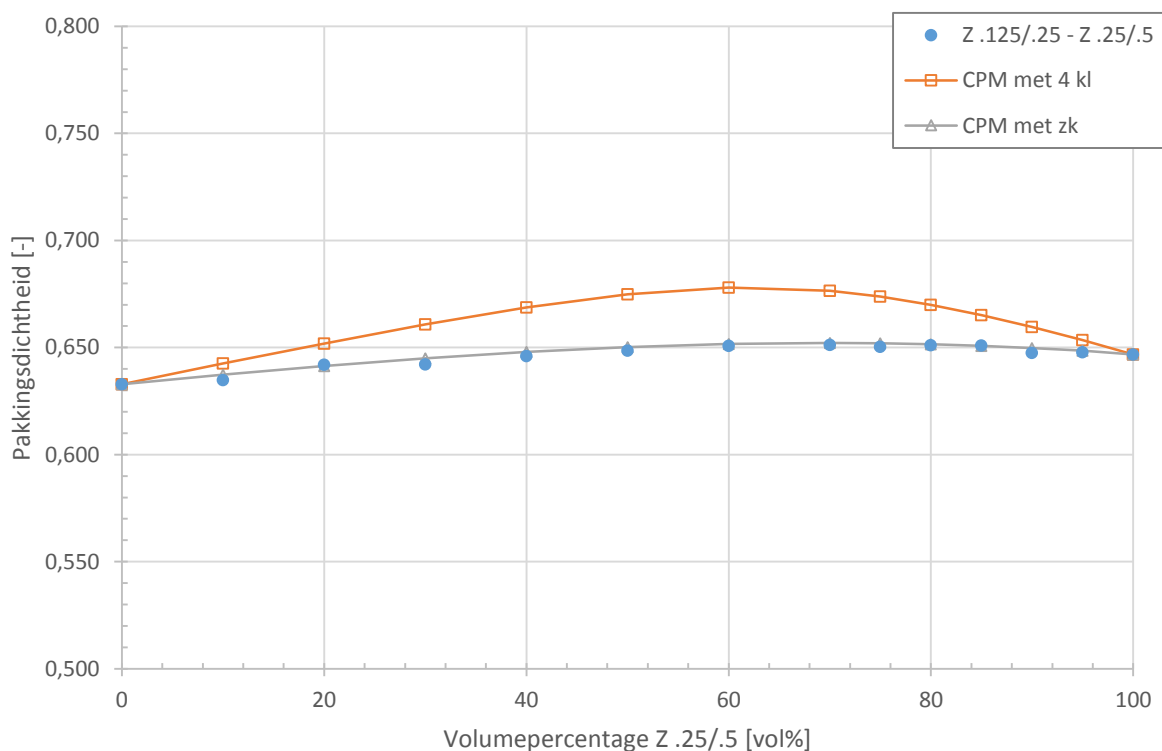
Z .5/1 [vol%]	PD _{actueel} [-]	CPM met 4 kl [-]	Error [%]	CPM met zk [-]	Error [%]
100	0,633	0,633	-	0,633	-
95	0,643	0,641	0,31	0,638	0,65
90	0,646	0,648	0,28	0,643	0,40
85	0,650	0,655	0,70	0,648	0,32
80	0,653	0,661	1,26	0,652	0,08
75	0,659	0,666	1,16	0,656	0,47
70	0,662	0,671	1,34	0,659	0,51
60	0,665	0,676	1,68	0,662	0,36
50	0,667	0,676	1,37	0,663	0,55
40	0,664	0,673	1,37	0,663	0,24
30	0,661	0,668	1,06	0,660	0,15
20	0,657	0,662	0,73	0,656	0,06
10	0,650	0,654	0,68	0,652	0,29
0	0,647	0,647	-	0,647	-
Gemiddelde error			1,00	0,34	
Maximale error			1,68	0,65	



Figuur D.6: Interactiekromme Z .5/1 - Z .25/.5 volgens verdichtingsproef

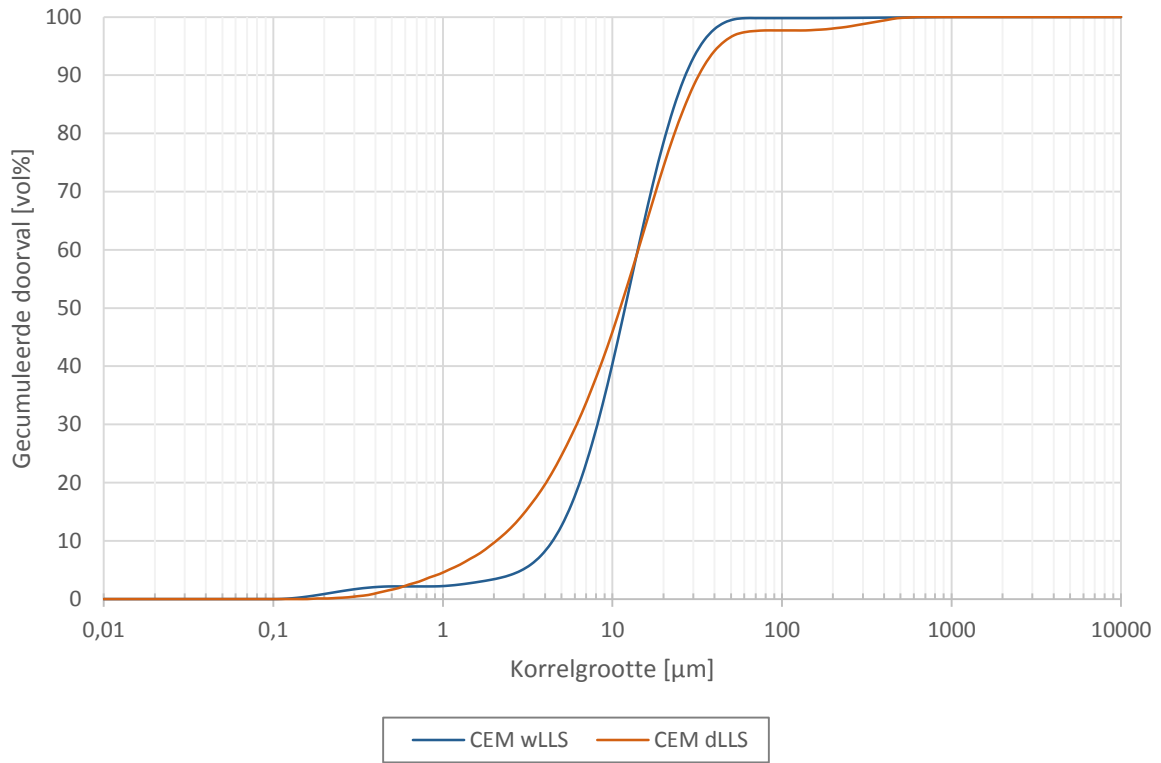
Tabel D.8: Pakkingsprofiel Z .125/.25 - Z .25/.5

Z .125/.25	PD	CPM met 4 kl	Error	CPM met zk	Error
[vol%]	[-]	[-]	[%]	[-]	[%]
100	0,647	0,647	-	0,647	-
95	0,648	0,654	0,88	0,649	0,12
90	0,648	0,660	1,83	0,650	0,35
85	0,651	0,665	2,15	0,651	0,01
80	0,651	0,670	2,82	0,652	0,07
75	0,650	0,674	3,47	0,652	0,24
70	0,651	0,676	3,73	0,652	0,14
60	0,651	0,678	4,00	0,652	0,13
50	0,649	0,675	3,90	0,650	0,26
40	0,646	0,669	3,39	0,648	0,29
30	0,642	0,661	2,83	0,645	0,44
20	0,642	0,652	1,52	0,641	0,09
10	0,635	0,643	1,21	0,637	0,40
0	0,633	0,633	-	0,633	-
Gemiddelde error			2,64	0,21	
Maximale error			4,00	0,44	

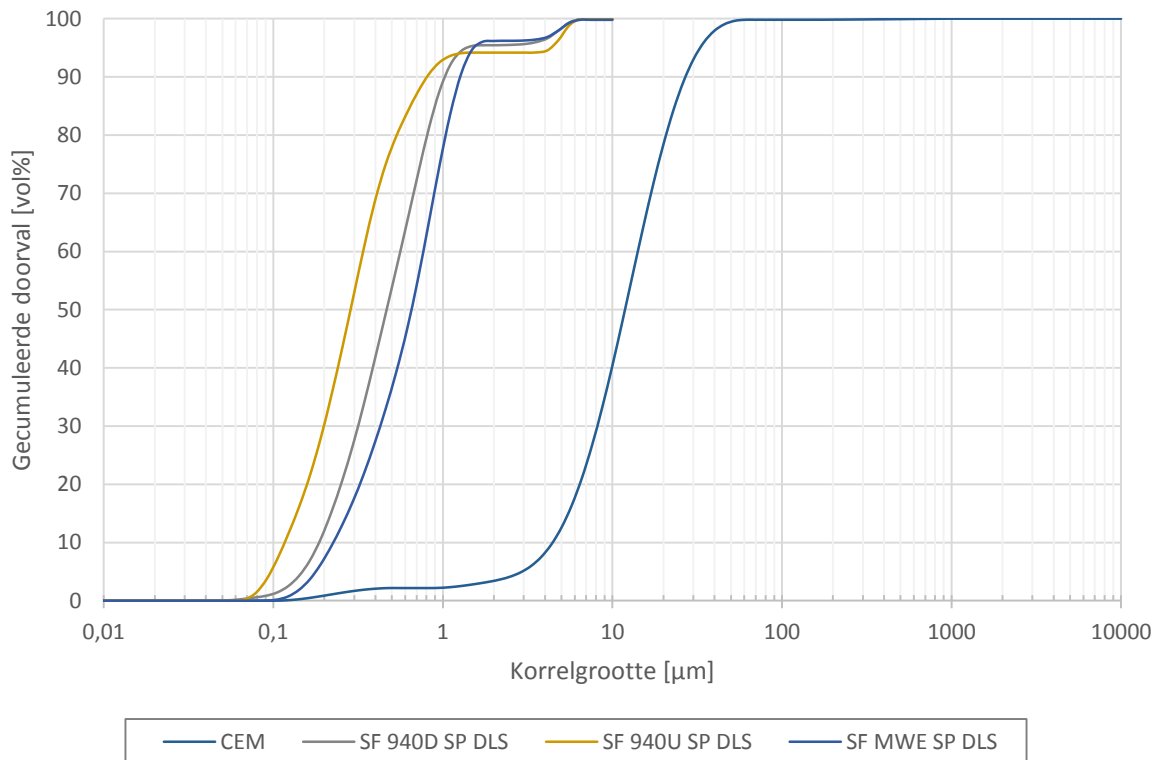


Figuur D.7: Interactiekromme Z .125/.25 - Z .25/.5 volgens verdichtingsproef

Bijlage E: Extra zeefkrommes



Figuur E.1: Droge zeefkromme cement



Figuur E.2: Natte zeefkrommes silica fume bepaald via DLS

Bijlage F: Interactiekrommen centrifugale consolidatie

Individuele pakkingsdichtheid van de afzonderlijke poeders

Tabel F.1: Individuele pakkingsdichtheid van poeders via centrifugale consolidatie

Poeder	PD _{actueel} [-]
Cement	0,706
SF 940D	0,508
SF 940U	0,550
SF MWE	0,516
M800 (p)	0,591
M800 (o)	0,699
Vliegas	0,823

Opmerking

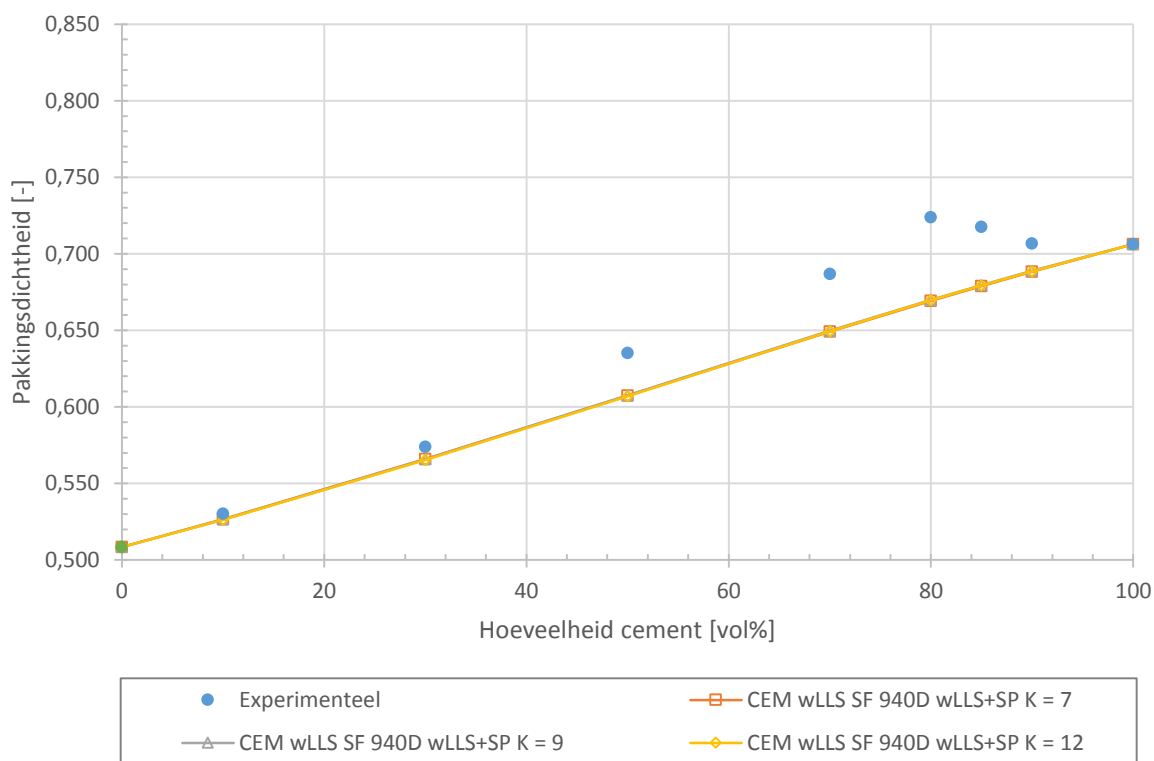
De eerste waarde voor de individuele pakkingsdichtheid van M800 wordt verkregen door het gevormde waterlaagje te pipetteren. De tweede en hogere waarde van de individuele pakkingsdichtheid van M800 wordt verkregen door het volledige vloeibare laagje, dat zich tijdens de centrifugale consolidatie heeft gevormd, te verwijderen en gedurende 24 uur te laten drogen in een oven van 40°C.

Pakkingsprofielen centrifugale consolidatie

In de onderstaande tabellen en grafieken worden de experimentele waarden van de pakkingsdichtheid vergeleken met de waarden afkomstig uit het *compressible packing model*. In de kolom **PD_{actueel}** wordt de actuele pakkingsdichtheid weergegeven, zoals berekend in paragraaf 7.7.1. In de kolom **CPM K = 7** gebeurt de simulatie van het model met een verdichtingsparameter die gelijk is aan 7. De kolommen **CPM K = 9** en **CPM K = 12** geven op hun beurt de waarden verkregen uit het *compressible packing model*, na toepassing van een andere K-waarde namelijk 9 of 12. De simulaties met verschillende verdichtingsparameters zijn noodzakelijk omdat de waarde van deze parameter op voorhand nog niet gekend is. Naast elke kolom met CPM-waarden wordt tevens een overzicht gegeven van de errorwaarde die optreedt tussen de experimentele en theoretische pakkingsdichtheid.

Tabel F.2: Pakkingsprofiel CEM wLLS - SF 940D wLLS+SP

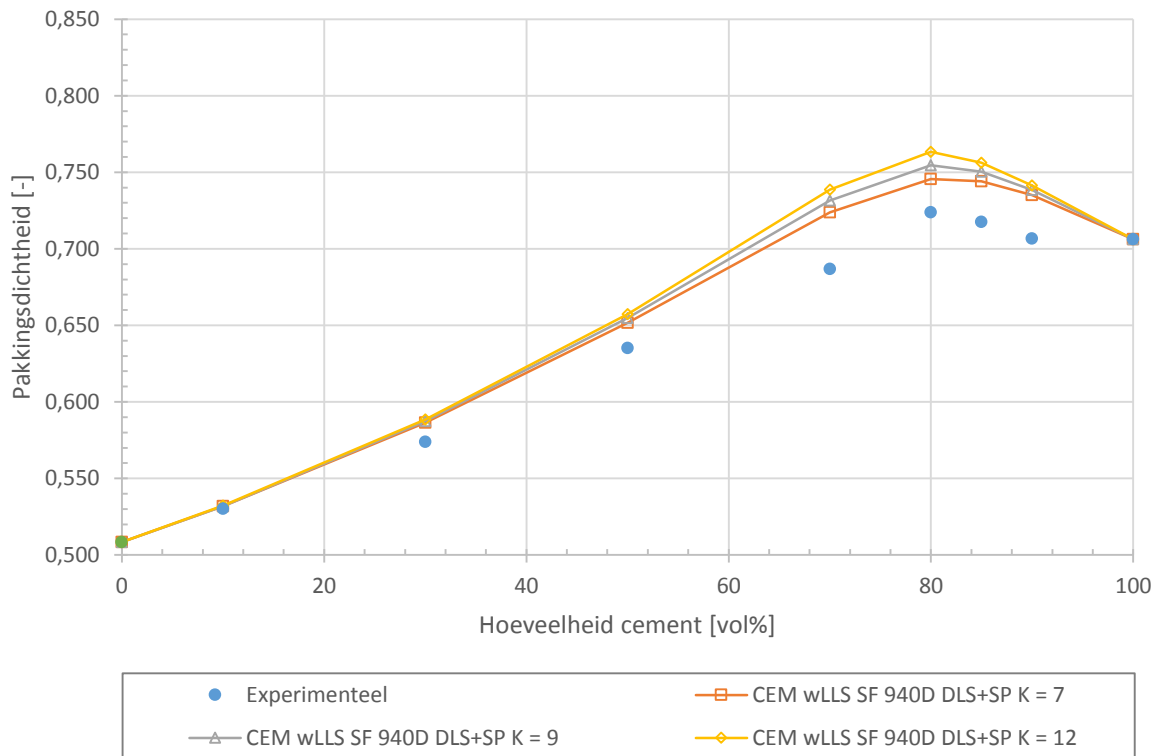
SF 940D	PD _{actueel}	W/P _{min}	CPM	Error	CPM	Error	CPM	Error
[vol%]	[-]	[-]	K = 7	[%]	K = 9	[%]	K = 12	[%]
			[-]		[-]		[-]	
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,707	0,136	0,688	2,68	0,689	2,59	0,689	2,63
15	0,718	0,131	0,679	5,69	0,680	5,59	0,679	5,62
20	0,724	0,129	0,669	8,17	0,670	8,06	0,670	8,09
30	0,687	0,159	0,649	5,78	0,650	5,69	0,649	5,75
50	0,635	0,214	0,607	4,55	0,608	4,53	0,607	4,63
70	0,574	0,297	0,566	1,42	0,566	1,46	0,565	1,53
90	0,530	0,383	0,527	0,66	0,526	0,73	0,526	0,75
100	0,508	0,426	0,508	-	0,508	-	0,508	-
Gemiddelde error				4,14	4,09		3,22	
Maximale error				8,17	8,06		8,09	



Figuur F.1: Interactiekromme CEM wLLS - SF 940D wLLS+SP

Tabel F.3: Pakkingsprofiel CEM wLLS – SF 940D DLS+SP

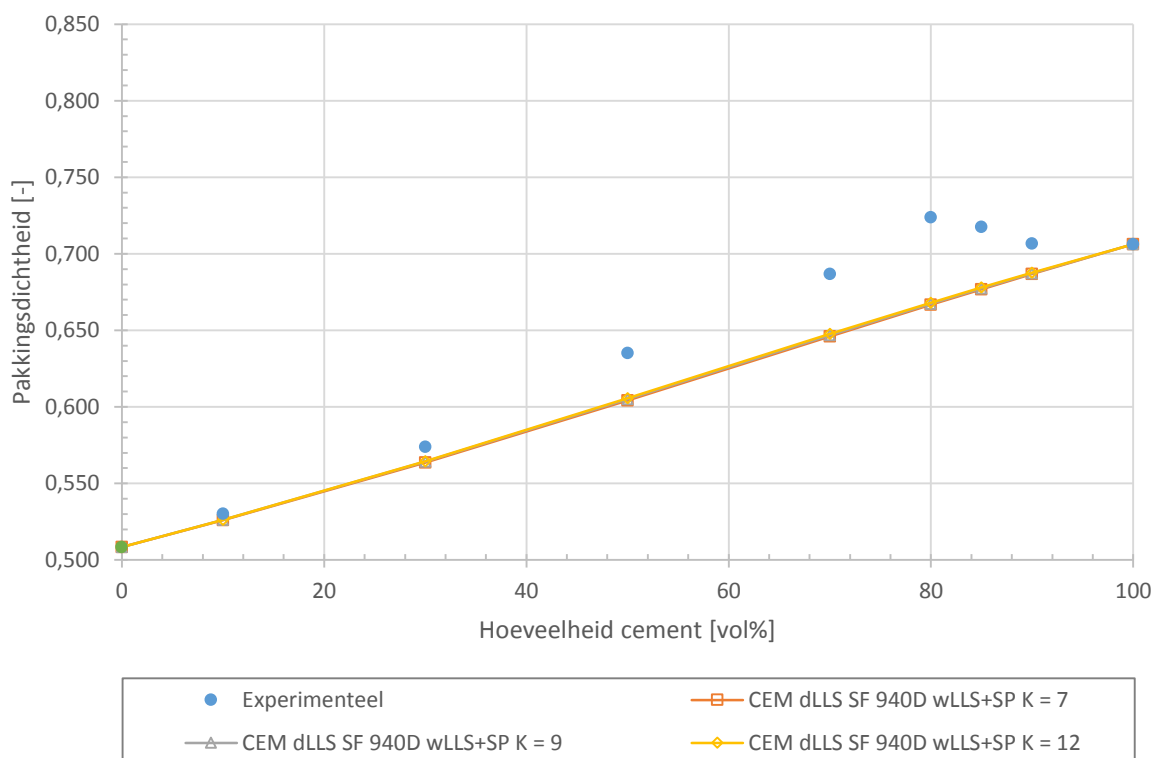
SF 940D	PD _{actueel}	W/P _{min}	CPM K = 7	Error	CPM K = 9	Error	CPM K = 12	Error
[vol%]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,707	0,136	0,735	3,87	0,738	4,31	0,741	4,68
15	0,718	0,131	0,744	3,58	0,750	4,39	0,756	5,11
20	0,724	0,129	0,746	2,91	0,754	4,05	0,763	5,17
30	0,687	0,159	0,724	5,12	0,732	6,14	0,739	7,03
50	0,635	0,214	0,652	2,56	0,655	3,02	0,657	3,38
70	0,574	0,297	0,586	2,13	0,587	2,31	0,589	2,49
90	0,530	0,383	0,532	0,29	0,532	0,31	0,532	0,38
100	0,508	0,426	0,508	-	0,508	-	0,508	-
Gemiddelde error				2,92	3,50		4,04	
Maximale error				5,12	6,14		7,03	



Figuur F.2: Interactiekromme CEM wLLS – SF 940D wLLS+SP

Tabel F.4: Pakkingsprofiel CEM dLLS – SF 940D wLLS+SP

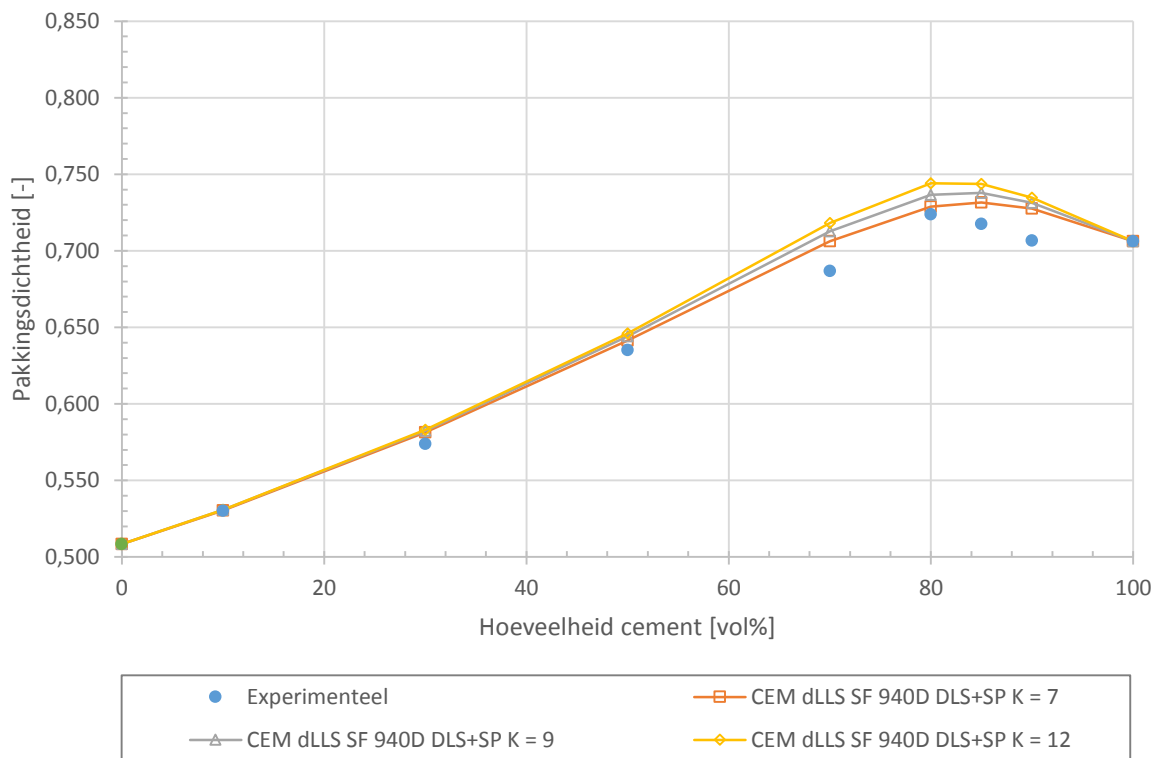
SF 940D	PD _{actueel}	W/P _{min}	CPM	Error	CPM	Error	CPM	Error
[vol%]	[-]	[-]	K = 7	[%]	K = 9	[%]	K = 12	[%]
			[-]		[-]		[-]	
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,707	0,136	0,687	2,88	0,687	2,82	0,688	2,77
15	0,718	0,131	0,677	6,01	0,677	5,92	0,678	5,84
20	0,724	0,129	0,667	8,58	0,667	8,46	0,668	8,36
30	0,687	0,159	0,646	6,31	0,647	6,16	0,648	6,04
50	0,635	0,214	0,604	5,12	0,605	4,97	0,606	4,86
70	0,574	0,297	0,564	1,81	0,564	1,72	0,565	1,65
90	0,530	0,383	0,526	0,80	0,526	0,77	0,526	0,76
100	0,508	0,426	0,508	-	0,508	-	0,508	-
Gemiddelde error				4,50	4,40		4,32	
Maximale error				8,58	8,46		8,36	



Figuur F.3: Interactiekromme CEM dLLS – SF 940D wLLS+SP

Tabel F.5: Pakkingsprofiel CEM dLLS – SF 940D DLS+SP

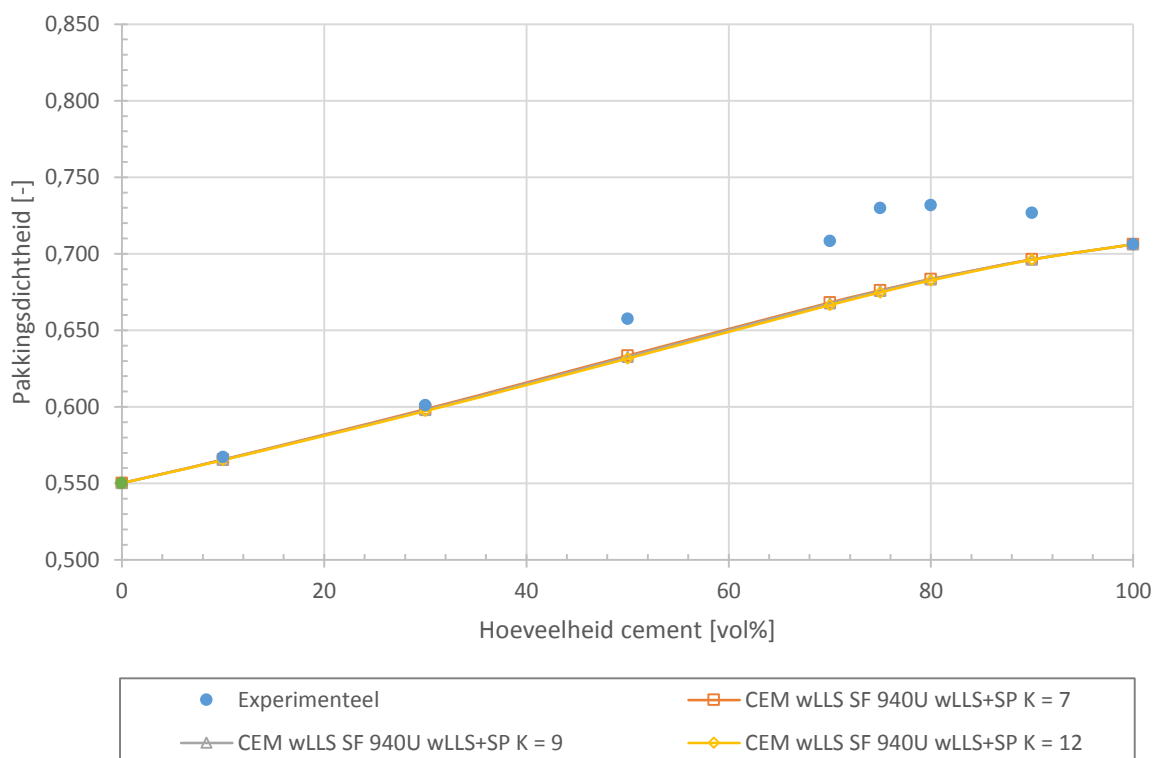
SF 940D	PD _{actueel}	W/P _{min}	CPM K = 7	Error	CPM K = 9	Error	CPM K = 12	Error
[vol%]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,707	0,136	0,728	2,87	0,731	3,38	0,735	3,82
15	0,718	0,131	0,732	1,92	0,738	2,75	0,744	3,53
20	0,724	0,129	0,729	0,67	0,737	1,72	0,744	2,73
30	0,687	0,159	0,706	2,76	0,713	3,64	0,718	4,38
50	0,635	0,214	0,641	0,98	0,644	1,40	0,646	1,68
70	0,574	0,297	0,581	1,29	0,583	1,48	0,583	1,59
90	0,530	0,383	0,530	0,04	0,531	0,10	0,531	0,13
100	0,508	0,426	0,508	-	0,508	-	0,508	-
Gemiddelde error				1,51	2,07		2,55	
Maximale error				2,87	3,64		4,38	



Figuur F.4: Interactiekromme CEM dLLS – SF 940D DLS+SP

Tabel F.6: Pakkingsprofiel CEM wLLS - SF 940U wLLS+SP

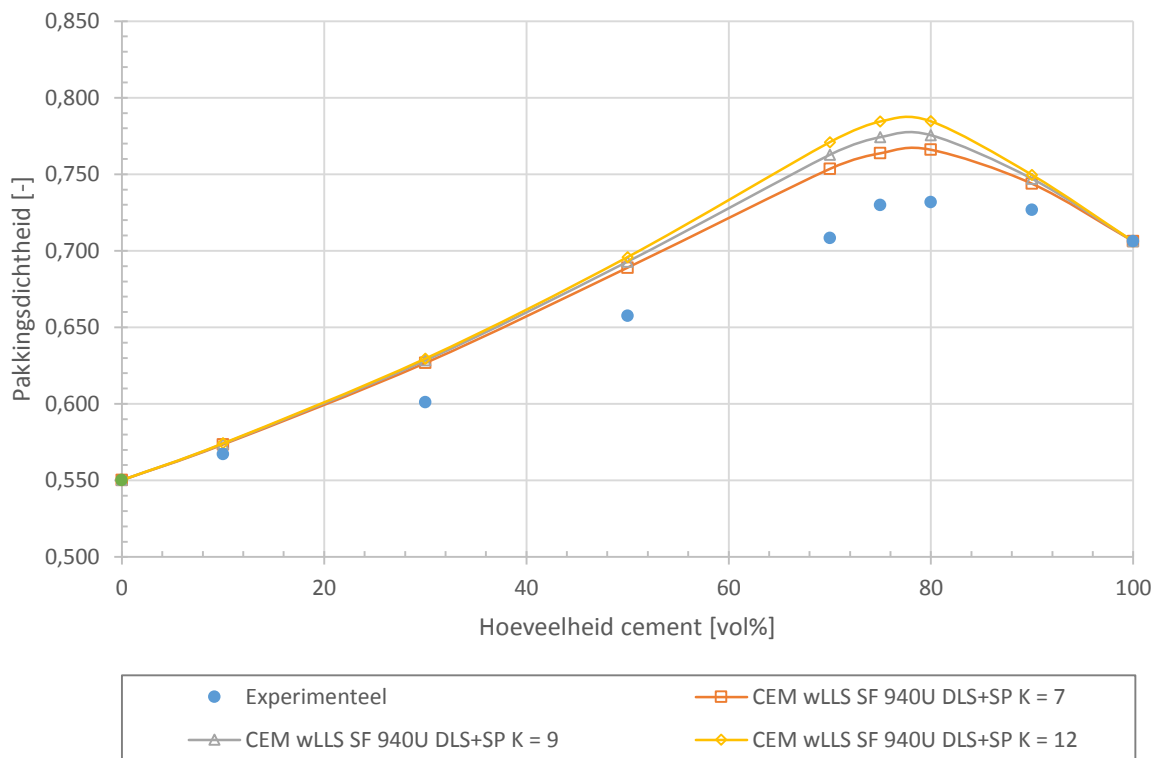
SF 940U [vol%]	PD _{actueel} [-]	W/P _{min} [-]	CPM	Error	CPM	Error	CPM	Error
			K = 7 [-]	[%]	K = 9 [-]	[%]	K = 12 [-]	[%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,727	0,124	0,696	4,36	0,696	4,37	0,696	4,39
20	0,732	0,125	0,684	7,07	0,683	7,11	0,683	7,21
25	0,730	0,128	0,676	7,95	0,676	8,02	0,675	8,17
30	0,708	0,145	0,668	6,01	0,668	6,11	0,666	6,28
50	0,658	0,198	0,633	3,80	0,633	3,93	0,632	4,11
70	0,601	0,273	0,598	0,44	0,598	0,54	0,597	0,65
90	0,567	0,342	0,566	0,27	0,565	0,31	0,565	0,34
100	0,550	0,376	0,550	-	0,550	-	0,550	-
Gemiddelde error				4,27	4,34		4,45	
Maximale error				7,95	8,02		8,17	



Figuur F.5: Interactiekromme CEM wLLS - SF 940U wLLS+SP

Tabel F.7: Pakkingsprofiel CEM wLLS – SF 940U DLS+SP

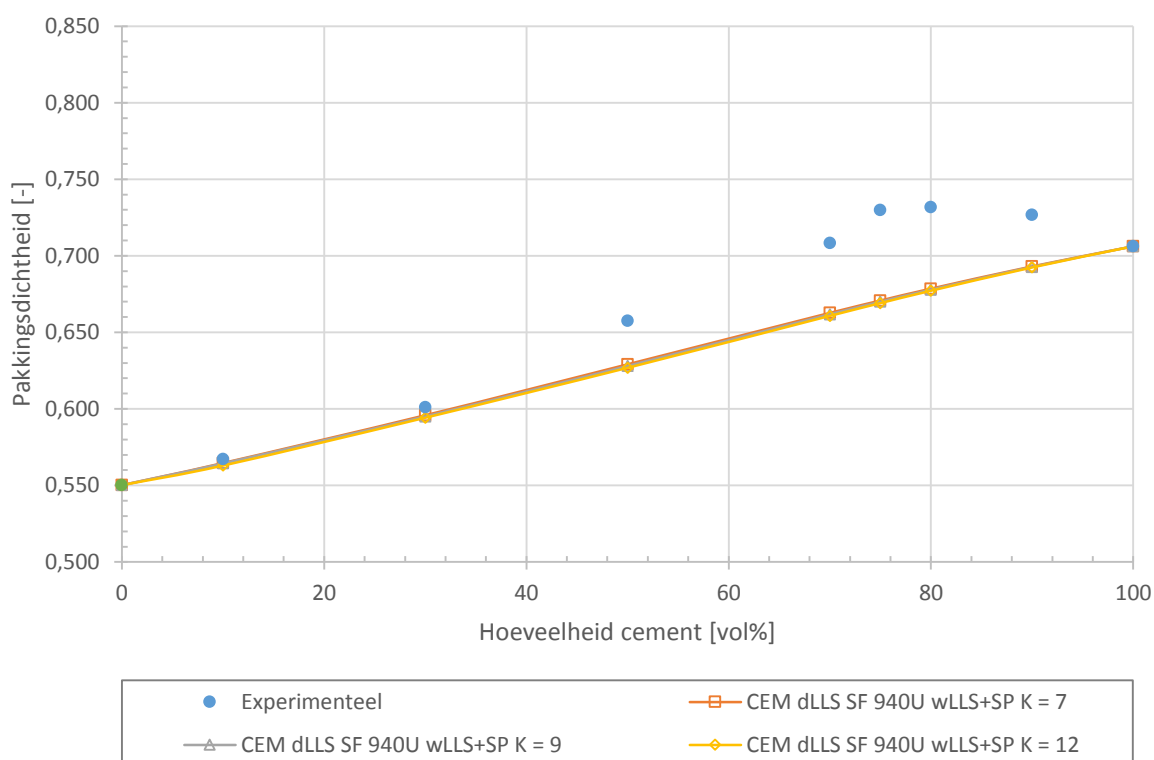
SF 940U [vol%]	PD _{actueel} [-]	W/P _{min} [-]	CPM	Error	CPM	Error	CPM	Error
			K = 7 [-]	[%]	K = 9 [-]	[%]	K = 12 [-]	[%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,727	0,124	0,744	2,30	0,747	2,72	0,750	3,05
20	0,732	0,125	0,766	4,46	0,775	5,63	0,785	6,72
25	0,730	0,128	0,764	4,43	0,774	5,73	0,784	6,96
30	0,708	0,145	0,754	6,00	0,763	7,13	0,771	8,13
50	0,658	0,198	0,689	4,57	0,693	5,11	0,696	5,51
70	0,601	0,273	0,627	4,08	0,628	4,34	0,630	4,52
90	0,567	0,342	0,574	1,10	0,574	1,18	0,574	1,23
100	0,550	0,376	0,550	-	0,550	-	0,550	-
Gemiddelde error				3,85	4,55		5,16	
Maximale error				6,00	7,13		8,13	



Figuur F.6: Interactiekromme CEM wLLS – SF 940U DLS+SP

Tabel F.8: Pakkingsprofiel CEM dLLS - SF 940U wLLS+SP

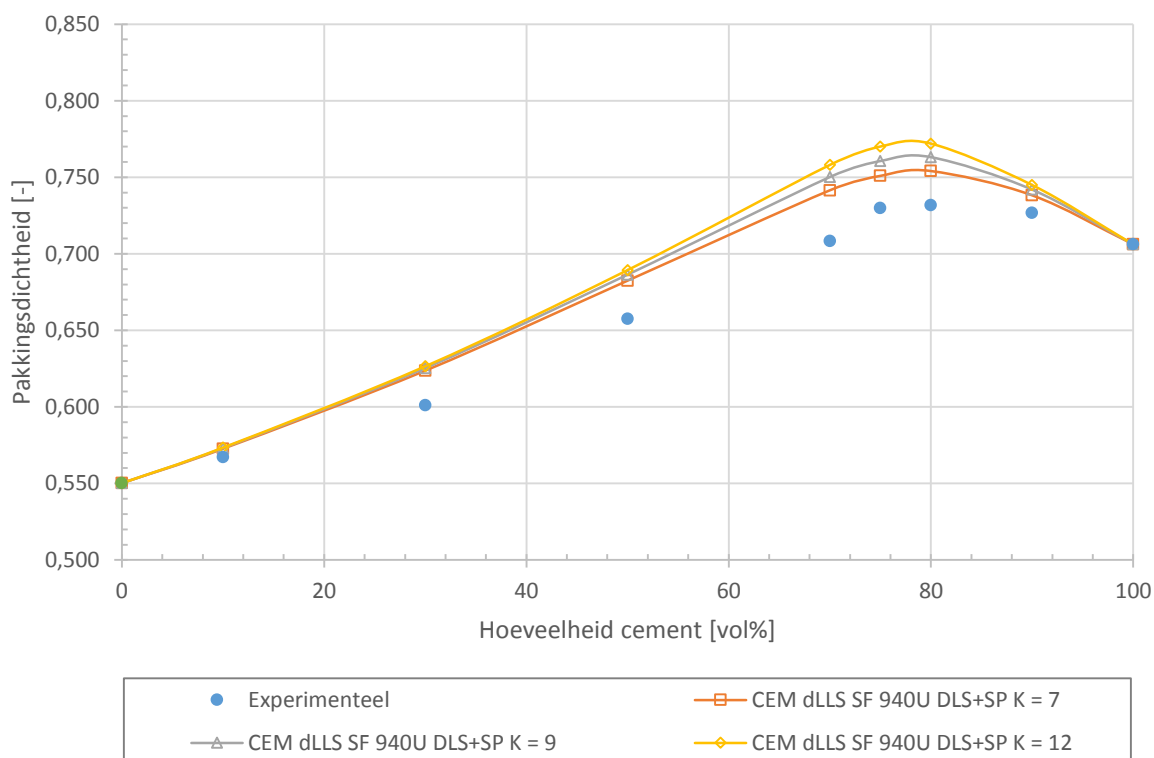
SF 940U	PD _{actueel}	W/P _{min}	CPM K = 7	Error	CPM K = 9	Error	CPM K = 12	Error
[vol%]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,727	0,124	0,693	4,85	0,693	4,90	0,692	4,95
20	0,732	0,125	0,679	7,86	0,678	7,96	0,677	8,07
25	0,730	0,128	0,671	8,81	0,670	8,94	0,669	9,08
30	0,708	0,145	0,663	6,88	0,662	7,03	0,661	7,20
50	0,658	0,198	0,629	4,52	0,628	4,70	0,627	4,90
70	0,601	0,273	0,596	0,89	0,595	1,02	0,594	1,16
90	0,567	0,342	0,565	0,45	0,564	0,49	0,563	0,74
100	0,550	0,376	0,550	-	0,550	-	0,550	-
Gemiddelde error				4,90	5,01		5,16	
Maximale error				8,81	8,94		9,08	



Figuur F.7: Interactiekromme CEM dLLS - SF 940U wLLS+sp

Tabel F.9: Pakkingsprofiel CEM dLLS – SF 940U DLS+SP

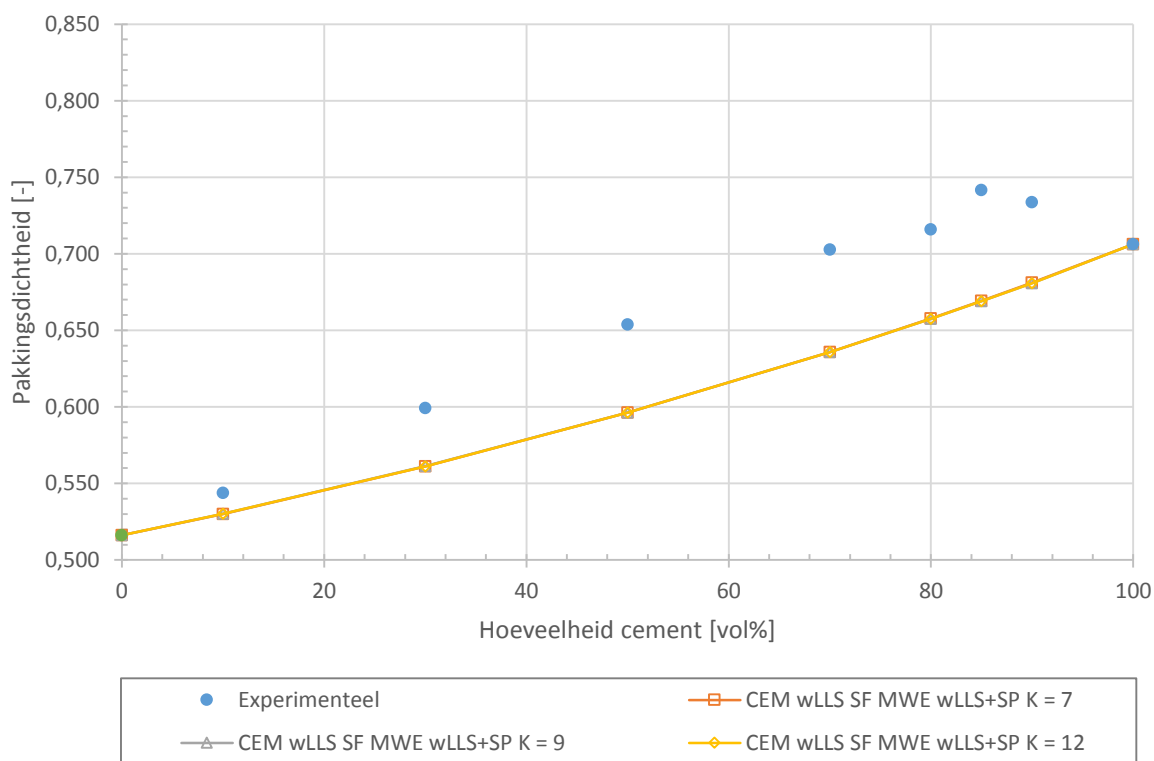
SF 940U	PD _{actueel}	W/P _{min}	CPM K = 7	Error	CPM K = 9	Error	CPM K = 12	Error
[vol%]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,727	0,124	0,738	1,56	0,742	2,05	0,745	2,45
20	0,732	0,125	0,754	2,95	0,763	4,10	0,772	5,20
25	0,730	0,128	0,751	2,80	0,761	4,04	0,770	5,22
30	0,708	0,145	0,741	4,47	0,750	5,58	0,758	6,56
50	0,658	0,198	0,682	3,65	0,686	4,21	0,689	4,62
70	0,601	0,273	0,624	3,62	0,625	3,88	0,627	4,06
90	0,567	0,342	0,573	0,96	0,573	1,04	0,573	1,09
100	0,550	0,376	0,550	-	0,550	-	0,550	-
Gemiddelde error				2,86	3,56		4,17	
Maximale error				4,47	5,58		6,56	



Figuur F.8: Interactiekromme CEM wLLS – SF 940U DLS+SP

Tabel F.10: Pakkingsprofiel CEM wLLS – SF MWE wLLS+SP

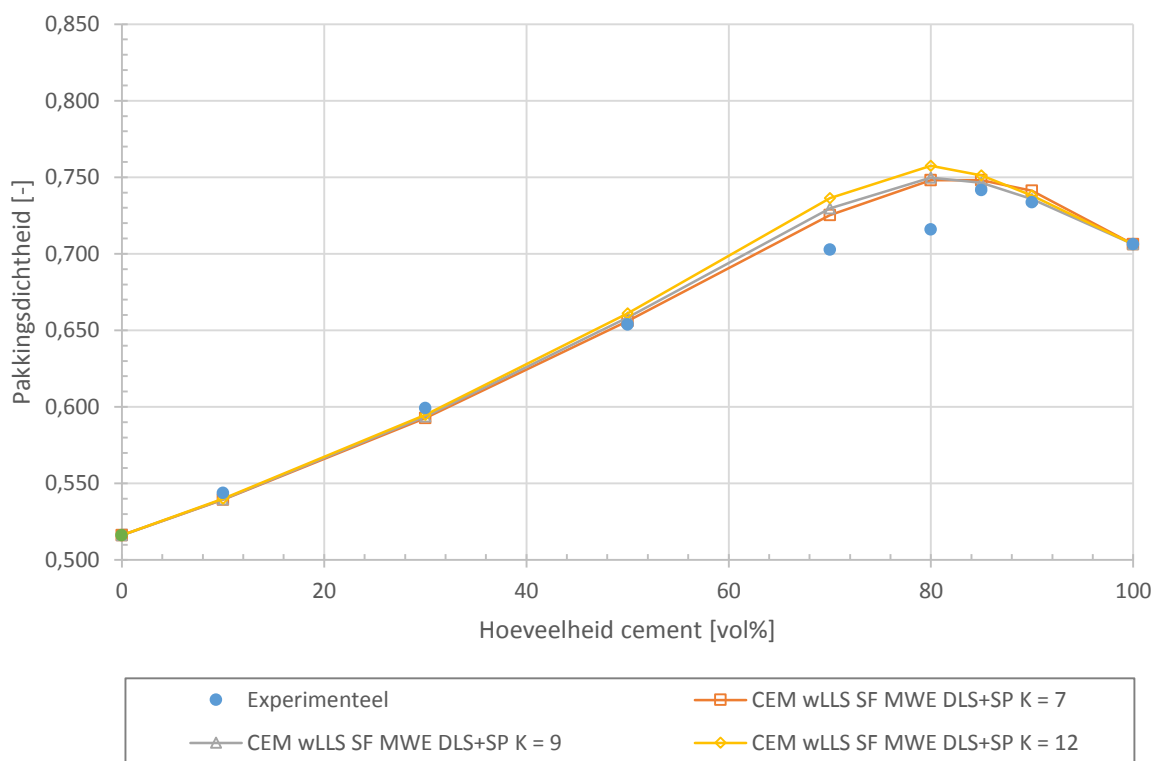
SF MWE	PD _{actueel}	W/P _{min}	CPM	Error	CPM	Error	CPM	Error
[vol%]	[-]	[-]	K = 7	[%]	K = 9	[%]	K = 12	[%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,734	0,119	0,681	7,72	0,681	7,75	0,681	7,75
15	0,742	0,116	0,669	10,81	0,669	10,84	0,669	10,85
20	0,716	0,134	0,658	8,84	0,658	8,86	0,658	8,86
30	0,703	0,148	0,636	10,52	0,636	10,53	0,636	10,54
50	0,654	0,198	0,596	9,65	0,596	9,65	0,596	9,66
70	0,599	0,269	0,561	6,78	0,561	6,76	0,561	6,78
90	0,544	0,364	0,530	2,61	0,530	2,56	0,530	2,58
100	0,516	0,412	0,516	-	0,516	-	0,516	-
Gemiddelde error				8,13	8,13		8,15	
Maximale error				10,81	10,84		10,85	



Figuur F.9: Interactiekromme CEM wLLS – SF MWE wLLS+SP

Tabel F.11: Pakkingsprofiel CEM wLLS - SF MWE DLS+SP

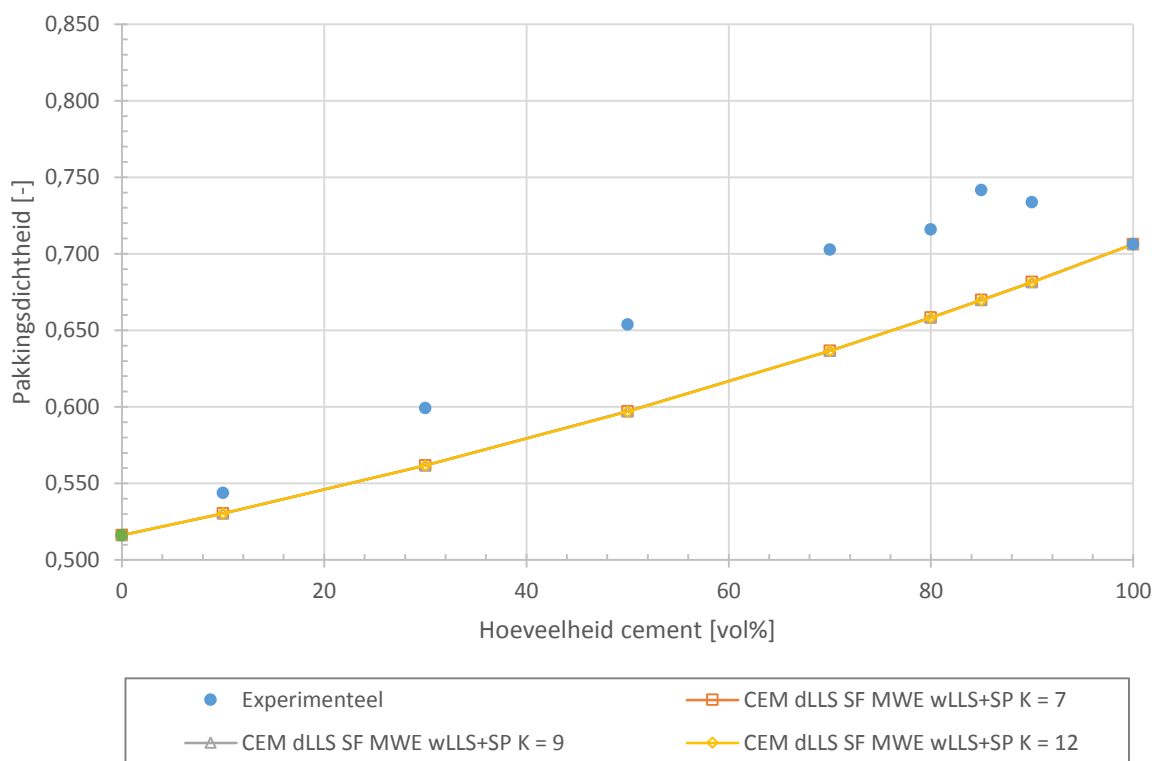
SF MWE	PD _{actueel}	W/P _{min}	CPM	Error	CPM	Error	CPM	Error
[vol%]	[-]	[-]	K = 7	[%]	K = 9	[%]	K = 12	[%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,734	0,119	0,741	1,03	0,736	0,30	0,738	0,60
15	0,742	0,116	0,748	0,87	0,746	0,65	0,751	1,28
20	0,716	0,134	0,748	4,31	0,750	4,54	0,757	5,50
30	0,703	0,148	0,725	3,10	0,730	3,70	0,736	4,57
50	0,654	0,198	0,656	0,37	0,658	0,69	0,661	1,09
70	0,599	0,269	0,593	1,09	0,594	0,94	0,595	0,74
90	0,544	0,364	0,539	0,82	0,540	0,78	0,540	0,70
100	0,516	0,412	0,516	-	0,516	-	0,516	-
Gemiddelde error				1,65	1,66		2,07	
Maximale error				4,31	4,54		5,50	



Figuur F.10: Interactiekromme CEM wLLS - SF MWE DLS+SP

Tabel F.12: Pakkingsprofiel CEM dLLS – SF MWE wLLS+SP

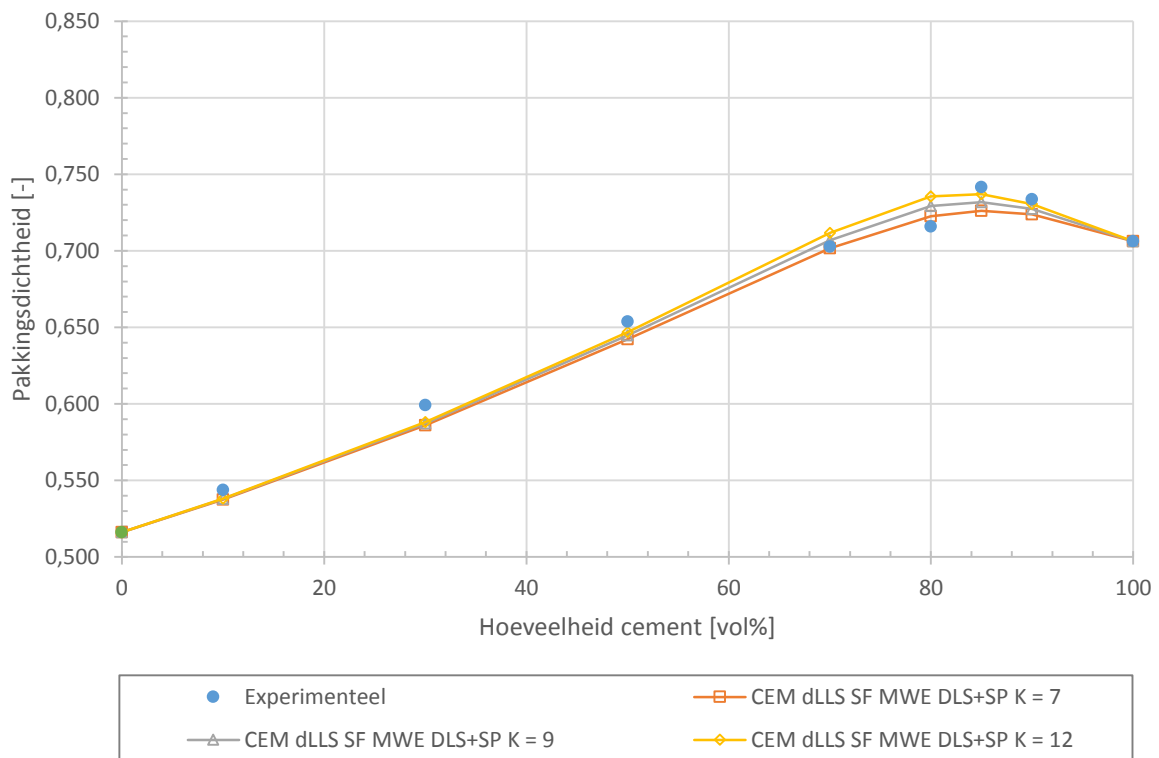
SF MWE	PD _{actueel}	W/P _{min}	CPM	Error	CPM	Error	CPM	Error
[vol%]	[-]	[-]	K = 7	[%]	K = 9	[%]	K = 12	[%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,734	0,119	0,682	7,64	0,681	7,66	0,681	7,66
15	0,742	0,116	0,670	10,71	0,670	10,72	0,670	10,74
20	0,716	0,134	0,658	8,71	0,658	8,72	0,658	8,74
30	0,703	0,148	0,637	10,37	0,637	10,38	0,637	10,40
50	0,654	0,198	0,597	9,49	0,597	9,51	0,597	9,52
70	0,599	0,269	0,562	6,66	0,562	6,66	0,562	6,67
90	0,544	0,364	0,530	2,52	0,530	2,52	0,530	2,52
100	0,516	0,412	0,516	-	0,516	-	0,516	-
Gemiddelde error				8,01	8,03		8,04	
Maximale error				10,71	10,72		10,74	



Figuur F.11: Interactiekromme CEM dLLS – SF MWE wLLS+SP

Tabel F.13: Pakkingsprofiel CEM dLLS - SF MWE DLS+SP

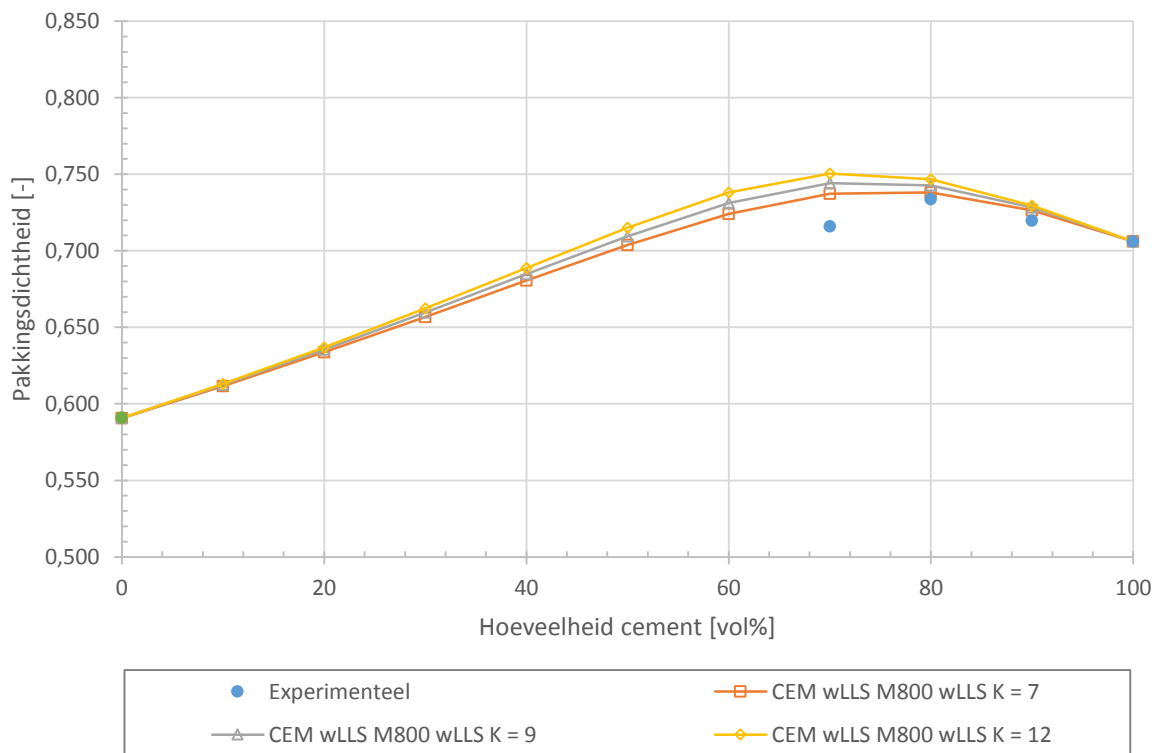
SF MWE	PD _{actueel}	W/P _{min}	CPM	Error	CPM	Error	CPM	Error
[vol%]	[-]	[-]	K = 7	[%]	K = 9	[%]	K = 12	[%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,734	0,119	0,724	1,36	0,727	0,86	0,731	0,43
15	0,742	0,116	0,726	2,11	0,732	1,34	0,737	0,61
20	0,716	0,134	0,723	0,95	0,729	1,84	0,736	2,69
30	0,703	0,148	0,702	0,17	0,707	0,60	0,712	1,26
50	0,654	0,198	0,642	1,80	0,645	1,40	0,647	1,07
70	0,599	0,269	0,586	2,25	0,587	2,06	0,588	1,90
90	0,544	0,364	0,538	1,16	0,538	1,11	0,538	1,06
100	0,516	0,412	0,516	-	0,516	-	0,516	-
Gemiddelde error				1,40	1,31		1,29	
Maximale error				2,25	2,06		2,69	



Figuur F.12: Interactiekromme CEM dLLS - SF MWE DLS+SP

Tabel F.14: Pakkingsprofiel CEM wLLS - M800(p) wLLS

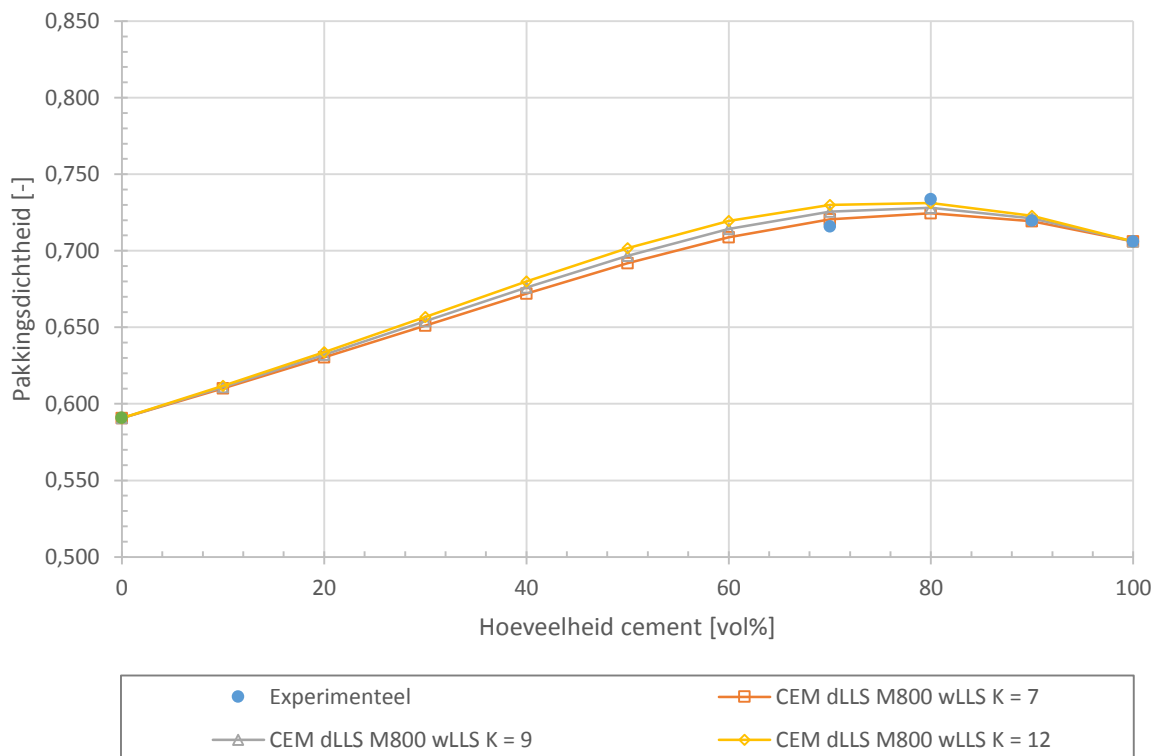
M800(p)	PD _{actueel}	W/P _{min}	CPM K = 7	Error	CPM K = 9	Error	CPM K = 12	Error
[vol%]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,720	0,126	0,726	0,90	0,728	1,16	0,730	1,35
20	0,734	0,119	0,738	0,60	0,743	1,22	0,747	1,73
30	0,716	0,132	0,737	2,90	0,744	3,80	0,751	4,61
50	-	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-
100	0,591	0,226	0,591	-	0,591	-	0,591	-
Gemiddelde error				1,47	2,06		2,57	
Maximale error				2,90	3,80		4,61	



Figuur F.13: Interactiekromme CEM wLLS - M800(p) wLLS

Tabel F.15: Pakkingsprofiel CEM dLLS – M800(p) wLLS

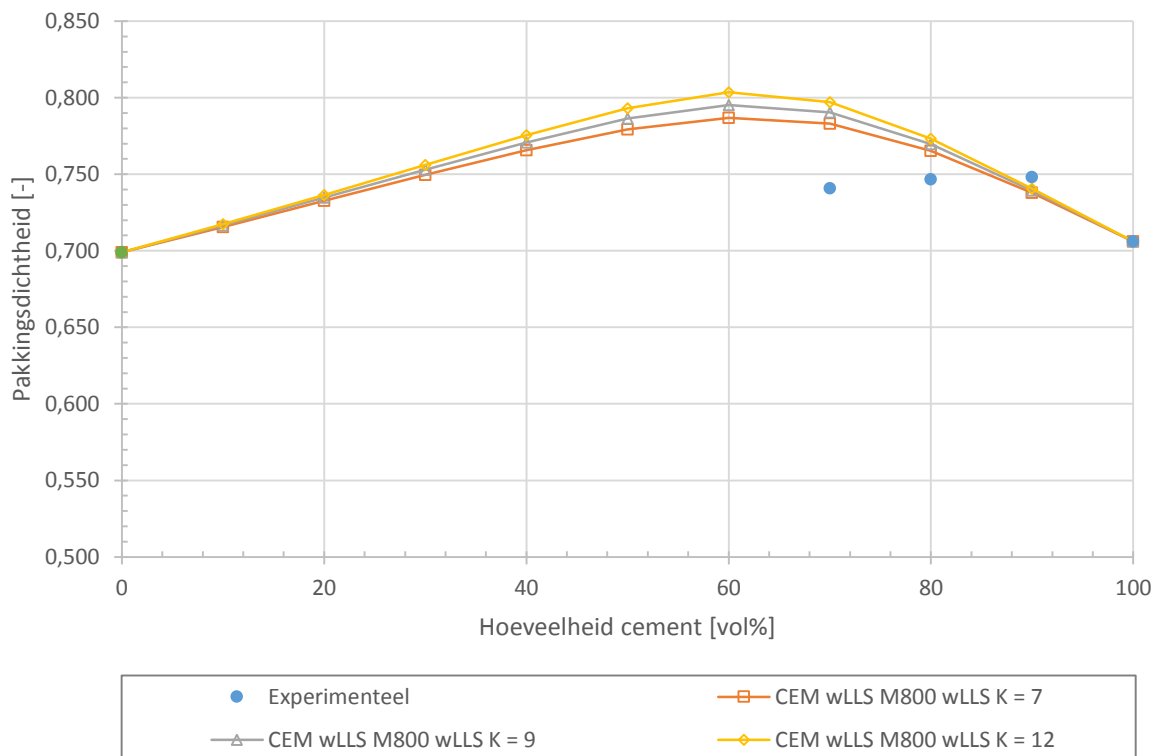
M800(p)	PD _{actueel}	W/P _{min}	CPM K = 7	Error	CPM K = 9	Error	CPM K = 12	Error
[vol%]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,720	0,126	0,719	0,06	0,721	0,20	0,723	0,41
20	0,734	0,119	0,724	1,28	0,728	0,77	0,731	0,34
30	0,716	0,132	0,721	0,66	0,726	1,34	0,730	1,94
50	-	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-
100	0,591	0,226	0,591	-	0,591	-	0,591	-
Gemiddelde error				0,67	0,77		0,90	
Maximale error				1,28	1,34		1,94	



Figuur F.14: Interactiekromme CEM wLLS – M800(p) wLLS

Tabel F.16: Pakkingsprofiel CEM wLLS - M800(d) wLLS

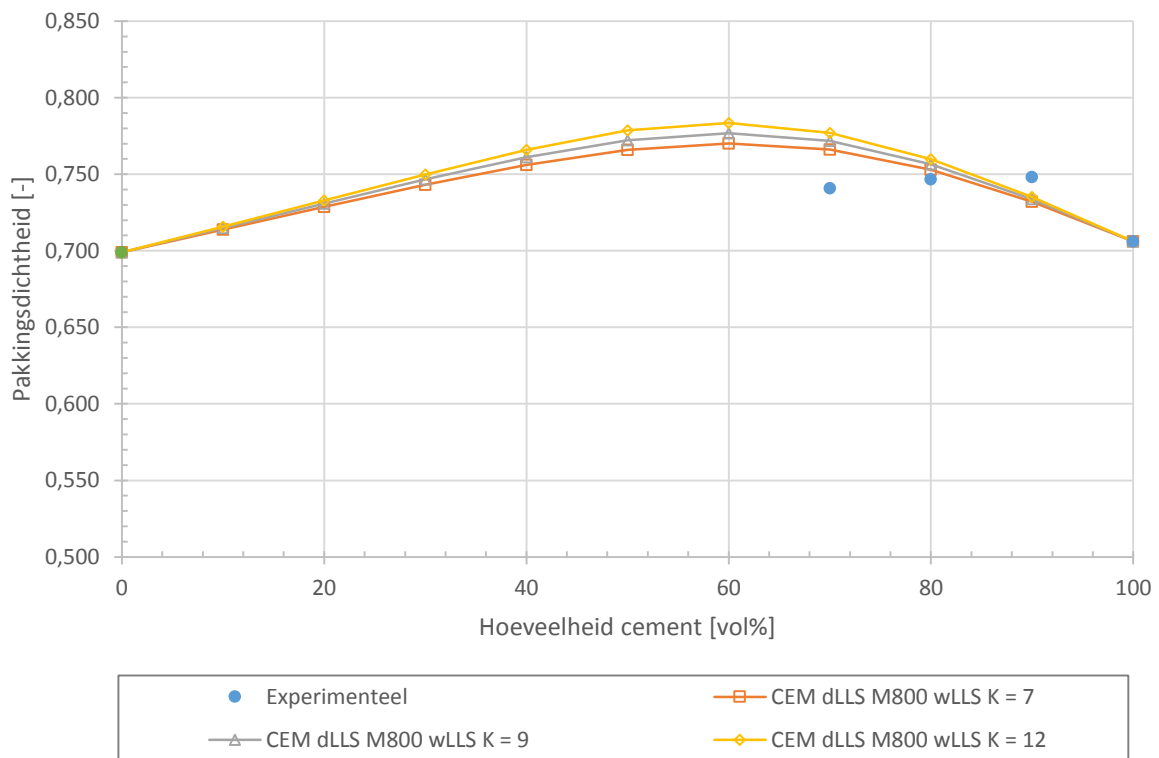
M800(o)	PD _{actueel}	W/P _{min}	CPM K = 7	Error	CPM K = 9	Error	CPM K = 12	Error
[vol%]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,748	0,109	0,738	1,39	0,739	1,16	0,741	1,00
20	0,747	0,125	0,765	2,43	0,770	2,97	0,773	3,42
30	0,741	0,117	0,783	5,39	0,790	6,27	0,797	7,07
50	-	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-
100	0,699	0,061	0,699	-	0,699	-	0,699	-
Gemiddelde error				3,07	3,47		3,83	
Maximale error				5,39	6,27		7,07	



Figuur F.15: Interactiekromme CEM wLLS - M800(o) wLLS

Tabel F.17: Pakkingsprofiel CEM dLLS – M800(d) wLLS

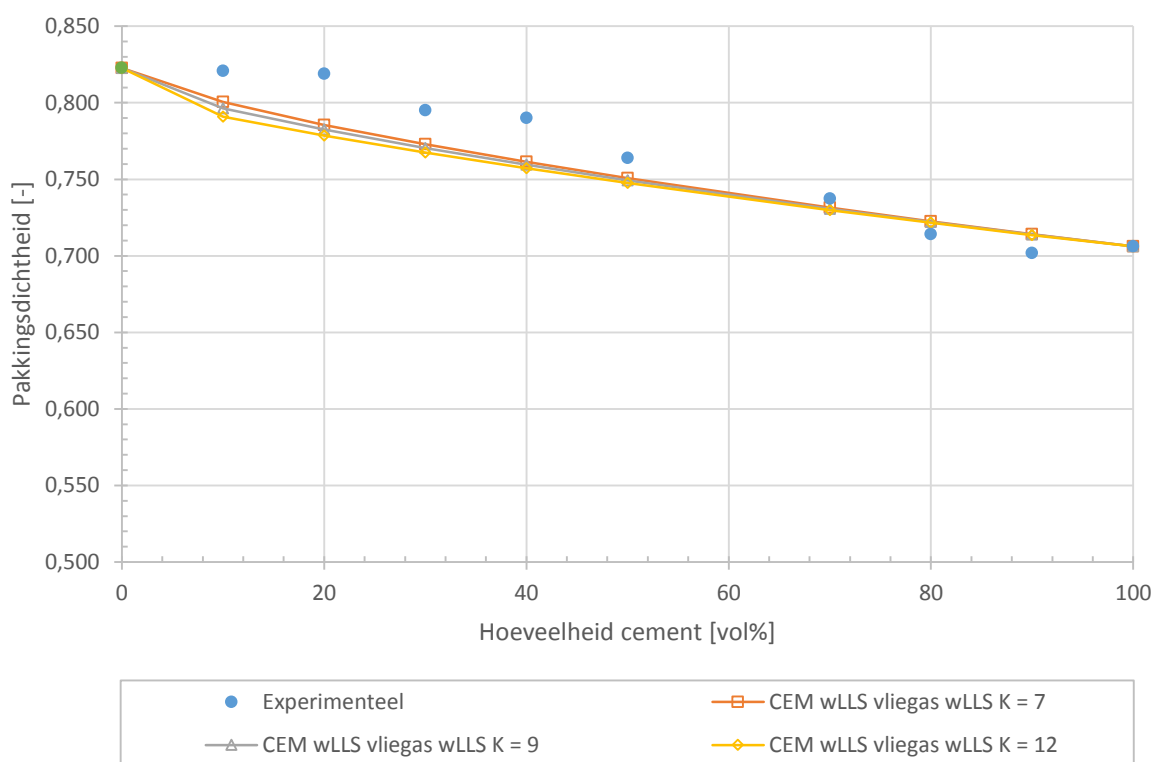
M800(o)	PD _{actueel}	W/P _{min}	CPM K = 7	Error	CPM K = 9	Error	CPM K = 12	Error
[vol%]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,748	0,109	0,732	2,20	0,734	1,96	0,735	1,76
20	0,747	0,125	0,753	0,81	0,757	1,30	0,760	1,72
30	0,741	0,117	0,766	3,31	0,772	4,01	0,777	4,65
50	-	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-
100	0,699	0,061	0,699	-	0,699	-	0,699	-
Gemiddelde error				2,11	2,43		2,71	
Maximale error				3,31	4,01		4,65	



Figuur F.16: Interactiekromme CEM dLLS - M800(o) wLLS

Tabel F.18: Pakkingsprofiel CEM wLLS - vliegas wLLS

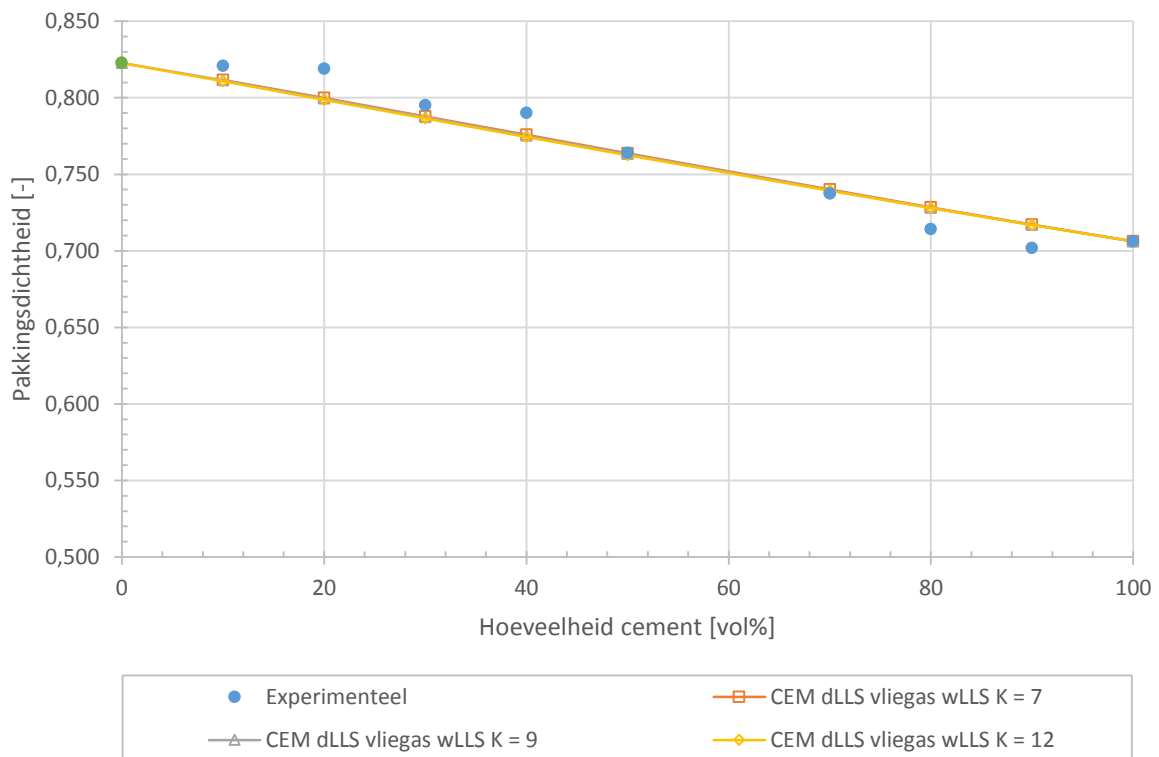
Vliegas [vol%]	PD _{actueel} [-]	W/P _{min} [-]	CPM		CPM		CPM	
			K = 7 [-]	Error [%]	K = 9 [-]	Error [%]	K = 12 [-]	Error [%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,702	0,157	0,714	1,72	0,714	1,69	0,714	1,66
20	0,714	0,145	0,723	1,18	0,722	1,11	0,722	1,04
30	0,737	0,145	0,732	0,79	0,731	0,90	0,730	1,02
50	0,764	0,129	0,751	1,75	0,749	1,95	0,748	2,17
60	0,790	0,127	0,761	3,76	0,759	4,02	0,757	4,32
70	0,795	0,121	0,773	2,89	0,770	3,22	0,768	3,60
80	0,819	0,120	0,786	4,26	0,782	4,67	0,779	5,19
90	0,821	0,128	0,800	2,56	0,796	3,08	0,791	3,80
100	0,823		0,823	-	0,823	-	0,823	-
Gemiddelde error				2,36		2,58		2,85
Maximale error				4,26		4,67		5,19



Figuur F.17: Interactiekromme CEM wLLS + vliegas wLLS

Tabel F.19: Pakkingsprofiel CEM dLLS - vliegas wLLS

Vliegas [vol%]	PD _{actueel} [-]	W/P _{min} [-]	CPM K = 7		CPM K = 9		CPM K = 12	
			[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]
0	0,706	0,132	0,706	-	0,706	-	0,706	-
10	0,702	0,157	0,717	2,14	0,717	2,12	0,717	2,10
20	0,714	0,145	0,728	1,97	0,728	1,94	0,728	1,89
30	0,737	0,145	0,740	0,36	0,740	0,31	0,739	0,25
50	0,764	0,129	0,764	0,03	0,763	0,10	0,762	0,19
60	0,790	0,127	0,776	1,84	0,775	1,91	0,774	2,01
70	0,795	0,121	0,788	0,93	0,787	1,00	0,786	1,10
80	0,819	0,120	0,800	2,39	0,799	2,44	0,799	2,54
90	0,821	0,128	0,812	1,13	0,811	1,17	0,811	1,24
100	0,823		0,823	-	0,823	-	0,823	-
Gemiddelde error				1,35		1,37		1,42
Maximale error				2,39		2,44		2,54



Figuur F.18: Interactiekromme CEM dLLS - vliegas wLLS

Bijlage G: Slump flow

Tabel G.1: Slump flow combinatie CEM – SF

Mengverhouding	W/P [-]	D _{gem} [cm]	Mengverhouding	W/P	D _{gem}
100 % CEM	0,15	21,4	70 % CEM + 30 % SF 940U	0,15	20,5
	0,16	27,8		0,16	23,5
	0,17	28,8		0,17	24,2
90 % CEM + 10 % SF 940D	0,14	18,6	50 % CEM + 50 % SF 940U	0,20	18,0
	0,15	22,3		0,22	20,7
	0,16	27,8		0,24	24,4
85 % CEM + 15 % SF 940D	0,14	18,9	30 % CEM + 70 % SF 940U	0,28	16,6
	0,15	22,4		0,30	18,8
	0,16	27,5		0,32	21,6
80 % CEM + 20 % SF 940D	0,14	19,5	10 % CEM + 9 % SF 940U	0,35	15,2
	0,15	21,9		0,37	17,2
	0,16	26,8		0,39	18,9
70 % CEM + 30 % SF 940D	0,16	22,6	90 % CEM + 10 % SF MWE	0,14	19,0
	0,17	27,2		0,15	24,1
	0,18	28,9		0,16	25,0
50 % CEM + 50 % SF 940D	0,22	25,3	85 % CEM + 15 % SF MWE	0,14	19,0
	0,23	28,8		0,15	24,6
	0,24	30,4		0,16	30,3
30 % CEM + 70 % SF 940D	0,30	25,0	80 % CEM + 20 % SF MWE	0,14	22,2
	0,31	27,4		0,15	24,2
	0,32	29,6		0,16	27,8
10 % CEM + 9 % SF 940D	0,39	22,8	70 % CEM + 30 % SF MWE	0,15	22,4
	0,41	26,1		0,16	25,4
	0,43	27,9		0,17	28,9
90 % CEM + 10 % SF 940U	0,15	19,0	50 % CEM + 50 % SF MWE	0,20	19,1
	0,16	25,6		0,22	22,7
	0,17	31,8		0,24	28,4
80 % CEM + 20 % SF 940U	0,15	23,3	30 % CEM + 70 % SF MWE	0,29	20,2
	0,16	23,7		0,30	21,5
	0,17	26,1		0,31	26,5
75 % CEM + 25 % SF 940U	0,15	22,7	10 % CEM + 9 % SF MWE	0,38	20,3
	0,16	24,4		0,40	23,4
	0,17	24,8		0,42	25,6

Tabel G.2: Slump flow combinatie CEM - M800

Mengverhouding	W/P [-]	D_{gem} [cm]
90 %CEM + 10 % M800	0,14	22,7
	0,15	23,5
	0,16	31,1
80 %CEM + 20 % M800	0,13	18,1
	0,14	22,1
	0,15	29,7
70 %CEM + 30 % M800	0,14	19,3
	0,15	23,6
	0,16	31,4

Tabel G.3: Slump flow combinatie CEM - vliegas

Mengverhouding	W/P [-]	D_{gem} [cm]
90 %CEM + 10 % vliegas	0,15	18,6
	0,17	27,6
80 %CEM + 20 % vliegas	0,15	25,0
	0,16	28,3
70 %CEM + 30 % vliegas	0,14	22,6
	0,16	30,2
60 %CEM + 40 % vliegas	0,14	25,2
	0,15	29,4
50 %CEM + 50 % vliegas	0,13	22,3
	0,15	28,0
40 %CEM + 60 % vliegas	0,14	26,5
	0,15	29,7
30 %CEM + 70 % vliegas	0,13	24,0
	0,14	27,0
20 %CEM + 80 % vliegas	0,13	24,4
	0,14	27,8
10 %CEM + 90 % vliegas	0,14	29,3
	0,15	32,0

Referenties

Abreu, C.R.A., Tavares, F.W. & Castier, M. (2003) Influence of particle shape on the packing and on the segregation of spherocylinders via Monte Carlo simulations. *Powder Technology*, 134(2013), pp. 167-180.

Belgische BetonGroepering (2009). *Betontechnologie*. Dilbeek: De Bouwkroniek.

Bleeck, T.H. (2011). *Particle packing; An Effective Approach to Optimized Design of Ultra High Strength hand Self Compacting Concretes*. Thesisrapport, University of New South Wales at the Australian Defence Force Academy, School of Engineering and Information Technology.

Breye, S. & De Vos, B. (2013). *Optimalisatie van de samenstelling van ultra hoge sterkte beton*. Masterthesis, Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur.

Coppola, L., Troli, R., Cerulli, T. & Collepardi, M. (1996). The influence of materials on the performance of reactive powder concrete. In *International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures*, pp. 502-513.

Cyr, M. & Tagnit-Hamou, A. (2001). *Particle size distribution of fine powders by LASER diffraction spectrometry. Case of cementitious materials*. *Materials and Structures*, 34, pp. 342 – 350.

De Reu, F. & Van Compernelle, W. (2014). *De waterbehoefte van poederachtige materialen. Validatie van het Compressible Packing Model*. Masterthesis, Katholieke Universiteit Leuven, Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen.

De Ruyck, S. & Eeckhout, M. (2006). *Etude et caractérisation d'une composition d'un béton à ultra hautes performances à l'aide de matériaux disponibles sur le marché belge*. Masterthesis, Université catholique de Louvain, Faculté des Sciences appliquées.

Dils, J. (2013). *Vacuum mixing a useful tool or not?*

Dils, J., Boel, V. & De Schutter, G. (2013). Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC. *Construction and Building Materials*, 41(2013), pp. 455-463.

Fennis, S.A.A.M. (2010). *Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimazation*. Doctoraatsthesis, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen.

Fennis, S.A.A.M. (2011). *Measuring water demand or packing density of micro powders – comparison of methods*.

Fennis, S.A.A.M. & Walraven, J.C. (2011). Ecological concrete and workability: a marriage with future? In *36th Conference on Our World Concrete & Structures*.

Fennis, S.A.A.M., Walraven, J.C. & Nijland, T.G. (2008). Measuring the packing density to lower the cement content in concrete. In J.C. Walraven & Stoelhorst (Eds.), *Tailor Made Concrete Structures*, pp. 419-424. Londen, Verenigd Koninkrijk: Taylor & Francis Group.

Fennis, S.A.A.M., Walraven, J.C. & Uijl, J.A. den (2009). The use of particle packing models to design ecological concrete. *HERON*, 54(2), pp. 185-204.

Fennis, S.A.A.M., Walraven, J.C. & Uijl, J.A. den (2013). Compaction-interaction packing model: regarding the effect of fillers in concrete mixture design. *Materials and Structures*, 46(2013), pp. 463-478.

Flatt, R.J. (1999). *Interparticle Forces and Superplasticizers in Cement Suspension*. PhD thesis, Ecole Polytechnique Federale Lausanne.

Haleerattanawattana, P. & Limsuwan, E. (2004). Strength-Based Gradation of Coarse Aggregates for Ultra-High-Strenght Concrete. In M. Schmidt, E. Fehling & C. Geisenhanslüke (Eds.), *Structural Materials and Engineering Series: No. 3. Ultra High Performance Concrete*, pp. 239-249.

HeidelbergCement Group (2007). *Productblad: Portlandcement CEM I*.

Hunger, M (2010). An integral design concept for ecological Self-Compacting Concrete. Doctoraatsthesis, Technische Universiteit Eindhoven.

Kjeldsen, A.M. (2007). *Consolidation behaviour of cement-based systems. Influence of interparticle forces*. Doctoraatsthesis, Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.

Kjeldsen, A.M., Bergström, L. & Geiker, M. (2004). Centrifugal Consolidation of MgO-Suspensions – The Influence of Superplasticizers on Particle Packing. In S.L. Mason (Ed.), *Annual Transactions – The Nordic Rheology Society*, 12(2004), pp. 31-39.

Kjeldsen, A.M. & Geiker, M. (2005). Modelling Inter-Particle Forces and Resulting Agglomerate Sizes in Cement-Based Materials. In *The Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, 1(2005), pp. 105-113.

Kjeldsen, A.M., Stang, H. & Geiker, M. (2006). *Relating inter-particle forces in fresh cement-based materials to packing and mean pore size*. Paper ingediend ter publicatie in *Cement and Concrete Research*.

Kwan, A.K.H. & Mora, C.F. (2001). Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles. *Magazine of Concrete Research*, 53(2), pp. 91-100.

Kwan, A.K.H & Wong, H.H.C. (2008). Packing density of cementitious materials: part 2 – packing and flow of OPC + PFA + CSF. *Materials and Structures*, 41(4), pp. 773-784.

Larrard, F. de (1989). Ultrafine particles for the making of very high strength concretes. *Cement and Concrete Research*, 19 (1989), pp. 161-172.

Larrard, F. de (1999). *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. Londen, Verenigd Koninkrijk: Routledge, Taylor & Francis Group.

Larrard, F. de & Sedran, T. (1994). Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, 24(6), pp. 997-1009.

Lesage, K. (2014). Interactions between cement and combined concrete admixtures. The influence on cement paste rheology. Doctoraatsthesis, Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur.

Mangulkar, M. N. & Jamkar, S. S. (2013). Review of Particle Packing Theories Used For Concrete Mix Proportioning. *International Journal Of Scientific & Engineering Research*, 4(5), pp. 143-148.

Miller, K.T., Melant, R.M. & Zukoski, C.F. (1996). Comparison of the Compressive Yield Response of Aggregated Suspensions - Pressure Filtration, Centrifugation, and Osmotic Consolidation. *Journal of the American Ceramic Society*, 79(10), pp. 2545-2556.

Mindess, S. (2006). Advanced concrete for use in civil engineering. In H. C. Wu (Ed.), *Advanced civil infrastructure materials*, pp. 1 – 29. Boca Raton, Verenigde Staten: CRC Press LLC.

Sedran, T. (1999). Rheologie et rheometrie des bétons. Appllication aux bétons autonivalants. Doctoraatsthesis, Université Laval.

Staquet, S. & Espion, B. (2002). Influence of Cement and Silica Fume Type on Compressive Strength of Reactive Powder Concrete. In *6th International Symposium On High Strength/High Performance Concrete*, 1(2002), pp. 1421-1436.

Stovall, T., Larrard, F. de & Buil, M. (1986). Linear Packing Density Model of Gran Mixtures. *Powder Technology*, 48(1986), pp. 1-12.

Suzuki, M., Shinmura, T., Iimura, K. & Hirota, M. (2008). Study of the Wall Effect on Particle Packing Structure Using X-ray Micro Computed Tomography. *Advanced Powder Technology*, 19(2008), pp. 183-195.

Wille, K., Naaman, A.E. & Parra-Montesinos, G.J. (2011). Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way. *ACI Materials Journal*, 108-M06, pp. 46-54.

Yajun, J. & Cahyadi, J.H. (2003). Effects on densified silica fume on microstructures and compressive strength of blended cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 33(2003), pp. 1543-1548.

Yu, A.B., Feng, C.L., Zou, R.P. & Yang, R.Y. (2003). On the relationship between porosity and interparticle forces. *Powder Technology*, 130(2003), 70-76.

Normen

NBN EN 1097-3:1998. Beproevingmethoden voor de bepaling van mechanische en fysische eigenschappen van toeslagmaterialen – Deel 3: Bepaling van de dichtheid van onverdicht materialen het gehalte aan holle ruimten.

NBN EN 1097-7:2008. Beproevingmethoden voor de bepaling van fysische en mechanische eigenschappen van toeslagmaterialen – Deel 7: Bepaling van de dichtheid van vulstof – Methode met pyknometer.

NBN EN 12350-8:2010. Beproeving van betonspecie – Deel 8: Zelfverdichtend beton – Vloeimaat.

NBN EN 933-1:2012. Beproevingmethoden voor geometrische eigenschappen van toeslagmaterialen - Deel 1: Bepaling van de korrelverdeling – Zeefmethode.

NEN EN 196-1:2005. Beproevingmethoden voor cement – Deel 1: Bepaling van de sterkte.

Lijst met figuren

Figuur 2.1: Invloed van de grootte van de deeltjes en de hoeveelheid korrels op de pakkingsdichtheid.....	24
Figuur 2.2: Invloed van het verdichtingsproces op de pakkingsdichtheid.....	26
Figuur 3.1: Verschillende stadia in de vorming van agglomeraten	30
Figuur 3.2: Correlatie vermogen - watertoevoer gedurende mengproces	31
Figuur 3.3: Schema van de evenwichtstoestand van consolidatie bij centrifugeren	32
Figuur 3.4: Consolidatiegedrag van suspensies met gedispergeerde deeltjes (links) en volkvorming (rechts)	35
Figuur 3.5: <i>Wall</i> en <i>loosening effect</i> bij een ternair mengsel met een dominante intermediaire korrelverdelingsklasse.....	36
Figuur 3.6: Invloed van het <i>wall effect</i> op het gehalte aan holle ruimtes	36
Figuur 3.7: Invloed van het <i>wall effect</i> op de pakkingsdichtheid.....	36
Figuur 3.8: Agglomereren van deeltjes verlaagt de pakkingsdichtheid omwille van de grote holle ruimtes (P) tussen de agglomeraten.....	37
Figuur 4.1: Pakkingsdichtheid van een binair mengsel in functie van het gehalte aan fijne deeltjes volgens het <i>linear packing density model</i>	40
Figuur 4.2: Pakkingsdichtheid in functie van het gehalte aan fijne deeltjes volgens het linear packing density model en het solid suspension model	41
Figuur 4.3: Interactiefuncties a_{ij} en b_{ij} in functie van de verhouding van korrelgroottes	43
Figuur 4.4: Variatie van K in functie van Φ	44
Figuur 4.5: Invloed van de korrelgrootte op de werkelijke pakkingsdichtheid van een binair mengsel. $K = 9$ en $\beta_1 = \beta_2 = 0,71$	46
Figuur 4.6: Invloed van de virtuele pakkingsdichtheden van de verschillende samenstellende delen op de pakkingsdichtheid van het binaire mengsel. $K = 4,75$, $\beta_2 = 0,70$ en $d_2/d_1 = 0,30$	46
Figuur 4.7: Invloed van de K-waarde op de pakkingsdichtheid van een binair mengsel. $\beta_1 = \beta_2 = 0,71$ en $d_2/d_1 = 0,20$	47
Figuur 4.8: Vergelijking van het pakkingsprofiel voor een mengsel bestaande uit millimeterpartikels en micrometerpartikels	50
Figuur 4.9: Aantrek - en afstootkrachten in het geval van hoge, gemiddelde en lage ionenconcentraties [Fennis, 2010].....	51
Figuur 4.10: Resultante van de aantrek- en afstootkrachten.....	51
Figuur 5.1: Invloed van de cementsoort op de vloeimaat en druksterkte	53
Figuur 5.2: Druksterkte in functie van de hoeveelheid alkaliën	54
Figuur 5.3: Slump flow in functie van de W/C-factor.....	55
Figuur 5.4: Adsorptie van superplastificeermoleculen op het grensvlak tussen de cementkorrel en het aanmaakwater [Belgische BetonGroepering, 2009]	56
Figuur 5.5: Elektrostatische afstoting van twee cementkorrels	56
Figuur 5.6: Sferische belemmering.....	56

Figuur 5.7: Scheikundige verbinding op de meest reactieve plaatsten.....	56
Figuur 6.1: Proefopstelling zwaartekrachtsproef.....	62
Figuur 6.2: Interactiekrommen voor binaire mengsels van grove granulaten inclusief validatie CPM.....	64
Figuur 6.3: Proefopstelling verdichtingsproef.....	68
Figuur 6.4: Experimentele data van de verdichtingsproef uit het onderzoek van Larrard [1999]	69
Figuur 6.5: Grafische voorstelling van de individuele pakkingsdichtheid bepaald volgens verdichtingsproef uit het onderzoek van Larrard [1999]	70
Figuur 6.6: Interactiekrommen voor binaire mengsels van grove granulaten inclusief validatie CPM.....	71
Figuur 6.7: Optreden van segregatie bij verschillende verhoudingen van granulaten van een binair mengsel.....	73
Figuur 6.8: Combinatie B 2/4 – Z .25/.5 in verhoudingen 80-20 vol% (a), 20-80 vol% (b) en 40-60 vol% (c).....	74
Figuur 7.1: Malvern Mastersizer 2000, inclusief natte eenheid Hydro SM.....	79
Figuur 7.2: Gecumuleerde zeefkrommes melen, vliegias en cement.....	83
Figuur 7.3: Gecumuleerde zeefkrommes silica fume zonder toevoeging van SP	84
Figuur 7.4: Onvolledige dispersie van de SF-partikels	85
Figuur 7.5: Gecumuleerde zeefkrommes silica fume met toevoeging van SP	86
Figuur 7.6: Invloed SP op witte en grijze silica fume.....	86
Figuur 7.7: Menger in open toestand.....	87
Figuur 7.8: Menger in gesloten toestand.....	87
Figuur 7.9: Heraeus Labofuge 400.....	88
Figuur 7.10: Effect van de toevoeging van SP op de pakkingsdichtheid van silica fume .	90
Figuur 7.11: Best passende rechte tussen de resultaten van de centrifugale consolidatieproef.....	94
Figuur 7.12: Grafische voorstelling van het iteratieproces ter bepaling van de pakkingsdichtheid.....	97
Figuur 7.13: Interactiekrommen voor de combinatie cement en silica fume verkregen uit de centrifugale consolidatie en de Marquardt-test.....	99
Figuur 7.14: Verhoging van het <i>loosening effect</i> ten gevolge van agglomeratie	100
Figuur 7.15: Resultaten pakkingsdichtheid Breye & De Vos [2013]	101
Figuur 7.16: Resultaten pakkingsdichtheid Sedran [1999]	101
Figuur 7.17: Meelpartikels in suspensie na centrifugale consolidatie	102
Figuur 7.18: Interactiekrommes voor de combinatie cement en M800 verkregen uit de centrifugale consolidatie en de Marquardt-test.....	103
Figuur 7.19: Laagvorming na centrifugereren	104
Figuur 7.20: Interactiekromme voor de combinatie cement en vliegias verkregen uit de centrifugale consolidatie	105
Figuur 7.21: Slump flow opstelling.....	110

Figuur 7.22: Walter + bai ai drukmachine (Serie DB).....	112
Figuur 7.23: Testprocedure cilinders.....	112
Figuur 7.24: Druksterkte voor de combinaties CEM – SF 940U en CEM – SF MWE.....	113
Figuur B.1: Zeefkromme rolgrind 4/16 (inclusief fracties).....	135
Figuur B.2: Zeefkromme basalt 4/16 (inclusief fracties).....	135
Figuur B.3: Zeefkromme porfier 2/4 (inclusief fracties).....	136
Figuur B.4: Zeefkromme zand M31 (inclusief fracties).....	136
Figuur C.1: Interactiekromme R 4/8 – Z.25/.5 volgens zwaartekrachtsproef.....	138
Figuur C.2: Interactiekromme R 2/4 – Z.25/.5 volgens zwaartekrachtsproef.....	139
Figuur C.3: Interactiekromme B 4/8 – Z.25/.5 volgens zwaartekrachtsproef.....	140
Figuur C.4: Interactiekromme B 2/4 – Z.25/.5 volgens zwaartekrachtsproef.....	141
Figuur C.5: Interactiekromme P 2/4 – Z.25/.5 volgens zwaartekrachtsproef.....	142
Figuur C.6: Interactiekromme Z 5/1 – Z.25/.5 volgens zwaartekrachtsproef.....	143
Figuur C.7: Interactiekromme Z .125/.25 – Z.25/.5 volgens zwaartekrachtsproef.....	144
Figuur D.1: Interactiekromme R 4/8 – Z.25/.5 volgens verdichtingsproef.....	146
Figuur D.2: Interactiekromme R 2/4 – Z.25/.5 volgens verdichtingsproef.....	147
Figuur D.3: Interactiekromme B 4/8 – Z.25/.5 volgens verdichtingsproef.....	148
Figuur D.4: Interactiekromme B 2/4 – Z.25/.5 volgens verdichtingsproef.....	149
Figuur D.5: Interactiekromme P 2/4 – Z.25/.5 volgens verdichtingsproef.....	150
Figuur D.6: Interactiekromme Z 5/1 – Z.25/.5 volgens verdichtingsproef.....	151
Figuur D.7: Interactiekromme Z .125/.25 – Z.25/.5 volgens verdichtingsproef.....	152
Figuur E.1: Droge zeefkromme cement.....	153
Figuur E.2: Natte zeefkrommes silica fume bepaalt via DLS.....	153
Figuur F.1: Interactiekromme CEM wLLS – SF 940D wLLS+SP.....	155
Figuur F.2: Interactiekromme CEM wLLS – SF 940D DLS+SP.....	156
Figuur F.3: Interactiekromme CEM dLLS – SF 940D wLLS+SP.....	157
Figuur F.4: Interactiekromme CEM dLLS – SF 940D DLS+SP.....	158
Figuur F.5: Interactiekromme CEM wLLS – SF 940U wLLS+SP.....	159
Figuur F.6: Interactiekromme CEM wLLS – SF 940U DLS+SP.....	160
Figuur F.7: Interactiekromme CEM dLLS – SF 940U wLLS+SP.....	161
Figuur F.8: Interactiekromme CEM dLLS – SF 940U DLS+SP.....	162
Figuur F.9: Interactiekromme CEM wLLS – SF MWE wLLS+SP.....	163
Figuur F.10: Interactiekromme CEM wLLS – SF MWE DLS+SP.....	164
Figuur F.11: Interactiekromme CEM dLLS – SF MWE wLLS+SP.....	165
Figuur F.12: Interactiekromme CEM dLLS – SF MWE DLS+SP.....	166
Figuur F.13: Interactiekromme CEM wLLS – M800(p) wLLS.....	167
Figuur F.14: Interactiekromme CEM dLLS – M800(p) wLLS.....	168
Figuur F.15: Interactiekromme CEM wLLS – M800(o) wLLS.....	169
Figuur F.16: Interactiekromme CEM dLLS – M800(o) wLLS.....	170
Figuur F.17: Interactiekromme CEM wLLS – vliegass wLLS.....	171
Figuur F.18: Interactiekromme CEM dLLS – vliegass wLLS.....	172

Lijst met tabellen

Tabel 4.1: K-waarden voor verschillende pakkingsmethoden	43
Tabel 6.1: Dichtheden gebruikte materialen	61
Tabel 6.2: Individuele pakkingsdichtheid van de korrelfracties volgens de verdichtingsproef	63
Tabel 6.3: Eigenschappen triltafel	67
Tabel 6.4: Individuele pakkingsdichtheid van de korrelfracties volgens de verdichtingsproef	69
Tabel 6.5: Vergelijking individuele pakkingsdichtheden zwaartekrachts- (ZP) en verdichtingsproef (VP)	75
Tabel 7.1: Dichtheden gebruikte materialen	78
Tabel 7.2: Eigenschappen Mastersizer 2000	79
Tabel 7.3: Eigenschappen Hydro SM	79
Tabel 7.4: Optische eigenschappen van poedervormige materialen	81
Tabel 7.5: Overzicht partikelvorm	81
Tabel 7.6: Karakteristieke korreldiameters melen, vliegas en cement	82
Tabel 7.7: Karakteristieke korreldiameters silica fume zonder toevoeging SP	84
Tabel 7.8: Karakteristieke korreldiameters silica fume met toevoeging van SP	85
Tabel 7.9: Eigenschappen Eirich-menger	87
Tabel 7.10: Eigenschappen centrifuge	88
Tabel 7.11: Overzicht gehalte SP bepaald via Funneltest	91
Tabel 7.12: Individuele pakkingsdichtheid silica fume en cement	98
Tabel 7.13: Maximale pakkingsdichtheid reeks CEM - SF	98
Tabel C.1: Individuele pakkingsdichtheid van de korrelfracties volgens de zwaartekrachtsproef	137
Tabel C.2: Pakkingsprofiel R 4/8 - Z .25/.5	138
Tabel C.3: Pakkingsprofiel R 2/4 - Z .25/.5	139
Tabel C.4: Pakkingsprofiel B 4/8 - Z .25/.5	140
Tabel C.5: Pakkingsprofiel B 2/4 - Z .25/.5	141
Tabel C.6: Pakkingsprofiel P 2/4 - Z .25/.5	142
Tabel C.7: Pakkingsprofiel Z .5/1 - Z .25/.5	143
Tabel C.8: Pakkingsprofiel Z .125/.25 - Z .25/.5	144
Tabel D.1: Individuele pakkingsdichtheid van de korrelfracties volgens de verdichtingsproef	145
Tabel D.2: Pakkingsprofiel R 4/8 - Z .25/.5	146
Tabel D.3: Pakkingsprofiel R 2/4 - Z .25/.5	147
Tabel D.4: Pakkingsprofiel B 4/8 - Z .25/.5	148
Tabel D.5: Pakkingsprofiel B 2/4 - Z .25/.5	149
Tabel D.6: Pakkingsprofiel P 2/4 - Z .25/.5	150
Tabel D.7: Pakkingsprofiel Z.5/1 - Z .25/.5	151

Tabel D.8: Pakkingsprofiel Z .125/.25– Z .25/.5.....	152
Tabel F.1: Individuele pakkingdichtheid van poeders via centrifugale consolidatie.....	154
Tabel F.2: Pakkingsprofiel CEM wLLS – SF 940D wLLS+SP.....	155
Tabel F.3: Pakkingsprofiel CEM wLLS – SF 940D DLS+SP.....	156
Tabel F.4: Pakkingsprofiel CEM dLLS – SF 940D wLLS+SP.....	157
Tabel F.5: Pakkingsprofiel CEM dLLS – SF 940D DLS+SP.....	158
Tabel F.6: Pakkingsprofiel CEM wLLS – SF 940U wLLS+SP.....	159
Tabel F.7: Pakkingsprofiel CEM wLLS – SF 940U DLS+SP.....	160
Tabel F.8: Pakkingsprofiel CEM dLLS – SF 940U wLLS+SP.....	161
Tabel F.9: Pakkingsprofiel CEM dLLS – SF 940U DLS+SP.....	162
Tabel F.10: Pakkingsprofiel CEM wLLS – SF 9MWE wLLS+SP.....	163
Tabel F.11: Pakkingsprofiel CEM wLLS – SF MWE DLS+SP.....	164
Tabel F.12: Pakkingsprofiel CEM dLLS – SF MWE wLLS+SP.....	165
Tabel F.13: Pakkingsprofiel CEM dLLS – SF MWE DLS+SP.....	166
Tabel F.14: Pakkingsprofiel CEM wLLS – M800(p) wLLS.....	167
Tabel F.15: Pakkingsprofiel CEM dLLS – M800(p) wLLS.....	168
Tabel F.16: Pakkingsprofiel CEM wLLS – M800(o) wLLS.....	169
Tabel F.17: Pakkingsprofiel CEM dLLS – M800(o) wLLS.....	170
Tabel F.18: Pakkingsprofiel CEM wLLS – vliegas wLLS.....	171
Tabel F.19: Pakkingsprofiel CEM dLLS – vliegas wLLS.....	172
Tabel G.1: Slump flow combinatie CEM – SF.....	173
Tabel G.2: Slump flow combinatie CEM – M800.....	174
Tabel G.3: Slump flow combinatie CEM – vliegas.....	174