



Vakgroep
Bouwkundige Constructies
Laboratorium Magnel voor Betononderzoek
Voorzitter: Prof. Dr. Ir. L. TAERWE

De beperking van autogene krimp met behulp van interne nabehandeling
door
Bart CRAEYE

Promotor: Prof. Dr. Ir. G. DE SCHUTTER

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van burgerlijk
bouwkundig ingenieur

Academiejaar 2005-2006

Universiteit Gent
Faculteit Ingenieurswetenschappen

Vakgroep
Bouwkundige Constructies
Laboratorium Magnel voor Betononderzoek
Voorzitter: Prof. Dr. Ir. L. TAERWE

De beperking van autogene krimp met behulp van interne nabehandeling
door
Bart CRAEYE

Promotor: Prof. Dr. Ir. G. DE SCHUTTER

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van burgerlijk
bouwkundig ingenieur

Academiejaar 2005-2006

Deze pagina is niet beschikbaar omdat ze persoonsgegevens bevat.
Universiteitsbibliotheek Gent, 2021.

This page is not available because it contains personal information.
Ghent University, Library, 2021.

De beperking van autogene krimp met behulp van interne nabehandeling
door
Bart CRAEYE

Scriptie ingediend tot het bepalen van de academische graad van
Burgerlijk bouwkundig ingenieur

Academiejaar 2005-2006

Promotor: Prof. Dr. Ir. G. DE SCHUTTER
Faculteit Ingenieurswetenschappen
Universiteit Gent

Vakgroep Bouwkundige Constructies
Laboratorium Magnel voor Betononderzoek
Voorzitter: Prof. Dr. Ir. L. TAERWE

Samenvatting

Dit afstudeerwerk is onderverdeeld in verschillende hoofdstukken, die opbouwend en elk van belang zijn wil men tot een goede conclusie komen.

In een eerste deel, de *Autogene krimp: theoretische achtergrond*, wordt de theorie die relevant is voor een goede verstaanbaarheid van het onderzoek uit de doeken gedaan.

De titel van het volgende hoofdstuk, namelijk *Meetmethoden ter bepaling van de autogene krimp*, zegt voldoende. Hierin wordt in het kort aangegeven aan welke proefvoorwaarden de autogene krimpmeting moet voldoen, wat de verschillende meetmethoden zijn, welke lineaire verticale meetmethode wij zullen hanteren en welke problemen er kunnen optreden bij de bepaling van de autogene krimp.

In deel 4, *Interne curing: verschillende methoden*, wordt aangegeven welke de voor- en nadelen van een hoge-prestatie-beton zijn (BHP). Een van deze nadelen is een grotere autogene krimp. Aangezien dit afstudeerwerk handelt over de beperking van autogene krimp met behulp van interne nabehandeling zullen we logischerwijs werken met betonsoorten die een grotere autogene krimp geven. Bijgevolg zal de invloed van de interne nabehandeling gemakkelijker duidelijk worden. Deze interne nabehandeling staat beter gekend als 'internal curing', waaromtrent dus ook het een en het ander zal worden uitgelegd. Bovendien staan we stil bij de verschillende mogelijkheden om tot een beperking van de autogene krimp te komen.

Als referentiebeton zullen we een hoge-prestatie-beton (BHP) hanteren. We staan stil bij de verschillende bestanddelen en de mengprocedure van dit beton. Wat de samenstelling van dit beton is, welke de consistentie is, hoeveel de druksterkte

bedraagt op 28 dagen en hoe we deze bepalen, hoeveel autogene krimp er na 6 dagen is opgetreden en dergelijke meer kan men terugvinden in het zesde deel, *Experimentele resultaten van het BHP*. Vanaf hier begint het experimentele gedeelte van dit afstudeerwerk.

Het volgende onderdeel, namelijk *Experimentele resultaten van het lichte granulaten beton LGB*, handelt over een eerste vorm van autogene krimpbeperking. Hiervoor maken we gebruik van verzadigde lichte granulaten, type Argex.

Vervolgens bespreken we hoe het gebruik van superabsorberende polymeren eveneens kan leiden tot de reductie van autogene krimp. Dit wordt in het 7^{de} deel *Experimentele resultaten van het SAP-beton* uitvoerig uitgewerkt.

Ter afsluiting van het proefondervindelijke gedeelte van dit eindwerk bekijken we of het mogelijk is om aan de hand van verzadigde gerecycleerde granulaten tot een vermindering van autogene krimp te komen. Dit wordt uitgelegd in *Experimentele resultaten van het gerecycleerde granulaten beton RGB*.

Uiteindelijk ronden we dit afstudeerwerk af met een uitvoerige conclusie betreffende de experimentele resultaten, om zo te komen tot de meest optimale methode van interne nabehandeling.

Trefwoorden: autogene krimp, hoge-prestatie-beton (BHP), lichte granulaten, superabsorberende polymeren, gerecycleerde granulaten.

Tabel met afkortingen en symbolen

α	de hydratatiegraad	[-]
$\alpha_{\max}$	de maximale hydratatiegraad	[-]
α_{th}	de thermische uitzettingscoëfficiënt van beton	[$\mu\text{m}/\text{m}$]
α_0	de percolatiedrempel	[-]
BHP	het hoge-prestatie-beton	
BUHP	het ultra-hoge-prestatie-beton	
C	de cementshoeveelheid	[kg/m^3]
CS	de chemische krimp	[$\text{kg water}/\text{kg gehydrateerd cement}$]
C_3S	tricalcium silicaat	
ϵ_{aut}	de autogene krimp van het beton	[$\mu\text{m}/\text{m}$]
ϵ_{therm}	de thermische krimp van het beton	[$\mu\text{m}/\text{m}$]
ϵ_{tot}	de totale krimp van het beton	[$\mu\text{m}/\text{m}$]
ϕ	de waterabsorptiegraad	[$\text{kg water}/\text{kg droog granulaat}$]
$f_{\text{cem},28}$	de karakteristieke druksterkte na 28 dagen	[MPa]
G/C	granulaten/cement	[-]
η	een efficiëntiefactor	[-]
k	een equivalentiefactor	[-]
L	lengte van het proefstuk op het ogenblik van de meting	[m]
L_0	initiële lengte (dit is de eerst gemeten lengte)	[m]
LGB	het lichte granulatenbeton	
LVDT	Linear Variable Differentia Transformer	
p	de initiële porositeit	[-]
P	de hoeveelheid puzzolane stoffen	[kg/m^3]
PTFE	teflon	
ρ_{werk}	de werkelijke volumemassa	[kg/m^3]
REF	het referentiebeton	
RGB	het gerecycleerde granulatenbeton	
S	de verzadigingsgraad	[-]
SAP	superabsorberende polymeren	
SAP-beton	het beton met toegevoegde superabsorberende polymeren	
$S_{1,2,3,4}$	de consistentieklassen van het verse beton	
t_0	“time-zero”	[h]
$V_{\text{che kri}}$	chemische krimp ontwikkeld bij maximale hydratatiegraad	[-]
V_{gelwater}	relatief volume ingenomen door het gelwater	[-]
$V_{\text{gel solid}}$	relatief volume ingenomen door de vaste cementgel	[-]
$V_{\text{onhydr cement}}$	relatief volume ingenomen door ongehydrateerd cement	[-]
V_{inw}	relatief volume van het toegevoegd nabehandelingwater	[-]
VGL-beton	het vergelijkingsbeton	
W	de waterhoeveelheid	[kg/m^3]
W_{aanmaak}	de hoeveelheid aanmaakwater	[kg/m^3]
W_{cur}	de benodigde nabehandelingwaterhoeveelheid	[kg/m^3]
W_{extra}	de hoeveelheid nabehandelingwater	[kg/m^3]
W/C	water/cement	[-]

Internally cured concretes

Bart Craeye

Supervisor: Geert De Schutter

Abstract: This article explains the possibilities to reduce the autogenous shrinkage of a “high strength concrete” (HSC). This is well known as the internal curing of concrete.

Keywords: autogenous shrinkage, high strength concrete, lightweight aggregates, super absorbing polymers, recycled aggregates.

I. INTRODUCTION

Today autogenous shrinkage is a ‘hot topic’ with active research taking place in many countries and yearly conferences devoted almost exclusively to the subject [1].

Autogenous shrinkage introduces stresses which generate deformation in concrete structures at early ages. When free deformation of concrete is prevented, shrinkage microcracking will be created due to internal restraints in high strength concretes with low w/b-factors. High strength concretes are more sensitive to cracking in the time before and during setting than normal concretes are.

Therefore, it's necessary to predict and understand the mechanics behind autogenous deformation and define the ways to reduce the created shrinkage.

II. AUTOGENOUS SHRINKAGE AND INTERNAL CURING

A. Autogenous shrinkage: Definition

Autogenous shrinkage is nothing else than a reduction of volume due to the hydration of the cement paste. Any other causes such as desiccation, temperature changes or external loading influence this phenomenon [2].

Autogenous shrinkage is due to the chemical shrinkage of a concrete, which is an absolute volume reduction associated with the hydration reactions in cementitious material [3].

B. Internal curing: Definition

By curing concrete internally, components are introduced into the concrete mixture. These components serve as a curing agent, perform as a waterreservoir and gradually release water. The components used in this experimental research are: presaturated lightweight aggregates, presaturated recycled aggregates and superabsorbent polymers. The goal of this research is to optimize the amount of curing components and to maximize the autogenous shrinkage reduction. The beneficial effects of the shrinkage reduction is counteracted by the reduction of the strength of the concrete.

III. MEASURING TECHNIQUES FOR INTERNAL WATER CURING

A linear measurement is performed by placing the fresh concrete mix in a rigid mould with low friction. Therefore, teflon is used as the plastic with the lowest friction. The length change of the concrete paste is recorded by a displacement transducer at the end of the specimen. The apparatus is placed on a moving table in order to tremble the concrete.

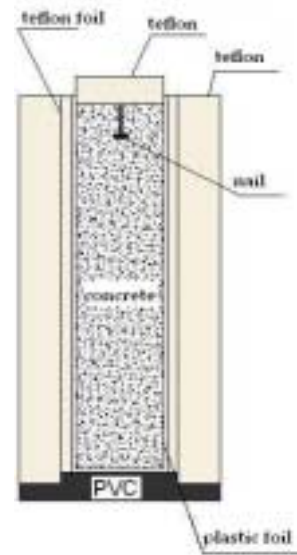


Figure 1 Apparatus for measurements of linear autogenous deformation

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

A. The total amount of water needed

The theoretical amount of internal curing water needed to offset self-desiccation can be calculated with Powers' model [4]. According to these calculations this amount may be up to roughly 30-50 g/m³, depending on the cement content:

$$\left(\frac{w}{c}\right)_{ic} = 0,18 \left(\frac{w}{c}\right) \quad \text{for } \frac{w}{c} \leq 0,36 \quad (1)$$

w = water content [kg/m³]

c = cement content [kg/m³]

B. The curing components

There are 3 types of curing components that are used in the executed experiments:

- *Lightweight aggregates, type Argex*
aggregate size: 0-2 mm (0/2) & 0-4 mm (0/4)
particle density: 940 kg/m³(0/2) & 1155 kg/m³(0/4)
absorbtion (24 h): 0,5 g/g (0/2) & 0,25 g/g (0/4)
- *Superabsorbent polymers, Norsocryl® D-60*
particle size: 100-800 µm
particle density: 750 kg/m³
absorbtion (300 s): 130 g/g
- *Recycled aggregates, type Steennex*
aggregate size: 0-1/2 mm (fine)& 1/2-1 mm (coarse)
particle density: 1250 kg/m³(f) & 1429 kg/m³(c)
absorbtion (24 h): 0,4 g/g (f) & 0,3 g/g (c)

C. Autogenous shrinkage and compressive strength of the internally cured concretes

After testing the concrete mixtures with different amounts of curing water and thus different amounts of curing components, we find positive effects on the reduction of the autogenous shrinkage. Unfortunately, we must hand in at compressive strength.

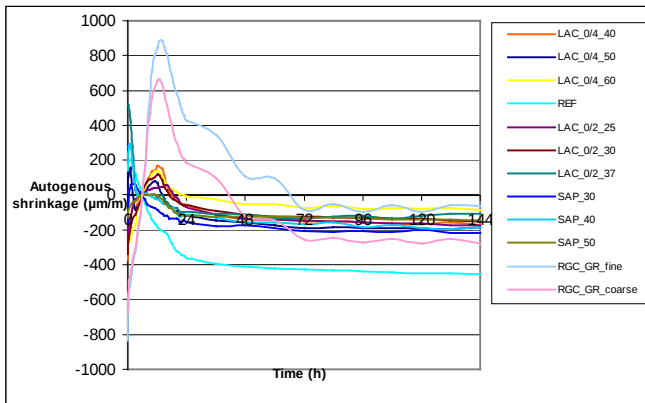


Figure 2 The autogenous shrinkage of the internally cured concretes convention: shrinkage is negative, expansion is positive

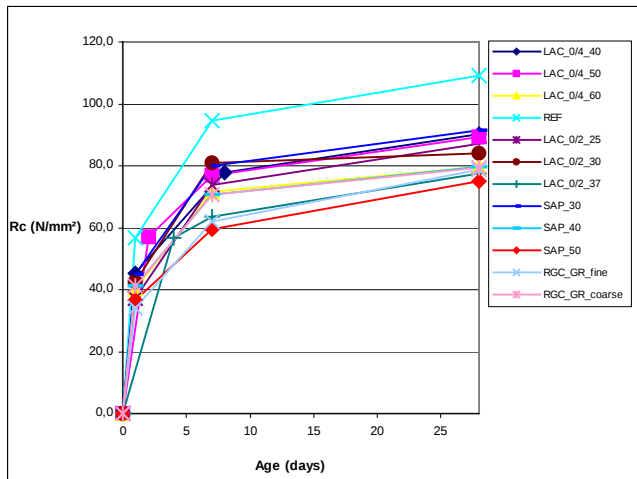


Figure 3 The compressive strength of the internally cured concretes

When we compare the autogenous shrinkage of our reference concrete (REF), which has a value of $-450 \mu\text{m/m}$ after 144 h with the internally cured concretes, we observe that, by using internal curing components, there is a reduction of autogenous shrinkage as well as a reduction of compressive strength.

In order of appearance RGC_GR_fine, LAC_0/4_60, LAC_0/2_37 and SAP_50 result in the least autogenous shrinkage. The amount of added curing water and curing components can be found in Table 1¹ while the realised shrinkage reduction and the loss of compressive strength after 28 days can be found in Table 2.

Table 1 The amount of added curing water, shrinkage reduction, compressive strength

	Curing component [kg/m ³]	Curing water [kg/m ³]
RGC_GR_fine	167	57
LAC_0/4_60	160	40
LAC_0/2_37	80	49
SAP_50	0,385	50

Table 2 Shrinkage reduction & loss in compressive strength

	Shrinkage reduction	Strength loss
RGC_GR_fine	84%	28%
LAC_0/4_60	81%	27%
LAC_0/2_37	77%	29%
SAP_50	68%	31%

For example, by adding an amount of 167 kg saturated recycled aggregates to a concrete mixture of 1 m³, 57 kg curing water is introduced into the fresh mix. After 144 h the autogenous shrinkage is reduced to a value of $-72 \mu\text{m/m}$, a reduction of 84% when compared with the reference concrete REF. On the other hand, the compressive strength (after 28 days) is less than the compressive strength of REF: 109 MPa $\rightarrow$ 79 MPa, a strength loss of 28%.

REFERENCES

- [1] T.A. Hammer, O. Bjontegaard, E. Sellevold, *Measurement methods for testing of early age autogenous strain*, Proceeding of the International RILEM Conference PRO 23, 2002, p. 217, p. 218-219, p.224-226.
- [2] H. Mitani, J.-P. Bourmazel, N. Rafai, *Autogenous shrinkag of different types of cement and different types of admixtures at early ages*, Proceeding of the International RILEM Conference PRO 23, 2002, p.115.
- [3] J. Lura, *Autogenous deformation and internal curing of concrete*, Technical University of Delft, 2003.
- [4] T.C. Powers, T.L. Brownyard, "Studies of the physical properties of hardened portland cement paste", Res. Lab. Portland Cem. Assoc., Bull 22, 1948.

¹ LAC: Lightweight Aggregate Concrete, RGC: Recycled Granulate Concrete, SAP: Superabsorbent Plymers Concrete

Inhoudstafel

Hoofdstuk 1 - Inleiding	4
Hoofdstuk 2 – Autogene krimp: theoretische achtergrond.....	6
2.1. <i>De verschillende soorten krimp</i>	6
2.1.1. Plastische krimp	7
2.1.2. Thermische krimp	7
2.1.3. Carbonatiekrimp	7
2.1.4. Uitdrogingskrimp	7
2.1.5. Autogene krimp	8
2.2. <i>Basisbegrippen</i>	11
2.2.1. Bleeding	11
2.2.2. De Water/Cement –factor	11
2.2.3. De consistentie van het vers beton	12
2.2.4. De wateropsorping	12
2.2.5. De hydratatiegraad	13
2.2.6. t_0 en α_0	14
2.2.6.1. Algemeen	14
2.2.6.2. Inschatting "time-zero"	14
2.2.7. De interne relatieve vochtigheid	17
2.2.8. De porositeit.....	18
2.3. <i>Samenvattend: de autogene krimp en de hydratatie onder afgezonderde omstandigheden</i>	19
Hoofdstuk 3 – Meetmethoden ter bepaling van de autogene krimp	20
3.1. <i>De proefvoorwaarden</i>	20
3.2. <i>De lineaire metingen versus de volumemetingen</i>	20
3.3. <i>De verschillende soorten meetsystemen</i>	22
3.4. <i>De verticale lineaire meting</i>	24
3.4.1. Geschiedenis	24
3.4.2. Proefopstelling: teflonbuis.....	24
3.5. <i>Het meetprincipe</i>	26
3.6. <i>De problemen die kunnen optreden bij autogene krimpmetingen [1]</i>	26
Hoofdstuk 4 – Interne curing: verschillende methoden	29
4.1. <i>Inleiding.....</i>	29
4.2. <i>Het hoge-prestatie-beton.....</i>	29
4.3. <i>Externe curing</i>	31
4.4. <i>Interne curing</i>	31
4.4.1. Het principe.....	31
4.4.2. Secundaire gevolgen van de interne water curing [30].....	32
4.4.3. Theoretische bepaling van de hoeveelheid toegevoegd water	33
4.4.3.1. Theoretische bepaling van de nodige waterhoeveelheid.....	33
4.4.3.2. Model van Powers.....	34
4.4.4. Met behulp van verzadigde lichte granulaten	37
4.4.4.1. Algemene geschiedenis.....	37
4.4.4.2. Voorafgaande autogene krimpmetingen.....	38
4.4.5. Met behulp van superabsorberende polymeren	42
4.4.5.1. Algemene geschiedenis.....	42
4.4.5.2. Voorafgaande autogene krimpmetingen.....	44
4.4.6. Met behulp van verzadigde gerecycleerde granulaten	46
4.5. <i>Conclusie</i>	47
Hoofdstuk 5 – Experimentele resultaten van het BHP	48
5.1. <i>De gekozen BHP samenstelling</i>	48
5.2. <i>Bespreking van de gekozen bestanddelen</i>	49
5.2.1. Porfier	49
5.2.2. Zand	49
5.2.3. Cement	49
5.2.4. Silicafume Rheomac SF 140.....	50

5.2.5.	Superplastificeerder Glenium 51	51
5.2.6.	Aanmaakwater	52
5.3.	Mengprocedure, proefmetingen en vervaardiging van proefstukken.....	52
5.3.1.	Stap 1: Aanmaken van het mengsel.....	52
5.3.2.	Stap 2: Bepalen van de consistentie	53
5.3.3.	Stap 3: Vullen van de autogene krimpmeetbuisjes	54
5.3.3.1.	De autogene krimpmetingen.....	54
5.3.3.2.	Meting van de temperatuur	54
5.3.4.	Stap 4: Bepalen van het volumegewicht en het luchtgehalte.....	55
5.3.4.1.	Volumegewicht.....	55
5.3.4.2.	Luchtgehalte.....	56
5.3.5.	Stap 5: Proefstukken voor de druksterkteproeven.....	56
5.4.	Bekomen resultaten op het referentiebeton	57
5.4.1.	Het verse beton: zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte	57
5.4.2.	Autogene krimpmetingen	58
5.4.2.1.	Analyse van de meetgegevens.....	58
5.4.2.2.	Autogene krimp van de referentie-betonsamenstelling	60
5.4.3.	Drukresultaten	62
5.5.	Besluit : Het referentiebeton	63
Hoofdstuk 6 – Experimentele resultaten van het lichte granulaten beton LGB		64
6.1.	Inleiding en principe	64
6.2.	Keuze van de lichte granulaten	65
6.2.1.	AG 0/2 –580 G-crushed	66
6.2.2.	AR 0/4 –650 R-Round	66
6.2.3.	Hoeveelheid toegevoegde Argex-korrels	66
6.3.	Eerst type Argex : AG 0/2-580 G voor interne curing.....	67
6.3.1.	Vervanging van de normale granulaten door de Argex-korrels	67
6.3.2.	Samenstelling van LGB_0/2	69
6.3.3.	Bekomen resultaten op LGB_0/2	70
6.3.3.1.	Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte	70
6.3.3.2.	De autogene krimp van LGB_0/2.....	72
6.3.3.3.	Drukresultaten.....	74
6.3.4.	Conclusie: AG 0/2-580G.....	76
6.4.	Tweede type Argex : AR 0/4-650 R voor interne curing	78
6.4.1.	Vervanging van de normale granulaten door de Argex-korrels	78
6.4.2.	Samenstelling van LGB_0/4	79
6.4.3.	Bekomen resultaten op LGB_0/4	80
6.4.3.1.	Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte	80
6.4.3.2.	De autogene krimp van LGB_0/2.....	81
6.4.3.3.	Drukresultaten.....	84
6.4.4.	Conclusie AG 0/2-580G	85
6.5.	Conclusie betreffende het LGB.....	86
Hoofdstuk 7 – Experimentele resultaten van het SAP-beton.....		89
7.1.	Inleiding en principe	89
7.2.	Keuze van de superabsorberende polymeren	89
7.3.	Norsocryl® D-60 voor interne curing	90
7.3.1.	Vervanging van de normale granulaten door de SAP-korrels	90
7.3.2.	De samenstelling van SAP_30, SAP_40 en SAP_50	92
7.3.3.	Bekomen resultaten op het referentiebeton.....	93
7.3.3.1.	Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte	93
7.3.3.2.	De autogene krimp van SAP.....	94
7.3.3.3.	Drukresultaten.....	97
7.4.	Conclusie betreffende het SAP	98
Hoofdstuk 8 – Experimentele resultaten van het gerecycleerde granulaten beton RGB		100
8.1.	Inleiding en principe	100
8.2.	Keuze van de gerecycleerde granulaten	100
8.2.1.	Algemeen	100

8.2.2.	Bepaling van het absorberend vermogen	101
8.2.3.	Bepaling van de werkelijke volumemassa.....	102
8.2.4.	Algemene eigenschappen van de gerecycleerde granulaten.....	103
8.3.	<i>Steennet metselgranulaten voor interne curing</i>	104
8.3.1.	Vervanging van de zandkorrels door de Steennet metselgranulaten.....	104
8.3.2.	Samenstelling van RGB_RO	105
8.3.3.	Bekomen resultaten op RGB_RO	106
8.3.3.1.	Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte	106
8.3.3.2.	De autogene krimp van LGB_0/2.....	107
8.3.3.3.	Drukresultaten.....	108
8.3.4.	Conclusie: Steennet metselgranulaat	109
8.4.	<i>Steenex menggranulaat voor interne curing</i>	110
8.4.1.	Vervanging van de zandkorrels door de Steenex menggranulaten.....	110
8.4.2.	Samenstelling van RGB_GR	111
8.4.3.	Bekomen resultaten op RGB_GR	112
8.4.3.1.	Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte	112
8.4.3.2.	De autogene krimp van RGB_GR.....	113
8.4.3.3.	Drukresultaten (nog schrijven).....	114
8.4.4.	Conclusie: Steenex menggranulaat	114
8.5.	Conclusie betreffende het RGB	115
	Hoofdstuk 9 – Interne nabehandeling: besluitvorming.....	118
	Bronnen en referenties	122

Hoofdstuk 1 - Inleiding

“Today autogenous shrinkage is a ‘hot topic’ with active research taking place in many countries and yearly conferences devoted almost exclusively to the subject [1]”.

De laatste tientallen jaren werden meer en meer hoog-performante betonsamenstellingen gemaakt aangezien zij over superieure mechanische eigenschappen beschikken en zij een excellente duurzaamheid kunnen garanderen. Jammer genoeg ondergaan deze lage W/C –systemen tijdens de eerste uren van de hydratatie van het cement een significante autogene vervorming. In sommige gevallen leiden deze vervormingen tot vroegtijdige scheurvorming van het materiaal. Bijgevolg is het van groot belang het ‘early-age’ vervormingsgedrag van het beton te begrijpen, te bepalen en vooral te reduceren.

Autogene krimp van beton is niets anders dan een volumevermindering waarvan de hydratatie van de cementpasta de oorzaak is. Bovendien werken de uitdroging van het beton, de temperatuursveranderingen in het beton en de invloed van externe krachten, zoals de zwaartekracht, de autogene krimp verder in de hand. Wanneer de autogene krimp van het beton verhinderd wordt, kan er op jonge leeftijd scheurvorming ontstaan aangezien de sterkte van het beton nog onvoldoende is om te weerstaan aan spanningen veroorzaakt door externe of interne beperkingen.

Op jonge leeftijd vertoont beton doorgaans een te zwakke mechanische sterkte om te kunnen weerstaan aan de spanningen die worden teweeggebracht door de autogene krimp. Een vroegtijdige scheurvorming, die de duurzaamheid van bijvoorbeeld een betonnen bouwwerk ernstig in het gedrang kan brengen, kan dan tot ontwikkeling komen. Bijgevolg is het interessant om te weten hoe deze autogene krimp in elkaar zit, en vooral hoe we deze autogene krimp kunnen beperken.

In het geval de vrije krimp van een constructie-element belemmerd wordt, kunnen krimpscheuren optreden. Deze scheuren trachten we, met behulp van interne nabehandeling, te minimaliseren.

Tegenwoordig wordt meer en meer gebruik gemaakt van speciaal beton, waarvan zelfverdichtend beton en hoge-prestatie-beton twee typische voorbeelden zijn. Deze betonsoorten hebben enerzijds een hogere mechanische weerstand of betere fysico-chemische eigenschappen dan traditioneel beton. Anderzijds worden ze gekenmerkt door een hogere scheurgevoeligheid op jonge leeftijd waarbij de lagere W/C –factor en de hogere hoeveelheid aan fijne deeltjes aan de basis liggen.

Het doel van dit onderzoek bestaat erin de hoeveelheid toegevoegde materialen, die dienen om de krimp van het hoge-prestatie-beton te reduceren, door middel van het vormen van een inwendig waterreservoir, te optimaliseren. Bovendien mogen de sterkte-eigenschappen van dit gemanipuleerd beton niet te veel afnemen. We moeten als het ware een compromis zoeken tussen 2 tegenstrijdigheden, namelijk het beperken van de autogene krimp en het behouden van de sterkte-eigenschappen.

De materialen waarvan we de invloed op de krimp van het beton willen bestuderen, zijn:

- Lichte granulaten
- Superabsorberende polymeren (SAP)
- Gerecycleerde granulaten

Uiteindelijk willen we komen tot een optimale dosering van deze toegevoegde materialen op zo'n manier dat de autogene krimp maximaal gereduceerd wordt en de druksterktevermindering geminimaliseerd wordt.

Hoofdstuk 2 – Autogene krimp: theoretische achtergrond

2.1. De verschillende soorten krimp

Onder krimp verstaat men de volumevermindering van beton die veroorzaakt wordt door een verlies van water of door vochttafvoer. Dit verlies doet zich voornamelijk voor door verdamping en in mindere mate door de hydratatiereactie en de carbonatatiereactie.

Het krimpverschijnsel is in de praktijk van een niet te onderschatten belang, omdat het leidt tot:

- Intrinsieke spanningen in de doorsnede die scheuren in het oppervlak kunnen teweeg brengen;
- Verkorting van de bouwelementen, die gedwongen krachtswerkingen en vaak brede scheuren kunnen veroorzaken;
- Bijkomende vervormingen van de doorsnede die wring -en torsieverschijnselen veroorzaken;
- Verlies van voorspankracht;
- ...

Krimp van een cementpasta is een relatief complex proces. Bovendien kan de krimp onderverdeeld worden in 5 soorten [2]. Deze verschillende soorten krimp hebben een cumulatief karakter, maar zijn toch elk verschillend qua natuur. Laten we deze verschillende soorten even in het kort bespreken:

- De **plastische krimp**, dat optreedt wanneer water verdampt uit de nog plastische betonspecie. Hierdoor kan reeds enkele uren na het storten plastische scheurvorming ontstaan;
- De **chemische krimp**, te wijten aan het feit dat het gehydrateerde cement een kleiner volume inneemt dan de som van de water –en cementvolumes die afzonderlijk aan de betonmengelingen worden toegevoegd. Een gevolg hiervan is zelfdroging waardoor **autogene krimp** ontstaat. Het is deze krimpvorm die onze aandacht verdient;
- De **uitdrogingskrimp**;
- De **thermische krimp**, te wijten aan de temperatuurdaling van het beton;
- De **carbonatiekrimp**, die het gevolg is van de reactie van het beton met het kooldioxide van natuurlijke oorsprong;

Algemeen kunnen we volgende regels vernoemen

“Hoe groter de W/C –factor, hoe groter de krimp.”

“Hoe groter de hoeveelheid cement, bij een gegeven W/C –factor, hoe groter de krimp.”

In het kader van dit afstudeerwerk is het vooral de autogene krimp die ons interesseert. Specifiek betreffende de autogene krimp geldt dat deze toeneemt naarmate de W/C –factor afneemt.

2.1.1. Plastische krimp

Wanneer vers beton voldoende verdicht is, vormt zich een dun waterlaagje aan het oppervlak. Een bijkomende hoeveelheid water wordt bekomen door bleeding. Indien niet de nodige maatregelen genomen worden zal het water aan het oppervlak verdampen onder invloed van de weersomstandigheden.

Als op een bepaald moment alle water verdampt is, vormen zich in het resterende aanmaakwater meniscussen, waardoor een capillaire onderdruk ontstaat. Hierdoor worden de fijnere deeltjes in de betonmengeling, zijnde de cementdeeltjes en de silicafume-deeltjes, aangetrokken. Door deze verplaatsing ontstaan capillaire plastische krimscheuren.

2.1.2. Thermische krimp

Het ontstaan van thermische spanningen in betonelementen is hoofdzakelijk te wijten aan het exotherm karakter van de hydratatiereactie. Bij het begin van de binding stijgt de temperatuur en zet het beton uit. Op het einde van de binding daalt de temperatuur geleidelijk dankzij de verspreiding van de warmte doorheen de bekisting. De thermische krimp ontstaat door de contractie die deze afkoeling vergezelt.

2.1.3. Carbonatiekrimp

De zones nabij het betonoppervlak ondergaan na enkele jaren een carbonatie, waardoor nog een bijkomende krimp ontstaat. Reden: in de gecarbonateerde betonstructuur ontstaan nieuwe producten met een klein volume ten overstaan van het niet-gecarbonateerd beton.

Dit kan leiden tot de verdere ontwikkeling van reeds bestaande krimscheuren of tot de vorming van nieuwe scheuren. Vooral in streken waar een hoog kooldioxidegehalte aanwezig is in de atmosfeer, is deze vorm van krimp niet te veronachtzamen.

2.1.4. Uitdrogingskrimp

Tengevolge van het verschil in relatieve vochtigheid zal het vrije capillair water verdwijnen uit het beton naar de omgeving. Dit veroorzaakt een kleine volumevermindering. Dit gaat door tot op een moment dat de capillairen leeg zijn. Vanaf dat ogenblik ontstaan in het inwendige van de cementsteen eveneens verschillen in relatieve vochtigheid. Hierdoor zal het water dat fysisch verbonden is aan de C-S-H structuur (gelwater) eveneens langzaam uitgedreven worden, waardoor een macroscopische volumevermindering optreedt : uitdrogingskrimp. Aangezien de vaste hydratatieproducten tengevolge van deze uitdrogingskrimp dichter bij elkaar komen te liggen en zo bijkomende chemische reacties ontstaan, zal de uitdrogingskrimp een licht irreversibel karakter vertonen.

De uitdrogingskrimp (en de plastische krimp) van het beton stijgt:

- Wanneer de relatieve luchtvochtigheid daalt en de temperatuur stijgt;
- Met de verhoging van de W/C –factor en bijgevolg ook de porositeit;
- Naarmate het element bij het begin van de droging jong is;
- Naarmate de verhouding oppervlakte/volume van de component hoog is;
- Naarmate de granulometrie van het cement fijn is;

2.1.5. Autogene krimp

Wanneer vochtuitwisseling met de omgeving verhinderd wordt en indien de vervorming onder isotherme omstandigheden gebeurt, dan zal een verhardend betonlichaam toch nog krimpen, ondanks het feit dat er geen uitdrogingskrimp ontstaat. Deze krimp, veroorzaakt door de vorming van hydratatieproducten, noemt men autogene krimp. Bij betonsamenstellingen met een lage W/C –factor ($< 0,45$) en met hoog cementgehalte, dus met hoge sterkte, kan deze autogene krimp grote waarden aannemen. De autogene krimp, ook wel basiskrimp genaamd, is onafhankelijk van de afmetingen van het betonlichaam, en verloopt lineair in functie van de hydratatiegraad. De basiskrimp treedt steeds op, ook indien de vochtuitwisseling met de omgeving niet verhinderd wordt. In dat geval moet men eveneens rekening houden met uitdrogingskrimp.

Laten we deze krimpvorm iets meer in detail bekijken:

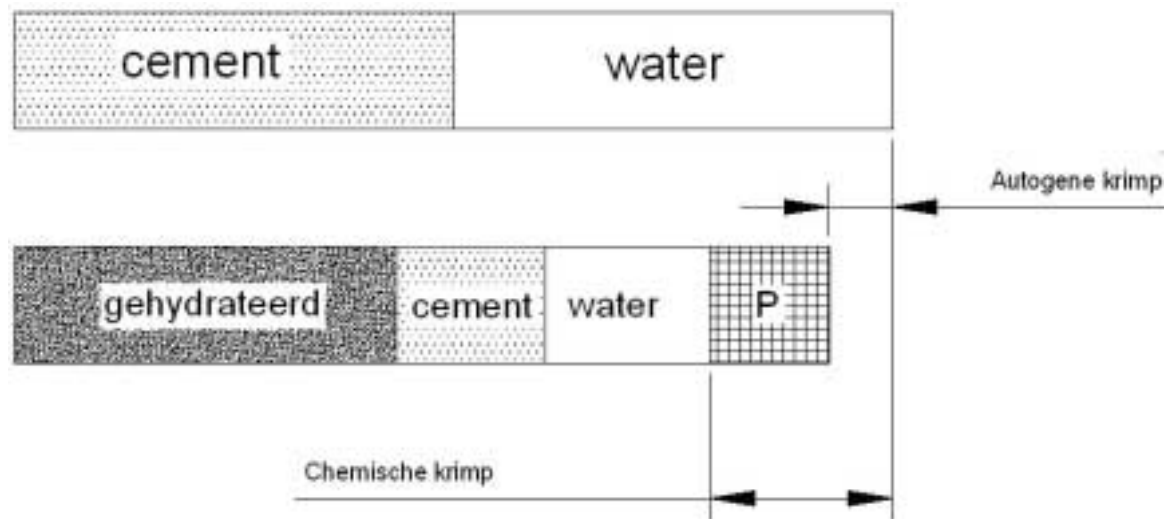
De volumetrische balans van de hydratatiereactie vertaalt zich door een vermindering van het absolute volume: het absolute volume van de gevormde hydraten is kleiner dan de som van de initiële absolute volumes van het watervrije cement en van het water. Dit verschijnsel staat gekend als chemische krimp. Deze chemische krimp is de drijfveer achter de autogene krimp. Gedurende de vloeibare fase van het beton is de autogene krimp equivalent aan de chemische krimp.

Vanaf een bepaalde hydratatiegraad, dus indien de specie een voldoende stijfheid heeft bereikt, wordt de daling van het absolute volume onverenigbaar met de vervormingen die mechanisch toelaatbaar zijn door het ontstane minerale skelet. Er zal met andere woorden een gasvolume verschijnen in de ontstane poriën. Dit verschijnsel staat gekend als zelfdroging.

De zelfdroging vertaalt zich fysisch door een daling van de interne relatieve vochtigheid van het materiaal en het ontstaan van een capillaire onderdruk in de poriën, en mechanisch door een globale krimp van het materiaal. Deze laatste krimp staat gekend als de autogene krimp van het beton.

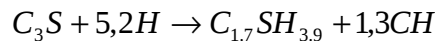
De chemische krimp is een interne volumevermindering, terwijl de autogene krimp extern is.

Ter verduidelijking lijkt het ons handig naar volgende kleine schets te verwijzen:



Figuur 2.1 – De relatie tussen de chemische krimp en de autogene krimp van een gehydrateerde cementspecie, P staat voor de tijdens de hydratatie gevormde holten [2]

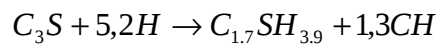
Als we nu een vereenvoudigde vergelijking van de hydratatie van het C_3S van het cement beschouwen, dan is het mogelijk om via de moleculaire massa's en de dichtheden aan te tonen dat het volume van het cement en het water groter is dan het volume gehydrateerd materiaal [14]:



	C_3S	H	$C_{1,7}SH_{3,9}$	CH
Moleculaire massa (g/mol)	228	18	225,4	74
Densiteit (g/cm ³)	3,15	1	2,01	2,24

Tabel 2.1 – De moleculaire massa en de densiteit van de verschillende producten

De berekeningen van de volumes gaan als volgt:



$$\frac{228}{3,15} + \frac{5,2 \cdot 18}{1} \rightarrow \frac{225,4}{2,01} + \frac{1,3 \cdot 74}{2,24} \quad \frac{g}{mol} \div \frac{g}{cm^3}$$

$$72,4 + 93,6 \rightarrow 112,1 + 42,9 \quad cm^3$$

$$166 \rightarrow 155 \quad cm^3$$

Volgende opmerking zijn niet te veronachtzamen:

- Het relatieve volume is dus met $\frac{166-155}{166} = 6,6\%$ afgenomen.
- De berekende volumeveranderingen hangen sterk af van de densiteit genomen voor CSH.

Aangezien dit afstudeerwerk volledig in het kader staat van de autogene krimp of beter gezegd de beperking ervan, geven we een kleine indicatie van parameters van een betonsamenstelling die de autogene krimp beïnvloeden [3]:

- **W/C –factor:** de autogene krimp is des te groter naarmate de W/C factor kleiner is;
- Hoe kleiner de W/C –factor hoe sneller de autogene krimp zich ontwikkelt;
- **Silicafume-gehalte:** hoe hoger het gehalte aan grijze silicafume, hoe groter de autogene krimp. De bijkomende autogene krimp gaat van start als de puzzolane reactie begint. Deze start wordt op ongeveer 70 h geschat;
- Het gebruik van **superplastificeerder** heeft tevens een invloed op de autogene krimp. Hoe hoger het gehalte aan superplastificeerder, hoe groter de autogene krimp;
- De aard van het **cement** heeft eveneens een invloed op de autogene krimp;
- Hoge prestatie beton (zie ook 4.2. *Het hoge-prestatie-beton*) **BHP** is veel gevoeliger aan deze vorm van krimp dan een traditioneel beton zeker naarmate de W/C –factor daalt.

Enkele maatregelen ter voorkoming van de autogene krimp en geen rekening houdende met gevraagde betonsterkte –of verwerkbaarheid zijn:

- Verlaag de chemische krimp door een cement te selecteren met een laag C₃A en een hoog C₂S gehalte, dat bovendien traag reageert;
- Verminder de chemische krimp door geen of zo weinig mogelijk gebruik te maken van superplastificeerders. Deze chemicaliën versnellen de reactie van het cement;
- Creëer een grofkorrelige poriënstructuur door zo weinig mogelijk silicafume te gebruiken en een zo hoog mogelijke W/C –factor, zodat de capillaire onderdruk op jonge leeftijd zo laag mogelijk gehouden wordt;
- Aanvaard enige bleeding aangezien zij de autogene krimp neutraliseren door een zwelling te veroorzaken.

2.2. Basisbegrippen

In onderhavige tekst worden de veel voorkomende en regelmatig terug kerende basisbegrippen behandeld die relevant zijn voor een verder verstaanbaar verloop van dit afstudeerwerk [4].

2.2.1. Bleeding

Bleeding of uitzweten is een zekere vorm van segregatie waarbij overtollig water opstijgt en zich aan het bovenvlak van het betonelement verzamelt. Zodra de massa tot rust komt begint de zwaartekracht zijn invloed uit te oefenen: de zwaardere delen (cementdeeltjes, granulaten) worden naar beneden getrokken, terwijl de lichtere deeltjes (het water) zullen opstijgen. Dit verschijnsel noemt men het klinken van beton. Bovendien kan dit uitzweetwater opnieuw geabsorbeerd worden door de cementpasta, wat eveneens een verklaring kan zijn voor de ontstane expansie [8].

Zowel de hoeveelheid aanmaakwater, de cementeigenschappen, als de aard en de hoeveelheid aan fijne deeltjes hebben een grote invloed op de neiging tot bleeding. Het gebruik van een fijner cement en bij lage W/C –factor mengsels vermindert de neiging tot uitzweten.

Bij het meten van de autogene krimp (zie 3.6. *De problemen die kunnen optreden bij autogene krimpmetingen*) kan dit verschijnsel een verklaring zijn voor het zwellen van het beton de eerste uren van de metingen.

2.2.2. De Water/Cement –factor

Hoe hoger de W/C –waarde, hoe groter de afstand tussen de cementkorrels dus hoe langer het duurt vooraleer een doorlopende structuur van hydratatieproducten gevormd wordt. Bovendien vertoont de verharde structuur ook een grotere porositeit bij toenemende W/C –factor.

Aangezien de puzzolane toevoeging van silica fume bijdraagt tot de sterkte van beton en deze laatste afhangt van de W/C –factor definiëren we een effectieve water/cementfactor, namelijk:

$$(W / C)_{eff} = \frac{W}{C + k.P}$$

met W de massa water, C de massa cement en P de massa puzzolane toevoeging. De equivalentiefactor k hangt onder andere af van de kwaliteit van het silicafume.

Wat betreft het onderwerp van deze thesis, namelijk de autogene krimp, kan men volgende regel in acht nemen: een lage W/C –factor maakt de cementpasta meer gevoelig aan inwendige uitdroging, wat leidt tot autogene krimp (zie 2.1. *Verschillende soorten krimp*).

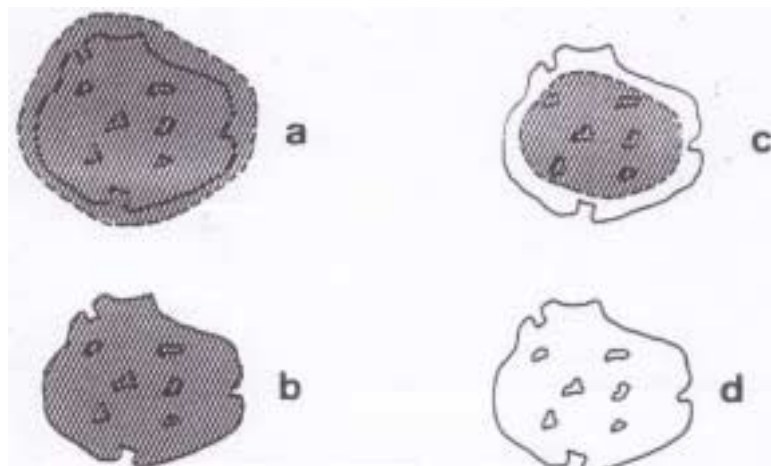
2.2.3. De consistentie van het vers beton

De consistentie karakteriseert de verwerkbaarheid van het verse beton. De twee extremen van dit begrip zijn enerzijds de droge consistentie en anderzijds de vloeibare consistentie. Volgende factoren beïnvloeden de consistentie van een beton:

- Het **watergehalte**: zowel het aanmaakwater als het water meegevoerd door de verzadigde lichte granulaten hebben een invloed op de verwerkbaarheid;
- De hoeveelheid **superplastificeerder**;
- Het gehalte aan **fijne materialen**: hoe groter het gehalte en de fijnheid van het cement, hoe meer water vereist is om een gegeven verwerkbaarheid te realiseren;
- Voor een gegeven W/C –factor neemt de verwerkbaarheid toe naarmate de G/C –factor afneemt.

2.2.4. De wateropsorping

Zij wordt gegeven door de verhouding van de massa opgeslorpt water bij volledige verzadiging tot de droge massa van het granulaat. Deze volledige verzadiging wordt bekomen door voldoende lange onderdompeling van het granulaat in water. In het kader van dit eindwerk zullen de volledig verzadigde lichte granulaten met een waterabsorberend doek behandeld worden om zo een verzadigde, quasi oppervlakte droge toestand te bekomen (zie Fig 2.2 – geval b). In deze vorm zullen de granulaten dan aan het betonmengsel toegevoegd worden.



Figuur 2.2 – De bevochtigingstoestanden van een granulaat

Omwille van hun cellulaire structuur slorpen lichte granulaten meer water op dan normale granulaten.

Aan de andere kant kunnen superabsorberende polymeren tot 500 keer hun gewicht in water absorberen. De werkelijk absorptiecoëfficiënten van de verschillende materialen die aan het beton zullen worden toegevoegd, worden in het verdere verloop van deze scriptie bepaald.

2.2.5. De hydratatiegraad

De hydratatiegraad, beter gekend als α , is gedefinieerd als de verhouding van de gereageerde cementshoeveelheid op de niet-gehydrateerde cementshoeveelheid. Oftewel:

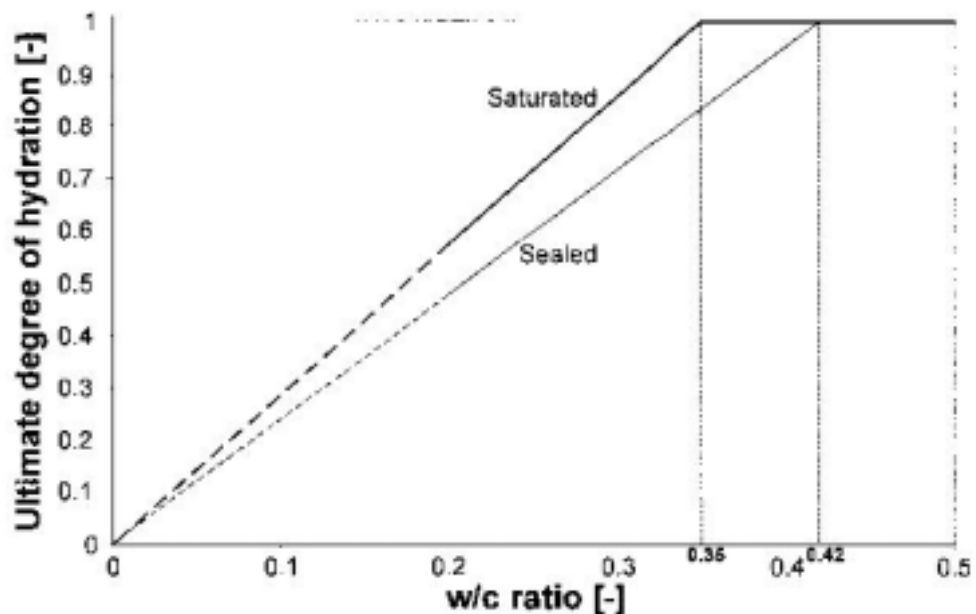
$$\alpha = \frac{\text{hoeveelheid gehydrateerd cement}}{\text{initiële cementshoeveelheid}}$$

De hydratatiegraad is gelegen tussen 0 en 1 en is in de praktijk zeer moeilijk vast te stellen.

De hydratatie van het cement gebeurt ogenblikkelijk, met andere woorden vanaf het moment dat het water in contact komt met het cement. Deze hydratatie gaat samen met de ontwikkeling van inwendige warmte en een chemische en fysische binding van het water. Zowel de hoeveelheid vrijgekomen warmte (zie ook Fig 3.6), als de hoeveelheid gebonden water ten opzichte van de maximale hoeveelheid van deze grootheden als al het cement gereageerd heeft, kunnen een indicatie zijn voor de hydratatiegraad van het cement.

Volgens Powers & Brownyard [5] bekomt men een volledige hydratatie als de W/C –factor 0,42 bedraagt. Bij een lagere W/C –factor zal de hydratatie stoppen ten gevolge van een tekort aan water in de capillairen en deze dus met hydratatieproducten gevuld zijn. Er zal dus een hoeveelheid niet gereageerd cement in de geharde cementpasta overblijven.

De onderstaande figuur toont de ultieme hydratatiegraad van cementpasta's. In geval van een lage W/C –factor is een maximale hydratatie slechts mogelijk in geval van een efficiënte interne curing (zie ook 4.4. *Interne curing*) en in volledig verzadigde omstandigheden.



Figuur 2.3 – De maximale hydratatiegraad volgens Powers' model [5] voor cementpasta's in verzadigde en afgesloten omstandigheden

2.2.6. t_0 en α_0

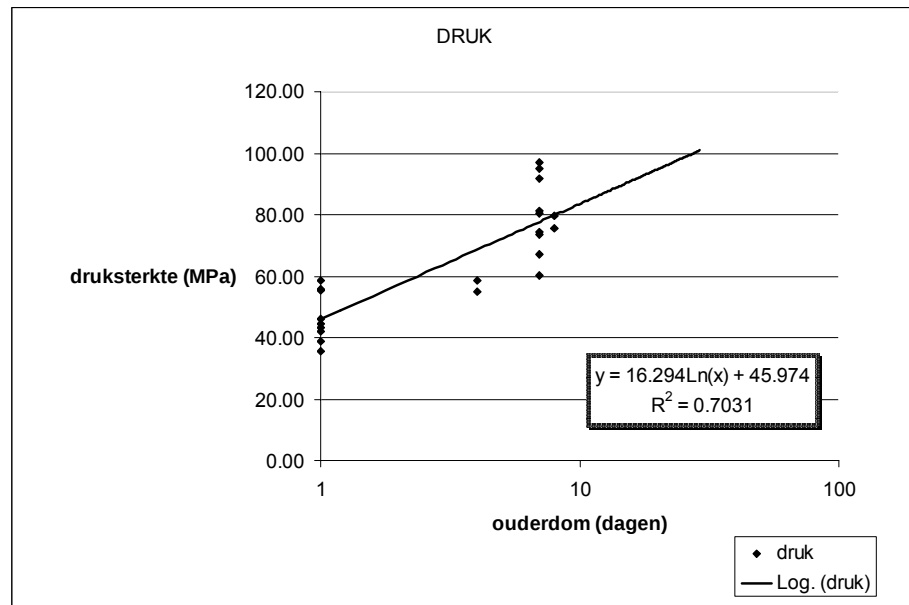
2.2.6.1. Algemeen

Krimpvervormingen in werkelijke betonconstructies zijn pas van belang (én nadelig) vanaf het moment dat er in het beton spanningen kunnen ontstaan. Dit is vanaf het moment dat het beton een bepaalde sterkte of stijfheid heeft. Dus wanneer, ten gevolge van de hydratatie, een vast zelfondersteunend skelet ontstaat. Zetting staat gekend als een proces waarbij de vloeibare cementpasta verandert in een visco-elastische vaste stof. Op een tijdsschaal wordt dit moment aangeduid met de notatie t_0 . Als we spreken over de hydratatiegraad, dan wordt dit moment aangeduid met behulp van α_0 , de percolatiedrempel. Uit literatuurstudie [6], gebaseerd op hydratatie –en sterkteproeven, halen we dat voor hoge-prestatie-beton (BHP) α_0 gelegen is tussen de 0,10 en de 0,20. Als we dit vertalen naar een tijdsschaal bekomen we, bij een temperatuur van 20°C, 5 h tot 10 h voor de t_0 -waarden. Bij de beproevingen op beton die wij zullen uitvoeren, zullen we zien dat het beton de eerste uren soms heel eigenaardige gedragingen vertoont, mede door het uitzweten van eventueel aanwezig bleeding-water. Aangezien er de eerste 6 h toch geen spanningen in het beton kunnen ontstaan, zijn deze beginverschijnselen van minder relevant belang. We zullen eerst overgaan tot een meer accurate inschatting van t_0 , “time-zero”.

2.2.6.2. Inschatting “time-zero”

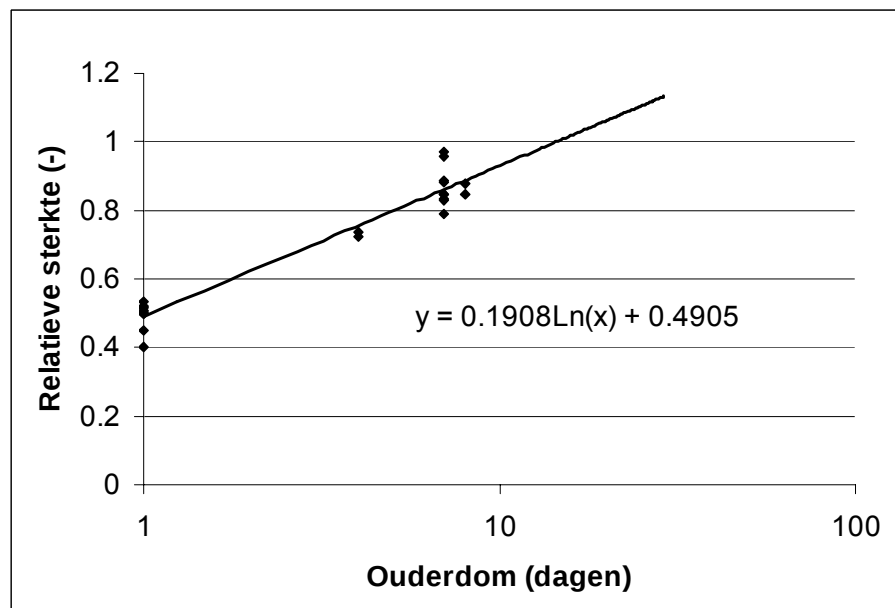
Time-zero (t_0) is het moment van wanneer opgelegde vervormingen aanleiding zullen geven tot spanningen. Met andere woorden, het is ook het moment waarop de sterkte –en stijfheidsontwikkeling een aanvang neemt. In het hydratatiegraadconcept spreekt men in dit verband van de percolatiedrempel α_0 , zijnde de waarde van de hydratatiegraad waarbij een percolerende microstructuur ontstaat, met als gevolg het begin van sterkte –en stijfheidsontwikkeling [1].

In eerste instantie kan men trachten “time-zero” in te schatten op basis van de bekomen druksterkteresultaten. Doorgaans volgt de ontwikkeling van de druksterkte benaderend een lineair verband in functie van de logaritme van de tijd. Op basis van een regressie kan op deze wijze gevonden worden dat de sterkteontwikkeling een aanvang zou nemen na ongeveer 1,5 uur (Fig 2.4).



Figuur 2.4 - De sterkteontwikkeling

Doet men een analoge analyse, maar dan op basis van de relatieve sterkteontwikkeling (sterkte relatief ten opzichte van de sterkte na 28 dagen), dan zou men kunnen besluiten dat het begin van de sterkteontwikkeling zich situeert rond 1,8 uur (Fig 2.5).



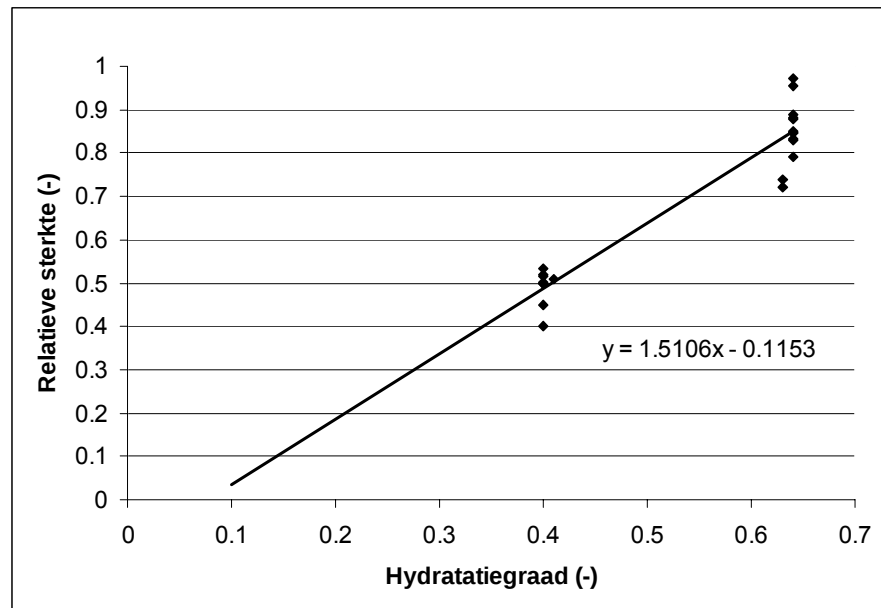
Figuur 2.5 - De relatieve sterkteontwikkeling

Hoe dan ook, het bepalen van “time-zero” op deze wijze is zeker niet accuraat. Er bestaat een grote onzekerheid op het resultaat, gezien de spreiding op de druksterkteresultaten, en gezien het ontbreken van voldoende druksterkteresultaten op zeer jonge ouderdom.

Een meer accurate begroting van “time-zero” kan bekomen worden via het hydratatiegraadconcept. Hierbij wordt de druksterkteontwikkeling bestudeerd in functie van de hydratatiegraad. Door middel van een hydratatiemodel [13] kan de tijd

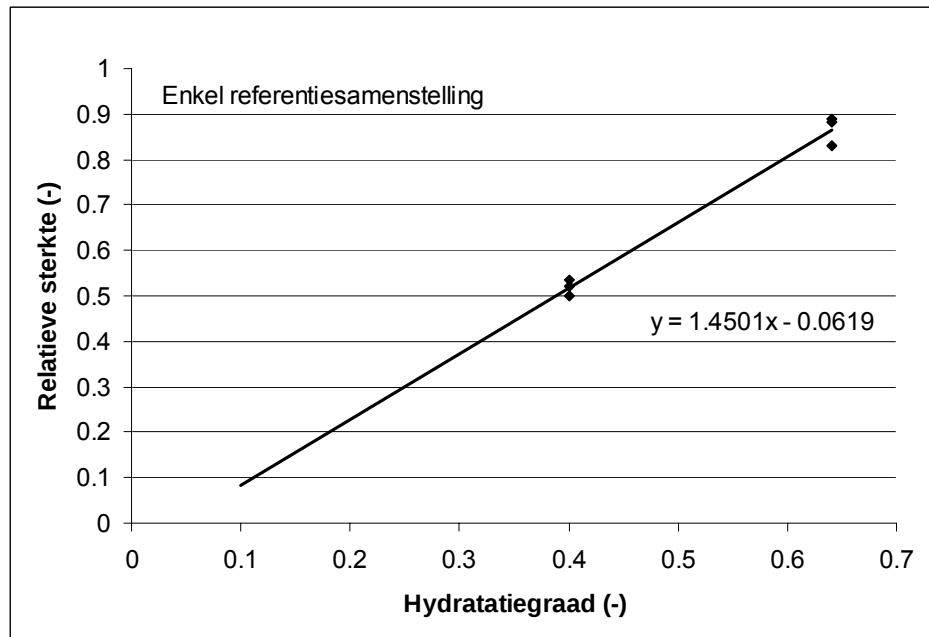
t omgerekend worden naar waarden voor de hydratatiegraad, rekening houdend met het temperatuurverloop dat het proefstuk ondergaan heeft (hier: constant bij 20°C). De details van deze omrekening vallen buiten de scope van voorliggend afstudeerwerk.

Na deze omrekening kunnen de (relatieve) druksterkteresultaten uitgezet worden in functie van de hydratatiegraad (*Fig 2.6*). Een lineaire regressie in deze grafiek geeft meteen aan dat de percolatiedrempel ongeveer gelijk is aan 0,08. Via het eerder vermelde hydratatiemodel kan dit terug omgerekend worden naar een tijd, die dan gelijk is aan “time-zero”. Op deze wijze bedraagt “time-zero” 6 uur.



Figuur 2.6 - De relatieve sterkteontwikkeling in functie van de hydratatiegraad.

Men kan nu nog opmerken dat in deze inschatting van de percolatiedrempel resultaten in rekening gebracht zijn die bekomen werden mede steunend op druksterkteresultaten bekomen op beton dat intern nabehandeld werd. Het is evenwel niet a priori bewezen dat het hydratatiemodel ook in deze situatie voldoende accuraat is. Indien de percolatiedrempel enkel bepaald wordt op basis van de druksterkteresultaten, bekomen op de referentiesamenstellingen zonder interne nabehandeling, dan wordt het resultaat bekomen zoals weergegeven in *Fig 2.7*. Op basis van de regressie in deze situatie bekomt men een percolatiedrempel gelijk aan 0,045, wat via het hydratatiemodel leidt tot een “time-zero” gelijk aan 4,5 uur.



Figuur 2.7 - relatieve sterkteontwikkeling in functie van de hydratatiegraad (enkel referentiesamenstelling)

Samenvattend komen we tot volgende waarden voor t_0 ("time-zero"):

- via een aanname van een sterkteontwikkeling die logaritmisches verloopt in de tijd: 1,5 tot 2 uur;
- via het hydratatiegraadconcept, toegepast op alle betonsamenstellingen: 6 uur;
- via het hydratatiegraadconcept, toegepast op de referentiesamenstellingen: 4,5 uur.

Op basis van deze resultaten wordt hierna in deze scriptie aangenomen dat t_0 gelijk is aan **6 uur**.

2.2.7. De interne relatieve vochtigheid

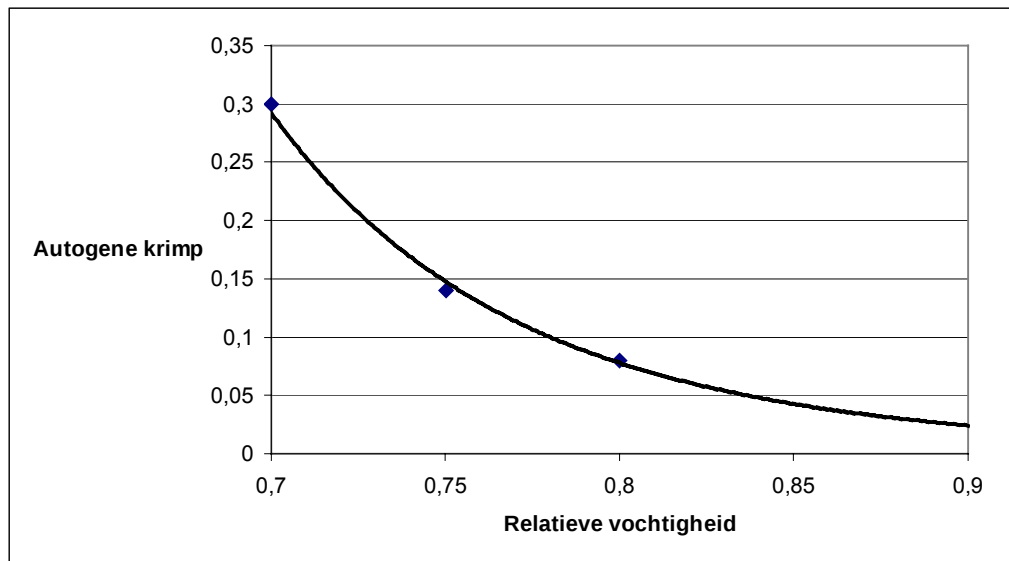
De mechanismen die leiden tot autogene krimp zijn vandaag de dag nog niet volledig verstaan. Wel is er een algemene overeenkomst tussen de personen die de autogene krimp van beton bestuderen dat deze laatste afhangt van de veranderingen in de relatieve vochtigheid in de poriën van de cementpasta.

De relatieve vochtigheid is een indicator van de activiteit van het water in de cementpasta. Indien de zelfdroging van het beton vrijwel onbestaande is dan zal de inwendige relatieve vochtigheid dicht bij de 100% liggen gedurende de hydratatie.

Beton, gezien als een fijn poreus materiaal (zie 2.2.8. *De porositeit*), heeft de mogelijkheid om vocht te binden. Hoe hoger de relatieve vochtigheid, hoe meer water er kan gebonden worden.

Wanneer de relatieve vochtigheid in het beton daalt, dan zal de onderdruk in de gevormde poriën van het beton toenemen. Hierdoor ontstaat er een samendrukking van de cementpasta. Op deze manier heeft men gevonden dat de relatieve vochtigheid van het beton wel degelijk een invloed heeft op de krimp ervan.

Globaal gezien kunnen we volgende parabolische betrekking aannemen tussen de autogene krimp en de relatieve vochtigheid:

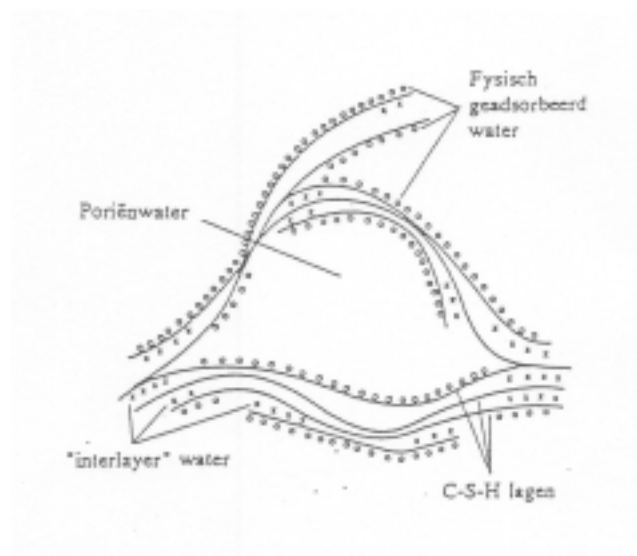


Figuur 2.8 - Autogene krimp versus relatieve vochtigheid

2.2.8. De porositeit

Beton is een materiaal dat holle ruimten bevat, poriën, die veroorzaakt worden door de aanwezigheid van water tijdens de hydratatie. Deze poriën zijn overigens mede bepalend voor de sterkte en de duurzaamheid van het beton.

De hoeveelheid water die door het portlandcement **chemisch** kan worden gebonden, bedraagt ongeveer 25% van de cementpasta. Hiernaast wordt nog 15% als gelwater gebonden.



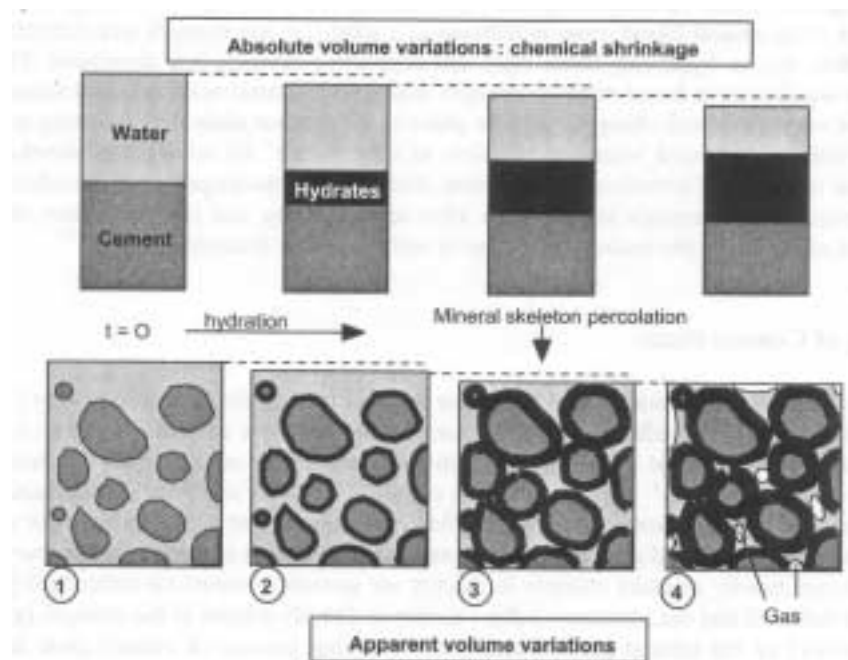
Figuur 2.9 – De verschillende soorten water in de hydraterende cementpasta

Dit gelwater bestaat uit water dat **fysisch** geadsorbeerd is aan het oppervlak van de hydratatieproducten en uit een mono-moleculaire waterfilm, het interlayer-water. Het gelwater ontwijkt volledig in een droogstof bij 105 °C, maar is toch niet in staat om te reageren met het nog niet gebonden cement.

De vaste hydratatieproducten nemen een kleiner absoluut volume in dan de som van de absolute volumes van het water en het cement die reeds gereageerd hebben (zie ook Fig 2.1). De vrijgekomen ruimtes staan beter gekend als 'capillaire holten'. Deze holten kunnen leeg zijn of **gevuld met water** (dit is de derde soort water) en betekenen een verzwakking van het beton. Bovendien kunnen agressieve stoffen via deze poriën het beton binnendringen, waardoor ook de duurzaamheid van het beton in het gedrang komt.

2.3. *Samenvattend: de autogene krimp en de hydratatie onder afgezonderde omstandigheden*

De chemische reacties van de hydratatie van cement staan in voor de generatie van warmte (zie Fig 3.6.), en een volumereductie van het hydratatie-systeem. Bovendien consumeert dit hydratatieproces watermoleculen, waardoor er een vermindering van de hoeveelheid aanwezig water ontstaat in de cementpasta bij toenemende hydratatie (en bijgevolg toenemende sterkte van het beton).



Figuur 2.10 – De zelfdroging als gevolg van chemische krimp

Zoals Fig 2.10 [15] illustreert verschijnt er een gasfase ten gevolge van de chemische krimp, en ontwikkelen er zich gas/water –meniscussen in het poriënnetwerk. Daardoor zal bij een bepaalde hydratatiegraad, en onder van de buitenomgeving afgezonderde omstandigheden, het materiaal een zelfdroging ervaren welke afhangt van het initiële watergehalte. Een afname van de interne relatieve vochtigheid is hiervan het gevolg.

Hoofdstuk 3 – Meetmethoden ter bepaling van de autogene krimp

3.1. De proefvoorwaarden

Bij de meting van de autogene vervorming van het jonge beton moet gelijktijdig voldaan worden aan drie proefvoorwaarden [2]:

- Het materiaal moet tijdens de ganse duur van de meting afgesloten zijn van iedere vochtuitwisseling met het buitenmilieu. Er mag dus geen water toegevoegd of afgevoerd worden;
- Het materiaal moet in een isotherme kamer worden bewaard. Indien de isothermie niet kan worden gegarandeerd, dan moeten de thermische vervormingen in rekening gebracht worden. Deze vervormingen ontstaan indien de door de hydratatiereactie vrijgekomen warmte niet kan worden afgevoerd;
- De metingen moeten zo snel mogelijk na het einde van de mengeling en het maken van de betonspecie aanvangen aangezien het materiaal vervormt van zodra het uitdroogt, dus vanaf het moment dat de betonmengeling gemaakt wordt en de hydratatiereactie van start gaat.

Al deze voorwaarden maken deze autogene krimpmeting zeer delicaat.

3.2. De lineaire metingen versus de volumemetingen

Hoe gaan we nu de autogene krimp bepalen? Er bestaan hiervoor verschillende proefmethoden die kunnen onderverdeeld worden in twee hoofdcategorieën [1]:

- De lineaire metingen: eenrichtingsmetingen van de vervorming van de verbonden proefstukken. Lineair meten kan zowel in horizontale als in verticale zin.
- Volumemetingen: Na het aanmaken van het beton wordt deze door middel van een soepel rubberen membraan omhuld en geïsoleerd van de buitenomgeving. Vervolgens wordt de vervorming van de specie en het membraan opgevolgd tijdens de verharding van het beton. Om het effect van de 'bleeding' te reduceren, wordt het monster geroteerd.

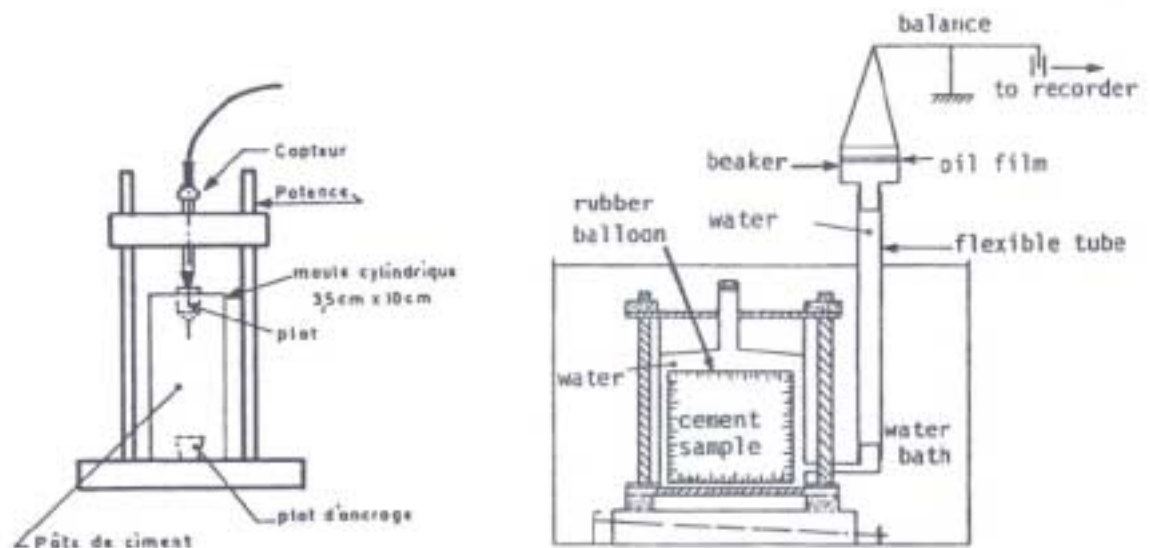
Barcelo [7] heeft de lineaire meting en de volumemeting met elkaar vergeleken en kwam tot de vaststelling dat de volumetrische methode een bij benadering drie keer zo grote krimp gaf als de lineaire methode. Verschillende redenen werden gegeven voor dit verschil:

- Wrijving tussen de pasta en de bekisting bij de lineaire meting;
- Druk van het rubberen membraan door het uitrekken van dit membraan wanneer deze met de pasta gevuld wordt;

- Een lagere capillaire onderdruk bij de volumetrische test te danken aan de rubberen omhulling;
- Door het monster te roteren wordt het bleeding-effect gedeeltelijk tot volledig uitgeschakeld bij de volumetrische metingen;
- Water kan door het rubberen membraan penetreren indien er een voldoende grote drijvende kracht is. De capillaire onderdruk in het beton blijkt een voldoende grote zuigkracht te veroorzaken om water doorheen het membraan te zuigen.

Nochtans kunnen voorgaand opgenoemde redenen niet de grootte van het verschil (tot drie keer grotere krimp!) verklaren. Twee hoofdoorzaken kunnen toegeschreven worden aan de grootte van het verschil: de opbouw van inwendige drukken en de ledige, met lucht gevulde, ruimtes tussen het oppervlak van het beton en het rubberen membraan.

Laten we tot slot de voorgaand besproken metingen visueel aan een vergelijking onderwerpen.



Figuur 3.1 – De lineaire meting (links) en de volumetrische meting (rechts) van de autogene vervorming van een cementpasta

Algemeen geven volumetrische metingen een 3 tot 5 keer grotere krimp dan de lineaire metingen, afhankelijk van de soort cementpasta.

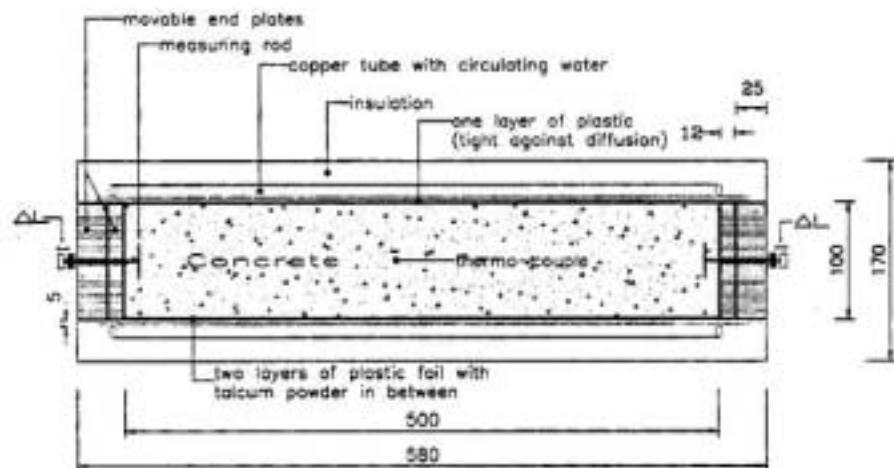
Hoewel ze de neiging heeft om de autogene krimp licht te onderschatten is de meting die wij zullen hanteren een **verticale lineaire meting**. Bovendien kan de volumetrische methode niet gehanteerd worden voor metingen op beton aangezien de granulaten het omhullende membraan kunnen beschadigen.

3.3. De verschillende soorten meetsystemen

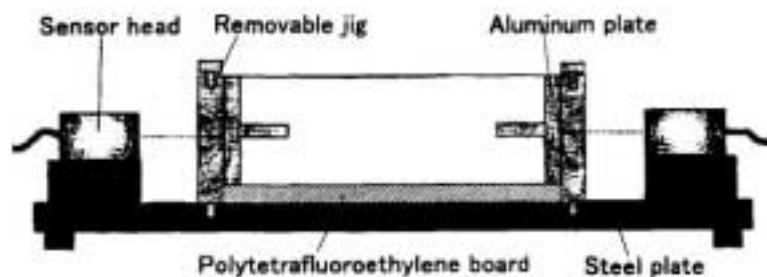
In het verleden zijn er verschillende meetsystemen gebruikt ter bepaling van de autogene krimp van het beton. Ze kunnen onderverdeeld worden in vijf groepen:

1. “cast in nails” : doorheen een opening in het midden van de eindplaten worden de nagels gestoken, waarvan de koppen door het beton (in balkvorm) omringd worden (zie Fig 3.2a).
2. Verplaatsbare eindplaten met “plugs” in een betonnen balk (zie Fig 3.2b).
3. Horizontale “cast in bars” doorheen een betonnen balk (zie Fig 3.2c).
4. Verticale “cast in bars” in een betonnen steen (zie Fig 3.2d).
5. Metalen plaat geplaatst op de top van een cilinder en een daarop verrichtte verticale lineaire meting (zie Fig 3.2e).

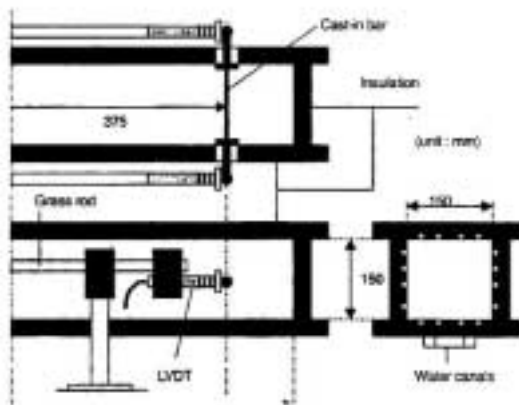
Laten we deze even visueel voorstellen:



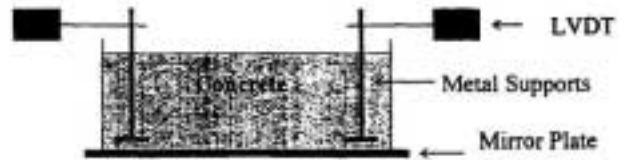
Figuur 3.2a – “Cast in nails” [8]



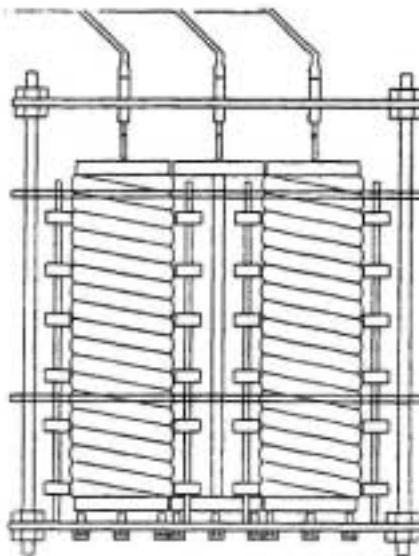
Figuur 3.2b– Verplaatsbare eindplaten met plugs in betonnen balk [9]



Figuur 3.2c– Horizontale “cast in bars” [10]



Figuur 3.2d– Verticale “cast in bars” [11]



Figuur 3.2 e- Metalen plaat op cilinder [12]

De meetmethode die wij zullen hanteren valt het best onder de vijfde categorie te plaatsen, maar is toch niet helemaal hetzelfde. We zullen deze proefopstelling hieronder verder bespreken.

3.4. De verticale lineaire meting

3.4.1. Geschiedenis

- *Baroghel Bouny* hanteert een meting die afgeleid is van de genormaliseerde metingen voor de bepaling van de krimp en zwelling van mortel: het monster wordt horizontaal in een metalen vorm gegoten om het proefstuk aan zijn uiteinden te kunnen voorzien van metalen contactplaatjes. Na het ontvormen worden de proefstukken ingepakt in een dubbel omhulsel van aluminium kleefband. De metingen worden dan verticaal verricht met de krimpmeter. De referentielengte is deze van het prisma op het ogenblik van het ontvormen [2];
- *Le Roy* giet zijn proefstukken verticaal in teflonvormen die aan het uiteinde afgesloten zijn met roestvrij stalen kappen. De meting gebeurt verticaal met behulp van 2 LVDT die in de kappen worden geplaatst [2];
- *Boivin* [16] heeft zich geïnspireerd op de twee vorige technieken en gebruikt voor zijn metingen van de autogene vervormingen op de verticale, een cilindervormige teflonvorm van 2 cm diameter en een totale lengte van 16 cm. De uiteinden van de vorm bestaan uit metalen kappen die in de specie verankerd zitten door middel van een schroef die uit de onderzijde van de kap uitsteekt en in de specie verzonken zit. De kappen laten op de bovenzijde een indruk achter waarmee het proefstuk nadien in een retractometer kan worden geplaatst [2].

3.4.2. Proefopstelling: teflonbuis

In de literatuur zijn verschillende variëteit proefopstellingen beschreven voor de bepaling van autogene krimp tijdens het verhardingsproces. De meeste methoden zijn bruikbaar voor mortel, terwijl het in voorliggend afstudeerwerk de bedoeling is een proefopstelling uit te werken die toepasbaar is op beton.

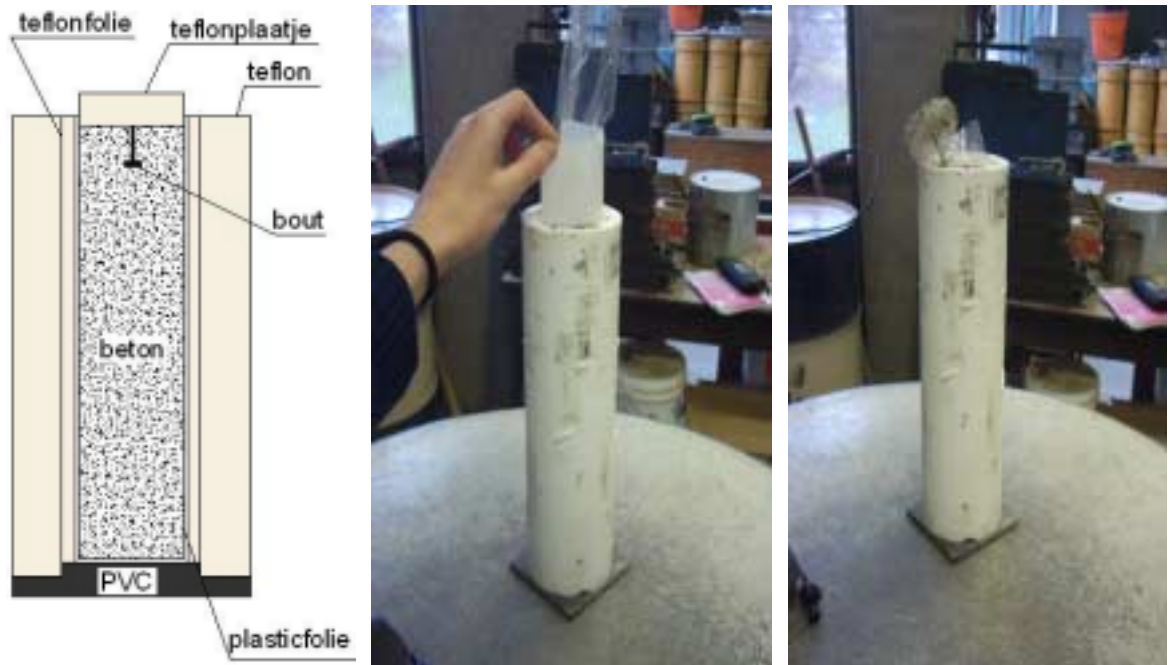
Aan de te ontwikkelen proefopstelling zijn meerdere eisen verbonden. Eerst en vooral betreft het een proefopstelling voor autogene krimp, wat met zich meebrengt dat onmiddellijk na aanmaken van het beton gestart moet worden met de metingen. Zoals aangegeven moeten we eveneens gebruik maken van een proefopstelling die bruikbaar is voor beton. De proefopstelling moet bovendien in een klimaatkamer geplaatst worden.

We gieten onze proefstukken verticaal in een cilindervormige teflonbuis, met lengte van 30 cm, een inwendige diameter van 6 cm en een uitwendige diameter van 9 cm, die aan de binnenzijde voorzien is van een extra laag teflonfolie, teneinde de wrijving tussen het proefstuk en de meetbuis te minimaliseren. Teflon is namelijk het plastic met de laagste wrijvingscoëfficiënt.

De vulling van de teflonbuis gebeurt op een triltafel die het beton verdicht. De teflonbuis is aan het ene uiteinde afgesloten met een PVC-plaatje en aan de andere zijde met een teflonplaatje voorzien van een bout die omhuld wordt door het beton en door het beton meegetrokken wordt in geval van krimp (zie *Fig 3.3*). De meting gebeurt verticaal met behulp van een LVDT (Linear Variable Differential

Transformer) die op het teflonplaatje wordt geplaatst en elke inzakking van dit plaatje registreert.

Schematisch kunnen we de proefopstelling als volgt voorstellen:

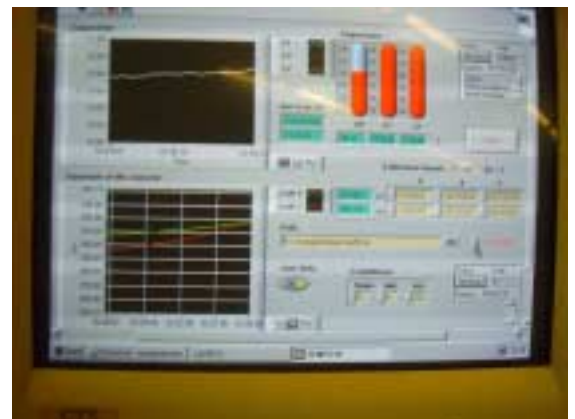


Figuur 3.3 – Schematische voorstelling van de verticale meetinrichting + werkelijk uitzicht

De metingen worden ononderbroken uitgevoerd in een klimaatkamer (20°C) gedurende 6 dagen, oftewel 144 h. Ter illustratie voegen we er nog een beeld van de LVDT-opstelling en van het meetprogramma bij.



Figuur 3.4 – LVDT-opstelling en thermokoppel (links)



Figuur 3.5 – Het meetprogramma

3.5. *Het meetprincipe*

De lineaire verticale meting van de autogene vervormingen bestaan uit de meting van de maatschommeling van het proefstuk in één verticale richting. De resultaten worden uitgedrukt door volgende formule:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$

met: L= lengte van het proefstuk op het ogenblik van de meting

L_0 = initiële lengte (dit is de eerst gemeten lengte)

3.6. *De problemen die kunnen optreden bij autogene krimpmetingen [1]*

- *Sedimentatie en bleeding*

Hiervoor zijn niet echt speciale maatregelen genomen. Uitzweten komt meestal voor tijdens de eerste uren na het einde van de mengeling. De aanwezigheid van dit uittredend water aan het oppervlakte van het proefmonster kan de meting vervalsen. Bovendien kan er een re-absorptie van dit uitzweetwater optreden indien het beton een zelfuitdroging kent, wat een expansie van het beton met zich kan meebrengen. Zoals we verder zullen zien kan bleeding dus een verklaring zijn voor het grillig begin van de autogene krimpmetingen.

Een mogelijkheid om de hoeveelheid uitgezweet water te verminderen bestaat erin de proefvorm met daarin de betonspecie aan een rotatie met constante hoeksnelheid te onderwerpen. Aangezien we niet over een dergelijk rotatiemechanisme beschikken zullen we de invloed van het uitzweten ondergaan en er rekening mee houden bij de analyse van de meetresultaten.

- *Wrijving tussen het proefstuk en de vorm*

De wrijving tussen het proefstuk en de vorm kunnen de vervormingen van het proefstuk beperken. Vooral als de stijfheid van het beton laag is kan de wrijving de vrije vervorming van het beton hinderen.

Om dit te vermijden / verminderen hebben we aan de binnenkant van de teflonbuis een extra laag teflonfolie geplaatst. De wrijving teflon op teflon is namelijk heel klein. Maar aangezien de stijfheid van het beton zich redelijk snel ontwikkelt, vormt de wrijving op dat moment een insignificant probleem.

- *Tijdstip van eerste meting*

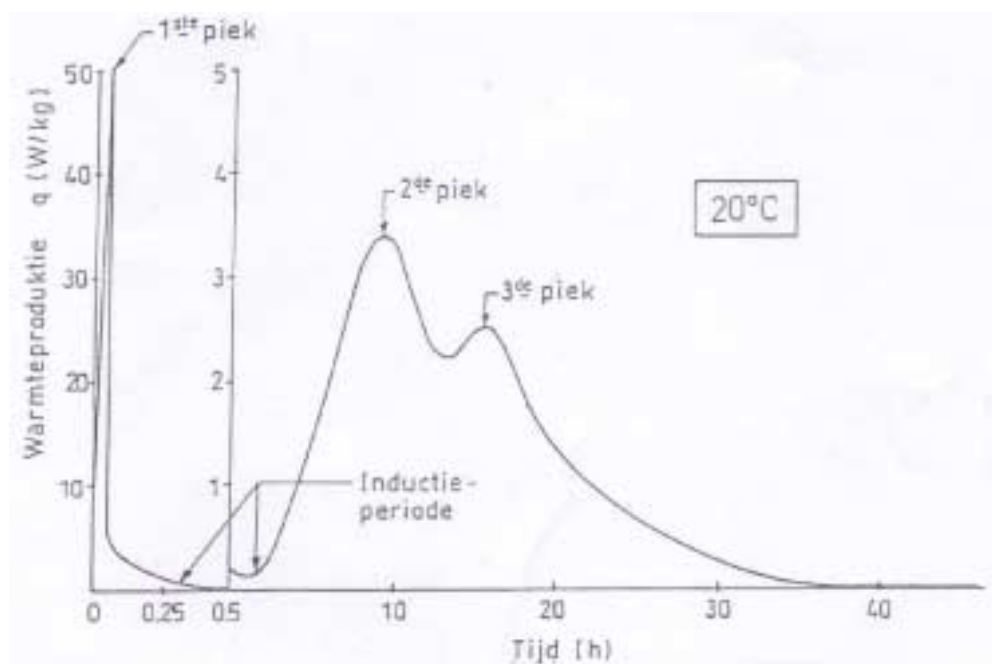
Van zodra het cement in contact komt met het water start de hydratatiereactie. De autogene vervormingen die daarmee gepaard gaan beginnen dus ogenblikkelijk. Aangezien een groot deel van de vervormingen reeds na 1 dag gebeuren, moeten de metingen zo snel mogelijk aangevangen worden. De bout die op het bovenste teflonplaatje vastzit, volgt de vervormingen van het beton, zelfs in het begin als het beton nog geen stijfheid bezit. Hierdoor kunnen de vervormingen vóór de binding worden gemeten.

- *Waterdichtheid van het systeem*

De waterdichtheid van het meetsysteem is een heel belangrijke vereiste om de metingen correct te kunnen uitvoeren. Zo moet iedere vochtuitwisseling met de omgeving beperkt worden (zie 3.1. *Proefvoorwaarden*). Daarom moet voor de proefvorm een zeer weinig absorberend materiaal gekozen worden. Teflon (PTFE) is daarvoor uiterst geschikt. Bovendien wordt het proefstuk verpakt in een plasticfolie, zodat onderaan de teflonbuis ook geen waterverlies door droging of weglekking kan optreden.

- *Veranderlijke temperatuur in het beton*

Zoals reeds eerder vernoemd is de hydratatie van beton een exotherme reactie. De daarbij ontstane warmte komt niet gelijkmatig vrij. Fig 3.6: Een eerste piek treedt onmiddellijk na het aanmaken op. Na deze eerste piek, die slecht enkele procenten van de totale hydratatiwarmte vertegenwoordigt en die wij niet zullen in rekening brengen, volgt een relatief rustige periode met weinig chemische reactiviteit. Ongeveer 5 à 15 uur na de watertoevoeging treedt een tweede piek op, te wijten aan de hydratatie van C_3S . Bij hoogovencement komt doorgaans ook een derde piek voor, maar aangezien we bij de proefmetingen gebruik maken van Portlandcement moeten we hier geen rekening mee houden:



Figuur 3.6 – De warmteproductie in het beton ten gevolge van de hydratatie van het cement [17]

Indien de temperatuur in het beton op het tijdstip van een bepaalde meting verschilt van de temperatuur op het tijdstip van de eerste meting, corrigeren we het bekomen resultaat met betrekking tot de temperatuur (zie 5.3.3.2. *Meting van de temperatuur*). Nu stelt zich de vraag: Hoe worden de bekomen waarden gecorrigeerd? We weten dat de totale krimp uit verschillende componenten bestaat (zie 2.1. *Verschillende soorten krimp*). Rekening houdende met de proefvoorwaarden waaronder de

autogene krimpmetingen uitgevoerd worden (zie 3.1. *Proefvoorwaarden*) mogen we, zonder een al te grote fout te maken, aannemen dat de totale krimp gelijk is aan de som van de autogene krimp en de thermische vervormingen. Oftewel (tussen haakjes vindt men de aangenomen tekenconventie):

$$\varepsilon_{tot}(-) = \varepsilon_{aut}(-) + \varepsilon_{therm}(+) \Rightarrow \varepsilon_{aut}(-) = \varepsilon_{tot}(-) - \varepsilon_{therm}(+)$$

De thermische vervorming zien we als een uitzetting aangezien we uit ervaring weten dat de hydratatiereactie de temperatuur in het beton zal doen toenemen waardoor de negatieve totale krimp zal verminderen. De negatieve autogene krimp zal, als verschil van de totale krimp en de thermische vervorming, anderzijds door het te corrigeren naar de temperatuur in absolute waarde groter zijn.

Hoofdstuk 4 – Interne curing: verschillende methoden

4.1. Inleiding

Zoals de titel van dit afstudeerwerk laat blijken, bestuderen we de autogene krimp van beton. Uit het literatuuronderzoek volgt dat de autogene krimp bij hoge-prestatie-beton (BHP) groter is dan bij de gewone betonsoorten. Het doel van dit werk is een vermindering van de autogene krimp te verwezenlijken door een intern waterreservoir binnen het beton te creëren. Deze techniek staat internationaal beter gekend als “internal curing”, de interne nabehandeling van het beton. Het waterreservoir moet een oplossing vormen voor de zelfdroging waarmee het beton geconfronteerd wordt en deze laatste vertaalt zich fysisch door een daling van de interne relatieve vochtigheid van het materiaal, en mechanisch door een globale krimp van het materiaal aangezien de onderdruk in de ontstane poriën (zie *Fig 2.1*) toeneemt. Deze laatste krimp staat gekend als de autogene krimp van het beton, welke we met behulp van het inwendig waterreservoir trachten te beperken [18,20,21,22,23]. Bovendien wensen we zo min mogelijk in te leveren aan druksterkte.

De vorming van zo'n reservoir kan op verscheidene manieren gebeuren. In dit eindwerk zullen we drie mogelijke materialen bestuderen, die de eigenschap hebben goed water te kunnen absorberen en deze weer af te geven om zo de zelfdroging van het beton te beperken. Deze drie materialen zijn:

- Lichte granulaten, welke het water fysisch vasthouden;
- Super Absorberende Polymeren, welke het water fysisch absorberen;
- Gerecycleerde granulaten, welke het water fysisch vasthouden;

Laten we eerst even stilstaan bij het BHP, het hoge-prestatie-beton.

4.2. Het hoge-prestatie-beton

Traditioneel beton, samengesteld uit cement – granulaten – water, heeft een druksterkte na 28 dagen tussen de 20 en 50 MPa. Om de verwerking van dit beton te vergemakkelijken wordt de waterhoeveelheid altijd groter genomen dan strikt noodzakelijk is om tot een volledige hydratatie van het cement te komen (let wel: een volledige hydratatie van 100% is praktisch onmogelijk). Door dit wateroverschot ontstaat er een capillaire porositeit, welke een onvermijdelijke invloed heeft op de sterkte en de duurzaamheid van het beton. “Water is vergif voor het beton”, G. Magnel citerende.

Daarom lijkt het interessant om de waterhoeveelheid in het beton te verminderen, doch de verwerkbaarheid van het verse beton onaangetast te laten. Dit kan mogelijk gemaakt worden door gebruik te maken van superplastificeerders, silicafume,... . Op deze manier is er een betonsoort ontstaan met zeer goede mechanische eigenschappen: het hoge- prestatie-beton (BHP). De mechanische eigenschappen

en de fysico-chemische eigenschappen van het BHP lijken de eigenschappen van het traditioneel beton ruimschoots te overtreffen.

In plaats van de traditionele water – cement – granulaten samenstelling, bestaat BHP uit een mengsel van water (een verlaagde dosering) – cement (Portlandcement CEM I 42.5 of 52.5) – granulaten (van goede kwaliteit, zoals bijvoorbeeld porfier) – superplastificeerders – silicafume.

Het is algemeen geweten dat het hoge-prestatie-beton onderhevig is aan hoge autogene krimp tijdens de eerste dagen van het verhardingsproces. Er is slechts weinig hydratatie nodig om een significante zelfdroging te bekomen bij een dichte binder. Metingen van de relatieve vochtigheid bewijzen bovenstaand gestelde: de zelfdroging reduceert de relatieve vochtigheid tot onder de 75% na enkele dagen, en hoe kleiner deze relatieve vochtigheid, hoe groter de autogene krimp (zie Fig 2.8).

Tot slot lijkt het ons interessant om enkele eigenschappen van het hoge prestatie beton op te sommen [18,19]:

- BHP heeft een zeer lage W/C factor: $0,2 \leq \frac{W}{C} < 0,4$. Een lage maximale hydratatiegraad, α ligt tussen de 0,3 en de 0,4 (voor BUHP), is hiervan het gevolg;
- BHP heeft een hogere karakteristieke druksterkte na 28 dagen in vergelijking met het traditionele beton, dus hoger dan 50 MPa. Algemeen kan er gesteld worden dat er bij BHP een verbetering van mechanische eigenschappen heerst;
- Een hogere compactheid waardoor er een grotere lucht –en waterdichtheid is;
- Een grotere slijtvastheid;
- Een betere duurzaamheid (hogere weerstand tegen agressieve stoffen, beter gedrag bij vorst-dooicycli).

Samenvattend geeft onderstaande tabel de verschillende betonsoorten en hun onderscheid weer[18]:

Betonsoort	Druksterkte	W/C -factor
Traditioneel beton	20-50 MPa	> 0,4
BHP	50-80 MPa	0,3-0,4
BUHP (ultra hoge prestatie)	> 80 MPa	< 0,3

Tabel 4.1 – De verschillende betonsoorten

4.3. Externe curing

Wanneer men een beton onder water plaatst gedurende het hydratatieproces, dan zal dit water doorheen de cementpasta penetreren en zich naar de partieel droge poriën begeven. Deze vorm van nabehandeling, beter gekend onder de naam 'underwater curing', reduceert de autogene krimp. Dit effect kan niet optreden in lage W/C -factor systemen aangezien deze reeds bij een lage hydratatiegraad een discontinue poriënstructuur ontwikkelen waar het bovenliggende nabehandelingwater niet doorheen kan. Op deze manier wordt de kern van het beton effectief afgesloten van het water aanwezig op het oppervlak, waardoor zelfdroging kan optreden zelf indien het beton ondergedompeld is in water.

Naast deze vorm van externe nabehandeling zijn er ook nog andere veel voorkomende mogelijkheden om het beton te manipuleren. Deze technieken worden zowel voor gewoon als voor hoge-prestatie-beton gehanteerd. Ze kunnen onderverdeeld worden in twee grote categorieën [24]:

- 'Water curing': technieken die additioneel vocht voorzien en het verlies ervan verhinderen. Het onder water zetten en het besproeien van een betonmengsel zijn manieren om een 'water curing' te bewerkstelligen. Voor hoge-prestatie-beton is deze techniek het meest effectief in vergelijking met de volgende curing-methode.
- 'Sealed curing': technieken die enkel dienen om het verlies van vocht te verhinderen. Dit kan met behulp van waterdichte membranen, rubbers, plastic zeilen,... gerealiseerd worden.

4.4. Interne curing

4.4.1. Het principe

We trachten nu de ontwikkeling van autogene krimp, waaraan BHP sterk onderhevig is, op een andere manier te beperken. Dit kan bijvoorbeeld met behulp van een soort kern van water, dat in het betonmengsel wordt gebracht, en tijdens de hydratatie van het cement geleidelijk aan water afgeeft aan zijn onmiddellijke omgeving en zo de zelfdroging van het beton deels voorkomt en met andere woorden de autogene krimp beperkt. Er wordt dus een component, die de curing van het beton realiseert, aan de betonmengeling toegevoegd. Vandaar ook de benaming 'interne curing' van beton: de interne waterbron geneest als het ware het beton, mocht autogene krimp de ziekte zijn.

Ook bij interne curing kunnen we een bepaalde onderverdeling maken [24]:

- 'Internal water curing': de curing-component gedraagt zich als een waterreservoir, welke geleidelijk water afgeeft aan de directe omgeving.
- 'Internal sealing': de curing-component tracht het verlies van water zoveel mogelijk te beperken.

De meeste BHP soorten hebben een lage W/C –factor, wat betekent dat de betonmengeling onvoldoende water bevat nodig om de hydratatiereactie en de puzzolane reacties te verwezenlijken. Daarom is het algemeen aanvaard dat methodes, gebaseerd op het inwendig toevoegen van extra water, meer efficiënt zijn voor BHP. Vandaar dat het vooral de ‘internal water curing’ is die onze aandacht trekt. We zullen ons in wat volgt dan ook enkel met deze categorie bezighouden.

In de literatuur [25,26,27,28,29] vinden we verscheidene methodes om een interne curing van het beton te realiseren, waarvan er ons twee interesseren: de met water verzadigde lichte granulaten en de superabsorberende polymeren. In het kader van het onderzoek zullen we eveneens trachten de interne waterbron te realiseren met behulp van met water verzadigde gerecycleerde granulaten (verpulverde baksteen en beton).

Laten we tot slot opmerken dat er ook nog andere methodes zijn om de autogene krimp te beperken. Zo kan mijn evenzeer gebruik maken van vezelversterkt beton of expansieve additieven (dit behoort tot de categorie ‘internal sealing’) toevoegen die eveneens de krimp reduceren. Hier zullen we echter geen onderzoek naar verrichten.

4.4.2. Secundaire gevolgen van de interne water curing [30]

- De interne nabehandeling zorgt ervoor dat de hydratatiereactie verder gezet wordt, en we een toegenomen hydratatiegraad bekomen. Men zou bijgevolg kunnen verwachten dat de **mechanische eigenschappen** van het beton na een bepaalde tijd dus een verbetering ondergaan. De toegevoegde componenten die de interne nabehandeling verwezenlijken, zijnde de lichte granulaten, de SAP-korrels,... hebben zeker een invloed op de prestatie van het BHP. In werkelijkheid zal een toename van deze additieven de sterkte van het beton verminderen zodat het voordelige effect van een door de interne nabehandeling toegenomen hydratatiegraad geneutraliseerd wordt.
- Indien de autogene krimp van een cementpasta succesvol gereduceerd wordt, dan zullen de **spanningen** veroorzaakt door belemmerde vervormingen eveneens tot een minimum herleid worden. Hierdoor neemt de waarschijnlijkheid dat inwendige **microscheuren** zullen optreden ook af.
- Een toegenomen maximale graad van hydratatie, bekomen door de interne curing, leidt eveneens tot een afname van de **porositeit**: BHP is een beton met een lage W/C –factor. Wanneer er voldoende curing water aanwezig is, dan zal de hydratatie verdergaan tot op het moment dat alle capillaire holten gevuld zijn met hydratatieproducten. Hierdoor neemt de porositeit van de cementpasta af.

4.4.3. Theoretische bepaling van de hoeveelheid toegevoegd water

Een belangrijke parameter bij de interne nabehandeling is de hoeveelheid water die via de lichte granulaten, de superabsorberende polymeren of de gerecycleerde granulaten aan de betonmengeling wordt toegevoegd.

De totale noodzakelijke hoeveelheid water hangt af van de betonsamenstelling, de externe omstandigheden en het doel van de interne nabehandeling. Wanneer het doel 'de beperking van de autogene krimp door zelfdroging vermijden' is, dan kan men gebruik maken van het *model van Powers* [5] ter bepaling van de totale waterhoeveelheid. Hoewel deze hoeveelheid vooral afhangt van de cementhoeveelheid wordt deze hoeveelheid ruw geschat op **40 kg/m³**. Toch zullen we in wat volgt voor een meer exacte bepaling opteren.

4.4.3.1. Theoretische bepaling van de nodige waterhoeveelheid

De hoeveelheid water nodig in de interne reservoirs ter vermindering van de zelfdroging van het beton, W_{cur} , kan bepaald worden rekening houdend met de hydratatiereactie en met de chemische krimp [31]:

$$W_{cur} = C \cdot \alpha_{max} \cdot CS$$

Met: W_{cur} – de waterhoeveelheid [kg/m³];
C – de cementhoeveelheid [kg/m³];
 α_{max} – de maximale hydratatiegraad [-];
CS – de chemische krimp [kg water/kg gehydrateerd cement].

De chemische krimp is grotendeels onafhankelijk van de W/C –factor en kan als constant beschouwd worden. Een typische aanvaardbare waarde is 0,07 kg water per kg gehydrateerd cement. De cementhoeveelheid halen we uit *Tabel 5.1* en bedraagt 475 kg/m³.

Voor een typische BHP met ongeveer 500 kg/m³ cement en een hydratatiegraad van 70% na een week kan de theoretische waterhoeveelheid bepaald worden [32]:

$$W_{cur} = 475(\text{kg cement}) \cdot 0,7 \cdot 0,07 \left(\frac{\text{kg water}}{\text{kg cement}} \right) \approx 23 \text{ kg water}$$

Deze hoeveelheid water zal met behulp van de verzadigde Argex-korrels, gerecycleerde granulaten of superabsorberende polymeren in de betonmengeling gebracht worden. Maar aangezien niet al het water in deze voorgaand opgesomde bestanddelen beschikbaar zal zijn ter beperking van de zelfdroging en de daarbij horende autogene krimp is bovenstaande waarde, namelijk **23 kg/m³** water, een theoretische ondergrens. Een deel van het water van de verzadigde granulaten en de SAP-korrels zal namelijk niet volledig aan de cementpasta worden afgegeven waardoor de theoretisch nodige toegevoegde waterhoeveelheid om autogene krimp te vermijden kleiner zal zijn dan de werkelijk nodige waterhoeveelheid.

Waarom kan niet al het water in de lichte granulaten beschikbaar zijn? De te fijne korreldistributie of een beperkte percolatie van het water in de omliggende

cementpasta (de afstand dat het water kan afleggen van de lichte granulaten tot in de pasta bedraagt ongeveer 200 μm volgens *Bentz & Snyder* [31]) kunnen een antwoord zijn op bovenstaande vraag.

Recentere studies hebben aangetoond dat de hoeveelheid water binnen de Argex-korrels nodig om de zelfdroging en de autogene krimp tegen te gaan opmerkelijk hoger moet zijn dan de bekomen waarde met bovenstaande formule. De nodige hoeveelheid zal eerder tussen de 30-40 kg/m^3 schommelen.

Aangezien een deel van het water van de verzadigde lichte granulaten niet volledig aan de cementpasta zal worden afgegeven zal de theoretisch nodige toegevoegde waterhoeveelheid om autogene krimp te vermijden kleiner zijn dan de werkelijk nodige waterhoeveelheid.

4.4.3.2. *Model van Powers*

a) Achtergrond

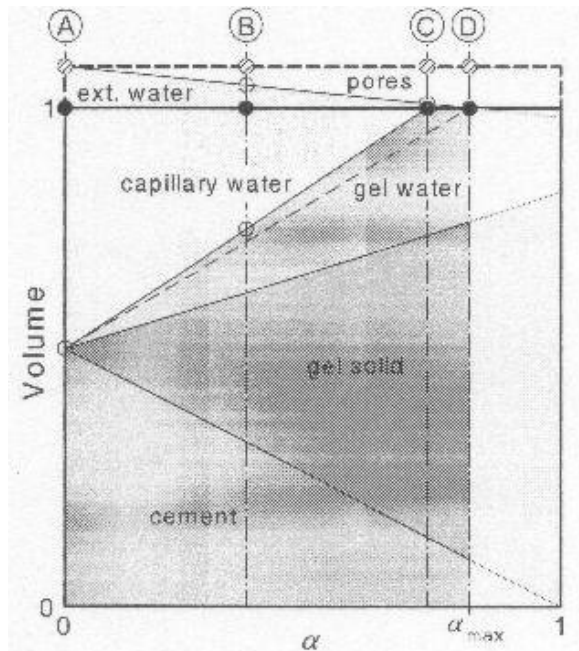
Zoals reeds eerder vermeld (zie 2.2.8. *De porositeit*) bestaan er in een vers beton verschillende fasen van water [33]. *Powers* heeft aangetoond dat ongeveer 0,23 g water per g gehydrateerd cement **chemisch** is gebonden. Dit water kan alleen verwijderd worden indien de temperatuur meer dan 105°C bedraagt.

Daarenboven bestaat de samenstelling eveneens uit 0,19 g water per g gehydrateerd cement **fysisch** gebonden water, gelwater. De bindingsenergie van dit water hangt af van de relatieve vochtigheid in het beton.

Het ongebonden water, **capillaire** water, is het water dat zich in de poriën bevindt. Alleen dit water is vrij beschikbaar voor de verdere hydratatie van het cement. De hydratatie wordt bijgevolg vertraagd als al het capillaire water is opgebruikt. *Fig. 2.9* geeft de visualisering van het voorgaand geformuleerde.

Het primaire mechanisme dat verantwoordelijk is voor het vasthouden van het water in de poriën van de lichte granulaten zijn de capillaire krachten. Alleen poriën met afmetingen groter dan 100 nm zijn bruikbaar als stockageplaats voor internal curing water. Smallere poriën houden het water zo stevig vast, zodat het niet meer beschikbaar is voor de cementreacties.

Bij complete hydratatie bindt 1 g cement ongeveer 0,23 g water chemisch en 0,19 g fysisch. Daardoor is volledige hydratatie enkel mogelijk bij W/C –factors hoger dan 0,42 (=0,23 + 0,19).



Figuur 4.1– De volumetrische fase distributie van een cementpasta in functie van de hydratatiegraad α , met $W/C = 0,30+0,05$. Het diagram geldt voor hydratatie met een watervoorziening van intern curing water. Ten gevolge van de lage W/C –factor kan volledige hydratatie van het cement niet bereikt worden

Fig. 4.1 toont de fazendistributie van een cementpasta met lage W/C –factor dat voorzien is van toegevoegd water gedurende hydratatie. Dit extra water zorgt ervoor dat het cement een hogere graad van hydratatie bereikt. Het gelwater daarentegen is niet beschikbaar voor de hydratatie van het cement.

Om nu tot een berekeningsformule te komen neemt Powers [5,34,35] aan dat de hydratatie bij lage W/C –factoren stopt indien al de beschikbare ruimte ingenomen is door het gelwater, het gehydrateerd deel (gel solid) en het ongehydrateerde cement (zie Fig 4.1). Dan kunnen we schrijven:

$$\alpha = \alpha_{\max} \Rightarrow V_{\text{gelwater}} + V_{\text{gel solid}} + V_{\text{ongehydrateerd cement}} = 1$$

Met: $V_{\text{gelwater}} = 0,60(1-p)\alpha$
 $V_{\text{gelsolid}} = 1,52(1-p)\alpha$
 $V_{\text{ongehydrateerd cement}} = (1-p)(1-\alpha)$
 V – relatieve volumes
 p – de initiële porositeit

Dit geeft na invulling van bovenstaande uitdrukkingen en na vereenvoudiging:

$$\alpha_{\max} = \frac{p}{1,1(1-p)} \Rightarrow (1-p)\alpha_{\max} = 0,91p$$

Het relatief volume van de hoeveelheid toegevoegd interne nabehandelingwater, V_{inw} , zou moeten gelijk zijn aan de chemische krimp ontwikkeld bij een maximale hydratatiegraad, $V_{\text{che kr}}$. Deze laatste grootte wordt volgens Powers bepaald aan de hand van volgende formule:

$$V_{inw} = V_{chekr} = 0,20(1-p)\alpha_{max} = 0,20 \cdot 0,91p = 0,18p$$

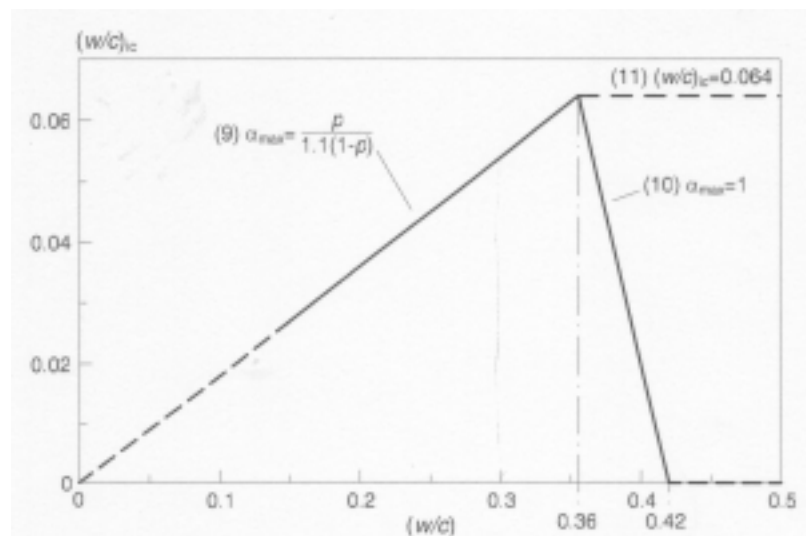
Op basis van de W/C –factors [kg water/kg cement], kunnen het initiële curing water en het capillaire water (het relatieve volume van het capillair water is gelijk aan de porositeit) als volgt worden uitgedrukt:

$$\left(\frac{W}{C}\right)_{ic} = \frac{V_{chekr} \cdot \rho_w}{V_{cement,O} \cdot \rho_c} ; \left(\frac{W}{C}\right) = \frac{p \cdot \rho_w}{V_{cement,O} \cdot \rho_c}$$

Bijgevolg vinden we als uitdrukking voor de hoeveelheid water voor de interne nabehandeling:

$$\left(\frac{W}{C}\right)_{ic} = 0,18 \left(\frac{W}{C}\right) \quad \text{voor } \frac{W}{C} \leq 0,36$$

Indien de W/C –factor meer dan 0,36 bedraagt dan moet men gebruik maken van onderstaande grafiek.



Figuur 4.2 – De minimale hoeveelheid water nodig om α_{max} te bereiken en bijgevolg zelfdroging tijdens de hydratatie te vermijden

b) De nodige waterhoeveelheid volgens Powers

Om een maximale hydratatie $\alpha = \frac{p}{1,1(1-p)}$ te bekomen hebben we een W/C –factor nodig die $0,18 \cdot (W/C)$ bedraagt. Met andere woorden:

$$\left(\frac{W}{C}\right)_{ic} = 0,18 \left(\frac{W}{C}\right) \quad \text{voor } \frac{W}{C} \leq 0,36$$

Uit *Tabel 5.1* kunnen we volgende gegevens halen (we houden geen rekening met de silicafume-hoeveelheid):

$$W = 150 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$C = 475 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Als we nu de waarden invullen, dan bekomen we voor de benodigde waterhoeveelheid:

$$\left(\frac{W}{C}\right) = \left(\frac{150}{475}\right) = 0,32 \leq 0,36 \Rightarrow \left(\frac{W}{C}\right)_{ic} = 0,18 \cdot 0,32 = 0,057 \Rightarrow W_{cur} = 0,057 \cdot 475 = 27 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Per mengeling van 1 m³ moet er dus, volgens *Powers*, een hoeveelheid water van **27 kg** toegevoegd worden.

Deze hoeveelheid water zal onrechtstreeks aan de betonsamenstelling worden toegevoegd en dit met behulp van:

- verzadigde lichte granulaten;
- superabsorberende polymeren;
- verzadigde gerecycleerde granulaten.

4.4.4. Met behulp van verzadigde lichte granulaten

4.4.4.1. Algemene geschiedenis

Volgens NBN B15-001 behoren granulaten met ρ_k kleiner dan 2000 kg/m³ tot de categorie 'lichte granulaten'.

Het gebruik van lichte verzadigde poreuze granulaten in beton is geen nieuw fenomeen. Hieraan is heel wat ervaring, proefwerk en onderzoek voorafgegaan. Wij vermelden hier de belangrijkste bevindingen [31,36,37,38,39,40]:

- *Aroni en Polivka* (in de jaren 60) schreven dat door gebruik te maken van bepaalde soorten lichte granulaten een **intern waterreservoir** kon gecreëerd worden voor interne curing welke de expansie van het beton beïnvloedde.
- *Holm* vond zo dat de **duurzaamheid** van het beton verbeterde door de verminderde microscheurvorming dankzij de interne curing.
- *Philleo* (begin de jaren 90) vond dat de het water van de interne waterbron verbruikt werd door **de chemische krimp** tijdens de **hydratatie** van het cement. Hierna ontstond een hele reeks studies betreffende de invloed van lichte granulaten op de autogene krimp van het BHP.
- *Hammer* (1992) toonde aan dat **de druksterkte** van het beton niet bijster veel werd aangetast wanneer er gebruik gemaakt werd van verzadigde lichte granulaten.
- *Van Breugel* (1996) bestudeerde de invloed van het **percentage vervanging** van de normale granulaten door lichte granulaten.

- *Bentz & Snyder* (1999) oordeelden dat de **afstand** tussen het lichte granulaat en het punt in de cementspecie, waar de vermindering van de relatieve vochtigheid plaatsvindt, bepalend is voor de doeltreffendheid van de interne curing.

4.4.4.2. Voorafgaande autogene krimpmetingen

Voorafgaand aan deze studie zijn er heel wat pogingen ondernomen om de autogene krimp van een hoge-prestatie-beton te verminderen. Een volledige bespreking van deze voorafgaande beproevingen zou ons te ver leiden. In [28] wordt de krimpreductiemethode uitgetest aan de hand van lichte granulaten gebaseerd op geëxpandeerde kleikorrels. Aangezien deze soort van lichte granulaten een grote gelijkenis vertoont met onze Argex-korrels (zie 6.2. *Keuze van de lichte granulaten*), lijkt het ons interessant de bekomen resultaten van dit onderzoek te bespreken. Men vertrekt van een referentiesamenstelling die nagenoeg volledig gelijkaardig is aan de referentiesamenstelling die wij zullen hanteren, zie *Tabel 5.1*. Alleen de korrelafmetingen van de porfierkorrels variëren gedeeltelijk, hoewel de totale hoeveelheid aan porfier een zelfde waarde kent. Er worden verschillende soorten lichte granulaten gebruikt met volgende eigenschappen:

Type	Vorm	Kaliber	ρ_{werk} [kg/m ³]	Absorberend vermogen (24h)
1.A	Vermalen	4/8	700	0,37 g/g droog
1.B	Rond	8/16	628	0,35
1.C	Rond	4/10	740	0,27
2.A	Rond	2/10	1100	0,14
2.B	Rond	4/8	1420	0,13

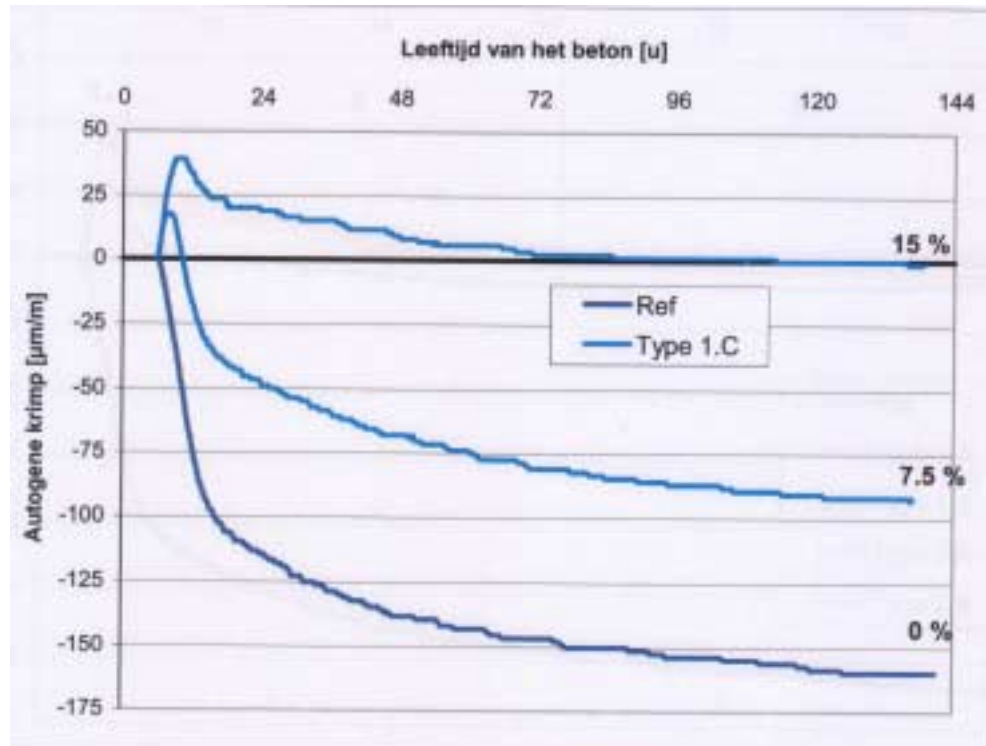
Tabel 4.2 – Algemene eigenschappen van de lichte granulaten

Aan de hand van deze lichte granulaten zal er water aan de betonsamenstelling worden toegevoegd in een poging de autogene krimp te reduceren. Opdat we steeds een samenstelling van 1 m³ wensen te bekomen zal er een deel van de normale granulaten vervangen dienen te worden. In de nu besproken studie zullen de porfierkorrels vervangen worden, terwijl we in dit afstudeerwerk er voor opteren om de zandkorrels te vervangen. De hoeveelheid ingebracht water door de lichte granulaten schommelt tussen de 25 en de 88 kg/m³.

Type	Lichte granulaten [kg/m ³]	Water ingebracht [kg/m ³]
1.C 15%	118	50
1.C 7.5%	59	25
2.A 25%	193	64
2.A 12,5%	96	32
1.A 25%	109	88
1.A 12,5%	55	44
1.B 25%	109	74
1.B 12,5%	55	37
2.B 25%	243	70
2.B 12,5%	121	35

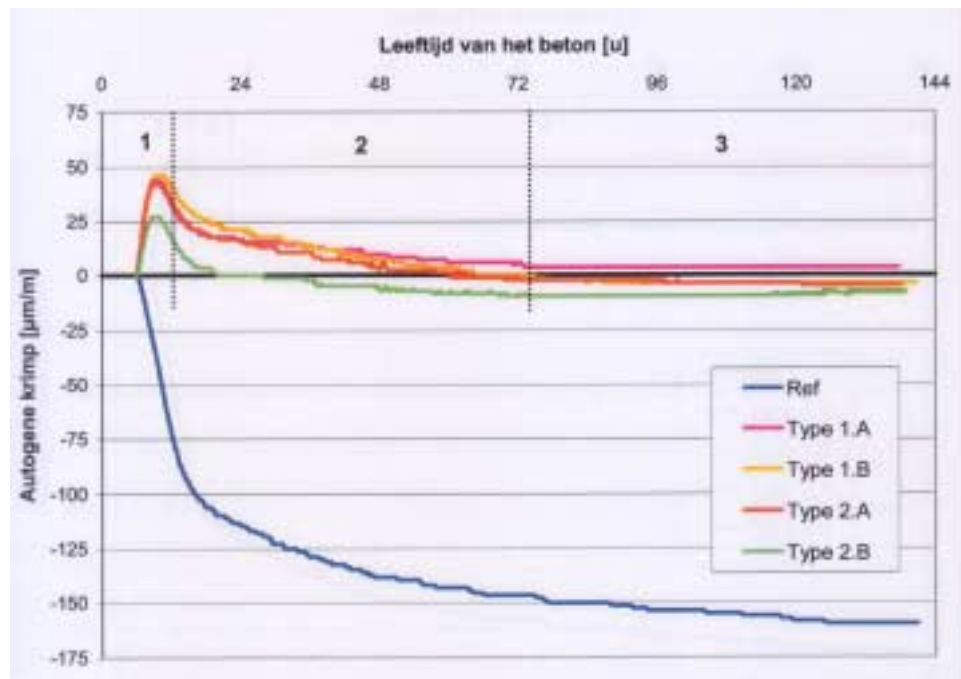
Tabel 4.3 – Hoeveelheid water ingebracht door de lichte granulaten

Vervolgens beschouwen we de resultaten van autogene krimp bereikt met de meetapparatuur op de verticale. Dit bestaat uit een verticale meting met behulp van een retractometer, waarbij het proefstuk zich volkomen vrij kan vervormen in verticale stand omwille van het ontbreken van wrijvingen vorm/proefstuk. Dit verschilt van de meetapparatuur die wij in wat volgt zullen hanteren (zie 3.4. *De verticale lineaire meting*).



Figuur 4.3 – Evolutie van de autogene krimp bekomen met het lichte granulaat type 1.C

Men stelt vast dat de toevoeging van 7,5% verzadigde lichte granulaten (7,5% van het totaal volume granulaten) de autogene krimp na 6 dagen vermindert met ongeveer 100 µm/m (een reductie van 43% in vergelijking met het referentiebeton). Deze hoeveelheid volstaat niet om de autogene krimp volledig uit te schakelen. Daarom heeft men geopteerd voor hogere gehalten aan lichte granulaten: 12,5 en 25% in normale granulatenvolume. Dit geeft voor de autogene krimpmetingen:



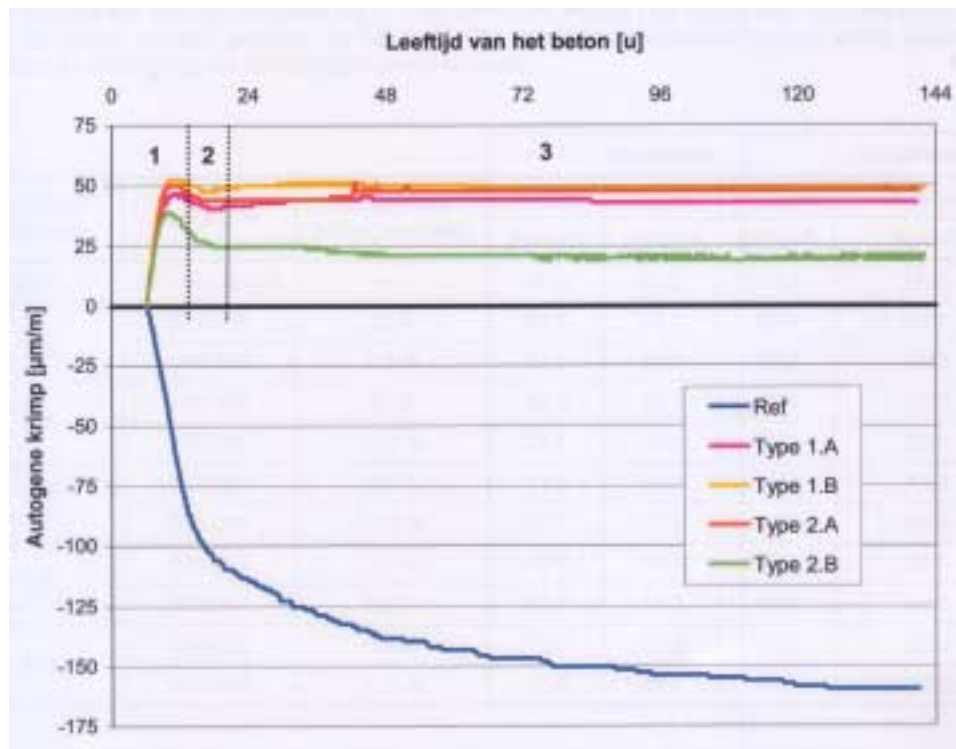
Figuur 4.4 – Evolutie van de autogene krimp van mengsels met 12,5% lichte granulaten

Uit Fig 4.4 blijkt dat een gehalte van 12,5% leidt tot een quasi-nul autogene krimp na 6 dagen. Bovendien wordt de evolutie van de autogene krimp gekenmerkt door 3 fasen:

- Fase 1 (tot 10 u): Doeltreffende interne curing. Men noteert een swelling in plaats van de snelle krimp bij het referentiebeton;
- Fase 2 (van 10 tot 72 u): De interne waterreserve in de lichte granulaten geraakt uitgeput en er begint zich een autogene krimp te ontwikkelen;
- Fase 3 (vanaf 72 u): De vervormingen vertragen tot ze een stabilisatie bereiken vanaf 3 dagen.

De interne curing lijkt iets minder effectief met het lichte granulaat type 2.B. Dat kan worden toegeschreven aan zijn hogere volumieke massa en zijn lagere absorptiecoëfficiënt.

Als we het gehalte aan lichte granulaten nog opdrijven dan bekomen we onderstaande autogene krimpresultaten (Fig 4.5):



Figuur 4.5 – Evolutie van de autogene krimp van mengsels met 25% lichte granulaten

Hier blijkt fase 2 nagenoeg onbestaande te zijn wat er op wijst dat de interne watervoorraad nu voldoende is om de ontwikkeling van de autogene krimp volledig uit te schakelen.

Aangezien de curven van Fig 4.4 vanaf een ouderdom van 72 h tot een ouderdom van 144 h het dichtst bij de referentie-as (lees: nul-as) gelegen zijn, zal het beton het minst vervormingen kennen, dus het minst spanningen induceren. Het is niet toevallig dat daar de hoeveelheid water ingebracht via de lichte granulaten tussen de 30 en de 50 kg/m³ schommelt (zie Tabel 4.3 **vet** gedrukt). We zullen bij onze eigen beproevingen dan ook opteren voor een ingebrachte waterhoeveelheid die schommelt tussen de 30 en de 50 kg/m³.

Laten we nog tot slot het druksterkteverlies vermelden door het toevoegen van deze lichte granulaten:

Type	Druksterkte na 28d [MPa]	Druksterkte na 28d [%]
REF	106	100
1.C 15%	80,6	76
1.C 7.5%	97,8	92
2.A 25%	82,4	78
2.A 12,5%	92,9	88
1.A 25%	69,4	65
1.A 12,5%	83,8	79
1.B 25%	68,9	65
1.B 12,5%	88,8	84
2.B 25%	90,1	85
2.B 12,5%	96,9	91

Tabel 4.4 – Druksterkte na 28 dagen

Men stelt vast dat de druksterkte bij de mengsels met een gedeeltelijke vervanging van de lichte granulaten met 12,5% in absolute waarde altijd groter blijft dan 84 MPa. Daarentegen, indien men de hoeveelheid lichte granulaten nogmaals verdubbelt, kan de druksterkte onder de 70 MPa dalen. Dit is nog een reden te meer waarom we bij onze eigen beproevingen dan ook zullen opteren voor een ingebrachte waterhoeveelheid die schommelt tussen de 30 en de 50 kg/m³.

4.4.5. Met behulp van superabsorberende polymeren

4.4.5.1. Algemene geschiedenis

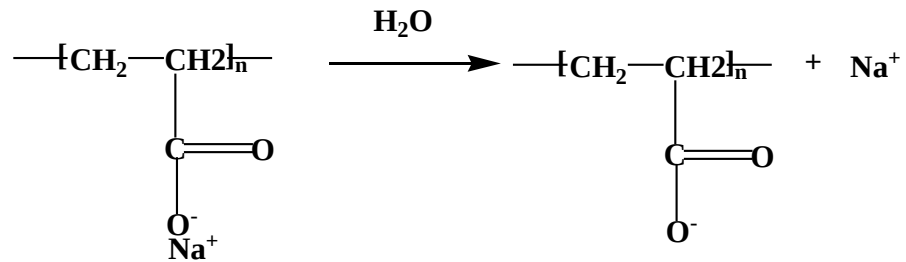
Deze methode voor het creëren van een interne waterbron met behulp van superabsorberende polymeren (SAP) is veel recenter en er is aldus weinig informatie omtrent deze topic te vinden:

- *Jensen & Hansen* [41] hebben aangetoond dat door toevoeging van een hele kleine hoeveelheid SAP de autogene krimp van het BHP volledig teniet kan gedaan worden;
- *Geiker* [42] onderzocht de invloed van toegevoegde SAP op de autogene krimp en de druksterkte van mortel.

Beton met toegevoegde SAP is dus een nieuwe techniek om tot een beperking van de autogene krimp van het beton te komen. Het concept is gebaseerd op de insluiting van een afgezonderde waterfase in de verhardende cementpasta. Deze fase wordt gecreëerd doordat de SAP-korrels water absorberen. Tijdens de menging van het beton worden de droge SAP-korrels aan het mengsel toegevoegd en ze zullen op deze manier water opnemen. Het water dat ingesloten is in de SAP-korrels zal pas vrijgelaten worden als het mechanisme van de zelfdroging van start gegaan is, dus wanneer de relatieve vochtigheid in het beton daalt. Hierdoor zullen poriën achtergelaten worden in de verharde cementpasta.

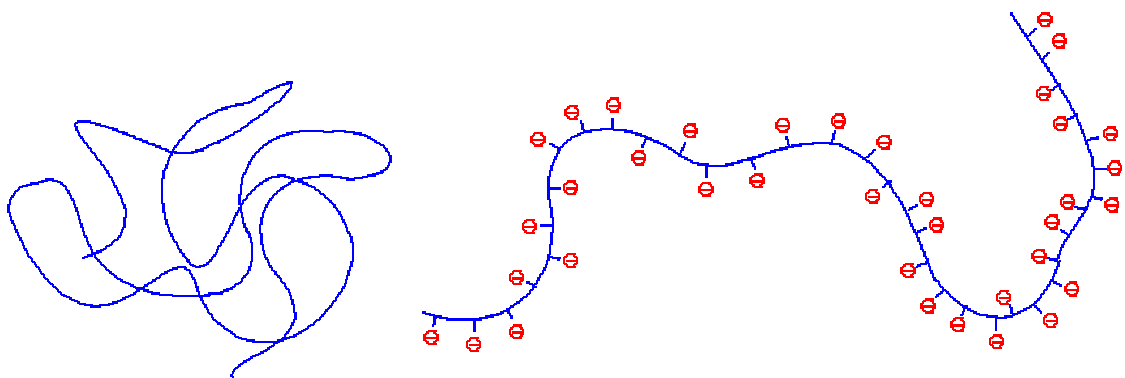
Superabsorberende polymeren zijn acrylpolymeren die het vermogen hebben een groot deel van een vloeistof te absorberen, zonder dat deze vloeistof losgelaten wordt. Eens het contact tussen de SAP-korrels en het water verwezenlijkt is, zwellen de korrels en vormen ze een gel. Sommige van deze korrels zijn in staat tot 500 keer hun gewicht in water op te nemen. Ze worden om deze laatste reden dan ook vaak gehanteerd in de gezondheidssector (opname van urine in pampers, gebruik van SAP in maandverbanden, bij contactlenzen, vuurbestrijding,...).

Acrylpolymeren zijn een soort van poly-electrolyten. Eens in water geplaatst breekt het polymeer zich in een positieve en een negatieve lading.



Figuur 4.6 – In water breekt het SAP in een positieve en een negatieve lading

Vervolgens zullen al deze negatieve ladingen mekaar afstoten, waardoor de polymeer niet verstrengeld geraakt in zichzelf, maar in tegendeel zich uitstrekt. Wanneer de poly-electrolyten zich uitstrekken, nemen ze meer plaats in waardoor ze vervolgens nog beter als solvent voor water kunnen optreden,



A polymer molecule tangled in a random coil.

A polyelectrolyte expands because it's like charges repel each other

Figuur 4.7 – Een poly-electrolyt zet zich uit doordat de gelijke ladingen elkaar afstoten

De voordelen van het gebruik van SAP kunnen in onderstaand lijst teruggevonden worden:

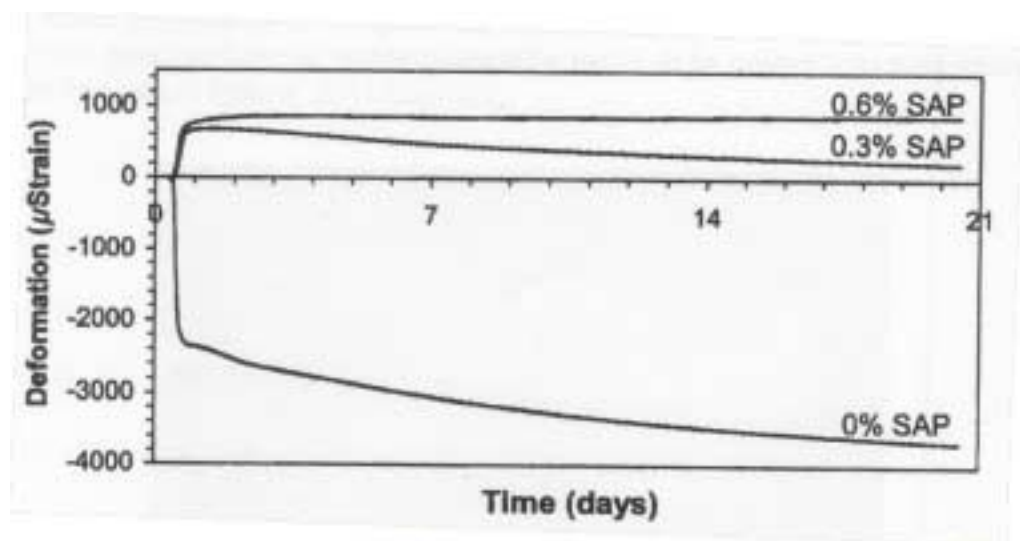
- Ze geven een verminderde autogene krimp voor het beton;
- Doordat ze door het opnemen van het water een bolvormigheid krijgen, en daardoor bolvormige holten achterlaten in het gedroogde beton, kunnen zij de rol overnemen van de luchtbelvormers, die het beton moeten beschermen tegen vorst-dooicyclusen;
- Door het behoud van de hogere interne relatieve vochtigheid in het beton bestaat er een mogelijkheid dat er een hogere hydratatiegraad van het cement bekomen wordt. Zodoende zal dit de druksterkte van het beton op langere termijn gunstig beïnvloeden.

4.4.5.2. Voorafgaande autogene krimpmetingen

Jensen & Hansen [41] hebben twee soorten superabsorberende polymeren gebruikt die zich onderscheiden door de vorm en de grootte van de deeltjes en hun absorptievermogen:

- SAP type A: bolvormige deeltjes, gemiddelde diameter 200 μm ;
- SAP type B: vermalen deeltjes, grootte van 125 tot 250 μm ;

Ze hebben aangetoond dat de toevoeging van 0,3% SAP in cementgewicht, de autogene krimp van een cementspecie met een W/C –factor van 0,30 met 20% silicarook in cementgewicht, volledig tenietdoet. De interne curing vertaalt zich door een zwelling tijdens de eerste uren van hydratatie (zie Fig 4.8). Het sterkteverlies gemeten op een mortel met 0,6% SAP in cementgewicht bedraagt 19% [29].



Figuur 4.8 – Resultaten verkregen door Jensen & Hansen [29]

Gebaseerd op deze waarnemingen halen we uit [29] een studie waarbij men tracht de autogene krimp te beperken door toevoeging van SAP. Er wordt vertrokken van volgende referentiesamenstelling:

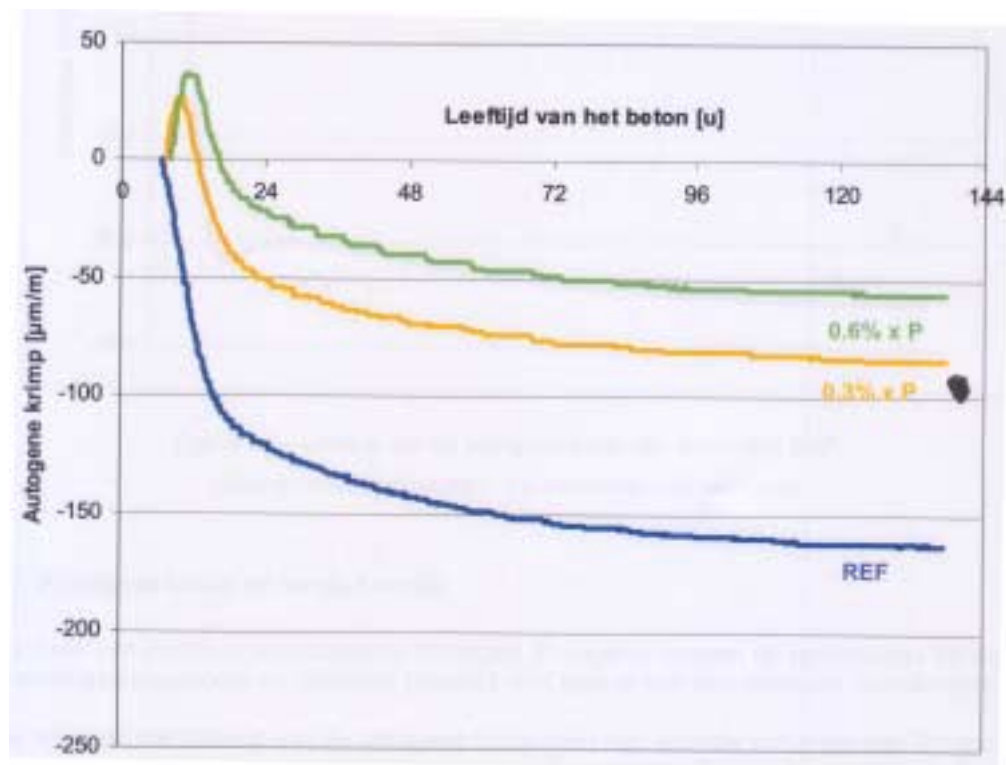
Samenstelling	Ref
Porfier 2/7 [kg/m^3]	547
Porfier 7/14 [kg/m^3]	509
Zand 0/2 [kg/m^3]	151
Zand 0/5 [kg/m^3]	604
CEM I 52.5 R HSR LA [kg/m^3]	428
Aanmaakwater [kg/m^3]	149
Superplastificeerder [kg/m^3]	4
Silicafume [kg/m^3]	23
SAP [kg/m^3]	0
W/P [-]	0,33

Tabel 4.5 – De betonsamenstelling van het referentiemengsel

Vervolgens worden op bovenstaande referentiesamenstelling twee varianten gemaakt:

- Een volkomen gelijkaardige samenstelling waarbij 0,3% SAP ($1,30 \text{ kg/m}^3$) in cementgewicht wordt toegevoegd en een hoeveelheid nabehandelingwater van 9 kg/m^3 ;
- Een volkomen gelijkaardige samenstelling waarbij 0,6% SAP ($2,60 \text{ kg/m}^3$) in cementgewicht wordt toegevoegd en een hoeveelheid nabehandelingwater van 18 kg/m^3 ;

Onderstaande grafiek geeft de resultaten bekomen met de meetmethode op de verticale. Men ziet een autogene zwelling van bij de binding van het beton tot een leeftijd van ongeveer 12 uur. Vervolgens begint de autogene krimp zich te ontwikkelen. De vorm van de curve is in overeenstemming met de resultaten bekomen op mortel door Jensen & Hansen (zie Fig. 4.8). Na 6 dagen constateert men een vermindering van de autogene krimp in de orde van 50% en 65% na de toevoeging van respectievelijk 0,3% en 0,6% SAP in poedergewicht.



Figuur 4.9 – Verloop van de autogene krimp van beton met SAP

Een volledige reductie van de autogene krimp wordt niet bekomen. Bij onze experimenten (zie 7.3.1. *Vervanging van de normale granulaten door de SAP-korrels*) zullen we een grotere hoeveelheid nabehandelingwater toevoegen (30, 40 en 50 kg/m^3). Deze hoeveelheden leunen dicht aan bij de waarden bekomen in 4.4.3.2. *Model van Powers*.

Laten we nog tot slot het druksterkteverlies vermelden door het toevoegen van deze superabsorberende polymeren:

Type	Druksterkte na 28d [MPa]	Druksterkte na 28d [%]
REF	106	100
0,3% x P	98,8	93
0,6% x P	92,6	87

Tabel 4.6 – Druksterkte na 28 dagen

We constateren een snelle druksterkteontwikkeling. Men stelt bovendien vast dat de druksterkte met de mengsels met een gedeeltelijke vervanging door SAP-korrels, 0,3% P en 0,6% P in absolute waarde altijd groter blijft dan 90 MPa na 28 dagen. De krimpreductie is dus minimaal.

4.4.6. Met behulp van verzadigde gerecycleerde granulaten

Het gebruik van gerecycleerde materialen ter beperking van de autogene krimp van hoge-prestatie-beton is een vrij recent onderwerp [43].

Hoewel ze een relatief hoog absorptievermogen hebben, zijn gerecycleerde materialen niet echt efficiënt als het gaat om een interne nabehandeling te verwezenlijken. Het cementpasta-gedeelte van de gerecycleerde granulaten hebben een typisch fijne en dichte poriënstructuur welke moeilijk water kunnen voorzien aan het hydraterende cement op jonge leeftijd. De stenen gedeeltes van deze gerecycleerde materialen kunnen wel degelijk water bevatten maar zijn bedekt door de cementdeeltjes, welke ook aanwezig zijn op deze soort van granulaten, en deze laatste belemmeren zo het uitwisselen van water. Zowel de kinematische als de thermodynamische beschikbaarheid van water in gerecycleerde granulaten is belemmerd [25].

Enkele belangrijke opmerkingen betreffende de gerecycleerde granulaten:

- Ze zijn minder bruikbaar dan lichte granulaten wat betreft de beperking van de autogene krimp;
- Ze hebben een averechts effect op de mechanische eigenschappen van het beton, zoals bijvoorbeeld een verlaagde E-modulus;
- Toch hebben sommige voorgaande experimenten hoopgevende resultaten opgeleverd, wat het voor ons interessant maakt om verder onderzoek te verrichten.

4.5. Conclusie

Hoge-prestatie-beton is sterk onderhevig aan autogene krimp. In dit deel werd kort besproken op welke manier we de autogene krimp, welke een gevolg is van de zelfdroging van het beton, kunnen reduceren. Drie mogelijkheden werden voorgesteld, namelijk:

- Het toevoegen van met water verzadigde **lichte granulaten** aan de betonmengeling.
- Het toevoegen van **super absorberende polymeren** aan het mengsel.
- Het toevoegen van met water verzadigde **gerecycleerde granulaten** aan de betonmengeling.

Het manipuleren van het beton op deze manier, staat beter gekend als 'internal curing'.

Hoofdstuk 5 – Experimentele resultaten van het BHP

Vanaf nu gaan we daadwerkelijk over tot het maken van beton en testen we hoe de bovenstaand besproken materialen de autogene krimp van een beton kunnen beperken. Hiervoor moeten we eerst de autogene krimp bepalen van een referentiebeton.

Als referentiebeton zullen we gebruik maken van een hoge-prestatie-beton (BHP). Deze betonsoort heeft de neiging om op jonge leeftijd een aanzienlijke autogene krimp te bewerkstelligen.

5.1. De gekozen BHP samenstelling

Om de vergelijking met de bekomen resultaten uit [3,28,29] mogelijk te maken, hebben we geopteerd voor een betonsamenstelling die niet al te veel verschilt van de referentiesamenstelling gebruikt in voorgaand vernoemde referentie. In wat volgt zullen we het beton waarmee we de vergelijking trekken volgende naam geven: VGL-beton. De betonsoort dat wij als referentie beschouwen heeft een W/C -factor van 0,31 en een cementgehalte van 475 kg/m³. Het silicafume gehalte bedraagt ongeveer 5% van het gehalte aan cementdeeltjes. Deze betonsoort valt te plaatsen onder de categorie “hoge-prestatie-beton (BHP)”. De samenstelling is hieronder gegeven.

Porfier 2/6,3 [kg/m ³]	482	$\rho_w = 2600 \text{ kg/m}^3$	$V = 482/2600 = 0,185 \text{ m}^3$
Porfier 6,3/20 [kg/m ³]	677	$\rho_w = 2600 \text{ kg/m}^3$	$V = 677/2600 = 0,26 \text{ m}^3$
Zand 0/5 [kg/m ³]	588	$\rho_w = 2550 \text{ kg/m}^3$	$V = 588/2550 = 0,231 \text{ m}^3$
CEMI 52.5R [kg/m ³]	475	$\rho_w = 3100 \text{ kg/m}^3$	$V = 475/3100 = 0,153 \text{ m}^3$
Silicafume [kg/m ³]	25	$\rho_w = 2000 \text{ kg/m}^3$	$V = 25/2000 = 0,013 \text{ m}^3$
Aanmaakwater [kg/m ³]	150	$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$	$V = 150/1000 = 0,15 \text{ m}^3$
Superplastificeerder [kg/m ³]	2,5	$\rho_w = 1050 \text{ kg/m}^3$	$V = 2,5/1050 = 0,002 \text{ m}^3$

$$\Sigma = 1 \text{ m}^3$$

Tabel 5.1 – De referentiebetonsamenstelling

Van deze referentiesamenstelling zullen we drie mengelingen maken teneinde een goede vergelijkingsbasis voor de betonsoorten, onderworpen aan de interne nabehandeling, te bekomen. Qua naamgeving gaan we het niet al te ver gaan zoeken: de referentiesamenstellingen heten respectievelijk REF001, REF002 en REF003.

5.2. *Bespreking van de gekozen bestanddelen*

5.2.1. **Porfier**

De porfierkorrels worden gekozen omwille van hun hogere sterkte dan bijvoorbeeld die van kalksteenkorrels.

Porfier is een stollingsgesteente van eruptieve oorsprong afkomstig van het Cambro-Siluur [44]. Bijgevolg komt dit gesteente zelden voor aan de oppervlakte. Het is meestal bedekt door leperiaanse klei -en zandafzettingen, op hun beurt bedolven onder leem, zand en grindafzettingen van het moderne tijdperk.

Mineralogisch is porfier een kwartshoudend dioriet (dus hogere sterkte-eigenschappen dan kalksteen), waarin de meestal grijze kleurtinten te wijten zijn aan de verschillende veldspaatkristallen [4].

Wij maken gebruik van porfier 2/6,3 en porfier 6,3/20 met andere woorden, de porfierstenen hebben afmetingen die gelegen zijn tussen de 2 mm en de 20 mm.

5.2.2. **Zand**

Zand is een steenachtig granulaat ontstaan door de natuurlijke desintegratie van gesteenten met korrelafmetingen die kleiner zijn dan 2 tot 5 mm. Rivierzand (Rijnzand) is het meest courant in België voor het gebruik in beton.

Het fijne zand dient zo goed mogelijk de holten tussen de grove granulaten (porfier) op te vullen. De holtes tussen de zandkorrels zullen op hun beurt opgevuld worden door de fijnere cement - en silicafume – korrels. Teneinde een voldoende dichte en goed verwerkbare betonstructuur te bekomen, dient men dus een voldoende hoeveelheid fijn materiaal te voorzien [4].

De zandsoort die wij zullen hanteren is zand 0/5, wat er op neerkomt dat de zandkorrels afmetingen hebben die tussen de 0 en de 5 mm gelegen zijn.

5.2.3. **Cement**

Cement is een hydraulisch bindmiddel. Bij de aangenomen betonsamenstellingen maken we gebruik van Portlandcement. Dit wordt verkregen door het fijnmalen van portlandklinker, met toevoeging van een kleine hoeveelheid calciumsulfaat als bindingsregelaar.

Er wordt bovendien in drie sterkteklassen en twee verhardingstypes voorzien. CEM I 52,5 R wil zoveel zeggen als: $f_{\text{cem},28} \geq 52,5 \text{ N/mm}^2$ en we hebben een snelle verharding en een hogere uiteindelijke sterkte aangezien minder niet-gehydrateerd cement overblijft. De nadelige kant van de hoge sterkte van dit cement is de grotere krimp. In principe zal een cement dat vlugger verhardt ook vlugger krimpen.

Cement is de duurste component van het beton en bovendien neemt de krimp van het verhard beton toe met toenemende cementhoeveelheid [4].

5.2.4. Silicafume Rheomac SF 140

Silicafume is een bijproduct van de vervaardiging van silicium en ferrosiliciumlegeringen. De combinatie van een hoog SiO_2 gehalte, de amorfe toestand en de extreem hoge fijnheid zorgen voor een zeer hoge puzzolane activiteit. Silicafume vertoont volgende interessante eigenschappen:

- Een bijzonder grote invloed op de druksterkte: 1 kg silica fume levert een even hoge sterkte bijdrage als 2-3 kg cement;
- Men bekomt een veel kleinere permeabiliteit, dus een grotere samenhang;
- Een verbeterde weerstand tegen chemische aantasting;
- Een verminderde neiging tot bleeding en ontmenging.

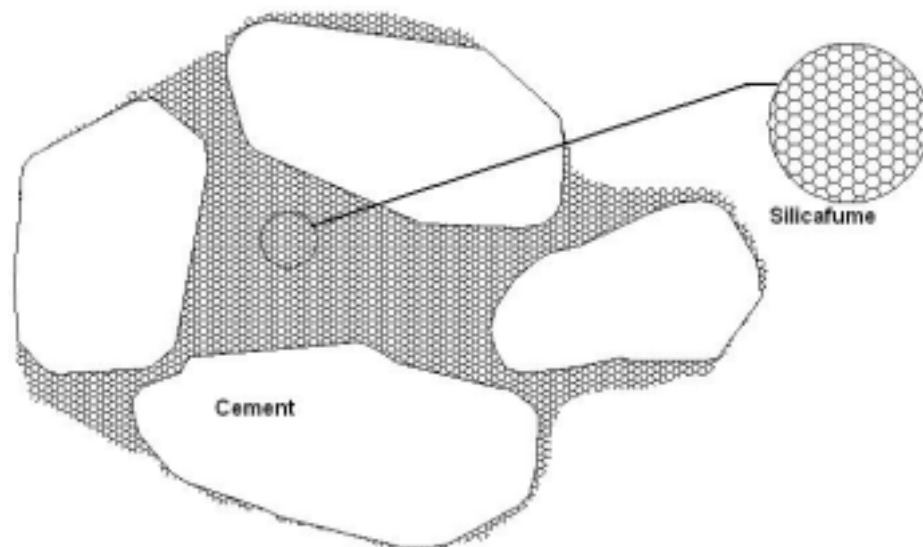
De grotere samenhang heeft tot gevolg dat de betonspecie minder goed verwerkbaar wordt. Men is dus genoodzaakt meer aanmaakwater of superplastificeerder toe te voegen teneinde een gelijkblijvende consistentie te bekomen.

Wegens de geringere uitzwetting bestaat een grotere neiging tot plastische krimp [4].

Rheomac SF 140 is een zeer fijne puzzolane hulpstof in poedervorm en bestaat uit meer dan 90% amorf SiO_2 met een zeer groot specifiek oppervlak. De werking ervan berust op een micro-vuleffect en een puzzolaan effect waardoor een veel dichtere en stevige matrix ontstaat. Tevens verbetert het aanzienlijk de eigenschappen van de betonspecie en van het verhard beton:

- Verbeterde samenhang;
- Verbeterde hechting aan wapening;
- Verminderde kans op waterafscheiding en ontmenging;
- Verhoogde begin –en eindsterkte;
- Hogere waterdichtheid;
- Hogere duurzaamheid;
- Hogere E-modulus;
- ...

Omwille van hun groter fijnheid kunnen de silicafumedeeltjes de holten vullen tussen de grovere cementdeeltjes, vooral wanneer deze goed gedefloculeerd werden door een geschikte hoeveelheid superplastificeerder. Een kleine schets verduidelijkt hetgeen hierboven geformuleerd werd:



Figuur 5.1 – Het opvuleffect van de silicafume-korrels tussen de cementkorrels [3]

5.2.5. Superplastificeerder Glenium 51

‘Een hulpstof die toelaat om voor eenzelfde verwerkbaarheid het watergehalte van beton te verminderen of bij eenzelfde watergehalte de verwerkbaarheid te verhogen [4]’.

Superplastificeerders zijn lange kettingvormige organische stoffen met een zeer hoog moleculair gewicht, die geadsorbeerd worden op de cementdeeltjes en een sterke negatieve lading geven aan deze cementdeeltjes waardoor er een onderlinge afstoting ontstaat en het samenvlokken van de cementdeeltjes voorkomen wordt. De vloeibaarheid en de verwerkbaarheid neemt hierdoor toe [4].

Glenium 51 is een toevoegmiddel dat gebaseerd is op gewijzigd polycarboxylether. Het heeft een laag alkaligehalte en is vrij van chloride. Het grote onderscheid tussen Glenium 51 en de andere superplastificeerders is dat naast het vormen van een elektrostatische barrière rond de cementdeeltjes tevens een fysische barrière gevormd wordt, zodat het samenvlokken van de cementdeeltjes extra voorkomen wordt. De polycarboxylether zorgt daarvoor. Met behulp van de superplastificeerder kan de hoeveelheid water gereduceerd worden met 15 tot 25% bij gelijkblijvende verwerkbaarheid.

In vergelijking met traditionele superplastificeerders verbetert Glenium 51 de fysische eigenschappen en duurzaamheid van het beton:

- Verhoogde druk –en treksterkte;
- Verbeterde E-modulus;
- Hogere adhesie voor gewapend en voorgespannen beton;
- Beter weerstand tegen carbonatatie;
- Beter weerstand tegen agressieve omgevingen;
- ...

Uit experimentele resultaten halen we dat men door het toevoegen van een hogere hoeveelheid superplastificeerder een kleiner krimp en vooral kleiner krimpscheuren van het beton bekomt [3].

Bij het maken van het beton zal de hoeveelheid toegevoegde Glenium 51 proefondervindelijk vastgesteld moeten worden. Pas als de verwerkbaarheid van het beton aanvaardbaar is, welke met de slump test (zie 5.3.2. *Bepaling van de consistentie*) geverifieerd kan worden, dient men geen Glenium 51 meer toe te voegen.

5.2.6. Aanmaakwater

De kwaliteit van het aanmaakwater is belangrijk voor de uiteindelijke kwaliteit van het ermee vervaardigd beton. Onzuiverheden moeten zoveel mogelijk vermeden worden. Daarom stelt men dat aanmaakwater voor beton drinkbaar water moet zijn, welke dan meestal minder dan 1000 ppm vaste stoffen bevat.

5.3. Mengprocedure, proefmetingen en vervaardiging van proefstukken

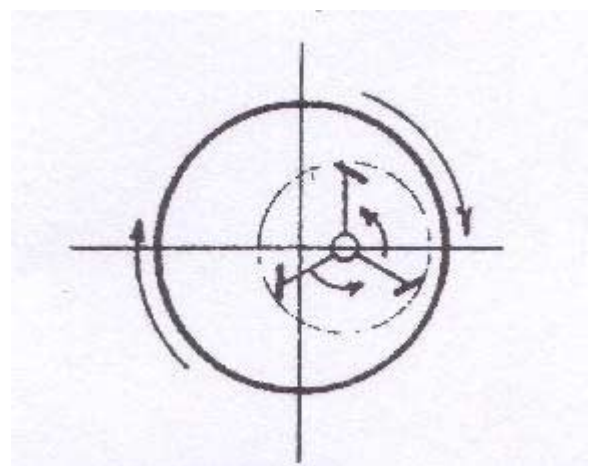
In wat volgt zullen we chronologisch de ondernomen stappen noteren, met andere woorden vertrekkende van het plaatsen van de droge granulaten in de mengkuip tot op het moment dat de laatste drukproeven uitgevoerd zijn.

5.3.1. Stap 1: Aanmaken van het mengsel

De vervaardiging van het beton gebeurt door middel van een mengkuip, van het type menger-roerder met verticale as. De menging gebeurt in een draaikuip door middel van schoepen die zich tegen de stroom in verplaatsen.



Figuur 5.2 – De mengkuip in labo Magnel



Figuur 5.3 – De bewegingen tijdens de menging

De grondstoffen worden van bovenuit in de kuip gestort. Eerst en vooral worden de droge componenten in de mengkuip gebracht, volgorde granulaten -> zand -> cement -> silicafume, en vervolgens droog voorgemengd

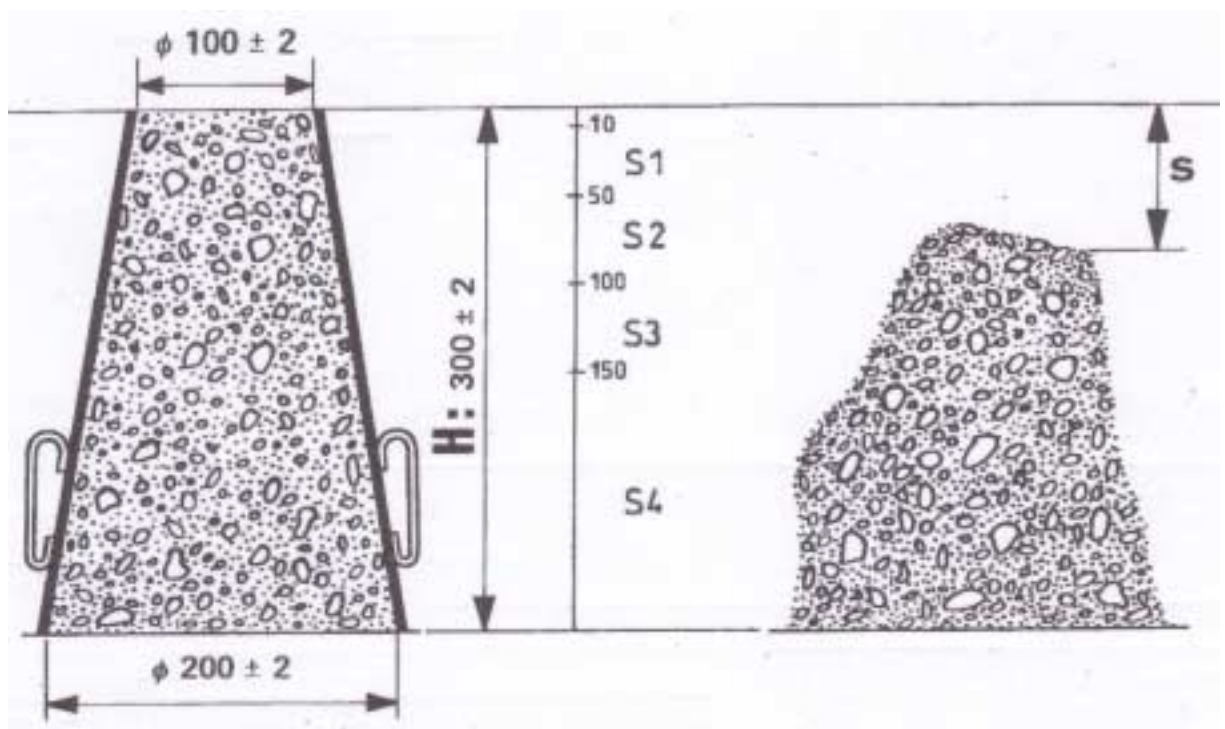
(gedurende maximaal 1 minuut). Opdat het cement en de silicafume zich niet zouden vastzetten op de wanden van de kuip zullen we dit bestanddeel niet als eerste toevoegen. Deze droge bestanddelen worden vervolgens gedurende 1 minuut droog gemengd. Vervolgens wordt het aanmaakwater aan de mengeling toegevoegd, en start de 4 minuten durende vermenging. Tijdens de menging (in het begin van de 4 minuten durende menging) wordt de superplastificeerder toegevoegd, om zo tot een aanvaardbare consistentie te komen.

5.3.2. Stap 2: Bepalen van de consistentie

Aangezien de consistentie van de betonspecie afneemt in de tijd, wordt ze onmiddellijk na het ledigen van de mengkuip bepaald.

De maat voor de consistentie van het beton zullen we conventioneel bepalen aan de hand van de zetmaat bepaald met de Abrams-kegel. Dit wordt ook wel de slump test genoemd. Ze wordt uitgevoerd volgens NBN B15-232.

Onderstaande figuren geven een duidelijke indicatie van hoe deze proefmetingen in elkaar zitten en hoe men de consistentie van het verse beton gemakkelijk kan bepalen:



Figuur 5.4 – Bepaling van de zetmaat



Figuur 5.5 – De Abrams-kegel



Figuur 5.6 – De slump-test

Na het uitvoeren van de slump test kunnen we het gemaakte beton categoriseren in verschillende zetmaatklassen [3]:

<u>KLASSE</u>	<u>ZETMAAT (in mm)</u>
S1	10-45
S2	50-95
S3	100-150
S4	>150

Tabel 5.2 – Consistentieklassen

Indien de bekomen resultaten niet bevredigend zijn, met name als de zetmaat minder dan 10mm bedraagt, dan zal er een kleine hoeveelheid Glenium 51 aan de betonsamenstelling toegevoegd worden en zal de menging nog even kort hervat worden.

5.3.3. Stap 3: Vullen van de autogene krimpmeetbuisjes

5.3.3.1. De autogene krimpmetingen

De teflonbuisjes (zie Fig 3.3.) worden met de betonspecie gevuld en enkele seconden getrild op een triltafel, om zo een goede verdichting van het beton te verzekeren. Aangezien de autogene krimp nagenoeg ogenblikkelijk begint is het van groot belang de krimpmetingen zo snel mogelijk aan te vatten.

5.3.3.2. Meting van de temperatuur

In één van de buisjes wordt eveneens een thermokoppel aangebracht om de inwendige temperatuur van het beton tengevolge van de hydratatie in het buisje te kennen. Op deze manier kunnen de bekomen krimpresultaten gecorrigeerd worden op de temperatuur (zie eveneens 3.6. *De problemen die kunnen optreden bij autogene krimpmetingen*).

Er zal in het beton een temperatuursstijging plaats vinden. Deze is het gevolg van de inwendige hydratatiereactie van het beton. Het temperatuurverloop in het beton dient bijgevolg continu geregistreerd te worden door middel van een thermokoppel dat over de volledige hoogte van een teflonbuis geplaatst is. Zo kan de krimpmeting gecorrigeerd worden met de waarde van de thermische krimp, die gegeven wordt door volgende formule:

$$\varepsilon_{therm} = \alpha_{therm} * \Delta T$$

$$\alpha_{therm} = 12 * 10^{-6} \frac{m}{m} = 12 \frac{\mu m}{m}$$

Met: α_{therm} = de thermische uitzettingscoëfficiënt van het beton.

Het blijkt dat de in het proefstuk gemeten temperatuursstijging vrij gering is. Het geringe temperatuursverschil dat rond de 3°C ligt, wordt verklaard door:

- De kleine afmetingen van de proefopstelling (zie 3.4.2. *Proefopstelling: de teflonbuis*) in vergelijking met de grote klimaatkamer, waar de proefopstellingen worden bewaard en de metingen worden uitgevoerd;
- De proefopstelling is niet voorzien van een thermische isolatie. De hydratatiewarmte kan bijgevolg door de wanden van de vorm heen verdwijnen.

Een additief effect van de thermische en de autogene vervorming blijkt echter te simplistisch te zijn, aangezien de thermische uitzettingscoëfficiënt α_{therm} niet constant is. Deze factor neemt af voor de zetting optreedt en neemt toe ten gevolge van de zelfdroging.

5.3.4. Stap 4: Bepalen van het volumegewicht en het luchtgehalte

Als voorlaatste stap moeten we nog het volumegewicht en het luchtgehalte van het verse verdichte beton bepalen.

5.3.4.1. Volumegewicht

Met het aangemaakt beton vult men een recipiënt met een gekend volume (8 liter) en verdicht men het vers beton. De verdichting gebeurt door middel van een trilnaald. Door weging van de massa aan vers beton kan men de volumemassa ervan bepalen volgens (NBN B15-213):

$$\rho_{vers\ beton} = \frac{M_{vers\ beton}}{V_{recipiënt}}$$

5.3.4.2. Luchtgehalte



Figuur 5.7- De luchtmeter

Het effectief luchtgehalte van licht granulaten beton bedraagt 2-3 % en verschilt weinig van dat van normaal beton. Toch zullen we het luchtgehalte van elke betonspecie meten met behulp van een luchtmeter en volgens NBN B15-224.

5.3.5. Stap 5: Proefstukken voor de druksterkteproeven

Tot slot worden per mengeling 4 proefstukken gevuld met de verse, verdichte betonspecie met de bedoeling er na 1, 7 en 28 dagen drukproeven op uit te voeren.

In de norm NBN B15-001 zijn voor de kwaliteitscontrole van beton controlekubussen voorzien die bewaard worden in geïdealiseerde omstandigheden. Het laboratorium Magnel beschikt over een bewaarkamer met relatieve vochtigheid > 90 %.

De controlekubussen die in genormaliseerde en optimale omstandigheden bewaard worden, worden vervolgens aan drukproeven onderworpen om de intrinsieke kwaliteit van het beton te bepalen.

De druksterkte van beton wordt gemeten door drukproeven uit te voeren op in kubussen vervaardigde proefstukken, die een ribbe van 15 cm hebben. De proefstukken worden na 1 dag ontkist en onderworpen aan drukproeven op respectievelijk 1, 7 en 28 dagen. Het proefstuk wordt daarvoor tussen de drukplaten van de drukpers geplaatst en onderworpen aan een volgens een voorgeschreven snelheid toenemende drukkracht. De druksterkte wordt bekomen door de maximale drukkracht te delen door de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de kubus ($15 \times 15 \text{ cm}^2$).

Voorafgaandelijk moet men wel na gaan of de vlakken die in contact komen met de drukplaten van de proefmachine voldoen aan de vlakheideisen [4].

De uitvoering van de drukproef gebeurt volgens NBN B15-220.



Figuur 5.8 – 4 kubussen ter bepaling van de druksterkte op 1, 7 en 28 dagen

5.4. Bekomen resultaten op het referentiebeton

5.4.1. Het verse beton: zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte

Op de niet verharde betonspecie werden volgende resultaten bekomen:

	REF 001	REF 002	REF 003	eenheid
Hoeveelheid glemium 51	150	150	150	cc
	3,3	3,3	3,3	l/m ³
Zetmaat	8	6,5	4	cm
Massa per 8 liter	19,86	19,79	19,2	kg
Volumegewicht	2482,5	2473,75	2400	kg/m ³
Luchtgewicht	2,1	1,5	1,8	%

Tabel 5.3 – Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte van het referentiebeton

Om het volumegewicht te bepalen, gebruiken we volgende formule:

$$\text{Volumegewicht} = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}}$$

Bijvoorbeeld:

$$2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{19,2 \text{ kg}}{0,008 \text{ m}^3}$$

Uit deze resultaten kunnen we volgende korte besluiten trekken:

- De mengsels REF001 en REF002 behoren tot de consistentieklasse S2, terwijl REF003 nog net tot de klasse S1 behoort. Eenvoudigheidshalve kunnen we de referentiesamenstelling onderverdelen onder de zetmaatklasse S2.
- Het VGL-beton heeft een veel grotere zetmaat, die draait rond de 18cm (consistentieklasse S4). Op gebied van verwerkbaarheid kunnen we ons referentiebeton niet vergelijken met het VGL-beton.
- Het volumegewicht (2475 kg/m^3) en het luchtgehalte (1,7%) van het VGL-beton zijn anderzijds wel nagenoeg identiek aan onze bekomen referentiewaarden.

5.4.2. Autogene krimpmetingen

5.4.2.1. Analyse van de meetgegevens

Voor het verdere verloop van deze studie zullen we volgende tekenconventie aannemen: krimp wordt negatief genomen, uitzetting wordt positief genomen.

De methode van de analyse van de meetgegevens betreffende de bepaling van de autogene krimp wordt geïllustreerd aan de hand van de bekomen LVDT-waarden van betonmengsel REF003.

Tijd (h)	Meetwaarde (μm)	Temperatuur ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta T (^{\circ}\text{C})$	Lengteverandering (μm)	Autogene krimp ($\mu\text{m/m}$)	Gecorrigeerde krimp ($\mu\text{m/m}$)	Grafiekwaarden ($\mu\text{m/m}$)
0	105,301086	17,7	0	0	0	0	114,68336
0,5	71,99787	17,782101	0,082101	-33,303216	-111,01072	114,29476	228,97812
1	66,190269	18,155642	0,455642	-39,110817	-130,36939	148,59507	263,27843
2	87,912748	18,622568	0,922568	-17,388338	-57,96112667	94,86384667	209,5472067
3	111,546587	18,809338	1,109338	6,245501	20,81833667	23,55518333	138,2385433
4	129,5599	19,058365	1,358365	24,258814	80,86271333	-26,52811333	88,15524667
5	144,872746	19,182878	1,482878	39,57166	131,9055333	-72,59041333	42,09294667
6	159,368358	19,338522	1,638522	54,067272	180,22424	-114,68336	0
7	174,333192	19,307392	1,607392	69,032106	230,10702	-165,81134	-51,12798
8	188,198693	19,618677	1,918677	82,897607	276,3253567	-199,5782767	-84,89491667
9	200,212374	19,712063	2,012063	94,911288	316,37096	-235,88844	-121,20508
10	213,95015	20,178988	2,478988	108,649064	362,1635467	-263,0040267	-148,3206667
11	226,36955	20,396887	2,696887	121,068464	403,5615467	-295,6860667	-181,0027067
12	237,659056	20,645914	2,945914	132,35797	441,1932333	-323,3566733	-208,6733133
13	242,927216	21,019455	3,319455	137,62613	458,7537667	-325,9755667	-211,2922067
14	246,062941	21,019455	3,319455	140,761855	469,2061833	-336,4279833	-221,7446233
15	247,756209	21,268482	3,568482	142,455123	474,85041	-332,11113	-217,42777
16	248,289277	21,29961	3,59961	142,988191	476,6273033	-332,6429033	-217,9595433
17	250,296077	21,455254	3,755254	144,994991	483,3166367	-333,1064767	-218,4231167
18	253,964702	21,050583	3,350583	148,663616	495,5453867	-361,5220667	-246,8387067
19	257,225628	20,894941	3,194941	151,924542	506,41514	-378,6175	-263,93414
20	259,545851	20,459145	2,759145	154,244765	514,1492167	-403,7834167	-289,1000567
21	261,615228	20,396887	2,696887	156,314142	521,04714	-413,17166	-298,4883
22	263,120191	20,085604	2,385604	157,819105	526,0636833	-430,6395233	-315,9561633

23	264,781926	20,085604	2,385604	159,48084	531,6028	-436,17864	-321,49528
24	265,879291	19,898832	2,198832	160,578205	535,2606833	-447,3074033	-332,6240433
36	273,623273	19,463036	1,763036	168,322187	561,0739567	-490,5525167	-375,8691567
48	277,887008	19,151751	1,451751	172,585922	575,2864067	-517,2163667	-402,5330067
60	281,178779	19,151751	1,451751	175,877693	586,2589767	-528,1889367	-413,5055767
72	283,561359	19,058365	1,358365	178,260273	594,20091	-539,86631	-425,18295
84	285,19151	19,120623	1,420623	179,890424	599,6347467	-542,8098267	-428,1264667
96	287,009752	19,058365	1,358365	181,708666	605,6955533	-551,3609533	-436,6775933
108	288,984713	19,027237	1,327237	183,683627	612,2787567	-559,1892767	-444,5059167
120	290,364041	18,964981	1,264981	185,062955	616,8765167	-566,2772767	-451,5939167
132	291,147728	19,027237	1,327237	185,846642	619,4888067	-566,3993267	-451,7159667
144	292,370301	18,996109	1,296109	187,069215	623,56405	-571,71969	-457,03633

Tabel 5.4 – Analyse van de meetgegevens (REF003)

We zullen in het kort bespreken hoe we aan de overeenkomstige kolomwaarden komen:

- De meetwaarden (in μm) zijn de door de LVDT-meter geregistreerde waarden. Dit apparaat noteert de inzakking van het teflonplaatje (zie 3.4.2. *Proefopstelling: de teflonbuis*) binnen een tijdspanne van 0 tot 144 h;
- De temperatuursmetingen gebeuren met behulp van een thermokoppel dat de temperatuur op elk tijdstip bepaalt, en wordt in $^{\circ}\text{C}$ uitgedrukt;
- De vierde kolom geeft de temperatuursverschillen ten opzichte van de temperatuur op tijdstip $t = 0\text{h}$ en wordt eveneens uitgedrukt in $^{\circ}\text{C}$. Het temperatuursverschil op elk willekeurig tijdstip i wordt bepaald aan de hand van volgende formule:

$$\Delta T_{t=i} = T_{t=i} - T_{t=0}$$

- Uiteindelijk willen we weten hoeveel het teflonplaatje is gezakt (lees: hoeveel het beton is gekrompen) ten opzichte van de eerste meetwaarde op tijdstip 0. Deze resultaten, uitgedrukt in μm , komen terecht in de 5^{de} kolom en worden op volgende manier bekomen:

$$\text{lengteverandering}_{t=i} = \text{meetwaarde}_{t=i} - \text{meetwaarde}_{t=0}$$

- De autogene krimp (6^{de} kolom) is een dimensieloze parameter ($\mu\text{m}/\text{m}$) die we bekomen door de lengteverandering uit de 5^{de} kolom te delen door de lengte van het teflonmeetbuisje, die een lengte heeft van 0,30 m:

$$\text{autogene krimp}_{t=i} = \frac{\text{lengteverandering}_{t=i}}{0,3\text{m}}$$

- Er heerst een temperatuurstijging in het beton ten gevolgen van de hydratatiereactie (zie 3.6. *Problemen die kunnen optreden*). Nu wensen we de autogene krimp nog te corrigeren op de in het beton geregistreerde temperatuur. Dit gebeurt in kolom 7 met behulp van onderstaande betrekking (de waarden worden uitgedrukt in $\mu\text{m}/\text{m}$):

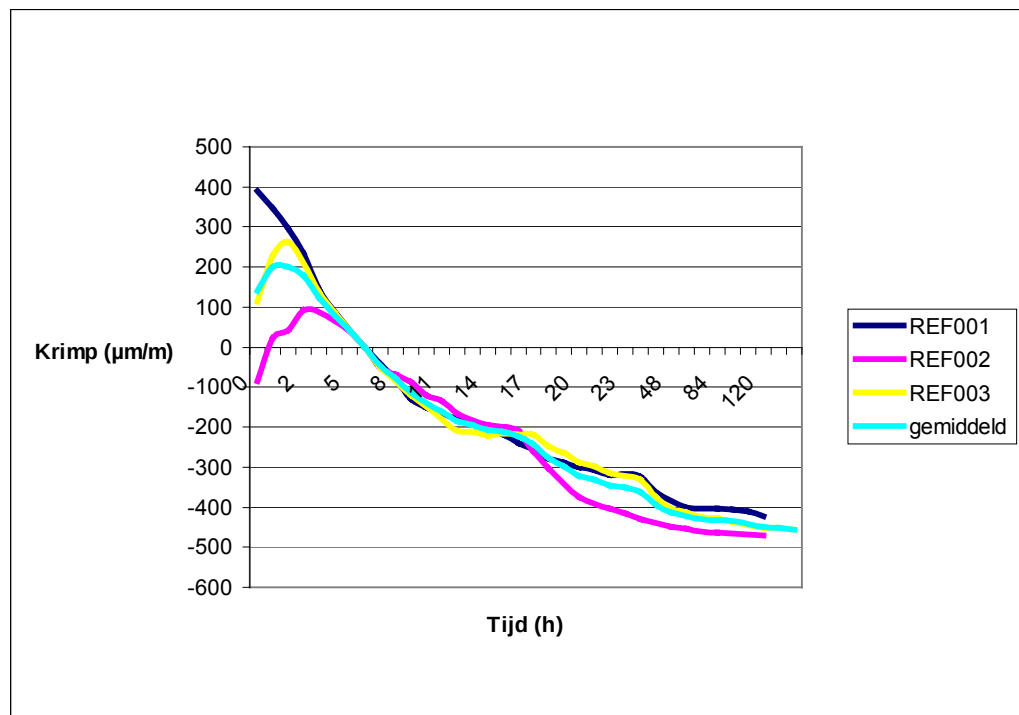
$$\text{gecorrigeerde krimp}_{t=i} = \frac{-(\text{lengteverandering}_{t=i} - \alpha_{\text{therm}} * \Delta T_{t=i})}{0,3m}$$

- α_{therm} is de thermische uitzettingscoëfficiënt van beton en heeft een waarde van $12 \frac{\mu m}{m \cdot ^\circ C}$;
 - Het minteken slaat op de aangenomen conventie, namelijk krimp wordt negatief genomen, uitzetting van het beton positief.
- De waarden van de 8^{ste} kolom zijn de waarden die uiteindelijk op de grafiek verschijnen. Betonspecie wordt in zijn eerste uren geconfronteerd met allerlei effecten zoals bleeding en sedimentatie. Om deze effecten deels uit te schakelen zullen we de gecorrigeerde krimp op tijdstip $t = 6h$ als referentiewaarde (lees: nulwaarde) beschouwen. Dit tijdstip komt overeen met “time-zero”, waarvoor we verwijzen naar 2.2.6.2. *Inschatting “time-zero”*. De waarden in de laatste kolom (eveneens uitgedrukt in $\mu m/m$) halen we uit volgende betrekking:

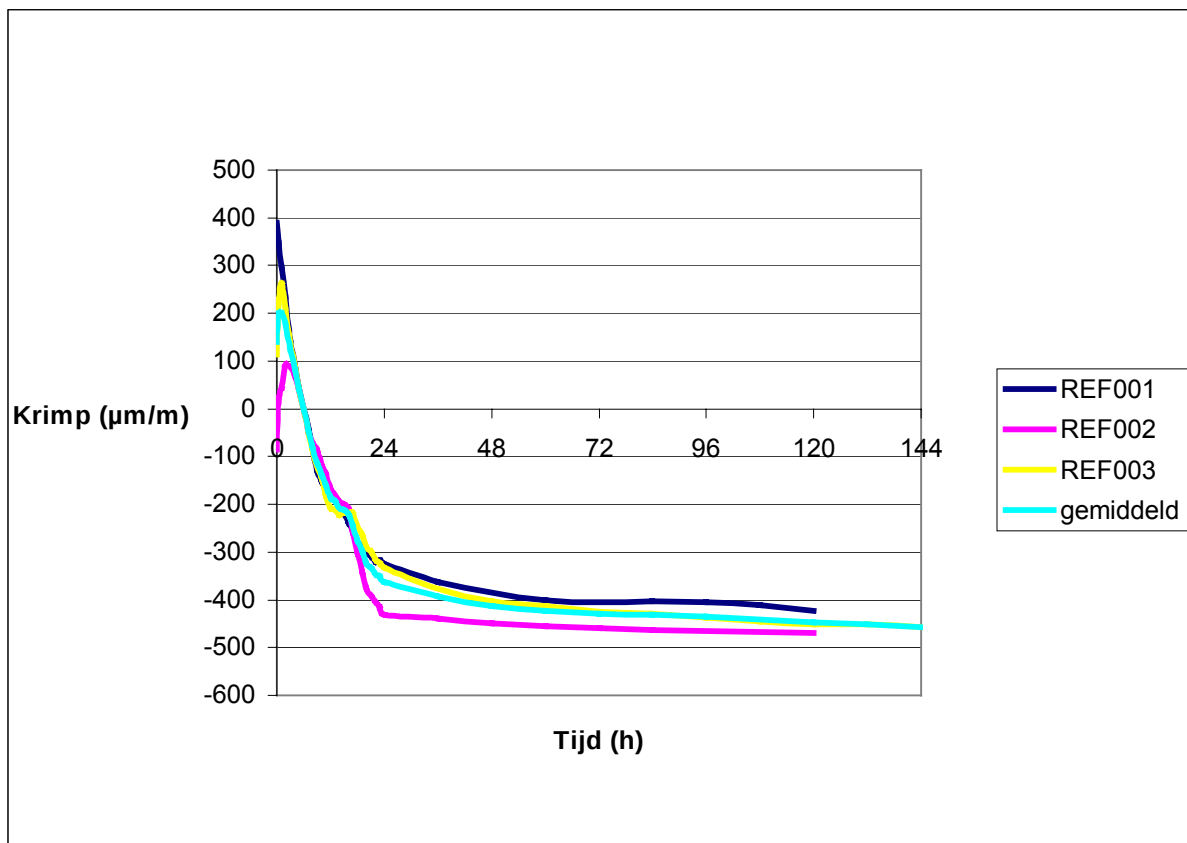
$$\text{grafiekwaarden}_{t=i} = \text{gecorrigeerde krimp}_{t=i} - \text{gecorrigeerde krimp}_{t=6h}$$

5.4.2.2. Autogene krimp van de referentie-betonsamenstelling

De volgende grafiek illustreert de bereikte resultaten op de drie referentiemengelingen: REF001, REF002 en REF003.



Figuur 5.9a – De autogene krimp van het referentiebeton, tijdsas niet op schaal



Figuur 5.9b – De autogene krimp van het referentiebeton, tijdsas op schaal

Uit deze grafiek kunnen we volgende besluiten trekken:

- De eerste uren van de metingen is het referentiebeton duidelijk onderhevig aan verschijnselen zoals bleeding, sedimentatie,... waardoor het jonge beton een zwelling kent. Doordat er eventueel een re-absorptie van het uitgezweete water optreedt, kan het beton expanderen. We noemen dit de 1^{ste} fase van de autogene krimp;
- Vervolgens, na 6h, komt de autogene krimp vlot tot ontwikkeling. Dit is de 2^{de} fase van de autogene krimp;
- Vanaf 24 h begint de curve een vlakker verloop te kennen, wat wil zeggen dat de krimp niet zo aanzienlijk meer verandert. Dit is de 3^{de} en laatste fase van de autogene krimpontwikkeling;
- De uiteindelijke gemiddelde autogene krimp bedraagt na 144h ongeveer **-450 µm/m**. Er dient opgemerkt dat de autogene krimp nog niet volledig is opgetreden: er treedt nog steeds een kleine verandering op. Stellende dat de uiteindelijke autogene krimp -450 à -500 µm/m bedraagt lijkt ons een goede aanname;
- Het verloop van de drie curven is in grote lijnen overeenkomstig;
- Het verschil tussen de autogene krimp op 120 h van REF001 (kleinste waarde) en deze van REF003 (grootste waarde) bedraagt: 50 µm/m, wat een niet onaanzienlijk bedrag is (11% van de uiteindelijke gemiddelde waarde);
- Als we kijken naar de autogene krimp van het VGL-beton, dan blijkt er totaal geen overeenkomst te zijn. Het VGL-beton kent een autogene krimp van

ongeveer 200 µm/m na 6 dagen, wat minder dan de helft is van de krimp van ons referentiebeton. Autogene krimp is een verschijnsel dat enorm kan variëren naargelang de betonsamenstelling, naargelang de meetmethode,.... Misschien werd er bij de studie van het VGL-beton gebruik gemaakt van een ander verticaal meetapparaat, van andere verwerking-analyse-formules,...? In alle geval maakt het niet zoveel uit aangezien we de vergelijking moeten maken met ons lichte granulatenbeton, SAP-beton, waarvan we zeker zijn dat bovenstaande 2 oorzaken (andere meetmethode en andere berekeningsmethode) niet van toepassing zijn;

5.4.3. Drukresultaten

Volgende waarden werden bekomen bij de opeenvolgende drukmetingen:

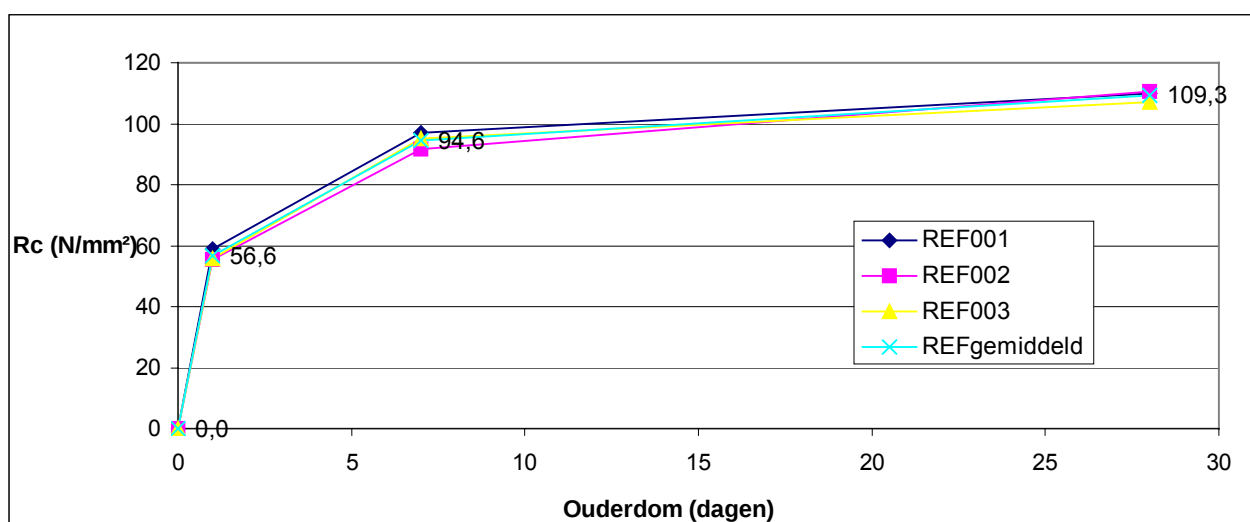
	ouderdom (d)	last (kN)	b (mm)	d (mm)	druksterkte (N/mm ²)
REF001	1	1339	150,3	151,6	58,8
	7	2215	150,2	152	97,0
	28	2509	150,1	151,1	110,63
	28	2472	149,9	150,6	109,5
REF002	1	1252	150	150,7	55,4
	7	2083	150,1	151,3	91,7
	28	2576	150,4	151,2	113,3
	28	2448	150,2	151,2	107,8
REF003	1	1260	150,3	150,5	55,7
	7	2155	150,3	150,7	95,2
	28	2406	150	150,3	106,7
	28	2436	150,1	150,6	107,8

Tabel 5.5 – De druksterktes op 1, 7 en 28 dagen van het referentiebeton

Ter bepaling van de druksterkte wordt volgende formule gehanteerd:

$$druksterkte = \frac{last}{b * d} \Rightarrow 58,8 \frac{N}{mm^2} = \frac{1339 * 10^3 N}{150,3 * 151,6 mm^2}$$

Volgende figuur verduidelijkt bovenstaande tabel. De in de figuur bijgevoegde waarden zijn de **gemiddelde** druksterktes op respectievelijk 1, 7 en 28 dagen van REF001, REF002 en REF003.



Figuur 5.10 – De ontwikkeling van de druksterkte van het referentiebeton

Op gebied van drukresultaten kunnen we volgende besluiten trekken:

- De druksterkte van het beton op 1 dag bedraagt al meer dan de helft van die van 28 dagen. We mogen dus concluderen dat we een hele snelle sterkte-evolutie van het beton op jonge leeftijd hebben. Het gebruik van Rheomac SF140, van Glenium 51 en van cement van het type “R” zijn hiervan de oorzaak;
- Enkel de waarden van de druksterkte op 7 en 28 dagen van het VGL-beton werden gegeven, namelijk 97 respectievelijk 106 MPa. Deze waarden komen goed overeen met onze bekomen gemiddelde referentiewaarden;
- De karakteristieke druksterkte na 28 dagen (f_{c28}) is groter dan 80 MPa. Aldus wordt het beton onderverdeeld in de categorie ‘beton met ultrahoge prestaties (BUHP)’;

5.5. Besluit : Het referentiebeton

Bij elk onderzoek is het van belang om de bekomen resultaten te kunnen vergelijken met elkaar. Zo ook bij de onderzoeken naar de autogene krimp. Daarom is het noodzakelijk om met een bepaalde referentiebetonsamenstelling te vertrekken, van waaruit we kunnen zien of de manipulatie van ons beton (door middel van toevoeging van lichte granulaten, superabsorberende polymeren, ...) een verbetering, dan wel een verslechtering is. Ter afsluiting van dit deel vatten we nog kort even de bekomen gemiddelde druk en autogene krimpresultaten na 144 h samen.

Autogene krimp	-450 $\mu\text{m/m}$
Druksterkte (1d)	56,6 MPa
Druksterkte (7d)	94,6 MPa
Druksterkte (28d)	109,3 MPa

Tabel 5.5 – Samenvatting: de autogene krimp en de druksterkte van het referentiebeton

Hoofdstuk 6 – Experimentele resultaten van het lichte granulaten beton LGB

6.1. Inleiding en principe

Hoge-prestatie-beton met lage W/C –factor wordt gekarakteriseerd door een hoge scheurgevoeligheid ten gevolge van de grote autogene krimp. Zoals we reeds eerder vermeld hebben, hangt de autogene krimp samen met de zelfdroging van de betonmengeling.

Teneinde de uitdroging van de cementpasta te voorkomen, is het mogelijk om verzadigde lichte granulaten aan de verse mengeling toe te voegen, die op hun beurt een inwendig waterreservoir creëren in het verse beton. Het water wordt fysisch vast gehouden in de natuurlijke poriën van het granulaat. Wanneer het cement hydrateert, zal het extra toegevoegde water uit de relatief grotere poriën van de lichte granulaten onttrokken worden en naar de kleinere poriën van de cementpasta gaan. Dit vermindert de ontwikkeling van de autogene krimp aangezien volgens de *Kelvin-Laplace* [45] vergelijking de krimpspanningen gecontroleerd worden door de grootte van de kleinste lege porie.

Als we de granulaten (zand of porfier) van het referentiebeton gedeeltelijk vervangen door met water verzadigde lichte granulaten, dan zou de autogene krimp moeten verminderen. Het door deze lichte granulaten meegevoerde water zal de uitdroging van de cementpasta reduceren tot zelfs neutraliseren, waardoor er een reductie van de autogene krimp zal optreden. Als lichte granulaten gebruiken wij verzadigde Argex-korrels.

Indien we alle porfierkorrels of zandkorrels vervangen door de verzadigde Argex-korrels, dan is de kans groot dat er zwelling zal optreden in plaats van krimp en zal de druksterkte hoogst waarschijnlijk ook enorm afnemen. Dit is natuurlijk niet de bedoeling. Bovendien kan gesteld worden dat deze zwelling des te groter is naarmate de lichte granulaten fijner zijn, zelf al brengen zij dezelfde hoeveelheid water aan.

Aan de andere kant kan er wel verwacht worden dat de uiteindelijke totale krimp, als het specimen zijn evenwichtstoestand bereikt heeft met de omgeving (dit kan jaren duren), groter zal zijn bij lichte granulatenbeton aangezien deze een hogere waterhoeveelheid hebben dan hun equivalent van hoge-prestatie-beton (zonder toevoeging van met water verzadigde granulaten). Daardoor ontstaat er een kans op het ontstaan van latere scheuren bij LGB.

We zullen trachten om een optimale vervangingshoeveelheid te bepalen. Dit betekent dat we moeten zoeken naar een betonmengeling met toegevoegde verzadigde Argex-korrels die enerzijds de autogene krimp van het beton zoveel mogelijk zullen reduceren en die anderzijds niet te veel aan druksterkte moeten inleveren.

6.2. *Keuze van de lichte granulaten*

Na enig literatuuronderzoek [28,31,36,37,38,39,40] lijkt het ons handig om de interne curing te verwezenlijken met behulp van geëxpandeerde kleikorrels. We hebben ons oog laten vallen op Argex-korrels. Volgende eigenschappen van het product zijn belangrijk informatief:

- Argex is een licht en natuurlijk granulaat van geëxpandeerde Boomse klei.
- Argex wordt vervaardigd door het bakken van klei die expandeert in een draaioven bij een temperatuur van 1100 °C.
- De Argexkorrels zijn rond en vertonen een stroef oppervlak. Ze bestaan uit een roodbruine microporeuze schaal en een zwarte kern met celvormige structuur.



Figuur 6.1 – Argex-korrels



Figuur 6.2 – Argex wordt vervaardigd in een draaioven bij 1100 °C

Bij een studie waarin beschreven staat dat beton behandeld met lichte granulaten met verschillende korrelgrootten (Liapor 0-4mm, Liapor 4-8mm en Liapor 8-16mm), komt men tot het besluit dat kleinere korrelgrootten betere resultaten leveren in de beperking van de autogene krimp [26].

Hier rekening mee houdend kozen we uit een lijst van beschikbare Argex-korrels volgende twee soorten:

- AG 0/2 –580 G-crushed
- AR 0/4 –650 R-Round

We gaan nu elk van vorige producten bespreken aan de hand van hun courante eigenschappen.

6.2.1. AG 0/2 –580 G-crushed

Korrelgrootte	0-2 mm
Vorm van de deeltjes	Gebroken
ρ_{werk}	940 kg/m ³
Absorberend vermogen (24h)	0,5 kg /kg droog granulaat

Tabel 6.1 – Algemene eigenschappen AG 0/2 – 580 G

Deze granulaten hebben dus een absorptievermogen van 50%.

Het korrelverdelingsdiagram ziet er als volgt uit:

	<u>mm</u>	<u>0,250</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2,8</u>	<u>4</u>
gemiddeld	%	38,2	69,9	95,6	100	100

Tabel 6.2 – Korrelverdeling AG 0/2 – 580 G

6.2.2. AR 0/4 –650 R-Round

Korrelgrootte	0-4 mm
Vorm van de deeltjes	Rond
ρ_{werk}	1155 kg/m ³
Absorberend vermogen (24h)	0,25 kg /kg droog granulaat

Tabel 6.3 – Algemene eigenschappen AG 0/4 –650 R

Deze granulaten hebben slechts een absorptievermogen van 25%.

Het korrelverdelingsdiagram ziet er als volgt uit:

	<u>mm</u>	<u>0,250</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
gemiddeld	%	12,1	21,3	40,3	89,4	99,9

Tabel 6.4 – Korrelverdeling AG 0/4 – 650 R

We zullen dus trachten de hoeveelheid van deze granulaten te optimaliseren zodanig dat de autogene krimp van het BHP kan worden verminderd met een minimale verlaging van de druksterkte.

6.2.3. Hoeveelheid toegevoegde Argex-korrels

Vertrekkende van bovenstaande waarde kan men vervolgens de hoeveelheid lichte granulaten (Argex) bepalen nodig ter compensatie van de zelfdroging [38]:

$$LWA = \frac{W_{cur}}{\phi \cdot S \cdot \eta}$$

Met: ϕ - de waterabsorptie-graad [kg water/kg droog Argex];
 S - de verzadigingsgraad [-];
 η - efficiëntiefactor [gelegen tussen 0 en 1].

Ter verduidelijking van bovenstaande formules geven we volgende opmerkingen:

- Voor de absorberende vermogens van de Argex-korrels verwijzen we naar *Tabel 6.1 & Tabel 6.3*;
- Vooraleer de Argex-korrels aan de betonmengeling worden toegevoegd zullen ze gedurende 24h onder water geplaatst worden. Conventioneel nemen we aan dat de korrels dan een volledige verzadiging bereikt hebben. Voor de verzadigingsgraad nemen we bijgevolg een waarde van 100% aan. Er dient wel opgemerkt te worden dat het mogelijk is dat de volledige verzadiging van de korrels niet bereikt wordt na 24 h aangezien de lucht in de poriën de wateropname vertraagt. De opname van het water kan eventueel versneld worden mits gebruik te maken van enkele technieken zoals er zijn: gebruik van hoge druk, 'boiling',... . Maar de extra kost van deze bewerkingen wegen niet op tegen de mindere baten (kleinere hoeveelheid lichte granulat nodig) die zij met zich meedragen. Op gebied van verwerkbaarheid van het beton is het ook handig om de lichte granulat op voorhand met water te verzadigen;
- We nemen een efficiëntie aan van $\eta=1$;
- We bevinden ons dus in een ideaal geval, namelijk volledige verzadiging en maximale efficiëntie. Om dit in werkelijkheid te bereiken, moeten we beroep doen op grofkorrelige granulat met kleine afmetingen en een open poriënstructuur.

Rest ons nu nog de hoeveelheid droge Argex-korrels van elk type te bepalen die een hoeveelheid van 27 kg/m³ kunnen opnemen:

theoretisch benodigde
waterhoeveelheid

27 kg/m³

Type licht granulaat	Absorberend vermogen	ρ_{werk}	hoeveelheid droog	hoeveelheid nat
	[kg / kg droog granulaat]	[kg/m ³]	granulaat [kg/m ³]	granulaat [kg/m ³]
AG 0/2-580 G-crushed	0,5	940	27/0,5 = 54	1,5*54 = 81
AR 0/4-650 R-Round	0,25	1155	27/0,25 = 108	1,25*108 = 135

Tabel 6.5 – De bepaling van de hoeveelheid droog granulaat

6.3. Eerst type Argex : AG 0/2-580 G voor interne curing

6.3.1. Vervanging van de normale granulat door de Argex-korrels

Onze referentiebetonsamenstelling (zie *Tabel 5.1*) bestaat uit porfier (482 + 677 kg) en zand (588kg) als normale granulat. Deze normale granulat zullen we vervangen door lichte gebroken granulat, type Argex met korrelafmetingen gelegen tussen de 0 en de 2 mm, die een interne waterbron in het beton zullen vormen op voorwaarde dat ze op voorhand in water ondergedompeld zijn en verzadigd zijn. Ze hebben een absorberend vermogen van 0,5 kg/kg. Aangezien de Argex-korrels ongeveer dezelfde afmetingen hebben als de fijne zanddeeltjes (zand 0/5) , en omdat de porfierkorrels meer bijdragen tot de sterkte van het beton dan het

zand, hebben we besloten gelijke volumes van de zandkorrels te vervangen door de Argex-korrels om zo opnieuw tot een samenstelling van exact 1 m³ te komen. Rest ons nu nog te bepalen hoeveel van het zand hiervoor moet vervangen worden:

<u>Gegevens:</u>			
ρ_w	940 kg/m ³ AG 0/2-580 G		
ρ_w	2550 kg/m ³ Zand 0/5		
Theoretisch benodigde	Absorberend vermogen	ρ_w	hoeveelheid droog
waterhoeveelheid [kg/m ³]	[kg / kg droog granulaat]	[kg/m ³]	granulaat [kg/m ³]
27	0,5	940	27/0,5= 54
33	0,5	940	33/0,5= 66
40	0,5	940	40/0,5= 80
<u>Gevraagd:</u>			
Hoeveelheid zand dat moet vervangen worden			
<u>Oplossing:</u>			
	MASSA	VOLUME	
ARGEX AG 0/2-580 G	54 kg ----->	0,057447 m ³	25 %
	66 kg ----->	0,070213 m ³ ==>	30 %
	80 kg ----->	0,085106 m ³	37 %
	/ 940 kg/m ³		
ZAND 0/5	588 kg ----->	0,230588 m ³	
	/ 2550 kg/m ³		
<u>Antwoord:</u>			
146,5 kg zand vervangen door	54 kg droog AG 0/2-580 G	LGB_0/2_25	
179,0 kg zand vervangen door	66 kg droog AG 0/2-580 G	LGB_0/2_30	
217,0 kg zand vervangen door	80 kg droog AG 0/2-580 G	LGB_0/2_37	

Tabel 6.6 – De bepaling van de te vervangen zandhoeveelheid

Aangezien de berekende waterhoeveelheid van 27 kg/m³ eerder een theoretische ondergrens is en we uit de literatuur halen dat we best tussen de 30 – 40 kg/m³ aan de mengeling toevoegen, hebben we geopteerd voor met verschillende watergehaltes te werken. In wat volgt zullen we de drie mengelingen maken met type AR 0/2-580G als licht granulaat, waarbij we afzonderlijk 27, 33 en 40 kg/m³ water met behulp van deze Argex-korrels aan de mengeling zullen toevoegen en dat zal instaan voor de creatie van de interne waterkern. Procentueel dient hiervoor respectievelijk 25, 30 en 37% van het volume zand vervangen worden (zie Tabel 6.6) om een volume van 1m³ over te houden. Vandaar ook de relevante naamgeving van de betonmengsels: LGB_0/2_25, LGB_0/2_30, LGB_0/2_37, waar LGB staat voor 'Lichte Granulatenbeton' en 0/2 voor de korrelafmetingen van de Argex-korrels.

6.3.2. Samenstelling van LGB_0/2

Het eerste type lichte granulaten beton kan nu samengesteld worden en krijgt de benaming LGB_0/2. In vergelijking met het referentiebeton REF heeft deze samenstelling een zelfde gehalte aan cement, porfier en silicafume. Bovendien is de rechtstreeks toegevoegde hoeveelheid water eveneens ongewijzigd gebleven. Wel dient opgemerkt te worden dat er onrechtstreeks, via de AG 0/2-580G korrels, een extra hoeveelheid water aan de samenstelling is toegevoegd. Het is dit water dat de strijd tegen de autogene krimp aangaat.

Enkel de zandhoeveelheid verschilt met dat van REF. Ook de hoeveelheid aan superplastificeerder heeft een variërende dosering. Deze laatste wordt proefondervindelijk vastgesteld: vanaf het moment dat we een toelaatbare consistentie bekomen, wordt er geen Glenium 51 meer aan de mengeling toegevoegd.

Samenstelling	<u>LGB 0/2 25</u>	<u>LGB 0/2 30</u>	<u>LGB 0/2 37</u>
Porfier 2/6,3 [kg/m ³]	482	482	482
Porfier 6,3/20 [kg/m ³]	677	677	677
Zand 0/5 [kg/m ³]	442	409	371
CEMI 52.5R [kg/m ³]	475	475	475
Silicafume [kg/m ³]	25	25	25
Aanmaakwater [kg/m ³]	150	150	150
Superplastificeerder [kg/m ³]	1,1	1	0,9
AG 0/2-580 G droog [kg/m ³]	54	66	80
AG 0/2-580 G nat [kg/m ³]	84,4	102,2	128,9
Extra water [kg/m ³]	30,4	36,2	48,9
W/C [-]	0,34	0,35	0,39

Tabel 6.7 – De betonsamenstelling van LGB_0/2

De bovenstaande tabel met de betonsamenstelling vereist toch nog enige verduidelijking:

- Van elk van de drie samenstellingen worden er, zoals bij het referentiebeton, opnieuw twee mengelingen gemaakt;
- De droge bestanddelen, namelijk de porfierkorrels, het zand, het cement en de silicafume worden in deze volgorde in de mengkuip gebracht en vervolgens gedurende 1 minuut droog voorgemengd. Vervolgens wordt het aanmaakwater, de verzadigde Argex-korrels en de Glenium 51 aan de samenstelling toegevoegd en worden alle componenten nog eens gedurende 4 minuten gemengd;
- De zandhoeveelheid in de betonsamenstelling van LGB_0/2 bekomt men door van 588 kg/m³ (zie Tabel 5.1) de vervangingshoeveelheid (zie Tabel 6.6) af te trekken. Zo bekomt men bijvoorbeeld:

$$442 \frac{kg}{m^3} = (588 - 146,5) \frac{kg}{m^3};$$

- De hoeveelheid aanmaakwater is voor de drie samenstellingen identiek terwijl het extra water, zijnde het water dat door middel van de Argex-korrels aan de

samenstelling is toegevoegd, een toenemende waarde heeft. Logisch aangezien de hoeveelheid aan verzadigde lichte granulaten eveneens toeneemt;

- Theoretisch gezien zou er respectievelijk 27, 33 en 40 kg/m³ extra water aan het mengsel toegevoegd worden (zie *Tabel 6.6*). In de praktijk blijkt dit iets meer te zijn, namelijk 30, 36 en 49 kg/m³ (zie *Tabel 6.7*). Het absorptievermogen van AG 0/2-580 G zal dus iets hoger zijn dan oorspronkelijk bepaald;
- Om de W/C –factor te bepalen zullen we de eerder geziene formule (zie 2.2.2. *De Water/ Cement –factor*) lichtjes wijzigen, en dit door de aanwezigheid van het extra water. De aangepaste formule wordt nu:

$$(W / C)_{eff} = \frac{W_{aanmaak} + W_{extra}}{C + k.P}$$

6.3.3. Bekomen resultaten op LGB_0/2

Net zoals bij het referentiebeton zullen we LGB_0/2 onderwerpen aan volgende proeven:

- Slumptest op het verse beton;
- Bepaling van het volumegewicht en het luchtgehalte van het verse beton;
- Meting van de autogene krimp gedurende 144h;
- Bepaling van de druksterkte van het beton op 1, 7 en 28 dagen.

Vervolgens kunnen we bepalen in welke mate het toevoegen van de Argex-korrels de autogene krimp daadwerkelijk verminderd heeft en in welke mate de druksterkte van het lichte granulatenvbeton is afgenomen. Vooreerst beginnen we met de eigenschappen te bepalen van verse beton.

6.3.3.1. Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte

Op de verse betonspecie werden volgende resultaten bekomen (ter vereenvoudiging hebben we de benaming LGB_0/2 weggelaten):

	25_1	25_2	30_1	30_2	37_1	37_2	eenheid
Hoeveelheid glenium 51	50	50	45	45	40	40	cc
	1,1	1,1	0,99	0,99	0,88	0,88	l/m ³
Zetmaat	5,3	3	2,3	3,5	4,8	7,1	cm
Gemiddelde zetmaat	4,15	4,15	2,9	2,9	5,95	5,95	cm
Massa per 8 liter	18,9	19,025	19,1	19,07	18,88	18,9	kg
Volumegewicht	2362,5	2378,125	2387,5	2383,75	2360	2362,5	kg/m ³
Luchtgehalte	1,8	1,75	1,45	1,5	1,5	1,65	%

Tabel 6.8 – Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte van LGB_0/2

Net zoals bij het referentiebeton (zie 5.4.1. *Het verse beton: zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte*) wordt het volumegewicht bepaald aan de hand van volgende formule:

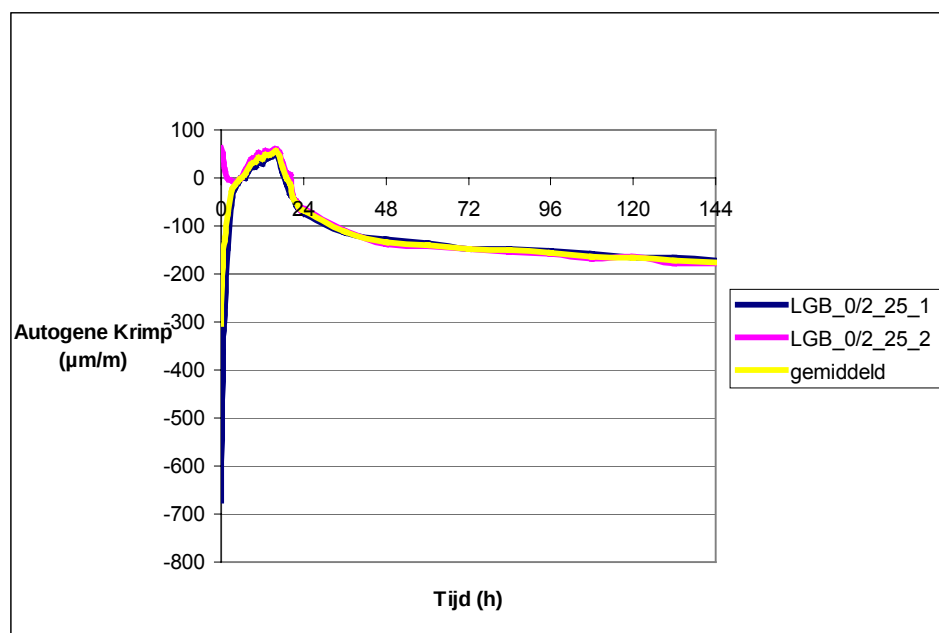
$$\text{Volumegewicht} = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}}$$

Uit deze resultaten kunnen we volgende korte besluiten trekken:

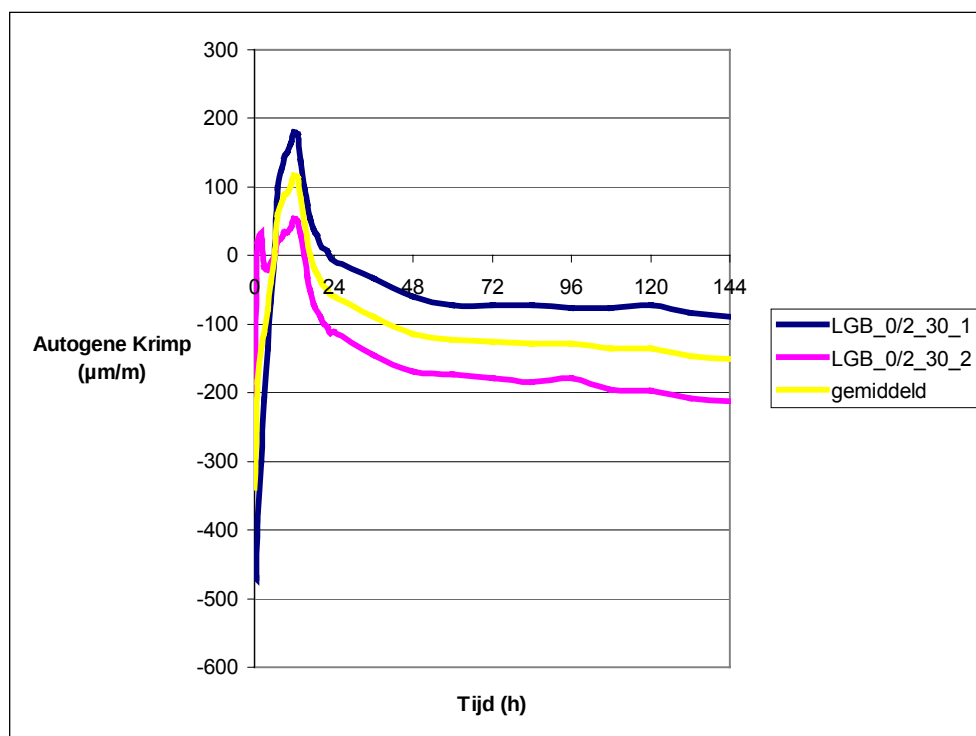
- De mengsels LGB_0/2_25 en LGB_0/2_30 behoren tot de consistentieklasse S1, terwijl LGB_0/2_37 tot de klasse S2 behoort. In vergelijking met het referentiebeton behoort LGB_0/2 tot een drogere consistentieklasse. Het is met andere woorden minder verwerkbaar dan REF. Bij de referentiesamenstelling werd wel een hogere dosering aan superplastificeerder gebruikt, waardoor de verwerkbaarheid automatisch toeneemt;
- Naarmate er meer lichte granulaten aan de mengeling worden toegevoegd (kleinere ρ_w), en er dus minder zand (grotere ρ_w) overblijft, kan men verwachten dat het volumegewicht afneemt. We constateren echter dat het volumegewicht nagenoeg niet varieert en tussen de 2360 kg/m³ en de 2380 kg/m³ schommelt. Vergeleken met REF, dat een volumemassa van meer dan 2400 kg/m³, kunnen we stellen dat bovenstaande redenering wel geldt. Deze daling heeft een rechtstreekse invloed op de druksterkte van de mengsels (zie 6.3.3.3. *Drukresultaten*);
- Het luchtgehalte van LGB_0/2_25 (1,8 %) ligt merkbaar wel hoger dan dat van LGB_0/2_30 (1,5 %) en LGB_0/2_37 (1,6 %). Deze waarden liggen in de buurt van deze van REF;
- We blijven nog steeds binnen het domein van het normale beton en niet van het lichte beton, omdat de volumieke massa groter is dan 2000 kg/m³.

6.3.3.2. De autogene krimp van LGB_0/2

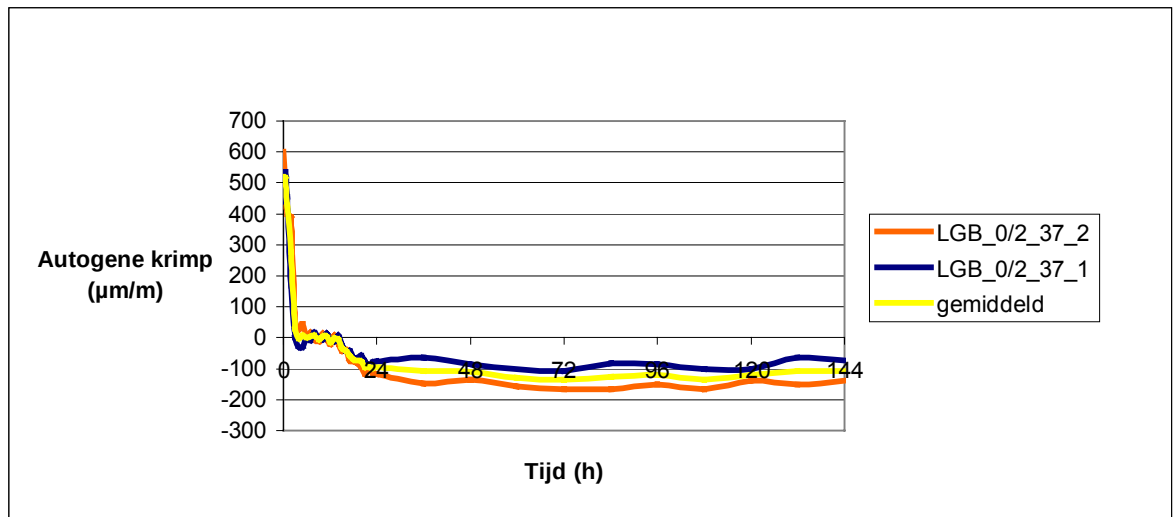
Voor elk van de samenstellingen geven we de bekomen resultaten betreffende de autogene krimp:



Figuur 6.3a – De autogene krimp van LGB_0/2_25

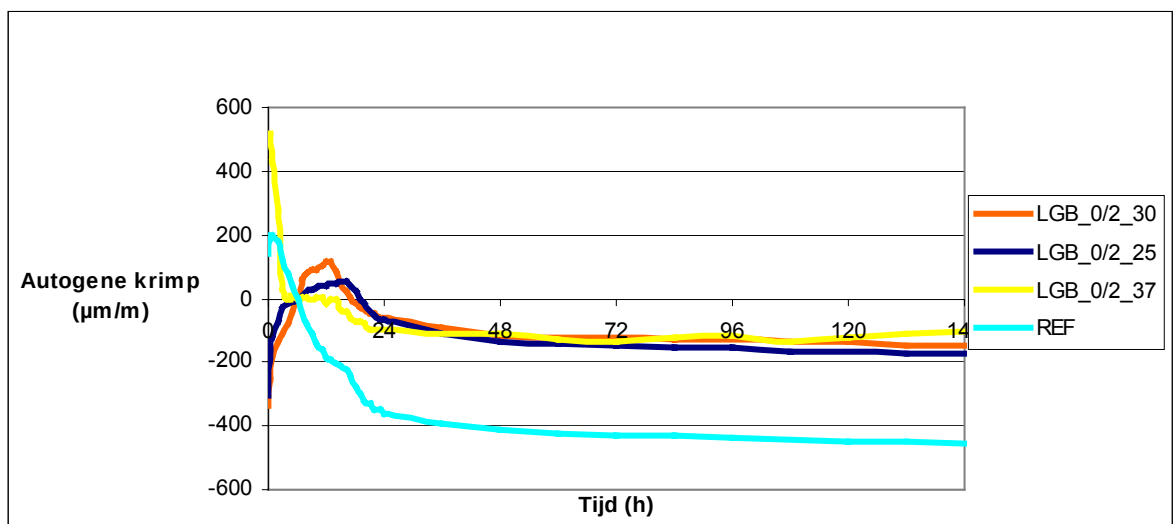


Figuur 6.3b – De autogene krimp van LGB_0/2_30



Figuur 6.3c – De autogene krimp van LGB_0/2_37

Als we nu de gemiddelde autogene krimp van de drie betonmengelingen LGB_0/2 en van de referentiebetonsamenstelling in een grafiek plaatsen dan bekommen we onderstaande vergelijkende figuur:



Figuur 6.3d – Het vergelijken van autogene krimp van LGB_0/2 met deze van REF

Laten we nu even stilstaan bij elk van bovenstaande figuren:

- Figuur 6.3a : Aannemende dat we voor t_0 een waarde van 6h nemen (daar snijden de curven de tijdsas), merken we dat de autogene krimp voor dit tijdstip een nogal grillig verloop kent. Er is op dat moment geen overeenkomst tussen LGB_0/2_25_1 en LGB_0/2_25_2. Aangezien er in het beton geen spanningen kunnen geïnduceerd worden voor t_0 en het vooral de autogene krimp na 144h is die ons interesseert, zullen we aan het wanordelijke begin niet veel aandacht besteden. Na 6h kent de betonspecie een lichte zwelling die een maximale waarde van 55 $\mu\text{m/m}$ bereikt na 16h. Na dit tijdstip tot een tijdsduur van 19h komt de autogene krimp volledig tot ontwikkeling om een

nadien een vlakker verloop te kennen en een uiteindelijke waarde van **-175 $\mu\text{m/m}$** te bereiken;

- Figuur 6.3b: Ook hier hebben we te maken met een vrij eigenaardig begin. Bovendien zijn de metingen van de autogene krimp van LGB_0/2_30_1 en LGB_0/2_30_2 over de volledige meetduur ongeveer 100 $\mu\text{m/m}$ uit elkaar gelegen. Wel hebben ze een gelijkaardige vorm en verloop. Daarom is het vooral de gemiddelde waarde die we zullen beschouwen. Net zoals bij de meting van LGB_0/2_25 constateren we een zwellings (die meer dan 100 $\mu\text{m/m}$ bedraagt) na t_0 en begint het beton daarna autogeen te krimpen om uiteindelijk een waarde van **-150 $\mu\text{m/m}$** te halen. Deze krimp is kleiner dan deze bekomen bij LGB_0/2_25, wat er op wijst dat een theoretisch benodigde waterhoeveelheid van 27 kg/m^3 inderdaad te weinig is;
- Figuur 6.3c: Vanaf het begin van de meting merken we een enorme zwellings op, welke gedeeltelijk aan het bleeding-effect en de re-absorptie van het uitzweetwater kan toegeschreven worden of eventueel aan het vrijkomen van inwendig gecreëerde warmte. Vervolgens ontwikkelt de autogene krimp zich op een vrij monotone manier. De uiteindelijke krimp bedraagt hier **-105 $\mu\text{m/m}$** . Hiermee hebben we de veronderstelling van Powers (zie 4.4.3. *Theoretische bepaling van de nodige hoeveelheid water*) bevestigd, namelijk dat in de praktijk een hoeveelheid van 40 kg/m^3 toegevoegd nabehandelingwater de beste resultaten geeft;
- Figuur 6.3d: We merken dat de evolutie van de autogene krimp gekenmerkt wordt door 3 fasen: de eerste fase (tot 10 à 12 h) kent een zeer doeltreffende autogene curing aangezien we een zwellings noteren in plaats van de snelle krimp die zich bij het referentiemengsel voordoet. Wat er gebeurt tussen het begin van de meting (0 h) en “time-zero” (6 h), laten we buiten beschouwing. De 2^{de} fase (10 tot 72 h) symboliseert de uitputting van de interne waterreserve in de Argex-korrels waardoor de autogene krimp zich begint te ontwikkelen, in het begin sneller dan naar het einde toe. Vervolgens kenmerkt de 3^{de} fase (vanaf 72 h) zich door een vertraagde vervorming en het bereiken van een stabilisatie.
- Als we nu het LGB_0/2 vergelijken met REF dan zien we dat er duidelijk een vermindering van autogene krimp is opgetreden en de interne nabehandeling van het beton dus wel degelijk effect heeft gehad. Door het toevoegen van verzadigde AG 0/2-580G korrels hebben we een krimpductie bekomen die zich vertaalt in een daling van **-450** naar **-105 $\mu\text{m/m}$** . Nu dienen we te controleren of we voor deze verbetering hebben moeten inboeten aan druksterkte. We verwijzen naar 6.3.3.3. *Drukresultaten*.
- Twee algemeen geldende regels zijn: ‘Hoe kleiner de W/C –factor, hoe groter de autogene krimp’ & ‘Hoe hoger de dosering aan superplastificeerder, hoe groter de krimp’. Als we even terugkijken naar Tabel 6.7 dan merken we dat LGB_0/2_25 een kleinere W/C –factor en een grotere hoeveelheid aan Glenium 51 heeft dan LGB_0/2_37 (om eenzelfde verwerkbaarheid te bekomen). Dit is eveneens een verklaring voor het verschil in autogene krimp tussen de verschillende samenstellingen.

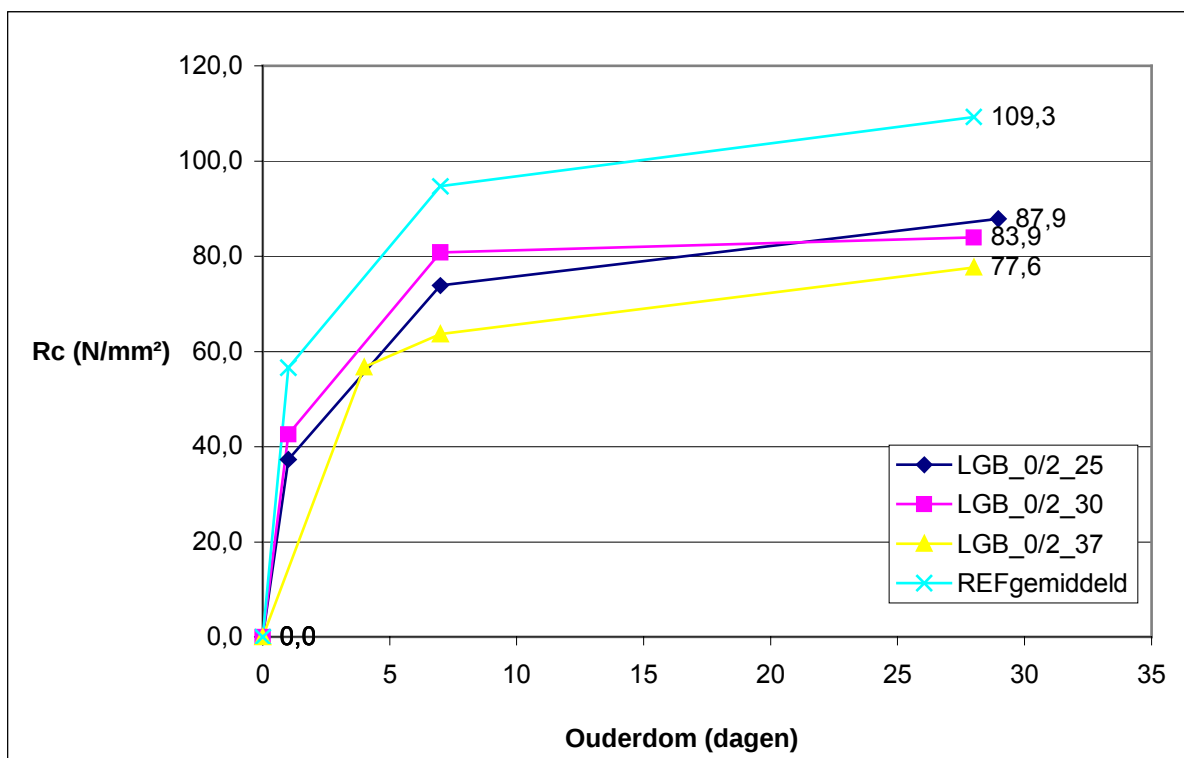
6.3.3.3. Drukresultaten

Volgende waarden werden bekomen bij de opeenvolgende drukmetingen:

	ouderdom (d)	last (kN)	b (mm)	d (mm)	druksterkte (N/mm ²)
LGB_0/2_25_1	1	803	150,2	150,2	35,6
	7	1676	150,3	150,4	74,1
	29	2010	150,2	150,4	89,0
LGB_0/2_25_2	1	876	150,1	149,7	39,0
	7	1666	150,2	150,7	73,6
	29	1961	150,1	150,6	86,8
LGB_0/2_30_1	1	980	150,3	151,5	43,0
	7	1833	150	150,7	81,1
	28	1897	150,2	150,7	83,8
	28	1897	150	152	83,2
LGB_0/2_30_2	1	958	150,2	151,7	42,0
	7	1826	150,2	150,9	80,6
	28	1947	150,2	151	85,9
	28	1894	150,2	152,5	82,7
LGB_0/2_37_1	4	1315	150	149,9	58,5
	7	1513	150,1	150,2	67,1
	28	1792	150	149,9	79,7
	28	1781	150,2	150,7	78,7
LGB_0/2_37_2	4	1236	149,9	149,9	55,0
	7	1443	150	159,9	60,2
	28	1717	150,1	150,5	76,0
	28	1727	150	151,1	76,2

Tabel 6.9 – De druksterktes op 1, 7 en 28 dagen van LGB_0/2

Ter verduidelijking maken we een figuur waarop de **gemiddelde** druksterktes (het gemiddelde van mengeling 1 en 2) weergegeven zijn. Om de vergelijking met REF te kunnen maken hebben we de gemiddelde druksterkte ervan eveneens op Fig 6.4. weergegeven.



Figuur 6.4 – De ontwikkeling van de druksterkte van LGB_0/2 en het referentiebeton

Wanneer we bovenstaande figuur analyseren, merken we enkele interessante zaken:

- In alle drie de betonsoorten merken we een snelle betonsterkte-ontwikkeling. Het valt op, indien we het referentiebeton even buiten beschouwing laten, dat naarmate het gehalte aan Argex-korrels toeneemt de sterkte van het beton zich sneller ontwikkelt. Zo bedraagt de druksterkte van LGB_0/2_30 reeds 42,5 MPa na 1 dag (dit is 52,5 % van de sterkte na 28 dagen) terwijl dit voor LGB_0/2_25 amper 37,3 MPa (dit is 42,2 % van de sterkte na 28 dagen) bedraagt. We mogen concluderen dat we een hele snelle sterkte-evolutie van het beton op jonge leeftijd hebben. Het gebruik van Rheomac SF140, van Glenium 51 en van cement van het type “R” zijn hiervan de oorzaak;
- Wat te verwachten was, is uitgekomen: naarmate het gehalte aan Argex-korrels toeneemt, evenals de hoeveelheid ‘curing-water’, neemt de druksterkte na 28 dagen van het nabehandelde beton af. Een bewijs dat de druksterkte omgekeerd evenredig is met het watergehalte;
- De karakteristieke druksterkte na 28 dagen (f_{c28}) ligt nog steeds in de buurt van 80 MPa. Aldus kan het beton onderverdeeld worden in de categorie ‘beton met ultrahoge prestaties (BUHP)’.

6.3.4. Conclusie: AG 0/2-580G

In een eerste poging om een vermindering van de autogene krimp van het referentiebeton te bekomen, hebben we een fractie van de fijne zandkorrels vervangen door een bepaalde hoeveelheid verzadigde lichte granulaten, type Argex AG 0/2-580G. Met behulp van deze lichte granulaten zijn we er in geslaagd verschillende hoeveelheden extra water (theoretisch 27, 33 en 40 kg/m³, werkelijk

30, 36 en 49 kg/m³) aan de betonmengeling toe te voegen en op deze manier een interne waterkern te creëren welke de zelfdroging tijdens de hydratatie van het cement tracht te voorkomen. We constateren dat in het geval waarbij 49 kg/m³ water aan het beton wordt toegevoegd, we de beste krimpreductie bekomen. Lagere toegevoegde waterhoeveelheden resulteren in een grotere autogene krimp, aangezien er niet voldoende water is om het zelfdrogingsverschijnsel van het beton te elimineren. Op deze manier zijn we er in geslaagd de autogene krimp te beperken tot een minimale waarde van -105 µm/m. Wetende dat deze krimp -450 µm/m bedraagt bij het referentiebeton, is met behulp van de interne nabehandeling de autogene krimp meer dan 4 keer kleiner geworden. Aan de andere kant kennen we wel een vermindering van de mechanische eigenschappen: de druksterkte van het referentiebeton na 28 dagen (109,3 MPa) is groter dan de sterkte van het behandelde beton na 28 dagen ($\pm$ 80 MPa). Bovendien komt de sterkte bij het referentiebeton iets sneller tot ontwikkeling. Toch behoren zowel LGB_0/2 als REF tot de klasse van beton met ultra hoge prestaties: BUHP.

Laten we ook nog opmerken dat we geen volledige reductie van de autogene krimp hebben bereikt, wat er op kan wijzen dat niet al het water in de verzadigde Argex-korrels beschikbaar is voor het vermijden van de zelfdroging van de cementpasta. Theoretisch gezien moest een toevoeging van 27 kg/m³ water voldoende zijn om de krimp tot een minimum te herleiden.

Tot slot vatten we de autogene krimp en de druksterkte nog even kort samen in onderstaande tabel:

	REF	LGB 0/2 25	LGB 0/2 30	LGB 0/2 37
Autogene krimp	-450 µm/m	-175 µm/m	-150 µm/m	-105 µm/m
Reductie	0%	61%	67%	77%
Druksterkte (1)	56,6 MPa	37,3 MPa	42,5 MPa	56,7 MPa (4)
Druksterkte (7)	94,6 MPa	73,9 MPa	80,8 MPa	63,6 MPa
Druksterkte (28)	109,3 MPa	87,9 MPa	83,9 MPa	77,6 MPa
	100%	80% (29)	77%	71%

Tabel 6.10 – Samenvatting: de autogene krimp en de druksterkte van REF en LGB_0/2

Indien we het gehalte aan droge AG 0/2-580 G korrels laten toenemen met 22% (54 kg/m³ → 66 kg/m³), waardoor er, na verzadiging van deze korrels, 20% meer nabehandelingwater in de betonspecie terecht komt (30 kg/m³ → 36 kg/m³) dan is een extra autogene krimpreductie van 6% en een extra drukvermindering van 3 % hiervan het gevolg. Nog een toename van deze gebroken Argex-korrels, namelijk een toename van 48% (54 kg/m³ → 80 kg/m³) waardoor er 63% meer curingwater bijkomt (30 kg/m³ → 49 kg/m³), leidt tot een extra krimpreductie van 16% maar een extra druksterktevermindering van 9%.

6.4. Tweede type Argex : AR 0/4-650 R voor interne curing

6.4.1. Vervanging van de normale granulaten door de Argex-korrels

Net zoals bij AG 0/2-580 R gaan we een equivalent volume aan zandkorrels (afmetingen 0/5 mm) van REF (zie *Tabel 5.1*) vervangen door Argex-korrels op zo'n manier dat het volume van de betonsamenstelling nog steeds 1 m³ bedraagt. Ditmaal zijn de gebruikte lichte granulaten niet gebroken maar rond, en zijn de korrelafmetingen gelegen tussen 0 en 4 mm. Het absorptievermogen is kleiner dan de eerste soort Argex-korrels en bedraagt slechts 0,25 kg/kg.

Rest ons nu nog te bepalen hoeveel van het zand er dient te vervangen worden. Dit gebeurt op een analoge manier als in 6.3.1. *Vervanging van de normale granulaten door de Argex-korrels* en als volgt:

<u>Gegevens:</u>			
ρ_w	1155 kg/m ³ AR 0/4-650 R		
ρ_w	2550 kg/m ³ Zand 0/5		
Theoretisch benodigde waterhoeveelheid [kg/m ³]	Absorberend vermogen [kg / kg droog granulaat]	ρ_w [kg/m ³]	hoeveelheid droog granulaat [kg/m ³]
27	0,25	1155	108
33	0,25	1155	132
40	0,25	1155	160
<u>Gevraagd:</u>			
Hoeveelheid zand dat moet vervangen worden			
<u>Oplossing:</u>			
	MASSA	VOLUME	
ARGEX AR 0/4-650 R	108 kg ----->	0,093506	40 %
	132 kg ----->	0,114286 m ³ =====>	50 %
	160 kg ----->	0,138528	60 %
	/ 1155 kg/m ³		
ZAND 0/5	588 kg ----->	0,230588 m ³	
	/ 2550 kg/m ³		
<u>Antwoord:</u>			
232,6 kg zand vervangen door	108 kg droog AR 0/4-650 R		
291,4 kg zand vervangen door	132 kg droog AR 0/4-650 R		
353,2 kg zand vervangen door	160 kg droog AR 0/4-650 R		

Tabel 6.11 – De bepaling van de te vervangen zandhoeveelheid

We hebben reeds eerder vermeld dat de berekende waterhoeveelheid van 27 kg/m³ eerder een theoretische ondergrens is en dat we best tussen de 30 – 40 kg/m³ water

aan de mengeling toevoegen via de lichte granulaten. Voor de beproevingen zullen we ook hier drie keer twee mengelingen maken met type AR 0/4-650R als licht granulaat, waarbij we afzonderlijk 27, 33 en 40 kg/m³ water met behulp van deze Argex-korrels aan de mengeling zullen toevoegen. Procentueel dient hiervoor respectievelijk 40, 50 en 60% van het volume zand vervangen worden (zie Tabel 6.11) om een volume van 1m³ over te houden. De naamgeving van de betonmengsels gaan we dan ook niet ver gaan zoeken: LGB_0/4_40, LGB_0/4_50, LGB_0/4_60.

6.4.2. Samenstelling van LGB_0/4

Het tweede type lichte granulatenbeton kan nu samengesteld worden en krijgt de benaming LGB_0/4. Deze samenstelling is volledig identiek aan REF en LGB_0/2 met uitzondering van de hoeveelheid zand en de toegevoegde lichte granulaten. Voor het overige zijn de normale granulaten (porfier), het cement, de silicafume en het aanmaakwater in dezelfde aantallen aanwezig. Wel dient opgemerkt dat er ditmaal meer zand dient vervangen te worden dan bij LGB_0/2 en dit om de eenvoudige regel dat de ronde AR 0/4-650 R korrels een kleiner absorberend vermogen hebben dan de gebroken AG 0/2-580 G korrels. Bijgevolg zullen er meer ronde verzadigde korrels nodig zijn om eenzelfde hoeveelheid water aan de samenstelling toe te voegen, waardoor er meer zandkorrels moeten wijken om tot een mengeling van 1 m³ te komen. Opnieuw heeft de hoeveelheid aan superplastificeerder een variërende waarde, afhankelijk van een aanvaardbare verwerkbaarheid van de betonspecie.

Samenstelling	<u>LGB 0/4 40</u>	<u>LGB 0/4 50</u>	<u>LGB 0/4 60</u>
Porfier 2/6,3 [kg/m ³]	482	482	482
Porfier 6,3/20 [kg/m ³]	677	677	677
Zand 0/5 [kg/m ³]	350	297	235
CEMI 52.5R [kg/m ³]	475	475	475
Silicafume [kg/m ³]	25	25	25
Aanmaakwater [kg/m ³]	150	150	150
Superplastificeerder [kg/m ³]	1,9	2	1,8
AG 0/2-580 G droog [kg/m ³]	108	132	160
AG 0/2-580 G nat [kg/m ³]	137	164	200
Extra water [kg/m ³]	29	32	40
W/C [-]	0,34	0,35	0,36

Tabel 6.12 – De betonsamenstelling van LGB_0/4

Laten we nog even een korte bespreking houden bij bovenstaande tabel:

- Van elk van de drie samenstellingen worden er, zoals bij het REF en LGB_0/2, opnieuw twee mengelingen gemaakt. Wegens een tijdelijk tekort aan porfierkorrels is er van samenstelling LGB_0/4_50 slechts één mengeling gemaakt;
- De mengprocedure gaat als volgt: eerst en vooral worden de droge bestanddelen, namelijk de porfierkorrels, het zand, het cement en de

silicafume in deze volgorde in de mengkuip gebracht en vervolgens gedurende 1 minuut droog voorgemengd. Vervolgens wordt het aanmaakwater, de verzadigde Argex-korrels en de Glenium 51 aan de samenstelling toegevoegd en worden alle componenten nog eens gedurende 4 minuten gemengd;

- De hoeveelheid aanmaakwater is voor de drie samenstellingen identiek terwijl voor het extra water, zijnde het water dat door middel van de Argex-korrels aan de samenstelling is toegevoegd, een toenemende waarde heeft. Logisch aangezien de hoeveelheid aan lichte granulaten eveneens toeneemt;
- Theoretisch gezien zou er respectievelijk 27, 33 en 40 kg/m³ extra water aan het mengsel toegevoegd worden. In de praktijk lijken deze waarde overeen te komen, namelijk 29, 32 en 40 kg/m³. Het absorptievermogen van AR 0/4-650 R beantwoordt aan de verwachtingen. De aanname van een volledige verzadiging lijkt te kloppen;
- Ter bepaling van de W/C –factor maken we opnieuw gebruik van de aangepaste formule:

$$(W / C)_{eff} = \frac{W_{aanmaak} + W_{extra}}{C + k.P}$$

6.4.3. Bekomen resultaten op LGB_0/4

6.4.3.1. Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte

Op de niet verharde betonspecie werden volgende resultaten bekomen (ter vereenvoudiging hebben we de benaming LGB_0/4 weggelaten):

	40_1	40_2	50_1	60_1	60_2	eenheid
Hoeveelheid glenium 51	85	85	90	80	80	cc
	1,9	1,9	2	1,7	1,7	l/m ³
Zetmaat	7,7	6,9	6,5	5,2	10	cm
Gemiddelde zetmaat	7,3	7,3	6,5	7,6	7,6	cm
Massa per 8 liter	18,38	18,75	18,55	18,25	18,5	kg
Volumegewicht	2297,5	2343,75	2318,75	2281,25	2312,5	kg/m ³
Luchtgehalte	2,1	2,5	2	2	1,6	%

Tabel 6.13 – Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte van LGB_0/4

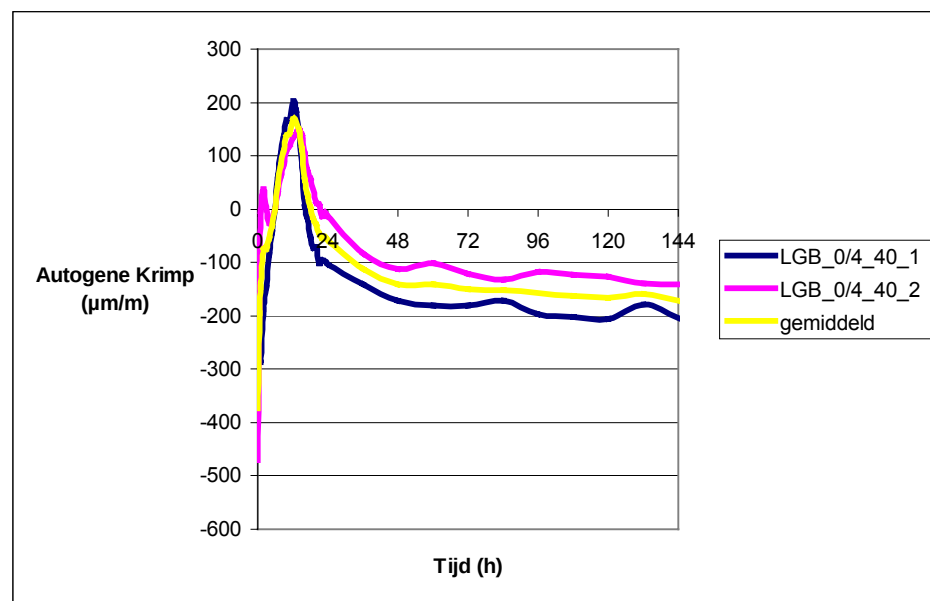
Uit deze resultaten kunnen we volgende korte besluiten trekken:

- De drie samenstellingen behoren allemaal tot de consistentieklasse S2. Qua verwerkbaarheid vertoont LGB_0/4 dus een grote overeenkomst met REF. Als we de verwerkbaarheid van LGB_0/2 bekijken, dan blijkt deze kleiner te zijn dan bij LGB_0/4. Het gebruik van een hogere dosering superplastificeerder kan een reden zijn waarom LGB_0/4 een hogere consistentie heeft;

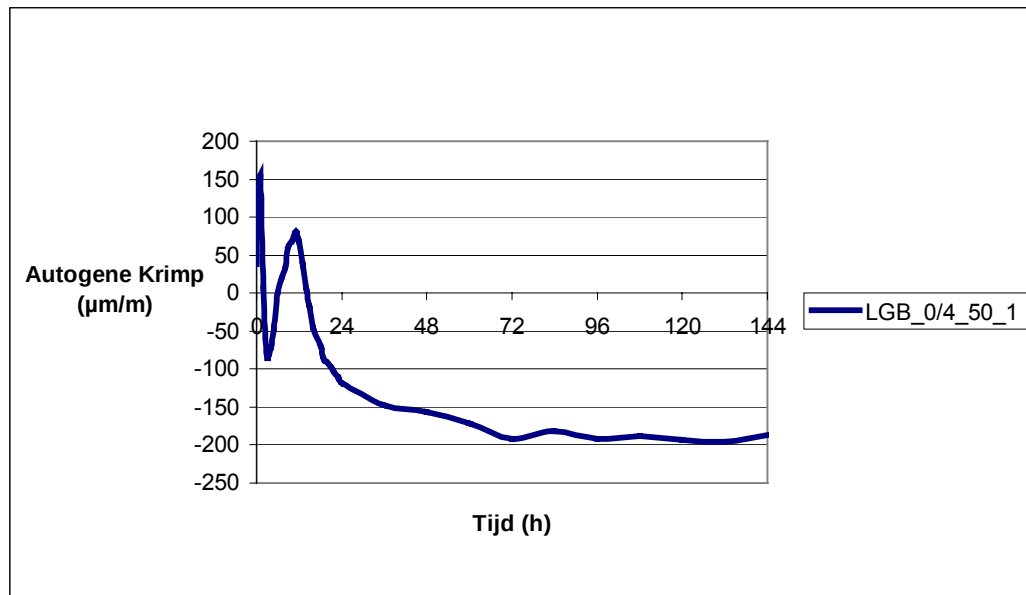
- Het volumegewicht van het verse beton ligt ongeveer rond de 2300 kg/m³. Vergeleken met REF, dat een volumemassa van meer dan 2400 kg/m³, en met LGB_0/2, dat een waarde van 2380 kg/m³ bereikt, kunnen we stellen dat LGB_0/4 een 'lichter' beton is. Aangezien de AR 0/4-650R korrels een kleiner absorptievermogen hebben, moeten er meer van deze korrels aan de betonmengeling gevoegd worden als we eenzelfde hoeveelheid extra water in de het mengsel willen brengen. Deze lichte granulaten hebben een kleinere ρ_w dan de zandkorrels waardoor het volumegewicht van LGB_0/4 een kleinere waarde bereikt;
- Het luchtgehalte van LGB_0/4_40 (2,3 %) ligt merkbaar hoger dan dat van LGB_0/4_50 (2 %) en LGB_0/2_37 (1,8 %). Deze waarden liggen in de buurt van dat van REF en van LGB_0/2.

6.4.3.2. De autogene krimp van LGB_0/2

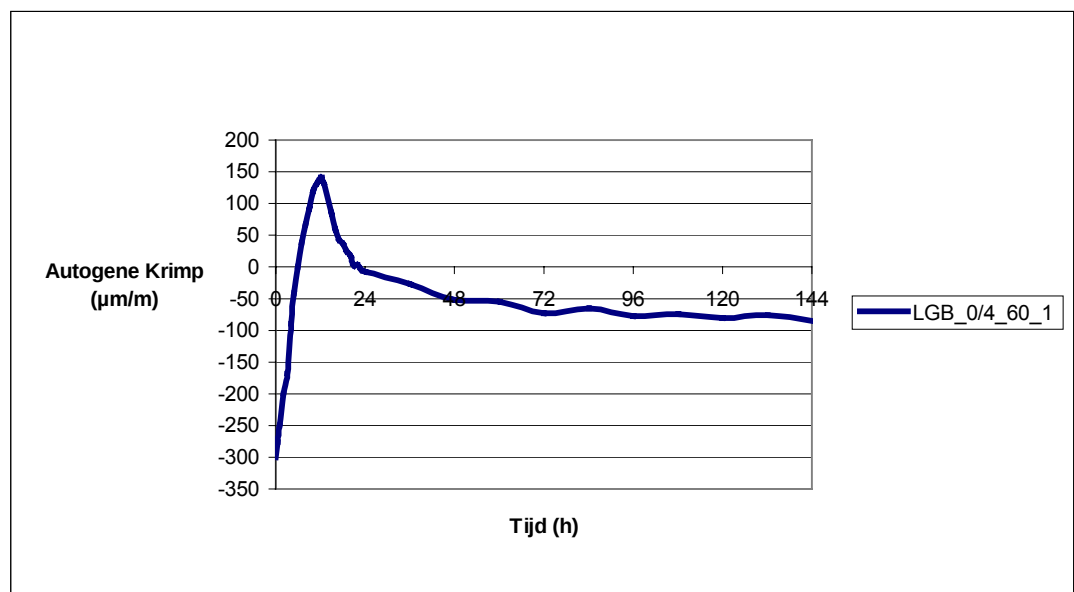
Voor elk van de samenstellingen geven we de bekomen resultaten betreffende de autogene krimp:



Figuur 6.5a – De autogene krimp van LGB_0/4_40

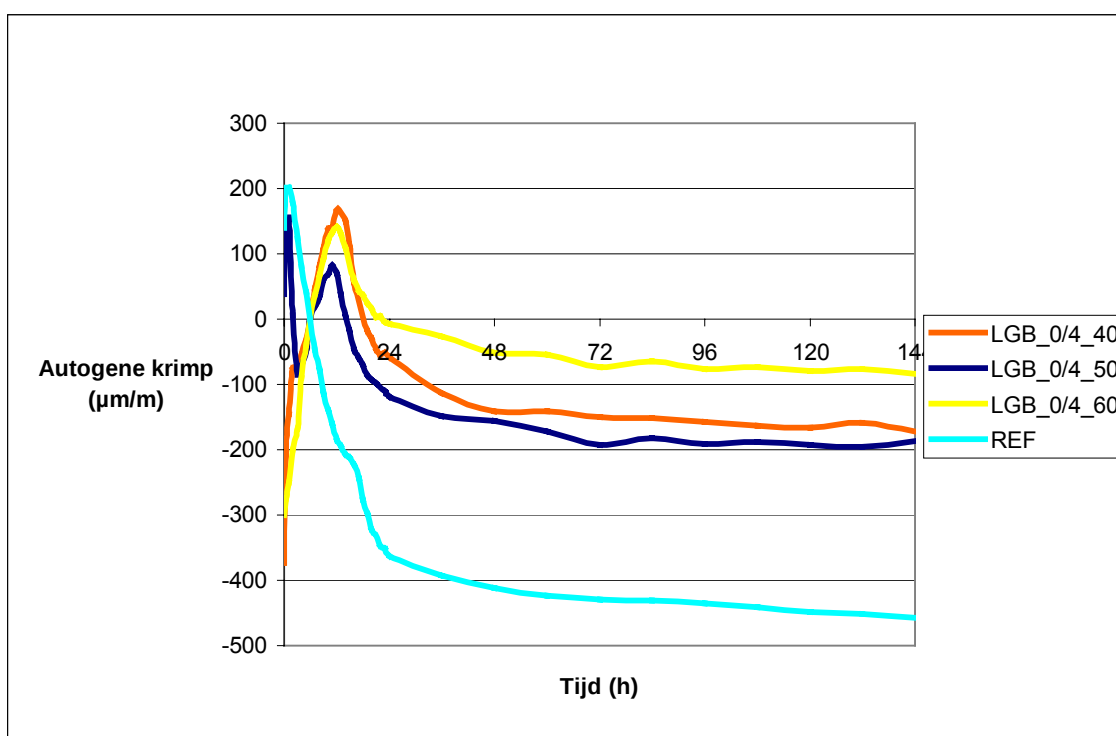


Figuur 6.5b – De autogene krimp van LGB_0/4_50



Figuur 6.5c – De autogene krimp van LGB_0/4_60

Als we nu de gemiddelde autogene krimp van de drie betonmengelingen LGB_0/4 en van de referentiebetonsamenstelling in een grafiek plaatsen dan bekomen we onderstaande vergelijkende figuur:



Figuur 6.5d – Het vergelijken van autogene krimp van LGB_0/4 met deze van REF

Laten we nu even stilstaan bij elk van bovenstaande figuren:

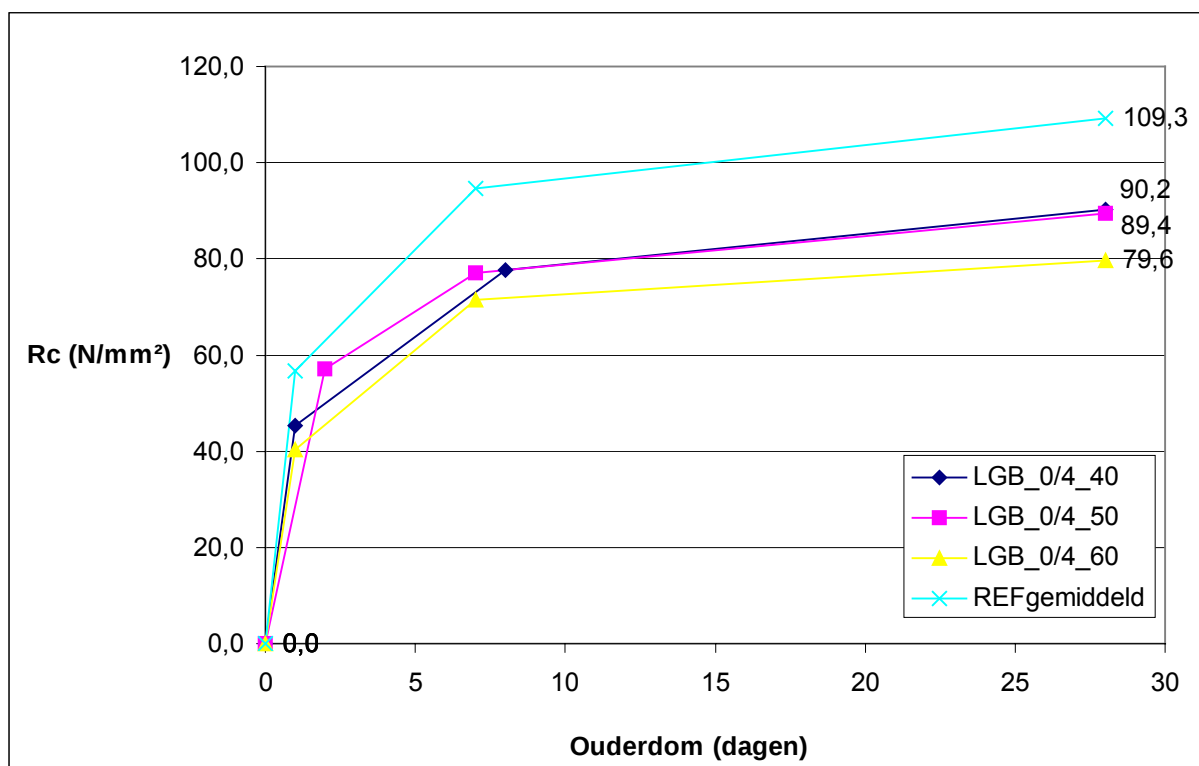
- Figuur 6.5a : We merken dat de grafiek voor tijdstip 6 h een nogal grillig verloop kent, waarbij er geen overeenkomst tussen LGB_0/4_40_1 en LGB_0/4_40_2. We houden dan ook geen rekening met wat er gebeurt voor “time-zero”. Daarna komen de curven van beide mengelingen goed overeen qua verloop. Na 6h kent de betonspecie een lichte zwelling die een maximale gemiddelde waarde van $168 \mu\text{m/m}$ bereikt na 12h. Daarna komt de autogene krimp volledig tot ontwikkeling om een uiteindelijke waarde van $-172 \mu\text{m/m}$ te bereiken;
- Figuur 6.5b: Wegens het geven van onrealistische resultaten kunnen we enkel beroep doen op de resultaten van de eerste mengeling. In het begin hebben we te maken met zowel een positief maximum als een negatief minimum, waarvan de oorsprong ons niet echt duidelijk is. Net zoals bij de meting van LGB_0/4_40 constateren we een zwelling (die ongeveer $80 \mu\text{m/m}$ bedraagt) na t_0 en begint het beton daarna autogeen te krimpen om uiteindelijk een waarde van $-186 \mu\text{m/m}$ te halen. De autogene krimp van LGB_0/4_40 na 144h is kleiner dan deze van LGB_0/4_50, wat een opmerkelijke vaststelling is. Als we merken dat bij LGB_0/4_60 de krimp ook een kleinere waarde geeft, zijn we geneigd om de resultaten van deze autogene krimpmeting te verwerpen.
- Figuur 6.5c: Opnieuw verwaarlozen we de begineffecten en bekijken we de curve pas vanaf het tijdstip 6 h. Na dit tijdstip merken we een zwelling op, welke een maximale waarde van $140 \mu\text{m/m}$ bereikt. Dit wijst op een doeltreffende werking van de interne curing. Na deze top ontwikkelt de autogene krimp zich tot 24h vrij snel en daarna op een vrij monotone manier. De uiteindelijke krimp bedraagt hier $-84 \mu\text{m/m}$. Dit zal van alle experimenten

een van de betere resultaten qua autogene krimpreductie zijn. Hiermee hebben we de veronderstelling van Powers (zie 4.3.3. *De theoretische bepaling van de benodigde hoeveelheid water*) nogmaals bevestigd, namelijk dat in de praktijk een hoeveelheid van 40 kg/m³ toegevoegd nabehandelingwater de beste resultaten geeft;

- Figuur 6.5d: Opnieuw kunnen we drie fasen onderscheiden (zie 6.3.3.2. *De autogene krimp van LGB 0/2*), hoewel de overgang tussen de 2^{de} en de 3^{de} fase ditmaal moeilijker te lokaliseren is. Als we nu het LGB_0/4 vergelijken met REF dan zien we dat er duidelijk een vermindering van autogene krimp is opgetreden en de interne nabehandeling van het beton dus wel degelijk effect heeft gehad. Door het toevoegen van ronde verzadigde AR 0/2-650R korrels hebben we een krimpreductie bekomen die zich vertaalt in een daling van - 450 naar -84 µm/m;
- Overigens merken we op dat de vorm van de drie curven van LGB_0/4 vrij gelijkaardig is, wat een indicatie van de juistheid van de metingen is;

6.4.3.3. Drukresultaten

Als we de **gemiddelde** druksterktes (het gemiddelde van mengeling 1 en 2) weergeven van zowel LGB_0/4 als van REF dan bekomen we volgende figuur:



Figuur 6.6 – De ontwikkeling van de druksterkte van LGB_0/4 en het referentiebeton

Wanneer we bovenstaande figuur analyseren, merken we enkele interessante zaken:

- Zoals het een hoge prestatie beton beaamt, is er een vrij snelle sterkteontwikkeling en een uiteindelijk hoge druksterkte na 28 dagen voor de drie samenstellingen. Bij LGB_0/4_40 bedraagt de sterkte na 1 dag 45,4 MPa. Dit is meer dan de helft van de sterkte na 28 dagen, namelijk 90,2 MPa. Ook voor LGB_0/4_60 kunnen we het zelfde besluit aannemen: 40,3 MPa is groter dan de helft van 79,6 MPa. We mogen concluderen dat we een hele snelle sterkte-evolutie van het beton op jonge leeftijd hebben. Het gebruik van Rheomac SF140, van Glenium 51 en van cement van het type "R" zijn hiervan de oorzaak;
- Wat te verwachten was, is uitgekomen: naarmate het gehalte aan Argex-korrels toeneemt, evenals de hoeveelheid 'curing-water', neemt de druksterkte van het nabehandelde beton af;
- De karakteristieke druksterkte na 28 dagen (f_{c28}) ligt nog steeds in de buurt van 80 MPa. Aldus kan het beton onderverdeeld worden in de categorie 'beton met ultrahoge prestaties (BUHP)';
- In vergelijking met het REF is het duidelijk dat we moeten inleveren hebben aan druksterkte en aan mechanisch eigenschappen;
- De sterkteontwikkeling en de druksterkte na 28 dagen bij LGB_0/2 en LGB_0/4 zijn heel overeenkomstig. Wel merken we dat de uiteindelijke druksterkte van LGB_0/4 net iets groter is.

6.4.4. Conclusie AG 0/2-580G

Nadat we in een eerste poging om de autogene krimp van het beton te beperken gebruik hebben gemaakt van gebroken verzadigde Argex-korrels, hanteren we in een tweede poging ronde verzadigde Argex-korrels. We hebben opnieuw een fractie van de fijne zandkorrels vervangen door een bepaalde hoeveelheid verzadigde lichte granulaten, type Argex AR 0/4-650R. Met behulp van deze lichte granulaten zijn we er in geslaagd verschillende hoeveelheden extra water (theoretisch 27, 33 en 40 kg/m³, werkelijk 29, 32 en 40 kg/m³) aan de betonmengeling toe te voegen en op deze manier een intern waterreservoir te creëren welke de zelfdroging tijdens de hydratatie van het cement tracht te voorkomen. We constateren dat in het geval waarbij 40 kg/m³ extra water aan het beton wordt toegevoegd, we de beste krimpreductie bekomen, beter zelf dan de reductie bekomen met de gebroken AG 0/6-580 G korrels. Lagere toegevoegde waterhoeveelheden resulteren in een grotere autogene krimp, aangezien er niet voldoende water is om het zelfdrogingsverschijnsel van het beton te elimineren. We zijn er in geslaagd de autogene krimp te beperken tot een minimale waarde van -84 µm/m. Wetende dat deze krimp -450 µm/m bedraagt bij het referentiebeton, is met behulp van de interne nabehandeling de autogene krimp meer dan 5 keer kleiner geworden. De autogene krimp van LGB_0/4_60 bedraagt met andere woorden maar 20% van deze van REF na 144h. Aan de andere kant kennen we wel een vermindering van de mechanische eigenschappen: de druksterkte van het referentiebeton na 28 dagen (109,3 MPa) is groter dan de druksterkte van het behandelde beton na 28 dagen (± 80 MPa), een vermindering van ongeveer 30 %. Bovendien komt de sterkte bij het referentiebeton

iets sneller tot ontwikkeling. Toch behoren zowel LGB_0/4 als REF tot de klasse van beton met ultra hoge prestaties: BUHP.

Tot slot vatten we de autogene krimp en de druksterkte nog even kort samen in onderstaande tabel:

	REF	LGB 0/4 40	LGB 0/4 50	LGB 0/4 60
Autogene krimp	-450 $\mu\text{m/m}$	-172 $\mu\text{m/m}$	-186 $\mu\text{m/m}$	-84 $\mu\text{m/m}$
Reductie	0%	62%	60%	81%
Druksterkte (1)	56,6 MPa	45,4 MPa	57 MPa (2)	40,3 MPa
Druksterkte (7)	94,6 MPa	77,7 MPa (8)	77 MPa	71,5 MPa
Druksterkte (28)	109,3 MPa	90,2 MPa	89,4 MPa	79,6 MPa
	100%	83%	82%	73%

Tabel 6.14 – Samenvatting: de autogene krimp en de druksterkte van REF en LGB_0/4

Indien we het gehalte aan droge AR 0/4-650 R korrels laten toenemen met 22% ($108 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 132 \text{ kg/m}^3$), waardoor er, na verzadiging van deze korrels, 10% meer nabehandelingwater in de betonspecie terecht komt ($29 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 32 \text{ kg/m}^3$) dan is een verminderde autogene krimpreductie van 2% en een extra drukvermindering van 1% hiervan het gevolg. We kunnen niet echt spreken van een succesvolle ingreep. Nog een toename van deze gebroken Argex-korrels, namelijk een toename van 48% ($108 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 160 \text{ kg/m}^3$) waardoor er 38% meer curingwater bijkomt ($29 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 40 \text{ kg/m}^3$), leidt tot een extra krimpreductie van 19% maar een extra druksterktevermindering van 10%. Als de krimpreductie belangrijker is dan de bekomen druksterkte, dan kunnen we in dit laatste geval spreken van een positieve behandeling.

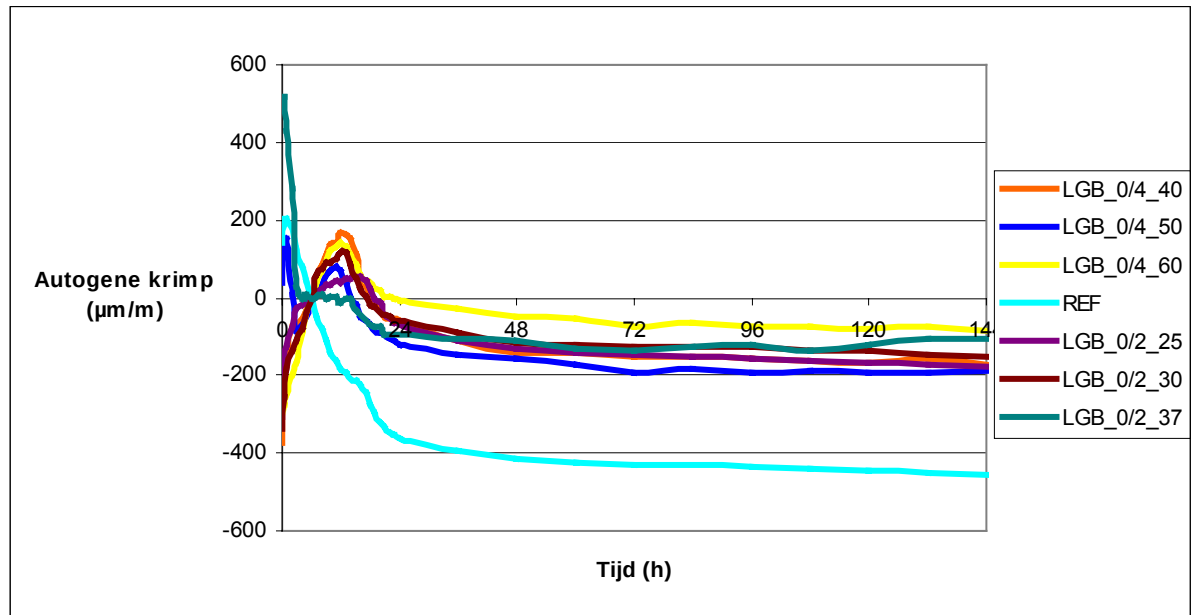
6.5. Conclusie betreffende het LGB

Een eerste poging om de autogene krimp van een beton met hoog performante eigenschappen te beperken, bestaat erin gebruik te maken van verzadigde lichte granulaten van het type Argex. Zowel een gebroken (AG 0/2-580 G) als een ronde (AR 0/4-650 R) vorm van deze korrels werden ter onze beschikking gesteld. Zo moeten we trachten een intern waterreservoir in de hydraterende cementpasta te vormen, waardoor het zelfdrogingsproces van het cement een halt wordt toegeroepen.

Theoretisch en aan de hand van het *model van Powers* [5,34,35] werd gevonden dat door het toevoegen van een hoeveelheid van 27 kg/m^3 water aan het verse beton en via de Argex korrels de autogene krimp geneutraliseerd zal worden. Aangezien een deel van het water van de verzadigde lichte granulaten niet volledig aan de cementpasta zal worden afgegeven zal de theoretisch nodige toegevoegde waterhoeveelheid om autogene krimp te vermijden kleiner zijn dan de werkelijk nodige waterhoeveelheid. Vandaar dat er verschillende betonsamenstellingen getest werden waarbij het gehalte aan verzadigde lichte granulaten varieert. We veronderstellen bovendien een volledige verzadiging (100%) van de Argexkorrels.

Hoe langer de lichte granulaten onder water geplaatst worden, hoe hoger de uiteindelijke druksterkte van hun beton wordt (*Bentur [37]*).

Als we de druksterkteproeven en de autogene krimpproeven van al deze samenstellingen naast elkaar plaatsen, kunnen we tot een overzichtelijke conclusie komen.

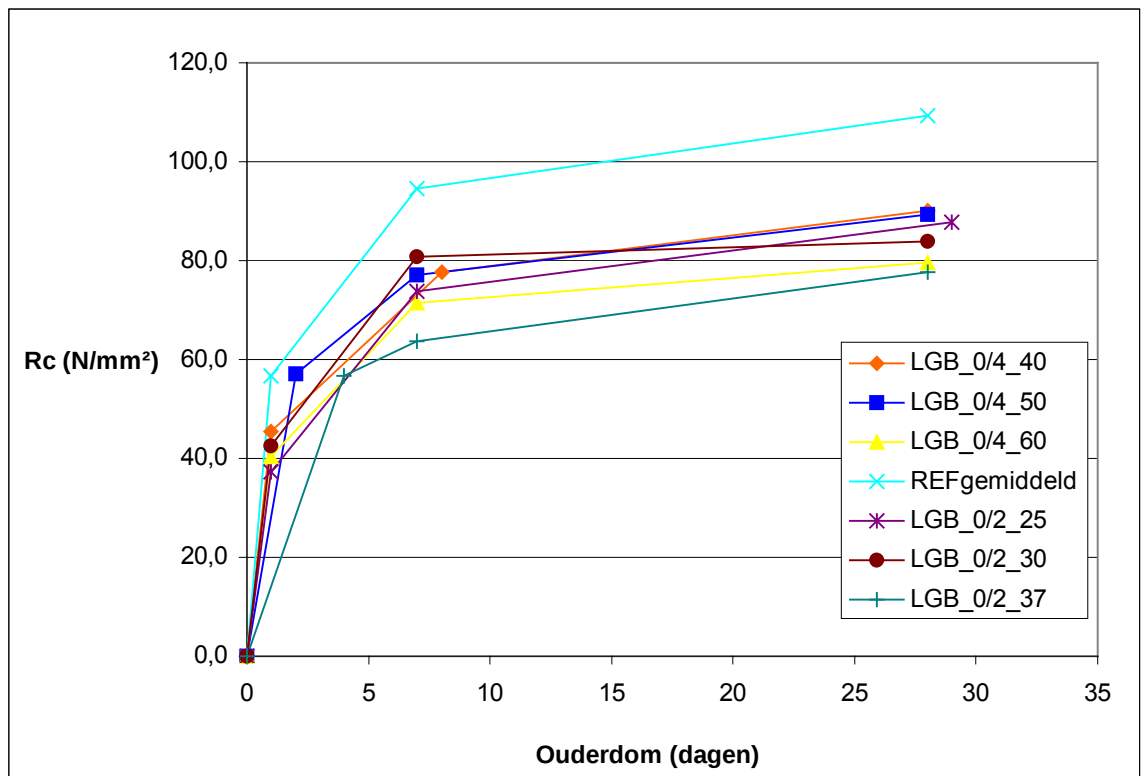


Figuur 6.7 – Samenvattende figuur: de autogene krimp van LGB en REF

Het gebruik van met water verzadigde Argexkorrels heeft dus wel degelijk een positieve invloed op de vermindering van de autogene krimp van het beton. Alle autogene krimp curven hebben een gelijkaardig verloop. Wat opvalt is dat alle betonmengelingen na 6h een zwelling vertonen die een maximum na ongeveer 13h bereikt. In het begin is er misschien te veel curingwater aanwezig dan er op dat moment strikt noodzakelijk is. Vandaar dat het beton een zwelling ondergaat. Dit staat gekend als de eerste fase waarbij een zeer doeltreffende interne curing voorkomt aangezien er een zwelling optreedt terwijl er bij het referentiebeton een zeer snelle krimp vastgesteld wordt. Uiteindelijk zal dit water toch opgebruikt worden in de 2^{de} fase tijdens de verdere hydratatie van het cement en ter voorkoming van de zelfdroging van het cement, waardoor de interne waterreserve in de lichte granulaten uitgeput begint te raken. In de 3^{de} fase (vanaf 72h) constateert men een nulvorming. De beste krimpreductie wordt bekomen indien er 40 kg/m³ extra water wordt toegevoegd. De autogene krimp na 144 h bedraagt bij LGB_0/4_60, waarbij ronde Argexkorrels gebruikt worden, nog slechts -84 µm/m, terwijl deze van het referentiebeton -450 µm/m bedraagt. Toch is deze waterhoeveelheid niet voldoende om een volledige eliminatie van de autogene krimp te bekomen. Verder onderzoek, waarbij bijvoorbeeld 50 kg/m³ intern nabehandelingwater wordt toegevoegd, is nodig.

De ronde Argexkorrels hebben een lager absorptievermogen dan de gebroken korrels, waardoor er een grotere hoeveelheid van de ronde korrels aan de mengeling moet toegevoegd worden wil men eenzelfde gehalte aan nabehandelingwater in het

beton verkrijgen. Zo zal de afstand tussen de ronde korrels en de cementdeeltjes kleiner zijn doordat er een grotere hoeveelheid aanwezig is (we hebben een betere verspreiding). Dit kan een verklaring zijn voor het bekomen van een kleinere autogene krimp indien men gebruik maakt van ronde, minder absorberende korrels. Wel dient er opgemerkt te worden dat lichte granulaten met een open structuur de voorkeur moeten krijgen aangezien zij meer en sneller water kunnen absorberen en ze ook rapper het water loslaten bij hoge relatieve vochtigheid. Dus algemeen beter toch beter gebroken korrels dan ronde.



Figuur 6.8 – Samenvattende figuur: de druksterkte van LGB en REF

Op gebied van druksterktes van het beton kan er een algemeen besluit gevormd worden: hoe meer Argex-korrels er aan de betonsamenstelling worden toegevoegd, hoe meer het beton afneemt qua druksterkte. LGB_0/4_40 kent de minste terugval in druksterkte, terwijl LGB_0/2_37 de grootste reductie kent. Indien er 40 kg/m³ nabehandelingwater aan de mengeling wordt toegevoegd, zoals dit bij LGB_0/2_37 en LGB_0/4_60 het geval is, dan bereikt het desbetreffende beton net geen 80 N/mm² aan druksterkte meer. In theorie hebben we in dat geval niet langer met BUHP te maken.

We kunnen concluderen dat, overeenkomstig met hetgeen Powers voorspeld heeft, we de beste autogene krimpreductie bekomen indien we 40 kg/m³ curingwater toevoegen. Zoals reeds aangekondigd veroorzaakt het gebruik van lichte granulaten een vermindering van druksterkte, waarbij de grootste vermindering voorkomt bij de betonsoorten die de kleinste autogene krimp hebben. Het hangt af van de aard van de constructie en van de eisen van de bouwheer of het de krimpbeperking dan wel de druksterkte is die het meeste aandacht verdient.

Hoofdstuk 7 – Experimentele resultaten van het SAP-beton

7.1. Inleiding en principe

Een andere methode om de autogene krimp van een hoge-prestatie-beton te beperken bestaat erin superabsorberende polymeren (SAP) toe te voegen om zo een interne waterbron voor het beton te vormen. Deze methode werd het eerst voorgesteld door *Jensen & Hansen* [40]. Deze superabsorberende polymeren hebben, zoals hun naam reeds doet vermoeden, een enorm waterabsorberend vermogen. Ze kunnen tot 500 keer hun gewicht opnemen in water. Vandaar dat ze tijdens de mengeling droog aan de betonspecie worden toegevoegd, waardoor ze vervolgens een deel van het aanmaakwater opnemen. Wanneer vervolgens de hydratatie van het cement van start gaat en de daarbij horende zelfdroging van het beton optreedt (daling van de interne vochtigheid), dan kan de in het beton veroorzaakte onderdruk het water uit de SAP onttrekken waardoor het mechanisme van de autogene krimp belemmerd wordt. De absorptie van het water in de SAP-korrels is gebaseerd op secundaire chemische bindingen.

Er zal een extra hoeveelheid aanmaakwater aan de betonsamenstelling worden toegevoegd, dat verondersteld wordt opgenomen te worden door de SAP-korrels. Om nog steeds tot een samenstelling van 1 m³ te komen zullen we wederom een in volume equivalente hoeveelheid zandkorrels vervangen, maar ditmaal door gewoon aanmaakwater.

We zullen vervolgens trachten om een optimale vervangingshoeveelheid te bepalen. Dit betekent dat we moeten zoeken naar een betonmengeling met toegevoegde SAP-korrels die enerzijds de autogene krimp van het beton zoveel mogelijk zullen reduceren en die anderzijds niet te veel aan druksterkte moeten inleveren.

7.2. Keuze van de superabsorberende polymeren

Er werd een type SAP gekozen op basis van een literatuurstudie en een marktstudie. Uiteindelijk viel de keuze op het materiaal Norsocryl® D-60. Het werd onder andere gekozen omwille van zijn vermogen om het geabsorbeerde water geleidelijk terug af te geven en om een interne waterbron te vormen voor het beton tijdens zijn uitharding. De eigenschappen van dit materiaal worden samengevat in onderstaande tabel:

Korrelgrootte	100-800 µm
Vorm - uiterlijk van de deeltjes	Wit poeder, uiterlijk van zoutkorrels
ρ_{werk}	750 kg/m ³
Absorberend vermogen (24h)	>500 g/g
Absorberend vermogen (300s)	130 g/g
Geltijd	100 s

Tabel 7.1 – Algemene eigenschappen Norsocryl® D-60

Deze SAP-korrels hebben een enorm absorberend vermogen. Bovenstaande waarde van 500 g/g is niet echt representatief voor een betonmengeling. Aangezien de

betonmengeling slechts 5 minuten duurt is het handiger te weten wat het absorberend vermogen van de korrels is op korte duur (zoals bijvoorbeeld 5 min). Daarom hebben we het absorberend vermogen zelf getest op volgende manier:

- Weeg een bepaalde hoeveelheid Norsocryl® D-60 korrels af. Neem bijvoorbeeld voor het gemak 1g van dit SAP.
- Plaats deze hoeveelheid SAP vervolgens op een waterdoorlatend doek, waarvan de openingen kleiner zijn dan 100 μm .
- Plaats het geheel gedurende 5 minuten in een met water gevulde kuip.
- Weeg na 300 s de met water gevulde SAP-gel.

Uiteindelijk bekomen we dat de SAP-korrels op een tijdspanne van 300s maar liefst 130g/g water absorberen. Om deze verbazingwekkende resultaten duidelijker te laten overkomen zijn volgende figuren gegeven:



Figuur 7.1 – Een illustratie van het absorberend vermogen van SAP-korrels
links: glas water / midden: bijgevoegde SAP-korrels / rechts: SAP na gelvorming

7.3. Norsocryl® D-60 voor interne curing

7.3.1. Vervanging van de normale granulaten door de SAP-korrels

Opnieuw zullen we de zandkorrels van de referentiebetonsamenstelling (zie *Tabel 5.1*) vervangen. Aangezien de SAP-korrels een enorm absorberend vermogen hebben en een kleine ρ_{werk} zal maar een kleine hoeveelheid van deze superabsorberende polymeren aan de betonsamenstelling moeten toegevoegd worden om een aanzienlijke hoeveelheid nabehandelingwater aan de mengeling toe te voegen.

We gaan een equivalent volume aan zandkorrels (afmetingen 0-5 mm) van REF (zie *Tabel 5.1*) vervangen door een equivalent volume extra aanmaakwater op zo'n manier dat het volume van de betonsamenstelling nog steeds 1 m³ bedraagt. De hoeveelheid SAP-korrels die droog dienen toegevoegd te worden bepalen we als volgt:

$$\text{hoeveelheid droog SAP} = \frac{\text{extra water}}{\text{absorberend vermogen SAP}}$$

Rest ons nu nog te bepalen hoeveel van het zand er dient te vervangen worden.

Gegevens:

ρ_w 1000 kg/m³ water
 ρ_w 2550 kg/m³ Zand 0/5

Theoretisch benodigde	Absorberend vermogen	ρ_w	hoeveelheid droog
waterhoeveelheid [kg/m ³]	[kg / kg droog granulaat]	[kg/m ³]	SAP [kg/m ³]
30	130	750	0,230769231
40	130	750	0,307692308
50	130	750	0,384615385

Gevraagd:

Hoeveelheid zand dat moet vervangen worden

Oplossing:

	MASSA		VOLUME	
WATER	30 kg ----->		0,03	12 %
	40 kg ----->		0,04 m ³ =====>	17 %
	50 kg ----->		0,05	22 %
	/ 1000 kg/m ³			
ZAND 0/5	588 kg ----->		0,230588 m ³	
	/ 2550 kg/m ³			

Antwoord:

70,6 kg zand vervangen door 0,231 kg SAP
 30 kg water
 102,0 kg zand vervangen door 0,308 kg SAP
 40 kg water
 127,5 kg zand vervangen door 0,385 kg SAP
 50 kg water

Tabel 7.2 – De bepaling van de te vervangen zandhoeveelheid

Bij de nabehandeling met verzadigde Argex-korrels hebben we gevonden dat de beste autogene krimpbeperkingen voorkomen indien er ongeveer 40 kg/m³ behandelingswater aan het beton wordt toegevoegd (zie 6.5. *Conclusie betreffende het LGB*). Toch bleef er in het beste geval (LGB 0/4_60) nog steeds een autogene krimp van –80 µm/m bestaan. Daarom opteren we om drie proefmetingen te doen, waarbij de hoeveelheid extra water toeneemt. De theoretisch benodigde waterhoeveelheid nemen we op 30, 40 en 50 kg/m³. Deze laatste waarde is een overschrijding van de volgens Powers nodige waterhoeveelheid van 40 kg/m³.

Voor de beproevingen zullen we ook hier drie keer twee mengelingen maken met een steeds toenemende hoeveelheid aan extra water en aan SAP-korrels die dit nabehandelingwater tijdens het vermengen zullen opnemen. Procentueel dient hiervoor respectievelijk 12, 17 en 22% van het volume zand vervangen worden (zie Tabel 7.2) om een volume van 1m³ over te houden. De naamgeving van de betonmengsels verwijst naar de hoeveelheid curingwater dat aan de samenstelling is toegevoegd: SAP_30, SAP_40 en SAP_50.

7.3.2. De samenstelling van SAP_30, SAP_40 en SAP_50

Het SAP-beton kan nu samengesteld worden. Deze samenstelling is volledig identiek aan REF en LGB met uitzondering van de hoeveelheid zand en een hoeveelheid nabehandelingwater en SAP-korrels die eraan worden toegevoegd. Voor het overige zijn de normale granulaten (porfier), het cement en de silicafume in dezelfde aantallen aanwezig. Opnieuw heeft de hoeveelheid aan superplastificeerder een variërende waarde, afhankelijk van de nodige verwerkbaarheid van de betonspecie.

Samenstelling	<u>SAP_30</u>	<u>SAP_40</u>	<u>SAP_50</u>
Porfier 2/6,3 [kg/m ³]	482	482	482
Porfier 6,3/20 [kg/m ³]	677	677	677
Zand 0/5 [kg/m ³]	517	486	460
CEMI 52.5R [kg/m ³]	475	475	475
Silicafume [kg/m ³]	25	25	25
Aanmaakwater [kg/m ³]	150	150	150
Superplastificeerder [kg/m ³]	2	1,5	1,3
Norsocryl ® D60 [kg/m ³]	0,231	0,308	0,385
Extra water [kg/m ³]	30	40	50
W/C [-]	0,34	0,36	0,38

Tabel 7.3 – De betonsamenstelling van SAP

Laten we nog even een korte bespreking houden bij bovenstaande tabel:

- Van elk van de drie samenstellingen worden er, zoals bij REF en LGB, opnieuw twee mengelingen gemaakt;
- De mengprocedure gaat als volgt: eerst en vooral worden de droge bestanddelen, namelijk de porfierkorrels, het zand, het cement en de silicafume in deze volgorde in de mengkuip gebracht en vervolgens gedurende 1 minuut droog voorgemengd. Terwijl de droge bestanddelen worden voorgemengd, worden de droge SAP-korrels eveneens aan de droge samenstelling toegevoegd. Vervolgens wordt het aanmaakwater, het extra water en de Glenium 51 aan de samenstelling toegevoegd en worden alle componenten nog eens gedurende 4 minuten gemengd;
- Bij SAP_30 is er een toevoeging van 0,05 % SAP-korrels in cementgewicht, terwijl deze voor SAP_40 en SAP_50 respectievelijk 0,06 % en 0,08 % bedraagt. De opvallend lage waarden van de SAP hoeveelheid zijn een gevolg van hun enorm hoog absorberend vermogen.
- De hoeveelheid aanmaakwater is voor de drie samenstellingen identiek terwijl het extra water een toenemende waarde heeft. Bijgevolg is het logisch dat de

W/C –factor het grootste is bij SAP_50 en het kleinst bij SAP_30. Omgekeerd daalt de hoeveelheid aan superplastificeerder om een vergelijkbare verwerkbaarheid van het verse beton te verkrijgen;

- Hoewel het extra water door de SAP-korrels wordt opgenomen, en zo een gel vormt, gebruiken we ter bepaling van de W/C –factor de aangepaste formule:

$$(W / C)_{eff} = \frac{W_{aanmaak} + W_{extra}}{C + k.P}$$

7.3.3. Bekomen resultaten op het referentiebeton

7.3.3.1. Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte

Op de niet verharde betonspecie werden volgende resultaten bekomen:

	SAP_30_1	SAP_30_2	SAP_40_1	SAP_40_2	SAP_50_1	SAP_50_2	eenheid
Hoeveelheid Glenium 51	90	90	70	70	60	60	cc
	2	2	1,5	1,5	1,3	1,3	l/m³
Zetmaat	8,5	10	6	11	10,5	7	cm
Gemiddelde zetmaat	9,3	9,3	8,5	8,5	8,8	8,8	cm
Massa per 8 liter	19,42	19,58	19,2	19,15	18,85	18,98	kg
Volumegewicht	2427,5	2447,5	2400	2393,75	2356,25	2372,5	kg/m³
Luchtgehalte	1,3	1,1	1,4	1,5	2,5	2,2	%

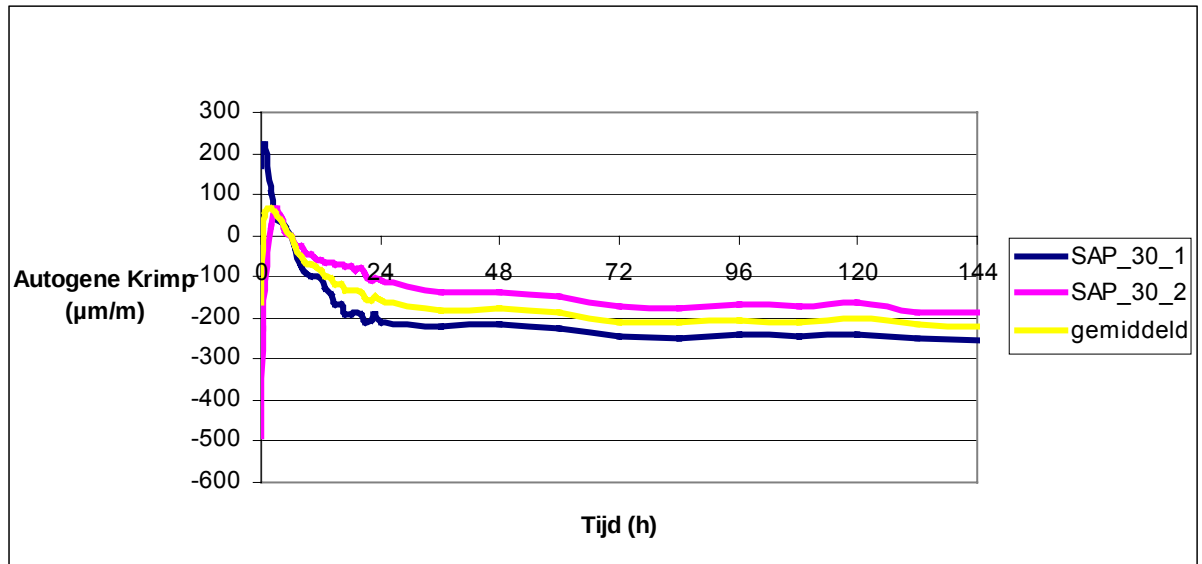
Tabel 7.4 – Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte van SAP

Uit deze resultaten kunnen we volgende korte besluiten trekken:

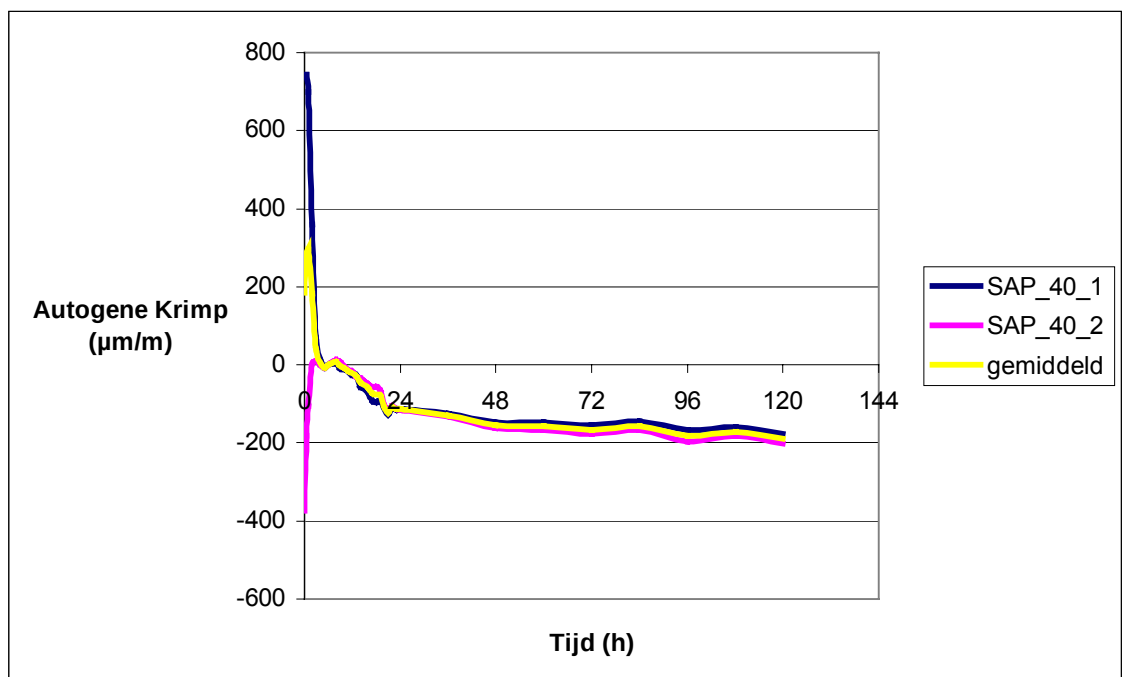
- De drie samenstellingen horen allemaal tot de consistentieklasse S2, hoewel ze heel dicht aanleunen bij consistentieklasse S3. Qua verwerkbaarheid heeft het SAP-beton dus een grotere waarde dan REF en LGB. Hoewel de hoeveelheid aan Glenium 51 niet echt verschilt van deze bij REF en LGB, is de verklaring van deze hogere verwerkbaarheid bij SAP dat er extra water rechtstreeks aan de betonsamenstelling wordt toegevoegd, terwijl dit bij LGB onrechtstreeks gebeurt (via de Argex-korrels). Nochtans nemen de SAP-korrels tijdens het mengen dit extra water op;
- Het volumegewicht van het verse beton ligt ongeveer rond de 2400 kg/m³. Vergeleken met REF, dat een volumemassa van meer dan 2400 kg/m³, is het verschil niet echt groot;
- Het luchtgehalte van SAP_50 (2,5 %) ligt merkbaar wel hoger dan dat van SAP_30 (1,5 %) en LGB_0/2_37 (1,3 %). Deze waarden liggen in de buurt van dat van REF, wat normaal is aangezien we nog steeds met hoge-prestatie-beton te maken hebben.

7.3.3.2. De autogene krimp van SAP

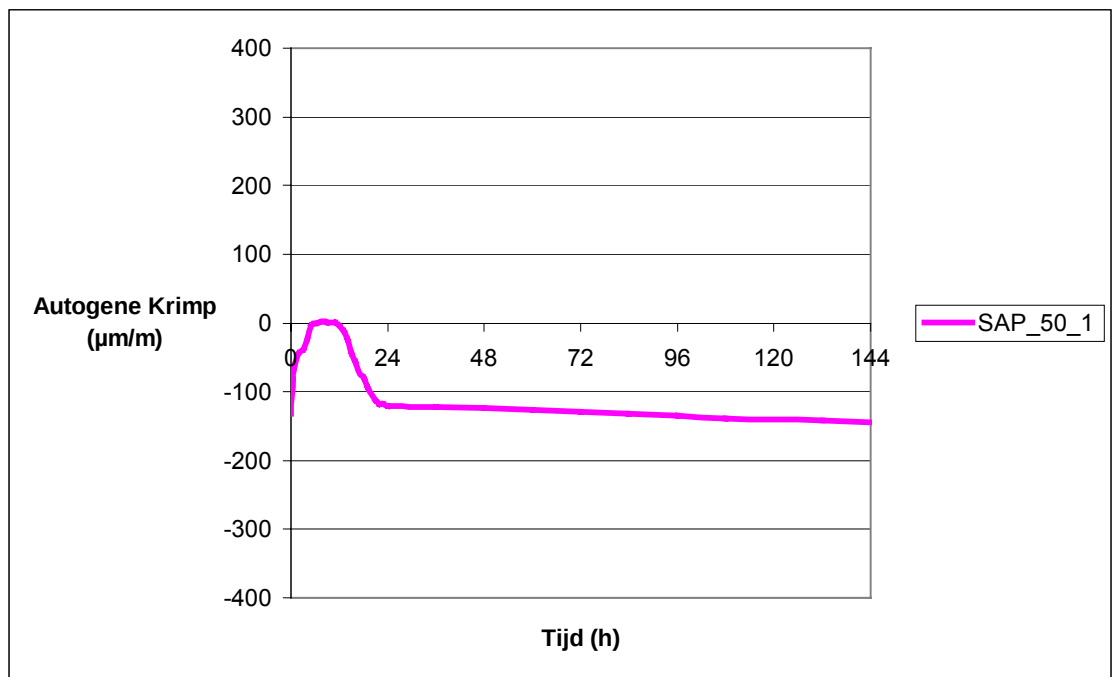
Voor elk van de samenstellingen geven we de bekomen resultaten betreffende de autogene krimp:



Figuur 7.2a – De autogene krimp van SAP_30

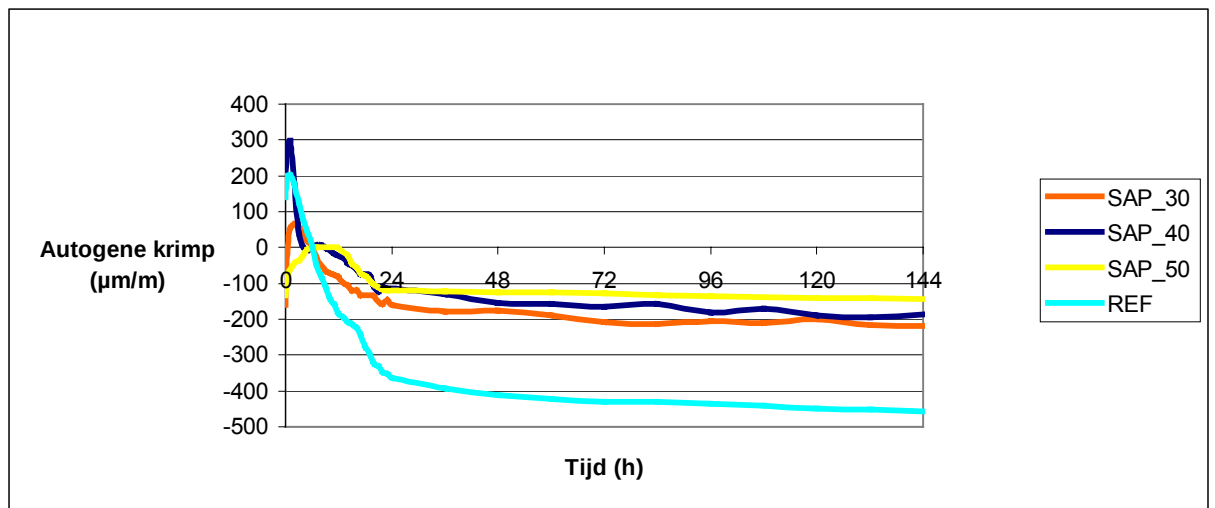


Figuur 7.2b – De autogene krimp van SAP_40



Figuur 7.2c – De autogene krimp van SAP_50

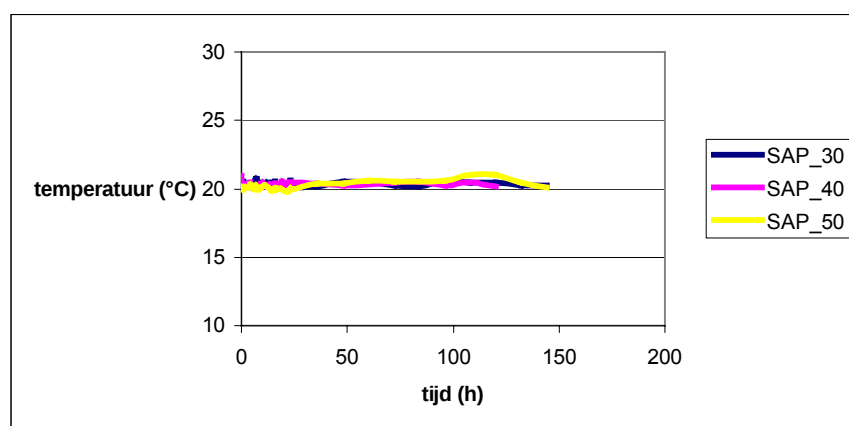
Als we nu de gemiddelde autogene krimp van de drie betonmengelingen SAP en van de referentiebetonsamenstelling in een grafiek plaatsen dan krijgen we onderstaande vergelijkende figuur:



Figuur 7.2d – Het vergelijken van autogene krimp van SAP met deze van REF

Laten we nu even stilstaan bij elk van bovenstaande figuren:

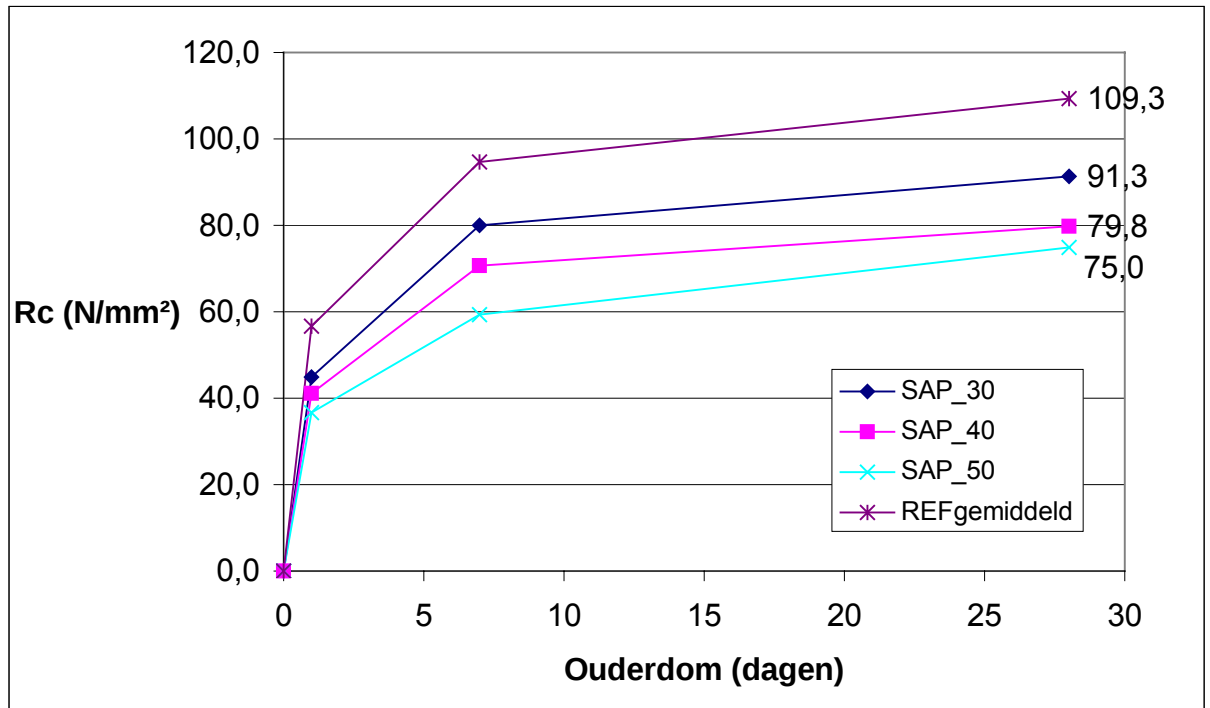
- Figuur 7.2a: Zoals te verwachten was, merken we dat de grafiek voor tijdstip 6 h een onvoorspelbaar verloop kent, waarbij er geen overeenkomst tussen SAP_30_1 en SAP_2. Daarna komen de curven van beide mengelingen goed overeen qua verloop, hoewel er een verschil van maximaal 130 $\mu\text{m}/\text{m}$ is tussen beide grafieken en naar het einde toe een verschil van ongeveer 70 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ditmaal komt de autogene krimp reeds voor t_0 tot ontwikkeling en kent het beton geen zwellen. De uiteindelijke gemiddelde autogene krimp bedraagt **-220 $\mu\text{m}/\text{m}$** ;
- Figuur 7.2b: Met uitzondering van de eerste 4 uur van de metingen vallen de grafieken van beide mengelingen nagenoeg samen. Ook hier merken we geen zwellen van het beton na tijdstip 6h, en komt de autogene krimp reeds voor dit tijdstip tot ontwikkeling om uiteindelijk een gemiddelde waarde van **-188 $\mu\text{m}/\text{m}$** te bereiken na 120 h;
- Figuur 7.2c: Wegens het geven van onrealistische resultaten kunnen we enkel beroep doen op de resultaten van de eerste mengeling. In tegenstelling tot SAP_30 en SAP_40 merken we hier wel een lichte zwellen na tijdstip t_0 die ongeveer 6 uur duurt en een maximale waarde van 1,5 $\mu\text{m}/\text{m}$ bereikt. Vervolgens constateren we een sterke autogene krimpontwikkeling die zich na ongeveer 23 h stabiliseert en waardoor de grafiek na dit tijdstip een vlakker verloop kent. Het beton bereikt een uiteindelijke waarde van **-144 $\mu\text{m}/\text{m}$** autogene krimp;
- Figuur 7.2d: Vergelijking van SAP met REF geeft duidelijk aan dat er een vermindering van autogene krimp is opgetreden en de interne nabehandeling van het beton dus wel degelijk effect heeft gehad. Door het toevoegen van de superabsorberende polymeren hebben we een krimpreductie bekomen die zich vertaalt in een daling van **-450 naar -144 $\mu\text{m}/\text{m}$** ;
- Overigens merken we dat de vorm van de drie curven van SAP vrij gelijkaardig is, wat een indicatie van de juistheid van de metingen is. Wel stellen we vast dat naarmate er meer curing water en meer SAP-korrels aan de samenstelling worden toegevoegd, de neiging tot zwellen toeneemt de eerste uren na t_0 ;
- Wat de gemeten temperatuur via het thermokoppel betreft, vinden we dat deze nagenoeg niet varieert gedurende de meting van de autogene krimp en rond de 20°C schommelt.



Figuur 7.3 – De temperatuursontwikkeling in SAP

7.3.3.3. Drukresultaten

Als we de **gemiddelde** druksterktes (het gemiddelde van mengeling 1 en 2) weergeven van zowel SAP als van REF dan bekommen we volgende figuur:



Figuur 7.4 – De ontwikkeling van de druksterkte van SAP en het referentiebeton

Wanneer we bovenstaande figuur analyseren, merken we enkele interessante zaken:

- Zoals het een hoge prestatie beton beaamt, is er een vrij snelle sterkteontwikkeling en een uiteindelijk hoge druksterkte na 28 dagen voor de drie samenstellingen. Bij SAP_30 bedraagt de druksterkte na 1 dag 45 MPa. Dit is net iets minder dan 50 % van de druksterkte na 28 dagen, namelijk 91,3 MPa. Voor SAP_40 bedraagt de sterkte na 1 dag, namelijk 41,2 MPa, net iets meer dan 50 % van 79,8 MPa. We mogen concluderen dat we een hele snelle sterkte-evolutie van het beton op jonge leeftijd hebben. Het gebruik van Rheomac SF140, van Glenium 51 en van cement van het type “R” zijn hiervan de oorzaak. Voor SAP_50 bedraagt de sterkte op 1 dag eveneens ongeveer 50 % van de druksterkte op 28 dagen;
- Wat te verwachten was, is uitgekomen: naarmate het gehalte aan SAP-korrels toeneemt, evenals de hoeveelheid ‘curing-water’, neemt de druksterkte van het nabehandelde beton af;
- De karakteristieke druksterkte na 28 dagen (f_{c28}) ligt nog steeds in de buurt van 80 MPa. Aldus kan het beton onderverdeeld worden in de categorie ‘beton met ultrahoge prestaties (BUHP)’;
- In vergelijking met het REF is het duidelijk dat we hebben moeten inleveren aan druksterkte en aan mechanisch eigenschappen;

7.4. Conclusie betreffende het SAP

In een volgende poging om de autogene krimp van een hoge-prestatie-beton te beperken hebben we gebruik gemaakt van superabsorberende polymeren, type Norsocryl ® D-60. Deze korrels werden droog aan de samenstelling toegevoegd evenals een extra hoeveelheid intern nabehandelingwater. De SAP-korrels zullen dan tijdens het vermengen van de verschillende bestanddelen van het beton een deel van het water opnemen, waardoor ze een intern waterreservoir vormen in het beton om eventuele zelfdroging tijdens de hydratatie van het beton te beperken.

Er werden drie samenstellingen getest waarbij de hoeveelheid extra water respectievelijk 30, 40 en 50 kg/m³ bedraagt. Hiervoor hebben we opnieuw een fractie van de zandkorrels moeten verwijderen om opnieuw een samenstelling van 1 m³ te bekomen.

Uiteindelijk kunnen we besluiten dat de beste autogene krimpreductie bekomen wordt indien er 50 kg/m³ extra water wordt toegevoegd dat theoretisch door 385 g/m³ SAP-korrels wordt opgenomen. De autogene krimp bedraagt -144 µm/m. Hiervoor hebben we wel moeten inleveren aan druksterkte: de druksterkte na 28 dagen van SAP_50 bedraagt slechts 69 % van de druksterkte van REF. Anderzijds is de krimp wel met 68 % gereduceerd. Bij SAP_30 kost een krimpreductie van ongeveer 50 % een inlevering van druksterkte van amper 15 %. Het hangt af van de bouwheer waar in de praktijk het meeste belang moet worden aan gehecht. Toch kunnen we het SAP-beton nog tot de klasse van BUHP rekenen.

Toch blijft de verhoopte volledige krimpreductie uit. Deze zou eventueel bekomen kunnen worden mochten we gebruik gemaakt hebben van een grotere hoeveelheid aan SAP-korrels. Op deze manier ontstaat er een grotere verspreiding van de met water gevulde korrels en wordt de afstand tussen de SAP-korrels en de cementkorrels kleiner, wat de autogene krimpvermindering ten goede komt. Als we even terugkijken naar Fig 7.2d dan merken we dat er nagenoeg geen zwelling optreedt na tijdstip 6h. Er is dus op elk tijdstip maar net voldoende curing water voorhanden, waardoor er naar het einde van de metingen misschien een tekort is en de zelfdroging dan niet meer tegengehouden wordt. Bij onderzoeken in de toekomst kan hier rekening mee gehouden worden.

Tot slot vatten we de autogene krimp en de druksterkte nog even kort samen in onderstaande tabel:

	REF	SAP 30	SAP 40	SAP 50
Autogene krimp	-450 µm/m	-220 µm/m	-188 µm/m	-144 µm/m
Reductie	0%	51%	58%	68%
Druksterkte (1)	56,6 MPa	45 MPa	41,2 MPa	36,6 MPa
Druksterkte (7)	94,6 MPa	80 MPa (8)	70,7 MPa	59,4 MPa
Druksterkte (28)	109,3 MPa	91,3 MPa	79,8 MPa	75 MPa
	100%	84%	73%	69%

Tabel 7.5 – Samenvatting: de autogene krimp en de druksterkte van REF en SAP

Als we nu het gehalte aan SAP-korrels laten toenemen met 33% ($0,231 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 0,308 \text{ kg/m}^3$), en de hoeveelheid nabehandelingwater ook met 33% vermeerdert ($30 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 40 \text{ kg/m}^3$) dan is een extra autogene krimpreductie van 7% en een extra drukvermindering van 11% hiervan het gevolg. Nog een toename van de hoeveelheid superabsorberende polymeren van 66% ($0,231 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 0,385 \text{ kg/m}^3$) waardoor er 66% meer curingwater bijkomt ($30 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 50 \text{ kg/m}^3$), leidt tot een extra krimpreductie van 17% maar een extra druksterktevermindering van 15%.

Maken we even de vergelijking met 4.4.5.2 *Voorafgaande autogene krimpmetingen* dan stellen we vast dat wij door gebruik te maken van een lagere dosering aan SAP-korrels een even grote autogene krimpreductie zijn gekomen (ordegrootte 50-60%). Wel merken we een veel groter druksterktevermindering als we *Tabel 4.6* en *Tabel 7.5* naast elkaar leggen. Aangezien we bij onze beproevingen maar een kleine hoeveelheid aan SAP-korrels hebben toegevoegd (een gehalte die 10 keer kleiner is dan de voorafgaande krimpmetingen), rijst de vraag of het niet beter is om een hoger gehalte aan SAP-korrels te hanteren bij gelijkblijvende hoeveelheid aan nabehandelingwater. De druksterkte zal echter opnieuw afnemen, maar we bekommen een grotere verspreiding van de SAP-korrels, wat kan leiden tot een efficiëntere interne nabehandeling. Verder onderzoek zal dit moeten uitwijzen.

Hoofdstuk 8 – Experimentele resultaten van het gerecycleerde granulaten beton RGB

8.1. Inleiding en principe

In een laatste poging de autogene krimp van het hoge-prestatie-beton te beperken, zullen we gebruik maken van gerecycleerde granulaten. Net zoals bij het LGB, kan men de uitdroging van de cementpasta voorkomen door gebruik te maken van verzadigde gerecycleerde granulaten, die op hun beurt een intern waterreservoir creëren in het beton. Het water wordt fysisch vast gehouden in de natuurlijke poriën van het gerecycleerde granulaat. Wanneer het cement hydrateert, zal het extra toegevoegde water uit de relatief grotere poriën van de gerecycleerde granulaten onttrokken worden en naar de kleinere poriën van de cementpasta gaan. Dit beperkt de zelfdroging van het beton en vermindert de ontwikkeling van de autogene krimp.

Opnieuw zullen we een gedeelte van de zandkorrels van het REF vervangen door verzadigde gerecycleerde granulaten. Op deze manier willen we 50 kg/m³ water aan de betonmengeling toevoegen. Naast de proeven op het verse beton zullen opnieuw autogene krimp –en drukmetingen uitgevoerd worden.

8.2. Keuze van de gerecycleerde granulaten

8.2.1. Algemeen

Er werden twee types gerecycleerde granulaten ter onze beschikking gesteld, namelijk metselgranulaten en menggranulaten. Beide zijn ze afkomstig van steenachtige afvalstoffen welke verwerkt en gerecycleerd werden tot hoogwaardige granulaten.

Er werd ons bij de levering heel weinig informatie verschaft betreffende de ontvangen granulaten. Het gaat over:

- Steennet metselgranulaat 1-2 mm & Steennet metselgranulaat ½ -1 mm
- Steennex menggranulaat 1-2 mm & Steennex menggranulaat ½ -1 mm



Figuur 8.1 – Steennex menggranulaat (links) en Steennet metselgranulaat (rechts)

Vooraleer over te gaan tot de keuze van de vervangingshoeveelheid aan gerecycleerde granulaten, bepalen we eerst hun absorberend vermogen en hun werkelijke volumemassa.

8.2.2. Bepaling van het absorberend vermogen

De methode om na te gaan hoeveel water de gerecycleerde granulaten kunnen opnemen op een tijdsperiode van 24h ziet er als volgt uit:

- Weeg een bepaalde hoeveelheid van het desbetreffende materiaal en plaats deze hoeveelheid in een waterdichte kuip. Gemakkelijkheidshalve nemen we een hoeveelheid van 1 kg.
- Vervolgens vult men de kuip met de afgewogen hoeveelheid granulaten erin met water, en laat men deze granulaten erin gedurende 24h. De granulaten zullen een deel van het water opnemen.
- Na 24h ledigt men de kuip en vangt men de verzadigde granulaten op met een waterdoorlatend doek waarvan de openingen kleiner zijn dan de kleinste korreldiameters (dus kleiner dan 0,5 mm).
- Door met een droog doek over de granulaten te gaan, tracht men deze volledig verzadigde granulaten oppervlaktedroog te maken (zie Fig 2.2).
- Tenslotte weegt men deze oppervlaktedroge verzadigde gerecycleerde granulaten en kan men het absorberend vermogen afleiden.

Op deze manier bekomen we voor de absorberende vermogens van de granulaten:

	<u>Droge massa</u>	<u>Natte massa en oppervlaktedroog</u>	<u>Absorberend vermogen (na 24h)</u>
Steennet metselgranulaat 1-2 mm	1 kg	1,4 kg	0,4 kg/kg droog granulaat
Steennet metselgranulaat ½ - 1 mm	1 kg	1,5 kg	0,5 kg/kg droog granulaat
Steennex menggranulaat 1-2 mm	1 kg	1,3 kg	0,3 kg/kg droog granulaat
Steennex menggranulaat ½ - 1 mm	1 kg	1,4 kg	0,4 kg/kg droog granulaat

Tabel 8.1 – Absorberend vermogen van de gerecycleerde granulaten

Het vermoeden dat de kleinere korrels meer water kunnen opnemen is bij deze bevestigd.

Wel dient opgemerkt te worden dat wij conventioneel aannemen dat de korrels volledig verzadigd zijn na een onderdompeling van 24h in het water.

8.2.3. Bepaling van de werkelijke volumemassa

Ook de werkelijke volumemassa ρ_{werk} is een belangrijk maar ongekend gegeven. Daarom is de bepaling ervan een volgende opdracht. Hiervoor hebben we volgende methode gehanteerd [4]:

- 1) Bepaal de droge massa van een hoeveelheid granulaat M_k : $M_k = 1\text{ kg}$
- 2) Bepaal de massa van dezelfde met water verzadigde en oppervlakedroge granulaten, M_1 . Hiervoor verwijzen we naar *Tabel 8.1*.
- 3) Vervolgens vullen we een vat volledig met water. De massa hiervan bedraagt exact 8 kg: $M_2 = 8\text{ kg}$
- 4) Tenslotte plaatsen we de verzadigde granulaten in hetzelfde vat en vullen we het opnieuw volledig met water. Hiervan bepalen we opnieuw de massa M_3 .
- 5) De werkelijke volumemassa bekomen we aan de hand van onderstaande formule:

$$\rho_{\text{werk}} = \frac{1000 * M_k}{(M_1 + M_2 - M_3)}$$

De resultaten van bovenstaand beschreven proef staan hieronder genoteerd.

	<u>M₁</u>	<u>M₃</u>	<u>ρ_{werk}</u>
Steennet metselgranulaat 1-2 mm	1,4 kg	8,65 kg	1333 kg/m ³
Steennet metselgranulaat ½ - 1 mm	1,5 kg	8,6 kg	1111 kg/m ³
Steenex menggranulaat 1-2 mm	1,3 kg	8,6 kg	1429 kg/m ³
Steenex menggranulaat ½ -1 mm	1,4 kg	8,6 kg	1250 kg/m ³

Tabel 8.2 – De werkelijke volumemassa van de gerecycleerde granulaten

8.2.4. Algemene eigenschappen van de gerecycleerde granulaten

Wegens een gebrek aan tijd en een gebrek aan beschikbare materialen zullen we met elk van de types gerecycleerde granulaten één betonmengeling maken, in een poging de autogene krimp van het beton waarin ze vermengd worden te beperken.

Wat de exacte samenstelling van deze gerecycleerde granulaten is, is niet exact gekend. Daaromtrent moeten bijkomende proeven uitgevoerd worden. Wegens tijdsgebrek valt dit buiten het kader van dit eindwerk. We gaan nu nog eens kort elk van vorige producten bespreken aan de hand van hun courante eigenschappen:

a) Steennet metselgranulaat ½ -1 mm

Korrelgrootte	½ -1 mm
Vorm van de deeltjes	Gebroken
ρ_{werk}	1111 kg/m ³
Absorberend vermogen (24h)	0,5 kg /kg droog granulaat
Kleur	rood

Tabel 8.3 – Algemene eigenschappen Steennet metselgranulaat ½ -1 mm

b) Steennet metselgranulaat 1-2 mm

Korrelgrootte	1-2 mm
Vorm van de deeltjes	Gebroken
ρ_{werk}	1333 kg/m ³
Absorberend vermogen (24h)	0,4 kg /kg droog granulaat
Kleur	rood

Tabel 8.4 – Algemene eigenschappen Steennet metselgranulaat 1-2 mm

c) Steennex menggranulaat ½ -1 mm

Korrelgrootte	½ -1 mm
Vorm van de deeltjes	Gebroken
ρ_{werk}	1250 kg/m ³
Absorberend vermogen (24h)	0,4 kg /kg droog granulaat
Kleur	grijs-bruin

Tabel 8.5 – Algemene eigenschappen Steennex menggranulaat ½ -1 mm

d) Steennex menggranulaat 1-2 mm

Korrelgrootte	1-2 mm
Vorm van de deeltjes	Gebroken
ρ_{werk}	1429 kg/m ³
Absorberend vermogen (24h)	0,3 kg /kg droog granulaat
Kleur	grijs-bruin

Tabel 8.6 – Algemene eigenschappen Steennex menggranulaat 1-2 mm

8.3. Steennet metselgranulaten voor interne curing

8.3.1. Vervanging van de zandkorrels door de Steennet metselgranulaten

Vertrekkende van de referentiebetonsamenstelling (zie *Tabel 5.1*) bepalen we de hoeveelheid zandkorrels die moet vervangen worden door een equivalent volume aan verzadigde Steennet metselgranulaten om zo opnieuw een mengeling van 1 m³ te bekomen. Dit bepalen we zowel voor het type met afmetingen ½ -1 mm als voor het type met korrelafmetingen 1-2 mm. De hoeveelheid van het zand dat hiervoor moet vervangen (oorspronkelijk 588 kg/m³ zand) worden, bedraagt:

<u>Gegevens:</u>				
ρ_w		1111 kg/m ³	Steennet 1/2-1 mm	
ρ_w		1333 kg/m ³	Steennet 1-2 mm	
ρ_w		2550 kg/m ³	Zand 0/5	
Theoretisch benodigde	Absorberend vermogen	ρ_w	hoeveelheid droog	
waterhoeveelheid [kg/m ³]	[kg / kg droog granulaat]	[kg/m ³]	granulaat [kg/m ³]	
50	0,5	1111	100	Steennet 1/2-1
50	0,4	1333	125	Steennet 1-2
<u>Gevraagd:</u>				
Hoeveelheid zand dat moet vervangen worden				
<u>Oplossing:</u>				
	MASSA		VOLUME	
STEENNET 1/2-1	100 kg ----->		0,090009 m ³ =====>	39 %
STEENNET 1-2	125 kg ----->		0,093773 m ³ =====>	41 %
	/ ρ_w			
ZAND 0/5	588 kg ----->		0,230588 m ³	
	/ 2550 kg/m ³			
<u>Antwoord:</u>				
	229,5 kg zand vervangen door	100 kg droog Steennet ½-1 mm		
	239,1 kg zand vervangen door	125 kg droog Steennet 1-2 mm		

Tabel 8.7 – De bepaling van de te vervangen zandhoeveelheid

We hebben geopteerd om via de Steennet granulaten 50 kg water toe te voegen aan een betonmengeling van 1m³. Deze waarde is iets meer dan de volgens Powers theoretisch aan te raden hoeveelheid van 30 – 40 kg/m³. We zullen met elke soort van deze granulaten 1 mengeling maken. Procentueel dient voor het beton met de fijnste gerecycleerde granulaten 39% van het volume zand vervangen worden (zie *Tabel 8.7*) om een volume van 1m³ over te houden, terwijl dit voor de grofste granulatensoort 41% bedraagt. Volgende naamgeving wordt gebruikt voor de

betonmengsels: RGB_RO_fijn en RGB_RO_grof , waar RGB staat voor ‘Recyclage Granulaten Beton’, en RO voor ‘rood’, de kleur van de Steennet metselgranulaten.

8.3.2. Samenstelling van RGB_RO

Nu zijn we in staat om het gerecycleerde granulatenbeton samen te stellen. In vergelijking met het referentiebeton REF heeft deze samenstelling een zelfde gehalte aan cement, porfier en silicafume. Bovendien is de rechtstreeks toegevoegde hoeveelheid water eveneens ongewijzigd gebleven. Wel dient opgemerkt te worden dat er onrechtstreeks, via de gerecycleerde korrels, een extra hoeveelheid water (50 kg/m³) aan de samenstelling is toegevoegd. Het is dit water die de strijd tegen de autogene krimp aangaat.

Enkel de zandhoeveelheid verschilt met dat van REF. Ook de hoeveelheid aan superplastificeerder heeft een variërende dosering. Deze laatste wordt proefondervindelijk vastgesteld: vanaf het moment dat we een toelaatbare consistentie bekomen, wordt er geen Glenium 51 meer aan de mengeling toegevoegd.

Samenstelling	RGB RO fijn	RGB RO grof
Porfier 2/6,3 [kg/m ³]	482	482
Porfier 6,3/20 [kg/m ³]	677	677
Zand 0/5 [kg/m ³]	358	349
CEMI 52.5R [kg/m ³]	475	475
Silicafume [kg/m ³]	25	25
Aanmaakwater [kg/m ³]	150	150
Superplastificeerder [kg/m ³]	1,65	1,65
Steennet droog[kg/m ³]	100 (1/2-1)	125 (1-2)
Steennet nat [kg/m ³]	150	175
Extra water [kg/m ³]	50	50
W/C [-]	0,38	0,38

Tabel 8.8 – De betonsamenstelling van RGB_RO

De bovenstaande tabel met de betonsamenstelling vereist toch nog enige verduidelijking:

- Van elk van de twee bovenstaande samenstellingen wordt er slechts één mengeling gemaakt;
- De droge bestanddelen, namelijk de porfierkorrels, het zand, het cement en de silicafume worden in deze volgorde in de mengkuip gebracht en vervolgens gedurende 1 minuut droog voorgemengd. Vervolgens wordt het aanmaakwater, de verzadigde Steennet metselgranulaten en de Glenium 51 aan de samenstelling toegevoegd en worden alle componenten nog eens gedurende 4 minuten gemengd;
- De zandhoeveelheid in de betonsamenstelling van RGB_RO bekomt men door van 588 kg/m³ (zie *Tabel 5.1*) de vervangingshoeveelheid (zie *Tabel 8.7*) af te trekken. Zo bekomt men bijvoorbeeld:

$$358 \frac{kg}{m^3} = (588 - 229,5) \frac{kg}{m^3};$$

- Theoretisch gezien zou er 50 kg/m³ extra water aan het mengsel toegevoegd worden. In de praktijk blijkt dit iets minder te zijn, namelijk 49 kg/m³ voor RGB_RO_fijn en 36 kg/m³ voor RGB_RO_grof. Het absorptievermogen van de Steennex metselgranulaten zal dus iets kleiner zijn dan oorspronkelijk bepaald;
- Om de W/C –factor te bepalen zullen we de eerder geziene formule (zie 2.2. *De Water/ Cement –factor*) lichtjes wijzigen, en dit door de aanwezigheid van het extra water. De aangepaste formule wordt nu:

$$(W / C)_{eff} = \frac{W_{aanmaak} + W_{extra}}{C + k.P}$$

8.3.3. Bekomen resultaten op RGB_RO

Volgende proeven worden uitgevoerd op het gemaakte beton :

- Slumptest op het verse beton;
- Bepaling van het volumegewicht en het luchtgehalte van het verse beton;
- Meting van de autogene krimp gedurende 144h;
- Bepaling van de druksterkte van het beton op 1, 7 en 28 dagen.

Vervolgens kunnen we bepalen in welke mate het toevoegen van de gerecycleerde granulaten de autogene krimp daadwerkelijk verminderd heeft en in welke mate de druksterkte van het gerecycleerde granulatenbeton is afgenomen. Vooreerst beginnen we met de eigenschappen te bepalen van verse beton.

8.3.3.1. Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte

Op de verse betonspecie werden volgende resultaten bekomen:

	RGB_RO_fijn	RGB_RO_grof	eenheid
Hoeveelheid glemium 51	75	75	cc
	1,65	1,65	l/m ³
Zetmaat	12	5	cm
Massa per 8 liter	18,9	18,9	kg
Volumegewicht	2362,5	2362,5	kg/m ³
Luchtgehalte	1,7	2,1	%

Tabel 8.9 – Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte van RGB_RO

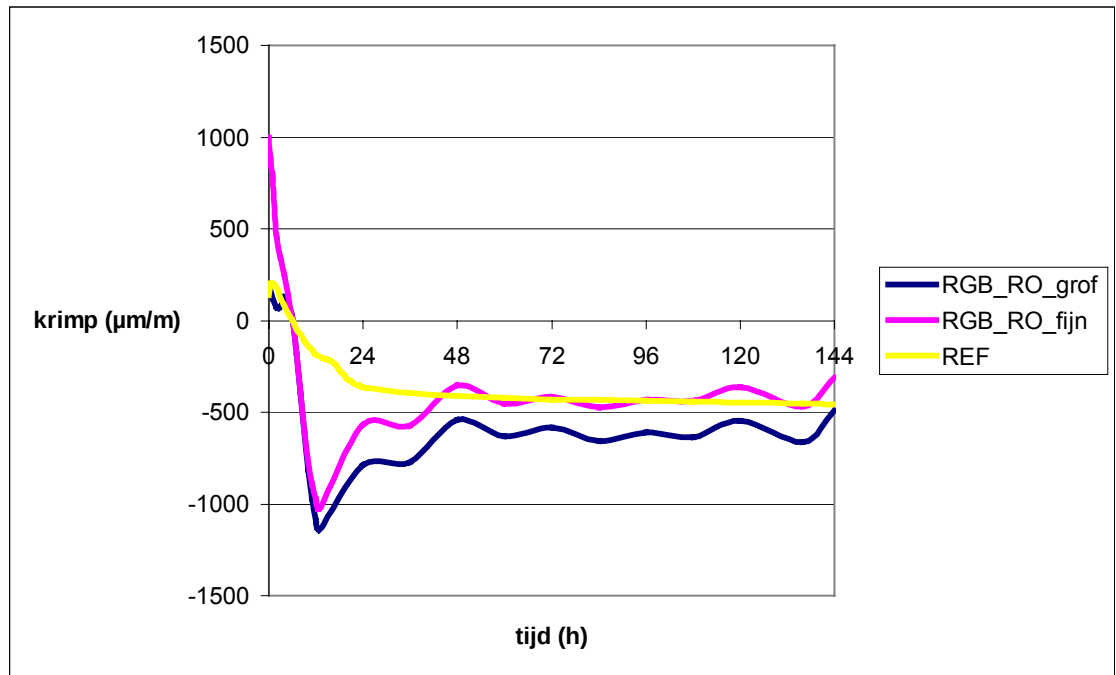
Uit deze resultaten kunnen we volgende korte besluiten trekken:

- RGB_RO_fijn is een beton dat tot de consistentieklasse S3 behoort, terwijl RGB_RO_grof tot klasse S2 behoort. In vergelijking met het referentiebeton heeft REC_RO_grof een vergelijkbare verwerkbaarheid. RGB_RO_fijn daarentegen heeft een hogere consistentie dan REF. Een verklaring hiervoor kan zijn dat bij RGB_RO_fijn wel degelijk 50 kg/m³ water via de gerecycleerde granulaten aan de mengeling is toegevoegd, terwijl dit voor RGB_RO_grof een kleinere hoeveelheid is (36kg/m³) ;

- Vergeleken met REF, dat een volumemassa van meer dan 2400 kg/m^3 , kunnen we stellen dat door het toevoegen van lichtere gerecycleerde granulaten het volumegewicht licht afgenomen is;
- De waarden van het luchtgehalte liggen in de buurt van deze van REF;

8.3.3.2. De autogene krimp van LGB_0/2

Wat de autogene krimp betreft bekomen we volgende merkwaardige figuur:



Figuur 8.2 – De autogene krimp van RGB_RO en REF

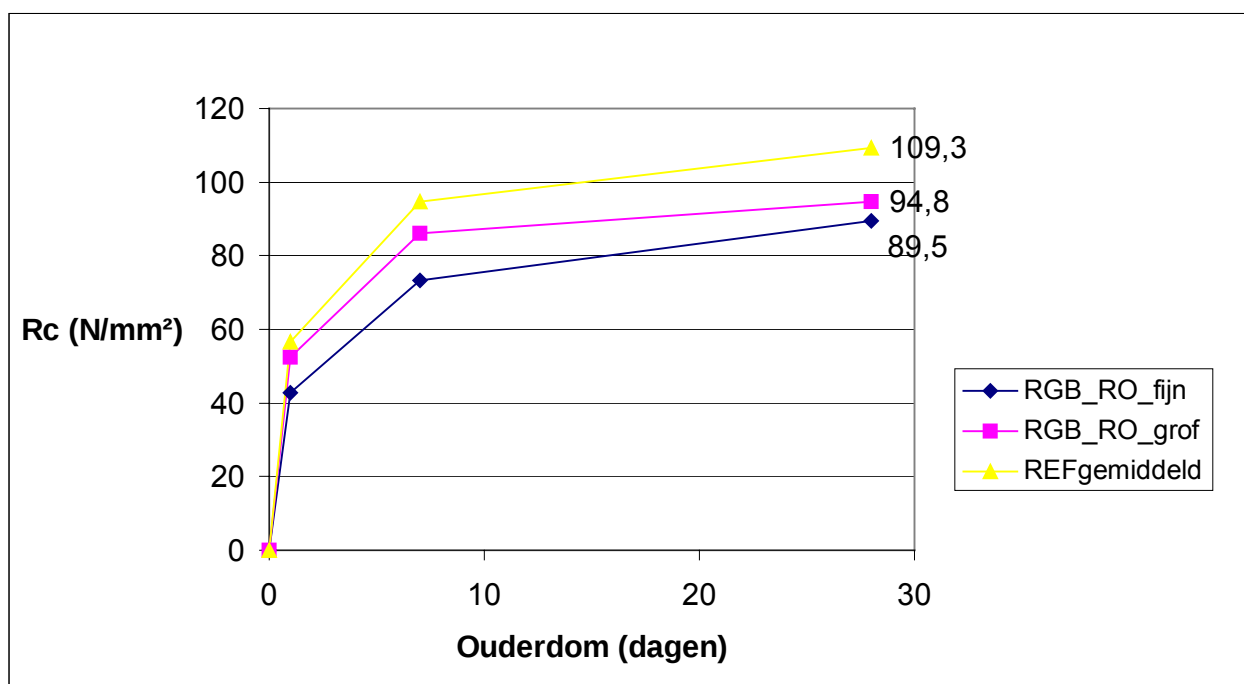
Laten we nu even stilstaan bij bovenstaande figuur:

- Op het eerste zicht zijn we geneigd om de onrealistisch uitziende resultaten te verwerpen maar aangezien de curven voor beide mengelingen een volledig gelijkaardig verloop kennen, moeten we de bekomen resultaten toch aanvaarden;
- Vanaf het tijdstip t_0 ontwikkelt de autogene krimp zich zowel bij RGB_RO_grof als bij RGB_RO_fijn zich zeer snel om tot een maximale waarde van respectievelijk -1139 µm/m en -1025 µm/m na 13 h te bekomen. De oorsprong van deze snelle ontwikkeling van de autogene krimp blijft ons voorlopig onbekend. Een bijkomende materiaalstudie van de Steennet metselgranulaten is vereist en kan mogelijk tot verduidelijking leiden;
- De volgende twaalf uur stellen we een zwelling vast. Vervolgens blijft de autogene krimp ongeveer constant tot 36h na het begin van de meting;
- Na 48 h kent de autogene krimpcurve een dagschommeling en kunnen we niet echt van een stabilisatie van de krimp spreken;
- Uiteindelijk merken we wel op dat we niet echt van een autogene krimpductie kunnen spreken. De interne nabehandeling met Steennet

metsselgranulaten, korrelafmetingen 1-2 mm, veroorzaakt zelfs meer autogene krimp dan REF.

8.3.3.3. Drukresultaten

We maken een figuur waarop de **gemiddelde** druksterktes (de druksterkte op 28 dagen wordt op 2 kubussen bepaald) weergegeven zijn. Om de vergelijking met REF te kunnen maken hebben we de gemiddelde druksterkte ervan eveneens op de figuur weergegeven.



Figuur 8.3 – De ontwikkeling van de druksterkte van RGB_RO en het referentiebeton

De analyse van Fig 8.3 geeft:

- In de twee betonsoorten merken we een snelle druksterkte-ontwikkeling. De druksterkte van RGB_RO_fijn bedraagt 42,9 MPa na 1 dag (dit is 47,9 % van de sterkte na 28 dagen) terwijl dit voor RGB_RO_grof reeds 52,4 MPa (dit is 55,3 % van de sterkte na 28 dagen) is. We mogen concluderen dat we een hele snelle sterkte-evolutie van het beton op jonge leeftijd hebben. Het gebruik van Rheomac SF140, van Glenium 51 en van cement van het type “R” zijn hiervan de oorzaak;
- Opvallend is dat de druksterkte van RGB_RO_grof groter is dan deze van RGB_RO_fijn hoewel er een grotere massa aan gerecycleerde lichtere granulaten en een kleinere zandhoeveelheid aanwezig is bij RGB_RO_grof.
- De karakteristieke druksterkte na 28 dagen (f_{c28}) bedraagt respectievelijk 89,5 MPa en 94,8 MPa voor RGB_RO_fijn en RGB_RO_grof. Aldus kan het beton ondergebracht worden in de categorie ‘beton met ultrahoge prestaties (BUHP)’.

8.3.4. Conclusie: Steennet metselgranulaat

Een gedeelte van de zandkorrels hebben we vervangen door Steennet metselgranulaat (korrelafmetingen $\frac{1}{2}$ -1 mm en 1-2 mm), een gerecycleerd granulaat, die we voorafgaand 24h onder water hebben geplaatst om zo volledige verzadiging te bekomen. Deze granulaten vormen dan op hun beurt een intern waterreservoir. We hebben een dosering aan Steennet metselgranulaten gekozen zodat 50 kg/m³ extra water aan de betonmengeling wordt toegevoegd. Uiteindelijk merken we dat dit geen verbetering oplevert: de autogene krimp is ongeveer even groot als bij het referentiebeton. Bovendien hebben we moeten inleveren aan druksterkte.

Wel dient opgemerkt te worden dat onze kennis betreffende de samenstelling van deze gerecycleerde granulaten beperkt is. Verder onderzoek is vereist maar ontbreekt wegens tijdsgebrek.

Tot slot vatten we de autogene krimp en de druksterkte nog even kort samen in onderstaande tabel:

	REF	RGB RO fijn	RGB RO grof
Autogene krimp	-450 $\mu\text{m/m}$	-414 $\mu\text{m/m}$	-597 $\mu\text{m/m}$
Reductie	0%	8%	-
Druksterkte (1)	56,6 MPa	42,9 MPa	52,4 MPa
Druksterkte (7)	94,6 MPa	73,4 MPa	86,2 MPa
Druksterkte (28)	109,3 MPa 100%	89,5 MPa 82%	94,8 MPa 87%

Tabel 8.10 – Samenvatting: de autogene krimp en de druksterkte van REF en RGB_RO

Opmerking: de waarden van de autogene krimp van RGB_RO_fijn en RGB_RO_grof na 144 h zijn het gemiddelde van de autogene krimpmetingen van 72h tot 144h. We nemen dit gemiddelde om de onrealistische dagschommelingen (zie Fig 8.2) tijdens de autogene krimpmeting weg te filteren. We hebben namelijk reeds eerder gezien dat bij interne nabehandeling met verzadigde lichte granulaten na 72 h de 3^{de} krimpfase intreedt, namelijk de periode van stabilisatie van de autogene krimp (zie 6.5. Conclusie betreffende het LGB).

8.4. Steennex menggranulaat voor interne curing

8.4.1. Vervanging van de zandkorrels door de Steennex menggranulaten

Opnieuw vertrekken we van de referentiebetonsamenstelling (zie *Tabel 5.1*) en bepalen we de hoeveelheid zandkorrels die moeten vervangen worden door een equivalent volume aan verzadigde Steennex menggranulaten om zo opnieuw een mengeling van 1 m³ te bekomen. Dit bepalen we zowel voor het type met afmetingen ½ -1 mm als voor het type met korrelafmetingen 1-2 mm. De hoeveelheid van het zand dat hiervoor moet vervangen (oorspronkelijk 588 kg/m³ zand) worden, bedraagt:

Gegevens:			
ρ_w	1250 kg/m ³	Steennex 1/2-1 mm	
ρ_w	1429 kg/m ³	Steennex 1-2 mm	
ρ_w	2550 kg/m ³	Zand 0/5	
Theoretisch benodigde waterhoeveelheid [kg/m ³]	Absorberend vermogen [kg / kg droog granulaat]	ρ_w [kg/m ³]	hoeveelheid droog granulaat [kg/m ³]
50	0,4	1250	125
50	0,3	1429	167
Steennex 1/2-1			
Steennex 1-2			
Gevraagd:			
Hoeveelheid zand dat moet vervangen worden			
Oplossing:			
	MASSA	VOLUME	
STEENNEX 1/2-1	125 kg ----->	0,1 m ³ =====>	43 %
STEENNEX 1-2	167 kg ----->	0,116632 m ³ =====>	51 %
	/ ρ_w		
ZAND 0/5	588 kg ----->	0,230588 m ³	
	/ 2550 kg/m ³		
Antwoord:			
255 kg zand vervangen door	125 kg droog Steennex ½-1 mm		
297,4 kg zand vervangen door	167 kg droog Steennex 1-2 mm		

Tabel 8.11 – De bepaling van de te vervangen zandhoeveelheid

Opnieuw hebben we geopteerd om via de Steennex granulaten 50 kg/m³ water toe te voegen aan de betonmengeling. We zullen met elke soort van deze gerecycleerde granulaten 1 mengeling maken. Procentueel dient voor het beton met de fijnste gerecycleerde granulaten 43% van het volume zand vervangen worden (zie *Tabel 8.11*) om een volume van 1 m³ over te houden, terwijl dit voor de grofste granulatensoort 51% bedraagt. Ongeveer de helft van het zand moet vervangen

worden door gerecycleerde granulaten. Volgende naamgeving wordt gebruikt voor de betonmengsels: RGB_GR_fijn en RGB_GR_grof , waar RGB staat voor 'Recyclage Granulaten Beton', en GR voor 'grijs', de kleur van de Steennet metselgranulaten.

8.4.2. Samenstelling van RGB_GR

Enkel de zandhoeveelheid verschilt met dat van REF. Ook de hoeveelheid aan superplastificeerder heeft een met de consistentie variërende dosering.

Samenstelling	RGB GR fijn	RGB GR grof
Porfier 2/6,3 [kg/m ³]	482	482
Porfier 6,3/20 [kg/m ³]	677	677
Zand 0/5 [kg/m ³]	333	291
CEMI 52.5R [kg/m ³]	475	475
Silicafume [kg/m ³]	25	25
Aanmaakwater [kg/m ³]	150	150
Superplastificeerder [kg/m ³]	1,65	1,65
Steennet droog[kg/m ³]	125 (1/2-1)	167 (1-2)
Steennet nat [kg/m ³]	175	217
Extra water [kg/m ³]	50	50
W/C [-]	0,38	0,38

Tabel 8.12 – De betonsamenstelling van RGB_GR

De bovenstaande tabel met de betonsamenstelling vereist toch nog enige verduidelijking:

- Van elk van de twee bovenstaande samenstellingen wordt er slechts één mengeling gemaakt;
- De droge bestanddelen, namelijk de porfierkorrels, het zand, het cement en de silicafume worden in deze volgorde in de mengkuip gebracht en vervolgens gedurende 1 minuut droog voorgemengd. Vervolgens wordt het aanmaakwater, de verzadigde Steennex menggranulaten en de Glenium 51 aan de samenstelling toegevoegd en worden alle componenten nog eens gedurende 4 minuten gemengd. De Steennex granulaten werden voorgaand 24 h onder water gedompeld;
- Theoretisch gezien zou er respectievelijk 50 kg/m³ extra water aan het mengsel toegevoegd worden. In de praktijk blijkt dit iets meer te zijn voor RGB_GR_fijn, namelijk 57 kg/m³ , en iets minder voor RGB_RO_grof, 40 kg/m³. Het absorptievermogen van de Steennex metselgranulaten verschilt dus iets dan eerder bepaald;

8.4.3. Bekomen resultaten op RGB_GR

Volgende proeven worden uitgevoerd op het gemaakte beton:

- Slumptest op het verse beton;
- Bepaling van het volumegewicht en het luchtgehalte van het verse beton;
- Meting van de autogene krimp gedurende 144h;
- Bepaling van de druksterkte van het beton op 1, 7 en 28 dagen.

Vervolgens kunnen we bepalen in welke mate het toevoegen van de gerecycleerde granulaten de autogene krimp daadwerkelijk verminderd heeft en in welke mate de druksterkte van het lichte granulaten beton is afgenomen. Vooreerst beginnen we met de eigenschappen te bepalen van verse beton.

8.4.3.1. Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte

Op de verse betonspecie werden volgende resultaten bekomen:

	RGB_GR_fijn	RGB_GR_grof	eenheid
Hoeveelheid glemium 51	75	75	cc
	1,65	1,65	l/m ³
Zetmaat	13	5,8	cm
Massa per 8 liter	19	18,85	kg
Volumegewicht	2375	2356	kg/m ³
Luchtgehalte	2	1,8	%

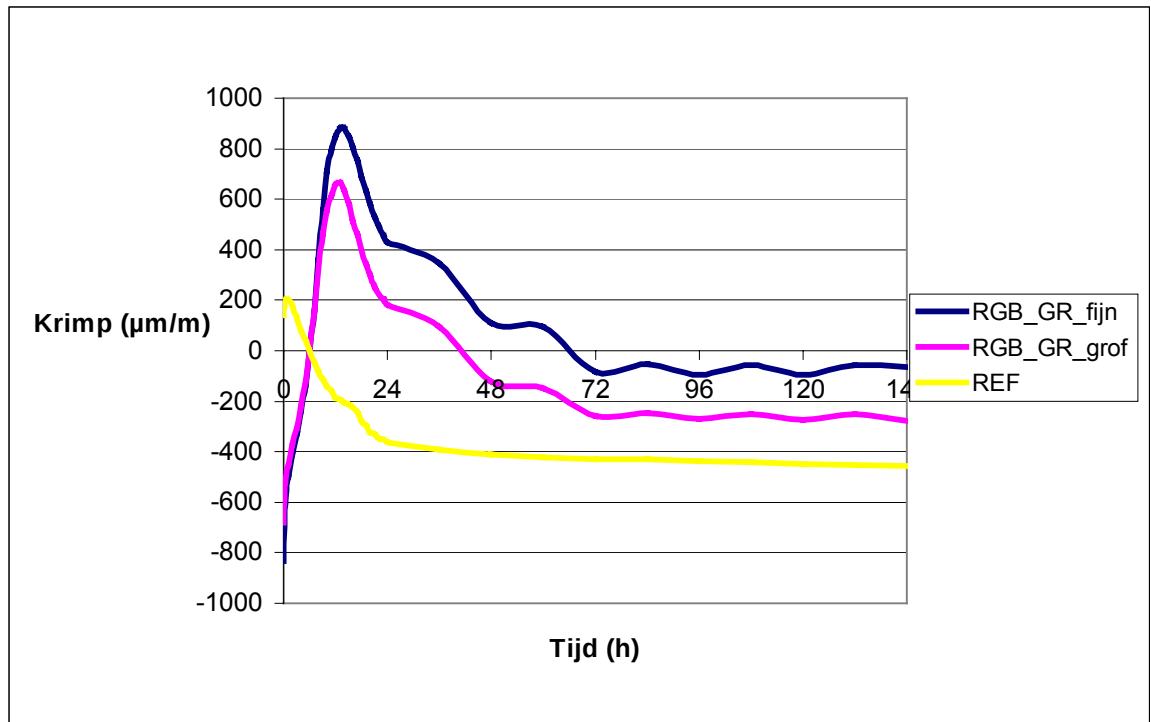
Tabel 8.13 – Zetmaat, volumegewicht en luchtgehalte van RGB_GR

Uit deze resultaten kunnen we volgende korte besluiten trekken:

- RGB_GR_fijn is een beton dat tot de consistentieklasse S3 behoort, terwijl RGB_GR_grof tot klasse S2 behoort. In vergelijking met het referentiebeton heeft RGB_GR_grof een vergelijkbare verwerkbaarheid. RGB_GR_fijn daarentegen heeft een hogere consistentie dan REF. Een verklaring hiervoor kan zijn dat bij RGB_RO_fijn 57 kg/m³ water via de gerecycleerde granulaten aan de mengeling is toegevoegd, terwijl dit voor RGB_RO_grof 40 kg/m³ is;
- Vergeleken met REF, dat een volumemassa van meer dan 2400 kg/m³, kunnen we stellen dat door het toevoegen van lichtere gerecycleerde granulaten het volumegewicht afgenomen is. Bovendien wordt er een grotere hoeveelheid aan zwaardere zandkorrels vervangen bij RGB_GR_grof, waardoor het volumegewicht logischerwijs kleiner is dan dat van RGB_GR_fijn en REF;
- De waarden van het luchtgehalte liggen in de buurt van deze van REF;

8.4.3.2. De autogene krimp van RGB_GR

Wat de autogene krimp betreft bekomen we volgende figuur.:



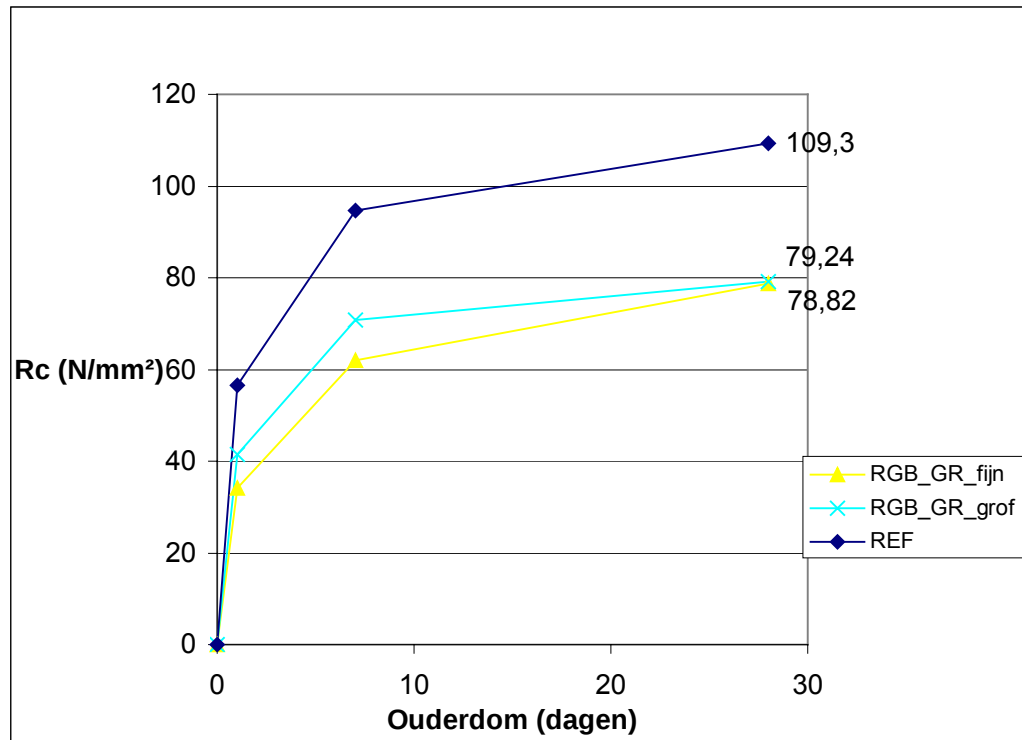
Figuur 8.4 – De autogene krimp van RGB_GR en REF

Laten we nu even stilstaan bij bovenstaande figuur:

- Opnieuw kunnen we de autogene krimpontwikkeling opdelen in 3 opeenvolgende fasen. De eerste fase loopt van 6h (t_0) tot 13h, waar we een enorme zwelling van het de betonspecie opmerken. Deze zwelling bereikt een maximale waarden van 665 $\mu\text{m/m}$ en 883 $\mu\text{m/m}$ voor respectievelijk RGB_GR_grof en RGB_GR_fijn na 13 h. Vervolgens komt de autogene krimp tot ontwikkeling. Dit is de 2^{de} fase, lopende van 13 h tot 72 h na de eerste meting. De laatste fase, de stabiliteitsfase, wordt gekenmerkt door een schommelend verloop (dagschommeling). De reden hiervan is onbekend. De waarden van de autogene krimp van RGB_RO_fijn en RGB_RO_grof na 144 h zijn het gemiddelde van de autogene krimpmetingen van 72h tot 144h. We nemen dit gemiddelde om de onrealistische dagschommelingen (zie Fig 8.4) tijdens de autogene krimpmeting weg te filteren. Zo bekomen we voor de autogene krimp na 144h voor respectievelijk RGB_GR_fijn en RGB_GR_grof een waarde van **-72 $\mu\text{m/m}$** en **-261 $\mu\text{m/m}$** . Door het gebruik van de verzadigde Steennex menggranulaten is er dus wel degelijk een autogene krimpductie opgetreden.
- Beide grafieken hebben een gelijkaardig verloop, wat een indicatie is van de juistheid van metingen. Wel merken we schommelingen na 72 h waar we normaal een vlakkere curve verwachten. Bijkomend onderzoek naar de materiaaleigenschappen van de samenstelling van de Steennex menggranulaten is dus vereist om duidelijkheid te brengen.

8.4.3.3. Drukresultaten (nog schrijven)

Volgende waarden werden bekomen bij de opeenvolgende drukmetingen:



Figuur 8.5 – De ontwikkeling van de druksterkte van RGB_GR en het referentiebeton

Wanneer we bovenstaande figuur analyseren, merken we enkele interessante zaken:

- Beide betonsoorten kennen opnieuw een snelle druksterkteontwikkeling: RGB_GR_grof heeft na 1 dag reeds 52% (41,36 MPa) en na 7 dagen al 89% (70,84 MPa) van de druksterkte na 28 dagen (79,24 MPa) bereikt. Voor RGB_GR_fijn is deze ontwikkeling iets minder snel maar nog steeds aanzienlijk, namelijk 43% (34,05 MPa) na 1 dag en 79% (62,04 MPa) na 7 dagen. Het gebruik van Rheomac SF140, van Glenium 51 en van cement van het type “R” zijn hiervan de oorzaak;
- De karakteristieke druksterkte na 28 dagen (f_{c28}) ligt voor beide betonsoorten nog steeds in de buurt van 80 MPa. Voor RGB_GR_fijn bedraagt dit 78,82 MPa terwijl het voor RGB_GR_grof 79,24 MPa bedraagt. We onderverdelen het beton in de categorie ‘beton met ultrahoge prestaties (BUHP)’.

8.4.4. Conclusie: Steennex menggranulaat

Net zoals bij de Steennet metselgranulaten hebben we opnieuw een gedeelte van de zandkorrels vervangen door ditmaal verzadigde Steennex menggranulaten (korrelafmetingen $\frac{1}{2}$ -1 mm en 1-2 mm), die op hun beurt een interne waterkren in de betonspecie vormen. We hebben de dosering aan Steennet metselgranulaten zo gekozen dat 50 kg/m³ extra water aan de betonmengeling wordt toegevoegd. In tegenstelling tot de interne nabehandeling met Steennet metselgranulaten bekomen

we ditmaal wel een reductie van de autogene krimp. We zijn er in geslaagd de autogene krimp te verminderen tot een minimale waarde van $-72 \mu\text{m/m}$, door gebruik te maken van verzadigde Steennex menggranulaten met korrelafmetingen tussen de $\frac{1}{2}$ en 1 mm. Hiervoor hebben we in praktijk 57 kg/m^3 water toegevoegd via de verzadigde gerecycleerde granulaten. Wetende dat deze krimp $-450 \mu\text{m/m}$ bedraagt bij het referentiebeton, is met behulp van de interne nabehandeling een autogene krimpreductie van 84% verwezenlijkt. Wel dient opgemerkt te worden dat we voor de dagschommeling vanaf 72 h tot 144 h een gemiddelde waarde hebben genomen en verondersteld hebben dat dit de autogene krimp is na 144 h. Door gebruik te maken van de Steennex menggranulaten, met korrelafmetingen 1-2 mm zijn we er in geslaagd een autogene krimp van $-261 \mu\text{m/m}$ te behalen: toch een reductie van 42% in vergelijking met het referentiebeton.

Aan de andere kant kennen we wel een vermindering van de mechanische eigenschappen: de druksterkte van het referentiebeton na 28 dagen (109,28 MPa) is groter dan de druksterkte van het behandelde beton na 28 dagen ($\pm 80 \text{ MPa}$), een vermindering van ongeveer 70 %.

Tot slot vatten we de autogene krimp en de druksterkte nog even kort samen in onderstaande tabel:

	REF	RGB GR fijn	RGB GR grof
Autogene krimp	-450 $\mu\text{m/m}$	-72 $\mu\text{m/m}$	-261 $\mu\text{m/m}$
Reductie	0%	84%	42%
Druksterkte (1)	56,6 MPa	34,1 MPa	41,4 MPa
Druksterkte (7)	94,6 MPa	62 MPa	70,8 MPa
Druksterkte (28)	109,3 MPa 100%	78,8 MPa 72%	79,2 MPa 73%

Tabel 8.14 – Samenvatting: de autogene krimp en de druksterkte van REF en RGB_GR

8.5. Conclusie betreffende het RGB

In een laatste poging om de autogene krimp van een hoge-prestatie-beton te beperken hebben we gebruik gemaakt van gerecycleerde granulaten. Twee verschillende soorten werden ter onze beschikking gesteld, telkens met twee verschillende korrelafmetingen. Voor het overige beschikken we niet over enige informatie betreffende absorptievermogen, werkelijke volumemassa, samenstellingen,... Deze hebben we bijgevolg zelf bepaald. Het gaat om volgende gerecycleerde gebroken materialen:

- Steennet metselgranulaten, korrelafmetingen $\frac{1}{2}$ -1 mm en 1-2mm
- Steennex menggranulaten, korrelafmetingen $\frac{1}{2}$ -1 mm en 1-2mm

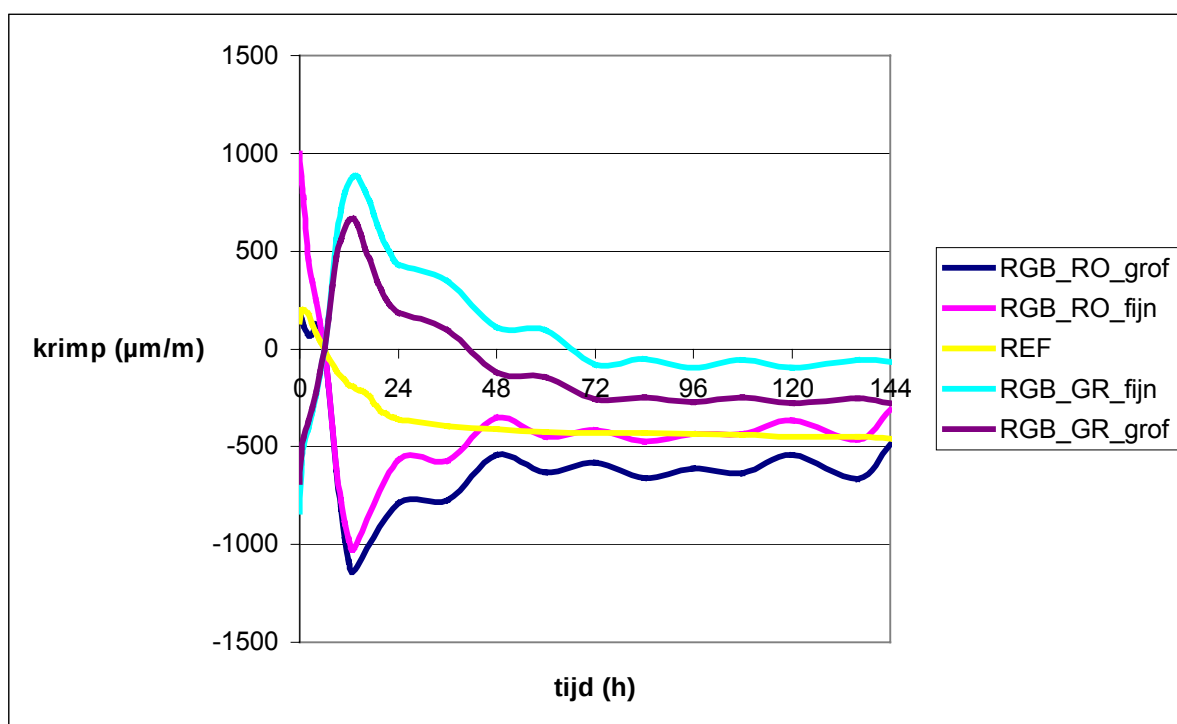
We hebben de hoeveelheid van deze granulaten zodanig gekozen dat ze in volledig verzadigde toestand 50 kg/m³ water aan de betonmengeling toevoegen. Deze waarden bleken in de praktijk lichtjes verschillend te zijn:

RGB_RO_grof	36 kg/m ³
RGB_RO_fijn	49 kg/m ³
RGB_GR_grof	40 kg/m ³
RGB_GR_fijn	57 kg/m ³

Tabel 8.15 – Werkelijk toegevoegde hoeveelheid water met behulp van de gerecycleerde granulaten

Zoals we reeds eerder vermeld hebben, dient dit intern nabehandelingwater om de zelfdroging tijdens de hydratatie van het cement tegen te gaan en zo de autogene krimp van het beton te beperken.

Met elk van deze granulaten hebben we 1 mengeling gemaakt waarop we proefmetingen verricht hebben. We plaatsen de autogene krimp –en de drukmetingen van elk van deze mengelingen samen en vergelijken het met het referentiebeton.



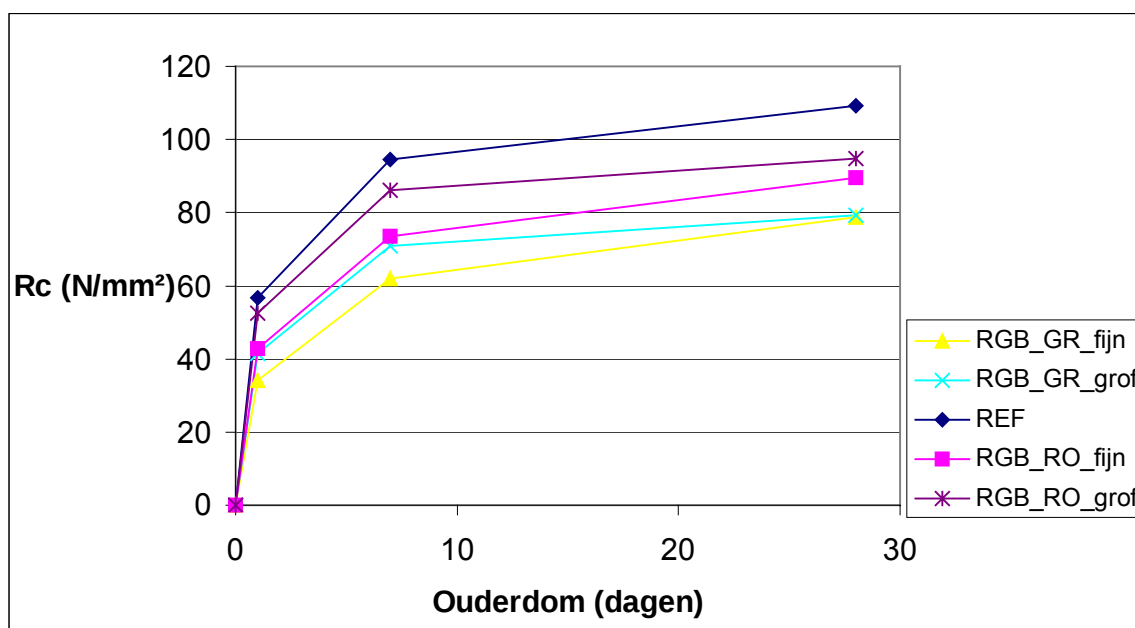
Figuur 8.6 – Samenvattende figuur: de autogene krimp van RGB en REF

Het gebruik van Steennex menggranulaten en Steennet metselgranulaten als interne nabehandelingmaterialen heeft een verschillende werking op de autogene krimp van een hoge-prestatie-beton. Terwijl de menggranulaten wel degelijk de krimp reduceren, zorgen de metselgranulaten daarentegen voor weinig tot geen autogene krimpproductie. Wat opvalt is dat de vier curven op Fig 8.6 van de behandelde betonsoorten een gelijkaardig verloop vertonen: de curven van de menggranulaten zijn als het ware het spiegelbeeld van de curven van de metselgranulaten waarbij de denkbeeldige horizontale spiegel-as net boven de referentiebetoncurve ligt. Laten we

de leeftijd van het beton voor 6 h buiten beschouwing dan merken we dat vanaf t_0 het menggranulatenbeton zwelt terwijl het metselgranulatenbeton krimpt, waarbij ze beiden hun extremum bereiken na 13 h. Dit kunnen we de 1^{ste} fase noemen. Vervolgens ontwikkelt de autogene krimp zich bij het menggranulatenbeton, terwijl daar tegenover het metselgranulatenbeton begint te zwellen. Deze fase, van tijdstip 13 h tot 72 h noemen we fase 2. De 3^{de} en laatste fase komt ongeveer na 72 h tot ontwikkeling waarbij alle vier de curven een dagschommeling kennen. Verdere materiaalstudies betreffende de specifieke eigenschappen en samenstellende delen van deze gerecycleerde granulaten blijkt noodzakelijk. Dit valt echter buiten het tijds kader van dit afstudeerwerk.

Een algemene waarneembare trend is dat door gebruik te maken van de fijnere gerecycleerde granulaten, die overigens ook een hoger absorptievermogen hebben, de beste autogene krimpverminderingen bekomen worden. De beste krimpreductie wordt overigens bekomen indien er 57 kg/m^3 extra water wordt toegevoegd via de gebroken Steennex menggranulaten met korrelafmetingen $\frac{1}{2}$ -1 mm. De autogene krimp na 144 h bedraagt bij RGB_GR_fijn nog slechts $-72 \text{ }\mu\text{m/m}$, terwijl deze van het referentiebeton $-450 \text{ }\mu\text{m/m}$ bedraagt. Toch is deze waterhoeveelheid niet voldoende om een volledige eliminatie van de autogene krimp te bekomen.

Wat de druksterkte ontwikkeling van het RGB betreft verwijzen we naar Fig. 8.7:



Figuur 8.7 – Samenvattende figuur: de druksterkte van RGB en REF

De betonsoorten kennen nog steeds een snelle druksterkteontwikkeling en behoren nog steeds tot het BHP. Wel valt op te merken dat de betonsoort, waarbij gebruik gemaakt wordt van de verzadigde rode metselgranulaten, een hogere druksterkte kent dan deze waarbij gebruik gemaakt wordt van de verzadigde grijze menggranulaten. Anderzijds wordt door gebruik te maken van de metselgranulaten de autogene krimp na 144 h niet vermindert. Een goede interne nabehandeling gaat steeds gepaard met een druksterktevermindering.

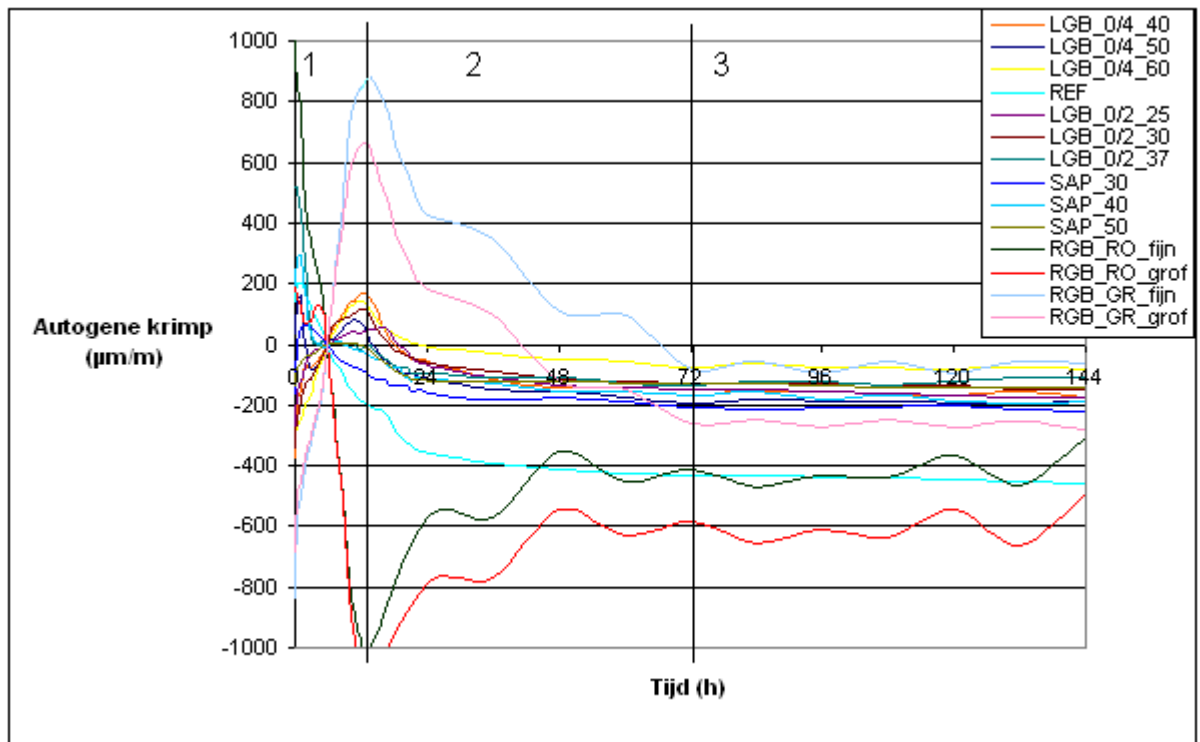
Hoofdstuk 9 – Interne nabehandeling: besluitvorming

In dit werk hebben we getracht de **autogene krimp** van een **hoge-prestatie-beton** te beperken, en dit met behulp van een **interne nabehandeling**. *Autogene krimp* is een gevolg van de chemische krimp die ontstaat tijdens de chemische reacties van de hydratatie van het cement en instaat voor een volumereductie van het hydratatie-systeem: de absolute waarde van het volume aan cement en water is groter dan het absolute volume aan gehydrateerd cement. Deze autogene krimp is groter bij een *hoge-prestatie-beton* (BHP) dan bij de gewone betonsoorten. Het BHP wordt gekenmerkt door een lage W/C –factor en een druksterkte van meer dan 50 MPa na 28 dagen. Het krimpverschijnsel is in de praktijk een niet te onderschatten verschijnsel aangezien het leidt tot onder andere intrinsieke spanningen in de doorsnede die scheuren in het oppervlak kunnen introduceren. Daarom hebben we een interne waterkern in het beton gecreëerd die in staat is de zelfdroging van het beton tegen te gaan en zo de autogene krimp van het BHP te reduceren. Dit staat gekend als de *interne nabehandeling* van een beton en ze wordt gerealiseerd met behulp van volgende materialen: verzadigde lichte granulaten, superabsorberende polymeren en verzadigde gerecycleerde granulaten. Deze krimpreductie gaat echter ook gepaard met een vermindering van de mechanische eigenschappen van het beton. Zo zal de druksterkte van het nabehandelde beton kleiner zijn dan deze van het onbehandelde beton. We hebben daarom getracht tot een zo optimaal mogelijke interne curing te komen, met andere woorden: een maximale autogene krimpreductie tegenover een minimale inlevering aan druksterkte. Daarbij zijn we vertrokken van een referentiesamenstelling en hebben we, naast de beproevingen op het verse beton, drukproeven en autogene krimpmetingen uitgevoerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van de opstelling gegeven in *Fig. 3.3*. We hebben meerdere mengelingen gemaakt waarbij het gehalte aan lichte granulaten, superabsorberende polymeren en gerecycleerde materialen varieert zodat de hoeveelheid nabehandelingwater telkens toeneemt. Deze hoeveelheden kan men vinden in *Tabel 9.1* :

<u>Betonsoort</u>	<u>Werkelijke massa extra water [kg/m³]</u>
LGB_0/2_25	30
LGB_0/2_30	36
LGB_0/2_37	49
LGB_0/4_40	29
LGB_0/4_50	32
LGB_0/4_60	40
SAP_30	30
SAP_40	40
SAP_50	50
RGB_RO_fijn	49
RGB_RO_grof	36
RGB_GR_fijn	57
RGB_GR_grof	40

Tabel 9.1 – De werkelijke massa intern nabehandelingwater

Op deze manier komen we tot volgende figuur waarin de autogene krimpreductie gevisualiseerd wordt:



Figuur 9.1 – De autogene krimp: samenvatting

Volgende vaststellingen kunnen we nog even aanhalen:

- De beste autogene krimp reductie resultaten bekomen we bij RGB_GR_fijn, LGB_0/4_60, LGB_0/2_37 en SAP_50 (in volgorde van beste krimpreductie). Het is niet toevallig dat deze betonsoorten de grootste hoeveelheid nabehandelingwater bevatten (zie Tabel 9.1);
- Bij alle mengelingen, met uitzondering van SAP_30, SAP_40 en REF merken we een duidelijk verloop in 3 fasen. De eerste fase (van $t_0 = 6h$ tot $t = 11-13h$, zie Fig 9.1) illustreert de optimale interne nabehandeling, aangezien er zwellling optreedt in plaats van de snelle autogene krimp bij REF. RGB_RO volgt deze algemene trend niet aangezien er daar in de 1^{ste} fase een enorme autogene krimp optreedt. Aangezien deze betonsoort geen krimpreductie in de hand werkt, laten we ze dan ook buiten beschouwing. De 2^{de} fase (van $t = 11-13h$ tot $t = 72 h$) toont de ontwikkeling van de autogene krimp. De hoeveelheid nabehandelingwater geraakt uitgeput. Vanaf de 3^{de} fase ($t > 72h$) kennen we een krimpstabilisatie, waarneembaar bij alle betonsoorten;
- We bekomen echter nooit een krimpreductie van 100%. Als we zien dat RGB_GR_fijn de beste resultaten qua krimpvermindering bereikt (indien we de dagschommelingen wegfilteren) en ook de hoogste hoeveelheid aan nabehandelingwater (57 kg/m^3) bevat, dan zijn we geneigd te denken dat indien we bij LGB een grotere hoeveelheid extra water hadden toegevoegd (bvb. 60 kg/m^3), we misschien een autogene krimpneutralisatie hadden bekomen. Verder experimenteel werk zal hierover uitsluitsel moeten geven. Er dient wel opgemerkt te worden dat de druksterkte zal afnemen als we de hoeveelheid aan verzadigde lichte granulaten laten toenemen;

Laten we tot slot de experimentresultaten resumeren in *Tabel 9.2*:

<u>Betonsoort</u>	<u>Autogene krimp (144 h) [µm/m]</u>	<u>Autogene krimp Reductie [%]</u>	<u>Druksterkte 28d [MPa]</u>	<u>Druksterkte 28d [%]</u>	<u>SOM [%]</u>
REF	-450	0	109	100	100
LGB_0/2_25	-175	61	88	80	141
LGB_0/2_30	-150	67	84	77	144
LGB_0/2_37	-105	77	78	71	148
LGB_0/4_40	-172	62	90	83	145
LGB_0/4_50	-186	60	90	83	143
LGB_0/4_60	-84	81	80	73	154
SAP_30	-220	51	91	84	135
SAP_40	-188	58	80	73	131
SAP_50	-144	68	75	69	137
RGB_RO_fijn	-414	8	90	83	91
RGB_RO_grof	-597	-	95	87	87
RGB_GR_fijn	-72	84	79	72	156
RGB_GR_grof	-261	42	79	73	115

Tabel 9.2 – De autogene krimp en de druksterkte: samenvatting

Het hangt natuurlijk van de bouwheer af waar het meeste belang moet aan gehecht worden, ofwel de krimpreductie ofwel het behoud van de druksterkte. Als beide aspecten even belangrijk zijn dan kunnen we concluderen dat de beste interne nabehandeling wordt bekomen voor: LGB_0/4_60, LGB_0/2_37 en RGB_GR_fijn (zie *Tabel 9.2*, 6^{de} kolom), waar respectievelijk 40 kg/m³, 49 kg/m³ en 57 kg/m³ via de verzadigde granulaten aan de betonspecie wordt toegevoegd.

Bronnen en referenties

- [1] T.A. Hammer, O. Bjontegaard, E. Sellevold, "Measurement methods for testing of early age autogenous strain", Proceeding of the International RILEM Conference PRO 23, 2002, p. 217, p. 218-219, p.224-226.
- [2] J. Piérard, V. Dieryck, B. Parmentier, "Speciaal beton: krimpbeheersing bij jong beton, Taak 1: Methodiek voor de meting van de krimp bij jonge leeftijd", Eindverslag –2^{de} versie.
- [3] J. Piérard, V. Dieryck, B. Parmentier, "Speciaal beton: krimpbeheersing bij jong beton, Taak 3.1: Krimp bij jonge leeftijd van speciaal beton: BHP", Eindverslag –2^{de} versie.
- [4] L. Taerwe, "Betontechnologie", Laboratorium Magnel voor Betononderzoek, 1997.
- [5] T.C. Powers, T.L. Brownyard, "Studies of the physical properties of hardened portland cement paste", Res. Lab. Portland Cem. Assoc., Bull 22, 1948.
- [6] G. De Schutter, "Beheersing van krimp bij jong beton, eindverslag van activiteiten Laboratorium Magnel voor Betononderzoek", Laboratorium Magnel voor betononderzoek, 2005.
- [7] L. Barcelo, S. Boivin, S. Rigaud, P. Acker and B. Clauvaud, "Linear vs volumetric autogenous shrinkage measurements: Material behaviour or experimental artefact", 1999.
- [8] O. Bjontegaard, "Thermal dilatation and autogeneous deformation as driving forces to self-induced stresses in high performance concrete", Ph.D thesis, Division of structural Engineering, Norway, 1999.
- [9] M. Morioka, A. Hori, H. Hagiwara, E. Sakai and M. Daimon, "Measurements of autogenous length changes by laser sensors equipped with digital computer systems". Autogenous Shrinkage of Concrete. Proceedings of an intrn. Workshop 1998 (ed. Ei-ichi Tazawa), Londen, 1999.
- [10] K. Takada, K. van Breugel, A.A.B. Van Koenders, N. Kaptijn, "Experimental evaluation of autogenous shrinkage of lightweight aggregate concrete". Autogenous Shrinkage of Concrete. Proceedings of an intrn. Workshop 1998 (ed. Ei-ichi Tazawa), Londen, 1999.
- [11] E.E. Holt, M.T. Leivo, "Autogenous shrinkage at very early ages". Autogenous Shrinkage of Concrete. Proceedings of an intrn. Workshop 1998 (ed. Ei-ichi Tazawa), Londen, 1999.

- [12] O.M. Jensen, S.L. Christensen, B.F. Dela, J.H. Hansen, P.F. Hansen, A. Nielsen, "HETEK – Control of Early Age Cracking in Concrete – Phase 2: Shrinkage of Mortar and Concrete". Report No. 110 1997, Road Directorate, Denmark Ministry of Transport.
- [13] G. De Schutter, "Fundamentele en praktische studie van thermische spanningen in verhardende massieve betonelementen", doctoraatsthesis, Laboratorium Magnel voor betononderzoek.
- [14] L. Barcelo, "Chemical Shrinkage", Report of RILEM Technical Committee TC 181-EAS: Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems, Report 25, 2003, p.21-22.
- [15] J. Bisschop, "Evolution of solid behaviour", Report of RILEM Technical Committee TC 181-EAS: Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems, Report 25, 2003, p.28.
- [16] S. Boivin, "Retrait au jeune âge du béton, Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 2001.
- [17] G. De Schutter, "Hydratatie van cement en eigenschappen van jong beton", Laboratorium Magnel voor Betononderzoek.
- [18] J. Piérard, V. Dieryck, B. Parmentier, "Speciaal beton: krimpbeheersing bij jong beton, Taak 3.1:"Krimp bij jonge leeftijd van speciaal beton: hoge-prestatie-beton (BHP)", Eindverslag –2^{de} versie.
- [19] G. Dreux, J. Festa, "Nouveau guide du béton", Editions Eyrolles, Paris, 1995.
- [20] B. Persson, " Shrinkage of high performance concrete", Proceeding of the International RILEM Conference PRO 23, 2002, p.299.
- [21] B. Persson, "(Early) basic creep of HPC". 4th International Symposium on the Utilisation of HPC, Paris 1996.
- [22] B. Persson, "On the under-pressure in the pore water of sealed high performance concrete", Concrete Science and Engineering, 2000.
- [23] O. Bjontegaard, E.J. Sellevold, "Very high strength concrete", Report of RILEM Technical Committee TC 181-EAS: Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems, Report 25, 2003, p.285-287.
- [24] RILEM, Technical Committee 'Internal Curing of Concrete', TC 196-ICC, ICC-N6, "External and Internal Curing of Concrete".
- [25] RILEM, Technical Committee 'Internal Curing of Concrete', TC 196-ICC, ICC-N18, "Draft of Chapter 4: Materials and methods for Internal curing".

- [26] P. Lura, K. van Breugel, I. Maruyama, "Autogenous and drying shrinkage of high strength lightweight aggregate concrete at early ages – the effect of specimen size", Proceeding of the International RILEM Conference PRO 23, 2002, p. 335-342.
- [27] A. Bentur, K. van Breugel, "Internally cured concretes", Report of RILEM Technical Committee TC 181-EAS: Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems, Report 25, 2003, p.295-304.
- [28] J. Piérard, V. Dieryck, B. Parmentier, "Speciaal beton: krimpbeheersing bij jong beton, Taak 4.2:Krimpreductiemethode – gebruik van lichte granulaten", Eindverslag –2^{de} versie.
- [29] J. Piérard, V. Dieryck, B. Parmentier, "Speciaal beton: krimpbeheersing bij jong beton, Taak 4.3:Krimpreductiemethode – gebruik van superabsorberende polymeren", Eindverslag –2^{de} versie.
- [30] P. Lura, O.M. Jensen, S.I. Igarashi, "Measuring techniques for internal water curing", p.6-9.
- [31] D.P. Bentz, K.A. Snyder, "Protected Paste Volume in Concrete. Extension to Internal Curing Using Saturated Lightweight Fine Aggregate", Cement and Concrete Research, V. 29(1999), 1863-1867.
- [32] A. Bentur, S. Igarashi, K. Kovler, "Internal curing of high strength concrete to prevent autogenous shrinkage and internal stresses by use of wet lightweight aggregates", Cement and Concrete Research, 1587-1591.
- [33] RILEM, Technical Committee 'Internal Curing of Concrete', TC 196-ICC, ICC-N29, "Draft of Chapter 3: Mechanics of Internal Water Curing".
- [34] T.C. Powers, "A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete", Bulletin 25, Portland Cement Association, Chicago (1948); Proceedings of the Highway Research Board, Washington DC 27 (1947), 178-188.
- [35] T.C. Powers, "Physical properties of cement paste", Chemistry of cement. Proceedings of the fourth international symposium, Washington DC, 1960, National Bureau of Standards, Monograph 43, US Department of Commerce, Washington DC Paper V-I (1962), 577-613.
- [36] K. van Breugel, H. de Vries, "Potential of mixtures with blended aggregates for reducing autogenous deformation in low water/cement ratio concrete", Delft, The Netherlands, p.453-462.
- [37] A. Bentur, S. Igarashi, K. Kovler, "Prevention of autogenous shrinkage in high strength concrete by internal using wet lightweight fine aggregate", Cement and Concrete Research 31, 2001, p.1587-1591.

- [38] S. Zhutovski, K. Kovler, A. Bentur, "Efficiency of lightweight aggregates for internal curing of high strength concrete to eliminate autogenous shrinkage", *Materials and Structures*, Vol.35, 2002, p.97-101.
- [39] P. Lura, D.P. Bentz, D. Lange, K. Kovler, A. Bentur, K. van Breugel, "Measurements of water transport from saturated pumice aggregates to hardening cement paste", *Advances in Cement and Concrete, Proceedings: Engineering Conferences International*, Copper Mountain, August 10-14, 2003, P.89-99.
- [40] O. Jensen, P. Hansen, "Water-entrained cement-based materials- I. Principles and theoretical background", *Cement and Concrete Research* 31, 2001, P.647-654.
- [41] O. Jensen, P. Hansen, "Water-entrained cement-based materials- II. Experimental observations", *Cement and Concrete Research* 32, 2002, P.973-978.
- [42] M.R. Geiker, D.P. Bentz, O.M. Jensen, "Mitigating autogenous shrinkage by internal curing", *American Concrete Institute Special Publication 218, High-Performance Structural Lightweight Concrete*, P.143-148, 2004.
- [43] RILEM TC-37-DRC, "Demolition and recycling of concrete, Recycled aggregates and recycled aggregate concrete", *Second state-of-the-art Report*, 1985.
- [44] P. Jacobs, "Sedimentaire geologie en geologie van België", *Vakgroep Geologie en Bodemkunde, Universiteit Gent*, 2004.
- [45] A.W. Adamson, "Physical Chemistry of Surfaces", *Wiley Interscience*, Fifth Edition, New York, 1990.