

# **Invloed van vloeibare kuringsmetodes op plastiese krimpkrake van beton**

deur

Jurie Wynand Visagie

*Verhandeling aangebied aan die vereistes vir die graad Magister in  
Ingenieurswese in die veld van Siviele Ingenieurswese aan die Fakulteit  
Ingenieurswese van Universiteit Stellenbosch*



Studieleier: Dr. Riaan Combrinck

Maart 2020

## Verklaring van Plagiat

Deur die inhandiging van hierdie voorlegging verklaar ek dat die werksomvang van hierdie werkstuk, in sy geheel, my eie oorspronklike werk is en dat ek die outeur is, tensy anders gestel. Die herproduksie en publikasie van hierdie werkstuk deur Universiteit Stellenbosch sal nie enige derdepartyregte skend nie en was nie in geheel, of selfs gedeeltelik, gepubliseer ter verkryging van enige ander kwalifikasie nie.

Maart 2020

## Opsomming

Die kraak van beton is 'n algemene probleem wat kan lei tot verlies aan duursaamheid, dienslewe en estetiese waarde. Tog is daar verskeie beskikbare maniere om die ontwikkeling van krale te verhoed of te beperk met onder meer die gebruik van verskeie kuringsmetodes en -materiale. Die mees gebruikte metode onder die verskeie beskikbare kuringsmetodes, is die bespuiting en bevogting van beton met water. Hierdie is egter slegs twee van vele beskikbare metode gemik op die kuring van vars en verharde beton. Die vorming van krale gedurende die vars stadium staan bekend as plastiese krale aangesien hierdie krale gedurende die plastiese na semi-plastiese fase van beton vorm. Die gevaar van plastiese krale word veral gevind in elemente met groot oppervlakareas wat aan omgewings met hoë verdampingstempo blootgestel is.

Die studie ondersoek die invloed van vloeibare kuringsmiddels op plastiese beton. Dit word algemeen aanvaar dat faktore soos krimp, versakking en kapillêre druk die kraak van beton beïnvloed aangesien die faktore oorwegend plaasvind gedurende die stolling van beton. Dit is gedurende die plastiese fase dat dié faktore die meeste deur kuring beïnvloed word. Dit word algemeen aanvaar dat oppervlakkuring die gevaar van plastiese krale verminder indien die middels op die regte tyd, plek en wyse toegepas word. In hierdie studie word beide enkel en veelvuldige toepassings, sowel as drie kuringsmiddels, gebruik om die invloed van kuring op plastiese kraakontwikkeling en die gedrag daarvan te ondersoek.

Enkeltoepassing van waterkuring is toegepas op kritieke tye gedurende die ontwikkeling van plastiese krale, naamlik vóór die opbou van kapillêre druk, begin van beduidende krimp, vóór en op die eerste sigbare haarlynkraak, sowel as gedurende die vinnige kraakgroeiperiode. Veelvuldige toepassings van waterkuring is toegepas om die krimp van beton in te perk en sodoende die kraak van beton te verminder of selfs te voorkom. Die gedrag van waterkuring is ook vergelyk met die gedrag van drie kuringsmiddels wat tans in die praktyk beskikbaar is, naamlik 'n wasemulsie, petroleumharsemulsie en 'n akriemulsie. Die kuringsmiddels is toegepas soos voorgeskryf deur die verskaffer.

Die studie het bevind dat enige toepassing van kuring die ontwikkeling van potensiële plastiese kroke verlig. In hierdie studie is daar bevind dat die kuring net vóór die beduidende groei van krimp optimaal was. Hierdie is bevestig deur die veelvuldige toepassings van kuring wat daarop gemik was om die krimp van beton te beperk. Die veelvuldige kuringstoepassings, gemik daarop om die krimp van beton na 5% van die ongekuurde monster se finale krimpwaarde in te perk, bewys dat oppervlakkroke voorkombaar is.

Oor die algemeen is dit bevind dat waterkuring wat té vroeg of té laat na die ontwikkeling van plastiese kroke toegepas word, oneffektief is. Al die kuringsmiddels het die kraakarea's verlaag, terwyl die petroleumemulsie selfs oppervlakkroke voorkom het.

Ten slotte, 'n enkeltoepassing van waterkuring in uiterste omstandighede met hoë verdamping, is nie genoeg om plastiese kroke te voorkom nie, veral as die toepassing nie op die regte tyd toegepas word nie. Tog was die veelvuldige toepassing van waterkuring meer suksesvol en is oppervlakkroke voorkom. Die studie wys dat kuring, veral die enkeltoepassing van waterkuring net vóór beduidende krimp, sowel as die veelvuldige toepassing van kuring gemik op die beperking van krimp, moontlik kroke kan voorkom in minder ernstige toestande.

## Abstract

The cracking of concrete is a common issue which may cause durability, service life and aesthetic concerns. Different means can be implemented to combat the formation of cracks, including various means of curing. The two most commonly used curing is the spraying and/or misting of concrete using water. These, however, are but two of many methods available which can be applied to fresh and hardened concrete. The cracks that occur during the fresh state of concrete are referred to as plastic cracks since these cracks form while the concrete is still in a plastic to semi-plastic state. These plastic cracks occur especially in concrete elements with large surface areas which are exposed to harsh environment conditions with high evaporation rates.

This study investigates the influence of liquid curing measures on the cracking of plastic concrete. It is well known that factors such as shrinkage, settlement and capillary pressure affects the cracking of concrete and that these factors predominantly occur during the setting of concrete. It is within the plastic phase that these factors are the most influential and most likely to be altered by curing. It is known that surface curing of concrete mitigates plastic shrinkage cracking when applied correctly and at the appropriate time. In this research both single and multiple water application, as well as three curing compounds, were used to investigate the effect of curing on plastic shrinkage cracking.

Single application water curing was spray applied at critical times during the development of typical plastic cracking such as: before the start of capillary pressure buildup, start of significant shrinkage, before and on the first visible surface crack, and during rapid crack growth. Multiple application water curing was spray applied to limit the shrinkage of concrete, aiming to limit or prevent cracking from occurring. Water curing performance was also compared to a wax emulsion, petroleum-based resin and water-based acrylic emulsion curing compounds, all applied at the supplier specified times.

The findings of this research showed that any application of curing helps to relieve the associated potential plastic shrinkage cracking of concrete. Optimal water curing application, based on the response of the various mechanisms of plastic shrinkage cracking was found to be just after the start of shrinkage and before any shrinkage-related damage occurred. This was confirmed by the limiting the shrinkage using multiple applications.

The multiple curing application proved to prevent surface cracking when limiting the shrinkage of concrete to approximately 5%, while even the 5% growth step limitation proved to lower the crack area significantly. In general, water curing done either too early or after plastic cracks have formed, is ineffective. All curing compounds applied, reduced the crack area, with only the petroleum resin-based curing compound resulting in no surface crack formation.

Finally, once-off application of water curing in extreme environmental conditions with high evaporation, is not enough to prevent plastic cracking, especially if the application timing is not optimal. Whereas multiple curing application proved to be far more successful and could prevent surface cracking. This research shows that curing, especially single application curing at the start of shrinkage and multiple application curing aimed to limit shrinkage, can prevent cracking in less severe environmental conditions.

## Erkennings

Ek wil graag die volgende mense en organisasies bedank vir hul hulp, ondersteuning en leiding gedurende die afloop van die studie:

- Finansiële ondersteuning van Suid-Afrikaanse Akademie vir Wetenskap en Kuns.
- My studieleier, Dr. Riaan Combrinck, vir sy ondersteuning en leiding waar nodig, asook om 'n kreatiewe werksomgewing te skep wat ruimte om te groei en te leer, voor en gedurende die studie.
- Die laboratorium en werkswinkelpersoneel by die Department Siviele Ingenieurswese, Universiteit Stellenbosch, vir hul bystand en hulp gedurende die eksperimentele toetsing, spesifiek Oom John, Charlton Ramat en Lee-roy Jones.
- Chryso vir die borg van die kuringsmiddels en advies oor die algemene gebruik daarvan.
- My ouers vir hulle onvoorwaardelike liefde en ondersteuning deur al my studies.
- Roné Roux en haar ouers vir hulle ondersteuning deur die loop van die studie.
- My vriende en kollegas, Philip Strydom en Pieter van Zyl, vir hulle voorgesette ondersteuning en vriendskap.
- My Skepper en Redder, dat Hy my die geleentheid en vermoë gebied het om die studie te voltooi.

Hierdie werkstuk is gebaseer op die navorsing wat deels geondersteun word deur die National Research Foundation (NRF) van Suid Afrika via die Thuthuka en Thrip navorsing- en ontwikkelingsinstrumente. Enige opinie, bevinding, gevolgtrekkings of voorstellings uitgedruk in hierdie studie is dié van die outeur en geen verantwoordelikheid word deur die NRF geneem nie. Die ondersteuning van Pretoria Portland Cement (PPC) en Chryso Suid-Afrika word ook met dank erken.

## Inhoudsopgawe

Verklaring van Plagiaat.....	i
Opsomming.....	ii
Abstract.....	iv
Erkennings .....	vi
Figure .....	x
Tabelle.....	xiii
Definisies .....	xv
Notasies.....	xv
Eenhede.....	xv
1. Inleiding .....	1
1.1. Doelwitte .....	3
1.2. Metodes .....	4
1.3. Navorsingswaarde .....	4
1.4. Verslaguitleg .....	5
2. Literatuurstudie .....	6
2.1. Beton .....	6
2.1.1. Hidrasie .....	6
2.1.2. Bloei.....	9
2.1.3. Verdamping.....	10
2.1.4. Klimaat.....	10
2.1.5. Kapillêre druk .....	12
2.2. Plastiese krake .....	15
2.2.1. Plastiese versakkingskrake.....	15
2.2.2. Plastiese krimpkrake .....	16



2.2.3.	Faktore wat plastiese krale beïnvloed .....	16
2.3.	Kuring.....	18
2.3.1.	Aanvanklike teenoor laatkuring.....	18
2.3.2.	Eksterne vloeistofkuring .....	19
2.3.1.	Eksterne bedekking .....	21
2.3.2.	Voorsorg maatreëls .....	23
2.4.	Invloed van kuringsmetodes op plastiese krimpkrake .....	23
3.	Eksperimentele raamwerk.....	26
3.1.	Mengontwerp en bestandele.....	26
3.2.	Toetsmetodes.....	27
3.2.1.	Kraak.....	27
3.2.2.	Volumetriese verandering.....	29
3.2.3.	Kapillêre druk .....	30
3.2.4.	Bloei.....	33
3.2.5.	Verdamping van standaardeenhede .....	35
3.2.6.	Verdamping van kuringsmiddels .....	35
3.2.7.	Stollingstye .....	36
3.3.	Toetsomstandighede.....	37
3.4.	Mengprosedures .....	38
3.5.	Kuringstoepassing en skedulering.....	40
3.5.1.	Kuringstoepassing.....	40
3.5.2.	Kuringshoeveelhede.....	41
3.5.3.	Kuringskedulering.....	42
3.6.	Toetshoeveelhede en dataversameling .....	45
4.	Resultate.....	47

4.1.	Ongekuurde beton .....	47
4.2.	Bloei en verdamping van ongekuurde beton.....	48
4.3.	Enkelwaterkuring .....	50
4.4.	Veelvuldige waterkuring .....	57
4.5.	Kuring met kuringsmiddels .....	60
4.6.	Verdamping van die kuringsmiddels .....	64
4.7.	Waarde van kuring .....	66
5.	Gevolgtrekkings en aanbevelings .....	73
6.	Bronnelys .....	76
A.	Bylaag A: Ongekuurde .....	a
B.	Bylaag B: WET1 .....	c
C.	Bylaag C: WET2.....	e
D.	Bylaag D: WET3.....	g
E.	Bylaag E: WET4.....	i
F.	Bylaag F: WET5 .....	k
G.	Bylaag G: WV5T .....	m
H.	Bylaag H: WV5B.....	o
I.	Bylaag I: KM1 .....	q
J.	Bylaag J: KM2 .....	s
K.	Bylaag K: KM3.....	u

## Figure

Figuur 2.1: Hidrasiefases van beton (aangepas vanuit Combrinck, 2016) .....	7
Figuur 2.2: Kalsiumsilikaathidraatkristalle (C-S-H) in sementpasta (Mehta & Monteiro, 2006) .....	8
Figuur 2.3: Bloei van beton ( <a href="https://www.youtube.com/user/WarunaThejana">https://www.youtube.com/user/WarunaThejana</a> , 2018).....	9
Figuur 2.4: Meniskusformasie in die kapillêre porie (Combrinck & Boshoff, 2012) .....	12
Figuur 2.5: Kapillêre ontwikkeling as gevolg van die gedrag van die deeltjies in die mengsel .....	13
Figuur 2.6: Fase van kapillêre drukontwikkeling (Combrinck & Boshoff, 2012).....	13
Figuur 2.7: Meganismes van plastiese versakkingskrake (aangepas vanuit Khan, 2018) .....	16
Figuur 2.8: Aanvanklike en laatkuringstye (Powers, 1968) .....	19
Figuur 2.9: Waterbevoogting van 'n betonblad (Kosmatka & Wilson, 2002).....	20
Figuur 2.10: Ondeurdringbare papierkuring (Cement concrete & aggregrate Australia, 2006) .....	23
Figuur 2.11: Kapillêre drukgedrag van enkelkuringstoepassing (Schmidt & Slowik, 2009)..	24
Figuur 2.12: Kapillêre drukontwikkeling as gevolg van veelvuldige toepassing van kuring (Schmidt & Slowik, 2009) .....	24
Figuur 2.13: Links: Kraakontwikkeling van veelvuldige kuringstoets; Regs: Kraakontwikkeling van ongekuurde toets (Schmidt & Slowik, 2009).....	25
Figuur 3.1: a) Insinkingstoets, b) Kubussterkte monsters.....	27
Figuur 3.2: Kraakvorm.....	27
Figuur 3.3: Kraakarea-afmetings .....	28
Figuur 3.4: Versakkingsopstelling van die krimpvorm (Le Roux, 2014).....	29
Figuur 3.5: Krimpopstelling van die krimpvorm (Le Roux, 2014) .....	30
Figuur 3.6: Kapillêre druksensor-opstelling op die krimpvorm .....	31
Figuur 3.7: Kapillêre druksensortoetsing.....	31
Figuur 3.8: Verwagde kapillêre data vergelyk met die sensordata .....	32
Figuur 3.9: Verteenwoordigende funksie van die kapillêre druk .....	32
Figuur 3.10: Bloeivorm en -toerusting.....	33
Figuur 3.11: Bloeivormbedekkings .....	34
Figuur 3.12: Verwagte bloeigedrag .....	34
Figuur 3.13: Verdampingsvorm.....	35

Figuur 3.14: Verdamping van kuringsmiddel.....	35
Figuur 3.15: Vicat-penetrasie-opstelling .....	36
Figuur 3.16: Stollingstyemonster.....	36
Figuur 3.17: Klimaatboksuitleg (Combrinck, 2016).....	37
Figuur 3.18: Mengprosedure.....	39
Figuur 3.19: Kuringstoepassingsgereedskap .....	40
Figuur 3.20: Ongekuurde plastiese krimpkraakgedrag en kuringstye T1-T5 .....	43
Figuur 3.21: Krimp- en versakkingsverteenwoordigings .....	46
Figuur 3.22: Kraakareaverteenwoordiging .....	46
Figuur 4.1: Ongekuurde betontoetsresultate in terme van krimp, versakking, kapillêre druk en kraakarea .....	48
Figuur 4.2: Die bloei vergelyk met die verdamping van die ongekuurde monster.....	49
Figuur 4.3: Enkelwaterkuringstoepassing vóór die ontwikkeling van die kapillêre druk (WET1) .....	50
Figuur 4.4: Enkelwaterkuringstoepassing aan die begin van krimp (WET2).....	51
Figuur 4.5: Enkelwaterkuringstoepassing voor die vorming van kraake (WET3).....	53
Figuur 4.6: Enkelwaterkuringstoepassing op die eerste sigbare kraak (WET4).....	53
Figuur 4.7: Enkelwaterkuringstoepassing gedurende vinnige groeiperiode van die kraak (WET5) .....	54
Figuur 4.8: Opsomming van enkelkuringstoepassing se kraakareas met 1 mm kuring.....	55
Figuur 4.9: Opsomming van enkelkuringstoepassing se krimp met 1 mm kuring .....	56
Figuur 4.10: Opsomming van enkelkuringstoepassing se kapillêre druk met 1 mm kuring ...	56
Figuur 4.11: Opsomming van enkelkuringstoepassing se versakking met 1 mm kuring .....	57
Figuur 4.12: Metode vir die berekening van die gemiddelde krimp op 'n gegewe tyd.....	58
Figuur 4.13: Veelvuldige waterkuringstoepassing op 5% krimptoenname (WV5T) .....	59
Figuur 4.14: Veelvuldige waterkuringstoepassing om krimp te beperk tot 5% (WV5B) .....	60
Figuur 4.15: Laag gevorm deur die petroleumharsemulsie (KA2).....	60
Figuur 4.16: Wasemulsie-kuringstoepassing (KA1).....	61
Figuur 4.17: Petroleumharsemulsie-kuringstoepassing (KA2).....	62
Figuur 4.18: Petroleumharsemulsie-versakking (KA2).....	63
Figuur 4.19: Interne kraakvorming van die petroleumharsemulsie (KA2).....	63
Figuur 4.20: Akrielemulsie-kuringstoepassing (KA3) .....	64

Figuur 4.21: Verdamping van die gekuurde monsters met die kuringsmiddels, sowel as die middels se massa deur die vorming van die ondeurdringbare laag .....	65
Figuur 4.22: Verdamping van die gekuurde monsters, aangepas vir die massaverlies .....	66
Figuur 4.23: Opsomming van kuringstoepassings: kraakarea .....	68
Figuur 4.24: Opsomming van kuringstoepassings: kapillêre druk .....	69
Figuur 4.25: Opsomming van die optimale kuringstoepassing van elke kuringsmetode .....	69
Figuur 4.26: Krimp- en versakkingsvermindering gemeet teen die finale kraakarea.....	71
Figuur 4.27: Krimp, kapillêre druk en eerste sigbare kraakvorming gemeet teen die finale kraakarea.....	72

## Tabelle

Tabel 3.1: Betonmengbestandele, verhoudings en eienskappe.....	26
Tabel 3.2: Kuringskema en aanwysing .....	44
Tabel 3.3: Hoeveelheid toetsmonsters .....	45
Tabel 4.1: Opsomming van kuringstoepassings .....	70
Tabel A.1: Kraakarea van ongekuurde monster .....	a
Tabel A.2: Kapillêre druk van ongekuurde monster.....	a
Tabel A.3: Versakking en krimp van ongekuurde monster .....	b
Tabel B.1: Kraakarea van WET1 .....	c
Tabel B.2: Kapillêre druk van WET1 .....	c
Tabel B.3: Versakking en krimp van WET1 .....	d
Tabel C.1: Kraakarea van WET2.....	e
Tabel C.2: Kapillêre druk van WET2 .....	e
Tabel C.3: Versakking en krimp van WET2 .....	f
Tabel D.1: Kraakarea van WET3.....	g
Tabel D.2: Kapillêre druk van WET3 .....	g
Tabel D.3: Versakking en krimp van WET3 .....	h
Tabel E.1: Kraakarea van WET4 .....	i
Tabel E.2: Kapillêre druk van WET4 .....	i
Tabel E.3: Versakking en krimp van WET4.....	j
Tabel F.1: Kraakarea van WET5 .....	k
Tabel F.2: Kapillêre druk van WET5 .....	k
Tabel F.3: Versakking en krimp van WET5 .....	l
Tabel G.1: Kraakarea van WV5T .....	m
Tabel G.2: Kapillêre druk van WV5T .....	m
Tabel G.3: Krimp van WV5T .....	n
Tabel H.1: Kraakarea van WV5B .....	o
Tabel H.2: Kapillêre druk van WV5B .....	o
Tabel H.3: Krimp van WV5B .....	p
Tabel I.1: Kraakarea van KM1 .....	q

Tabel I.2: Kapillêre druk van KM1.....	q
Tabel I.3: Versakking en krimp van KM1 .....	r
Tabel J.1: Kraakarea van KM2 .....	s
Tabel J.2: Kapillêre druk van KM2 .....	s
Tabel J.3: Versakking en krimp van KM2.....	t
Tabel K.1: Kraakarea van KM3.....	u
Tabel K.2: Kapillêre druk van KM3 .....	u
Tabel K.3: Versakking en krimp van KM3 .....	v

## Definisies

### Notasies

ACI	Amerikaanse Sement Instituut
ASTM	Amerikaanse Standaardtoetsmetodes
Bloei	Bloeiwater
C-S-H	Kalsiumsilikaathidraat
KM	Kuringsmiddels
LVDT	Linêre veranderlike verplasingsskakelaar
$P_{kap}$	Kapillêre druk
PPC	Pretoria Portland Sement
PVC	Polimeriserende Vinielchloried
SANS	Suid-Afrikaanse Nasionale Standaarde
Temp	Temperatuur
Verd	Verdampingstempo [ $\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$ ]
$\text{Verd}_{std}$	Standaardverdamping [ $1 \text{ kg}/\text{m}^2/\text{h}$ ]
WS	Water-Sementverhouding [ $\text{Massa}_{water}/\text{Massa}_{sement}$ ]

### Eenhede

N	Newton
kN	Kilonewton [ $10^3 \text{ N}$ ]
Pa	Pascal [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]
kPa	Kilopascal [ $10^3 \text{ Pa}$ ]
MPa	Megapascal [ $10^6 \text{ Pa}$ ]
psig	Pond per vierkante duim [ $6.89476 \text{ kPa}$ ]



## 1. Inleiding

Plastiese krimpkrake is 'n ongewenste resultaat van volumetriese krimp wat vars gegote betonelemente ondergaan, veral elemente met groot blootgestelde oppervlakke (Powers, 1968). Die krake word beïnvloed deur die afsakking van digter bestandele, soos aggremaat, sand en beton, in 'n vloeibare medium. Dit veroorsaak dat water na die oppervlak styg in 'n verskynsel bekend as bloei van beton (Slowik, Schmidt & Fritsch, 2008). Die tempo van bloei teenoor die verdampingstempo is een van die leidende faktore van plastiese kraakvoorvalle (Wittmann, 1975; Cohen, Olek & Dolch, 1989; Krönlof, Leivo & Sipari, 1995; Uno, 1998; Slowik, Schmidt & Fritsch, 2008). Beton is hoogs vatbaar vir krake gedurende die plastiese fase aangesien beton min na geen weerstand teen die kraakverskynsel bied.

Hierdie verskynsel sluit in die spanning en vervorming soos veroorsaak deur die beperking van beton se beweging, wat insluit bewapening, vormwrywing, variasie in diepte, ensovoorts. Krake vorm wanneer hierdie spanning en vervorming die toelaatbare kapasiteit oorskry (Olivier *et al.*, 2018; Combrinck & Boshoff, 2019). Plastiese krimpkrake kom gewoonlik in deurkruisde en onreëlmatige patrone voor, met lengtes van 50 – 1000 mm en wydtes wat 1 mm mag oorskry (Slowik, Schmidt & Fritsch, 2008). Indien hierdie krake nie behandel word nie, kan dit paaie word vir skadelike stowwe wat 'n negatiewe invloed op duursaamheid van betonstrukture kan hê, veral strukture met groot blootgestelde elemente soos dié van betonblaaie en bewapening (Qi, 2003; Otieno, Alexander & Beushausen, 2010).

Verskeie metodes is beskikbaar om krimp en versakking te verlaag en kan verdeel word in interne materiaalgebaseerde ontwerpe, of eksterne toegepaste metodes. Een van hierdie eksterne metode is kuring, waar die betonoppervlak met water of kuringsmiddels natgemaak word (Slowik *et al.*, 2009; Ghourchian, Wyrzykowski & Lura, 2016). Die oppervlak kan deur verskeie metodes natgemaak word, soos bevoogting, wateropdamming, waterversadigde bedekking of verseëling van die oppervlak met plastiekblaaie, kuringsmiddels of waterdigte papier. Kuring help om die laag water op die oppervlak van beton te behou en sodoende vertraag dit die ontwikkeling van uiterste hoë trekkapillêre poriedruk wat dien as die voorloper van plastiese krimpkrake is (ACI 308R, 2001; Slowik *et al.*, 2009).

Die Amerikaanse Sement Instituut (ACI) stel voor dat die metodes wat gebruik word om plastiese kroke te voorkom gebaseer moet word op die tempo van verdamping van die bloeiwater op die oppervlak (ACI 305.1-06, 2007). Kuringsmetodes kan gebruik word om plastiese krimpkrake te versag, deur gebruik te maak van 'n vergelyking tussen die in-situ betonbloeiempo en die voorspelling van verdampingstempo soos voorgestel deur Uno se vergelyking (Uno, 1998).

Kwak en Ha (2006) het 'n analitiese model voorgestel om die verdrogings tyd van 'n gegewe betonblad te bepaal, waar 'n balans tussen die bloei van die beton en die verdamping van die vog op die oppervlak bereik word. Dit word algemeen aanvaar dat kuring moet plaasvind net vóór of op hierdie verdrogings tyd (Kwak & Ha, 2006).

Teenstrydig met eksterne en aktiewe kraakvoorkomingsmetodes word passiewe metodes gebaseer op die verandering van die materiaal eienskappe van die meng en word algemeen gebruik om plastiese krimpkrake te bestry. Hierdie metodes maak onder andere gebruik van minerale of vloeibare bymiddels, soos krimpverminderingsbymiddels en versnellers (Krönlof, Leivo & Sipari, 1995; Lura *et al.*, 2007; Mora-Ruacho, Gettu & Aguado, 2008; Leemann, Nygaard & Lura, 2013; Combrinck *et al.*, 2019). Terselfdertyd moet die gebruik van sekere bymiddels versigtig oorweeg word, soos vertragers en plastieseerders of ander waterverminderingsbymiddels wat plastiese krimpkrake mag versnel (Krönlof, Leivo & Sipari, 1995).

So ook mag krimpverminderingsbymiddels die meganiese eienskappe van beton negatief affekteer indien hoë dosisse gebruik word, soos byvoorbeeld die druksterkte. Vesels kan as passiewe metode gebruik word aangesien dit versakkings verminder en die kohesie regdeur die betonmatriks versterk, wat die voorvalle van kroke help voorkom (Olivier *et al.*, 2018). Materiaalontwerpe, wat kan gebruik word om plastiese krimpkrake te help voorkom, verander die vars eienskappe van beton van binne-af. Dit poog om die meganismes, wat mag lei tot kroke, te voorkom of te verlaag. Materiaalontwerpe word vooraf beplan waar kuring ná die giet of stolling van beton toegepas word.

Die kuringsmetodes wat gebruik is kan moontlik die erns van plastiese krimp verlaag, maar dit ook vererger. Aktiewe metodes soos bevogting is daarop gemik om die relatiewe humiditeit van die beton se oppervlak te verhoog wat die verdampingsproses vertraag. Meeste van die metodes of voorsorgmaatreëls het ten doel om die verlies van water vanuit die beton te voorkom deur die verdampingsproses te vertraag of die verlore water aan te vul (Uno, 1998; ACI 308R, 2001).

Aanvanklike kuringsmetodes soos dié van die sproei van 'n fyn mis oor die beton se oppervlak (bekend as bevogting), bedekking van die beton met goingsak of plastiese bedekking en sproei van kuringsmiddels of verdamingsvertragers, is alles daarop gemik om die verdampingstempo te verlaag. Die regte toepassingstyd en -metode van hierdie kuringsmetodes is noodsaaklik vir die sukses wat bereik kan word. Kuring is slegs effektief indien dit toegepas word voordat die beton kraak en kan nie kroke herstel ná hul gevorm het nie. Die ACI 308R stel voor dat kuringsmetode toegepas word die oomblik wanneer al die bloeiwater op die oppervlak verdamp het om sodoende plastiese krimpkrake te voorkom (ACI 308R, 2001).

Hierdie navorsing poog om 'n praktiese en betroubare benadering tot die gebruik van oppervlakkuringsmetodes te bied met spesifieke fokus op die verligting van plastiese krimpkrake en die uitdagings wat daarmee gepaard gaan. 'n Betroubare kuringskedule kan ingestel word deur die effektiwiteit van bevogting en die gebruik van kuringsmiddels te ondersoek. Die effektiwiteit van enige kuringsmetode is direk verwant aan die toepassingstyd. Hierdie toepassingstye kan aanbeveel word deur die aanvanklike en finale stollingstye, kapillêre poriedruk, krimp- en versakkingsontwikkeling, bloei- en verdampingseienskappe van beton, sowel as die ontstaan van kroke. In hierdie studie word waterkuring, enkel en veelvuldige kuringstoepassing en kuringsmiddels se invloed op die plastiese krimpkrake van beton ondersoek.

## **1.1. Doelwitte**

Hierdie studie het ten doel om die volgende te ondersoek:

- Die invloed van eksterne toepassing van waterkuring op die plastiese krimpkrake van beton.
- Die effektiwiteit van veelvuldige waterkuring gemeet teen enkel-waterkuring.
- Die invloed van eksterne toepassing van vloeibare kuringsmiddels op die plastiese krimpkrake van beton.

## 1.2. Metodes

Die metodiek ten einde die doelwitte van hierdie studie te bereik, sluit die volgende in:

- Voltooi 'n breedvoerige literatuurstudie oor die gedrag van beton en die interne eienskappe gedurende die varsfase waarin beton stol en van 'n vloeistof na 'n vaste stof beweeg. Die literatuurstudie is gefokus op die volgende: krimp, versakking, bloei, verdamping, kapillêre druk, plastiese kraak en kuring van beton.
- Die uitvoering van eksperimentele toetse op ongekuurde beton in die plastiese toestand, om sodoende die bloei, verdamping, krimp, versakking, kapillêre druk en kraak van plastiese beton in uiterste toestande, wat gunstig is vir die vorming van kraak, te bepaal.
- Die resultaat van die ongekuurde toets te gebruik om die toetsskedule te bepaal en uit te voer ten einde die invloed van vloeibare kuringsmetodes te toets.
- Analiseer en bespreek alle resultate om toepaslike gevolgtrekkings en aanbevelings te maak.

## 1.3. Navorsingswaarde

Die voorkoming van die kraak van beton in die verharde toestand is van omvangryke belang, aangesien kraak verlies aan duursaamheid, dienslewe, stabiliteit van 'n struktuur en estetiese waarde kan veroorsaak. Tog is die oorheersende bestrydingsmaatreëls wat geneem word om kraak te voorkom meestal ingestel nádat beton gestol het. Hierdie studie het ten doel om die belangrikheid te beklemtoon van die toepassing van voorkomende maatreëls wat ingestel word gedurende die plastiese toestand, aangesien die vorming van kraak gedurende hierdie toestand een van die vroegste defekte is wat voorkom in betonstrukture en kan dus ernstige duursaamheid, onderhoud en strukturele probleme veroorsaak.

Hierdie studie fokus verder op die eksterne toepassing van vloeibare kuringsmiddels wat algemeen gebruik word in die praktyk. Tog is daar nie veel navorsing beskikbaar wat eksperimenteel bewys hoe kuringsmetodes die bekende meganismes en faktore wat plastiese krimpkraak veroorsaak, beïnvloed nie (Schmidt & Slowik, 2009).

Die kennis en begrippe opgedoen gedurende die studie kan gebruik word om 'n optimale kuringskedule op te stel wat plastiese krimpkrake algeheel kan voorkom. Die voorkoming van krake sal die duursaamheid en stabiliteit van die struktuur verbeter deur die nodige onderhoud en kostes daarvan te verlaag. Die sal deel vorm van die globale beweging na volhoubare, estetiese, veeldoelige gebruik, ekonomiese, veilige en standvastige infrastruktuur.

#### **1.4. Verslaguitleg**

Hoofstuk 1 bied 'n inleiding na die studie en sluit die doelwitte, metodes en navorsingswaarde in.

Hoofstuk 2 bevat die literatuurstudie benodig om beton, die interne eienskappe van beton en die gedrag van plastiese krake te verstaan en dien as 'n basis vir die eksperimente wat gedoen is en die resultate verkry in hierdie studie. Dit sluit die nodige agtergrondkennis van die hidrasie van beton, gedrag van vars beton, plastiese krake en kuringsmetodes in.

Hoofstuk 3 beskryf die eksperimentele raamwerk vir die toetse wat vir die studie uitgevoer is. Dit sluit in die beskrywing van die vorms, meng- en toetsapparate wat gebruik is, sowel as die prosedures wat gevolg is. Die hoofstuk beskryf ook die materiale en mengontwerp wat gebruik is gedurende toetse en die toepassing van kuringsmetodes.

Hoofstuk 4 lewer en bespreek die resultate van die toetse wat die stollingstye, insinking, bloei, verdamping, krimp, versakking, kapillêre druk en die kraakontwikkeling vir beide die gekuurde en ongekuurde beton insluit.

Hoofstuk 5 lewer die gevolgtrekkings wat vanuit die studie verkry is sowel as aanbevelings vir toekomstige navorsing.

## 2. Literatuurstudie

Hierdie hoofstuk bied 'n omvattende agtergrondstudie om sodoende die gedrag van plastiese krimpkrake in vars gegote beton te kan verstaan. Die hoofstuk is verdeel in vier hoofafdelings. Die eerste afdeling bespreek beton in die algemeen; die tweede afdeling verduidelik plastiese krimpkrake in beton; die derde dek kuringsmetodes; en die vierde bespreek die invloed van kuring op plastiese krimpkrake.

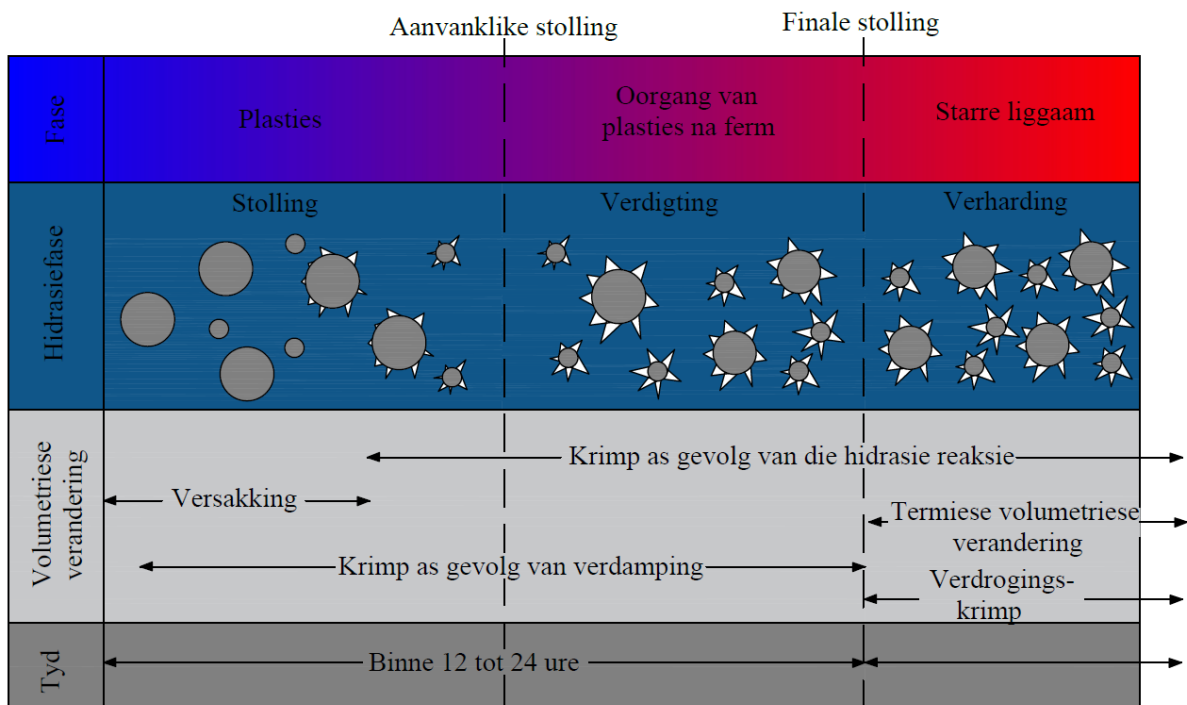
### 2.1. Beton

Hierdie afdeling bespreek die gedrag van algemene standaardbeton wat bestaan uit growwe en fyn aggregraat, sementpoeier en water, maar kan ook bymiddels en bestandele bevat. Beton kan gedefinieer word as 'n harde, sterk boumateriaal, gemaak deur 'n sementeerende materiaal te meng, soos dié van Portlandsement, en mineraalaggregraat, soos sand en gruis, met 'n voldoende hoeveelheid water om hidrasie te veroorsaak sodat die mengsel kan stol en die hele massa kan bind (Merriam-Webster, 2016). Die volgende subafdelings verduidelik die algemene gedrag van beton.

#### 2.1.1. Hidrasie

Hidrasie is 'n chemiese reaksie tussen water en sement wat hidrasieprodukte vorm, die bestandele bind en die sterkte van beton bepaal (Mehta & Monteiro, 2006). Hierdie reaksie veroorsaak 'n faseverandering vanaf 'n vloeistof na 'n vaste stof oor 'n gegewe tyd, wat verdeel kan word in twee arbitrêre afmetings, naamlik aanvanklike en finale stolling (SANS 50196-3, 2006). Hierdie afmetings word verkry deur gebruik te maak van penetrasietoetse wat die interne weerstand van die pasta gebruik as 'n aanduiding van die verdigting. Tog is die waarde net 'n aanduiding en meet dit nie die chemiese gedrag van die reaksie nie.

Die hidrasiereaksie kan in drie hoofperiodes verdeel word deur gebruik te maak van die aanvanklike en finale stollingstye soos aangedui in Figuur 2.1. Hierdie proses vind plaas wanneer die nat bestandele, gewoonlik water, by die droë bestandele wat 'n sementhoudende bestandele bevat, soos byvoorbeeld Portlandsement, gevoeg word (Powers, 1968; Combrinck, 2016).



Figuur 2.1: Hidrasiefases van beton (aangepas vanuit Combrinck, 2016)

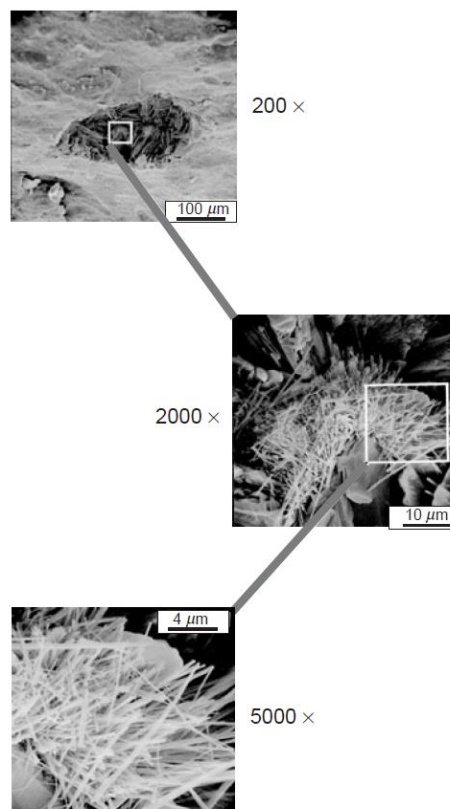
### Stollingsfase

Die eerste fase van hidrasie staan bekend as die stollingsfase en begin amptelik wanneer water in kontak kom met sement. Die fase is ook bekend as die fase waar die sementpasta sy digtheid verloor (Mehta & Monteiro, 2006). Gedurende hierdie fase word die beton gegiet en ondergaan 'n oorgrote versakking en bloei aangesien dit steeds 'n plasties vloeibare oplossing is. So ook ondergaan die beton krimp as gevolg van verdamping wat later in die hoofstuk bespreek word (Combrinck, 2016).

Die tempo van hitte vrygestel gedurende hierdie periode begin met 'n hoë tempo wat gedryf word deur die aanvanklike eksotermiese reaksie tussen gips en aluminate in die sementwatermengsel. Gips word bygevoeg om die geweldige reaksie tussen die aluminate en water wat ettringiet vorm, 'n reaksieprodukt wat veroorsaak dat beton te vinnig stol, te voorkom. Daarna gaan die aanvanklike reaksie in 'n rusperiode as gevolg van die gips wat bygevoeg is en veroorsaak 'n vertraging van die formasie van ettringiet wat veroorsaak dat die mengsel vir 'n langer tydperk werkbaar bly. Die rusperiode kan in natuurlike omstandighede tussen twee tot drie ure duur (Mehta & Monteiro, 2006).

## Verdigtingsfase

Die tweede fase staan bekend as die verdigtingsfase waarin die mengsel oorgaan van 'n plastiese na 'n soliede fase soos aangedui deur die verlies van die mengsel se deurlaatbaarheid en poreusheid (Combrinck, 2016). Die begin van hierdie fase word gedefinieer deur die aanvanklike stolling van die mengsel. Dit is gedurende hierdie fase wanneer die kalsiumsilikaathidraatkristalle (C-S-H) begin vorm, soos aangedui in Figuur 2.2, as gevolg van die reaksie tussen water en die silikaat Aliet ( $C_3S$ ). Hierdie kristalle veroorsaak dat die pasta stol en gee beton sy kenmerkende sterkte (Mehta & Monteiro, 2006).



Figuur 2.2: Kalsiumsilikaathidraatkristalle (C-S-H) in sementpasta (Mehta & Monteiro, 2006)

## Verhardingsfase

Die volgende fase begin wanneer die pasta stol en dui die begin van die mengsel se beduidende sterkte aan (Powers, 1968; Combrinck, 2016). Hierdie fase begin wanneer die mengsel finale stolling bereik en staan bekend as die verhardingsfase. Die fase dui op die toevoeging van die silikaat Beliet ( $C_2S$ ) by die reaksie van die Aliet en help die formasie van die kalsiumsilikaathidraatkristalle (C-S-H). Hierdie kristalle vul die leemtes en veroorsaak 'n verlies aan poreusheid en die sterkte van beton tot gevolg het (Emeritus, 1990; Mehta & Monteiro, 2006).



### 2.1.2. Bloei

Die bloei van beton word gedefinieer as die water wat na die oppervlak van die beton styg en word na verwys as bloeiwater, soos aangedui in Figuur 2.3. Bloei vind plaas wanneer digter bestandele, gewoonlik die aggremaat, in 'n oplossing sink wat water na die oppervlak forseer (Powers, 1968). Bloeiwater dien as 'n interne kuring, maar is ten koste van die beskikbare water vir die hidrasiereaksie. Die bloei van beton begin aanvanklik teen 'n konstante tempo en neem gelydelik af na geen bloei.

Die bloei van 'n monster is 'n belangrike eienskap aangesien die kuringsaspek van die bloeiwater die verdamping van die poriewater vertraag asook die plastiese kraak, wat later in die afdeling bespreek word. Die tempo sowel as die hoeveelheid bloeiwater moet fyn dop gehou word aangesien die bloeiwater opgeweeg word teen die verdamping om rofweg te voorspel of die monster sal kraak, al dan nie (Powers, 1968).



*Figuur 2.3: Bloei van beton* (<https://www.youtube.com/user/WarunaThejana>, 2018)

Die tempo en hoeveelheid bloei word beïnvloed deur die fynheid en digtheid van die bestandele, sowel as die hoeveelheid water wat gebruik is. Daar is bymiddels beskikbaar wat die bloei van beton beïnvloed soos viskositeitsverwysings- en lugverdigtingsmiddels. Die bloei van beton word oor die algemeen verlaag deur fyner en meer hoekige bestandele te gebruik (Josserand & de Larrard, 2004; ACI 305.1-06, 2007; Le Roux, 2014; Combrinck *et al.*, 2019).

### 2.1.3. Verdamping

Verdamping is die proses waar water uit die monster onttrek word in die vorm van waterdamp. Water word oorwegend vanaf die bloeiwater op die betonoppervlak verwyder. Dit kan egter ook vanuit die betonporieë verwyder word. Die verdampingsproses word meestal gedryf deur die omgewingstoestande en word gemeet in kilogram per vierkante meter per uur ( $\text{kg/m}^2/\text{h}$ ) (Powers, 1968).

Verdamping verwyder vog vanuit die beton deur middel van konveksiehitte wat die beton uitdroog en help met die stolling en verhardingsproses (Powers, 1968). Verdamping kan wiskundig bereken word soos aangedui deur Vergelyking 1. Erge verdamping word ervaar in droë, warm en winderige omgewings soos voorgestel in die gegewe vergelyking, dus sal 'n droë woestyn 'n hoër verdamping ervaar as die van 'n vogtige tropiese omgewing (Uno, 1998).

$$ER = 5[(T_c - 18)^{2.5} - r(T_c + 18)^{2.5}](V + 4) \times 10^{-6} \quad \text{Vergelyking 1}$$

Waar:

ER = Verdampingstempo [ $\text{kg/m}^2/\text{h}$ ]

$T_c$  = Betontemperatuur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_a$  = Lugtemperatuur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

r = Relatiewe humiditeit [%]

V = Windspoed [ $\text{km/h}$ ]

Die invloed van klimaat op verdamping sowel as ander aspekte van beton word in die volgende afdeling bespreek.

### 2.1.4. Klimaat

Die klimaat het 'n beduidende impak op die gedrag van beton en beïnvloed die hidrasie sowel as die verdampingstempo (Combrinck & Boshoff, 2012). Beton kan vinnig uitdroog en 'n hoër hidrasietempo ondergaan in 'n droë warm klimaat, waar 'n koue klimaat die hidrasie vertraag. Die klimaat moet dus versigtig oorweeg word vir enige projek wat gebruik maak van beton, aangesien klimaat beton negatief kan beïnvloed of selfs skade veroorsaak (Penttala, 2015). Oor die algemeen word dit aanvaar dat klimaat hoofsaaklik bepaal word deur temperatuur, relatiewe humiditeit en windspoed soos in die volgende afdeling bespreek.

## Temperatuur

Die temperatuur of hitte rondom 'n monster beïnvloed die hidrasiereaksie, groei en verdamping van die betonmonster (Combrinck & Boshoff, 2013). Die temperatuur verhoog die tempo en hoeveelheid verdamping wat groter hoeveelhede groeiwater verwyder en sodoende die risiko van krake vergroot soos bespreek in die vorige afdeling. Hierdie hitte word oorgedra aan die betonmonster en verhoog die interne hitte wat die eksotermiese hidrasiereaksie beïnvloed.

In 'n natuurlike opstelling word hitte veroorsaak deur die hitte van die son se strale, terwyl kunsmatige faktore beligting, industriële prosesse, masjinerie en ander vorme insluit. Hierdie faktore verhoog gewoonlik die hitte, tog is daar ander faktore wat weer die temperatuur verlaag, soos wolke wat die son uitblok of dauw wat op die blootgestelde oppervlak vorm.

Al is hoë temperature gewoonlik die hoofklimaatbepalende faktor, kan lae temperature ook probleme veroorsaak soos vrieskade en vertraging van die hidrasietempo. Die toetstemperatuur in laboratoria word gewoonlik beheer deur klimaatbeheerde kamers of toerusting wat gereguleer word deur elektroniesbeheerde verhittingselemente (Almusallam *et al.*, 1998; Uno, 1998; ACI 305.1-06, 2007).

## Relatiewe humiditeit

Relatiewe humiditeit, wat gemeet word as 'n persentasie, is die hoeveelheid vog in die lug rondom 'n betonmonster. Die humiditeit beïnvloed die verdamping en kan verdamping aanhelp of dit teëwerk (Combrinck & Boshoff, 2013). Die humiditeit is 'n aanduiding van die hoeveelheid vog in die lug. 'n Hoër humiditeit dui aan dat die lug meer versadig is en is dus moeiliker om meer vog by te las. So ook is die teenoorgestelde waar: water verdamp makliker in onversadigde lug, dus hoe laer die humiditeit hoe hoër die verdamping.

Die relatiewe humiditeit word ook deur die temperatuur beïnvloed, naamlik hoe hoër die temperatuur hoe laer is die relatiewe humiditeit. Dit vorm deel van die verskynsel waar lug teen 'n gegewe temperatuur 'n gegewe hoeveelheid vog kan hanteer (Uno, 1998). Die gelokaliseerde humiditeit kan beïnvloed word deur die nabyheid van 'n waterliggaam of die gebrek daarvan. Die humiditeit rondom 'n monster kan kunsmatig verhoog word deur gebruik te maak van misopwekkers of verlaag word deur gebruik te maak van houtskoolaggregaat of ontvoeters (Kosmatka & Wilson, 2002).

## Windspoed

Wind veroorsaak die verwydering van waterdamp rondom die monster en beïnvloed die verdrogingstempo. Hoe hoër die windspoed, hoe meer effektief is die verwydering van die vog rondom die betonmonster en sodoende verhoog die verdampingstempo van die bloei en poriewater vanuit die beton soos vroeër bespreek (Uno, 1998; Kwak & Ha, 2006; Combrinck, 2012).

Wind word natuurlik veroorsaak wanneer warm lug styg en koue lug daal, sodoende beweeg lugmolekules vinnig van 'n hoë na 'n lae drukgebied. Hierdie beweging van lug of wind vervoer beide hitte en vog van een gebied na 'n ander (Makariewa *et al.*, 2010).

### 2.1.5. Kapillêre druk

Kapillêre druk word aangedryf deur die verdamping van water vanuit die betonporieë wat druk veroorsaak tussen soliede deeltjies as gevolg van die formasie van meniskusse tussen die deeltjies, wat wiskundig uitgedruk kan word (Vergelyking 2). Hierdie kragte, aangedui in Figuur 2.4, is 'n driedimensionele krag wat verdeel kan word in vertikale en horisontale komponente. Hierdie komponente kan beskryf word as versakking in die horisontale rigting en krimp in die vertikale rigting wat bevestig word deur die kapillêre gedrag, soos aangedui in Figuur 2.5 (Powers, 1968; Slowik, Schmidt & Fritsch, 2008; Schmidt & Slowik, 2009).

$$P = -\sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{Vergelyking 2}$$

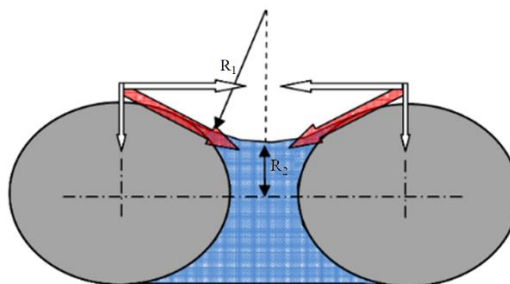
Waar:

$P$  = Kapillêre druk

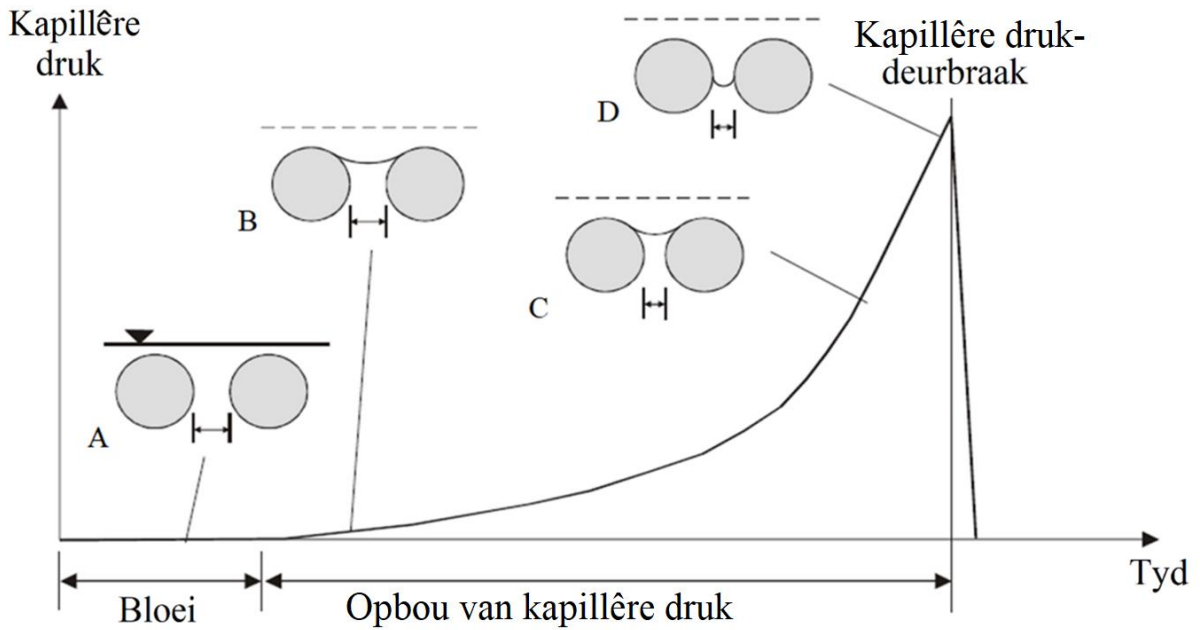
$\sigma$  = Oppervlakspanning

$R_1$  = Maksimum radius van die watermeniskus

$R_2$  = Minimum radius van die watermeniskus

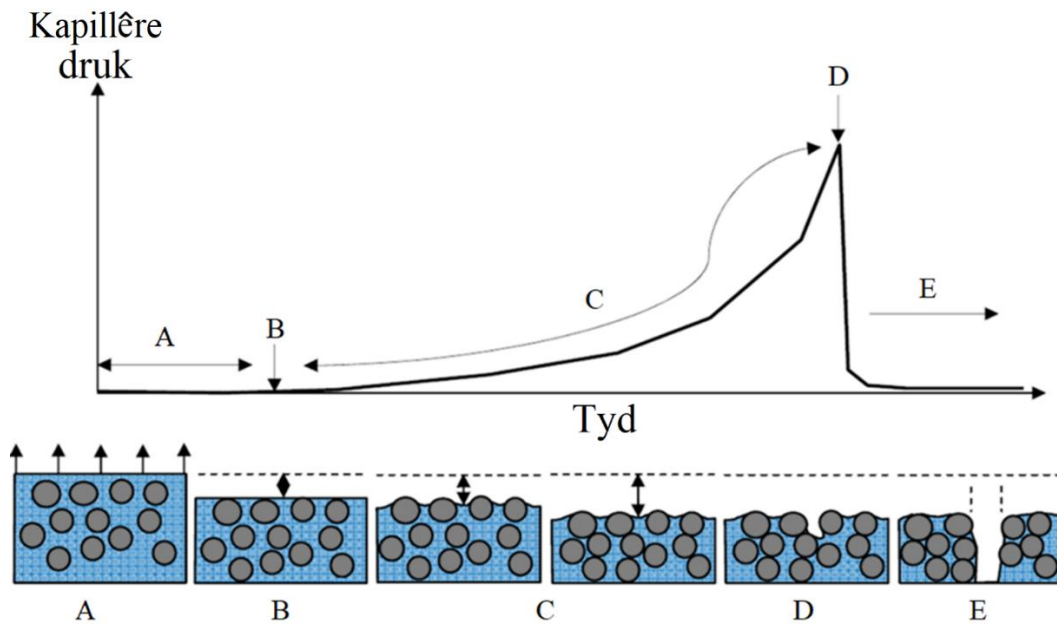


Figuur 2.4: Meniskusformasie in die kapillêre porie (Combrinck & Boshoff, 2012)



Figuur 2.5: Kapillêre ontwikkeling as gevolg van die gedrag van die deeltjies in die mengsel

Die kapillêre druk ontwikkel oor tyd soos aangedui in Figuur 2.6. Die ontwikkeling wys belangrike tye gedurende die faseverandering van beton, vanaf 'n vloeistof na 'n vaste stof (Schmidt & Slowik, 2009; Combrinck & Boshoff, 2012). Die ontwikkeling van die kapillêre druk kan verdeel word in 'n kombinasie van drie hoof fases en twee punte soos as volg bespreek:



Figuur 2.6: Fase van kapillêre drukontwikkeling (Combrinck & Boshoff, 2012)

### **Fase A: Rustydperk**

Fase A begin wanneer die beton gegiet word en 'n fyn lagie water op die oppervlak van die betonmonster vorm, bekend as bloei van beton. Hierdie fase word oorheers deur 'n hoër tempo bloei eerder as dié van verdamping (Combrinck & Boshoff, 2012; Chryso, 2019).

### **Punt B: Begin van kapillêre druk**

Punt B is die punt waar die bloei van die monster en die verdampingswaarde gelykbreek en dit is vanaf hiërdie punt wat die kapillêre druk ontwikkel (Combrinck, 2012).

### **Fase C: Verhoging van kapillêre druk**

Fase C dui die fase aan waar die bloeitempo laer is as die verdampingstempo wat sametrekingskragte veroorsaak tussen die vaste deeltjies as gevolg van die formasie van meniskusse. Hierdie kragte trek die deeltjies nader aan mekaar, in beide die vertikale en horisontale rigtings, soos die kapillêre druk verder styg (Slowik *et al.*, 2009; Combrinck, 2012).

### **Punt D: Lugpenetrasië**

Punt D dui die punt aan waar lug die sementpasta binnedring en stem ooreen met die maksimum vertikale versakking. Lug penetreer die monster op lukrake gelokaliseerde punte op die oppervlak en dui die moontlike posisies van krake aan. Hierdie word veroorsaak deur die radius van die meniskusse wat te klein raak om die gapings tussen die deeltjies te vul (Krönlof, Leivo & Sipari, 1995; Slowik, Schmidt & Fritsch, 2008).

Dit is belangrik om kennis te neem dat die tyd wat die lug die monster binnedring nie altyd konsekwent is nie, aangesien die tyd en plek wat die lug penetreer plaaslik varieer. Die tyd van lugpenetrasië is dus nie van belang nie, maar dien as 'n aanduiding van die tyd en tempo van die kapillêre drukontwikkeling en help om te verstaan wat gebeur in die betonporieë.

### **Fase E: Kraakvorming**

Fase E dui aan die vorming of die verbreding van 'n kraak by die posisie waar lug die monster binnedring soos gedefinieer as 'n plastiese krimpkraak, wat bespreek word in Afdeling 2.2.2. Die kraak sal bly verbreed so lank as wat die verdamping voortduur én die kapillêre druk verder ontwikkel in die nie-gekraakte plastiese beton langsaan die kraak (Combrinck, 2012).

## 2.2. Plastiese kraake

Plastiese kraake vind plaas gedurende die vars of plastiese fase van beton en kan vir agt ure ná die giet van beton duur, afhangend van die tipe mengontwerp en die omgewing waar dit gegiet is (Cohen, Olek & Dolch, 1989; Krönlof, Leivo & Sipari, 1995; Slowik, Schmidt & Fritsch, 2008). Beton is hoogs vatbaar vir kraake gedurende die plastiese fase omdat die monster lae weerstand teen spanning en vervorming bied (Olivier *et al.*, 2018).

Hierdie kraake vorm in kruis en onreëlmatige patrone met lengtes van 50 – 1000 mm en breedtes wat groter as 1 mm kan groei. Hierdie kraake vorm toegangsroetes vir ongewenste gasse en vloeistowwe tot die bewapening en mag duursaamheidsprobleme veroorsaak (Qi, 2003; Otieno, Alexander & Beushausen, 2010).

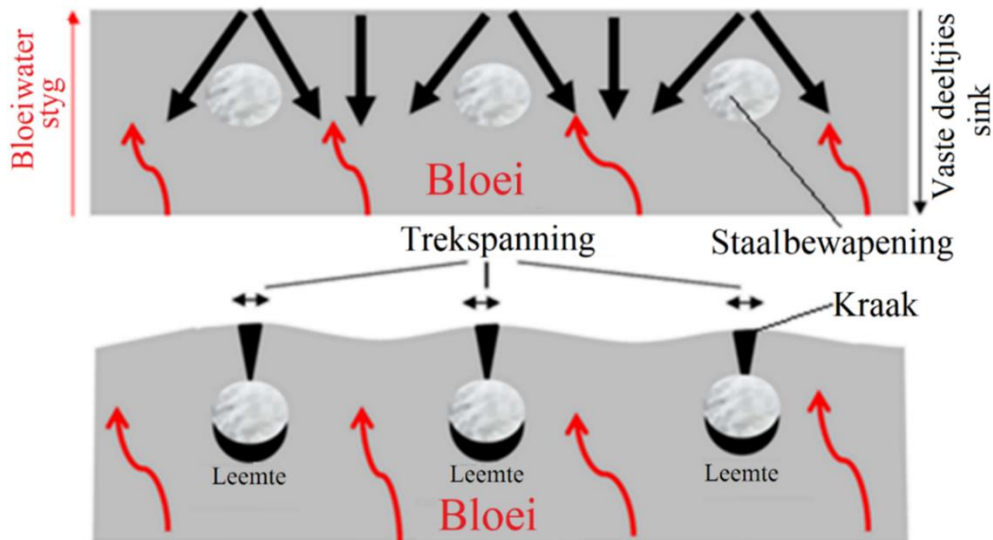
Die volumetriese verandering van 'n betonmonster gedurende die plastiese fase kan verdeel word in twee hoofvolumetriese veranderinge, naamlik versakking ('n vertikale verandering in volume) en krimp ('n driedimensionele verandering in volume) (Combrinck & Boshoff, 2012; Khan, 2018).

### 2.2.1. Plastiese versakkingskraake

Plastiese versakking vind plaas as gevolg van die afsakking van digter materiale in die mengsel en tot 'n mindere mate die verlies van betonporiewater as gevolg van verdamping. Dit vind hoofsaaklik plaas gedurende die rusperiode as gevolg van die opgeloste natuur van die mengsel (Emeritus, 1990; Khan, 2018).

Plastiese versakkingskraake vind plaas wanneer die beton se vrye versakking beperk word en veroorsaak differensiële versakking. Die beperking veroorsaak die insluitels of starre insluitels in beton soos dié van bewapeningstaal of vormwerk met varieërende dieptes. Die differensiële versakking veroorsaak interne trekspanning rondom die beperking wat kraake veroorsaak, soos aangedui in Figuur 2.7.

Plastiese versakking van 'n betonmonster vind hoofsaaklik plaas gedurende die rusperiode en eindig gewoonlik voordat die beduidende hidrasie plaasvind (Powers, 1968). Plastiese versakkingskraake vind dus plaas vóór plastiese krimpkraake en mag selfs die aanvanklike kraake inisieer wat later verbreed word deur plastiese krimp (Combrinck, Steyl & Boshoff, 2018)



Figuur 2.7: Meganismes van plastiese versakkingskrake (aangepas vanuit Khan, 2018)

### 2.2.2. Plastiese krimpkraake

Plastiese krimp word gedryf deur verdamping wat kapillêre druk veroorsaak en mag lei tot die kraak van beton soos bespreek in Afdeling 2.1.5 (Slowik, Schmidt & Fritsch, 2008). Kraake vorm slegs as die krimp van die monster beperk word deur byvoorbeeld staalbewapening, verandering in vormwerkkuitleg, weerstand van die vormwerk of subgraad asook die differensiële verharding van beton. Studies wys dat betonmonsters met groot blootgestelde oppervlakke en/of beton in erge klimaatomgewings, 'n groot moontlikheid het om plastiese kraake te vorm (ACI 224R-80, 1984; Sant *et al.*, 2009; Combrinck & Boshoff, 2012).

### 2.2.3. Faktore wat plastiese kraake beïnvloed

Dit is belangrik om al die faktore wat plastiese kraake beïnvloed te verstaan ten einde dit te voorkom. Die graad van sukses kan gemeet word as die hoeveelheid verkleining van die kraakgrootte, 'n waarde wat slegs verkrygbaar is deur fisiese eksperimentering aangesien die verandering van een interne eienskap, sonder om die ander te affekteer, feitlik onmoontlik is.

Die interkonnektiwiteit en interafhanklikheid van die interne eienskappe is geweldig kompleks en akurate modelle wat plastiese krimpkraake simuleer is steeds beperk (Sonebi *et al.*, 2016). Tog is die faktore wat platiese krimpkraake beïnvloed meestal bekend en van hierdie faktore is reeds bespreek in Afdeling 2.1, soos bloei, verdamping en kapillêre druk. Somige van die hoof faktore word bespreek in die volgende afdeling:



## Stollingstyd

Die stollingstye, naamlik die tyd wat beton neem om te stol en te verhard, beïnvloed indirek die plastiese versakkings- en plastiese krimpkrake. Dit is as gevolg van die feit dat die stolling van beton veroorsaak word deur die interne eienskappe, insluitende hidrasie, verdamping, ensovoorts. Waar moontlik, word dit aanbeveel dat die stollingstyd beperk word, aangesien 'n langer stollingsperiode 'n hoër moontlikheid vir die vorming van krale bied en meer tyd toelaat vir versakking en krimp wat dus die risiko van krale vergroot (Powers, 1968; Uno, 1998; ACI 308R, 2001).

## Waterverlies

Waterverlies vanuit beton is hoofsaaklik as gevolg van verdamping, maar kan ook as gevolg van die absorpsie van onversadigde aggregraat, subgraad en/of die vormwerk wees. Oor die algemeen, hoe meer water verlore gaan, hoe groter is die risiko vir plastiese krimpkrake.

Verdamping beïnvloed vele interne en eksterne eienskappe van beton soos bespreek in Afdeling 2.1.3. Dit sluit in die verwydering van bloeiwater sowel as die kapillêre drukontwikkeling, een van die hoofmeganismes wat plastiese krimpkrake veroorsaak, soos bespreek in Afdeling 2.1.5 (Powers, 1968; Uno, 1998; ACI 308R, 2001; Combrinck, 2016).

## Beperking

Indien die krimp van beton nie beperk word nie sal die monster vrylik krimp met geen krale nie. Hoe meer beton beperk word, hoe hoër is die graad en waarskynlikheid van krale. Tog is dit nie altyd moontlik om beperking te voorkom nie, soos in die geval van staalbewapening, bevestigingsboute, verandering in hoogte of algemene veranderinge in uitleg soos die verbreding van die vormwerk (Cohen, Olek & Dolch, 1989).

Omdat krimp 'n driedimensionele effek is word dit beïnvloed deur die longitudinale uitleg, maar ook die diepte van die beperking in die uitleg. Tog mag die vertikale krimp en versakkingskrake veroorsaak word deur differensiële versakking soos bespreek in die vorige afdelings (Steyl, 2016).

## Mengverhoudings en bestandele

Die mengverhoudings en bestandele speel 'n geweldige belangrike rol in die ontwikkeling van krake van beton aangesien die bestandele 'n direkte invloed op die bloei en dus die kapillêre druk, asook die krimp en versakking van plastiese beton het. Die bestandele sluit in die aggremaat, binder, water en bymiddels. Die ontwikkeling van krake kan ook beperk of selfs voorkom word deur gebruik te maak van mengverhoudings wat spesifiek ontwerp is (Wyrzykowski *et al.*, 2015; Cepuritis *et al.*, 2017; Combrinck *et al.*, 2019).

Een van die grootste invloede op plastiese krake is die fynheidsinhoud soos die sement en die stofverhouding van die sand. 'n Verhoogde fynheidsinhoud verhoog die graad en waarskynlikheid van krake omdat 'n hoër fynheidsinhoud bloei verlaag. Wanneer die bloeiwater verlaag word, beskerm dit nie meer die monster nie. Sodoende verhoog dit die invloed van verdamping, sowel die waarskynlikheid van krake (Jones & McCarthy, 2006). Die fyner deeltjies veroorsaak die vorming van meer meniskusse as gevolg van die verdamping, wat tesame met die verlies van bloeiwater, die kapillêre druk verhoog en dus so ook die potensiaal vir die vorming van krake.

### 2.3. Kuring

Kuring is 'n welbekende vorm van versagting van plastiese krake en kan verdeel word in interne tegnieke of eksterne toegepaste tegnieke (Schmidt & Slowik, 2009; Slowik *et al.*, 2009). Hierdie afdeling fokus op die eksterne metodes wat bereik kan word deur bevochtiging, wateropdamming, waterversadigde bedekkings, kuringsmiddels, oppervlakverseëling of die vooraf natgemaakte subgraad. Die hoofdoel van aanvanklike kuring is om plastiese krake te voorkom deur verdamping te voorkom of te vertraag en kan die hoeveelheid kuring rofweg bepaal word vanaf die verdampingstempo (ACI 305.1-06, 2007; Al-Gahtani, 2010).

#### 2.3.1. Aanvanklike teenoor laatkuring

Aanvanklike kuring vind plaas vanaf die giet tot die finale afwerking van die beton en duur gewoonlik tussen twee tot vyf ure na finale stolling bereik is. Aanvanklike kuring fokus meestal op die vermindering van vogverlies vanuit die beton gedurende die plastiese fase wat hoofsaaklik deur verdamping veroorsaak word (Jin *et al.*, 2014).

Laatkuring begin wanneer die beton verhard en beduidende sterkte bereik, min of meer 12 – 24 uur nadat die beton gegiet is en mag vir weke voortduur, soos aangedui in Figuur 2.8. Laatkuring is hoofsaaklik gefokus op die ontwikkeling van die beton se sterkte en is gemik om die hidrasiereaksie of die produkte daarvan te versterk (Emeritus, 1990; Jin *et al.*, 2014).

	Aanvanklike stol	Finale stol
Kurings-fase	Aanvanklike kuring	
Konstruksie-prosedure	Giet	Oppervlak-behandeling
Tyd	Binne 12 - 24 ure	
		Na finale stolling
		Laatkuring
		Kragontwikkeling

Figuur 2.8: Aanvanklike en laatkuringstye (Powers, 1968)

Aanvanklike kuring is gewoonlik oorgesien as gevolg van die kompleksiteit en die moontlikheid dat beton beskadig mag word, gevolglik word laatkuring meer algemeen gebruik (Cement concrete & aggregate Australia, 2006).

### 2.3.2. Eksterne vloeistofkuring

Eksterne vloeibare kuring, onder andere bevogting of wateropdamming, poog om die verdamping te voorkom deur die relatiewe humiditeit te verhoog of die bloeiwater aan te vul. Die volgende afdeling verduidelik hierdie metodes wat toegepas kan word as aanvanklike of laatkuring.

#### Waterbevogting

Waterbevogting word hoofsaaklik gebruik in konstruksie en word toegepas deur die monster met fyn watermis te sproei. Hierdie metode word ook besproeiing genoem en word aangedui in Figuur 2.9. Die hoeveelheid wat gesproei word hang af van die verdamping wat die monster ondergaan en word gewoonlik in ure van beskerming gemeet. Hierdie metode is daarop gemik om die verdampingstempo te verlaag deur die relatiewe humiditeit bo die betonmonster te verhoog (Kosmatka & Wilson, 2002).

Tog word 'n deel van die miswater gebruik om die bloeiwater, wat verlore is as gevolg van verdamping, aan te vul. Dit bied ook addisionele water wat eers verdamp moet word vóór die kapillêre druk verder kan ontwikkel en krake vorm. Indien oormatige bevoogting gebruik word kan dit ook gesien word as wateropdamming soos verduidelik in die volgende afdeling. Daar moet ingedagte gehou word dat bevoogting in omgewings met hoë windspoed dikwels ondoeltreffend is aangesien meeste van die water wegwaai.



Figuur 2.9: Waterbevoogting van 'n betonblad (Kosmatka & Wilson, 2002)

'n Fyn balans moet gehandhaaf word tussen die hoeveelheid en toepassingstyd, om sodoende skade aan die beton te voorkom, soos onder andere die toename van die water-sementverhouding van die beton se oppervlak. Die sukses van kuring hang dus af van die hoeveelheid en toepassingstyd (ACI 308R, 2001).

### **Wateropdamming**

Wateropdamming of onderdompelingskuring word gewoonlik gebruik op plat oppervlakke en het ten doel om die vog in die beton te behou. Dit word bereik deur dyke te bou rondom die beton met sand of gruis en word dan met water gevul. Opdamming word gereeld toegepas nadat beton verhard het om sodoende nie die beton te beskadig nie en word die metode dus algemeen gebruik as 'n laaifase kuring.

Wateropdamming kan ook gebruik word as 'n termiese-spanningsversagter (*heat sink*) indien die watertemperatuur onder 11°C gehou word, aangesien die water optree as 'n verkoelingstelsel wat die impak van die eksterne omgewingshitte en die interne hitte van die beton verlaag (Kosmatka & Wilson, 2002).

Hierdie metode word algemeen gebruik in laboratoria, kleiner betonmonsters of monsters met fyner oppervlakafwerking. Die monsters word gewoonlik onderdompel in water met lae onsuiverhede om te verhoed dat die monsters vlek of verkleur. Wateropdamming word algemeen gebruik vir betonfasette omdat dié fasette gewoonlik vooraf vervaardig word en gevolglik 'n fyner oppervlakafwerking benodig (Kosmatka & Wilson, 2002; SANS 3001-CO3-1, 2015).

### **Kuringsmiddels**

Bevogting kan ook gedoen word met kuringsmiddels. Hierdie metode het ten doel om die verlies van vog te voorkom deur 'n dun ondeurdringbare laag te vorm wat meer effektief is hoe meer ondeurdringbaar die laag word. Kuringsmiddels word gemaak van verskeie materiale soos akriel-, was- en petroleumemulsies, elk met hul eie voor- en nadele (Chryso, 2019).

Al is dit bewys dat kuringsmiddels plastiese krake kan voorkom, moet dit by gespesialiseerde verskaffers teen 'n addisionele koste aangekoop word. Onder die nadele van dié middels mag die grootste nadeel die oppervlakafwerking wees omdat meeste kuringsmiddels 'n laag op die oppervlak vorm wat moeilik verwyderbaar is (Chryso, 2019).

#### **2.3.1. Eksterne bedekking**

Kuring sluit in die bedekking van die monster met ondeurdringbare bedekkings, soos byvoorbeeld plastiese oortreksels wat algemeen gebruik word om pilare te kuur, of die bekleding (*boxing*) met gebruik van Perspex of ander starre materiale. Hierdie metodes is moeilik om toe te pas en te beheer aangesien die materiaal wat gebruik word blootgestel word aan die omgewing, dit 'n groot area moet bedek en maklik versteur of beskadig kan word (Cement concrete & aggregate Australia, 2006).

#### **Droë bedekking**

'n Algemene gebruikte metode is om eenvoudig die element te bedek met 'n plastiese ondeurdringbare materiaal soos plastiese blaaië, oorwegend gebruik vir balkelemente, of kleefplastiek, oorwegend gebruik vir kolomelemente, met die doel om verlies van bloeiwater te voorkom. Hierdie metode stop nie die verdampingsproses nie, aangesien sommige hitte wel die materiaal penetreer en veroorsaak dat die bloeiwater verander in waterdamp. Tog is die waterdamp nie verlore nie, aangesien die bedekking dit binnehou en sodoende 'n verhoging van die relatiewe humiditeit tot gevolg het (Cement concrete & aggregate Australia, 2006).

Hierdie metode het 'n paar nadele, onder andere: die koste van 'n groot genoeg materiaal; die proses kan maklik versteur word; die kompleksiteit van uitlegbedekking. Die metode kan versteur word deur iets so eenvoudig soos 'n skeur in die materiaal, lekkasie, of wanneer die blad oplig en sodoende die metode oneffektief kan maak op lokale punte of oor groot dele van die element.

Hierdie metode word beperk deur die grootte en uitleg van die element, aangesien 'n groter en meer komplekse uitleg dit bemoeilik om vogverlies te voorkom (Cement concrete & aggregrate Australia, 2006).

### **Versadigde bedekking**

Versadigde bedekkings is 'n wyse om te verbeter op die droë bedekkings soos vroeër bespreek, aangesien die metode die verdamping van die monster verlaag deur addisionele vog te bied vir hidrasie. Verskeie materiale kan gebruik word vir die metode soos sand of goiinsak. Daar moet verseker word dat die materiaal wat gebruik word die volle area van die element bedek en moet ook nat gehou word om as pit te dien (Kosmatka & Wilson, 2002; Cement concrete & aggregrate Australia, 2006).

Hierdie metode word beheer deur, onder meer die stol van die monster, aangesien die kuringsmateriaal die oppervlak van die beton mag beskadig as dit nie sterk genoeg is om die las te dra nie. Dit mag ongelyke oppervlak of verlies van afwerking tot gevolg hê. Die materiaal wat gebruik word vir die kuring moet skoon wees aangesien verkleuring van die monster die estetiese waarde aansienlik verlaag en mag kontaminasie van die monster se oppervlak tot gevolg hê (Kosmatka & Wilson, 2002; Cement concrete & aggregrate Australia, 2006).

### **Ondeuringbare papier**

Ondeuringbare papier word gemaak deur twee blaaië Kraftpapier ('n tipe papier wat van 'n chemiese pulp gemaak word deur die Kraftproses) aan mekaar te bind met 'n bitumeneuse gom en word deur die ASTM C 171 gereguleer, soos aangetoon in Figuur 2.10. Hierdie blaaië word gebruik om relatiewe eenvoudige vorms te bedek ten einde die verlies van vog te voorkom deur die waterdamp in te sluit. Hierdie blaaië benodig nie periodiese bevoogting nie en kan hergebruik word aangesien gate en geskeurde dele maklik herstelbaar is (Cement concrete & aggregrate Australia, 2006; ASTM C171, 2016).



*Figuur 2.10: Ondeurdringbare papierkuring (Cement concrete & aggregeate Australia, 2006)*

### **2.3.2. Voorsorg maatreëls**

Vooraf toegepaste kuringsmetodes is relatief skaars aangesien hierdie metodes nie so effektief is soos kuring wat toegepas word gedurende die plastiese of laterfases nie. Dit mag lei tot probleme soos die absorpsie van die water wat vooraf gebruik is om die subgraad te bevogtig.

#### **Bevogting van subgraad**

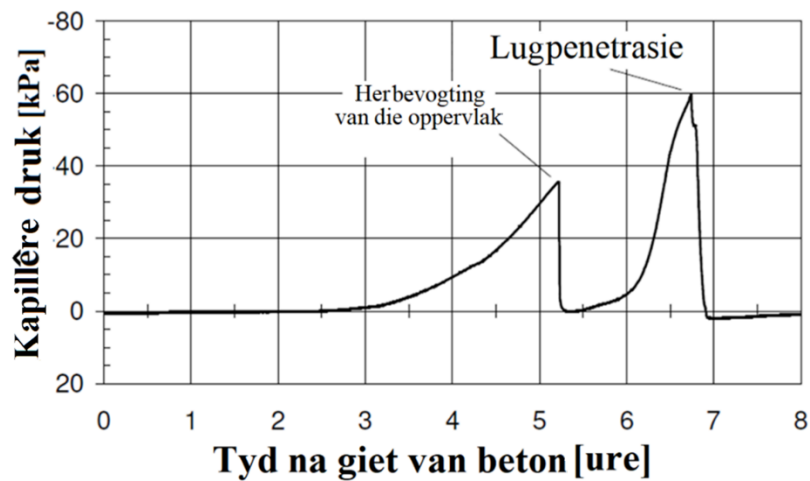
Een van die vooraf kuringsmetodes is die bevogting van die subgraad vóór die giet van die betonelement. Dit word gewoonlik gedoen om te verseker dat die subgraad nie die vog vanuit die beton absorbeer nie, terwyl dit ook 'n beter hegting met die subgraad tot gevolg mag hê. Dit word meestal in die praktyk gebruik om kontaminasie te voorkom en die lokale binding te verbeter en nie as 'n metode vir kuring nie (Kosmatka & Wilson, 2002).

Die analise van hierdie metode raak vinnig kompleks aangesien dit onbekend is hoeveel vog aan die element gebied word en hoeveel die subgraad absorbeer. Verdere vrae duik op wat verdere verwarring veroorsaak. Vrae soos die pad van vogabsorpsie, die wyse en tyd van die vogabsorpsie, affekteer die vog die water-sementverhouding op lokale plekke of beïnvloed die vog die hidrasiereaksie. Hierdie metode is verder gekompliseerd wanneer die tipe subgraad in ag geneem word of hoe kompleks dit is om die effek in 'n laboratorium na te boots (Kosmatka & Wilson, 2002).

### **2.4. Invloed van kuringsmetodes op plastiese krimpkrake**

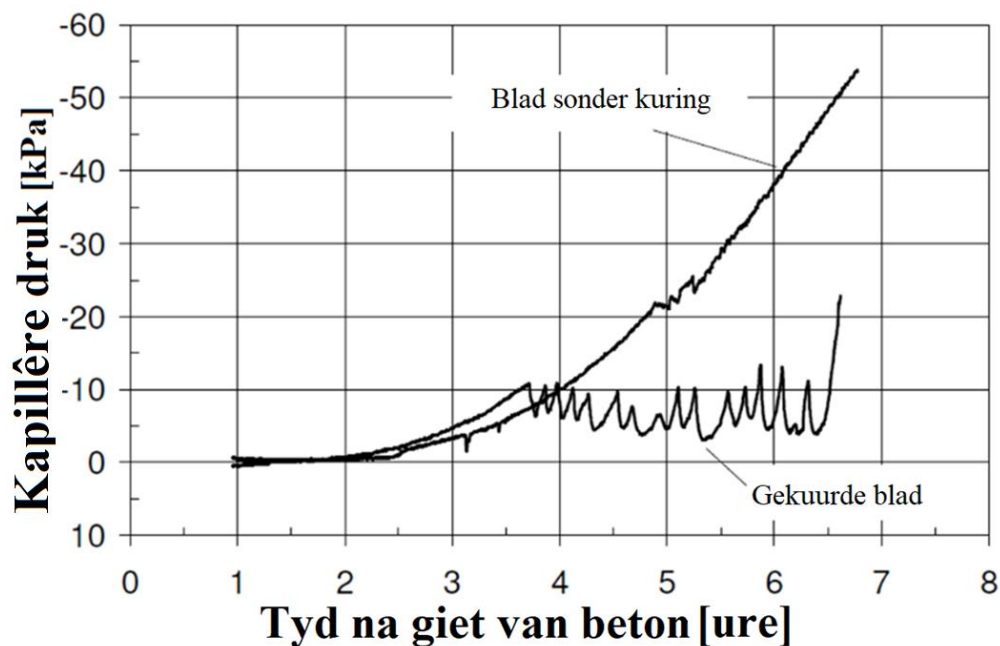
Dit word algemeen aanvaar dat kuring plastiese krimpkrake van beton verlig, tog is die sukses van die metodes en materiale meestal onbekend. Studies het bewys dat kuring die interne eienskappe van beton versag, soos krimp, versakking en kapillêre druk.

‘n Studie deur Slowik (2009) het bewys dat dit wel moontlik is om die kapillêre druk te kan versag, selfs deur ‘n enkeltoepassing van kuring soos aangedui in Figuur 2.11 (Wittmann, 1975; Slowik, Schmidt & Fritsch, 2008; Schmidt & Slowik, 2009).



Figuur 2.11: Kapillêre drukgedrag van enkelkuringstoepassing (Schmidt & Slowik, 2009)

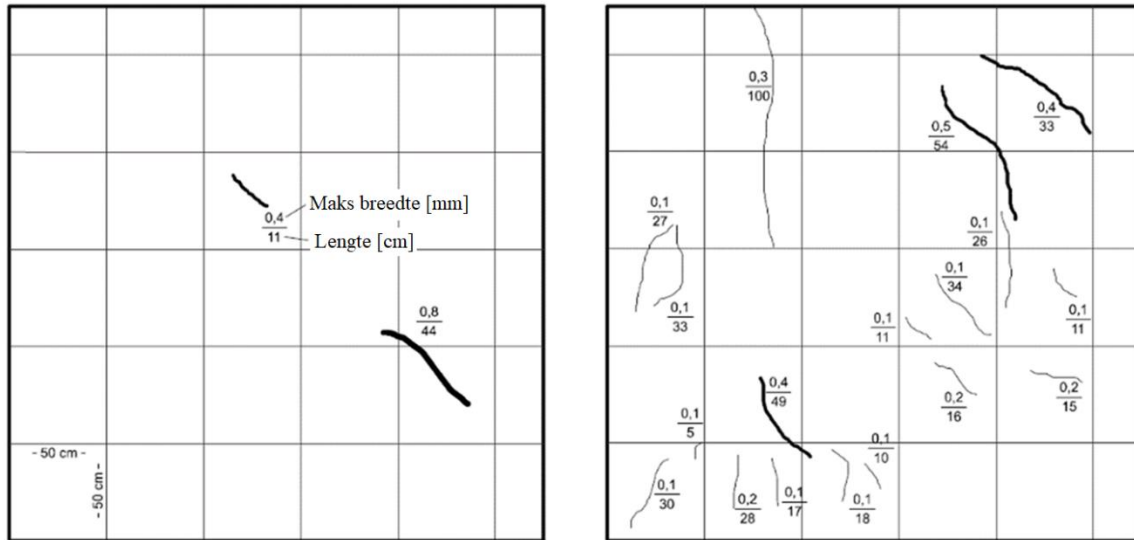
Die studie het bewys dat kuring, toegepas gedurende die begin van die kapillêre ontwikkeling, moontlik die kapillêre drukontwikkeling kan verlaag of selfs voorkom. Die versagting van die kapillêre ontwikkeling veroorsaak ‘n vermindering van die krimp en versakking wat ‘n verminderde ontwikkeling van die kraak veroorsaak. Die presiese verhouding tussen hierdie eienskappe is steeds onbekend. ‘n Algemene argument kan tog gemaak word dat groter versagting van kapillêre druk, ‘n groter afname in kraakontwikkeling toon (Figuur 2.12) (Schmidt & Slowik, 2009).



Figuur 2.12: Kapillêre drukontwikkeling as gevolg van veelvuldige toepassing van kuring (Schmidt & Slowik, 2009)



Die toepassing van veelvuldige kuring toon 'n drastiese versagting van die kapillêre ontwikkeling, veral wanneer dit vergelyk word met die ongekuurde monster. Hierdie versagte gedrag het 'n verminderde kraakontwikkeling getoon soos aangedui in Figuur 2.13.



Figuur 2.13: Links: Kraakontwikkeling van veelvuldige kuringstoets; Regs: Kraakontwikkeling van ongekuurde toets (Schmidt & Slowik, 2009)

Die kuring het drasties die kraakontwikkeling verminder, wat weereens bevestig dat kuring gebruik kan word as 'n versagtingsmetode teen die plastiese krimpkraak. Die studie deur Slowik (2009) het verder uitgelig dat die kuring gedurende die vroeë fase van beton belangrik is aangesien 'n paar krale gevorm het voordat kuring toegepas is. Hierdie studie het ook bewys, alhoewel dit algemeen aanvaar word, dat dit nie moontlik is om krale te herstel nadat dit gevorm het nie. Die studie is een van die min beskikbare studies wat die invloed van kuring op krale ondersoek, maar fokus op die kuring in die laatstadium van betonontwikkeling. Ander studies fokus op die onderwerp van kuring, plastiese krale of die invloed van bymiddels op kraakvorming as enkelkonsepte (Schmidt & Slowik, 2009).

### 3. Eksperimentele raamwerk

Hierdie hoofstuk bespreek die bestandele en mengontwerp wat in die toetse gebruik is, asook die werkswyse en tipe toetse wat uitgevoer is om die doelwitte van die studie te bereik, naamlik die ondersoek van die invloed van eksterne toegepaste vloeibare kuring op plastiese krimpkrake van beton. Dit is bereik deur 'n ongekuurde monster, naamlik 'n ongeaffekteerde monster, te vergelyk met 'n spesifiek geaffekteerde monster deur gebruik te maak van water- of kuringsmiddels. Hierdie toetse sluit in krimp, versakking, kapillêre druk en kraakontwikkeling van ál die toetse, asook die bloei, verdamping en stollingstye van die ongekuurde monster.

#### 3.1. Mengontwerp en bestandele

'n Algemene standaardbetonmengsel sonder enige bymiddels is gebruik vir die toets van alle monsters. Die insakkingswaarde van die meng was ongeveer 100 mm, met 'n water-sementverhouding van 0.55 en CEM II 52.5N-sement. 'n 9 mm-Greywacke klip as growwe aggregraat, saam met 'n natuurlike steengroefsand, algemeen bekend as Malmesburysand, is gebruik. Die mengverhoudings word aangedui in Tabel 3.1, tesame met die 7 en 28 dae kubussterkte en die insakkingswaarde. Die kubussterkte en insakkingstoetse, soos aangedui in Figuur 3.1, is getoets deur gebruik te maak van gestandaardiseerde toetse soos gedefinieer deur SANS kodes (SANS 5862-1, 2006; SANS 5863, 2006; McCarter *et al.*, 2012).

Tabel 3.1: Betonmengbestandele, verhoudings en eienskappe

<b>Bestandele</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Relatiewe digtheid</b>
Water	205	1
Sement CEM II/A-L 52.5N	373	3.14
Klip 9 mm Greywacke	1037	2.8
Sand Malmesbury	801	2.62
<b>Gemiddelde kubusdruksterkte [MPa]</b>	<b>7 Dae</b>	<b>28 Dae</b>
	40.7	51.8
<b>Insinking</b>	100 mm	



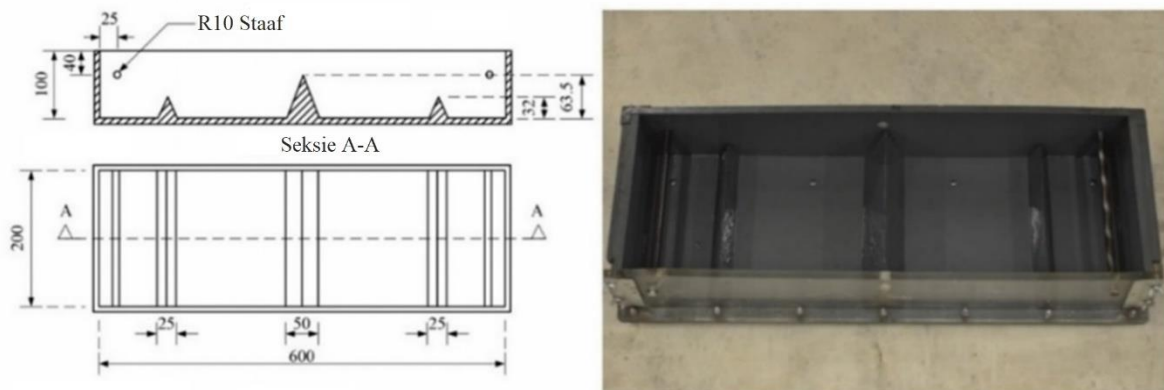
Figuur 3.1: a) Insinkingstoets, b) Kubussterkte monsters

## 3.2. Toetsmetodes

Hierdie afdeling bespreek die vorms en toerusting wat gebruik is gedurende eksperimentering. Die vorms is met beton gevul en is in die klimaatboks geplaas waar die monsters getoets is vir ten minste 260 minute. Dit moet in gedagte gehou word dat die vorms bedek is met 'n klein hoeveelheid vormvrystellingsolie om te help met die verwydering van die monsters uit die vorms ná voltooiing van die toetse. Dit laat toe dat die vorms hergebruik kan word vir ander monsters. Hierdie olie word nie gesien as 'n bymiddel nie, aangesien die hoeveelheid wat gebruik is weglaatbaar klein is en nie die betonmonsters beïnvloed nie (Combrinck, 2016; Khan, 2018).

### 3.2.1. Kraak

Die kraakvorm, naamlik die vorm wat gebruik word om kraakvorming te veroorsaak en die plastiese kraak van beton meet, is 'n  $600 \times 200 \times 100$  mm-vorm wat bestaan uit drie driehoeke (twee klein en een groot driehoek) en twee staalstawe aan elke kant van die vorm, soos aangedui in Figuur 3.2. Hierdie vorms is ontwerp volgens ASTM C1579 (2013) regulasies.

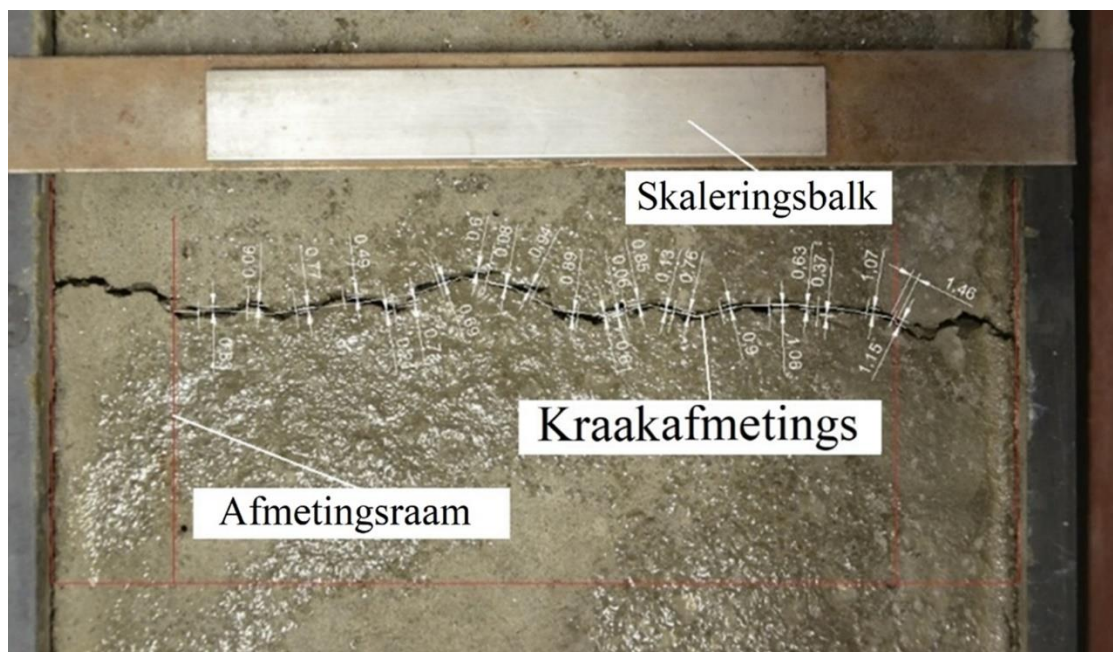


Figuur 3.2: Kraakvorm

Hierdie vorm is so ontwerp om die kraak te laat vorm oor die groter driehoek. Die vorm veroorsaak beide plastiese krimp- en plastiese versakkingskrake aangesien die grootste driehoek versakking tot gevolg het, terwyl die klein driehoekies en die staalstawe beperkings veroorsaak wat krimp tot gevolg het. Tog veroorsaak die vorms groter krimp as versakking, aangesien baie min differensiële versakking plaasvind (Boshoff & Combrinck, 2013).

Die kraakarea van die monster is bereken vanaf foto's wat geneem is met 'n hoë-definisiekamera in 20 minuut-intervalle en is vanaf die eerste sigbare haarnaaldkraak gemeet. Hierdie foto's is dan gemeet deur gebruik te maak van rekenaarsagteware.

Nadat die foto's in die sagteware ingevoer is, is dit geskaleer deur gebruik te maak van die skaleringsbalk, aangesien die balk 'n bekende lengte is, soos aandui in Figuur 3.3. Daarna is die metingsraam op die laaste foto in die reeks geskets. Die metingsraam is so toegepas dat dit 25 mm van elke kant afsny om sodoende die invloed van die vorms se kante op die vorming en gedrag van kroke te verwyder, soos aanbeveel deur ASTM C1579 (2013).



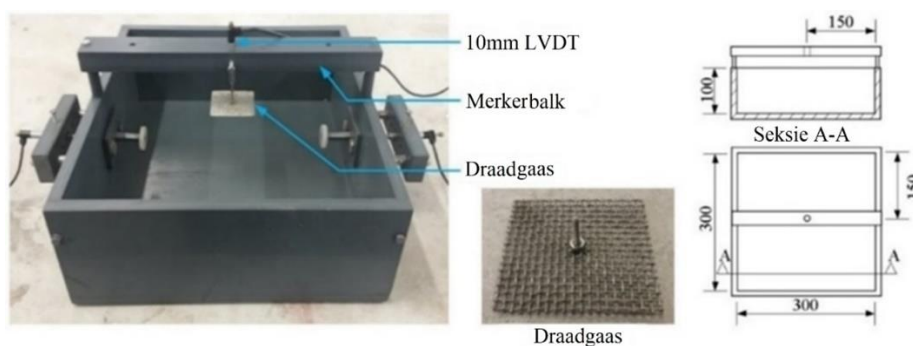
*Figuur 3.3: Kraakarea-afmetings*

Die metingsraam is dan gebruik om vasgekettingde 10 mm-lynsegmente, wat die kraak volg, te skets. Hierdie is gedoen op die finale foto van die reeks, aangesien dit die finale kraakpatroon wat gemeet is bevat. Daarna is 'n lyn loodreg op die middel van elke 10 mm-segment geskets. Hierdie lyne is gebruik om die wydte van die kraak in elke segment te meet.

Hierdie waarde is vermenigvuldig met die lengte van die lynsegment, gewoonlik 10 mm, maar mag varieer op die laaste segment soos aangedui in Figuur 3.3. Die som van hierdie waardes stel die kraakarea van 'n gegewe monster op 'n gegewe periode voor. Hierdie metingsraam word gekopieer op die oorblywende foto's van die reeks om te verseker dat dieselfde area vergelyk word. Die metode is herhaal vir elke reeks foto's waarna 'n gemiddelde vir elke periode bereken is.

### 3.2.2. Volumetriese verandering

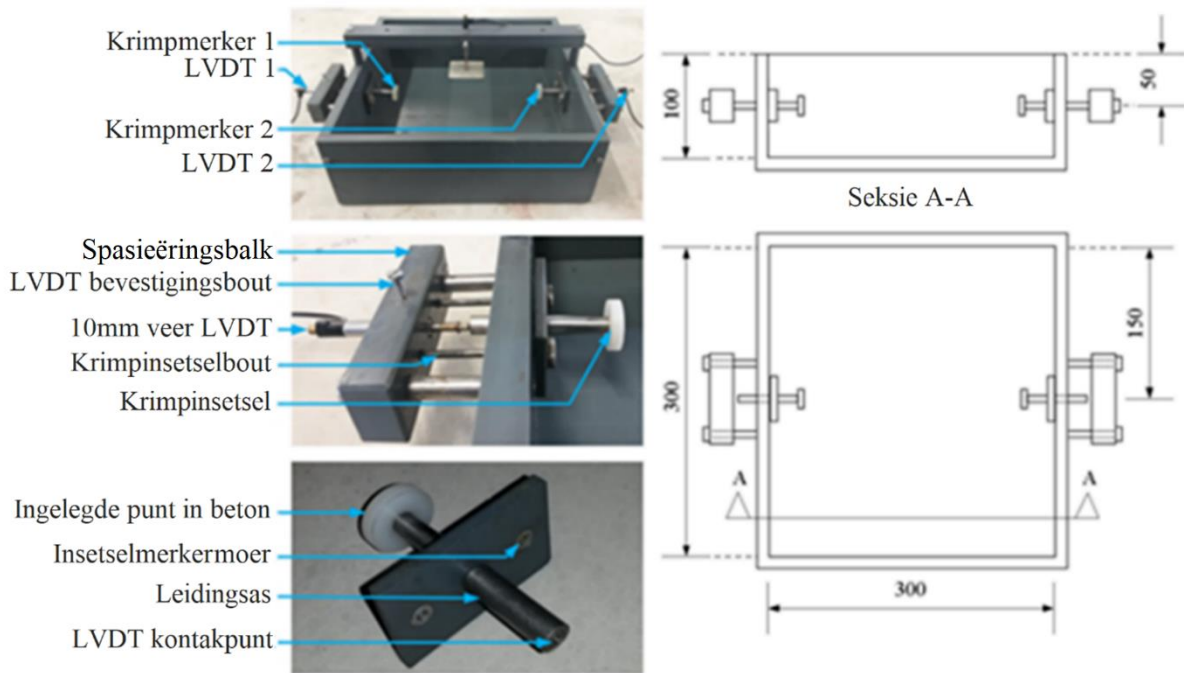
Die volumetriese verandering van die monster, naamlik die krimp en versakking, is verkry deur gebruik te maak van die krimpvorm, naamlik 'n 300 x 300 x 100 mm-vorm soos aangetoon in Figuur 3.4. Hierdie vorm is opgestel met drie linêre veranderlike verplasingsoordraers (LVDT's). Twee van hierdie LVDT's is horisontaal geplaas om die krimp van die monster te meet en een is vertikaal geplaas om die versakking te meet (Slowik, Schlattner & Klink, 2004).



Figuur 3.4: Versakkingsopstelling van die krimpvorm (Le Roux, 2014)

Die versakking van die monster is gemeet deur 'n vertikale LVDT toe te rus met 'n draadgaas, soos aangedui in Figuur 3.4 en Figuur 3.5. Die draadgaas laat die bloeiwater toe om te penetreer wat sodoende die ware oppervlaktiepte meetbaar maak, aangesien die LVDT nie styg of val met die verandering van die watervlak nie. Die waardes gemeet deur hierdie LVDT word gedefinieer as die versakking van die monster, tog sluit die waarde ook 3D-krimp in as gevolg van verdamping soos bespreek in Hoofstuk 2.2. In hierdie studie is die bykomende krimp by die versakkingswaarde gevoeg (Powers, 1968; Mehta & Monteiro, 2006).

Die spasieëringsbalk is so ontwerp om die LVDT toe te laat om aan die insetsel te heg, met behulp van 'n veeropstelling wat die vertikale krimp van die monster meet. Die balk verseker dat die LVDT horisontaal bly. Die insetsel waaraan die LVDT deur middel van 'n veeropstelling geheg is, word in die beton ingelê en volg die krimp wat die monster ondergaan.



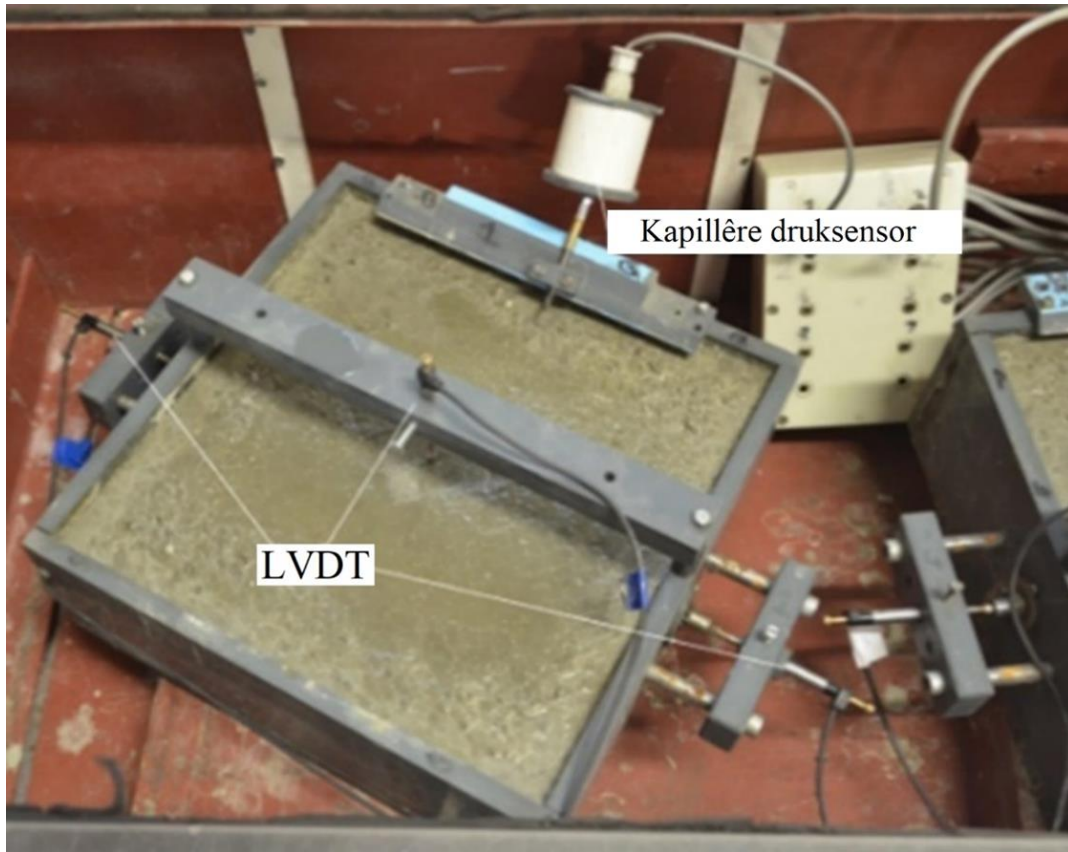
Figuur 3.5: Krimpstelling van die krimpform (Le Roux, 2014)

### 3.2.3. Kapillêre druk

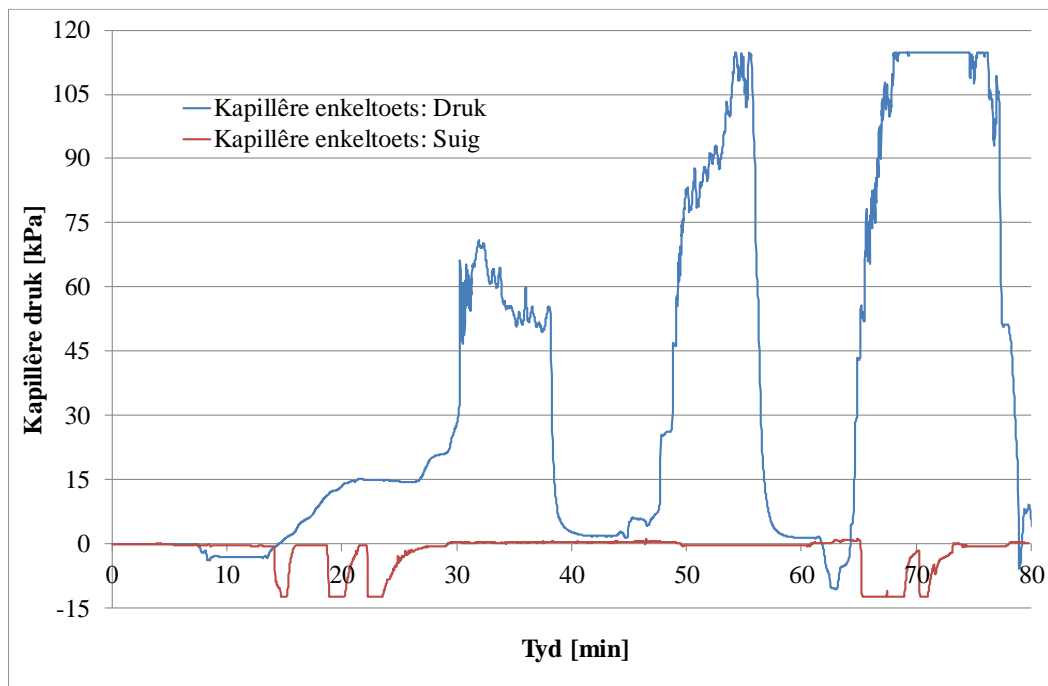
Die kapillêre druk is ook in die krimpform getoets, soos aangedui in Figuur 3.6. Die opstelling bestaan uit die kapillêre druksensor wat aan 'n koperbuisie geheg is en presies lank genoeg is om te verseker dat die buis se opening 50 mm vanaf die beton se oppervlak is. Deur van bou te maak, is hierdie buisie in plek gehou deur 'n klein rakkie wat vas gebout is op die vorm.

Die sensor is aangekoop om negatiewe druk, veroorsaak deur die suigkrag van die meniskusse, te meet (Powers, 1968; Emeritus, 1990; Combrinck, 2016). Ongelukkig is die sensors met nuwe sensors vervang vóórdat hierdie studie begin is, en die nuwe sensors is drukkragssensors wat 'n hoër positiewe lesing, maar laer negatiewe lesing meet, soos aangedui in Figuur 3.7.

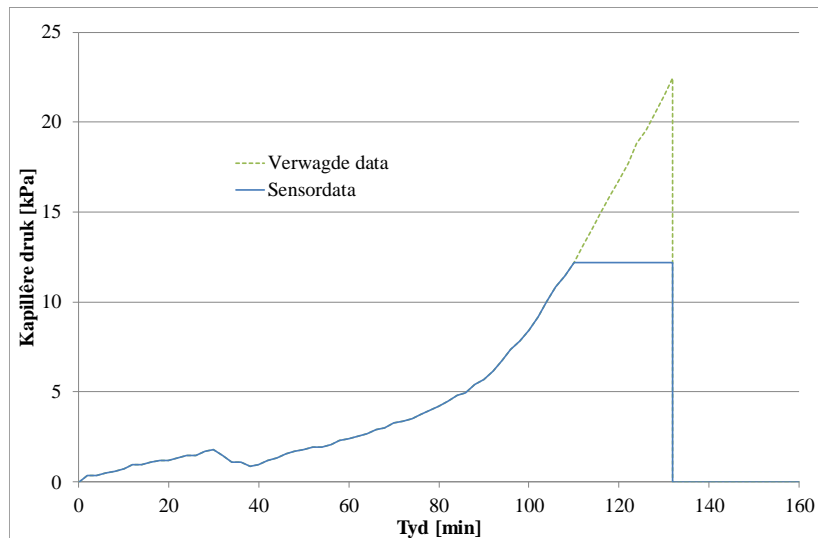
Die sensors is getoets en daar is bevind dat die maksimum suig- of trekkrags wat die sensors kan meet ongeveer 13 kPa is, waar die drukkapasiteit ongeveer 125 kPa is. Die trekkragskapasiteit is dus laer as die verwagte waardes wat maklik groter as 20 kPa kan wees, soos aangedui in Figuur 3.8. Die verlies van hierdie data is ongewens, maar bied steeds voldoende data aangesien die ontwikkeling en aanvanklike groeitempo van die kapillêre ontwikkeling in die beskikbare datareeks val en dit aansienlik belangriker is as die maksimum druk wat bereik kan word (Slowik, Schmidt & Fritsch, 2008).



*Figuur 3.6: Kapillêre druksensor-opstelling op die krimpvorm*

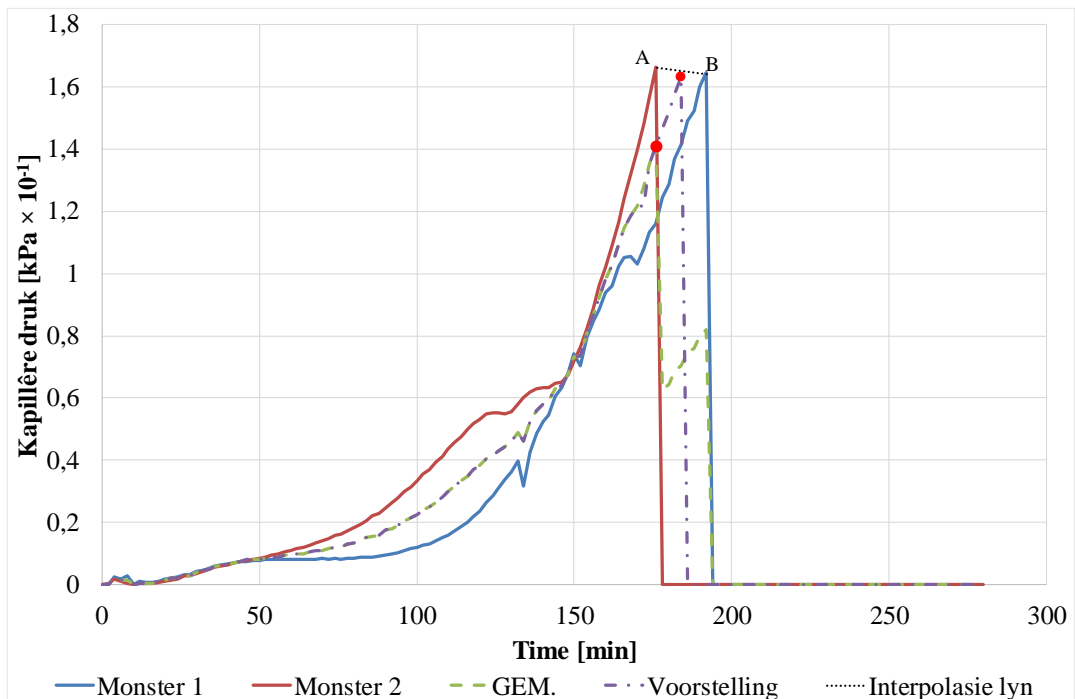


*Figuur 3.7: Kapillêre druksensortoetsing*



Figuur 3.8: Verwagde kapillêre data vergelyk met die sensordata

Die verteenwoordigende kapillêre druk van 'n monster vanaf meer as een toets, kan nie bereken word deur slegs gebruik te maak van 'n gemiddeld nie, aangesien die lugpenetrasietye vir elke toets varieer. Die verteenwoordigende kapillêre druk is dus eerder bereken vanaf 'n kombinasie van die gemiddelde en 'n interpolasie funksie. Die gemiddeld van die twee grafieke is gebruik tot die punt waar lug die eerste monster penetreer. Daarna is hierdie punt aangeheg aan die middel van die interpolasie funksie wat so opgestel is om die twee pieke te verbind, naamlik punt A en B. Hierdie verteenwoordigende funksie is dan na nul gestel om die lugpenetrasie voor te stel. Die proses word aangedui in Figuur 3.9.

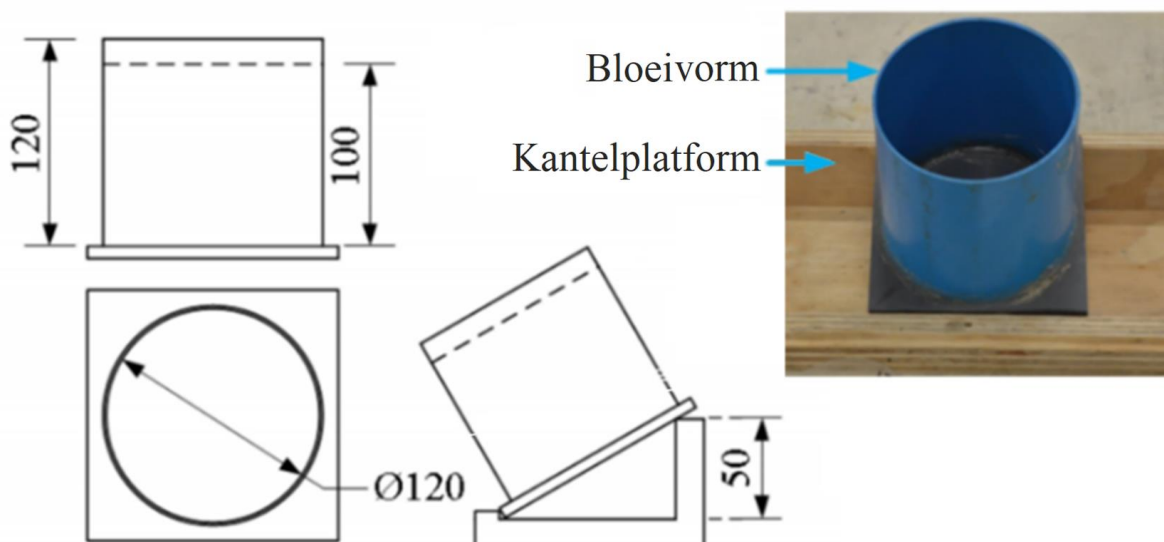


Figuur 3.9: Verteenwoordigende funksie van die kapillêre druk



### 3.2.4. Bloei

Die bloeihoeveelheid en tempo van 'n monster is bereken deur die gewig van water wat vanuit die bloeivorm onttrek is, te meet, soos aangedui in Figuur 3.10. Die water is onttrek deur die vorm te kantel volgens regulasie ASTM C232 (2004). Die hoeveelheid en tempo is gemeet as 'n kumulatiewe massa van die onttrekte water.



Figuur 3.10: Bloeivorm en -toerusting

Die vorm is omtrent 100 mm gevul, vibreer en bedek met plastiek wat in plek gehou word met 'n rekkie om sodoende die verdamping te minimaliseer, soos aangedui in Figuur 3.11. Tog voorkom die plastiek nie die verdamping nie, aangesien dit verwyder moet word om die bloeiwater te onttrek en word daarna weer teruggeplaas oor die monster. Daar word dus gebruik gemaak van 'n wiskundige berekening wat 'n regstelling bied vir die massaverlies, soos aangedui in Vergelyking 3 (Josserand & de Larrard, 2004; Kwak & Ha, 2008; Ghourchian, Wyrzykowski & Lura, 2016).

$$m_{\text{ware bloei}} = m_{\text{bloei gemeet}} + (m_{\text{monster na op } T(i-1)} - m_{\text{monster voor op } T(i)}) \quad \text{Vergelyking 3}$$

Waar:

$m_{\text{ware bloei}}$  = Ware massa van die bloeiwater [g]

$m_{\text{bloei gemeet}}$  = Massa van bloeiwater gemeet [g]

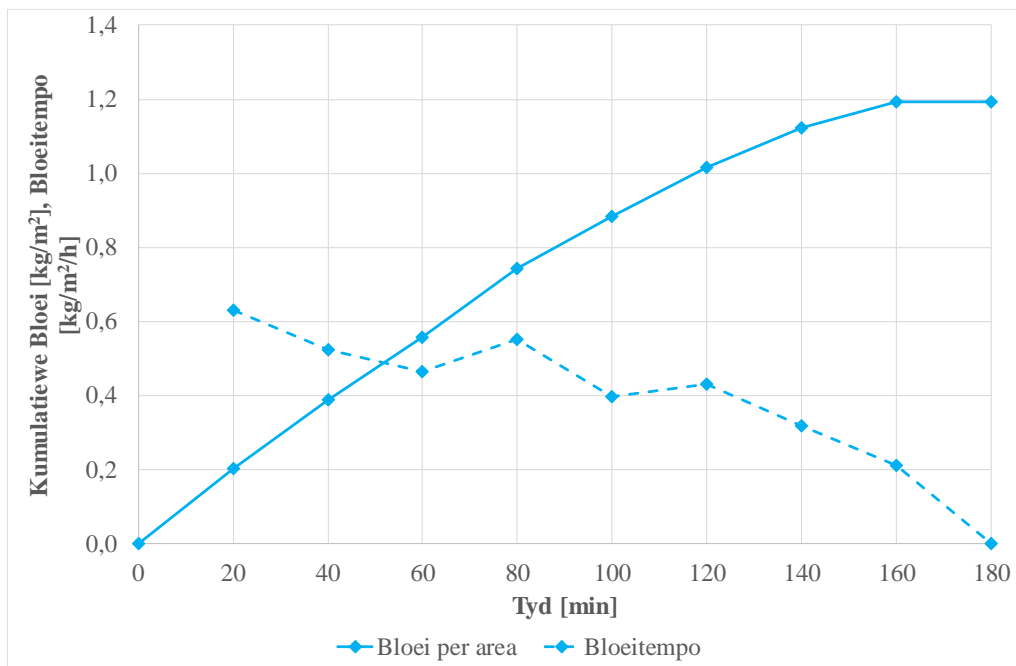
$m_{\text{monster na op } T(i-1)}$  = Massa van die monster nadat bloeiwater verwyder is op die vorige tyd [g]

$m_{\text{monster voor op } T(i)}$  = Massa van die monster voor bloeiwater is verwyder op 'n gegewe tyd [g]



Figuur 3.11: Bloeivormbedekkings

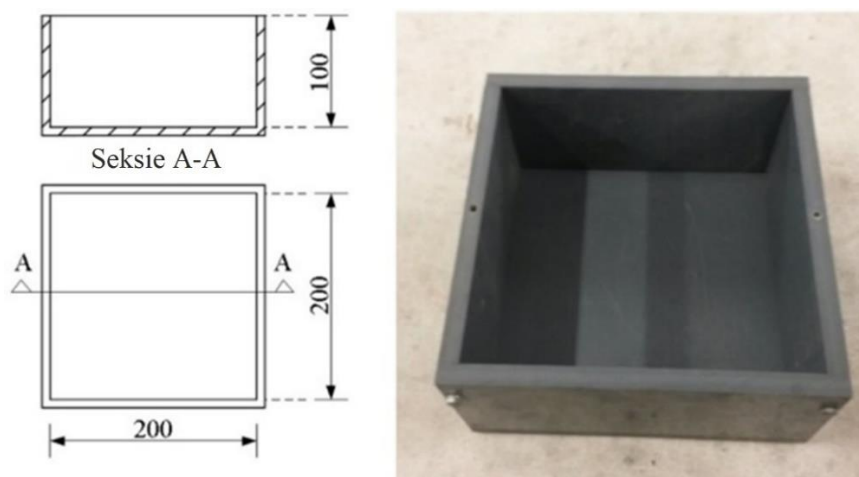
Die regestelde waarde is dan kumulatief opgetel om die hoeveelheid bloei te bereken, dan deur die tyd gedeel om die bloeitempo van die monster te bepaal soos aangedui in Figuur 3.12. Die bloei van 'n monster word beïnvloed deur verskeie prosesse, insluitende die herabsorpsie van die bloeiwater en die verdamping. Die bloei van die monster is dus in dieselfde omstandighede gemeet as dié gebruik om die monsters te toets, naamlik deur die monsters in die klimaatboks te toets soos bespreek in Hoofstuk 3.3 (Josserand & de Larrard, 2004; Kwak & Ha, 2008; Ghourchian, Wyrzykowski & Lura, 2016).



Figuur 3.12: Verwagte bloeigedrag

### 3.2.5. Verdamping van standaardeenhede

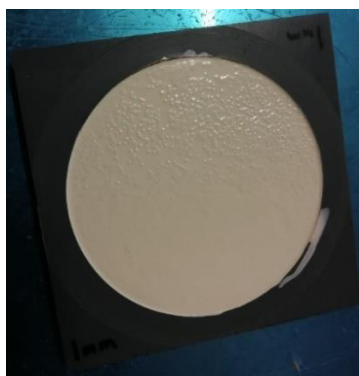
Die verdamping van 'n monster is gemeet deur 'n  $200 \times 200 \times 100$  mm-vorm met beton te vul, in die klimaatboks te plaas en die verlies van massa in 20 minuut-intervalle te meet (Figuur 3.13). 'n Skaal met 'n kapasiteit van 15 kg en 'n resolusie van 0.1 g is gebruik om te verseker dat akurate lesings geneem word.



Figuur 3.13: Verdampingsvorm

### 3.2.6. Verdamping van kuringsmiddels

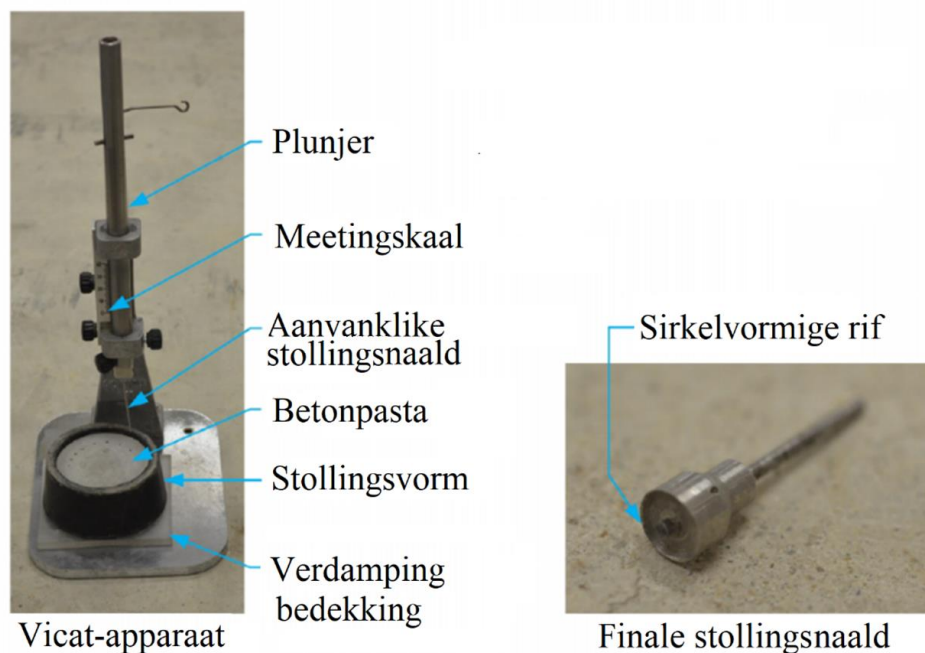
Die verdamping van 'n monster wat met die kuringsmiddels gekuur is, is ook ondersoek. Dit was egter baie kompleks weens die interaksie tussen die water, beton en die gegewe kuringsmiddel, tesame met die verlies van massa gedurende die vorming van die beskermingslaag. 'n Nuwe vorm is dus ontwerp (Figuur 3.14). Die vorm is gemaak uit polimeriserende vinielchloried (PVC) met 'n oppervlak van ongeveer  $0.04 \text{ m}^2$  wat 1 mm diep gesink is. Hierdie 1 mm-diep vorm is gevul met 'n gegewe kuringsmiddel en in die klimaatboks geplaas om die verlies van massa te ondersoek sonder die invloed van water of betonpasta.



Figuur 3.14: Verdamping van kuringsmiddel

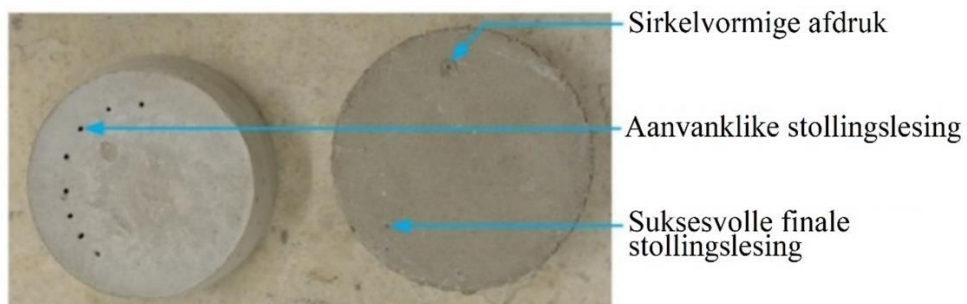
### 3.2.7. Stollingstye

Die faseverandering vanaf 'n vloeistof na 'n vaste stof word gereeld na verwys as die stolling van beton. Die stollingstye word verdeel deur twee punte, naamlik die aanvanklike en finale stolling soos aangedui in Figuur 2.1. Hierdie punte kan bepaal word deur gebruik te maak van 'n Vicat-penetrasie-aparaat soos aangedui in Figuur 3.15. Die Vicat is opgestel met 'n aanvanklike stollingsnaald wat onder sy eie gewig vanaf die oppervlak laat val word in 20 minuut-intervalle. Aanvanklike stolling word bereik wanneer die naald  $6 \pm 3$  mm vanaf die boom van die vorm stop (SANS 50196-3, 2006; McCarter *et al.*, 2012).



Figuur 3.15: Vicat-penetrasie-opstelling

Daarna is die monster omgekeer en die aanvanklike stollingsnaald vervang met die finale stollingsnaald wat op soortgelyke wyse in 20 minuut-intervalle vanaf die oppervlak laat val is. Die finale stolling is bereik wanneer die buitenste ring nie meer 'n merk op die monster laat nie, sien Figuur 3.16 (SANS 50196-3, 2006; McCarter *et al.*, 2012).

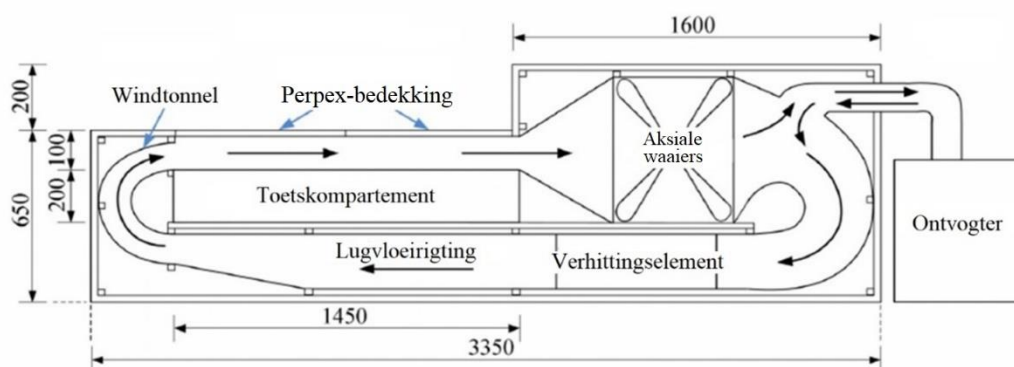


Figuur 3.16: Stollingstye monster

Tog word hierdie tye slegs gebruik as aanduidings van die verandering vanaf 'n vloeistof na 'n vaste stof en is slegs 'n suggestie aangesien dit nie die fase van die chemiese reaksie of sterkte van die beton voorstel nie (SANS 50196-3, 2006; McCarter *et al.*, 2012).

### 3.3. Toetsomstandighede

Dit is hoogs waarskynlik dat plastiese krake sal vorm in omstandighede met uiterste hitte, lae humiditeit en hoë windspoed (Powers, 1968; Combrinck, 2016). Deur hierdie omstandighede te beheer is dit moontlik om 'n ideale omgewing te skep vir die vorming van plastiese krake ten einde verskillende meng en kuringsmetodes te vergelyk. Vir hierdie doel is 'n klimaatboks gebruik wat spesiaal ontwerp is om hierdie ideale omgewing te skep. (Figuur 3.17) (Combrinck, 2012; Khan, 2018).



Figuur 3.17: Klimaatboksuitleg (Combrinck, 2016)

Die ideale klimaat vir die vorming van plastiese krake word bepaal deur die hoeveelheid vog wat verloor word vanweë verdamping, naamlik 'n tempo van  $1 \text{ kg/m}^2/\text{h}$  of meer (Uno, 1998). Hierdie tempo van verdamping is bereik deur 'n  $40^\circ\text{C}$  lugtemperatuur,  $23^\circ\text{C}$  betontemperatuur, 10% relatiewe humiditeit en 'n windspoed van  $6.25 \text{ m/s}$ -opstelling, soos voorgestel in Vergelyking 1. Meer inligting oor die klimaatboks kan elders gevind word (Combrinck, 2016).

### 3.4. Mengprosedures

Al die bestandele wat gebruik is gedurende toetsing is vir ten minste 24 uur voor toetsing in 'n klimaatbeheerde kamer geplaas, teen 23°C, 65% relatiewe humiditeit en geen windspoed nie. Dit is gedoen om die natuurlike wisseling in temperatuur, veroorsaak deur weersomstandighede, te vermy (Powers, 1968; Emeritus, 1990).

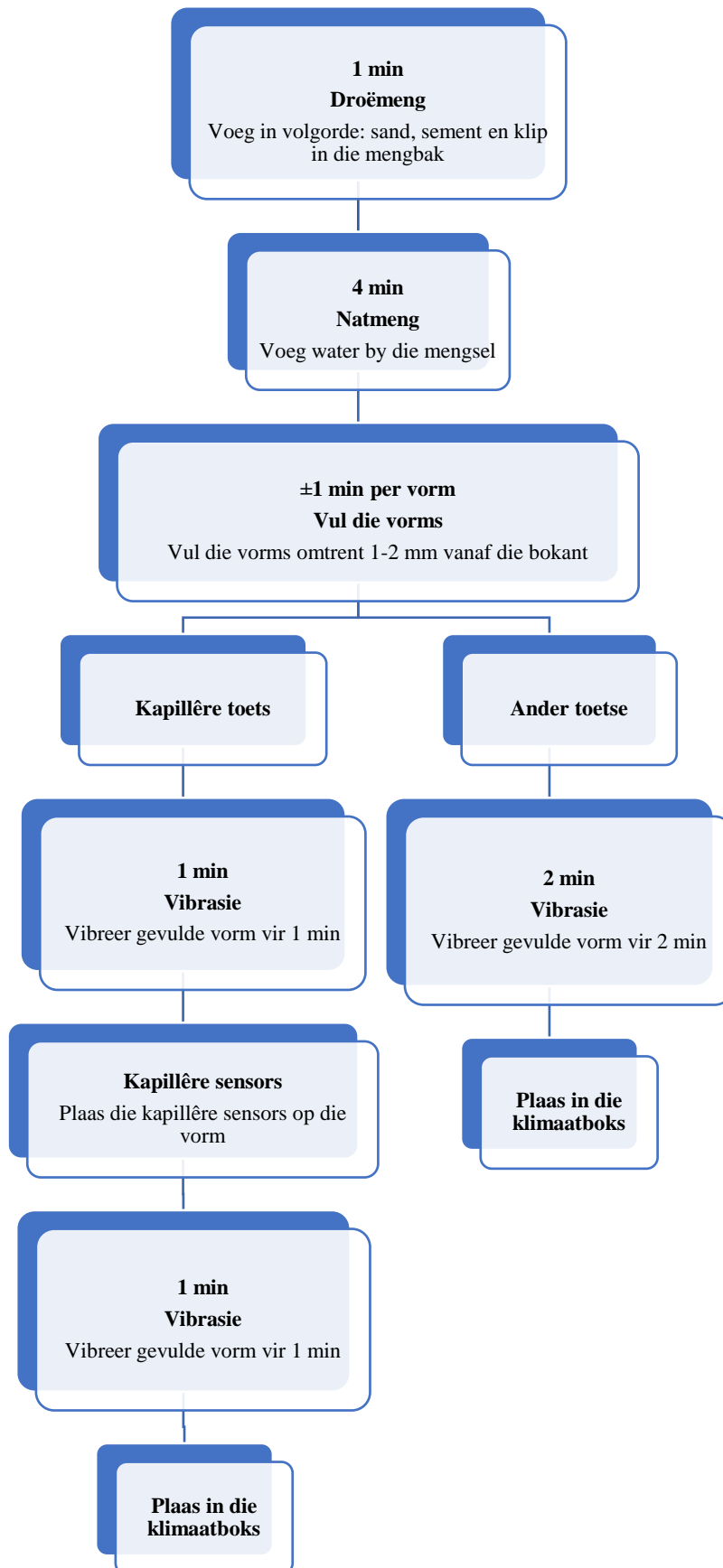
Op die dag van toetsing is die bestandele vanuit die klimaatkamer verwyder en in 'n 50 liter-panmenger gemeng. Vir elke toets is die panmenger op dieselfde wyse skoon- en drooggemaak. Die tyd tussen die verwydering vanuit die klimaatkamer is tot 'n minimum beperk om die bestandele se temperatuurverandering, vanweë blootstelling aan die omgewing, so ver as moontlik te verlaag. So ook is die mengtoerusting drooggemaak om variasie van waterhoeveelhede te voorkom.

Die mengproses, soos aangedui in Figuur 3.18, begin deur die droë bestandele in die pan te gooi in volgorde: sand, sement en klip. Die droë bestandele word vir een minuut gemeng om 'n homogeniese droë-materiaal te verkry. Dan is die water bygevoeg en word die mengsel vir 'n verdere minute gemeng.

Daarna is die mengsel in die gegewe vorm geskep en vir twee minute aaneen vir alle vorms gevibreer, behalwe vir die kapillêre vorm. Die kapillêre vorms is tweederdes gevul; vir 'n minuut gevibreer; die sensor is opgestel; die vorm is daarna heeltemal gevul en vir nog 'n verdere minuut vibreer. Hierdie proses is gevolg om te verseker dat die water in die sensor se buis in kontak kom met die poriewater, maar dat dit nie gedurende die opstelling lek nie.

Gedurende die vibrasie is die vorms tot ongeveer 1 mm van die bokant met die mengsel gevul. Die gevulde vibreerde vorms is dan in die klimaatboks geplaas. Die nodige gereedskap, soos die kapillêre kables of LVDT's, is gekoppel soos verduidelik in Hoofstuk 3.6.

Nadat al die sensors gekoppel is, is die "nul tyd" of begin van lesings gedefinieer en vir alle toetse geneem. Die proses vandat die water bygevoeg is tot die "nul tyd" was konstant ongeveer 10 minute vir alle toetse.



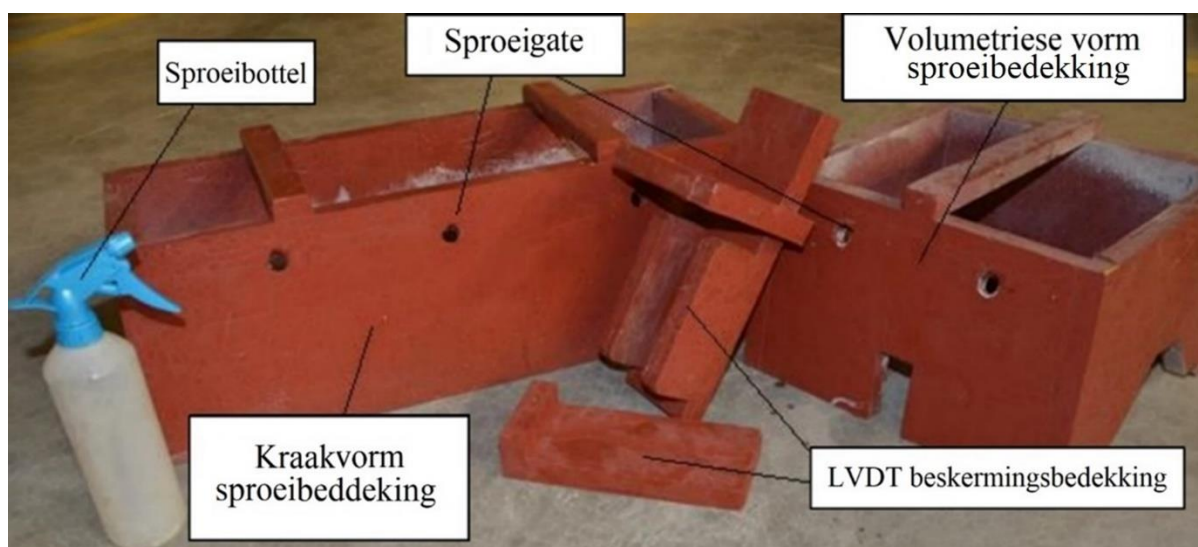
Figuur 3.18: Mengprosedure

### 3.5. Kuringstoepassing en skedulering

Hierdie studie fokus op vloeibare kuringsmiddels wat toegepas word op die monster se oppervlak. Dit kan bereik word deur die gegewe middel in die lug bo die monster te spuit. Die metode laat toe dat die vloeistof onder sy eie gewig neerdaal wat die moontlikheid van skade aan die oppervlak voorkom en die vloeistof oor die oppervlak egalig versprei (Kosmatka & Wilson, 2002; Cement concrete & aggregate Australia, 2006; Chryso, 2019).

#### 3.5.1. Kuringstoepassing

Kuringstoepassing word deur die wind in die klimaatboks benadeel soos beskryf in hoofstuk 3.2. 'n Bedekking is dus ontwerp en gebruik om gedurende die toepassing van die kuringsmiddel die wind oor die spesifieke monster af te baken. Die bedekkers, aangedui in Figuur 3.19, het besproeiingsgate wat teen 'n hoek van ongeveer 60° geboor is. Sodoende voorkom die gate dat die sproei van die vloeistof direk op die oppervlak gesproei word en moontlik die oppervlak beskadig. Die hoogte van die bedekking is so ontwerp om die hoogte van die klimaatboks te oorskry, wat dus keer dat die wind bo-oor die bedekking invloei.



*Figuur 3.19: Kuringstoepassingsgereedskap*

Die betongevulde vorms is bedek en gesproei met die gewenste hoeveelheid kuringsvloeistof op die gewenste tyd deur die vorm vir ongeveer 30 sekondes elk te bedek. Groot sorg is geneem om te verseker dat 'n ekwivalente hoeveelheid tyd vir elke monster gebruik word om toe te laat dat die vog egalig en konsekwent op elke monster neersak (Kosmatka & Wilson, 2002; Cement concrete & aggregate Australia, 2006).



### 3.5.2. Kuringshoeveelhede

Dit word vermoed dat kuring beïnvloed word deur die hoeveelheid wat gebruik word, dus is dit nodig om hierdie aspek te beheer en te reguleer. Die hoeveelheid kuringswater gebruik, word bereken vanaf die tempo van verdamping wat die monster ondergaan en word gedefinieer as die hoeveelheid of tyd wat die monster beskerm word. Die hoeveelheid is gemeet as 'n hoogte aangesien die oppervlak wat beskerm moet word heeltemal bedek moet wees. Die hoeveelheid kuring hang dus nie af van die area nie, solank die hele area bedek word. Hierdie hoeveelheid word bereken soos aangedui in Vergelyking 4 (Kosmatka & Wilson, 2002; Cement concrete & aggregate Australia, 2006).

$$h_{kv} = \frac{Verd_{toeg} \times A_{besk} \times t_{besk}}{\rho_{kv} \times A_{kv}} \quad \text{Vergelyking 4}$$

Waar:

$h_{kv}$  = Hoogte van die kuringsvloeistof [ $m$ ]

$Verd_{toeg}$  = Verdampingstempo [ $kg/m^2/h$ ]

$A_{besk}$  = Area om te beskerm [ $m^2$ ]

$t_{besk}$  = Tyd om te beskerm [ $h$ ]

$\rho_{kv}$  = Digtheid van die kuringsvloeistof [ $kg/m^3$ ]

$A_{kv}$  = Area bedek met die kuringsvloeistof [ $m^2$ ]

Dit moet in gedagte gehou word dat die vloeistof wat toegepas is nie die gegewe hoeveelheid beskerming bied nie, aangesien daar steeds verlies van water plaasvind wat te moeilik is om in ag te neem. Hierdie verlies sluit onder andere in: die vog wat weggeblaas is nadat die bedekkings verwyder is; die vog wat op die vorm se kant geval het; die vog wat deur die vorm geabsorbeer is. Die hoeveelheid van 1 mm kuringswater bied ongeveer een uur se beskerming, dus is dit gebruik as 'n basis vir die kuringhoeveelheid vir die eksperimentele toetsing.

Om te verseker dat 'n akurate hoeveelheid waterkuring toegepas word op die monster, is die beskermingshoeveelheid omgeskakel na 'n massa. Hierdie massa is bereken soos aangedui in Vergelyking 5 en is ongeveer 90 g vir een uur se beskerming.

$$m_{water} = A_{beskerming} \times h_{beskerming} \times \rho_{water} \quad \text{Vergelyking 5}$$

Waar:

$m_{\text{water}}$  = Massa van water gebruik vir kuring [g]

$A_{\text{beskerming}}$  = Area wat beskerm moet word [ $m^2$ ]

$h_{\text{beskerming}}$  = Hoeveelheid beskerming [mm]

$\rho_{\text{water}}$  = Digtheid van water [ $kg/m^3$ ]

Drie tipes kuringsmiddels is ook in die studie ondersoek, naamlik 'n wit gepigmenteerde wasemulsie, 'n petroleumharsemulsie en 'n waterbasisakrielemulsie. Die hoeveelheid kuringsmiddel wat toegepas is, is deur die verskaffer gereguleer aangesien meeste kuringsmiddels 'n laag vorm wat die beton bedek met 'n spesifieke hoeveelheid vloeistof. Die kuring is dus nie meer daarop gemik om die beskikbare water aan te vul nie, maar eerder om te voorkom dat die water verwyder word. Die verskaffers stel 'n besproeiingswaarde van  $0.2 \text{ l/m}^2$  vir al drie van die kuringsmiddels voor (Chryso, 2019).

Al die kuringsmiddels is deur Chryso verskaf. Die wit gepigmenteerde wasemulsie is bekend as Chryso Cure WB en het 'n vae ligte reuk, spesifieke swaartekrag van 0.98 by kamertemperatuur en is gedeeltelik oplosbaar in water. Die petroleumharsemulsie is bekend as Chryso Cure WP en is 'n melkerige wit vloeistof met 'n spesifieke swaartekrag van minder as een en is gedeeltelik oplosbaar in water. Die waterbasisakrielemulsie is bekend as Chryso Cure Acrylic, 'n melkerige pink vloeistof wat oplosbaar is in water (Chryso, 2019).

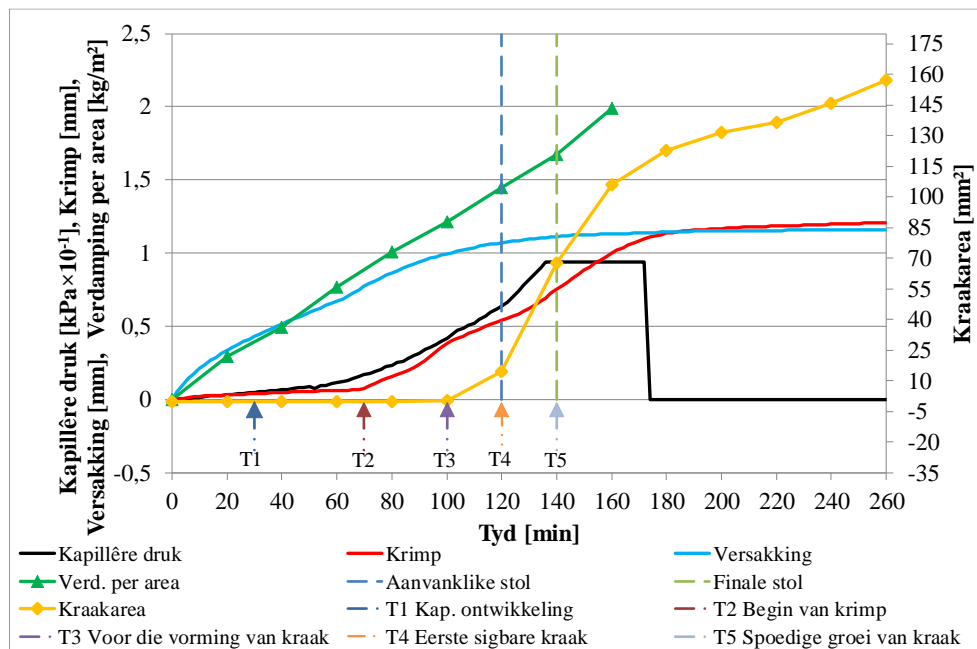
### 3.5.3. Kuringskedulering

Die toegepaste kuring kan verdeel word in twee kategorieë, naamlik waterkuring en kuring deur gebruik te maak van kuringsmiddels, wat verder verdeel kan word volgens die toepassingstye. Waterkuring word verdeel in enkel en veelvuldige toepassing, waar die kuringsmiddels verdeel word volgens die tipe basis, soos bespreek in die volgende afdelings.

#### Enkelwaterkuring

Die gewenste hoeveelheid kuring, soos bespreek in die vorige hoofstuk, is toegepas op verskeie tye. Hierdie tye is verkry vanaf die toets van die betonmengsel waar geen kuring toegepas is nie, soos aangedui in Figuur 3.20. Die figuur wys die resultate vir krimp, versakking, kapillêre druk en kraakontwikkeling van die standaardbetonmengsel, wat regdeur die studie verwys word as die ongekuurde monster. Hierdie resultate word meer breedvoerig bespreek in Hoofstuk 4 en word slegs hier gemeld om die kuringstye aan te dui.

Die eerste toepassing (T1) is oomblikke vóór die begin van die kapillêre drukontwikkeling toegepas. Die tweede (T2) is toegepas nét voor die oorhoofse krimp van die monster plaasgevind het. Die derde toepassing (T3) was voor die begin van kraakvorming. Die vierde toepassing (T4) was op die eerste sigbare kraak rondom die tyd van die aanvanklike stolling. Die finale kuringstoepassing (T5) het plaasgevind gedurende die vinnige kraakgroeiperiode wat relatief naby aan die finale stollingstyd was.



Figuur 3.20: Ongekuurde plastiese krimpkraakgedrag en kuringstye T1-T5

### Veelvuldige waterkuring

Twee veelvuldige kuringstoepassings is ondersoek. Daar is besluit om gedurende die veelvuldige toepassing die krimp van die monster te beperk. Twee metodes is gekies vir die beperking. Die eerste eksperiment was om die monster toe te laat om 5% van die ongekuurde monster se finale krimpwaarde te laat krimp vóór die toepassing van kuring, asook om 5% krimp toe te laat vir die daaropenvolgende toepassing van kuring, naamlik 5%, 10%, 15%, ensovoorts.

Die tweede eksperiment is soortgelyk aan eersgenoemde, maar was daarop gemik om die totale krimp van die monster tot 5% van die ongekuurde monster se finale krimpwaarde te beperk. Die gekose 5%-krimp is bereken vanaf die ongekuurde monster as 0.061 mm wat ongeveer plaasgevind het op 70 minute. Dit stem ooreen met T2. Hierdie metode is meer kompleks as die vorige kuringstoepassings aangesien dit meer toepassings op onbekende en onvoorspelbare tye benodig.

## Kuringsmiddels

Die gekose kuringsmiddels is toegepas soos voorgeskryf deur die verskaffer. Die was- en petroleumgebaseerde middels is met die giet van die monster toegepas, waar die akriëlgebaseerde middel toegepas is wanneer die betonoppervlak nie meer 'n waterglans bevat nie. Hierdie middels is toegepas op dieselfde wyse as die waterkuring, deur dit op die monster met 'n sproei-bottel te spuit om sodoende te verseker dat die middel egalig oor die monster versprei sonder om die oppervlak te beskadig (Chryso, 2019).

## Kuringstoepassingsopsomming

Tabel 3.2 som die tipe, toepassingstyd en rede vir kuring, sowel as die aanwysings wat vir elke toets gegee is, op. Hierdie aanwysings is vir die res van die studie vir vergelykingsdoeleindes tussen toetse gebruik. Al die toetse gebruik 1 mm water of 0.2 l/m<sup>2</sup> kuringsmiddel. Die kuringsmiddels word genoem in volgorde: 1 – Was, 2 – Petroleum en 3 – Akriël.

Tabel 3.2: Kuringskema en aanwysing

Tipe Kuring	Toepassings-tyd [min]	Toetsmeganisme/toepassingsredes	Kuringshoeveel-hede	Toets-aanwysing
Geen	0	Ongekuurde verwysing	NVT	Ongekuurde
Enkel-water-toepassing	30	Voor kapillêre drukontwikkeling	1 mm	WET1
	70	Begin van krimp	1 mm	WET2
	100	Voor die begin van kraakvorming	1 mm	WET3
	120	Eerste sigbare kraak	1 mm	WET4
	140	Gedurende die vinnige groei van kraak	1 mm	WET5
Veelvuldige water-toepassing	Soos benodig	Laat 'n 5% toename	1 mm	WV5T
	Soos benodig	Beperk die groei van krimp tot 5%	1 mm	WV5B
Kuringsmiddels	0	Na die giet van beton	0.2 l/m <sup>2</sup>	KM1
	0	Na die giet van beton	0.2 l/m <sup>2</sup>	KM2
	80	Verlies van waterglans	0.2 l/m <sup>2</sup>	KM3

### 3.6. Toetshoeveelhede en dataversameling

Om te verseker dat die resultate akkuraat en herhaalbaar is, is daar ten minste vier LVDT-monsters en twee kapillêre monsters getoets vir meeste van die toetse. Vir die ongekuurde monster is daar egter agt monsters getoets, aangesien alle toetse teen die gedrag van die ongekuurde monster gemeet word.

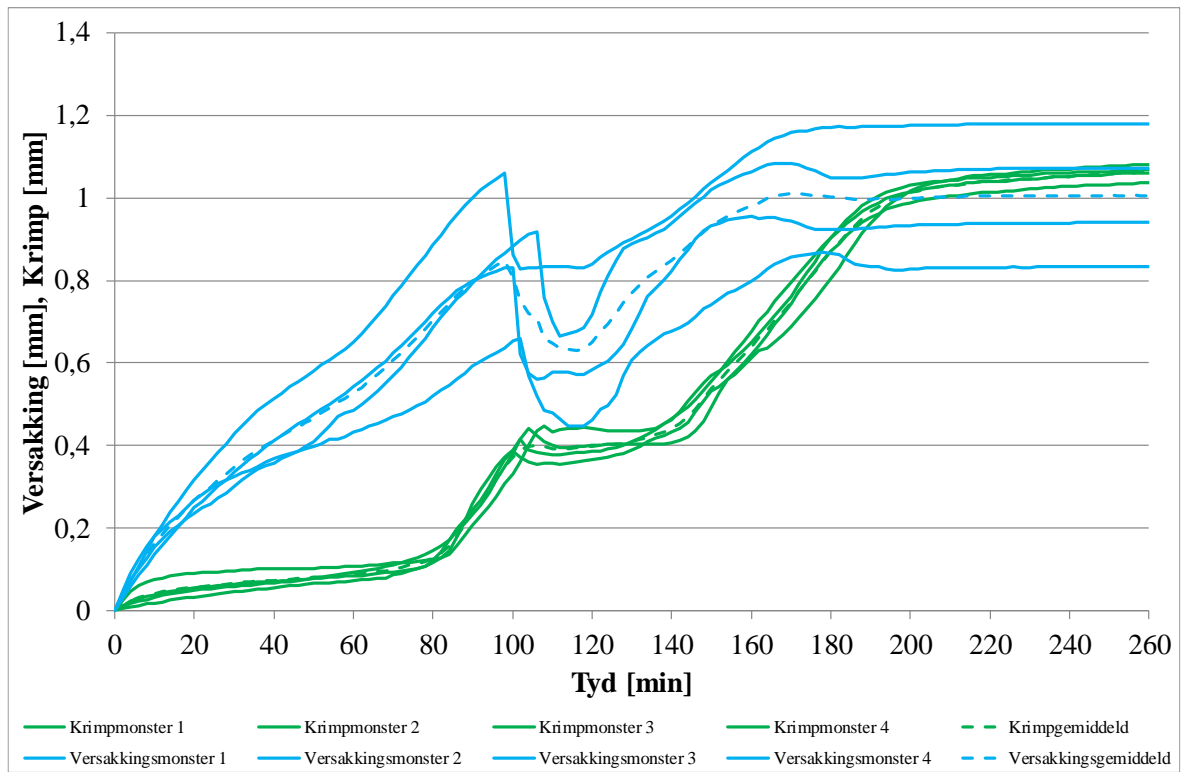
As gevolg van tyd en beperkte materiaal is twee van die toetse beperk na twee monsters, soos aangedui in Tabel 3.3. Die tabel wys ook die hoeveelheid wat getoets is vir al die monsters.

Tabel 3.3: Hoeveelheid toetsmonsters

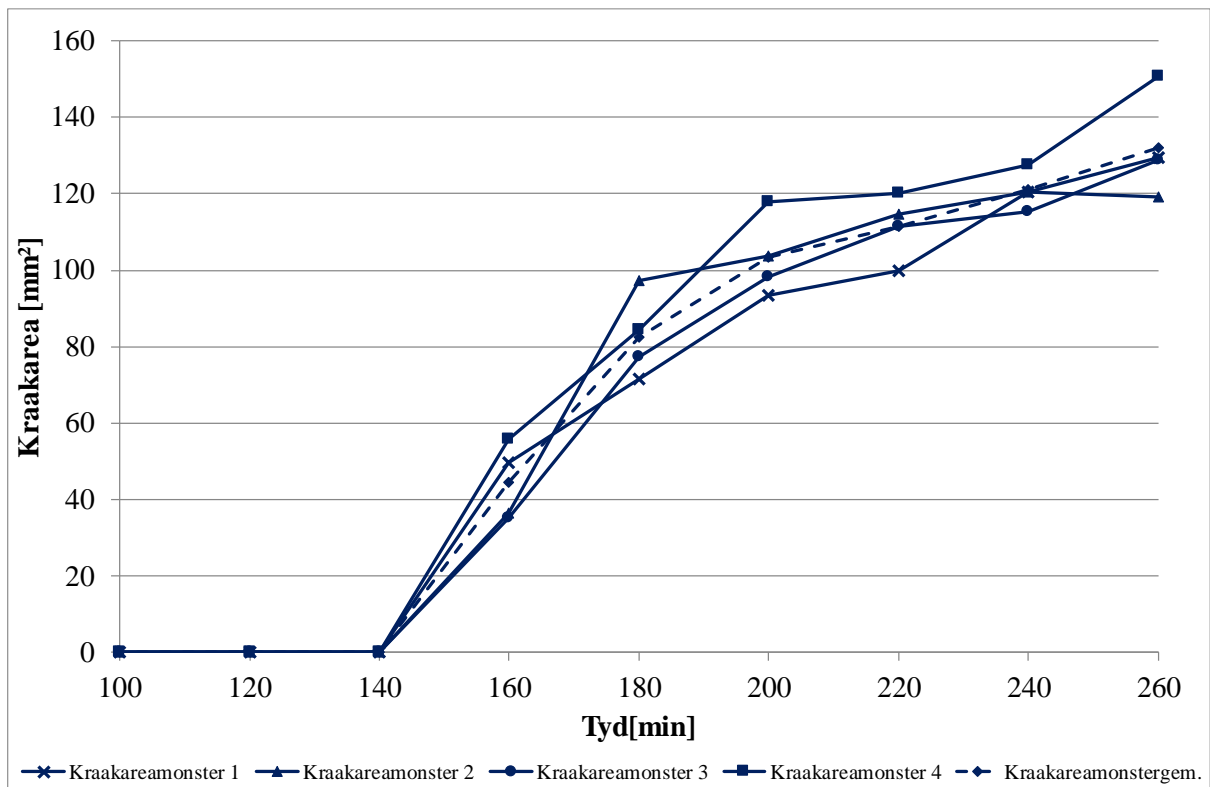
<b>Toetsaanwysing</b>	<b>Hoeveelheid monsters getoets</b>	<b>Toetsaanwysing</b>	<b>Hoeveelheid monsters getoets</b>
Ongekuurde	8	WV5T	2
WET1	4	WV5B	2
WET2	4	KM1	6
WET3	4	KM2	4
WET4	4	KM3	7
WET5	4		

Die data verkry vanaf die LVDT's en die kapillêre sensors is opgeneem deur gebruik te maak van 'n data-opnamesisteam wat aan 'n rekenaar, met die nodige sagteware, gekoppel was. Dit is ontwerp om die dataleser se seine te interpreteer. Die herhaalbaarheid van alle toetse was van 'n aanvaarbare aard en is dus verwerk na 'n gemiddelde voorstelling wat gebruik word vir vergelykingsdoeleindes.

Figuur 3.21 en Figuur 3.22 toon die resultate van vier monsters se algemene krimp, versakking en krake. Hierdie data wys goeie herhaalbaarheid en toon die grootste afwyking by die versakkingsresultate aan (Figuur 3.21). Selfs vir hierdie voorbeelde is die gemiddeld van die vier versakkingsmonsters 'n goeie en aanvaarbare voorstelling van die versakking van beton onder die gegewe kuringstoepassing.



Figuur 3.21: Krimp- en versakkingsverteenvoordigings



Figuur 3.22: Kraakareaverteenvoordiging

## 4. Resultate

Hierdie hoofstuk bespreek die resultate van die eksperimente soos bespreek in die vorige afdeling. Die plastiese krimpgedrag van die ongekuurde monster is ondersoek om die gedrag van die interne eienskappe, soos krimp, versakking en kapillêre druk, gemeet teen die kraakontwikkeling, te verstaan. Daarna is die invloed van enkel en veelvuldige toepassing van waterkuring, asook die gebruik van kuringsmiddels, op tipiese krimpkraakgedrag ondersoek.

### 4.1. Ongekuurde beton

Die plastiese krimpgedrag van die ongekuurde monster, naamlik die toets wat nie gekuur is nie, is ondersoek in terme van krimp, versakking, kapillêre druk en kraakontwikkeling soos aangedui in Figuur 4.1. Die kraak begin ongeveer tussen 100 en 120 min, wat ongeveer 50 minute ná die ontwikkeling van die kapillêre druk en krimp van die monster plaasvind. Daarna gaan die monster in 'n vinnige groeiperiode tussen 120 en 180 minute en stabiliseer kort daarna.

Hierdie gedrag word vererger deur die krimp, versakking en kapillêre druk soos deur Combrinck et al. (2019) bespreek. Die algehele gedrag van hierdie bevindinge staaf dié van ander navorsers (Wittmann, 1975; Cohen, Olek & Dolch, 1989; Krönlof, Leivo & Sipari, 1995; Uno, 1998; Slowik, Schmidt & Fritsch, 2008; Combrinck *et al.*, 2019). Die invloed van hierdie interne eienskappe word in die volgende paragrafe bespreek.

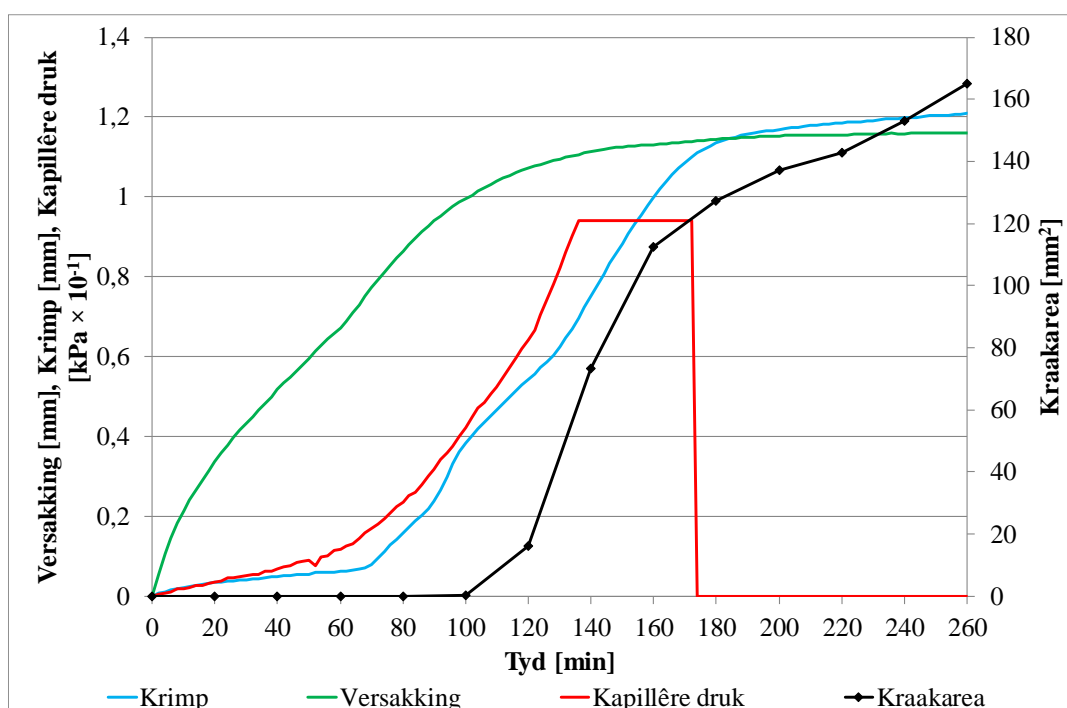
Die versakking van die ongekuurde monster groei stadig oor die eerste 120 minute, stabiliseer daarna en bereik 'n maksimum van 1.16 mm aan die einde van die toets. Die grafiek wys dat die beton vanaf 120 minute tot die einde van die toets slegs 0.06 mm versak. Soos bespreek in Hoofstuk 2.2.1 vind meeste van die versakking plaas wanneer die beton gegiet word en neem gelydelik af soos die beton verander vanaf 'n vloeistof na 'n vaste stof. Dit is gedurende die vloeibare fase wanneer beton die oorhoofse versakking toon (Powers, 1968; McCarter *et al.*, 2012).

In teenstelling met versakking, begin die krimpgedrag rondom 70 minute groei, waarna die monster die vinnige krimpfase ingaan vir ongeveer 120 minute. Hierdie vinnige groei van die krimp gebeur tesame met die vinnige groeiperiode van die kapillêre druk as gevolg van die hoër suigkragte soos bespreek in Hoofstuk 2.1.5. Die finale periode, min of meer vanaf 190 minute, toon 'n soortgelyke gestabiliseerde periode as dié in die finale fase van die versakkingsgedrag (Powers, 1968; Emeritus, 1990).

Die kapillêre druk begin met 'n periode waar baie stadige groei plaasvind en begin eers eksponensieel groei na omtrent 50 minute. Teen ongeveer 135 minute het die sensors hulle kapasiteit bereik en vir 'n verdere 35 minute gehou. Sodoende veroorsaak dit 'n plato wat eindig wanneer lug die monster penetreer en die druk by ongeveer 170 minute breek, soos in Hoofstuk 3.2.3 bespreek.

Dit is belangrik om kennis te neem w nneer die oorhoofse kapillêre druk begin groei, aangesien vorige studies voorstel dat vertraging van kapillêre druk 'n vermindering van kraakvorming toon (Powers, 1968; Schmidt & Slowik, 2009; Combrinck, 2016).

Die eerste sigbare haarnaaldkraak verskyn tussen 100 en 120 minute, waarna verwys kan word as die ontwikkelings- of vormingsperiode. Daarna volg 'n vinnige groeiperiode wat ongeveer 60 minute duur. Rondom 180 minute volg 'n stabilisasieperiode, alhoewel dit steeds 'n groei in kraakarea toon, maar teen 'n drastiese laer tempo as die vinnige groeiperiode. Hierdie stadige groei van die kraakarea is waarskynlik as gevolg van die stabilisering van die krimp en versakking van die monster (Powers, 1968; Khan, 2018).



Figuur 4.1: Ongekuurde betontoetsresultate in terme van krimp, versakking, kapillêre druk en kraakarea

## 4.2. Bloei en verdamping van ongekuurde beton

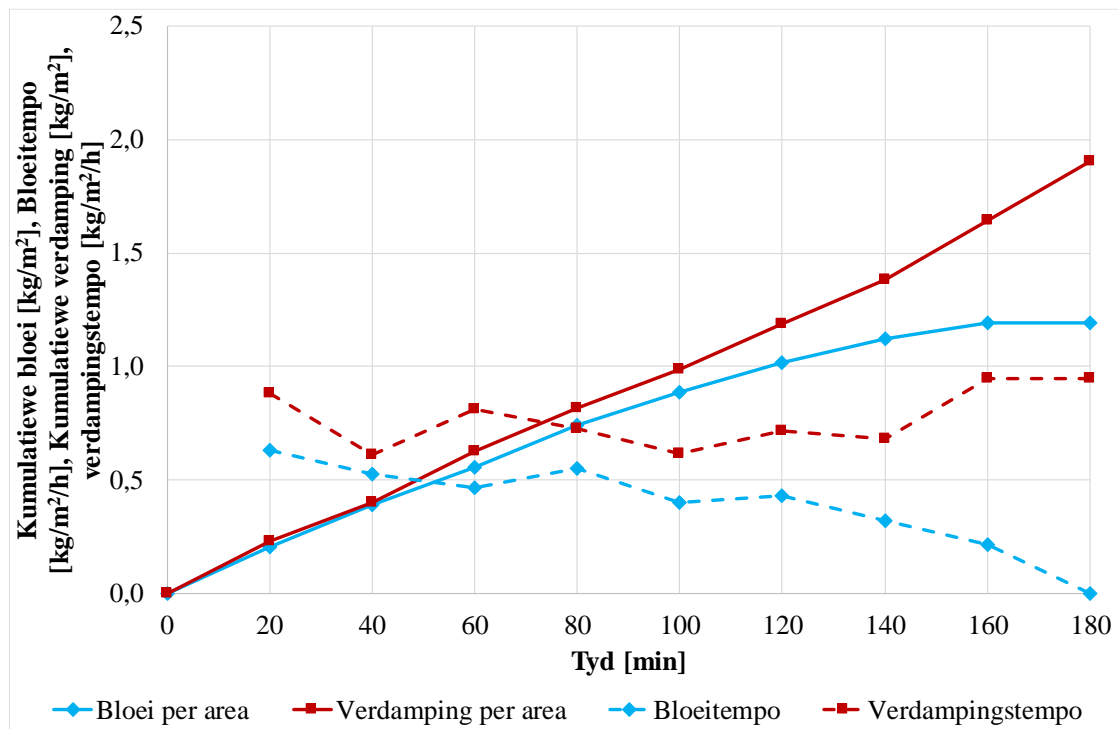
Die hoeveelheid en tempo van bloei en verdamping van die ongekuurde betonmonster word aangedui in Figuur 4.2. Hierdie monster is in die klimaatboks getoets in dieselfde omstandighede as al die ander toetse.



Die hoeveelheid bloei gedurende die eerste 40 minute toon 'n geringe laer waarde as dié van die verdamping. Hierdie verskil groei met tyd na die eerste 40 minute. Die verskil tussen die bloei en verdamping dui aan dat die vorming van krake hoogs waarskynlik is. Dit word bevestig deur die gedrag van die kraakontwikkeling soos aangedui in Figuur 4.1.

Die vermindering van die monster se hoeveelheid bloei oor die verloop van tyd, is weens die vermindering van die versakking wat die water na die oppervlak verplaas het. Die verdamping bly relatief konstant soos meer poriewater vanuit die betonmonster onttrek word.

Die bloeitempo toon 'n duidelike vermindering en wys hoe dit oor tyd verminder en na 180 minute nul bereik. Die verdampingstempo verminder ook soos die beton verhard, maar het nie in die eerste drie ure vir die gegewe meng, in die gegewe omstandighede, plaasgevind nie (Josserand & de Larrard, 2004; ACI 305.1-06, 2007; Combrinck, 2012; Yim *et al.*, 2013).



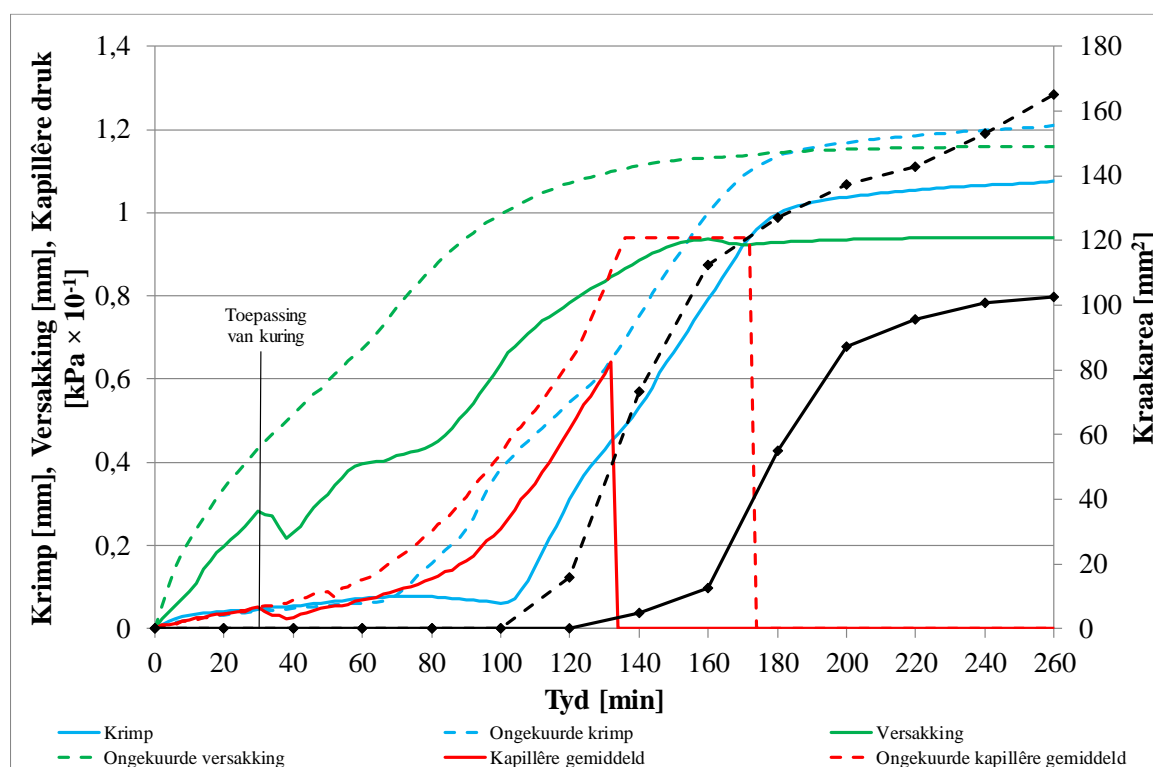
Figuur 4.2: Die bloei vergelyk met die verdamping van die ongekuurde monster

Figuur 4.2 wys ook dat die kumulatiewe hoeveelheid verdamping na afloop van 40 minute dié van die bloei oorskry. Dit kan gedefinieer word as die uitdroogtyd. Die uitdroogtyd dui die begin of moontlikheid van kapillêre ontwikkeling aan, soos bevestig word deur die resultate in Figuur 4.1. Dit wys dat oorhoofse kapillêre drukontwikkeling plaasvind net nadat die uitdroogtyd bereik is, ongeveer 50 minute vanaf die begin van die toets.

### 4.3. Enkelwaterkuring

Waterkuring is toegepas op vyf unieke tye soos bespreek in Tabel 3.2. Die impak van waterkuring op die krimp, versakking, kapillêre poriedruk- en kraakarea-ontwikkeling vir elk van die kuringstye word in Figuur 4.3 tot Figuur 4.7 aangetoon. Hierdie figure wys beide waterkuring asook die ongekuurde monsters vir vergelykingsdoeleindes.

Die eerste toepassing ondersoek die invloed van kapillêre druk voor die beduidende drukontwikkeling veronderstel is om te begin. Die monster is dus op 30 minute met 1 mm water besproei. Figuur 4.3 toon die invloed van waterkuring toegepas vóór die begin van die beduidende kapillêre drukontwikkel. Op hierdie punt toon waterkuring 'n stabilisering en vermindering van beide versakking en kapillêre druk.

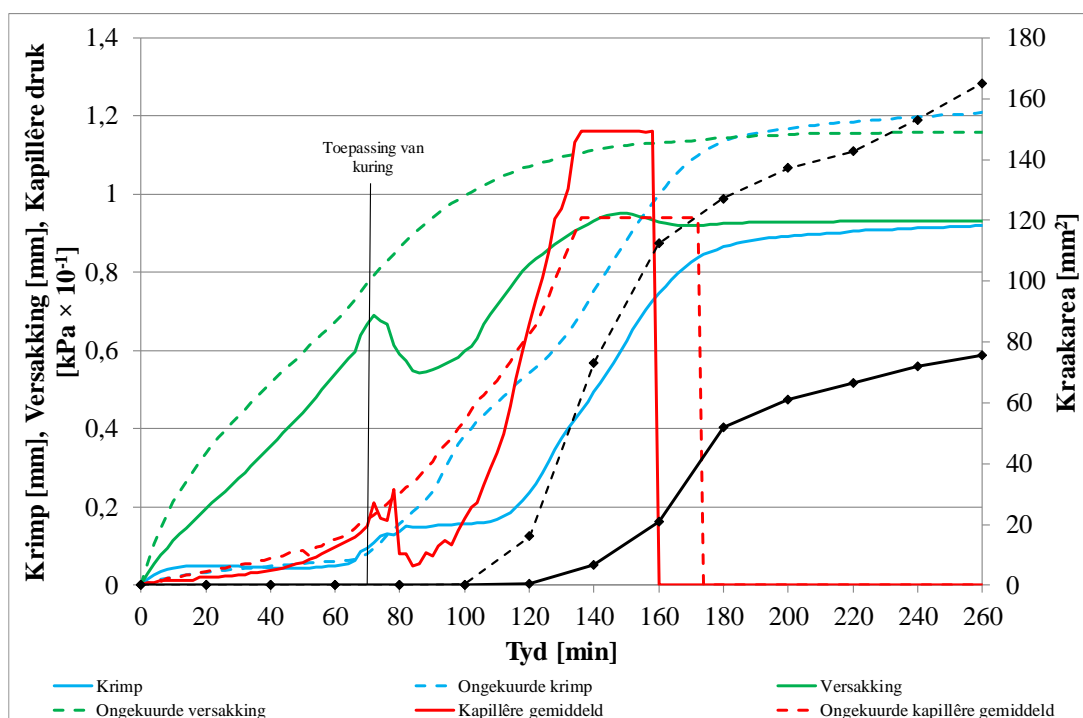


Figuur 4.3: Enkelwaterkuringstoepassing vóór die ontwikkeling van die kapillêre druk (WET1)

Die kapillêre drukgedrag varieer drasties vanaf die ongekuurde monster en wys 'n vertraging van 20 minute ten opsigte van die beduidende kapillêre drukontwikkeling. Die versakking van die gekuurde monster toon soortgelyke gedrag as die ongekuurde monster en varieer na 30 minute as gevolg van die toepassing van kuring, waarna versakking teen dieselfde tempo as voor kuringstoepassing groei. Dit lei na 'n laer finale versakkingswaarde in vergelyking met die ongekuurde monster. Die versakking toon dat beton effens swel wanneer kuring toegepas word.

Die versakking van die gekuurde monster toon 'n 30 minuut vertraging van die begin van die beduidende versakking, wat daarna teen 'n soortgelyke tempo as die ongekuurde monster groei. Die finale versakking van die gekuurde monster is effens laer as die ongekuurde monster. Al hierdie vertraging en verminderings weens die kuring, veroorsaak 'n 20 minuut vertraging van die kraakvorming, asook 'n aansienlik laer finale kraakarea van die gekuurde monster, gemeet teenoor die ongekuurde monster.

Hierdie gedrag is soortgelyk vir die tweede monster. Die tweede monster toon die invloed van kuring aan, soos toegepas vóór die beduidende groei van krimp, naamlik op 70 minute (Figuur 4.4). Die monster word aangedui as WET2 soos beskryf in Tabel 3.2.



Figuur 4.4: Enkelwaterkuringstoepassing aan die begin van krimp (WET2)

Hierdie monster, WET2, toon soortgelyke gedrag as WET1, tog is die vermindering en vertraging van krimp en versakking groter as dié van WET1, asook die ongekuurde monster. Die kapillêre drukgedrag varieer drasties van die ongekuurde monster sowel as WET1 en wys 'n beduidende vermindering tot nulwaardes, ná die toepassing van kuring.

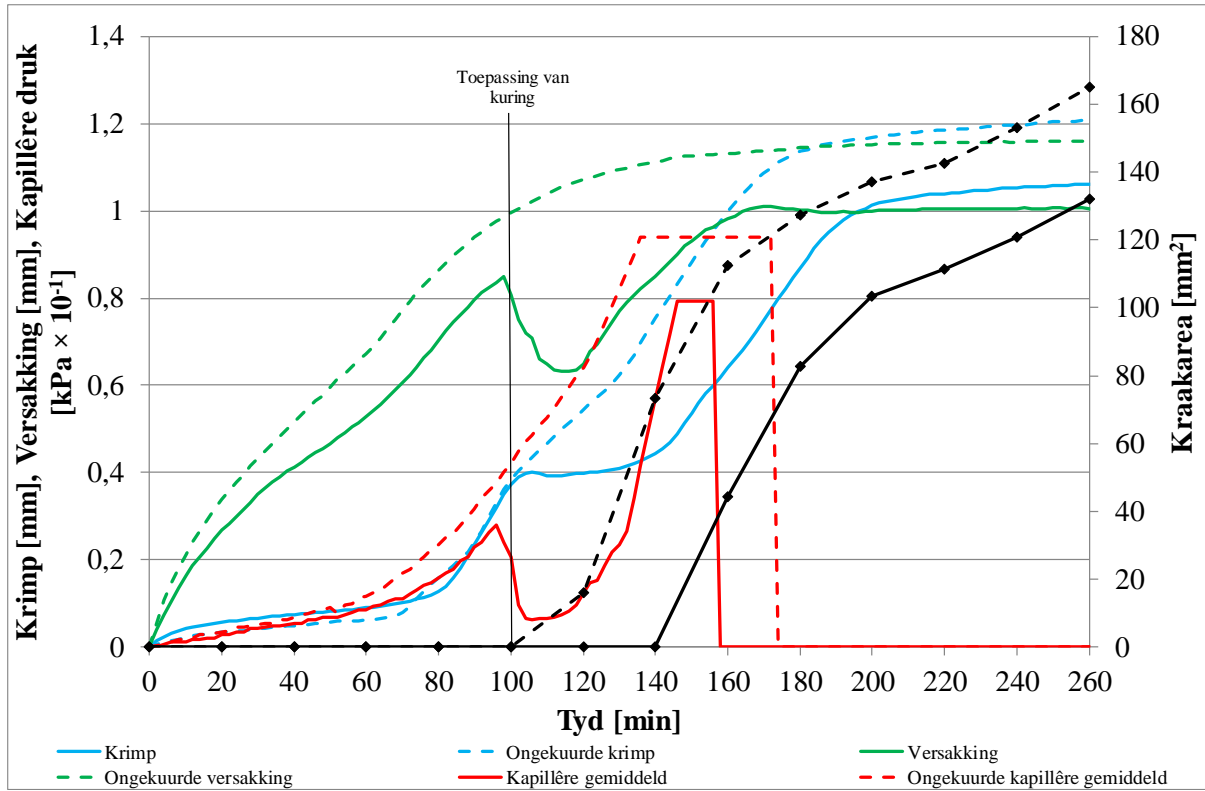
Dit moet in ag geneem word dat die kapillêre sensors reeds aan die begin van die toets op nul gestel is, dus is die nulwaarde aan die begin van die toets in Figuur 4.4 en alle ander kapillêre resultate eintlik 'n geringe positiewe drukkrag as gevolg van hidrostatiese druk. Die waarde waarna die druk val ná die toepassing van kuring, is dus die ware nulpunt en is die stabiele of gebalanseerde druk.

Dit beteken dat kuring wel die kapillêre druk algeheel kan verlig aangesien die druk ná die toepassing van kuring, na ongeveer nul val. Dit word algemeen aanvaar dat hierdie beduidende verligting van kapillêre druk verantwoordelik is vir die swelling soos waargeneem in die versakkingsdata. Tog wys die resultate dat wanneer die kapillêre druk rondom 100 minute weer toeneem, dit teen 'n hoër tempo toeneem as dié van die ongekuurde monster.

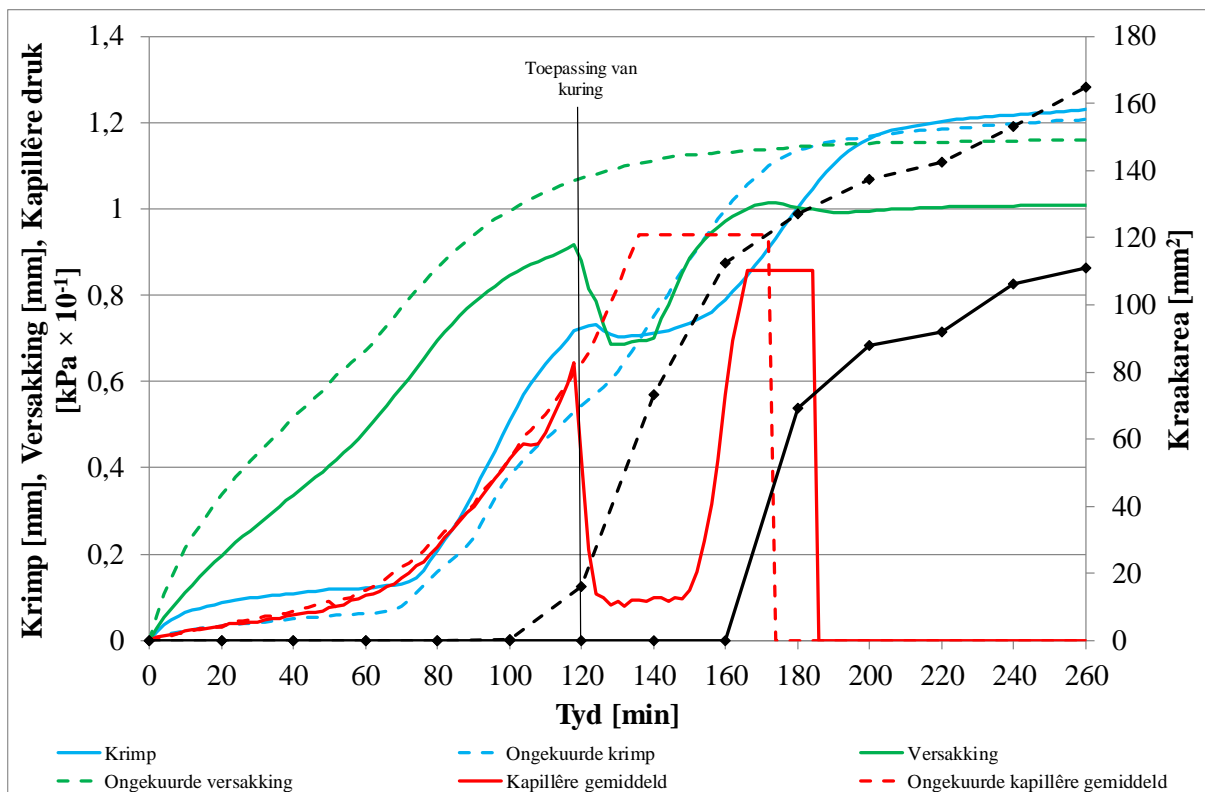
Die krimp van die monster toon 'n stabilisasie wanneer kuring toegepas word op 70 minute en begin verder krimp rondom 110 minute. Die kuring het veroorsaak dat die vorming van die kraak met 20 minute vertraag is, asook dat die finale kraakarea met helfde verminder het as dié van die ongekuurde monster. Die kraaktempo is ook laer vir die gekuurde monster tussen 140 en 180 minute.

WET3 ondersoek die invloed van kuring, toegepas net vóór die vorming van die kraak, naamlik op 100 minute. Die kuring het 'n soortgelyke gedragsverandering soos in WET1 en WET2 en vertraag die vorming van die eerste kraak met 40 minute. Tog word die finale kraak slegs effens verminder soos aangedui in Figuur 4.5.

WET4 mik om die invloed van kuring gedurende die vroeë ontwikkelingsfase van die kraak te ondersoek. Dit word bereik deur die monster te kuur op die eerste sigbare haarnaaldkraak, op ongeveer 120 minute. Die kuring het 'n soortgelyke gedrag tot gevolg gehad as WET3, maar toon 'n effens groter vermindering van die kraakarea wanneer dit met WET3 vergelyk word (sien Figuur 4.6). 'n Merkwaardige verskil met WET4 is die skielike en groot kraakarea wat gevorm het nadat die kuringswater verdamp het en die kapillêre druk weer toeneem geneem het.

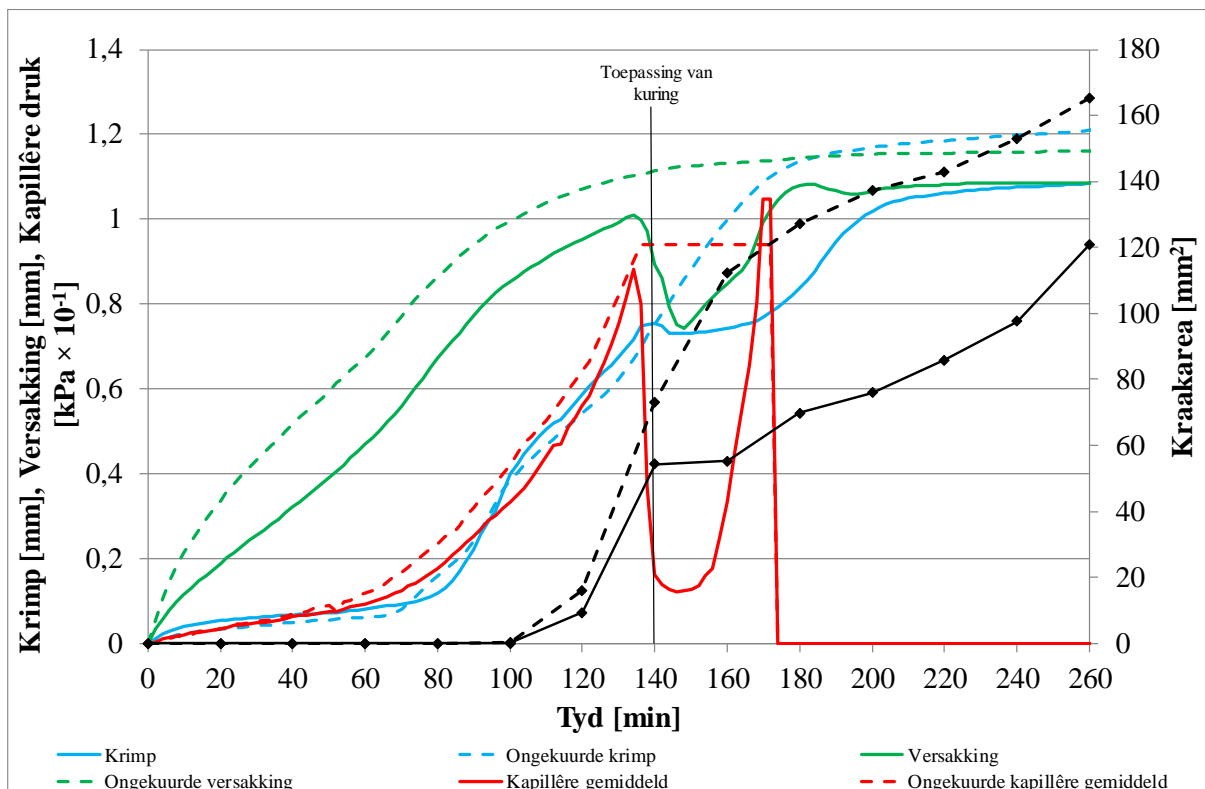


Figuur 4.5: Enkelwaterkuringstoepassing voor die vorming van kraake (WET3)



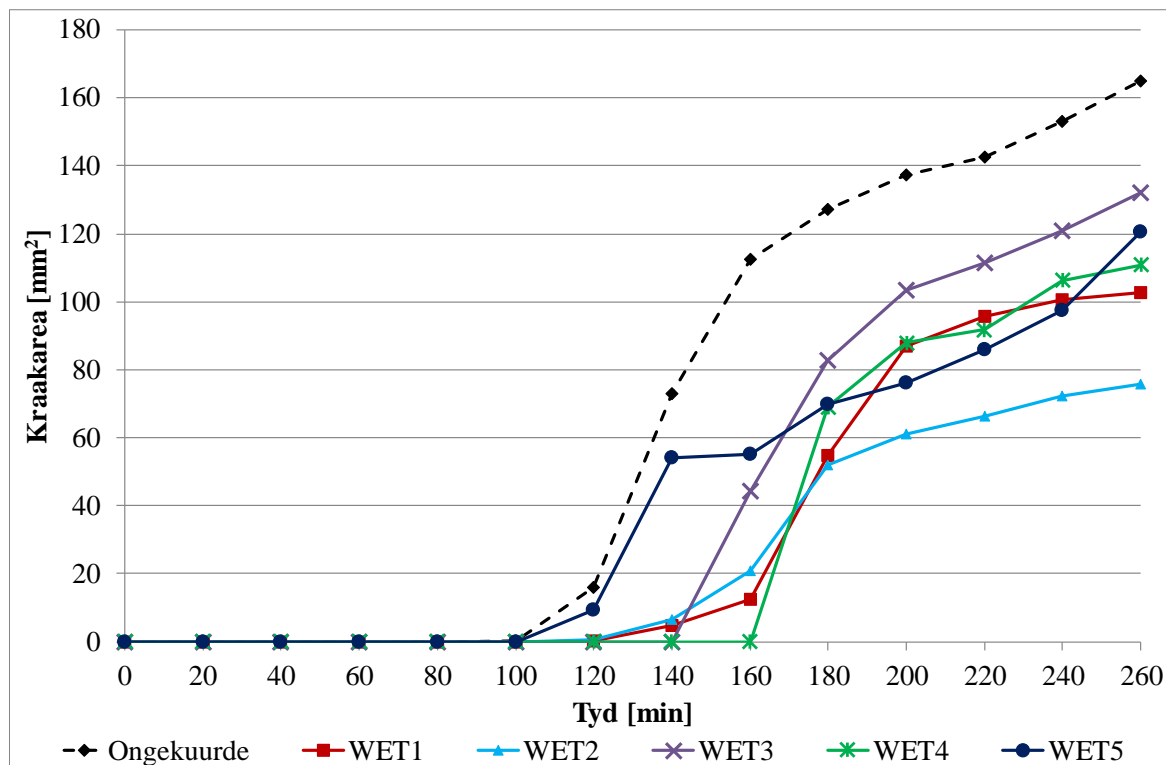
Figuur 4.6: Enkelwaterkuringstoepassing op die eerste sigbare kraak (WET4)

Die vyfde en finale enkel-waterkuring, WET5, ondersoek die invloed van kuring wat toegepas word gedurende die vinnige groeiperiode van die kraak op 140 minute, soos getoon in Figuur 4.7. Die resultate volg dieselfde patroon as die vorige monsters en bewys dat dit nie moontlik is om krale te herstel of toe te maak nádat dit gevorm het deur slegs van waterbevoogting gebruik te maak nie. Tog het die toets bewys dat dit wel moontlik is om die groei van die kraakarea vir 'n kort periode te stabiliseer nadat kuring toegepas is en dat dit die finale kraakarea wel verlaag het.



Figuur 4.7: Enkelwaterkuringstoepassing gedurende vinnige groeiperiode van die kraak (WET5)

Al hierdie monsters vorm deel van die verwysingsbasis vir die studie as enkeltoepassing van waterkuring op die fundamentele faktore en die ontwikkeling van kraakvorming in vergelyking met dié van ongekuurde monsters. Deur die kraake van die toetse te analiseer is dit duidelik dat WET2 die hoogste kraakvermindering tot gevolg gehad het, soos getoon in Figuur 4.8. Dit kan dus gestel word dat die enkeltoepassing van waterkuring aan die begin van die beduidende krimptwikkeling die mees optimale enkelwaterkuring onder die getoetsde monsters was.

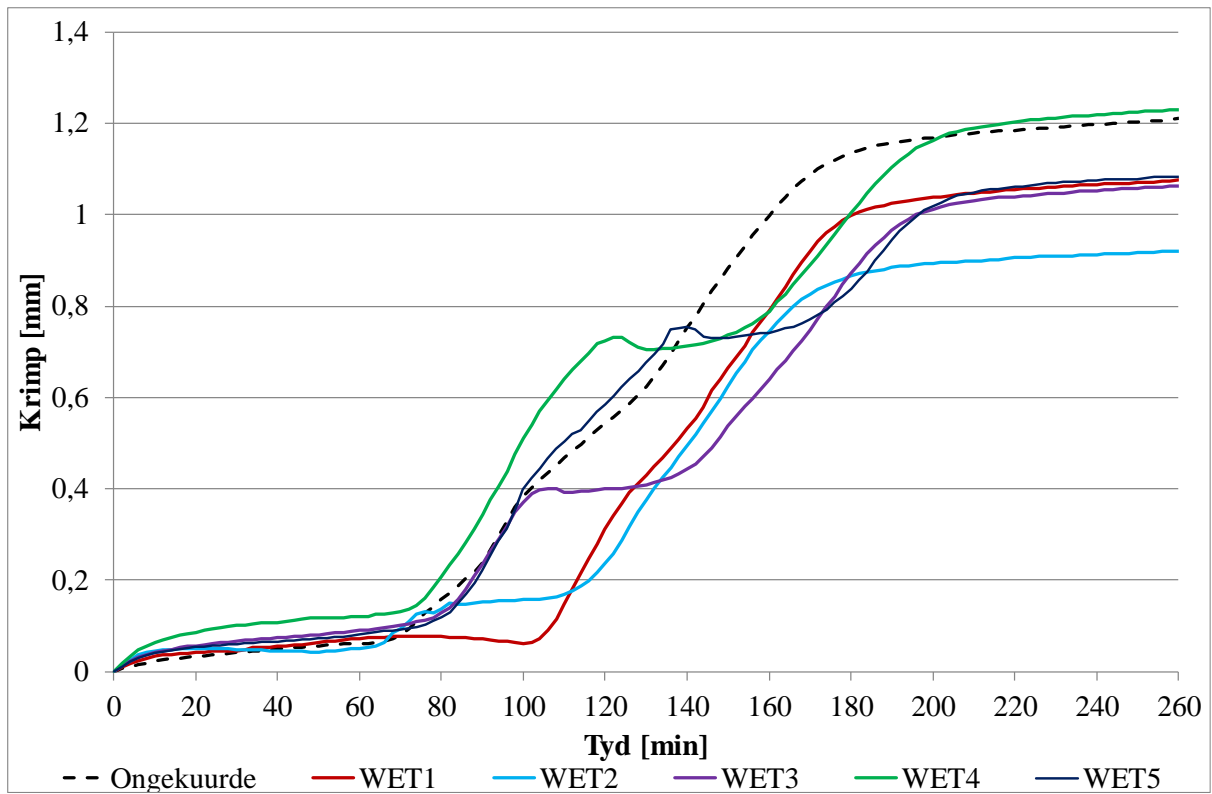


Figuur 4.8: Opsomming van enkelkuringstoepassing se kraakareas met 1 mm kuring

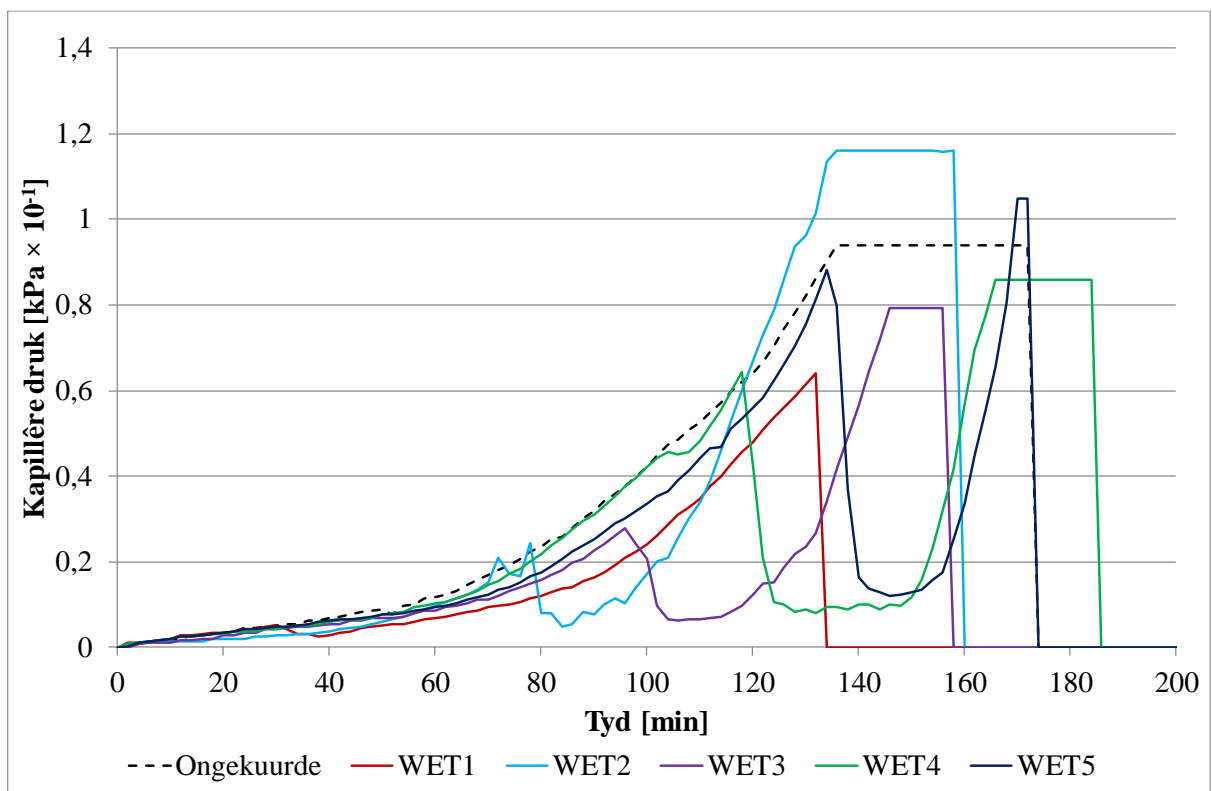
Die vermindering van die kraakarea in WET2 is hoogs waarskynlik veroorsaak deur die groter krimpvermindering teenoor dié van die ander monsters, soos aangedui in Figuur 4.9. Tog is dit steeds onbekend of die vermindering van die finale krimp 'n groter invloed op die kraakontwikkeling het as dié van die vinnige groeiperiode se vertraging.

'n Verdere waarneming is dat hoewel die kapillêre druk heeltamal verlig is deur die toepassing van kuring, het die verligting nie die krimp van die monster wat alreeds voor kuring gevorm het, teengewerk nie. Die kapillêre druk groei teen 'n streng tempo wanneer die kuringswater verdamp en veroorsaak dat die kraak 'n soortgelyke gedrag het as dié van die ongekuurde monster. Hierdie resultate wys dat die skade of moontlike mikro-kraak, veroorsaak deur die krimp van die monster vóór kuring, nie herstel word deur kuring toe te pas nie.

Die kapillêre drukontwikkeling vir al die monsters, soos aangedui in Figuur 4.10, wys dat alhoewel kuring die kapillêre druk heeltamal verlig het, dit daarna weer vinnig toegeneem het. Die toename was gewoonlik teen 'n hoër tempo as vóór die toepassing van kuring. Die verligting van die kapillêre druk moet nie verwar word met die lugpenetrasie van die monster nie, aangesien die druk herstel en die ware lugpenetrasie plaasvind op 'n later fase (Schmidt & Slowik, 2009).



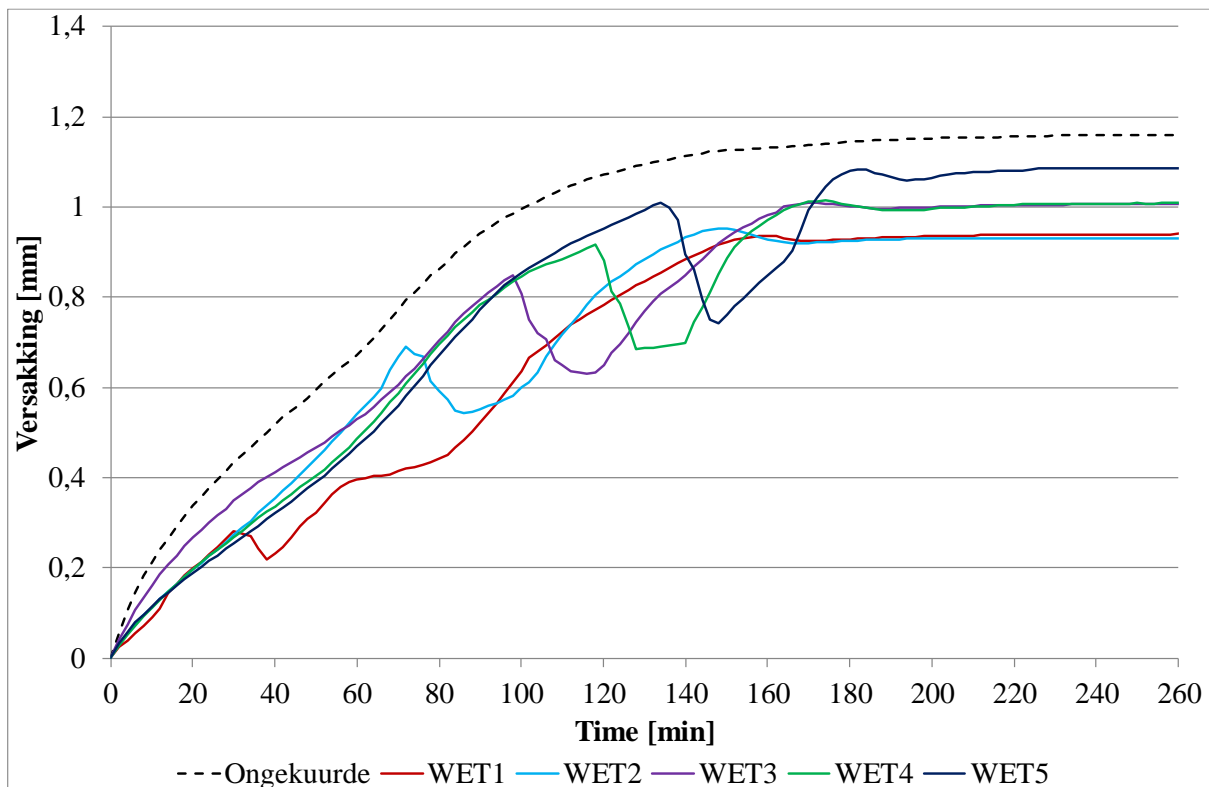
Figuur 4.9: Opsomming van enkelkuringstoepassing se krimp met 1 mm kuring



Figuur 4.10: Opsomming van enkelkuringstoepassing se kapillêre druk met 1 mm kuring



Soos vroeër genoem, toon die versakkingsresultate vir alle toetse 'n swelling of vermindering wanneer die kuring toegepas word (sien Figuur 4.11.). Die figuur toon ook dat die swelling meer prominent is hoe later kuring toegepas word. Hoe later kuring toegepas word hoe hoër is die kapillêre druk wat ontwikkel het en dus deur die toepassing van kuring verlig word. Dit wys dat die verligting van druk veroorsaak word deur die swelling van die monster en hoe hoër die kapillêre druk is wat verlig word, hoe groter is die swelling.



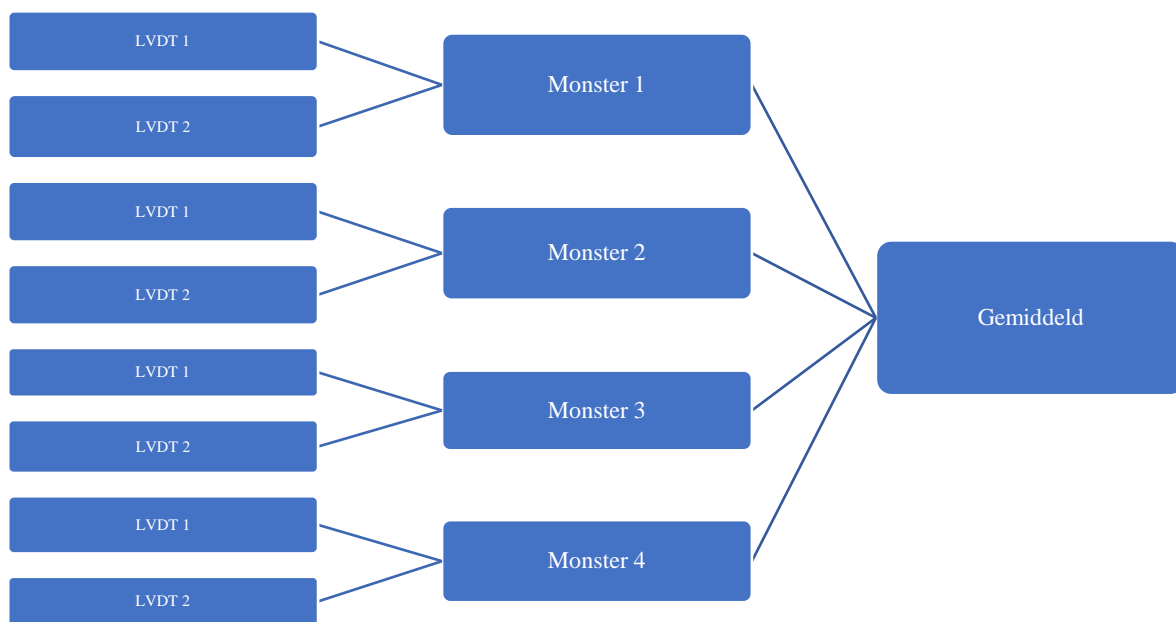
Figuur 4.11: Opsomming van enkelkuringstoepassing se versakking met 1 mm kuring

#### 4.4. Veelvuldige waterkuring

Vorige studies het bewys dat veelvuldige kurings die ontwikkeling van krake drasties kan verminder. Hierdie studies maak gebruik van outomatiese sisteme wat opgestel is met die fokus op kapillêre druk en die toepassing van kuring wanneer die druk 'n sekere drempel oorskry of bereik. Kuring is dus toegepas op lukrake onreëlmatige intervalle. Die veelvuldige kuring soos toegepas deur Slowik het verdere krake redelik suksesvol voorkom. Gevolglik word veelvuldige kuringskemas ondersoek met die fokus op die krimp van die monster in plaas van die kapillêre druk, soos in die toetse van Slowik (Slowik, Schlattner & Klink, 2004).

'n Waarde van 5% van die ongekuurde finale krimpwaarde, naamlik 0.061 mm, dien as gekose waarde, aangesien dit die waarde is wat krimp bereik vóór die beduidende krimp van die monster plaasvind. Die monster moet dus gekuur word wanneer 'n waarde van 0.061 mm krimp bereik word.

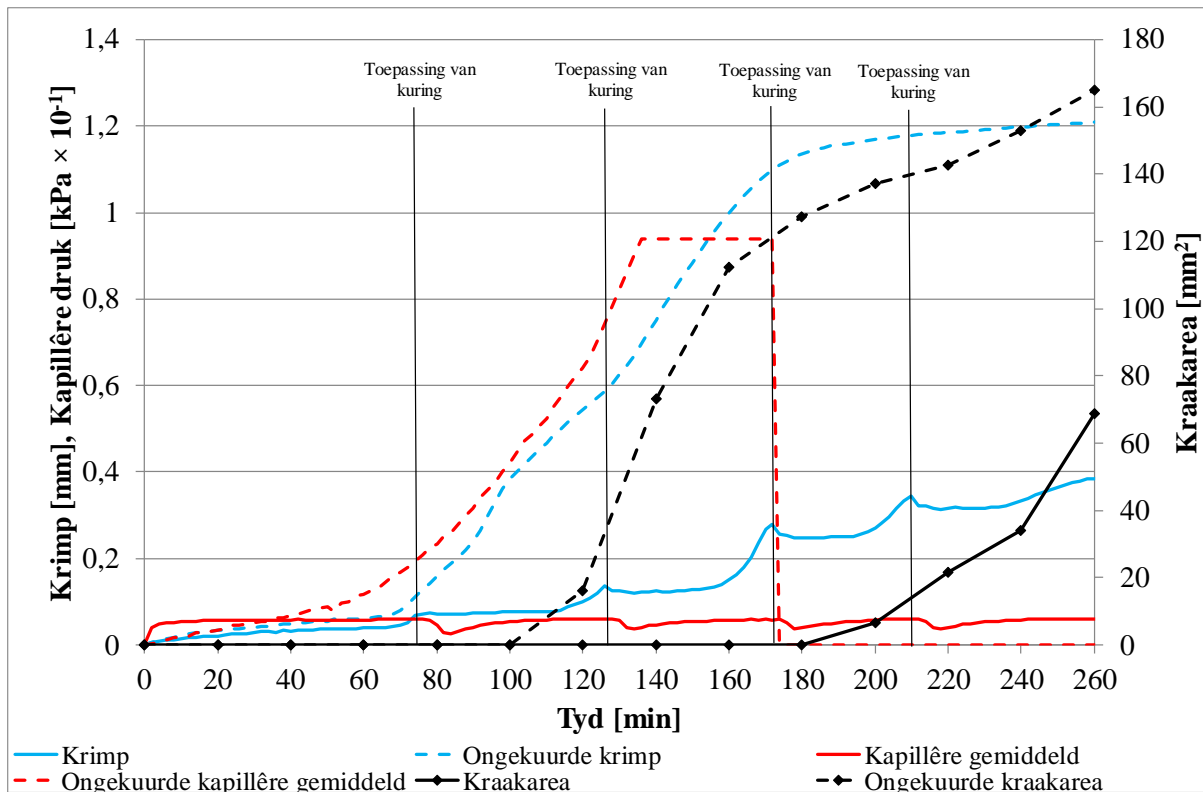
Dit was egter moeilik om 5% krimpwaarde te bereken, aangesien die lesing vanaf 'n aktiewe dataverwerking verkry is, soos getoon in Figuur 4.12. Kuring was dus nie presies toegepas soos aanvanklik beplan nie en was soms meer as die 0.061 mm krimp, soos aangedui in Figuur 4.13.



*Figuur 4.12: Metode vir die berekening van die gemiddelde krimp op 'n gegewe tyd*

WV5T wys drastiese vermindering van die kraakarea soos aangedui in Figuur 4.13. Die figuur toon oorheersende afwykings ná die toepassing van kuring, veral dié van die krimp en kapillêre druk. Hierdie veelvuldige kuring het die kraakvorming drastiese verminder of vertraag, maar kon nie die kraakvorming voorkom nie, moontlik weens beduidende krimp wat steeds na aan die einde van die toets plaasgevind het.

Die data wys dat lugpenetrasie nie plaasgevind het nie, tog word die kapillêre druklesing nader aan die einde van die toets onbetroubaar as gevolg van die stolling en verharding van die beton (Powers, 1968; Schmidt & Slowik, 2009).

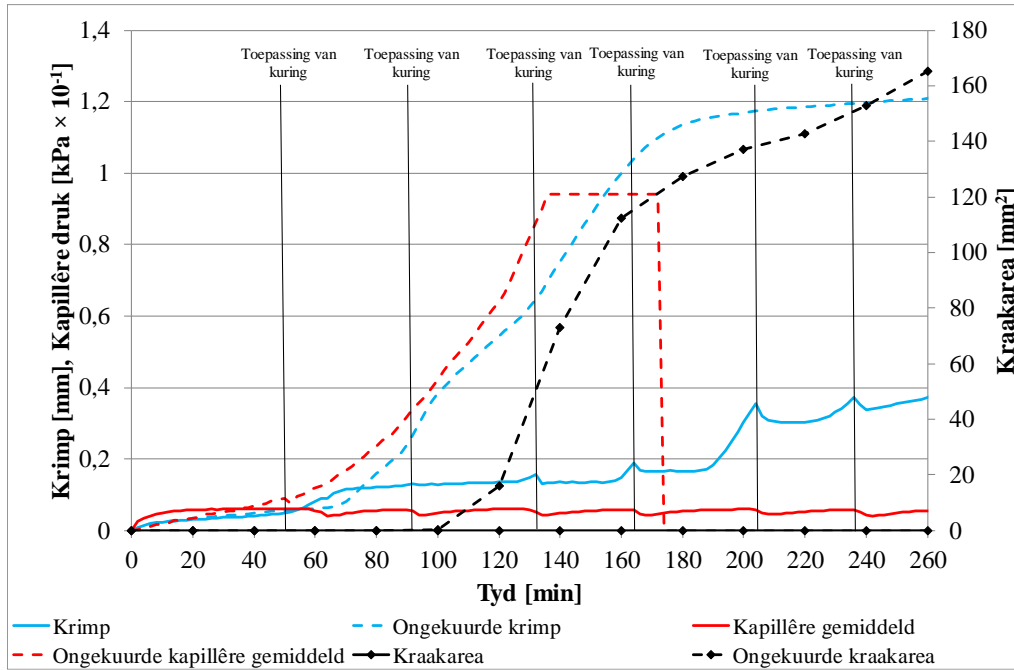


Figuur 4.13: Veelvuldige waterkuringstoepassing op 5% krimptoenname (WV5T)

Die tweede veelvuldige waterkuringstoets was daarop gemik om die finale krimp van die monster te beperk tot 5% van die totale krimp van die ongekuurde monster, deur gebruik te maak van veelvuldige toepassings, soos aangedui in Figuur 4.14. Hierdie toets wys soortgelyke gedrag as WV5T, maar met 'n effense afwyking aangesien die monster meer gereeld gekuur is.

Die toets beperk die krimp van die monster tot 31.21% as gevolg van 'n laat toepassing van kuring wat 'n groei van 11.26% toegelaat het. Tog, al was die monster nie beperk tot 5% nie, is oppervlakkraake steeds voorkom, wat dus bewys dat plastiese krimpkrake in ernstige omstandighede ten minste op die oppervlak voorkombaar is.

Een van die moontlike redes waarom WV5B nie gekraak het nie en WV5T wel gekraak het, is omdat WV5B beduidend minder krimp getoon het rondom 160 minute, terwyl WV5T beduidend meer krimp getoon het op 190 minute. Dit wys dat, om kraake te voorkom, die krimp van die monster so ver as moontlik, vir so lank as moontlik voorkombaar moet word.



Figuur 4.14: Veelvuldige waterkuringstoepassing om krimp te beperk tot 5% (WV5B)

#### 4.5. Kuring met kuringsmiddels

Die studie is gemik om die invloed van vloeibare kuringsmetodes op die plastiese krimpkraak van beton te ondersoek, wat meestal bereik word deur gebruik te maak van water, alhoewel kuringsmiddels ook gebruik kan word. Tussen die beskikbare middels is drie van die mees gebruikte middels vir hierdie studie gekies, naamlik: wasemulsie, petroleumharsemulsie en akriemulsie.

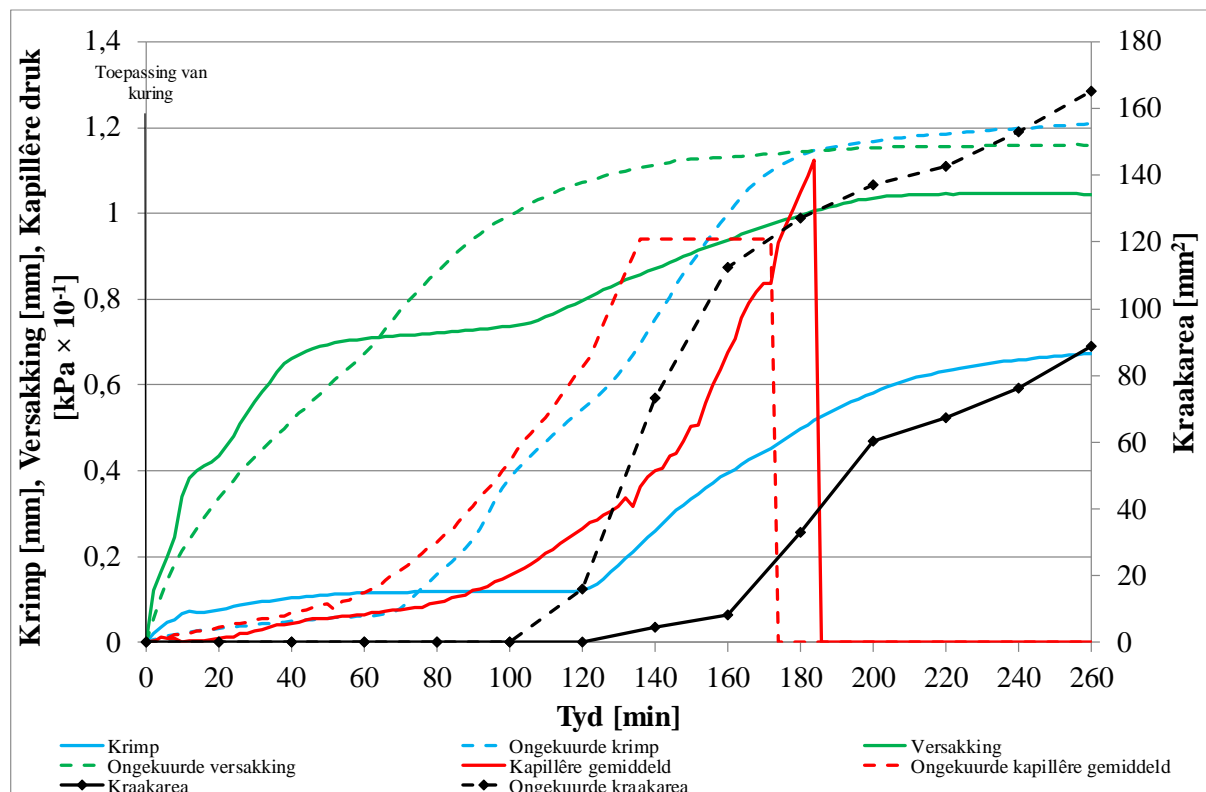
Hierdie middels is ontwerp om te verhard en 'n ondeurdringbare laag te vorm wat die vog in die beton vasvang en sodoende die verdamping van die oppervlakwater voorkom, soos aangedui in Figuur 4.15. Hierdie lae mag moeilik wees om te verwyder en benodig 'n verlengde periode voordat dit verwyder kan word sonder om die betonoppervlak te beskadig (Chryso, 2019).



Figuur 4.15: Laag gevorm deur die petroleumharsemulsie (KA2)

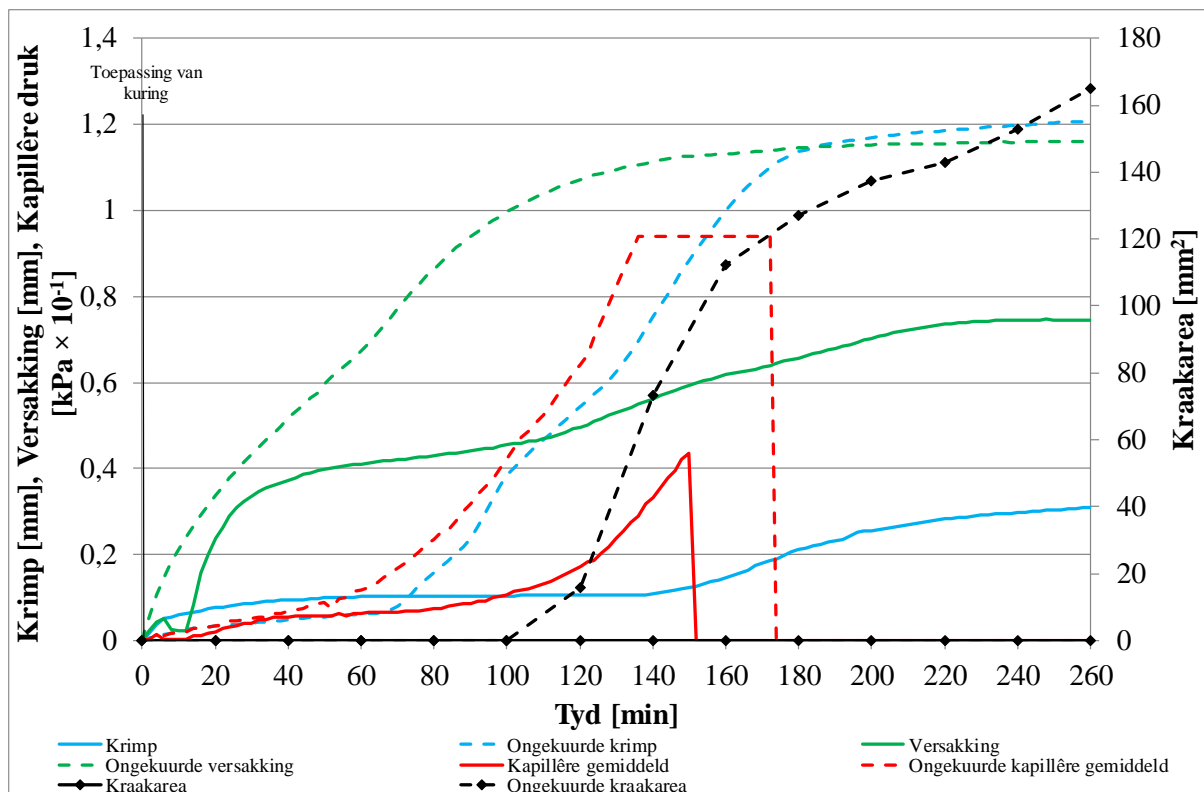
Die eerste van die middels, naamlik die wasemulsie (KM1) se resultate word aangedui in Figuur 4.16. Die petroleumharsemulsie (KM2) word in Figuur 3.17 aangetoon en die akrielemulsie (KM3) in Figuur 4.20.

Die wasemulsie (KM1) is toegepas met die giet van die beton en vertraag drasties die ontwikkeling van krimp en kapillêre druk wanneer vergelyk word met die ongekuurde monster. Die finale krimpwaarde het ook drasties verlaag terwyl die versakking slegs effens verlaag het. Dit veroorsaak 'n vertraging en vermindering van kraakvorming, met 'n area soortgelyk aan die optimale enkel-waterkuring, naamlik WET2. Die versakking van die monster wys 'n toename gedurende die eerste periode wat veroorsaak is deur die kuringsmiddel wat 'n ondeurdringbare laag vorm.



Figuur 4.16: Wasemulsie-kuringstoepassing (KA1)

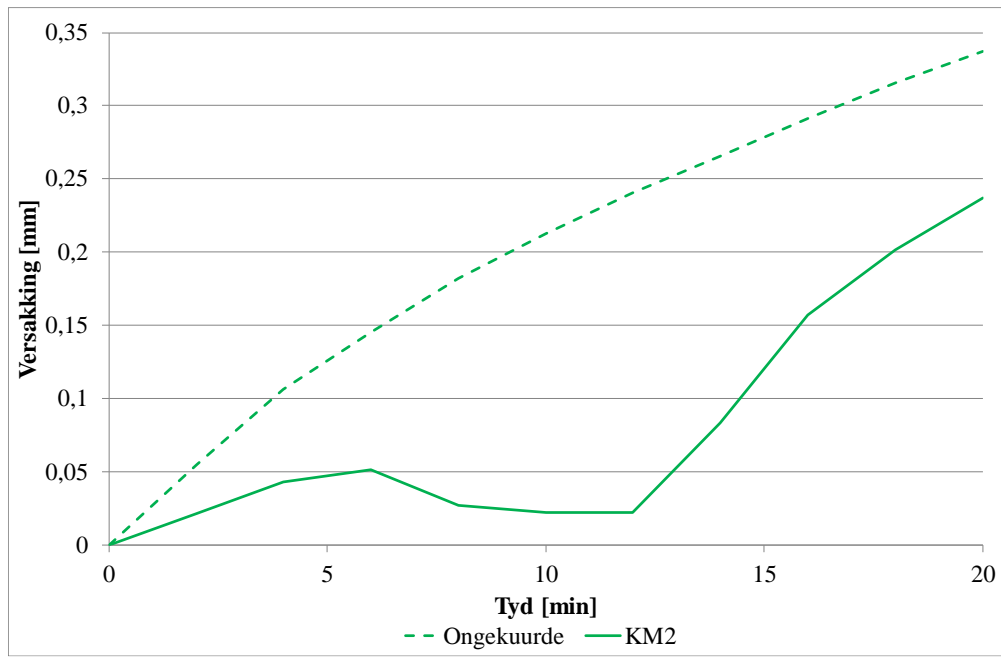
Die petroleumharsemulsie (KM2) wys 'n drastiese vertraging en vermindering van die krimp en kapillêre gedrag soos getoon in Figuur 4.17. Die versakking het ook verminder en toon 'n afwyking teenoorgesteld van die wasemulsie (KM1) soos aangedui in Figuur 4.18. Hierdie is waarskynlik as gevolg van die reaksie en transformasie gedurende die vorming van die verskillende ondeurdringbare lae.



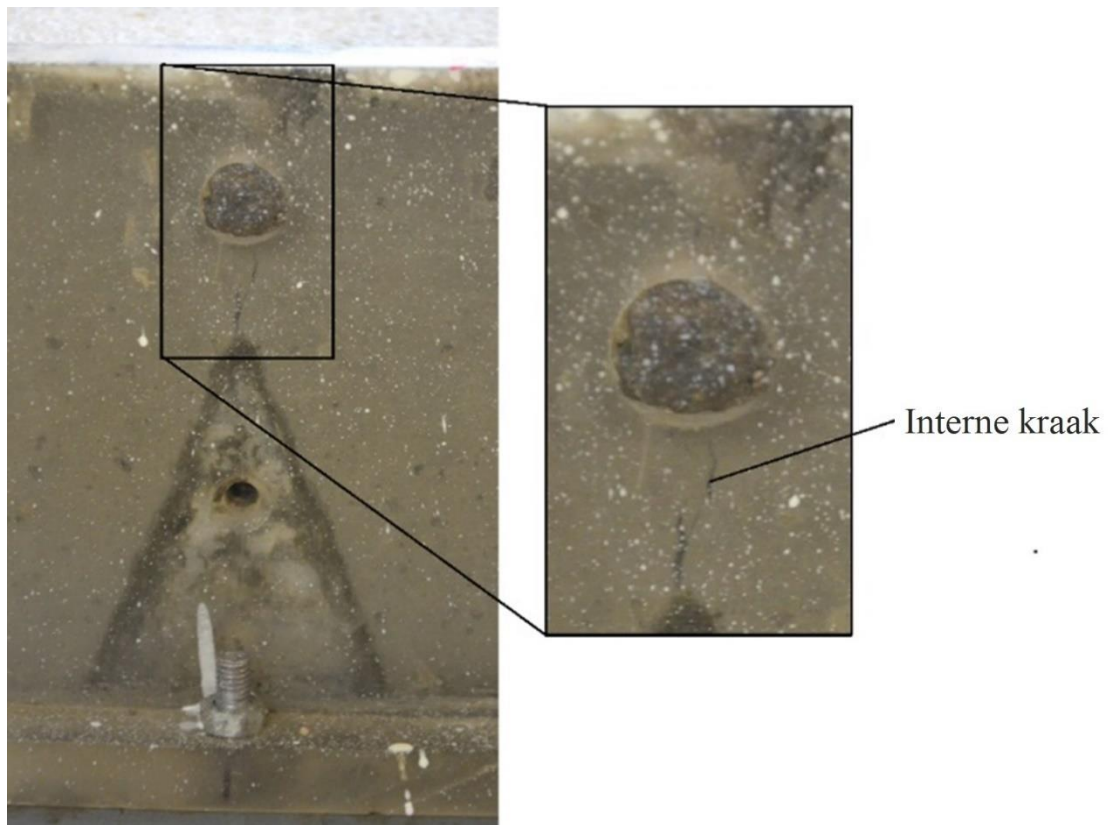
Figuur 4.17: Petroleumharsemulsie-kuringstoepassing (KA2)

Die petroleumharsemulsie (KM2) wys 'n groot vertraging en vermindering van die krimp- en kapillêre waardes, wat veroorsaak dat oppervlakkraak voorkom word. Tog is die voorkoming van oppervlakkraak nie 'n volkome voorkoming van plastiese kraak nie, aangesien interne kraak steeds mag vorm soos aangedui in Figuur 4.19.

Die foto, aangetoon in Figuur 4.19, is geneem na aanloop van die toets. Dit is onduidelik wanneer die kraak gevorm het nie, maar aangesien dit gevorm het gedurende die plastiese fase, word dit gedefinieer as 'n plastiese kraak. Hoewel daar geen kraak op die oppervlak sigbaar was nie, is dit moontlik dat die kraak wel die oppervlak bereik het, maar dat dit versteek was deur die laag wat die kuringsmiddel gevorm het.



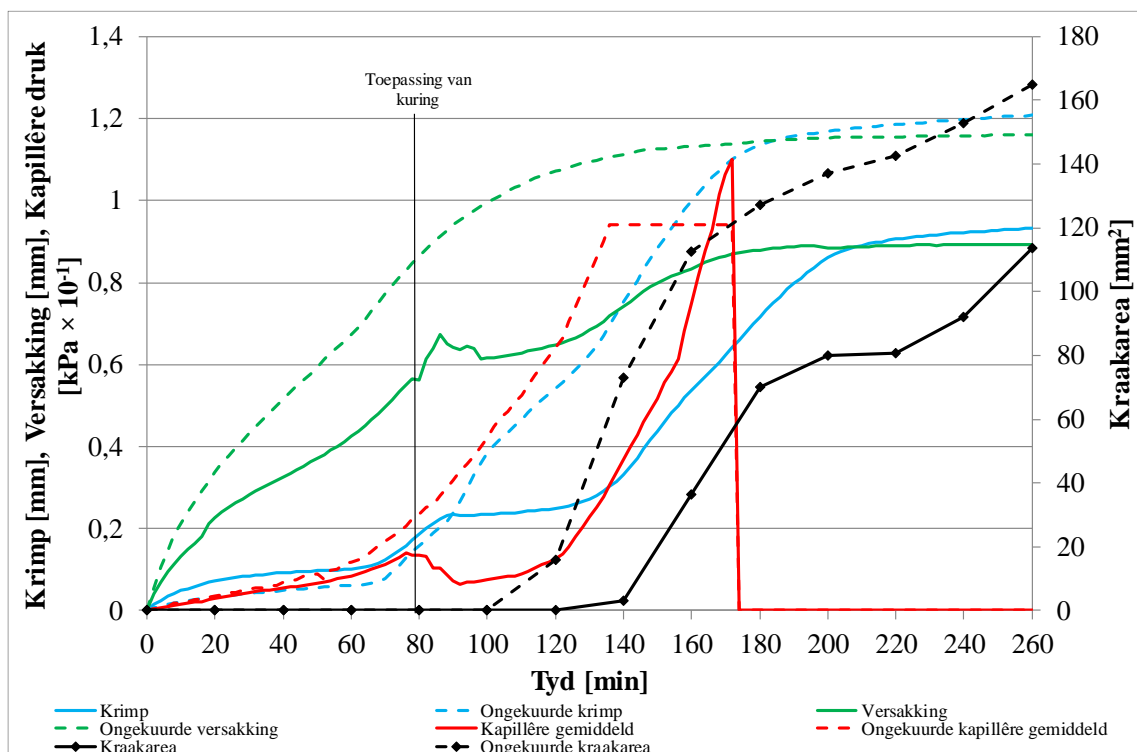
Figuur 4.18: Petroleumharsemulsie-versakking (KA2)



Figuur 4.19: Interne kraakvorming van die petroleumharsemulsie (KA2)

Die finale kuringsmiddel, naamlik die akriemulsie (KM3) is, soos deur die verskaffer voorgeskryf, toegepas wanneer die beton sy waterglans verloor het. Dit het plaasgevind op ongeveer 80 minute weens die spesifieke verhoudings en bestandele wat in die meng gebruik is, asook die opstelling wat gekies is vir die klimaatboks. Die resultate van hierdie toets word in Figuur 4.20 getoon.

Die akriemulsie (KM3) se gedrag is soortgelyk aan die van die eerste middel (KM1), maar vind plaas op 'n later periode aangesien die toepassingstye verskil. Die monster toon 'n kleiner vermindering van krimp, versakking en kapillêre drukgedrag, wat 'n kleiner vermindering van die kraakarea tot gevolg het as dié van KM1. Die akriemulsie is minder effektief as sommige van die enkelwaterkuringstoepassings, wat bewys dat waterkuring met kuringsprodukte kan vergelyk word.



Figuur 4.20: Akriemulsie-kuringstoepassing (KA3)

#### 4.6. Verdamping van die kuringsmiddels

Die effektiwiteit van 'n kuringsmiddel kan bepaal word deur die verdamping wat beton ondergaan te toets, met én sonder die toepassing van die middel. Hierdie waardes kan egter misleidend wees aangesien dit die verdamping van die monster sowel as die kuringsmiddels bevat. Gevolglik is 'n aparte reeks toetse gedoen om die verdampfingsverlies van die kuringsmiddel gedurende die vorming van die beskermingslaag te bepaal.

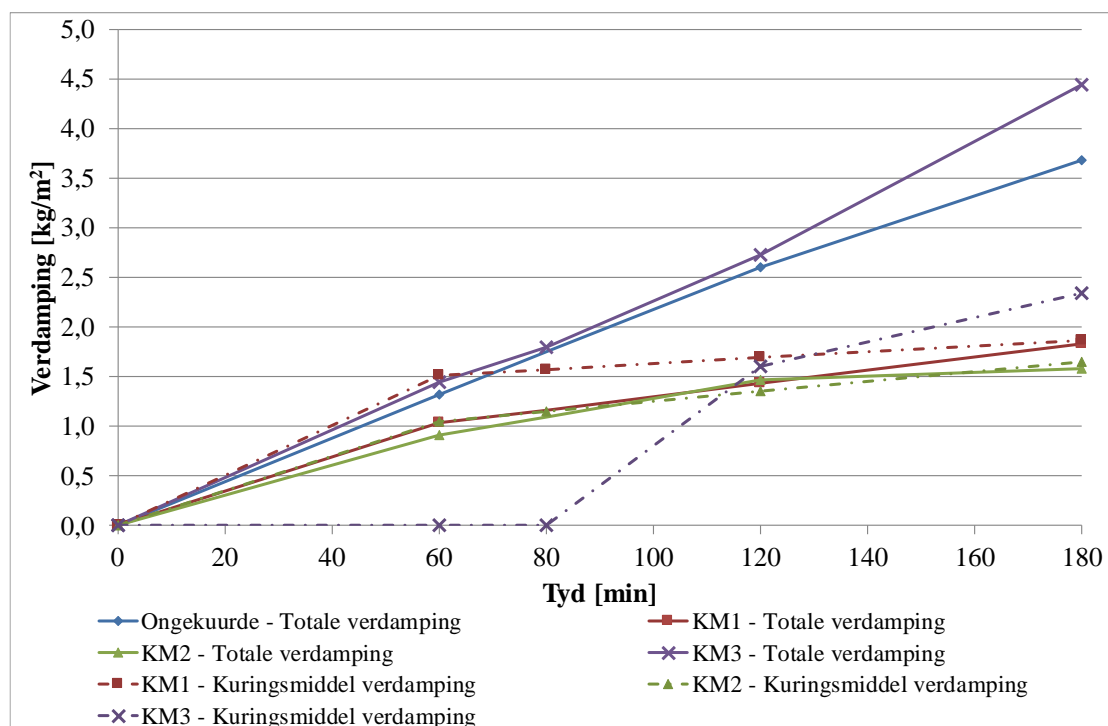


Figuur 4.21 wys die verdampings- of massaverlies van die beton met én sonder die toepassing van kuring, soos beskryf in Hoofstuk 3.2.5. So ook is die verdamping van die kuringsmiddels bereken soos bespreek in Hoofstuk 3.2.6.

Deur hierdie data te analiseer wys dit dat sekere van die middels 'n effense hoër verdamping toon as die ongekuurde monster. Dit beteken dat die gekurde monsters 'n hoër kraakarea moes bereik as wat aangui is. Tog sluit die gegewe massaverlies beide die verdamping van die kuringsmiddel en die vorming van die ondeurdringbare laag in.

Dit word veral gesien in die petroleumharsemulsie (KM2) omdat die verdamping- en massaverlies amper ekwivalent is. Hierdie middel het dus die meeste of selfs moontlik alle verdamping van die beton voorkom. Dieselfde is waargeneem by die wasemulsie (KM1), maar die massaverlies was effens groter as die verdamping.

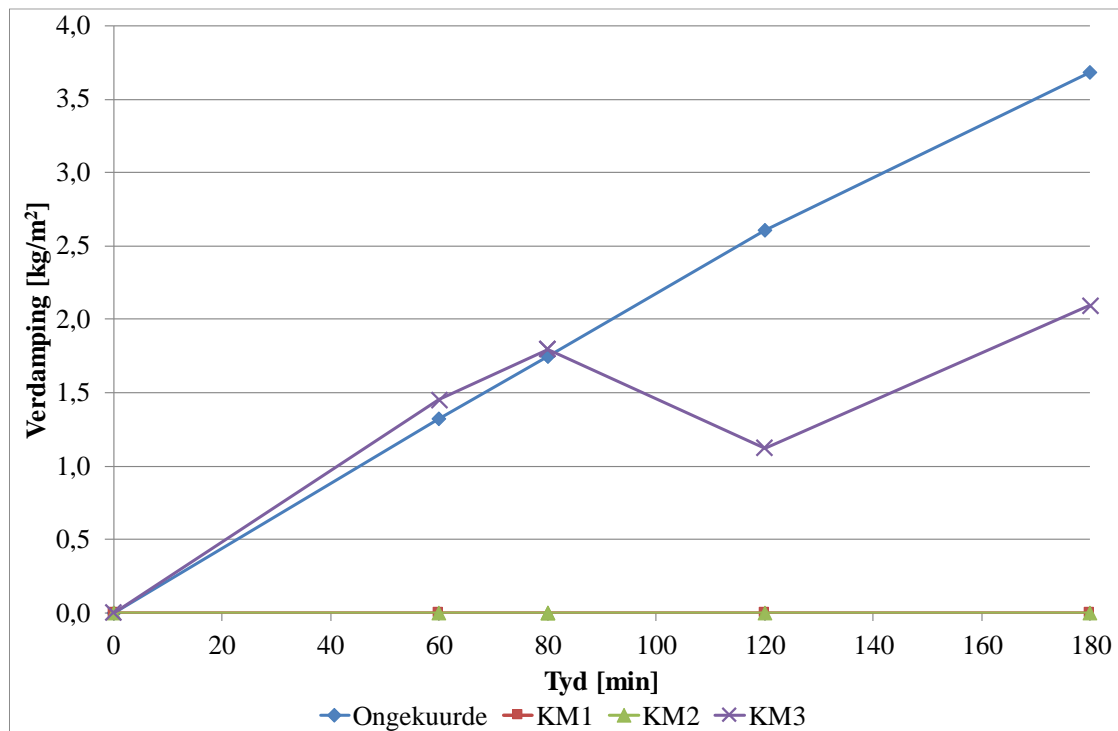
Hierdie afwyking is waarskynlik weens die verskil in toetsmetodes, soos bespreek in Hoofstuk 3.2.5 en 3.2.6, vanweë die feit dat die standaardverdampingsvorm omtrent agt keer groter is as die vorms wat gebruik is vir die berekening van die massaverlies van die kuringsmiddels. Die akriemulsie toon die verskil tussen 'n gekurde en 'n ongekuurde monster, aangesien dit die verdamping van die ongekuurde gedrag amper perfek volg tot waar die kuringsmiddel toegepas word.



Figuur 4.21: Verdamping van die gekurde monsters met die kuringsmiddels, sowel as die middels se massa deur die vorming van die ondeurdringbare laag

Om 'n meer akurate voorspelling van die gekuurde monsters se kraakgedrag te maak, kan die middels se massaverlies van die verdampingsresultate afgetrek word, soos aangedui in Figuur 4.22.

Die figuur toon dat die verdamping van die gekuurde monster heelwat minder prominent is as die oorspronklik gekuurde monsters se data. Dit bevestig die gedrag van hierdie spesifieke toets se kraakvorming. Soos verwag het die petroleumharsemulsie (KM2) die verlies van bloeiwater weens die verdamping teoreties voorkom. Dit laat die bloeiwater toe om die monster te beskerm en die effek van die kapillêre drukontwikkeling te verlig. Dieselfde gedrag word getoon deur die wasemulsie. Die akrielemulsie toon 'n drastiese val in verdamping ná die toepassing van die kuringsmiddel. Hierdie gedrag verduidelik die kraakontwikkeling van die gekuurde monsters.



Figuur 4.22: Verdamping van die gekuurde monsters, aangepas vir die massaverlies

#### 4.7. Waarde van kuring

Oor die algemeen het die toepassing van kuring 'n onmiddellike stabilisasie of 'n skielike vermindering van die interne eienskappe getoon, wat tot die vermindering van plastiese krimpkrake lei. Enkelwaterkuringstoepassingskemas, WET1 tot WET5, volg die ongekuurde gedrag en varieer na die toepassing van die kuring, wat 'n laer krimpwaarde op die einde van die toetsperiode veroorsaak.

WET4 toon 'n effens hoër finale krimpwaarde as dié van die ongekuurde monster, aangesien die groeitempo van die krimp ietwat groter is vóór die toepassing van die kuring. Die vermindering van die interne faktore, insluitende krimp, versakking en kapillêre drukgedrag, veroorsaak 'n laer kraakontwikkeling. Hierdie is die suksesvolste getoon deur WET2.

Die gedrag van die enkeltoepassing het verbeter deur gebruik te maak van veelvuldige waterkuring, naamlik WV5T en WV5B. Hierdie monsters verminder verder die interne eienskappe en lei tot WV5B wat die oppervlakkraak suksesvol voorkom.

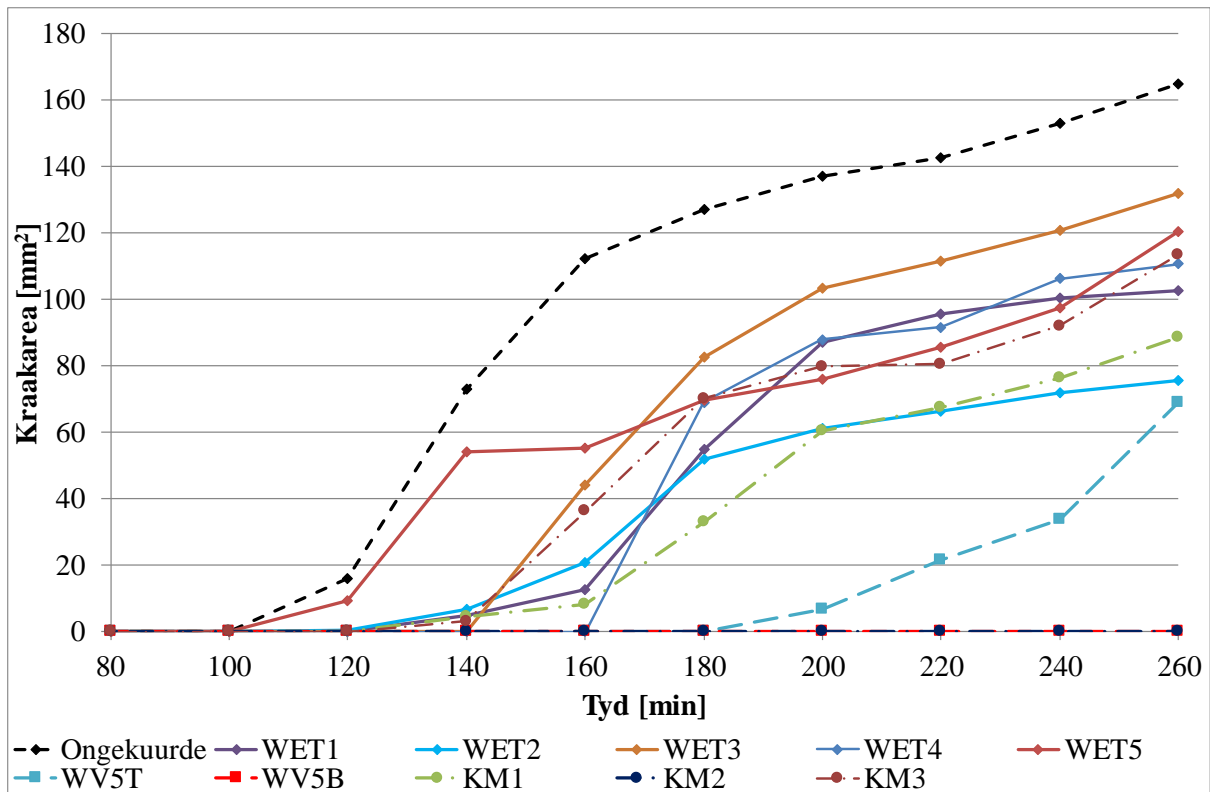
Soortgelyke waarnemings kan gemaak word vanaf die kuringsmiddels se data, veral dié van akriemulsie (KM3), omdat dit soortgelyke gedrag as dié van waterkuring wys. Die kuringsmiddels KM1 en KM2, wat toegepas is met die giet van die beton, vertraag die toename van die monster se krimp, versakking en kapillêre drukgedrag wat verminderde kraakontwikkeling tot gevolg het. Hierdie is veral waargeneem deur die petroleumharsemulsie wat die oppervlakkraak suksesvol voorkom het.

'n Algemene tendens kan vanuit die resultate waargeneem word, naamlik hoe meer die krimp vertraag en verminder word, hoe laer is die kraakontwikkeling.

Dit is ook waargeneem dat ná 'n sekere krimpdrempel bereik is, die stabilisering as gevolg van kuring nie die finale krimpwaarde affekteer nie. So ook is die krimpwaarde wat veroorsaak is onherstelbaar en het meestal gelei na plastiese krimpkraak in hierdie studie. Die waarde van hierdie krimpdrempel bly onbekend, maar word algemeen aanvaar dat dit beïnvloed word deur die betonbestandele, klimaat en beperking.

Vertikale versakking, soortgelyk aan die krimpdata, kan oombliklik afwyk van die ongekuurde gedrag wanneer kuring toegepas word en veroorsaak 'n drastiese val in die instrumentele lesings. Hierdie eienskappe het egter teruggekeer na die gedrag soos waargeneem by die ongekuurde monster. Dit het teen 'n stadiger tempo plaasgevind vanweë die feit dat kuring nie krimp óf versakking óf kapillêre druk voorkom het nie, maar slegs vertraag het.

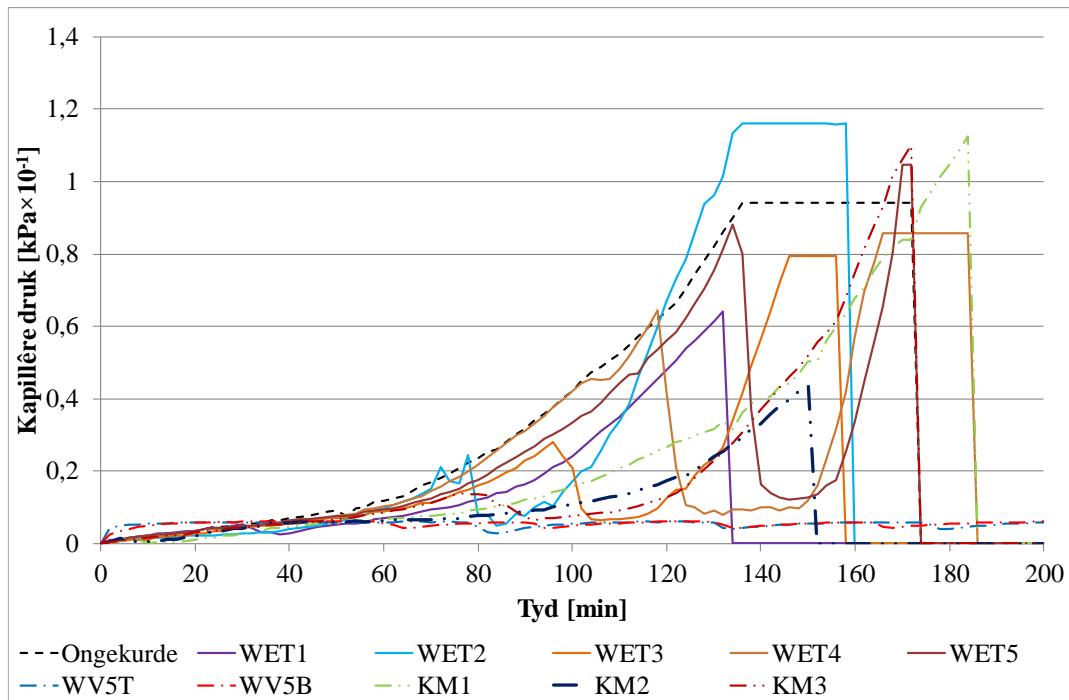
Die waarnemings vir versakking, krimp en kapillêre druk is bevestig deur die kraakarea se resultate soos aangedui in Figuur 4.23. Die optimale van elke kuringsmetode word in Figuur 4.25 aangedui.



Figuur 4.23: Opsomming van kuringstoepassings: kraakarea

WET1, WET3, WET4 en KM2 toon laer lugpenetrasiewaardes; WET2, WET5, KM1 en KM2 toon hoër lugpenetrasiewaardes; terwyl WV5T en WV5B geen lugpenetrasie toon nie (Figuur 4.24). Soos voorheen genoem, is die tyd wat lug die monster penetreer nie van groot belang nie, aangesien die lugpaadjies arbitrêr varieer.

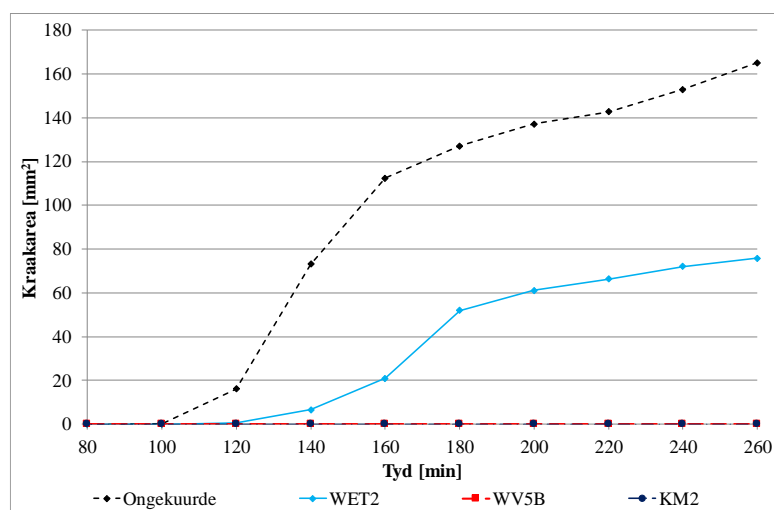
Van groter belang is die tempo van poriedrukontwikkeling en die verandering wat dit toon, soos aangedui deur KM1 wat 'n lang egalige groei toon voordat lug die monster penetreer. Hierdie stadige toename van die kapillêre poriedrukontwikkeling het 'n groter positiewe invloed op kraakontwikkeling teenoor WET4 en WET5, wat 'n kort skerp groei aangetoon het (Figuur 4.24).



Figuur 4.24: Opsomming van kuringstoepassings: kapillêre druk

Kuring het gewys dat dit moontlik is om die vorming van kraake te vertraag indien dit toegepas word vóór die kraak sigbaar is. Kuring stabiliseer of verminder ook die kraaktempo indien dit toegepas word ná of óp kraakvorming. Alle kuringstoeste het hierdie gedrag getoon, maar WV5T het 'n beter resultaat getoon waar die kraakvorming met ongeveer 80 minute vertraag is.

WET5 volg noukeurig die ongekuurde monster se kraakgedrag en stabiliseer die kraak vir 'n kort periode ná die toepassing van kuring, waar WV5B en KM2 oppervlakkraake voorkom het en selfs heeltemal vertraag het, soos aangedui in Figuur 4.25.



Figuur 4.25: Opsomming van die optimale kuringstoepassing van elke kuringmetode

Die kuringsmiddels het oor die algemeen beter gevaar as die waterkuring, met die akriemulsie (KM3) wat soortgelyke gedrag toon as die gemiddelde waterkuring. Die wasemulsie (KM1) toon soortgelyke gedrag as die optimale waterkuring, naamlik WET2, waar die petroleumharsemulsie (KM2) die vorming van oppervlakkraake voorkom het.

KM1 en KM3, soortgelyk aan waterkuring, vertraag die vorming van kraake en verminder kraakontwikkeling. Die wasemulsie (KM1) toon 'n groter invloed as dié van die akriemulsie (KM3). Die petroleumharsemulsie (KM2) toon 'n totale voorkoming van kraake op die oppervlak, alhoewel interne kraake onder die oppervlak waargeneem is. Gevoglek is dit nie moontlik om te stel dat KM2 plastiese kraake heeltemal voorkom nie.

Die sukses van die verskillende kuringsmetodes, in terme van versakking, krimp, finale kraakarea, kapillêre ontwikkelingsvertraging en kraakvermindering, word in vergelyking met die ongekuurde monster in Tabel 4.1 opgesom. Die analise van die verskillende kuringstoeste toon aan dat kuring, gemik op die krimp van die monster (WET2), die grootste vermindering van die kraakarea onder die enkelwaterkuringstoepassings tot gevolg gehad het.

Veelvuldige kuring WV5B, wat daarop gemik was om krimp te beperk, het die grootste vermindering onder die veelvuldige waterkuring getoon en kon oppervlakkraake voorkom. Soortgelyk het die petroleumharsemulsie (KM2), die grootste vermindering onder die kuringsmiddels getoon en het ook oppervlakkraake voorkom.

Tabel 4.1: Opsomming van kuringstoepassings

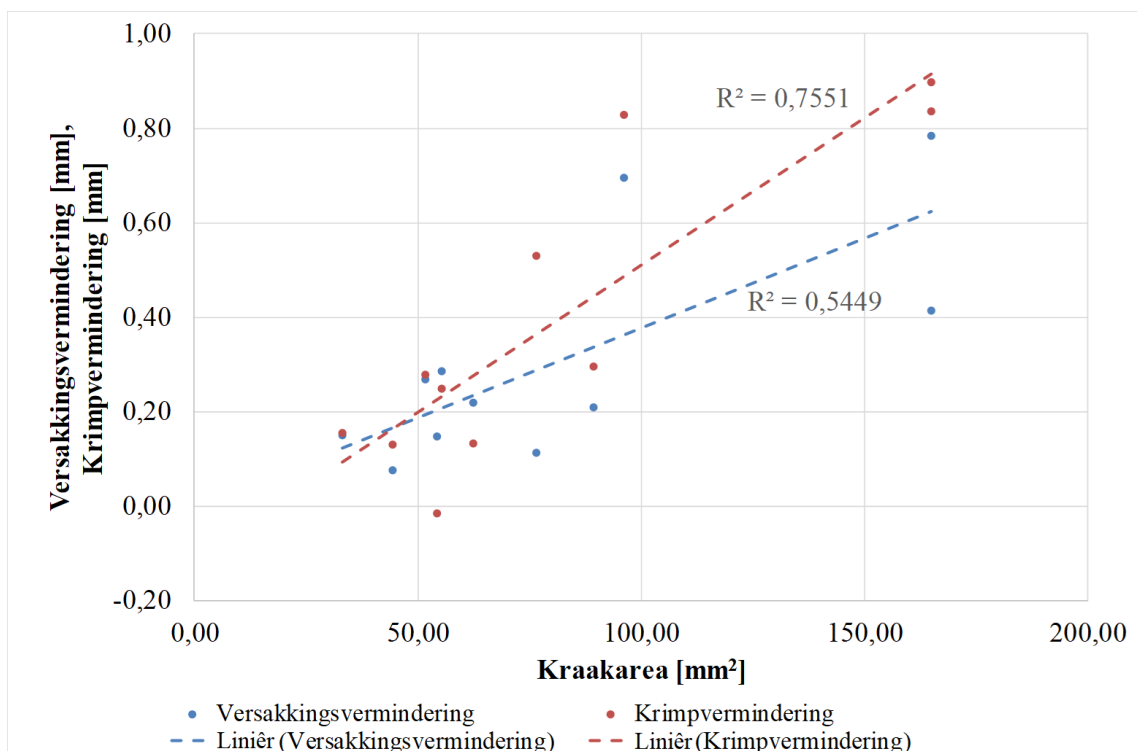
Toets	Versakkings-	Krimp		Kapillêre druk-	Kraakarea	
	vermindering [%]	Vertraging [min]	Vermindering [%]	vertraging [min]	Vertraging [min]	Vermindering [%]
<b>WET1</b>	18,9%	30	10,9%	-10	20	37,8%
<b>WET2</b>	18,0%	50	24,2%	50	20	54,1%
<b>WET3</b>	13,0%	70	12,6%	60	60	20,0%
<b>WET4</b>	12,6%	50	-1,2%	100	80	32,9%
<b>WET5</b>	6,4%	110	10,8%	100	20	26,9%
<b>WV5T</b>	59,8%	160	68,0%	210	60	58,3%
<b>WV5B</b>	67,5%	190	68,8%	210	160	100,0%
<b>KM1</b>	9,8%	50	43,5%	30	20	46,3%
<b>KM1</b>	35,7%	190	73,9%	50	160	100,0%
<b>KM3</b>	23,1%	70	22,9%	70	40	31,2%

Die resultate getoon in Tabel 4.1 dui 'n korrelasie tussen kraakarea en vermindering aan, asook kraakarea en vertraging van interne eienskappe wat krimp, versakking en kapillêre drukontwikkeling insluit. Hierdie korrelasie is verder ondersoek deur die vermindering en vertraging teenoor kraakontwikkeling aan te dui (Sien Figuur 4.26 en Figuur 4.27).

Figuur 4.26 toon dat daar wel 'n korrelasie tussen vermindering van krimp en versakking is, sowel as die grootte van die finale kraakarea. In die figuur is dit ook duidelik dat 'n groter vermindering van krimp en versakking, 'n kleiner en minder ernstige kraak veroorsaak. Die figuur sluit die tendenslyne en die R-kwadraatwaardes (wat ook bekend staan as die bepalingseffisiënt) vir die krimp- en versakkingsvermindering in.

Die R-kwadraatwaarde van die krimp (0.76) is groter as dié van die versakking (0.54). So ook is die gradiënt van die krimpregressielyn groter as dié van die versakking. Beide die R-kwadraatwaardes en genoemde gradiënt dui aan dat die vermindering van krimp meer effektiewe kraakvermindering tot gevolg het as dié van versakking.

Soortgelyke korrelasies kan waargeneem word tussen die vertraging van die krimp, kapillêre ontwikkeling en die kraakvorming soos gemeet teen die finale kraakarea. In ooreenstemming aan die tendenslyne in Figuur 4.26, toon die tendense in Figuur 4.27 'n lae R-kwadraatwaarde, met uitsonderlike lae waardes vir kapillêre ontwikkeling.

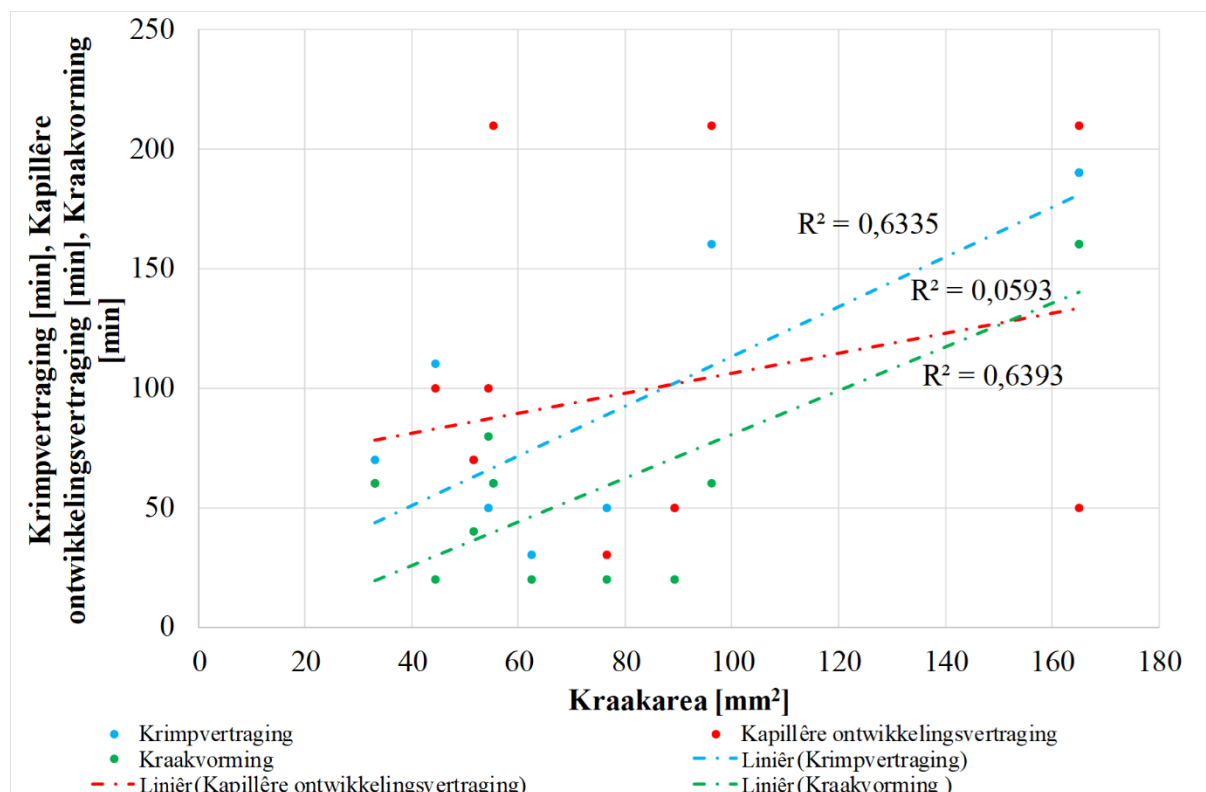


Figuur 4.26: Krimp- en versakkingsvermindering gemeet teen die finale kraakarea

Figuur 4.26 dui aan dat daar wél ‘n korrelasie tussen vertraging (veral dié van krimp en kraakvorming) en die finale kraakgrootte is. Die resultate toon dat hoe meer die krimp en vorming van krake vertraag word, hoe kleiner is die finale kraakgrootte. Die resultate toon ook dat die vertraging van die kapillêre ontwikkeling nie so ‘n beduidende invloed het soos dié van die krimp en die kraakvorming nie.

Dit moet in ag geneem word dat die R-kwadraatwaardes in beide Figuur 4.26 en Figuur 4.27 relatief laag is en slegs dien as ‘n voorstelling. Verdere toetse is dus nodig om hierdie waarnemings te bevestig.

Figuur 4.26 en Figuur 4.27 toon dat kuring ‘n duidelike invloed op die interne eienskappe wat ondersoek is en die gevolglike krake het. Die data verkry uit hierdie studie toon aan dat die vermindering en vertraging van krimp ‘n prominente invloed het op die vermindering van finale kraakarea, meer as: 1) die vermindering van versakking en 2) die vertraging van die kapillêre ontwikkeling. Enige kuring gemik om die beduidende krimp te verminder of te vertraag, behoort effektief die plastiese krimpkrake van beton te verminder.



Figuur 4.27: Krimp, kapillêre druk en eerste sigbare kraakvorming gemeet teen die finale kraakarea



## 5. Gevolgtrekkings en aanbevelings

Die doelwit van hierdie studie was om die invloed van vloeibare kuringsmetodes op die kraak van plastiese beton te ondersoek. Die volgende beduidende gevolgtrekkings kan gemaak word vanuit hierdie navorsing.

- Kuring het 'n direkte impak op die fundamentele interne eienskappe van plastiese krimpkrake, soos die krimp, versakking en kapillêre ontwikkeling. Die toepassing van kuring het 'n vermindering in die tempo van die plastiese krimpverskynsel of 'n stabilisering wat lei tot vertraging van die vorming van plastiese krimpkrake.
- Dit is duidelik dat kuring gedurende die plastiese fase, ongeag toepassingstyd, die intensiteit van krake verminder. Die resultate toon dat die totale voorkoming van plastiese krimpkrake moeilik is, veral in ernstige omstandighede soos toegepas in hierdie studie. In twee toetse het kuring wel oppervlakkraak voorkom.
- Die optimale enkelkuringstoepassing van waterkuring is toegepas net vóór die begin van beduidende krimp (WET2), voor enige krake gevorm het. Dit het 'n vermindering van 54% in die kraakarea getoon.
- Die resultate toon ook die belangrikheid en sensitiwiteit van kuringstoepassing op die optimale tyd. Toepasings vóór of ná die optimale tyd, het 'n laer vermindering van plastiese krake tot gevolg gehad, soos aangedui deur WET1 en WET3.
- Die veelvuldige waterkuringstoepassing (WV5B) was daarop gemik om die begin van die krimp te vertraag. Gedurende die toetsperiode het WV5B oppervlakkraak suksesvol voorkom.
- Die petroleumharsemulsie (KM2) toon die beste kraakvermindering en voorkom oppervlakkraak. Interne krake is egter onder die oppervlak, by die punt van beperking, waargeneem.

- Die finale grootte van die kraakareas ná kuring is gedomineer deur die krimpgedrag van die monster. Hoe nader die kuring dus aan die begin van die beduidende krimp toegepas word, hoe groter is die invloed van die kuring op die monster (WET2 en WV5B). Soortgelyk kan kraakvorming vertraag word deur die monster te kuur vóór die vorming van die eerste sigbare kraak. Hierdie invloed van die krimp en kraakvorming is bevestig deur enkelwaterkuring (WET2) en kuringsmiddels (KM1 en KM2), wat die kraakarea drasties beïnvloed het en die voorkoms vertraag het.
- ‘n Optimale kuringsmetode kan as ‘n debateerbare punt gesien word, maar kan dien as ‘n goeie basis vir meeste betontoepassings. Die argument staan as volg: Indien die metode in uiterste omstandighede suksesvol is, sal dit ook suksesvol wees in minder ernstige omstandighede. Die optimale waterkuring kan vir argumentsonthalwe as die veelvuldige kuring gesien word, met die doel om die krimp van die monster so laag as moontlik te hou. Dit is egter nie altyd moontlik om die krimp van die monster te meet soos in laboratoriumtoetsings nie.
- In vergelyking met die ander kuringsmetodes, kan petroleumharsemulsie as optimale kuringsmetode gesien word, aangesien dit die krimp mees suksesvol verminder het. Daarby is slegs net een toepassing nodig. Die middel moet egter omsigtig oorweeg word, aangesien goeie tydsberekening nodig is om die laag wat die middel vorm te verwyder.
- Die studie toon aan dat enige kuring wat gemik is op die vermindering en vertraging van die begin van krimp, plastiese krimpkrake van beton suksesvol verminder.

Die gebruik van hierdie kuringskemas en -middels in alledaagse betonpraktyk behoort effektief te wees en mag selfs plastiese krimpkrake voorkom indien dit reg toegepas word. Die gebruik van kuringsmiddels mag egter vooraftoetsing benodig, aangesien die moontlikheid bestaan dat die laag wat die middels vorm, die oppervlakafwerking en kwaliteit kan belemmer.

Hierdie studie ontsluit die moontlikheid van verder navorsing wat die volgende onderwerpe kan insluit:

- ‘n Verlengde toetstyd ná die varsfase-periode ten einde verdere kraakontwikkeling te ondersoek tot die punt waar die kraak heeltemal stabiliseer.

- Ondersoek die invloed van kuringshoeveelhede vir elke toetsperiode wat varieer van 10 minute tot op die punt waar bevogting na wateropdamming oorgaan.
- Varieer die toepassingstye en -hoeveelhede van die kuringsmiddels ten einde die gevolge van die middels te toets wanneer dit op 'n nie-aanbevole metode gebruik word.
- Ondersoek die invloed van verdunde kuringsmiddels as 'n moontlikheid om die bedekkingsoppervlakte per liter te vergroot.
- Ondersoek die invloed van kuring deur middel van plastiese bedekking en ander bedekkings.
- Ontwerp 'n vorm wat krake veroorsaak ten einde kapillêre druk te ondersoek met die verdere doel om kapillêre gedrag in kraakvormingsomstandighede waar te neem.
- 'n Nuwe metode en toetsgereedskap om die interne krake van beton te meet.
- Die ontwerp van 'n outomatiese kuringsstelsel wat op spesifieke interne eienskappe kan fokus, soos krimp, versakking, kapillêre druk of kraakvorming.

## 6. Bronnelys

ACI 224R-80 (1984) 'Control of Cracking in Concrete Structures'. doi: 10.3151/coj1975.34.8\_13.

ACI 305.1-06 (2007) 'Specification for Hot Weather Concreting', *Farmington Hills: American Concrete Institute*.

ACI 308R (2001) 'Guide to Curing Concrete', *Farmington Hills: American Concrete Institute*.

Al-Gahtani, A. S. (2010) 'Effect of curing methods on the properties of plain and blended cement concretes', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 24(3), pp. 308–314. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.036.

Almusallam, A. A., Maslehuddin, M., *et al.* (1998) 'Effects of mix proportions on plastic shrinkage cracking of concrete in hot environments'.

ASTM C 232 (2004) 'Standard Test Methods for Bleed of Concrete'.

ASTM C1579 (2013) 'Standard test method for evaluating plastic shrinkage cracking of restrained fiber reinforced concrete (using a steel form insert', *American Society for Testing and Materials*.

ASTM C171 (2016) 'Standard specification for sheet materials for curing concrete', *ASTM International*, i, pp. 1–2. doi: 10.1520/C0171-07.2.

Boshoff, W. P. & Combrinck, R. (2013) 'Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete'.

Cement concrete & aggregate Australia (2006) 'Curing of concrete'.

Cepuritis, R., Jacobsen, S., *et al.* (2017) 'Influence of crushed aggregate fines with micro-proportioned particle size distributions on rheology of cement paste', *Cement and Concrete Composites*. Elsevier Ltd, 80, pp. 64–79. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.02.012.

Chryso (2019) 'Curing agent data sheets', p. 2019.

Cohen, M. D., Olek, J. & Dolch, W. L. (1989) 'Mechanism of Plastic shrinkage cracking in Portland Cement and Portland Cement-Silica Fume Paste and Mortar'.

Combrinck, R. (2012) 'Plastic shrinkage cracking in conventional and low volume fibre

reinforced concrete’, (March). Available at: <http://scholar.sun.ac.za/handle/10019.1/6572>.

Combrinck, R. (2016) ‘Cracking of Plastic Concrete in Slab-Like Elements’, (March).

Combrinck, R., Kayondo, M., *et al.* (2019) ‘Effect of various liquid admixtures on cracking of plastic concrete’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 202, pp. 139–153. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.060.

Combrinck, R. & Boshoff, W. P. (2012) ‘Typical plastic shrinkage cracking behaviour of concrete’.

Combrinck, R. & Boshoff, W. P. (2013) ‘Typical plastic shrinkage cracking behaviour of concrete’.

Combrinck, R. & Boshoff, W. P. (2019) ‘Tensile properties of plastic concrete and the influence of temperature and cyclic loading’, *Cement and Concrete Composites*, 97(March 2017), pp. 300–311. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.01.002.

Combrinck, R., Steyl, L. & Boshoff, W. P. (2018) ‘Interaction between settlement and shrinkage cracking in plastic concrete’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 185, pp. 1–11. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.028.

Emeritus, T. (1990) ‘Cement chemistry’.

Ghourchian, S., Wyrzykowski, M. & Lura, P. (2016) ‘The bleeding test: A simple method for obtaining the permeability and bulk modulus of fresh concrete’.

<https://www.youtube.com/user/WarunaThejana> (2018) *Civil Engineering BITZ!*

Jin, H., Guohua, J., *et al.* (2014) ‘Influence of early-age moist curing time on the late-age properties of concretes with different binders’, 21(December), pp. 677–682.

Jones, M. R. & McCarthy, A. (2006) ‘Heat of hydration in foamed concrete : Effect of mix constituents and plastic density’, 36, pp. 1032–1041. doi: 10.1016/j.cemconres.2006.01.011.

Josserand, J. & de Larrard, F. (2004) ‘A method for concrete bleeding measurement’, *Materials and Structures*, 37(December), pp. 666–670.

Khan, M. Y. (2018) ‘The tensile material properties of plastic concrete and the influence on plastic cracking’, (March).

- Kosmatka, S. & Wilson, M. (2002) 'Design and Control of Concrete Mixtures', (69973).
- Krönlof, A., Leivo, M. & Sipari, P. (1995) 'Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh mortar'.
- Kwak, H.-G. & Ha, S. (2006) 'Plastic shrinkage cracking in concrete slabs, Part I: A numerical model'.
- Kwak, H. G. & Ha, S. J. (2008) 'Bleeding and evaporation in concrete slabs with sequential placement', *Magazine of Concrete Research*, 60(10), pp. 769–783. doi: 10.1680/mac.2008.60.10.769.
- Leemann, A., Nygaard, P. & Lura, P. (2013) 'Impact of admixtures on the plastic shrinkage cracking of self-compaction concrete'.
- Lura, P., Pease, B., *et al.* (2007) 'Influence of shrinkage-reducing admixtures on the development of plastic shrinkage cracks'.
- Makarieva, A., Gorshkov, V., *et al.* (2010) 'Where do winds come from? A new theory on how water vapor condensation influences atmospheric pressure and dynamics', (April). doi: 10.5194/acp-13-1039-2013.
- McCarter, W. J., Chrisp, T. M., *et al.* (2012) 'Setting, hardening and moisture-loss within a cement-based backfill grout under simulated repository environments', *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. Elsevier Ltd, 45(3), pp. 235–242. doi: 10.1016/j.measurement.2011.12.014.
- Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. (2006) *Concrete microstructure, properties and materials*.
- Merriam-Webster (2016) 'Merriam-Webster dictionary'.
- Mora-Ruacho, J., Gettu, R. & Aguado, A. (2008) 'Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete'.
- Olivier, G., Combrinck, R., *et al.* (2018) 'Combined effect of nano-silica, super absorbent polymers, and synthetic fibres on plastic shrinkage cracking in concrete.pdf'.
- Otieno, M. B., Alexander, M. G. & Beushausen, H.-D. (2010) 'Corrosion in cracked and uncracked concrete – influence of crack width, concrete quality and crack reopening', 9831(6), pp. 393–404. doi: 10.1680/mac.2010.62.6.393.

Penttala, V. (2015) 'MECHANISM OF INTERNAL FREEZE-THAW DAMAGE IN CONCRETE MECHANISM OF INTERNAL FREEZE-THAW DAMAGE IN', (December 2007).

Powers, T. C. (1968) 'The Properties of Fresh Concrete'.

Qi, C. (2003) 'Quantitative assessment of plastic shrinkage cracking and its effect on the corrosion of steel reinforcement'.

Le Roux, B. D. (2014) 'Influence of admixtures on the early age plastic cracking of concrete', (March), pp. 1–58.

SANS 3001-CO3-1 (2015) 'SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD Civil engineering test methods Part CO3-1 : Concrete durability index testing — Preparation of test specimens'.

SANS 50196-3 (2006) 'SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD Methods of testing cement Part 3 : Determination of setting times and soundness', pp. 1–5.

SANS 5862-1 (2006) 'SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD Concrete tests — Consistence of freshly mixed concrete — Slump test'.

SANS 5863 (2006) 'SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD Concrete tests — Compressive strength of hardened concrete', pp. 2–6.

Sant, G., Angeles, L., *et al.* (2009) 'Detecting the Fluid-to-Solid Transition in Cement Pastes', (June).

Schmidt, M. & Slowik, V. (2009) 'Capillary shrinkage cracking and its prevention by controlled concrete curing', (1), pp. 1–8.

Slowik, V., Hubner, T., *et al.* (2009) 'Simulation of Capillary shrinkage cracking in cement-like materials'.

Slowik, V., Schlattner, E. & Klink, T. (2004) 'Experimental investigation into early age shrinkage of cement paste by using fibre Bragg gratings', 26, pp. 473–479. doi: 10.1016/S0958-9465(03)00077-5.

Slowik, V., Schmidt, M. & Fritzsche, R. (2008) 'Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value'.

Sonebi, M., Cevik, A., *et al.* (2016) 'Modelling the fresh properties of self-compacting concrete using support vector machine approach', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 106, pp. 55–64. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.035.

Steyl, L. (2016) 'Plastic cracking of concrete and the effect of depth', *Stellenbosch: The University of Stellenbosch. (MSc thesis)*, (December).

Uno, P. J. (1998) 'Plastic Shrinkage Cracking and Evaporation Formulas', (July 1998).

Wittmann, F. H. (1975) 'On the action of Capillary Pressure in Fresh Concrete'.

Wyrzykowski, M., Trtik, P., *et al.* (2015) 'Cement and Concrete Research Plastic shrinkage of mortars with shrinkage reducing admixture and lightweight aggregates studied by neutron tomography', *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 73, pp. 238–245. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.03.013.

Yim, H. J., Kim, J. H., *et al.* (2013) 'Evaluation of internal bleeding in concrete using self-weight bleeding test'.



## A. Bylaag A: Ongekuurde

Tabel A.1: Kraakarea van ongekuurde monster

Monster	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0,90	23,06	108,51	154,98	178,16	178,76	179,35	194,25	205,70
2	0	0	0	0	0	1,80	2,10	24,10	54,92	86,67	87,85	89,02	90,08	91,63
3	0	0	0	0	0	0	0	1,80	90,25	131,19	147,68	147,91	160,96	165,66
4	0	0	0	0	0	0	0	57,91	94,43	113,97	114,16	125,76	130,31	160,50
5	0	0	0	0	0	0	0	81,42	111,77	117,35	149,66	161,77	169,27	176,08
6	0	0	0	0	0	0	0	71,21	93,78	99,89	98,73	104,63	127,50	130,28
7	0	0	0	0	0	0	31,30	93,20	110,68	111,25	123,74	125,26	130,08	151,32
8	0	0	0	0	0	0	59,37	103,26	137,46	143,07	153,54	160,35	165,66	174,32
GEM.	0	0	0	0	0	0,34	14,48	67,68	106,03	122,69	131,76	136,76	146,01	156,94
STD	0	0	0	0	0	0,63	20,50	35,57	28,69	26,50	28,83	28,91	30,51	31,90

Tabel A.2: Kapillêre druk van ongekuurde monster

Min	1	2	GEM.
0	0	0	0
10	0,02	0,03	0,03
20	0,04	0,06	0,05
30	0,06	0,09	0,08
40	0,08	0,12	0,10
50	0,09	0,17	0,13
60	0,12	0,22	0,17
70	0,18	0,31	0,25
80	0,26	0,42	0,34
90	0,37	0,55	0,46
100	0,51	0,71	0,61
110	0,63	0,89	0,76
120	0,81	1,05	0,93
130	1,08	0	1,19
140	1,44	0	1,36
150	1,65	0	1,36
160	1,65	0	1,36
170	1,65	0	1,36
180	0	0	0
190	0	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0

Tabel A.3: Versakking en krimp van ongekuurde monster

Min	Versakking						Min	Krimp				
	1	2	3	4	GEM.	STD		1	2	3	GEM.	STD
0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,09	0,11	0,12	0,11	<b>0,11</b>	<b>0,01</b>	5	0,01	0,01	0,02	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
10	0,20	0,16	0,26	0,23	<b>0,21</b>	<b>0,04</b>	10	0,02	0,02	0,03	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
15	0,25	0,19	0,34	0,29	<b>0,27</b>	<b>0,05</b>	15	0,02	0,02	0,04	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>
20	0,31	0,22	0,43	0,39	<b>0,34</b>	<b>0,08</b>	20	0,03	0,03	0,05	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>
25	0,35	0,24	0,48	0,44	<b>0,38</b>	<b>0,09</b>	25	0,03	0,03	0,05	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>
30	0,40	0,26	0,55	0,52	<b>0,43</b>	<b>0,11</b>	30	0,04	0,03	0,05	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>
35	0,43	0,28	0,59	0,57	<b>0,47</b>	<b>0,13</b>	35	0,04	0,03	0,06	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>
40	0,47	0,30	0,64	0,66	<b>0,52</b>	<b>0,14</b>	40	0,05	0,04	0,06	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>
45	0,51	0,32	0,66	0,71	<b>0,55</b>	<b>0,15</b>	45	0,05	0,04	0,07	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>
50	0,57	0,34	0,69	0,79	<b>0,59</b>	<b>0,17</b>	50	0,05	0,04	0,07	<b>0,06</b>	<b>0,01</b>
55	0,62	0,36	0,70	0,83	<b>0,63</b>	<b>0,17</b>	55	0,06	0,04	0,08	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
60	0,67	0,39	0,73	0,90	<b>0,67</b>	<b>0,18</b>	60	0,06	0,04	0,08	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
65	0,71	0,42	0,76	0,95	<b>0,71</b>	<b>0,19</b>	65	0,06	0,04	0,09	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
70	0,77	0,46	0,84	1,03	<b>0,77</b>	<b>0,21</b>	70	0,08	0,04	0,12	<b>0,08</b>	<b>0,03</b>
75	0,81	0,47	0,89	1,08	<b>0,81</b>	<b>0,22</b>	75	0,10	0,04	0,19	<b>0,11</b>	<b>0,06</b>
80	0,85	0,50	0,98	1,12	<b>0,86</b>	<b>0,23</b>	80	0,14	0,04	0,29	<b>0,16</b>	<b>0,10</b>
85	0,88	0,52	1,04	1,14	<b>0,90</b>	<b>0,24</b>	85	0,17	0,04	0,35	<b>0,19</b>	<b>0,13</b>
90	0,92	0,55	1,13	1,17	<b>0,94</b>	<b>0,24</b>	90	0,22	0,06	0,43	<b>0,24</b>	<b>0,15</b>
95	0,93	0,57	1,17	1,19	<b>0,97</b>	<b>0,25</b>	95	0,28	0,12	0,50	<b>0,30</b>	<b>0,16</b>
100	0,96	0,59	1,23	1,21	<b>1,00</b>	<b>0,26</b>	100	0,35	0,20	0,60	<b>0,38</b>	<b>0,16</b>
105	0,97	0,60	1,25	1,23	<b>1,01</b>	<b>0,26</b>	105	0,39	0,24	0,63	<b>0,42</b>	<b>0,16</b>
110	1,00	0,62	1,27	1,26	<b>1,04</b>	<b>0,26</b>	110	0,44	0,29	0,67	<b>0,47</b>	<b>0,16</b>
115	1,02	0,64	1,29	1,27	<b>1,05</b>	<b>0,26</b>	115	0,47	0,33	0,70	<b>0,50</b>	<b>0,15</b>
120	1,04	0,65	1,31	1,28	<b>1,07</b>	<b>0,26</b>	120	0,52	0,37	0,74	<b>0,54</b>	<b>0,15</b>
125	1,04	0,67	1,32	1,30	<b>1,08</b>	<b>0,27</b>	125	0,56	0,40	0,76	<b>0,57</b>	<b>0,15</b>
130	1,04	0,69	1,35	1,31	<b>1,09</b>	<b>0,26</b>	130	0,61	0,45	0,81	<b>0,62</b>	<b>0,15</b>
135	1,04	0,70	1,36	1,32	<b>1,10</b>	<b>0,27</b>	135	0,66	0,49	0,86	<b>0,67</b>	<b>0,15</b>
140	1,04	0,71	1,39	1,32	<b>1,11</b>	<b>0,27</b>	140	0,74	0,56	0,95	<b>0,75</b>	<b>0,16</b>
145	1,04	0,71	1,41	1,32	<b>1,12</b>	<b>0,27</b>	145	0,79	0,62	1,01	<b>0,80</b>	<b>0,16</b>
150	1,05	0,71	1,43	1,31	<b>1,13</b>	<b>0,27</b>	150	0,88	0,70	1,07	<b>0,88</b>	<b>0,15</b>
155	1,06	0,72	1,43	1,31	<b>1,13</b>	<b>0,27</b>	155	0,94	0,75	1,11	<b>0,93</b>	<b>0,14</b>
160	1,07	0,72	1,43	1,31	<b>1,13</b>	<b>0,27</b>	160	1,01	0,83	1,16	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>
165	1,07	0,73	1,43	1,31	<b>1,13</b>	<b>0,27</b>	165	1,05	0,88	1,19	<b>1,04</b>	<b>0,12</b>
170	1,08	0,74	1,43	1,31	<b>1,14</b>	<b>0,26</b>	170	1,10	0,95	1,21	<b>1,09</b>	<b>0,11</b>
175	1,08	0,74	1,43	1,31	<b>1,14</b>	<b>0,26</b>	175	1,12	0,99	1,22	<b>1,11</b>	<b>0,09</b>
180	1,08	0,75	1,44	1,31	<b>1,14</b>	<b>0,26</b>	180	1,13	1,04	1,23	<b>1,14</b>	<b>0,08</b>
185	1,08	0,75	1,44	1,31	<b>1,15</b>	<b>0,26</b>	185	1,14	1,06	1,24	<b>1,15</b>	<b>0,07</b>
190	1,08	0,75	1,45	1,31	<b>1,15</b>	<b>0,26</b>	190	1,15	1,08	1,24	<b>1,16</b>	<b>0,07</b>
195	1,08	0,76	1,45	1,31	<b>1,15</b>	<b>0,26</b>	195	1,16	1,08	1,25	<b>1,16</b>	<b>0,07</b>
200	1,08	0,76	1,46	1,31	<b>1,15</b>	<b>0,26</b>	200	1,16	1,09	1,25	<b>1,17</b>	<b>0,07</b>
205	1,08	0,76	1,46	1,31	<b>1,15</b>	<b>0,26</b>	205	1,17	1,10	1,26	<b>1,17</b>	<b>0,06</b>
210	1,08	0,76	1,46	1,31	<b>1,15</b>	<b>0,26</b>	210	1,18	1,10	1,26	<b>1,18</b>	<b>0,06</b>
215	1,08	0,77	1,46	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	215	1,18	1,11	1,26	<b>1,18</b>	<b>0,06</b>
220	1,08	0,77	1,46	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	220	1,18	1,11	1,26	<b>1,19</b>	<b>0,06</b>
225	1,08	0,77	1,46	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	225	1,19	1,11	1,27	<b>1,19</b>	<b>0,06</b>
230	1,08	0,77	1,47	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	230	1,19	1,12	1,27	<b>1,19</b>	<b>0,06</b>
235	1,08	0,77	1,47	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	235	1,19	1,12	1,27	<b>1,20</b>	<b>0,06</b>
240	1,08	0,77	1,47	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	240	1,20	1,12	1,27	<b>1,20</b>	<b>0,06</b>
245	1,08	0,77	1,47	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	245	1,20	1,13	1,27	<b>1,20</b>	<b>0,06</b>
250	1,08	0,78	1,47	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	250	1,20	1,13	1,28	<b>1,20</b>	<b>0,06</b>
255	1,08	0,77	1,47	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	255	1,21	1,13	1,28	<b>1,21</b>	<b>0,06</b>
260	1,08	0,77	1,47	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	260	1,21	1,13	1,29	<b>1,21</b>	<b>0,06</b>

## B. Bylaag B: WET1

Tabel B.1: Kraakarea van WET1

Monster	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	10,7	62,3723	85,3048	97,6106	100,124	102,6373
2	0	0	0	0	0	0	0,8	18,2	36,604	68,4672	96,6264	102,6264	103,9264	105,2264
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1,1	24,8233	65,4879	74,0963	82,7047	83,8
4	0	0	0	0	0	0	0	1,3	1,9	63,912	101,032	108,304	115,576	118,82
GEM.	0	0	0	0	0	0	0,20	4,88	12,58	54,89	87,11	95,66	100,58	102,62
STD	0	0	0	0	0	0	0,35	7,71	14,37	17,51	13,74	13,01	11,79	12,48

Tabel B.2: Kapillêre druk van WET1

Min	1	2	GEM.
0	0	0	0
10	0,02	0,04	0,03
20	0,04	0,06	0,05
30	0,06	0,09	0,08
40	0,04	0,04	0,04
50	0,07	0,08	0,08
60	0,08	0,12	0,10
70	0,10	0,17	0,14
80	0,14	0,21	0,18
90	0,20	0,27	0,24
100	0,31	0,39	0,35
110	0,46	0,55	0,51
120	0,67	0,72	0,70
130	0	0,95	0,89
140	0	0	0
150	0	0	0
160	0	0	0
170	0	0	0
180	0	0	0
190	0	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0

Tabel B.3: Versakking en krimp van WET1

Min	Versakking						Min	Krimp					
	1	2	3	4	GEM.	STD		1	2	3	4	GEM.	STD
0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,06	0,05	0,01	0,04	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	5	0,00	0,01	0,04	0,02	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
10	0,13	0,12	0,01	0,10	<b>0,09</b>	<b>0,05</b>	10	0,01	0,02	0,07	0,04	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>
15	0,18	0,17	0,03	0,20	<b>0,14</b>	<b>0,07</b>	15	0,01	0,03	0,07	0,04	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>
20	0,23	0,24	0,09	0,23	<b>0,20</b>	<b>0,06</b>	20	0,00	0,03	0,08	0,05	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>
25	0,26	0,28	0,14	0,23	<b>0,23</b>	<b>0,06</b>	25	0,00	0,04	0,08	0,06	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>
30	0,32	0,35	0,21	0,25	<b>0,28</b>	<b>0,05</b>	30	0,00	0,04	0,08	0,06	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>
35	0,31	0,13	0,28	0,36	<b>0,27</b>	<b>0,09</b>	35	0,01	0,05	0,08	0,07	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>
40	0,21	0,18	0,36	0,18	<b>0,23</b>	<b>0,07</b>	40	0,01	0,05	0,09	0,07	<b>0,06</b>	<b>0,03</b>
45	0,30	0,21	0,33	0,23	<b>0,27</b>	<b>0,05</b>	45	0,02	0,05	0,09	0,08	<b>0,06</b>	<b>0,03</b>
50	0,37	0,24	0,33	0,35	<b>0,32</b>	<b>0,05</b>	50	0,02	0,05	0,10	0,08	<b>0,06</b>	<b>0,03</b>
55	0,42	0,34	0,33	0,36	<b>0,36</b>	<b>0,04</b>	55	0,03	0,06	0,10	0,08	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>
60	0,50	0,40	0,33	0,36	<b>0,40</b>	<b>0,06</b>	60	0,04	0,06	0,10	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>
65	0,51	0,41	0,33	0,36	<b>0,40</b>	<b>0,07</b>	65	0,05	0,06	0,10	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
70	0,52	0,41	0,37	0,36	<b>0,42</b>	<b>0,07</b>	70	0,06	0,06	0,10	0,09	<b>0,08</b>	<b>0,02</b>
75	0,53	0,41	0,40	0,36	<b>0,42</b>	<b>0,06</b>	75	0,06	0,06	0,10	0,09	<b>0,08</b>	<b>0,02</b>
80	0,54	0,42	0,44	0,36	<b>0,44</b>	<b>0,07</b>	80	0,06	0,05	0,10	0,09	<b>0,08</b>	<b>0,02</b>
85	0,56	0,46	0,48	0,36	<b>0,47</b>	<b>0,07</b>	85	0,06	0,05	0,09	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
90	0,61	0,54	0,54	0,39	<b>0,52</b>	<b>0,08</b>	90	0,07	0,05	0,08	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
95	0,65	0,60	0,59	0,42	<b>0,57</b>	<b>0,09</b>	95	0,07	0,04	0,07	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
100	0,70	0,69	0,69	0,47	<b>0,64</b>	<b>0,10</b>	100	0,06	0,04	0,06	0,08	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
105	0,72	0,74	0,75	0,50	<b>0,68</b>	<b>0,10</b>	105	0,12	0,04	0,05	0,08	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>
110	0,76	0,77	0,81	0,55	<b>0,72</b>	<b>0,10</b>	110	0,23	0,07	0,18	0,11	<b>0,15</b>	<b>0,06</b>
115	0,78	0,80	0,84	0,58	<b>0,75</b>	<b>0,10</b>	115	0,30	0,12	0,28	0,16	<b>0,22</b>	<b>0,08</b>
120	0,81	0,82	0,88	0,62	<b>0,78</b>	<b>0,10</b>	120	0,39	0,21	0,39	0,25	<b>0,31</b>	<b>0,08</b>
125	0,83	0,84	0,92	0,64	<b>0,81</b>	<b>0,10</b>	125	0,44	0,26	0,44	0,34	<b>0,37</b>	<b>0,08</b>
130	0,85	0,86	0,96	0,67	<b>0,84</b>	<b>0,11</b>	130	0,50	0,31	0,48	0,44	<b>0,43</b>	<b>0,07</b>
135	0,86	0,88	0,99	0,69	<b>0,86</b>	<b>0,11</b>	135	0,53	0,34	0,52	0,48	<b>0,47</b>	<b>0,08</b>
140	0,89	0,90	1,03	0,72	<b>0,89</b>	<b>0,11</b>	140	0,60	0,41	0,58	0,54	<b>0,53</b>	<b>0,08</b>
145	0,90	0,92	1,05	0,73	<b>0,90</b>	<b>0,11</b>	145	0,65	0,45	0,63	0,58	<b>0,58</b>	<b>0,08</b>
150	0,92	0,94	1,07	0,76	<b>0,92</b>	<b>0,11</b>	150	0,78	0,52	0,71	0,65	<b>0,66</b>	<b>0,09</b>
155	0,93	0,96	1,07	0,77	<b>0,93</b>	<b>0,11</b>	155	0,83	0,57	0,76	0,70	<b>0,71</b>	<b>0,09</b>
160	0,94	0,96	1,07	0,78	<b>0,94</b>	<b>0,10</b>	160	0,90	0,65	0,84	0,77	<b>0,79</b>	<b>0,09</b>
165	0,92	0,96	1,07	0,78	<b>0,93</b>	<b>0,10</b>	165	0,95	0,72	0,88	0,82	<b>0,84</b>	<b>0,09</b>
170	0,90	0,93	1,09	0,78	<b>0,92</b>	<b>0,11</b>	170	1,04	0,81	0,94	0,89	<b>0,92</b>	<b>0,08</b>
175	0,90	0,93	1,10	0,78	<b>0,93</b>	<b>0,11</b>	175	1,08	0,86	0,97	0,94	<b>0,96</b>	<b>0,08</b>
180	0,90	0,93	1,11	0,78	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	180	1,12	0,90	0,99	0,99	<b>1,00</b>	<b>0,08</b>
185	0,90	0,94	1,11	0,78	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	185	1,14	0,91	0,99	1,00	<b>1,01</b>	<b>0,08</b>
190	0,90	0,94	1,11	0,78	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	190	1,16	0,93	1,00	1,01	<b>1,02</b>	<b>0,08</b>
195	0,90	0,94	1,12	0,78	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	195	1,16	0,93	1,00	1,02	<b>1,03</b>	<b>0,08</b>
200	0,90	0,94	1,12	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	200	1,17	0,94	1,01	1,03	<b>1,04</b>	<b>0,08</b>
205	0,90	0,94	1,12	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	205	1,18	0,95	1,01	1,03	<b>1,04</b>	<b>0,08</b>
210	0,90	0,94	1,12	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	210	1,18	0,95	1,02	1,04	<b>1,05</b>	<b>0,08</b>
215	0,90	0,94	1,12	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	215	1,19	0,96	1,02	1,04	<b>1,05</b>	<b>0,08</b>
220	0,90	0,94	1,12	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	220	1,19	0,96	1,02	1,04	<b>1,05</b>	<b>0,08</b>
225	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	225	1,19	0,97	1,03	1,05	<b>1,06</b>	<b>0,08</b>
230	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	230	1,20	0,97	1,03	1,05	<b>1,06</b>	<b>0,08</b>
235	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	235	1,20	0,97	1,03	1,05	<b>1,06</b>	<b>0,08</b>
240	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	240	1,20	0,98	1,03	1,05	<b>1,07</b>	<b>0,08</b>
245	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	245	1,20	0,98	1,03	1,06	<b>1,07</b>	<b>0,08</b>
250	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	250	1,21	0,98	1,03	1,06	<b>1,07</b>	<b>0,08</b>
255	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	255	1,21	0,98	1,04	1,06	<b>1,07</b>	<b>0,08</b>
260	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	260	1,21	0,99	1,04	1,06	<b>1,08</b>	<b>0,08</b>

## C. Bylaag C: WET2

Tabel C.1: Kraakarea van WET2

Monster	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	8,3	37,2318	42,5318	55,662	68,9144	70,3318
2	0	0	0	0	0	0	0,7	11,4	30,8126	63,3025	78,3336	81,6403	87,8907	96,2344
3	0	0	0	0	0	0	1	10,7	20,0992	38,1336	52,9424	53,1368	54,2368	58,1424
4	0	0	0	0	0	0	0,5	4,4235	24,3485	69,619	70,419	75,109	77,4385	78,513
GEM.	0	0	0	0	0	0	0,55	6,63	20,89	52,07	61,06	66,39	72,12	75,81
STD	0	0	0	0	0	0	0,36	4,69	8,21	14,56	14,10	12,24	12,32	13,84

Tabel C.2: Kapillêre druk van WET2

Min	1	2	GEM.
0	0	0	0
10	0,02	0,02	0,02
20	0,03	0,03	0,03
30	0,03	0,05	0,04
40	0,03	0,08	0,06
50	0,03	0,14	0,09
60	0,03	0,25	0,14
70	0,13	0,31	0,22
80	0,13	0,10	0,12
90	0,09	0,13	0,11
100	0,22	0,28	0,25
110	0,51	0,47	0,49
120	0,92	1,02	0,97
130	1,49	1,30	1,40
140	1,71	1,66	1,69
150	1,71	1,66	1,69
160	0	0	0
170	0	0	0
180	0	0	0
190	0	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0

Tabel C.3: Versakking en krimp van WET2

Min	Versakking						Min	Krimp					
	1	2	3	4	GEM.	STD		1	2	3	4	GEM.	STD
0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,06	0,05	0,06	0,05	<b>0,06</b>	<b>0,00</b>	5	0,01	0,03	0,03	0,03	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>
10	0,13	0,10	0,12	0,10	<b>0,11</b>	<b>0,01</b>	10	0,02	0,05	0,06	0,06	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>
15	0,18	0,13	0,15	0,13	<b>0,15</b>	<b>0,02</b>	15	0,02	0,05	0,06	0,06	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>
20	0,24	0,18	0,19	0,17	<b>0,20</b>	<b>0,03</b>	20	0,02	0,05	0,06	0,07	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>
25	0,28	0,21	0,21	0,20	<b>0,23</b>	<b>0,03</b>	25	0,02	0,05	0,06	0,07	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>
30	0,35	0,26	0,23	0,24	<b>0,27</b>	<b>0,05</b>	30	0,01	0,05	0,06	0,08	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>
35	0,39	0,30	0,25	0,27	<b>0,30</b>	<b>0,06</b>	35	0,01	0,04	0,05	0,08	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>
40	0,46	0,37	0,28	0,31	<b>0,35</b>	<b>0,07</b>	40	0,02	0,03	0,05	0,08	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>
45	0,51	0,41	0,30	0,34	<b>0,39</b>	<b>0,08</b>	45	0,02	0,03	0,04	0,08	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>
50	0,58	0,48	0,32	0,39	<b>0,44</b>	<b>0,10</b>	50	0,03	0,02	0,03	0,09	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>
55	0,63	0,53	0,33	0,43	<b>0,48</b>	<b>0,11</b>	55	0,04	0,02	0,03	0,09	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>
60	0,71	0,61	0,36	0,49	<b>0,54</b>	<b>0,13</b>	60	0,04	0,03	0,03	0,10	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>
65	0,75	0,66	0,38	0,53	<b>0,58</b>	<b>0,14</b>	65	0,03	0,04	0,05	0,10	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>
70	0,89	0,76	0,42	0,60	<b>0,67</b>	<b>0,18</b>	70	0,14	0,07	0,07	0,10	<b>0,09</b>	<b>0,03</b>
75	0,93	0,66	0,45	0,66	<b>0,68</b>	<b>0,17</b>	75	0,18	0,14	0,07	0,10	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>
80	0,64	0,59	0,52	0,62	<b>0,59</b>	<b>0,05</b>	80	0,22	0,12	0,10	0,11	<b>0,14</b>	<b>0,05</b>
85	0,67	0,58	0,39	0,55	<b>0,55</b>	<b>0,10</b>	85	0,21	0,13	0,15	0,11	<b>0,15</b>	<b>0,04</b>
90	0,67	0,55	0,40	0,59	<b>0,55</b>	<b>0,10</b>	90	0,22	0,13	0,15	0,11	<b>0,15</b>	<b>0,04</b>
95	0,67	0,57	0,40	0,62	<b>0,56</b>	<b>0,10</b>	95	0,22	0,14	0,14	0,11	<b>0,15</b>	<b>0,04</b>
100	0,75	0,59	0,44	0,63	<b>0,60</b>	<b>0,11</b>	100	0,22	0,14	0,15	0,12	<b>0,16</b>	<b>0,04</b>
105	0,80	0,61	0,47	0,65	<b>0,63</b>	<b>0,12</b>	105	0,23	0,14	0,15	0,12	<b>0,16</b>	<b>0,04</b>
110	0,94	0,75	0,48	0,69	<b>0,72</b>	<b>0,16</b>	110	0,25	0,14	0,16	0,12	<b>0,17</b>	<b>0,05</b>
115	0,99	0,81	0,54	0,71	<b>0,76</b>	<b>0,16</b>	115	0,30	0,14	0,18	0,13	<b>0,19</b>	<b>0,07</b>
120	1,03	0,86	0,63	0,77	<b>0,82</b>	<b>0,15</b>	120	0,40	0,16	0,23	0,16	<b>0,24</b>	<b>0,10</b>
125	1,04	0,88	0,66	0,80	<b>0,85</b>	<b>0,14</b>	125	0,41	0,24	0,29	0,21	<b>0,29</b>	<b>0,08</b>
130	1,07	0,93	0,69	0,85	<b>0,88</b>	<b>0,14</b>	130	0,47	0,35	0,39	0,29	<b>0,38</b>	<b>0,06</b>
135	1,08	0,95	0,71	0,88	<b>0,91</b>	<b>0,13</b>	135	0,51	0,38	0,44	0,37	<b>0,42</b>	<b>0,06</b>
140	1,09	0,98	0,74	0,92	<b>0,93</b>	<b>0,13</b>	140	0,57	0,44	0,52	0,44	<b>0,49</b>	<b>0,06</b>
145	1,09	1,00	0,75	0,95	<b>0,95</b>	<b>0,12</b>	145	0,62	0,49	0,57	0,49	<b>0,54</b>	<b>0,06</b>
150	1,06	1,02	0,75	0,97	<b>0,95</b>	<b>0,12</b>	150	0,70	0,56	0,67	0,58	<b>0,63</b>	<b>0,06</b>
155	1,05	1,02	0,73	0,97	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	155	0,75	0,61	0,73	0,63	<b>0,68</b>	<b>0,06</b>
160	1,04	0,99	0,72	0,96	<b>0,93</b>	<b>0,13</b>	160	0,80	0,69	0,80	0,70	<b>0,75</b>	<b>0,05</b>
165	1,04	0,98	0,71	0,96	<b>0,92</b>	<b>0,12</b>	165	0,82	0,73	0,84	0,74	<b>0,78</b>	<b>0,05</b>
170	1,04	0,97	0,72	0,96	<b>0,92</b>	<b>0,12</b>	170	0,85	0,77	0,89	0,80	<b>0,83</b>	<b>0,04</b>
175	1,04	0,97	0,72	0,96	<b>0,92</b>	<b>0,12</b>	175	0,86	0,79	0,91	0,82	<b>0,85</b>	<b>0,04</b>
180	1,04	0,97	0,72	0,97	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	180	0,87	0,81	0,93	0,85	<b>0,87</b>	<b>0,04</b>
185	1,04	0,97	0,72	0,97	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	185	0,88	0,82	0,93	0,86	<b>0,87</b>	<b>0,04</b>
190	1,04	0,97	0,73	0,97	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	190	0,89	0,83	0,94	0,87	<b>0,88</b>	<b>0,04</b>
195	1,04	0,97	0,73	0,97	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	195	0,89	0,84	0,95	0,88	<b>0,89</b>	<b>0,04</b>
200	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	200	0,90	0,84	0,95	0,88	<b>0,89</b>	<b>0,04</b>
205	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	205	0,90	0,85	0,95	0,88	<b>0,90</b>	<b>0,04</b>
210	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	210	0,90	0,85	0,96	0,89	<b>0,90</b>	<b>0,04</b>
215	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	215	0,91	0,85	0,96	0,89	<b>0,90</b>	<b>0,04</b>
220	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	220	0,91	0,86	0,96	0,89	<b>0,91</b>	<b>0,04</b>
225	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	225	0,91	0,86	0,97	0,89	<b>0,91</b>	<b>0,04</b>
230	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	230	0,92	0,86	0,97	0,90	<b>0,91</b>	<b>0,04</b>
235	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	235	0,92	0,86	0,97	0,90	<b>0,91</b>	<b>0,04</b>
240	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	240	0,92	0,86	0,97	0,90	<b>0,91</b>	<b>0,04</b>
245	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	245	0,92	0,86	0,97	0,90	<b>0,91</b>	<b>0,04</b>
250	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	250	0,92	0,87	0,98	0,90	<b>0,92</b>	<b>0,04</b>
255	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	255	0,93	0,87	0,98	0,90	<b>0,92</b>	<b>0,04</b>
260	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	260	0,93	0,87	0,98	0,90	<b>0,92</b>	<b>0,04</b>

## D. Bylaag D: WET3

Tabel D.1: Kraakarea van WET3

Monster	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	49,6104	71,47455	93,3387	99,9439	120,4225	129,4884
2	0	0	0	0	0	0	0	0	36,5608	97,3139	103,6509	114,5465	120,5758	119,278
3	0	0	0	0	0	0	0	0	35,3044	77,4906	98,3118	111,36	115,306	128,779
4	0	0	0	0	0	0	0	0	55,8862	84,2954	118,0402	120,1088	127,7	150,672
GEM.	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	44,34	82,64	103,34	111,49	121,00	132,05
STD	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	8,71	9,61	9,24	7,36	4,41	11,48

Tabel D.2: Kapillêre druk van WET3

Min	1	2	GEM.
0	0	0	0
10	0,01	0,02	0,02
20	0,03	0,05	0,04
30	0,05	0,07	0,06
40	0,07	0,09	0,08
50	0,09	0,11	0,10
60	0,11	0,14	0,13
70	0,13	0,19	0,16
80	0,20	0,26	0,23
90	0,29	0,37	0,33
100	0,14	0,46	0,30
110	0,09	0,10	0,10
120	0,09	0,27	0,18
130	0,11	0,57	0,34
140	0,68	0	0,82
150	1,12	0	1,15
160	1,67	0	0
170	1,67	0	0
180	0	0	0
190	0	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0

Tabel D.3: Versakking en krimp van WET3

Min	Versakking						Min	Krimp					
	1	2	3	4	GEM.	STD		1	2	3	4	GEM.	STD
0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,06	0,07	0,08	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,01</b>	5	0,01	0,02	0,05	0,02	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
10	0,14	0,18	0,15	0,18	<b>0,16</b>	<b>0,02</b>	10	0,02	0,04	0,08	0,03	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>
15	0,18	0,24	0,19	0,22	<b>0,21</b>	<b>0,02</b>	15	0,02	0,05	0,08	0,04	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>
20	0,25	0,32	0,24	0,27	<b>0,27</b>	<b>0,03</b>	20	0,03	0,05	0,09	0,05	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
25	0,29	0,36	0,26	0,30	<b>0,30</b>	<b>0,04</b>	25	0,04	0,06	0,09	0,05	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
30	0,34	0,43	0,30	0,33	<b>0,35</b>	<b>0,05</b>	30	0,05	0,06	0,10	0,06	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
35	0,37	0,47	0,33	0,34	<b>0,38</b>	<b>0,05</b>	35	0,05	0,07	0,10	0,06	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
40	0,41	0,51	0,36	0,37	<b>0,41</b>	<b>0,06</b>	40	0,06	0,07	0,10	0,07	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
45	0,44	0,54	0,38	0,38	<b>0,44</b>	<b>0,07</b>	45	0,06	0,07	0,10	0,07	<b>0,08</b>	<b>0,01</b>
50	0,48	0,58	0,41	0,40	<b>0,47</b>	<b>0,07</b>	50	0,07	0,08	0,10	0,08	<b>0,08</b>	<b>0,01</b>
55	0,50	0,61	0,45	0,41	<b>0,49</b>	<b>0,07</b>	55	0,07	0,08	0,11	0,08	<b>0,08</b>	<b>0,01</b>
60	0,54	0,65	0,49	0,43	<b>0,53</b>	<b>0,08</b>	60	0,07	0,08	0,11	0,09	<b>0,09</b>	<b>0,01</b>
65	0,57	0,69	0,52	0,45	<b>0,56</b>	<b>0,09</b>	65	0,08	0,09	0,11	0,10	<b>0,09</b>	<b>0,01</b>
70	0,62	0,76	0,57	0,47	<b>0,61</b>	<b>0,11</b>	70	0,09	0,09	0,12	0,11	<b>0,10</b>	<b>0,01</b>
75	0,66	0,81	0,61	0,48	<b>0,64</b>	<b>0,12</b>	75	0,10	0,10	0,12	0,12	<b>0,11</b>	<b>0,01</b>
80	0,72	0,89	0,69	0,52	<b>0,70</b>	<b>0,13</b>	80	0,12	0,12	0,12	0,15	<b>0,13</b>	<b>0,01</b>
85	0,76	0,94	0,73	0,55	<b>0,74</b>	<b>0,14</b>	85	0,15	0,17	0,14	0,17	<b>0,16</b>	<b>0,02</b>
90	0,80	1,00	0,79	0,59	<b>0,80</b>	<b>0,14</b>	90	0,26	0,25	0,21	0,23	<b>0,24</b>	<b>0,02</b>
95	0,82	1,03	0,83	0,62	<b>0,82</b>	<b>0,15</b>	95	0,32	0,30	0,25	0,29	<b>0,29</b>	<b>0,02</b>
100	0,83	0,86	0,88	0,65	<b>0,81</b>	<b>0,09</b>	100	0,39	0,39	0,33	0,38	<b>0,37</b>	<b>0,02</b>
105	0,57	0,83	0,91	0,57	<b>0,72</b>	<b>0,15</b>	105	0,39	0,36	0,40	0,44	<b>0,40</b>	<b>0,03</b>
110	0,58	0,83	0,70	0,48	<b>0,65</b>	<b>0,13</b>	110	0,38	0,36	0,43	0,40	<b>0,39</b>	<b>0,03</b>
115	0,58	0,83	0,67	0,45	<b>0,63</b>	<b>0,14</b>	115	0,38	0,36	0,44	0,40	<b>0,39</b>	<b>0,03</b>
120	0,58	0,84	0,72	0,46	<b>0,65</b>	<b>0,14</b>	120	0,39	0,37	0,44	0,40	<b>0,40</b>	<b>0,03</b>
125	0,60	0,87	0,81	0,50	<b>0,70</b>	<b>0,15</b>	125	0,39	0,37	0,44	0,40	<b>0,40</b>	<b>0,02</b>
130	0,68	0,90	0,89	0,61	<b>0,77</b>	<b>0,13</b>	130	0,41	0,39	0,44	0,40	<b>0,41</b>	<b>0,02</b>
135	0,76	0,92	0,90	0,64	<b>0,81</b>	<b>0,11</b>	135	0,43	0,41	0,44	0,40	<b>0,42</b>	<b>0,01</b>
140	0,82	0,96	0,94	0,68	<b>0,85</b>	<b>0,11</b>	140	0,47	0,43	0,46	0,41	<b>0,44</b>	<b>0,02</b>
145	0,88	0,99	0,97	0,70	<b>0,88</b>	<b>0,12</b>	145	0,49	0,46	0,51	0,42	<b>0,47</b>	<b>0,03</b>
150	0,93	1,04	1,02	0,74	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	150	0,56	0,53	0,57	0,49	<b>0,54</b>	<b>0,03</b>
155	0,95	1,07	1,04	0,77	<b>0,96</b>	<b>0,12</b>	155	0,60	0,56	0,60	0,56	<b>0,58</b>	<b>0,02</b>
160	0,96	1,11	1,06	0,80	<b>0,98</b>	<b>0,12</b>	160	0,68	0,62	0,65	0,61	<b>0,64</b>	<b>0,03</b>
165	0,95	1,14	1,08	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,12</b>	165	0,72	0,67	0,69	0,64	<b>0,68</b>	<b>0,03</b>
170	0,94	1,16	1,08	0,86	<b>1,01</b>	<b>0,12</b>	170	0,80	0,74	0,76	0,69	<b>0,75</b>	<b>0,04</b>
175	0,93	1,16	1,07	0,86	<b>1,01</b>	<b>0,12</b>	175	0,84	0,80	0,82	0,73	<b>0,80</b>	<b>0,04</b>
180	0,92	1,17	1,05	0,87	<b>1,00</b>	<b>0,12</b>	180	0,90	0,87	0,90	0,81	<b>0,87</b>	<b>0,04</b>
185	0,92	1,17	1,05	0,85	<b>1,00</b>	<b>0,12</b>	185	0,94	0,91	0,95	0,86	<b>0,91</b>	<b>0,03</b>
190	0,93	1,17	1,05	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	190	0,98	0,95	0,99	0,94	<b>0,97</b>	<b>0,02</b>
195	0,93	1,17	1,06	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	195	1,00	0,97	1,01	0,98	<b>0,99</b>	<b>0,02</b>
200	0,93	1,18	1,06	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	200	1,02	0,99	1,03	1,02	<b>1,01</b>	<b>0,02</b>
205	0,93	1,18	1,06	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	205	1,02	1,00	1,04	1,03	<b>1,02</b>	<b>0,02</b>
210	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	210	1,03	1,00	1,04	1,04	<b>1,03</b>	<b>0,02</b>
215	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	215	1,04	1,01	1,05	1,05	<b>1,04</b>	<b>0,02</b>
220	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	220	1,04	1,01	1,05	1,06	<b>1,04</b>	<b>0,02</b>
225	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	225	1,04	1,02	1,05	1,06	<b>1,04</b>	<b>0,02</b>
230	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	230	1,05	1,02	1,06	1,06	<b>1,05</b>	<b>0,02</b>
235	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,01</b>	<b>0,13</b>	235	1,05	1,02	1,06	1,07	<b>1,05</b>	<b>0,02</b>
240	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,01</b>	<b>0,13</b>	240	1,05	1,03	1,06	1,07	<b>1,05</b>	<b>0,02</b>
245	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,01</b>	<b>0,13</b>	245	1,06	1,03	1,06	1,07	<b>1,06</b>	<b>0,02</b>
250	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,01</b>	<b>0,13</b>	250	1,06	1,03	1,06	1,08	<b>1,06</b>	<b>0,02</b>
255	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,01</b>	<b>0,13</b>	255	1,06	1,03	1,07	1,08	<b>1,06</b>	<b>0,02</b>
260	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,01</b>	<b>0,13</b>	260	1,06	1,04	1,07	1,08	<b>1,06</b>	<b>0,02</b>



## E. Bylaag E: WET4

Tabel E.1: Kraakarea van WET4

Monster	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	72,901	94,948	95,204	108,5535	109,1205
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50,8667	57,8309	64,3198	99,2309	99,7704
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	69,424	90,5288	94,4486	95,8304	110,2812
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	83,1833	108,6728	113,1394	121,5728	124,2401
GEM.	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	69,09	88,00	91,78	106,30	110,85
STD	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	11,68	18,66	17,53	9,97	8,74

Tabel E.2: Kapillêre druk van WET4

Min	1	2	GEM.
0	0	0	0
10	0,03	0,03	0,03
20	0,04	0,05	0,05
30	0,05	0,07	0,06
40	0,08	0,09	0,09
50	0,11	0,11	0,11
60	0,16	0,14	0,15
70	0,24	0,18	0,21
80	0,37	0,26	0,32
90	0,51	0,39	0,45
100	0,70	0,52	0,61
110	0,72	0,68	0,70
120	0,34	0,89	0,62
130	0,16	0,10	0,13
140	0,17	0,12	0,15
150	0,23	0,11	0,17
160	1,41	0,24	0,83
170	1,67	0	1,25
180	1,67	0	1,25
190	0	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0

Tabel E.3: Versakking en krimp van WET4

Min	Versakking					Min	Shrinkage					
	1	2	3	GEM.	STD		1	2	3	4	GEM.	STD
0	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,05	0,06	0,06	<b>0,06</b>	<b>0,01</b>	5	0,04	0,01	0,04	0,05	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>
10	0,11	0,15	0,10	<b>0,12</b>	<b>0,02</b>	10	0,07	0,02	0,07	0,09	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
15	0,14	0,20	0,13	<b>0,16</b>	<b>0,03</b>	15	0,08	0,03	0,08	0,10	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>
20	0,18	0,27	0,18	<b>0,21</b>	<b>0,04</b>	20	0,10	0,04	0,09	0,11	<b>0,09</b>	<b>0,03</b>
25	0,20	0,32	0,20	<b>0,24</b>	<b>0,05</b>	25	0,12	0,04	0,10	0,12	<b>0,09</b>	<b>0,03</b>
30	0,24	0,38	0,24	<b>0,29</b>	<b>0,07</b>	30	0,13	0,05	0,10	0,13	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
35	0,27	0,42	0,27	<b>0,32</b>	<b>0,07</b>	35	0,14	0,05	0,10	0,13	<b>0,10</b>	<b>0,04</b>
40	0,31	0,48	0,31	<b>0,37</b>	<b>0,08</b>	40	0,14	0,05	0,10	0,14	<b>0,11</b>	<b>0,04</b>
45	0,33	0,51	0,34	<b>0,39</b>	<b>0,08</b>	45	0,15	0,05	0,10	0,14	<b>0,11</b>	<b>0,04</b>
50	0,37	0,57	0,38	<b>0,44</b>	<b>0,09</b>	50	0,18	0,05	0,10	0,14	<b>0,12</b>	<b>0,05</b>
55	0,40	0,60	0,42	<b>0,47</b>	<b>0,09</b>	55	0,19	0,05	0,09	0,14	<b>0,12</b>	<b>0,05</b>
60	0,45	0,65	0,47	<b>0,52</b>	<b>0,09</b>	60	0,20	0,06	0,09	0,15	<b>0,12</b>	<b>0,05</b>
65	0,49	0,69	0,51	<b>0,56</b>	<b>0,09</b>	65	0,21	0,06	0,08	0,15	<b>0,12</b>	<b>0,06</b>
70	0,55	0,75	0,57	<b>0,63</b>	<b>0,09</b>	70	0,23	0,06	0,08	0,16	<b>0,13</b>	<b>0,07</b>
75	0,60	0,80	0,62	<b>0,67</b>	<b>0,09</b>	75	0,25	0,08	0,08	0,18	<b>0,15</b>	<b>0,07</b>
80	0,66	0,86	0,69	<b>0,74</b>	<b>0,09</b>	80	0,34	0,16	0,09	0,24	<b>0,21</b>	<b>0,09</b>
85	0,70	0,89	0,73	<b>0,77</b>	<b>0,08</b>	85	0,41	0,23	0,10	0,29	<b>0,26</b>	<b>0,11</b>
90	0,75	0,92	0,78	<b>0,82</b>	<b>0,07</b>	90	0,53	0,33	0,15	0,37	<b>0,34</b>	<b>0,14</b>
95	0,77	0,93	0,81	<b>0,84</b>	<b>0,07</b>	95	0,62	0,39	0,19	0,43	<b>0,41</b>	<b>0,15</b>
100	0,80	0,96	0,84	<b>0,87</b>	<b>0,07</b>	100	0,72	0,49	0,32	0,51	<b>0,51</b>	<b>0,14</b>
105	0,82	0,98	0,86	<b>0,88</b>	<b>0,07</b>	105	0,78	0,53	0,41	0,56	<b>0,57</b>	<b>0,14</b>
110	0,84	0,99	0,88	<b>0,90</b>	<b>0,06</b>	110	0,86	0,55	0,49	0,66	<b>0,64</b>	<b>0,14</b>
115	0,86	1,00	0,90	<b>0,92</b>	<b>0,06</b>	115	0,91	0,56	0,54	0,71	<b>0,68</b>	<b>0,15</b>
120	0,89	0,84	0,92	<b>0,88</b>	<b>0,03</b>	120	0,98	0,52	0,59	0,80	<b>0,72</b>	<b>0,18</b>
125	0,65	0,75	0,94	<b>0,78</b>	<b>0,12</b>	125	0,97	0,50	0,63	0,83	<b>0,73</b>	<b>0,18</b>
130	0,67	0,79	0,60	<b>0,69</b>	<b>0,08</b>	130	0,96	0,50	0,59	0,77	<b>0,71</b>	<b>0,17</b>
135	0,70	0,79	0,58	<b>0,69</b>	<b>0,09</b>	135	0,95	0,51	0,59	0,77	<b>0,71</b>	<b>0,17</b>
140	0,71	0,81	0,57	<b>0,70</b>	<b>0,10</b>	140	0,96	0,52	0,59	0,78	<b>0,71</b>	<b>0,17</b>
145	0,73	0,90	0,68	<b>0,77</b>	<b>0,09</b>	145	0,96	0,53	0,60	0,79	<b>0,72</b>	<b>0,17</b>
150	0,83	0,98	0,84	<b>0,88</b>	<b>0,07</b>	150	0,96	0,54	0,62	0,82	<b>0,74</b>	<b>0,16</b>
155	0,86	1,01	0,91	<b>0,93</b>	<b>0,06</b>	155	0,96	0,56	0,64	0,86	<b>0,75</b>	<b>0,16</b>
160	0,88	1,06	0,96	<b>0,97</b>	<b>0,07</b>	160	0,97	0,59	0,68	0,92	<b>0,79</b>	<b>0,16</b>
165	0,91	1,10	0,98	<b>0,99</b>	<b>0,08</b>	165	0,99	0,62	0,73	0,97	<b>0,83</b>	<b>0,16</b>
170	0,95	1,13	0,97	<b>1,02</b>	<b>0,08</b>	170	1,04	0,67	0,82	1,02	<b>0,89</b>	<b>0,15</b>
175	0,97	1,14	0,96	<b>1,02</b>	<b>0,08</b>	175	1,07	0,72	0,88	1,06	<b>0,93</b>	<b>0,14</b>
180	0,97	1,13	0,95	<b>1,02</b>	<b>0,08</b>	180	1,13	0,80	0,96	1,13	<b>1,00</b>	<b>0,14</b>
185	0,96	1,12	0,95	<b>1,01</b>	<b>0,08</b>	185	1,17	0,84	1,01	1,17	<b>1,05</b>	<b>0,14</b>
190	0,93	1,12	0,96	<b>1,00</b>	<b>0,09</b>	190	1,24	0,89	1,06	1,22	<b>1,10</b>	<b>0,14</b>
195	0,92	1,12	0,96	<b>1,00</b>	<b>0,09</b>	195	1,28	0,92	1,09	1,25	<b>1,13</b>	<b>0,15</b>
200	0,93	1,13	0,97	<b>1,01</b>	<b>0,09</b>	200	1,33	0,94	1,11	1,27	<b>1,16</b>	<b>0,15</b>
205	0,93	1,13	0,97	<b>1,01</b>	<b>0,09</b>	205	1,36	0,95	1,12	1,28	<b>1,18</b>	<b>0,16</b>
210	0,93	1,13	0,97	<b>1,01</b>	<b>0,09</b>	210	1,38	0,97	1,13	1,29	<b>1,19</b>	<b>0,16</b>
215	0,93	1,13	0,97	<b>1,01</b>	<b>0,09</b>	215	1,39	0,97	1,13	1,29	<b>1,20</b>	<b>0,16</b>
220	0,93	1,13	0,97	<b>1,01</b>	<b>0,09</b>	220	1,40	0,98	1,14	1,30	<b>1,20</b>	<b>0,16</b>
225	0,94	1,14	0,98	<b>1,02</b>	<b>0,09</b>	225	1,40	0,98	1,14	1,30	<b>1,21</b>	<b>0,16</b>
230	0,94	1,14	0,98	<b>1,02</b>	<b>0,09</b>	230	1,41	0,99	1,15	1,31	<b>1,21</b>	<b>0,16</b>
235	0,94	1,14	0,98	<b>1,02</b>	<b>0,09</b>	235	1,41	0,99	1,15	1,31	<b>1,22</b>	<b>0,16</b>
240	0,94	1,14	0,98	<b>1,02</b>	<b>0,09</b>	240	1,41	0,99	1,15	1,31	<b>1,22</b>	<b>0,16</b>
245	0,94	1,14	0,98	<b>1,02</b>	<b>0,09</b>	245	1,42	1,00	1,16	1,31	<b>1,22</b>	<b>0,16</b>
250	0,94	1,14	0,98	<b>1,02</b>	<b>0,09</b>	250	1,42	1,00	1,16	1,32	<b>1,22</b>	<b>0,16</b>
255	0,94	1,14	0,98	<b>1,02</b>	<b>0,09</b>	255	1,42	1,00	1,16	1,32	<b>1,23</b>	<b>0,16</b>
260	0,94	1,14	0,98	<b>1,02</b>	<b>0,09</b>	260	1,43	1,01	1,17	1,32	<b>1,23</b>	<b>0,16</b>

## F. Bylaag F: WET5

Tabel F.1: Kraakarea van WET5

Monster	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	47,1368	48,9184	64,5008	77,7824	92,7784	110,3552	132,6784
2	0	0	0	0	0	0	5	65,0604	69,1696	79,579	80,9417	85,1511	91,372	112,0766
3	0	0	0	0	0	0	17,7	53,648	52,4384	65,4799	67,1381	67,8771	80,9737	105,9056
4	0	0	0	0	0	0	14,5	51,0259	50,5869	69,7959	78,2582	97,222	107,666	132,027
GEM.	0	0	0	0	0	0	9,30	54,22	55,28	69,84	76,03	85,76	97,59	120,67
STD	0	0	0	0	0	0	7,12	6,67	8,12	5,97	5,27	11,19	12,03	11,89

Tabel F.2: Kapillêre druk van WET5

Min	1	2	GEM.
0	0	0	0
10	0,03	0,03	0,03
20	0,05	0,05	0,05
30	0,07	0,07	0,07
40	0,09	0,09	0,09
50	0,11	0,11	0,11
60	0,14	0,13	0,14
70	0,20	0,16	0,18
80	0,30	0,21	0,26
90	0,43	0,30	0,37
100	0,54	0,43	0,49
110	0,70	0,58	0,64
120	0,92	0,70	0,81
130	1,30	0,89	1,10
140	0,23	0,24	0,24
150	0,21	0,16	0,19
160	0,41	0,56	0,49
170	1,37	1,67	1,52
180	0	0	0
190	0	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0

Tabel F.3: Versakking en krimp van WET5

Min	Versakking						Min	Krimp					
	1	2	3	4	GEM.	STD		1	2	3	4	GEM.	STD
0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,04	0,05	0,10	0,03	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>	5	0,02	0,01	0,03	0,02	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
10	0,09	0,11	0,19	0,07	<b>0,11</b>	<b>0,05</b>	10	0,03	0,03	0,06	0,04	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>
15	0,11	0,14	0,25	0,09	<b>0,15</b>	<b>0,06</b>	15	0,04	0,03	0,06	0,05	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>
20	0,14	0,18	0,32	0,11	<b>0,19</b>	<b>0,08</b>	20	0,05	0,04	0,07	0,06	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>
25	0,16	0,21	0,37	0,13	<b>0,22</b>	<b>0,09</b>	25	0,05	0,05	0,07	0,06	<b>0,06</b>	<b>0,01</b>
30	0,19	0,24	0,44	0,16	<b>0,25</b>	<b>0,11</b>	30	0,06	0,05	0,07	0,06	<b>0,06</b>	<b>0,01</b>
35	0,21	0,26	0,49	0,17	<b>0,28</b>	<b>0,12</b>	35	0,06	0,06	0,07	0,06	<b>0,06</b>	<b>0,00</b>
40	0,25	0,28	0,56	0,19	<b>0,32</b>	<b>0,14</b>	40	0,07	0,07	0,07	0,07	<b>0,07</b>	<b>0,00</b>
45	0,27	0,30	0,61	0,21	<b>0,35</b>	<b>0,16</b>	45	0,07	0,07	0,07	0,07	<b>0,07</b>	<b>0,00</b>
50	0,31	0,33	0,69	0,23	<b>0,39</b>	<b>0,18</b>	50	0,08	0,08	0,06	0,07	<b>0,07</b>	<b>0,01</b>
55	0,33	0,35	0,74	0,26	<b>0,42</b>	<b>0,19</b>	55	0,08	0,08	0,06	0,08	<b>0,07</b>	<b>0,01</b>
60	0,38	0,39	0,81	0,29	<b>0,47</b>	<b>0,20</b>	60	0,09	0,10	0,05	0,08	<b>0,08</b>	<b>0,02</b>
65	0,41	0,41	0,86	0,32	<b>0,50</b>	<b>0,21</b>	65	0,10	0,10	0,05	0,08	<b>0,09</b>	<b>0,02</b>
70	0,46	0,45	0,95	0,38	<b>0,56</b>	<b>0,23</b>	70	0,12	0,11	0,05	0,09	<b>0,09</b>	<b>0,03</b>
75	0,50	0,49	1,00	0,42	<b>0,60</b>	<b>0,23</b>	75	0,13	0,12	0,04	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
80	0,56	0,54	1,08	0,51	<b>0,67</b>	<b>0,24</b>	80	0,16	0,16	0,05	0,10	<b>0,12</b>	<b>0,05</b>
85	0,59	0,57	1,14	0,55	<b>0,71</b>	<b>0,25</b>	85	0,20	0,21	0,08	0,10	<b>0,15</b>	<b>0,06</b>
90	0,65	0,60	1,20	0,63	<b>0,77</b>	<b>0,25</b>	90	0,27	0,35	0,13	0,14	<b>0,22</b>	<b>0,09</b>
95	0,68	0,62	1,25	0,69	<b>0,81</b>	<b>0,25</b>	95	0,32	0,49	0,15	0,18	<b>0,29</b>	<b>0,14</b>
100	0,72	0,65	1,30	0,74	<b>0,85</b>	<b>0,26</b>	100	0,40	0,72	0,22	0,27	<b>0,40</b>	<b>0,19</b>
105	0,74	0,67	1,33	0,76	<b>0,88</b>	<b>0,26</b>	105	0,44	0,75	0,27	0,33	<b>0,45</b>	<b>0,19</b>
110	0,78	0,69	1,37	0,79	<b>0,91</b>	<b>0,27</b>	110	0,49	0,80	0,34	0,38	<b>0,50</b>	<b>0,18</b>
115	0,81	0,70	1,39	0,81	<b>0,93</b>	<b>0,27</b>	115	0,52	0,83	0,35	0,41	<b>0,53</b>	<b>0,19</b>
120	0,84	0,72	1,42	0,84	<b>0,95</b>	<b>0,27</b>	120	0,54	0,88	0,48	0,45	<b>0,59</b>	<b>0,17</b>
125	0,85	0,73	1,43	0,86	<b>0,97</b>	<b>0,27</b>	125	0,55	0,92	0,55	0,47	<b>0,62</b>	<b>0,17</b>
130	0,87	0,75	1,44	0,90	<b>0,99</b>	<b>0,27</b>	130	0,56	0,99	0,64	0,51	<b>0,68</b>	<b>0,19</b>
135	0,89	0,77	1,45	0,93	<b>1,01</b>	<b>0,26</b>	135	0,58	1,04	0,70	0,56	<b>0,72</b>	<b>0,19</b>
140	0,63	0,51	1,47	0,98	<b>0,89</b>	<b>0,37</b>	140	0,59	1,06	0,74	0,63	<b>0,75</b>	<b>0,19</b>
145	0,56	0,49	1,33	0,80	<b>0,79</b>	<b>0,33</b>	145	0,58	1,05	0,72	0,59	<b>0,73</b>	<b>0,19</b>
150	0,67	0,51	1,14	0,73	<b>0,76</b>	<b>0,23</b>	150	0,59	1,05	0,71	0,57	<b>0,73</b>	<b>0,19</b>
155	0,78	0,55	1,12	0,75	<b>0,80</b>	<b>0,20</b>	155	0,59	1,06	0,71	0,58	<b>0,74</b>	<b>0,19</b>
160	0,88	0,62	1,12	0,78	<b>0,85</b>	<b>0,18</b>	160	0,60	1,06	0,71	0,60	<b>0,74</b>	<b>0,19</b>
165	0,90	0,68	1,13	0,81	<b>0,88</b>	<b>0,16</b>	165	0,61	1,06	0,72	0,61	<b>0,75</b>	<b>0,19</b>
170	0,93	0,74	1,38	0,92	<b>0,99</b>	<b>0,23</b>	170	0,62	1,09	0,73	0,63	<b>0,77</b>	<b>0,19</b>
175	0,97	0,77	1,46	0,98	<b>1,04</b>	<b>0,25</b>	175	0,64	1,12	0,74	0,67	<b>0,79</b>	<b>0,19</b>
180	0,99	0,80	1,49	1,05	<b>1,08</b>	<b>0,25</b>	180	0,68	1,17	0,76	0,74	<b>0,84</b>	<b>0,20</b>
185	0,98	0,80	1,51	1,04	<b>1,08</b>	<b>0,26</b>	185	0,71	1,22	0,79	0,79	<b>0,88</b>	<b>0,20</b>
190	0,97	0,77	1,51	1,01	<b>1,07</b>	<b>0,27</b>	190	0,75	1,30	0,86	0,88	<b>0,94</b>	<b>0,21</b>
195	0,97	0,76	1,50	1,01	<b>1,06</b>	<b>0,27</b>	195	0,77	1,34	0,90	0,93	<b>0,98</b>	<b>0,21</b>
200	0,98	0,76	1,50	1,03	<b>1,07</b>	<b>0,27</b>	200	0,79	1,38	0,95	0,96	<b>1,02</b>	<b>0,22</b>
205	0,98	0,76	1,50	1,05	<b>1,07</b>	<b>0,27</b>	205	0,80	1,40	0,97	0,97	<b>1,04</b>	<b>0,22</b>
210	0,99	0,77	1,50	1,06	<b>1,08</b>	<b>0,26</b>	210	0,81	1,41	0,99	0,99	<b>1,05</b>	<b>0,22</b>
215	0,99	0,77	1,50	1,06	<b>1,08</b>	<b>0,26</b>	215	0,82	1,42	0,99	0,99	<b>1,05</b>	<b>0,22</b>
220	0,99	0,77	1,50	1,06	<b>1,08</b>	<b>0,26</b>	220	0,82	1,42	1,00	1,00	<b>1,06</b>	<b>0,22</b>
225	1,00	0,77	1,50	1,06	<b>1,08</b>	<b>0,26</b>	225	0,82	1,43	1,01	1,00	<b>1,06</b>	<b>0,22</b>
230	1,00	0,77	1,50	1,07	<b>1,08</b>	<b>0,26</b>	230	0,83	1,43	1,01	1,01	<b>1,07</b>	<b>0,22</b>
235	1,00	0,77	1,50	1,07	<b>1,08</b>	<b>0,26</b>	235	0,83	1,44	1,01	1,01	<b>1,07</b>	<b>0,22</b>
240	1,00	0,77	1,50	1,07	<b>1,09</b>	<b>0,26</b>	240	0,83	1,44	1,02	1,01	<b>1,08</b>	<b>0,22</b>
245	1,00	0,77	1,50	1,07	<b>1,09</b>	<b>0,26</b>	245	0,83	1,44	1,02	1,01	<b>1,08</b>	<b>0,22</b>
250	1,00	0,77	1,50	1,07	<b>1,09</b>	<b>0,26</b>	250	0,83	1,44	1,02	1,02	<b>1,08</b>	<b>0,22</b>
255	1,00	0,77	1,50	1,07	<b>1,09</b>	<b>0,26</b>	255	0,84	1,44	1,03	1,02	<b>1,08</b>	<b>0,22</b>
260	1,00	0,77	1,50	1,07	<b>1,09</b>	<b>0,26</b>	260	0,84	1,45	1,03	1,02	<b>1,08</b>	<b>0,22</b>

## G.Bylaag G: WV5T

Tabel G.1: Kraakarea van WV5T

Monster	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13,5419	33,1091	53,7012	68,0435
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,9	14,2	69,7026
GEM.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,77095	21,5046	33,9506	68,8731
STD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,77095	11,6046	19,7506	0,82955

Tabel G.2: Kapillêre druk van WV5T

Min	1	2	GEM.
0	0	0	0
10	0,08	0,08	0,08
20	0,08	0,08	0,08
30	0,08	0,09	0,08
40	0,08	0,09	0,08
50	0,08	0,09	0,08
60	0,08	0,09	0,08
70	0,09	0,09	0,09
80	0,07	0,06	0,07
90	0,06	0,06	0,06
100	0,08	0,08	0,08
110	0,08	0,09	0,08
120	0,09	0,09	0,09
130	0,08	0,08	0,08
140	0,07	0,07	0,07
150	0,08	0,08	0,08
160	0,08	0,09	0,08
170	0,08	0,09	0,09
180	0,05	0,06	0,06
190	0,07	0,08	0,08
200	0,08	0,09	0,08
210	0,09	0,09	0,09
220	0,06	0,06	0,06
230	0,08	0,07	0,08
240	0,09	0,08	0,08
250	0,09	0,08	0,09
260	0,09	0,08	0,09

Tabel G.3: Krimp van WV5T

Min	Versakking			
	1	2	GEM.	STD
0	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,00	0,02	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
10	0,01	0,02	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
15	0,01	0,03	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
20	0,01	0,03	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
25	0,01	0,04	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>
30	0,01	0,05	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>
35	0,01	0,05	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>
40	0,01	0,06	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>
45	0,01	0,06	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>
50	0,01	0,06	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>
55	0,01	0,07	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>
60	0,01	0,07	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>
65	0,01	0,07	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>
70	0,02	0,07	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>
75	0,04	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
80	0,04	0,10	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>
85	0,04	0,10	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>
90	0,04	0,10	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>
95	0,04	0,11	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>
100	0,04	0,11	<b>0,08</b>	<b>0,03</b>
105	0,04	0,11	<b>0,08</b>	<b>0,03</b>
110	0,04	0,11	<b>0,08</b>	<b>0,03</b>
115	0,05	0,11	<b>0,08</b>	<b>0,03</b>
120	0,08	0,12	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
125	0,10	0,14	<b>0,12</b>	<b>0,02</b>
130	0,11	0,14	<b>0,12</b>	<b>0,02</b>
135	0,10	0,14	<b>0,12</b>	<b>0,02</b>
140	0,11	0,14	<b>0,12</b>	<b>0,02</b>
145	0,11	0,14	<b>0,12</b>	<b>0,02</b>
150	0,11	0,15	<b>0,13</b>	<b>0,02</b>
155	0,12	0,15	<b>0,13</b>	<b>0,02</b>
160	0,15	0,15	<b>0,15</b>	<b>0,00</b>
165	0,20	0,16	<b>0,18</b>	<b>0,02</b>
170	0,28	0,25	<b>0,27</b>	<b>0,01</b>
175	0,27	0,24	<b>0,26</b>	<b>0,02</b>
180	0,27	0,22	<b>0,25</b>	<b>0,03</b>
185	0,27	0,22	<b>0,25</b>	<b>0,03</b>
190	0,28	0,22	<b>0,25</b>	<b>0,03</b>
195	0,28	0,22	<b>0,25</b>	<b>0,03</b>
200	0,30	0,24	<b>0,27</b>	<b>0,03</b>
205	0,33	0,26	<b>0,30</b>	<b>0,04</b>
210	0,38	0,31	<b>0,34</b>	<b>0,04</b>
215	0,36	0,29	<b>0,32</b>	<b>0,03</b>
220	0,35	0,28	<b>0,32</b>	<b>0,04</b>
225	0,35	0,28	<b>0,32</b>	<b>0,04</b>
230	0,35	0,28	<b>0,32</b>	<b>0,04</b>
235	0,36	0,28	<b>0,32</b>	<b>0,04</b>
240	0,37	0,29	<b>0,33</b>	<b>0,04</b>
245	0,38	0,32	<b>0,35</b>	<b>0,03</b>
250	0,38	0,35	<b>0,36</b>	<b>0,02</b>
255	0,38	0,37	<b>0,38</b>	<b>0,01</b>
260	0,39	0,38	<b>0,38</b>	<b>0,00</b>

## H. Bylaag H: WV5B

Tabel H.1: Kraakarea van WV5B

Monster	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GEM.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
STD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel H.2: Kapillêre druk van WV5B

Min	1	2	GEM.
0	0	0	0
10	0,07	0,07	0,07
20	0,08	0,09	0,08
30	0,08	0,09	0,09
40	0,08	0,09	0,09
50	0,08	0,09	0,09
60	0,07	0,09	0,08
70	0,06	0,08	0,07
80	0,07	0,09	0,08
90	0,07	0,10	0,09
100	0,06	0,08	0,07
110	0,07	0,09	0,08
120	0,07	0,10	0,09
130	0,07	0,10	0,08
140	0,06	0,08	0,07
150	0,07	0,09	0,08
160	0,07	0,10	0,08
170	0,05	0,08	0,06
180	0,07	0,09	0,08
190	0,07	0,10	0,08
200	0,07	0,10	0,09
210	0,05	0,08	0,07
220	0,06	0,09	0,08
230	0,07	0,09	0,08
240	0,05	0,07	0,06
250	0,06	0,08	0,07
260	0,07	0,09	0,08

Tabel H.3: Krimp van WV5B

Min	Krimp		
	1	GEM.	STD
0	0,00	0,00	NA
5	0,01	0,01	NA
10	0,02	0,02	NA
15	0,03	0,03	NA
20	0,03	0,03	NA
25	0,03	0,03	NA
30	0,04	0,04	NA
35	0,04	0,04	NA
40	0,04	0,04	NA
45	0,04	0,04	NA
50	0,05	0,05	NA
55	0,06	0,06	NA
60	0,08	0,08	NA
65	0,09	0,09	NA
70	0,12	0,12	NA
75	0,12	0,12	NA
80	0,12	0,12	NA
85	0,12	0,12	NA
90	0,13	0,13	NA
95	0,13	0,13	NA
100	0,13	0,13	NA
105	0,13	0,13	NA
110	0,13	0,13	NA
115	0,13	0,13	NA
120	0,14	0,14	NA
125	0,14	0,14	NA
130	0,15	0,15	NA
135	0,13	0,13	NA
140	0,14	0,14	NA
145	0,14	0,14	NA
150	0,14	0,14	NA
155	0,13	0,13	NA
160	0,15	0,15	NA
165	0,19	0,19	NA
170	0,17	0,17	NA
175	0,16	0,16	NA
180	0,17	0,17	NA
185	0,17	0,17	NA
190	0,18	0,18	NA
195	0,22	0,22	NA
200	0,30	0,30	NA
205	0,35	0,35	NA
210	0,30	0,30	NA
215	0,30	0,30	NA
220	0,30	0,30	NA
225	0,31	0,31	NA
230	0,33	0,33	NA
235	0,36	0,36	NA
240	0,34	0,34	NA
245	0,34	0,34	NA
250	0,36	0,36	NA
255	0,36	0,36	NA
260	0,37	0,37	NA



## I. Bylaag I: KM1

Tabel I.1: Kraakarea van KM1

Monster	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,6	65,6318	70,4492	76,6506	78,4144
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21,7563	44,903	45,0987	44,255	60,6007
3	0	0	0	0	0	0	0,8	17,6	33,1	50,4684	63,8676	85,3516	99,482	119,9276
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41,0782	67,2986	68,9734	84,8292	95,4972
GEM.	0	0	0	0	0	0	0,20	4,40	8,28	32,98	60,43	67,47	76,30	88,61
STD	0	0	0	0	0	0	0,35	7,62	14,33	13,27	9,04	14,42	20,23	21,89

Tabel I.2: Kapillêre druk van KM1

Min	1	2	GEM.
0	0	0	0
10	0,00	0,00	0,00
20	0,02	0,01	0,02
30	0,04	0,04	0,04
40	0,07	0,06	0,07
50	0,08	0,08	0,08
60	0,08	0,11	0,10
70	0,08	0,14	0,11
80	0,09	0,18	0,14
90	0,10	0,25	0,18
100	0,12	0,33	0,23
110	0,16	0,44	0,30
120	0,24	0,53	0,39
130	0,36	0,56	0,46
140	0,53	0,63	0,58
150	0,74	0,72	0,73
160	0,94	1,02	0,98
170	1,03	1,40	1,22
180	1,29	0	1,52
190	1,60	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0

Tabel I.3: Versakking en krimp van KM1

Min	Versakking				Min	Krimp							
	1	2	GEM.	STD		1	2	3	4	5	GEM.	STD	
0	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,10	0,23	<b>0,17</b>	<b>0,07</b>	5	0,01	0,02	0,06	0,04	0,06	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	
10	0,29	0,39	<b>0,34</b>	<b>0,05</b>	10	0,04	0,07	0,10	0,04	0,10	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>	
15	0,35	0,45	<b>0,40</b>	<b>0,05</b>	15	0,04	0,06	0,11	0,05	0,11	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>	
20	0,36	0,51	<b>0,44</b>	<b>0,08</b>	20	0,04	0,07	0,12	0,06	0,12	<b>0,08</b>	<b>0,03</b>	
25	0,41	0,55	<b>0,48</b>	<b>0,07</b>	25	0,05	0,07	0,12	0,07	0,12	<b>0,09</b>	<b>0,03</b>	
30	0,50	0,62	<b>0,56</b>	<b>0,06</b>	30	0,05	0,08	0,13	0,08	0,13	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>	
35	0,55	0,66	<b>0,61</b>	<b>0,06</b>	35	0,06	0,08	0,14	0,09	0,14	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>	
40	0,61	0,72	<b>0,66</b>	<b>0,05</b>	40	0,06	0,09	0,15	0,10	0,15	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>	
45	0,63	0,73	<b>0,68</b>	<b>0,05</b>	45	0,06	0,09	0,15	0,10	0,15	<b>0,11</b>	<b>0,04</b>	
50	0,64	0,75	<b>0,69</b>	<b>0,06</b>	50	0,06	0,09	0,16	0,11	0,16	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
55	0,64	0,76	<b>0,70</b>	<b>0,06</b>	55	0,07	0,09	0,16	0,11	0,16	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
60	0,65	0,77	<b>0,71</b>	<b>0,06</b>	60	0,07	0,10	0,16	0,12	0,16	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
65	0,65	0,77	<b>0,71</b>	<b>0,06</b>	65	0,07	0,09	0,16	0,12	0,16	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
70	0,65	0,78	<b>0,72</b>	<b>0,06</b>	70	0,07	0,09	0,16	0,12	0,16	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
75	0,65	0,78	<b>0,72</b>	<b>0,06</b>	75	0,07	0,09	0,17	0,12	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
80	0,66	0,79	<b>0,72</b>	<b>0,06</b>	80	0,08	0,09	0,17	0,12	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
85	0,66	0,79	<b>0,72</b>	<b>0,06</b>	85	0,08	0,09	0,17	0,11	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
90	0,66	0,79	<b>0,73</b>	<b>0,06</b>	90	0,08	0,09	0,17	0,11	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
95	0,67	0,79	<b>0,73</b>	<b>0,06</b>	95	0,08	0,09	0,17	0,11	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
100	0,67	0,80	<b>0,74</b>	<b>0,06</b>	100	0,08	0,09	0,17	0,10	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
105	0,68	0,81	<b>0,74</b>	<b>0,06</b>	105	0,08	0,09	0,17	0,10	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
110	0,69	0,82	<b>0,76</b>	<b>0,06</b>	110	0,08	0,09	0,17	0,10	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
115	0,71	0,84	<b>0,77</b>	<b>0,07</b>	115	0,08	0,09	0,17	0,09	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
120	0,73	0,86	<b>0,80</b>	<b>0,07</b>	120	0,09	0,10	0,18	0,09	0,18	<b>0,13</b>	<b>0,04</b>	
125	0,74	0,88	<b>0,81</b>	<b>0,07</b>	125	0,10	0,12	0,19	0,11	0,19	<b>0,14</b>	<b>0,04</b>	
130	0,77	0,91	<b>0,84</b>	<b>0,07</b>	130	0,15	0,17	0,25	0,15	0,25	<b>0,19</b>	<b>0,05</b>	
135	0,78	0,92	<b>0,85</b>	<b>0,07</b>	135	0,18	0,20	0,30	0,20	0,30	<b>0,23</b>	<b>0,05</b>	
140	0,81	0,94	<b>0,87</b>	<b>0,07</b>	140	0,23	0,24	0,37	0,27	0,37	<b>0,29</b>	<b>0,06</b>	
145	0,82	0,95	<b>0,88</b>	<b>0,06</b>	145	0,26	0,27	0,41	0,31	0,41	<b>0,33</b>	<b>0,07</b>	
150	0,85	0,96	<b>0,91</b>	<b>0,06</b>	150	0,31	0,33	0,46	0,35	0,46	<b>0,38</b>	<b>0,07</b>	
155	0,86	0,97	<b>0,92</b>	<b>0,06</b>	155	0,34	0,36	0,49	0,38	0,49	<b>0,41</b>	<b>0,06</b>	
160	0,88	0,99	<b>0,94</b>	<b>0,05</b>	160	0,37	0,41	0,52	0,42	0,52	<b>0,45</b>	<b>0,06</b>	
165	0,90	1,01	<b>0,95</b>	<b>0,06</b>	165	0,39	0,43	0,54	0,45	0,54	<b>0,47</b>	<b>0,06</b>	
170	0,92	1,02	<b>0,97</b>	<b>0,05</b>	170	0,43	0,44	0,57	0,48	0,57	<b>0,50</b>	<b>0,06</b>	
175	0,93	1,03	<b>0,98</b>	<b>0,05</b>	175	0,45	0,45	0,59	0,50	0,59	<b>0,52</b>	<b>0,06</b>	
180	0,95	1,04	<b>1,00</b>	<b>0,05</b>	180	0,50	0,47	0,63	0,53	0,63	<b>0,55</b>	<b>0,07</b>	
185	0,96	1,05	<b>1,01</b>	<b>0,04</b>	185	0,53	0,49	0,65	0,55	0,65	<b>0,57</b>	<b>0,07</b>	
190	0,98	1,05	<b>1,02</b>	<b>0,04</b>	190	0,57	0,51	0,68	0,57	0,68	<b>0,60</b>	<b>0,07</b>	
195	1,00	1,06	<b>1,03</b>	<b>0,03</b>	195	0,59	0,53	0,69	0,59	0,69	<b>0,62</b>	<b>0,06</b>	
200	1,02	1,06	<b>1,04</b>	<b>0,02</b>	200	0,63	0,55	0,71	0,60	0,71	<b>0,64</b>	<b>0,06</b>	
205	1,03	1,05	<b>1,04</b>	<b>0,01</b>	205	0,65	0,56	0,73	0,61	0,73	<b>0,65</b>	<b>0,07</b>	
210	1,04	1,05	<b>1,04</b>	<b>0,00</b>	210	0,67	0,57	0,74	0,63	0,74	<b>0,67</b>	<b>0,07</b>	
215	1,04	1,04	<b>1,04</b>	<b>0,00</b>	215	0,69	0,58	0,75	0,64	0,75	<b>0,68</b>	<b>0,07</b>	
220	1,05	1,04	<b>1,05</b>	<b>0,00</b>	220	0,71	0,60	0,76	0,65	0,76	<b>0,69</b>	<b>0,06</b>	
225	1,05	1,04	<b>1,05</b>	<b>0,01</b>	225	0,71	0,60	0,76	0,65	0,76	<b>0,70</b>	<b>0,06</b>	
230	1,06	1,04	<b>1,05</b>	<b>0,01</b>	230	0,73	0,61	0,77	0,66	0,77	<b>0,71</b>	<b>0,06</b>	
235	1,06	1,03	<b>1,05</b>	<b>0,01</b>	235	0,73	0,62	0,77	0,67	0,77	<b>0,71</b>	<b>0,06</b>	
240	1,06	1,03	<b>1,05</b>	<b>0,01</b>	240	0,74	0,62	0,78	0,68	0,78	<b>0,72</b>	<b>0,06</b>	
245	1,06	1,03	<b>1,05</b>	<b>0,02</b>	245	0,74	0,63	0,78	0,68	0,78	<b>0,72</b>	<b>0,06</b>	
250	1,06	1,03	<b>1,05</b>	<b>0,02</b>	250	0,75	0,63	0,79	0,69	0,79	<b>0,73</b>	<b>0,06</b>	
255	1,06	1,03	<b>1,05</b>	<b>0,02</b>	255	0,75	0,63	0,79	0,69	0,79	<b>0,73</b>	<b>0,06</b>	
260	1,06	1,03	<b>1,04</b>	<b>0,02</b>	260	0,75	0,64	0,79	0,70	0,79	<b>0,73</b>	<b>0,06</b>	

## J. Bylaag J: KM2

Tabel J.1: Kraakarea van KM2

Monster	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GEM.	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
STD	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabel J.2: Kapillêre druk van KM2

Min	1	2	GEM.
0	0,00	0,00	0,00
10	0,01	0,00	0,01
20	0,03	0,03	0,03
30	0,06	0,06	0,06
40	0,08	0,08	0,08
50	0,09	0,08	0,09
60	0,09	0,09	0,09
70	0,10	0,09	0,10
80	0,12	0,10	0,11
90	0,14	0,11	0,13
100	0,18	0,13	0,16
110	0,22	0,16	0,19
120	0,29	0,21	0,25
130	0,38	0,31	0,35
140	0,51	0,45	0,48
150	0,66	0,60	0,63
160	0	0	0
170	0	0	0
180	0	0	0
190	0	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0

Tabel J.3: Versakking en krimp van KM2

Min	Versakking					Min	Krimp					
	1	2	3	GEM.	STD		1	2	3	4	GEM.	STD
0	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,01	0,11	0,05	<b>0,06</b>	<b>0,04</b>	5	0,02	0,04	0,05	0,04	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>
10	0,02	0,00	0,09	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	10	0,03	0,04	0,09	0,08	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
15	0,07	0,04	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>	15	0,04	0,05	0,09	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
20	0,28	0,13	0,10	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	20	0,04	0,06	0,10	0,09	<b>0,08</b>	<b>0,02</b>
25	0,35	0,17	0,11	<b>0,21</b>	<b>0,10</b>	25	0,05	0,07	0,11	0,10	<b>0,08</b>	<b>0,02</b>
30	0,44	0,20	0,11	<b>0,25</b>	<b>0,14</b>	30	0,05	0,09	0,11	0,10	<b>0,09</b>	<b>0,02</b>
35	0,48	0,21	0,12	<b>0,27</b>	<b>0,15</b>	35	0,06	0,09	0,12	0,10	<b>0,09</b>	<b>0,02</b>
40	0,52	0,21	0,12	<b>0,28</b>	<b>0,17</b>	40	0,06	0,10	0,12	0,10	<b>0,09</b>	<b>0,02</b>
45	0,53	0,23	0,13	<b>0,30</b>	<b>0,17</b>	45	0,07	0,10	0,13	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
50	0,55	0,25	0,13	<b>0,31</b>	<b>0,18</b>	50	0,07	0,10	0,13	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
55	0,56	0,25	0,13	<b>0,32</b>	<b>0,18</b>	55	0,07	0,11	0,13	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
60	0,57	0,27	0,14	<b>0,32</b>	<b>0,18</b>	60	0,07	0,11	0,14	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
65	0,58	0,27	0,14	<b>0,33</b>	<b>0,18</b>	65	0,07	0,11	0,14	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
70	0,58	0,28	0,14	<b>0,33</b>	<b>0,19</b>	70	0,07	0,11	0,14	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
75	0,59	0,29	0,14	<b>0,34</b>	<b>0,19</b>	75	0,07	0,11	0,14	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
80	0,59	0,30	0,14	<b>0,34</b>	<b>0,19</b>	80	0,07	0,11	0,14	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
85	0,60	0,31	0,14	<b>0,35</b>	<b>0,19</b>	85	0,07	0,11	0,14	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
90	0,60	0,32	0,14	<b>0,35</b>	<b>0,19</b>	90	0,07	0,11	0,14	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
95	0,61	0,33	0,15	<b>0,36</b>	<b>0,19</b>	95	0,07	0,11	0,15	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
100	0,61	0,34	0,15	<b>0,37</b>	<b>0,19</b>	100	0,07	0,11	0,15	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
105	0,62	0,35	0,15	<b>0,37</b>	<b>0,19</b>	105	0,07	0,11	0,15	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
110	0,62	0,37	0,15	<b>0,38</b>	<b>0,19</b>	110	0,07	0,11	0,15	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
115	0,63	0,38	0,15	<b>0,38</b>	<b>0,20</b>	115	0,07	0,11	0,15	0,09	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>
120	0,65	0,39	0,15	<b>0,40</b>	<b>0,20</b>	120	0,07	0,12	0,15	0,09	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>
125	0,66	0,40	0,15	<b>0,40</b>	<b>0,21</b>	125	0,07	0,12	0,15	0,09	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>
130	0,69	0,42	0,15	<b>0,42</b>	<b>0,22</b>	130	0,07	0,12	0,15	0,09	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>
135	0,70	0,43	0,15	<b>0,43</b>	<b>0,23</b>	135	0,07	0,12	0,15	0,09	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>
140	0,72	0,45	0,15	<b>0,44</b>	<b>0,23</b>	140	0,08	0,12	0,15	0,09	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>
145	0,73	0,47	0,16	<b>0,45</b>	<b>0,24</b>	145	0,09	0,13	0,16	0,09	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>
150	0,75	0,49	0,17	<b>0,47</b>	<b>0,24</b>	150	0,10	0,15	0,17	0,08	<b>0,12</b>	<b>0,03</b>
155	0,75	0,51	0,18	<b>0,48</b>	<b>0,23</b>	155	0,11	0,16	0,18	0,08	<b>0,13</b>	<b>0,04</b>
160	0,76	0,52	0,21	<b>0,50</b>	<b>0,23</b>	160	0,13	0,17	0,21	0,07	<b>0,15</b>	<b>0,05</b>
165	0,77	0,53	0,23	<b>0,51</b>	<b>0,22</b>	165	0,14	0,19	0,23	0,07	<b>0,16</b>	<b>0,06</b>
170	0,78	0,54	0,25	<b>0,52</b>	<b>0,21</b>	170	0,15	0,20	0,25	0,11	<b>0,18</b>	<b>0,05</b>
175	0,78	0,56	0,27	<b>0,54</b>	<b>0,21</b>	175	0,15	0,21	0,27	0,13	<b>0,19</b>	<b>0,05</b>
180	0,80	0,57	0,28	<b>0,55</b>	<b>0,21</b>	180	0,16	0,22	0,28	0,19	<b>0,21</b>	<b>0,04</b>
185	0,80	0,58	0,29	<b>0,56</b>	<b>0,21</b>	185	0,16	0,23	0,29	0,20	<b>0,22</b>	<b>0,05</b>
190	0,81	0,60	0,31	<b>0,57</b>	<b>0,21</b>	190	0,16	0,24	0,31	0,21	<b>0,23</b>	<b>0,05</b>
195	0,82	0,61	0,32	<b>0,58</b>	<b>0,21</b>	195	0,19	0,25	0,32	0,22	<b>0,24</b>	<b>0,05</b>
200	0,83	0,62	0,33	<b>0,59</b>	<b>0,21</b>	200	0,21	0,25	0,33	0,23	<b>0,26</b>	<b>0,05</b>
205	0,84	0,63	0,34	<b>0,60</b>	<b>0,21</b>	205	0,22	0,26	0,34	0,23	<b>0,26</b>	<b>0,05</b>
210	0,85	0,64	0,35	<b>0,61</b>	<b>0,20</b>	210	0,22	0,27	0,35	0,24	<b>0,27</b>	<b>0,05</b>
215	0,85	0,64	0,36	<b>0,62</b>	<b>0,20</b>	215	0,23	0,27	0,36	0,25	<b>0,28</b>	<b>0,05</b>
220	0,86	0,65	0,37	<b>0,62</b>	<b>0,20</b>	220	0,23	0,28	0,37	0,26	<b>0,28</b>	<b>0,05</b>
225	0,86	0,65	0,37	<b>0,63</b>	<b>0,20</b>	225	0,24	0,28	0,37	0,26	<b>0,29</b>	<b>0,05</b>
230	0,87	0,65	0,37	<b>0,63</b>	<b>0,20</b>	230	0,24	0,28	0,37	0,27	<b>0,29</b>	<b>0,05</b>
235	0,87	0,66	0,38	<b>0,63</b>	<b>0,20</b>	235	0,24	0,29	0,38	0,27	<b>0,29</b>	<b>0,05</b>
240	0,87	0,66	0,38	<b>0,63</b>	<b>0,20</b>	240	0,25	0,29	0,38	0,27	<b>0,30</b>	<b>0,05</b>
245	0,87	0,66	0,38	<b>0,64</b>	<b>0,20</b>	245	0,25	0,29	0,38	0,28	<b>0,30</b>	<b>0,05</b>
250	0,87	0,65	0,39	<b>0,64</b>	<b>0,20</b>	250	0,25	0,29	0,39	0,28	<b>0,30</b>	<b>0,05</b>
255	0,87	0,65	0,39	<b>0,64</b>	<b>0,20</b>	255	0,26	0,30	0,39	0,29	<b>0,31</b>	<b>0,05</b>
260	0,87	0,65	0,39	<b>0,64</b>	<b>0,19</b>	260	0,26	0,30	0,39	0,29	<b>0,31</b>	<b>0,05</b>

## K. Bylaag K: KM3

Tabel K.1: Kraakarea van KM3

Monster	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	33,7064	50,1802	62,6949	63,985	75,1195	99,3096
2	0	0	0	0	0	0	0	0	31,3388	61,2388	74,2388	75,6784	78,1644	119,7692
3	0	0	0	0	0	0	0	6,8	48,373	93,773	94,3352	97,0775	113,8217	116,1992
4	0	0	0	0	0	0	0	5,7	32,0684	75,2804	88,2676	85,6744	101,1774	118,8548
GEM.	0	0	0	0	0	0	0,00	3,13	36,37	70,12	79,88	80,60	92,07	113,53
STD	0	0	0	0	0	0	0,00	3,15	6,98	16,30	12,31	12,22	16,10	8,32

Tabel K.2: Kapillêre druk van KM3

Min	1	2	3	4	GEM.
0	0	0	0	0	0
10	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
20	0,04	0,03	0,06	0,05	0,04
30	0,06	0,05	0,08	0,07	0,06
40	0,07	0,07	0,09	0,09	0,08
50	0,09	0,09	0,11	0,11	0,10
60	0,12	0,11	0,13	0,14	0,12
70	0,17	0,13	0,18	0,17	0,16
80	0,24	0,18	0,11	0,26	0,20
90	0,08	0,11	0,10	0,13	0,11
100	0,11	0,09	0,11	0,13	0,11
110	0,15	0,11	0,13	0,14	0,13
120	0,29	0,13	0,15	0,17	0,18
130	0,51	0,17	0,38	0,27	0,33
140	0,72	0,25	0,66	0,51	0,53
150	0,91	0,51	0,78	0,80	0,75
160	1,12	0,90	1,24	1,07	1,08
170	0	1,30	1,68	1,61	1,54
180	0	0	0	0	0
190	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0
210	0	0	0	0	0
220	0	0	0	0	0
230	0	0	0	0	0
240	0	0	0	0	0
250	0	0	0	0	0
260	0	0	0	0	0



# **Influence of liquid curing measures on plastic shrinkage cracking of concrete**

by

Jurie Wynand Visagie

*Thesis presented in fulfilment of the requirements for the degree of  
Master of Engineering in Civil Engineering in the Faculty of Engineering  
at Stellenbosch University*

Study leader: Dr Riaan Combrinck

March 2019

## **Declaration**

By submitting this dissertation electronically, I declare that the entirety of the work contained therein is my own, original work, that I am the sole author thereof (save to the extent explicitly otherwise stated), that reproduction and publication thereof by Stellenbosch University will not infringe any third-party rights and that I have not previously in its entirety or in part submitted it for obtaining any qualification.

December 2019



## Abstract

The cracking of concrete is a common issue which may cause durability, service life and aesthetic concerns. Different means can be implemented to combat the formation of cracks, including various means of curing. The most commonly used curing is the spraying or misting of concrete using water, however these are but two of many methods available which can be applied to fresh and hardened concrete. The cracks that occur during the fresh state of concrete are referred to as plastic cracks since these cracks form while the concrete is still in a plastic to semi-plastic state. These plastic cracks occur especially in concrete elements with large surface areas which are exposed to harsh environment conditions with high evaporation rates.

This study investigates the influence of liquid curing measures on the cracking of plastic concrete. It is well known that factors such as shrinkage, settlement and capillary pressure affects the cracking of concrete and that these factors predominantly occur during the setting of concrete. It is within the plastic phase that these factors are the most influential and most likely to be altered by curing. It is known that surface curing of concrete mitigates plastic shrinkage cracking when applied correctly and at the appropriate time. In this research, both single and multiple water application as well as three curing compounds were used to investigate the effect of curing on plastic shrinkage cracking.

Single application water curing was spray applied at critical times during the development of typical plastic cracking such as: before the start of capillary pressure buildup, start of significant shrinkage, before and on the first visible surface crack, and during rapid crack growth. Multiple application water curing was spray applied to limit the shrinkage of concrete aiming to limit or prevent cracking from occurring. Water curing performance was also compared to a wax emulsion, petroleum-based resin and water-based acrylic emulsion curing compounds, all applied at the supplier specified times.

The findings of this research showed that any application of curing helps to relieve the associated potential plastic shrinkage cracking of concrete. Optimal water curing application based on the response of the various mechanisms of plastic shrinkage cracking was found to be just after the start of shrinkage, about an hour after casting in this research and before any shrinkage-related damage to the concrete, confirmed by the limiting of the shrinkage multiple application test.

The multiple curing application proved to prevent surface cracking when limiting the shrinkage of concrete to approximately 5% of the uncured sample (approximately 0.061 mm), while even the 5% growth step limitation proved to lower the crack area significantly. In general, water curing done either too early or after plastic cracks have formed, is ineffective. All curing compounds applied, reduced the crack area, with only the petroleum resin-based curing compound resulting in no surface crack formation.

Finally, once-off application of water curing in extreme environmental conditions with high evaporation, is not enough to prevent plastic cracking, especially if the application timing is not optimal. Whereas multiple curing application proved to be far more successful and could prevent surface cracking. This research shows that curing, especially single application curing at the start of shrinkage and multiple application curing aimed to limit shrinkage, can prevent cracking in less severe environmental conditions.

## Opsomming

Die kraak van beton is 'n algemene probleem wat kan lei tot verlies aan duursaamheid, dienslewe en estetiese waarde. Tog is daar verskeie beskikbare maniere om die ontwikkeling van krale te verhoed of te beperk met onder meer die gebruik van verskeie kuringsmetodes en -materiale. Die mees gebruikte metodes onder die verskeie beskikbare kuringsmetodes, is die bespuiting en bevogting van beton met water. Hierdie is egter slegs twee van vele beskikbare metodes gemik op die kuring van vars en verharde beton. Die vorming van krale gedurende die vars stadium staan bekend as plastiese krale aangesien hierdie krale gedurende die plastiese na semi-plastiese fase van beton vorm. Die gevaar van plastiese krale word veral gevind in elemente met groot oppervlakareas wat aan omgewings met hoë verdampingstempo blootgestel is.

Die studie ondersoek die invloed van vloeibare kuringsmiddels op plastiese beton. Dit word algemeen aanvaar dat faktore soos krimp, versakking en kapillêre druk die kraak van beton beïnvloed aangesien die faktore oorwegend plaasvind gedurende die stolling van beton. Dit is gedurende die plastiese fase dat dié faktore die meeste deur kuring beïnvloed word. Dit word algemeen aanvaar dat oppervlakkuring die gevaar van plastiese krale verminder indien die middels op die regte tyd, plek en wyse toegepas word. In hierdie studie word beide enkel en veelvuldige toepassings, sowel as drie kuringsmiddels, gebruik om die invloed van kuring op plastiese kraakontwikkeling en die gedrag daarvan te ondersoek.

Enkeltoepassing van waterkuring is toegepas op kritieke tye gedurende die ontwikkeling van plastiese krale, naamlik vóór die opbou van kapillêre druk, begin van beduidende krimp, vóór en op die eerste sigbare haarlynkraak, sowel as gedurende die vinnige kraakgroeiperiode. Veelvuldige toepassings van waterkuring is toegepas om die krimp van beton in te perk en sodoende die kraak van beton te verminder of selfs te voorkom. Die gedrag van waterkuring is ook vergelyk met die gedrag van drie kuringsmiddels wat tans in die praktyk beskikbaar is, naamlik 'n wasemulsie, petroleumharsemulsie en 'n akriemulsie. Die kuringsmiddels is toegepas soos voorgeskryf deur die verskaffer.

Die studie het bevind dat enige toepassing van kuring die ontwikkeling van potensiële plastiese kroke verlig. In hierdie studie is daar bevind dat die kuring net vóór die beduidende groei van krimp optimaal was. Hierdie is bevestig deur die veelvuldige toepassings van kuring wat daarop gemik was om die krimp van beton te beperk. Die veelvuldige kuringstoepassings, gemik daarop om die krimp van beton na 5% van die ongekuurde monster se finale krimpwaarde in te perk, bewys dat oppervlakkroke voorkombaar is.

Oor die algemeen is dit bevind dat waterkuring wat té vroeg of té laat na die ontwikkeling van plastiese kroke toegepas word, oneffektief is. Al die kuringsmiddels het die kraakarea's verlaag, terwyl die petroleumemulsie selfs oppervlakkroke voorkom het.

Ten slotte, 'n enkeltoepassing van waterkuring in uiterste omstandighede met hoë verdamping, is nie genoeg om plastiese kroke te voorkom nie, veral as die toepassing nie op die regte tyd toegepas word nie. Tog was die veelvuldige toepassing van waterkuring meer suksesvol en is oppervlakkroke voorkom. Die studie wys dat kuring, veral die enkeltoepassing van waterkuring net vóór beduidende krimp, sowel as die veelvuldige toepassing van kuring gemik op die beperking van krimp, moontlik kroke kan voorkom in minder ernstige toestande.

## Acknowledgements

I would like to thank the following people for the assistance, support and guidance during this study:

- Financial support from SA Akademie
- My promoter, Dr Riaan Combrinck for creating an environment allowing growth and learning, by providing guidance when needed, continuous support and belief throughout and before the study.
- The staff in the laboratory and workshop at the Civil Engineering Department of Stellenbosch University, for their assistance and time during the experimental work, specifically Oom John, Charlton and Lee-roy.
- Chryso for sponsoring the curing agents used as well as guidance on their common use
- My parents for their unconditional love and support during all of my studies.
- My girlfriend, Roné Roux, and her parents for their support and accommodation throughout the study
- My close friends, Philip Strydom and Pieter van Zyl, for their continued support and comradery.
- Finally, my Creator and Saviour, for giving me the opportunity and ability to complete this study.

This work is based on the research supported in part by the National Research Foundation of South Africa via the Thuthuka and Thrip research and development instruments. Any opinion, finding and conclusions or recommendation expressed in this material is that of the author(s) and the NRF does not accept any liability on this regard. The support of Pretoria Portland Cement (PPC) and Chryso South Africa are also gratefully acknowledged.

## Table of Contents

Declaration.....	i
Abstract.....	ii
Opsomming.....	iv
Acknowledgements.....	vi
List of Figures.....	x
List of Tables.....	xiii
Definitions.....	xv
Notations.....	xv
Units.....	xv
1. Introduction.....	1
1.1. Objectives.....	3
1.2. Methodology.....	3
1.3. Research significance.....	4
1.4. Report outline.....	4
2. Background study.....	6
2.1. Concrete.....	6
2.1.1. Hydration.....	6
2.1.2. Bleeding.....	9
2.1.3. Evaporation.....	10
2.1.4. Climate.....	10
2.1.5. Capillary pressure.....	12
2.2. Plastic cracking.....	15
2.2.1. Plastic settlement cracking.....	15
2.2.2. Plastic shrinkage cracking.....	16

2.2.3.	Factors influencing plastic cracking .....	16
2.3.	Curing.....	18
2.3.1.	Initial vs late curing .....	18
2.3.2.	External liquid curing .....	19
2.3.3.	External covering .....	21
2.3.4.	Pre-emptive measures .....	23
2.4.	Influence of curing measures on plastic shrinkage cracking.....	23
3.	Experimental framework .....	26
3.1.	Mix design and material constitutes.....	26
3.2.	Test methods .....	27
3.2.1.	Cracking .....	27
3.2.2.	Volumetric change .....	29
3.2.3.	Capillary pressure .....	30
3.2.4.	Bleeding .....	33
3.2.5.	Evaporation of standard units .....	35
3.2.6.	Evaporation of curing agents .....	35
3.2.7.	Setting time .....	36
3.3.	Test conditions .....	37
3.4.	Mixing procedures.....	38
3.5.	Curing application and scheduling.....	40
3.5.1.	Curing application.....	40
3.5.2.	Curing quantity .....	41
3.5.3.	Curing scheduling .....	42
3.6.	Test quantities and data acquisition .....	44
4.	Results.....	47

4.1.	Uncured concrete.....	47
4.2.	Bleeding and evaporation of uncured concrete .....	49
4.3.	Single water curing.....	50
4.4.	Multiple water curing .....	57
4.5.	Curing using curing agents.....	60
4.6.	Evaporation of the curing agents.....	64
4.7.	Value of curing.....	66
5.	Conclusions and recommendations.....	73
6.	References.....	76
A.	Appendix A: Uncured.....	a
B.	Appendix B: WST1.....	c
C.	Appendix C: WST2.....	e
D.	Appendix D: WST3 .....	g
E.	Appendix E: WST4.....	i
F.	Appendix F: WST5.....	k
G.	Appendix G: WM5I.....	m
H.	Appendix H: WM5S .....	o
I.	Appendix I: CA1 .....	q
J.	Appendix J: CA2.....	s
K.	Appendix K: CA3 .....	u



## List of Figures

Figure 2.1: Stages of Concrete Hydration (Adapted from (Combrinck, 2016)).....	7
Figure 2.2: Calcium Silicate Hydrates (C-S-H) crystals in cement paste (Mehta and Monteiro, 2006) .....	8
Figure 2.3: Bleeding of concrete ( <a href="https://www.youtube.com/user/WarunaThejana">https://www.youtube.com/user/WarunaThejana</a> , 2018) .....	9
Figure 2.4: Meniscus forming in capillary pore (Combrinck and Boshoff, 2012) .....	12
Figure 2.5: Capillary development due to particle behaviour.....	13
Figure 2.6: Stages of capillary development (Combrinck and Boshoff, 2012) .....	13
Figure 2.7: Mechanisms for plastic settlement cracking (Khan, 2018) .....	16
Figure 2.8: Initial and late curing timing (Powers, 1968).....	19
Figure 2.9: Misting of concrete (Kosmatka and Wilson, 2002) .....	20
Figure 2.10: Impervious paper curing (Cement concrete & aggregate Australia, 2006).....	22
Figure 2.11: Capillary pressure behaviour due to single curing application (Schmidt and Slowik, 2009).....	24
Figure 2.12: Capillary pressure behaviour due to multiple curing application (Schmidt and Slowik, 2009).....	24
Figure 2.13: Left: Crack development due to multiple curing application, Right: Crack development of uncured test (Schmidt and Slowik, 2009) .....	25
Figure 3.1: a) Slump test b) Cube strength samples .....	27
Figure 3.2: Crack mould layout .....	27
Figure 3.3: Crack area measurements .....	28
Figure 3.4: Settlement setup of the shrinkage mould (Le Roux, 2014).....	29
Figure 3.5: Shrinkage setup of the shrinkage mould (Le Roux, 2014).....	30
Figure 3.6: Capillary pressure sensor on the shrinkage mould.....	31
Figure 3.7: Capillary sensor testing .....	31
Figure 3.8: Expected capillary data compared to the data obtained from the sensor .....	32
Figure 3.9: Capillary pressure representative function .....	32
Figure 3.10: Bleeding mould and equipment.....	33
Figure 3.11: Bleeding mould covering .....	34
Figure 3.12: Expected behaviour of bleeding .....	34
Figure 3.13: Evaporation mould .....	35

Figure 3.14: Evaporation of curing agent .....	35
Figure 3.15: Vicat penetration setup .....	36
Figure 3.16: Setting time specimens .....	36
Figure 3.17: Climate Chamber layout (Combrinck, 2016) .....	37
Figure 3.18: Mixing procedure .....	39
Figure 3.19: Curing application equipment .....	40
Figure 3.20: Uncured plastic shrinkage cracking behaviour and curing times, T1- T5.....	43
Figure 3.21: Settlement and shrinkage representatives.....	46
Figure 3.22: Crack area representative .....	46
Figure 4.1: Uncured concrete test results in terms of shrinkage, settlement, capillary pressure and crack area .....	48
Figure 4.2: The bleeding compared to the evaporation of the uncured sample.....	49
Figure 4.3: Single water curing application before significant capillary buildup (WST1) .....	50
Figure 4.4: Single water curing application at start of shrinkage (WST2) .....	51
Figure 4.5: Single water curing application before the appearance of crack (WST3).....	53
Figure 4.6: Single water curing application on the first visible crack (WST4).....	53
Figure 4.7: Single water curing application during rapid growth period of crack (WST5).....	54
Figure 4.8: Summary of single application 1 mm curing crack area .....	55
Figure 4.9: Summary of single application 1 mm curing shrinkage.....	56
Figure 4.10: Summary of single application 1 mm curing capillary pressure .....	56
Figure 4.11: Summary of single application 1 mm curing settlement.....	57
Figure 4.12: Calculation scheme for calculation of the average shrinkage at a given time ....	58
Figure 4.13: Multiple water curing application at every 5% increase in shrinkage (WM5I) ..	59
Figure 4.14: Multiple water curing application to a final shrinkage of 5% (WM5S).....	60
Figure 4.15: Layer created by the petroleum curing agent (CA2).....	60
Figure 4.16: Wax emulsion-based curing agent (CA1) .....	61
Figure 4.17: Petroleum resin-based curing agent (CA2) .....	62
Figure 4.18: Petroleum resin-based curing agent settlement (CA2).....	63
Figure 4.19: Internal crack formation of the petroleum resin-based curing agent (CA2) .....	63
Figure 4.20: Water Acrylic emulsion-based curing agent (CA3) .....	64

Figure 4.21: Evaporation of the samples cured using curing agents and the curing agent's loss of mass due to creation of the impermeable layer. ....	65
Figure 4.22: Evaporation of the cured concrete using curing agents adjusted for the loss of mass of the agents .....	66
Figure 4.23: Summary of curing applications crack area .....	68
Figure 4.24: Summary of curing applications capillary pressure .....	69
Figure 4.25: Summary of optimum curing application of each curing period or method .....	69
Figure 4.26: Shrinkage and settlement reduction versus final crack area.....	71
Figure 4.27: Shrinkage, capillary pressure and first crack appearance versus final crack area. ....	72

## List of Tables

Table 3.1: Concrete mix constituents, proportions and, properties .....	26
Table 3.2: Curing regime and designation .....	44
Table 3.3: Test sample quantities.....	45
Table 4.1: Summary of curing application .....	70
Table A.1: Crack area of uncured sample.....	a
Table A.2: Capillary pressure of uncured sample.....	a
Table A.3: Shrinkage and settlement of the uncured sample.....	b
Table B.1: Crack area of WST1 .....	c
Table B.2: Capillary pressure of WST1 .....	c
Table B.3: Shrinkage and settlement of WST1 .....	d
Table C.1: Crack area of WST2.....	e
Table C.2: Capillary pressure of WST2.....	e
Table C.3: Shrinkage and settlement of WST2 .....	f
Table D.1: Crack area of WST3 .....	g
Table D.2: Capillary pressure of WST3 .....	g
Table D.3: Shrinkage and settlement of WST3 .....	h
Table E.1: Crack area of WST4 .....	i
Table E.2: Capillary pressure of WST4 .....	i
Table E.3: Shrinkage and settlement of WST4.....	j
Table F.1: Crack area of WST5 .....	k
Table F.2: Capillary pressure of WST5 .....	k
Table F.3: Shrinkage and settlement of WST5 .....	l
Table G.1: Crack area of WM5I .....	m
Table G.2: Capillary pressure of WM5I .....	m
Table G.3: Shrinkage of WM5I .....	n
Table H.1: Crack area of WM5S .....	o
Table H.2: Capillary pressure of WM5S .....	o
Table H.3: Shrinkage of WM5S .....	p
Table I.1: Crack area of CA1 .....	q

Table I.2: Capillary pressure of CA1 .....	q
Table I.3: Shrinkage and settlement of CA1 .....	r
Table J.1: Crack area of CA2.....	s
Table J.2: Capillary pressure of CA2.....	s
Table J.3: Shrinkage and settlement of CA2 .....	t
Table K.1: Crack area of CA3 .....	u
Table K.2: Capillary pressure of CA3 .....	u
Table K.3: Shrinkage and settlement of CA3 .....	v

## Definitions

### Notations

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Standard Testing Method
Bleed	Bleeding water
CA	Curing Agent
C-S-H	Calcium Silicate Hydrates
Evap	Evaporation rate [ $\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$ ]
Evap <sub>std</sub>	Standard evaporation [ $1 \text{ kg}/\text{m}^2/\text{h}$ ]
LVDT	Linear Variable Displacement Transducer
$P_{\text{cap}}$	Capillary Pressure
PPC	Pretoria Portland Cement
PPE	Personal Protective Equipment
PSC	Plastic Shrinkage Cracking
PVC	Polymerizing Vinyl Chloride
SANS	South African National Standards
Temp	Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]
WC	Water-Cement ratio [ $\text{Mass}_{\text{water}}/\text{Mass}_{\text{cement}}$ ]

### Units

N	Newton
kN	Kilonewton [ $10^3 \text{ N}$ ]
Pa	Pascal [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]
kPa	Kilopascal [ $10^3 \text{ Pa}$ ]
MPa	Megapascal [ $10^6 \text{ Pa}$ ]
psig	Pounds per square inch gauge [ $6.89476 \text{ kPa}$ ]

## 1. Introduction

Plastic shrinkage cracking is an unwanted result of volumetric shrinkage that takes place in freshly cast concrete elements with large exposed surfaces (Powers, 1968). It is influenced by the consolidation of denser concrete constituents, such as aggregates, sand, and cement, in a fluid medium, causing water to rise to the surface in a phenomenon known as bleeding (Slowik, Schmidt, *et al.*, 2008). The rate of bleeding versus that of evaporation becomes one of the deciding factors for plastic cracking incidences (Wittmann, 1975; Cohen, Olek, *et al.*, 1989; Krönlof, Leivo, *et al.*, 1995; Uno, 1998; Slowik, Schmidt, *et al.*, 2008). Concrete is highly susceptible to cracking within the plastic state since it offers little resistance to the cracking phenomena.

This phenomenon includes the induced stresses and strains due to the existence of restraint, such as reinforcement, mould friction, level differences, etc. Cracking occurs when these stresses and strains exceed the allowable capacities (Olivier, Combrinck, *et al.*, 2018; Combrinck and Boshoff, 2019). Plastic shrinkage cracks are usually crisscrossed and of an irregular pattern, with lengths of 50-1000 mm, and widths that may exceed 1 mm (Slowik, Schmidt, *et al.*, 2008). These cracks, if unattended to, become paths for deleterious substances that may further impair the durability of concrete structures, particularly those with large exposed elements, such as concrete slabs, and reinforcement (Qi, 2003; Otieno, Alexander, *et al.*, 2010).

There are a number of plastic shrinkage and settlement mitigation approaches, categorised as either internal material design-based or externally applied techniques. One of the external approaches to mitigate plastic cracking is curing, which involves the wetting of the concrete surface with water or curing compounds (Slowik, Hubner, *et al.*, 2009; Ghourchian, Wyrzykowski, *et al.*, 2016). This can be achieved through fogging, water ponding, water-saturated coverings, or using surface sealing such as plastic sheets, curing compounds and waterproof paper. Curing helps to maintain a layer of water on the surface of plastic concrete, and in the process delay or prevent the development of extreme tensile capillary pore pressures which is the precursor for plastic shrinkage cracking (ACI 308R, 2001; Slowik, Hubner, *et al.*, 2009).

The American Concrete Institute (ACI) proposes a mitigation method of plastic shrinkage cracking based on the evaporation rate of surface bleed water (ACI 305.1-06, 2007). By relying on a predicted evaporation rate based on Uno's equation and comparing it to the measured in-situ concrete bleeding rate, curing measures can be adopted to combat possible plastic shrinkage cracking (Uno, 1998). Kwak and Ha (2006) proposed an analytical model that determines the drying time of a given concrete slab, which is the time when the bleeding and evaporation amount of surface moisture are balanced. This model assumes that cracking can only occur once the drying time is reached. The general understanding is that curing should be performed just before or immediately after the drying time is reached (Kwak and Ha, 2006).

Contrary to external or active crack mitigation measures, passive solutions relying on material properties modifications are commonly used to combat plastic shrinkage cracking. These approaches involve the use of mineral or liquid admixtures, such as shrinkage reducing admixtures and accelerators (Krönlof, Leivo, *et al.*, 1995; Lura, Pease, *et al.*, 2007; Mora-Ruacho, Gettu, *et al.*, 2008; Leemann, Nygaard, *et al.*, 2013; Combrinck, Kayondo, *et al.*, 2019). At the same time, careful consideration should be given when using certain admixtures such as retarders and plasticisers or other water reducing admixtures, which may instead accelerate plastic shrinkage phenomena (Krönlof, Leivo, *et al.*, 1995).

Of equal concern, shrinkage reducing admixtures may negatively impact the mechanical properties of concrete such as compressive strength, if used in high dosages. The use of fibres as a passive approach to plastic shrinkage reduction works by reducing settlement and increasing cohesion throughout the concrete matrix, all of which help to reduce incidences of cracking (Olivier, Combrinck, *et al.*, 2018). Material design methods to mitigate plastic shrinkage cracking, work from within to modify the properties of the fresh concrete to resist or reduce the impact of the mechanisms leading to plastic shrinkage cracking, whereas curing on the other hand may be performed after the concrete is cast.

The curing measures immediately adopted are capable of either abating or increasing the severity of plastic shrinkage cracking. Active measures such as fogging are aimed at increasing the relative humidity above the concrete surface, a procedure that delays evaporation. Most of these procedures or precautionary measures are aimed at reducing the water loss from concrete, either by delaying the evaporation, or replenishing evaporating water (Uno, 1998; ACI 308R, 2001).



Initial curing procedures, for example: spraying a fine water mist above the concrete surface, e.g. fogging, covering the concrete with hessian or plastic sheeting, spraying curing compound or evaporative retarders all aim to minimize the evaporation rate. The timing and correct application of these curing procedures are crucial to their success. Curing can only be effective if applied before the cracking has occurred and cannot close cracks once they are formed. To prevent plastic shrinkage cracks, ACI 308R proposes that these curing measures should be applied the moment all bleed water on the surface has evaporated (ACI 308R, 2001).

This research attempts to provide a practical and reliable approach to the use of surface curing measures aimed at alleviating the challenges of plastic shrinkage cracking. By investigating the effectiveness of fogging and that of curing compounds at different application times on the surface of concrete, a reliable curing regime can be adopted. The effectiveness of any curing method is directly related to the timing of its application. The decision on timing can be guided by the initial and final setting times, capillary pore pressure, shrinkage and settlement development, bleeding and evaporation characteristics of the concrete, as well as the appearance of cracks. In this study the influence of water curing timing, curing single and multiple application and curing compounds on plastic shrinkage cracking are investigated.

## **1.1. Objectives**

This study aims to investigate:

- The influence of externally applied water curing on the plastic shrinkage cracking of concrete
- The effectivity of multiple water curing compared to single water curing
- The influence of externally applied liquid curing agents on the plastic shrinkage cracking of concrete

## **1.2. Methodology**

The methodology adopted to achieve the objectives set out for this study include:

- Conduct a thorough literature study on the behaviour of concrete and the internal properties during the fresh state in which concrete hardens from a suspended liquid to a solid. The literature study should include shrinkage, settlement, bleeding, evaporation, capillary pressure, plastic cracking as well as curing.

- Conduct experiments on uncured concrete in the plastic state to determine the bleeding, evaporation, shrinkage, settlement, capillary pressure and cracking of plastic concrete in a severe environment ideal for cracking.
- Using the results obtained from the uncured concrete tests to plan a testing regime to test the influence of liquid curing measures.
- Analyse and discuss all results and draw appropriate conclusions and recommendations.

### **1.3. Research significance**

The prevention of the cracking of concrete in the hardened state is of well-known importance as cracking could decrease the durability, service life and stability of a structure, while also decreasing the aesthetic value. However, the predominant combative measures taken to prevent cracking are mostly done after the concrete has set. This study aims to highlight the importance of implementing preventative measure during the plastic phase as the cracking during this phase is one of the earliest defects that occurs in concrete structures and can therefore result in severe durability, maintenance and even structural issues.

This study focuses on the externally applied liquid curing measures which is regularly used in practice. However, not much research has been done that experimentally shows how these curing measures influence the factors and mechanisms known to cause plastic shrinkage cracking (Schmidt and Slowik, 2009).

All the knowledge and understanding gained can be used to prescribe optimum curing regimes in which plastic shrinkage cracking can be completely prevented. This prevention will improve the durability and stability of the structure by reducing the required maintenance and associated cost. This will aid the global drive towards sustainable, aesthetical, multi-purpose use, economical, safe and secure infrastructure.

### **1.4. Report outline**

Chapter 1 provides an introduction to this study along with the objectives, methodology and research significance.

Chapter 2 provides the background study required to understand concrete, its internal properties, behaviour of plastic cracking and thereby serve as basis for the experimentation done and results obtained in this study. This includes background on the hydration of concrete, behaviour of fresh concrete, plastic cracking as well as curing measures.

Chapter 3 describes the experimental framework required for the tests conducted in this study. This includes descriptions of the moulds, mixers and testing equipment used along with the procedures followed. This chapter also describes the materials and mixes used for testing as well as the application of the curing measures.

Chapter 4 provides and discusses the results of the tests including the setting times, slump, bleeding, evaporation, shrinkage, settlement, capillary pressure and crack area development for cured and uncured concrete.

Chapter 5 provides the final conclusions drawn from this study as well as recommendations for future work.

## 2. Background study

This chapter provides a comprehensive background study to help understand the behaviour of plastic shrinkage cracking of freshly cast concrete. The chapter is separated into four main sections. The first section discusses concrete in general, the second explains plastic shrinkage cracking of concrete, the third covers curing methods and the fourth explains the influences of curing on plastic shrinkage cracking.

### 2.1. Concrete

This section discusses the behaviour of conventional concrete, consisting of coarse and fine aggregate, cement powder and water, but may include admixtures and additional constituents. Concrete can be defined as a hard, strong building material made by mixing a cementing material, such as Portland cement and mineral aggregates, such as sand and gravel, with sufficient water to cause the cement hydration which sets and binds the entire mass (Merriam-Webster, 2016). The following sections describe the general behaviour and workings of concrete.

#### 2.1.1. Hydration

Hydration is a chemical reaction between water and cement forming hydration products which binds all the concrete constituents and is ultimately responsible for concrete's strength (Mehta and Monteiro, 2006). This reaction causes a change from a fluid to a solid, occurring over a period of time which can be separated by two arbitrary measurements known as initial and final set (SANS 50196-3, 2006). These measurements are obtained through penetration tests which use the resistance of the paste as an indication of solidification, however this value should be used with caution as it does not measure the chemical response of the reaction.

The hydration reaction can be separated into three main periods, divided by initial and final set as shown in Figure 2.1. This process starts when wet constituents, normally water, are added to the dry constituents, which contains cementitious material, such as Portland cement (Powers, 1968; Combrinck, 2016).

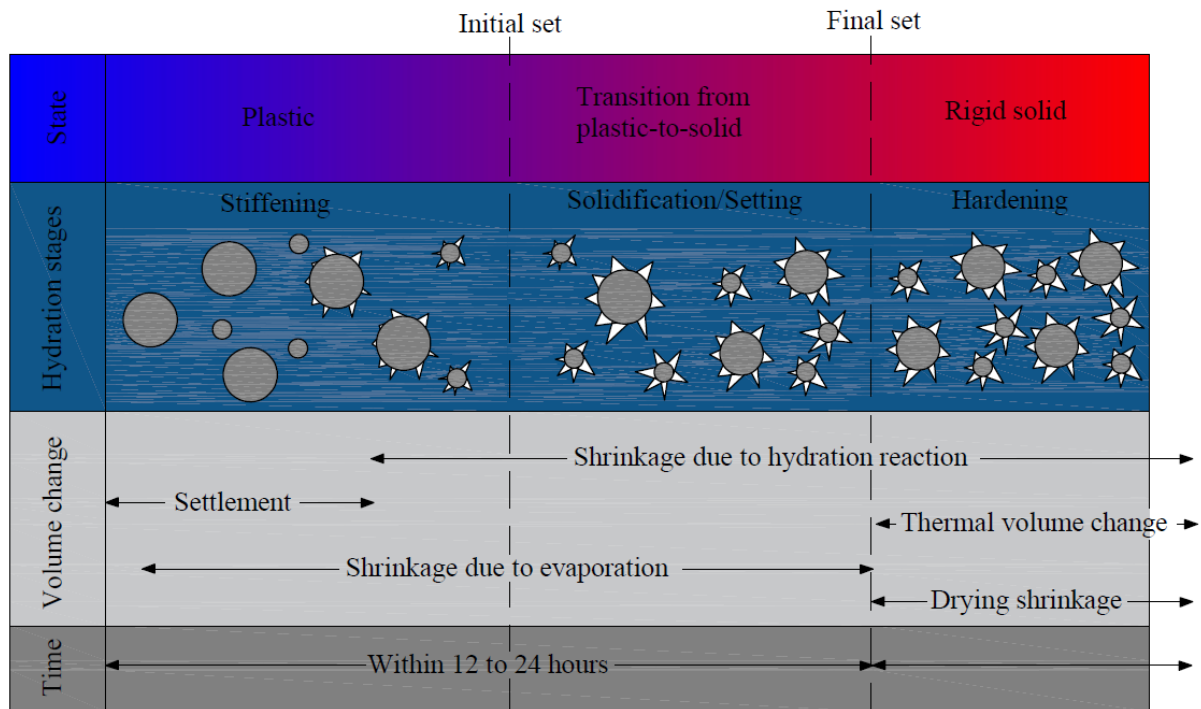


Figure 2.1: Stages of Concrete Hydration (Adapted from (Combrinck, 2016))

### Stiffening stage

The first phase of hydration is known as the stiffening stage, this stage commences when the water comes in contact with the cement. The phase is also known as the loss of consistency of the cement paste phase (Mehta and Monteiro, 2006). During this phase the concrete is placed as the mix is still plastic and fluid. It is also within this stage that the concrete undergoes major settlement and bleeding due to the suspended nature of the constituents along with shrinkage due to evaporation as discussed later in this chapter (Combrinck, 2016).

The rate of heat released during this phase starts with a high peak, which is driven by the initial exothermic reaction between gypsum and aluminates in cement with water. Gypsum is added to prevent the intense reaction between aluminates and water which forms ettringite, a product which causes rapid setting of concrete. After the initial reaction the concrete enters a dormant phase due to the added gypsum slowing the formation of ettringites, this makes the mixture workable for a longer period of time aiding placement. The dormant period typically lasts for two to three hours in an ordinary environmental setting (Mehta and Monteiro, 2006).

## Solidification stage

The second phase is known as the setting or solidification stage, where the mixture transitions from the plastic to the solid state shown by the loss of permeability and porosity (Combrinck, 2016). The start of this phase is designated as the initial set. This phase is also the start of the formation of Calcium Silicate Hydrates (C-S-H) crystals, shown in Figure 2.2, caused by the reaction between water and the silicate, Alite ( $C_3S$ ). These crystals cause the paste to solidify and gives strength to the concrete (Mehta and Monteiro, 2006).

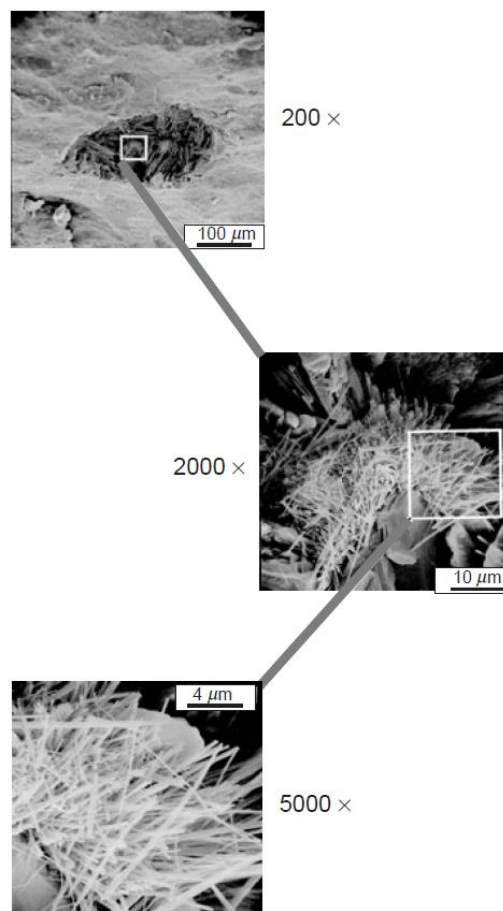


Figure 2.2: Calcium Silicate Hydrates (C-S-H) crystals in cement paste (Mehta and Monteiro, 2006)

## Hardening stage

The next phase starts when the paste has solidified and initiates the start of significant strength gained due to hardening of concrete (Powers, 1968; Combrinck, 2016). This phase starts as the final set is reached and is referred to as the hardening stage. This phase designates the addition of the silicate, Belite ( $C_2S$ ), reaction along with the Alite reaction creating Calcium Silicate Hydrates (C-S-H) crystals. These crystals fill voids contributing to the loss of porosity and the gain of strength (Emeritus, 1990; Mehta and Monteiro, 2006).

### 2.1.2. Bleeding

Bleeding of concrete is defined as the water that rises to the surface of the concrete and is referred to as bleeding water as shown in Figure 2.3. Bleeding occurs when the denser constituents, usually the aggregates, settle within a fluid medium forcing water upwards, which collects on the surface of the concrete (Powers, 1968). Bleeding water acts as an internal curing measure but reduces available water for the hydration reaction. Bleeding initially starts at a constant rate where after the rate gradually decreases to zero.

The bleeding of the sample is an important property as the curing aspect of the bleed water delays the evaporation of concrete pore water, which also delays or prevents plastic cracking as discussed later in this chapter. The rate, along with the amount of bleeding water, is closely monitored as this is measured against evaporation to roughly estimate if cracking will occur (Powers, 1968).



Figure 2.3: Bleeding of concrete (<https://www.youtube.com/user/WarunaThejana>, 2018)

The rate and amount of bleeding is influenced by the fineness and density of the constituents used as well as the amount of water added to the mixture. Admixtures are available which influence the bleeding, these include viscosity modifying agents and air-entrainers. In general, the finer and the more angular the particles in the concrete the less the bleeding (Josserand and de Larrard, 2004; ACI 305.1-06, 2007; Le Roux, 2014; Combrinck, Kayondo, *et al.*, 2019).

### 2.1.3. Evaporation

Evaporation is the process whereby water is extracted from a body in the form of water vapour. From concrete, water predominantly evaporates from the bleeding water on the concrete's surface but also includes water from within the concrete pores. This process is mostly driven by the surrounding environmental conditions and is measured in kilograms per square meter per hour (Powers, 1968).

Evaporation removes moisture from concrete through convection heat which dries out the concrete and aids in stiffening and solidification (Powers, 1968). Evaporation can be mathematically approximated using Equation 1. The most severe evaporation is experienced in dry, warm and windy environments as suggested in the given equation, thus a dry desert environment would show greater evaporation than a humid tropical environment (Uno, 1998).

$$ER = 5[(T_c - 18)^{2.5} - r(T_c + 18)^{2.5}](V + 4) \times 10^{-6} \quad \text{Equation 1}$$

with:

ER = evaporation rate [ $kg/m^2/h$ ]

$T_c$  = concrete temperature [ $^{\circ}C$ ]

r = relative humidity [%]

V = wind velocity [ $km/h$ ]

The influence of the climate on the evaporation and other aspects of the concrete are discussed in the following section.

### 2.1.4. Climate

The climate has a significant impact on the behaviour of concrete, influencing the hydration and evaporation rate (Combrinck and Boshoff, 2012). In dry warm climates a concrete element can dry rapidly together with an increased hydration rate, while in cold climates the hydration reaction is retarded. Thus, the climate has to be carefully considered for any project involving concrete as climate may negatively influence and even damage concrete elements (Penttala, 2015). The climate is mainly determined by the temperature, relative humidity and wind speed as discussed in the following sections.



## Temperature

The temperature or heat around the element influences the hydration reaction, bleeding and evaporation of the concrete element (Combrinck and Boshoff, 2013). Temperature increases the rate and amount of evaporation which removes greater amounts of bleeding water and increases the risk of cracking as discussed in the previous sections. This heat is transferred into the specimen increasing internal heat affecting the exothermic hydration reaction.

In a natural setting the temperature is caused by the heat of the sun's solar radiation whereas artificial factors include heat from lighting, industrial processes, machinery or other forms. These influences usually result in an increase of heat, yet there are other factors that decrease the temperature, such as cloud covering blocking the sun's rays or dew forming on the exposed surface elements.

Although high temperatures are usually a leading climate concern, low temperature may also cause problems including freeze-thaw damage and retardation of the hydration rate. The temperatures for testing in laboratories are normally controlled to be moderate or comfortable using climate-controlled rooms or chambers with electronically controlled heating elements (Almusallam, Maslehuddin, *et al.*, 1998; Uno, 1998; ACI 305.1-06, 2007).

## Relative humidity

Relative humidity, measured as a percentage, is the amount of water vapour present in the air around the concrete body. The humidity influences the evaporation either aiding or counteracting evaporation (Combrinck and Boshoff, 2013). The relative humidity acts as an indication of the amount of water vapour in the air, the higher the humidity the more saturated the air and the harder it is to add more vapour to the air. This is true for the opposite as well, if the humidity is low, water is easily evaporated into the unsaturated air, i.e. the lower the humidity the more the evaporation.

The relative humidity is also influenced by the temperature, the higher the temperature, the lower the relative humidity. This forms part of the phenomenon where air at a certain temperature can only hold a certain amount of water vapour (Uno, 1998). The localised humidity could also be affected by the proximity of a body of water close by, or lack thereof. The humidity around an element can be artificially increased using foggers or misters and decreased using charcoal stones or dehumidifiers (Kosmatka and Wilson, 2002).

## Wind speed

Wind causes the removal of water vapour around the element affecting concrete's drying rate. The higher the wind speed the more effective the removal of the water vapour around the concrete body and therefore the higher the evaporation rate of bleed and concrete pore water from the concrete as discussed in the previous sections (Uno, 1998; Kwak and Ha, 2006; Combrinck, 2012).

Wind is naturally caused by warm air rising and cold air descending causing air molecules to rapidly move from high to low pressure areas. This movement of air or wind transports both heat and water vapour which may add or remove energy from one location to another (Makarieva, Gorshkov, *et al.*, 2010).

### 2.1.5. Capillary pressure

Capillary pressure is driven by evaporation of water from the concrete pores which results in water pressure between solid particles, caused by the formation of menisci between particles and can be expressed mathematically as shown in Equation 2. These forces, as shown in Figure 2.4, act as a three-dimensional force which can be separated into a vertical and horizontal component. These components can be described as settlement in the horizontal and shrinkage in the vertical directions and is confirmed by the capillary behaviour shown in Figure 2.5 (Powers, 1968; Slowik, Schmidt, *et al.*, 2008; Schmidt and Slowik, 2009).

$$P = -\sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{Equation 2}$$

with:

P = capillary pressure

$\sigma$  = surface tension

R<sub>1</sub> = maximum radius of water meniscus

R<sub>2</sub> = minimum radius of water meniscus

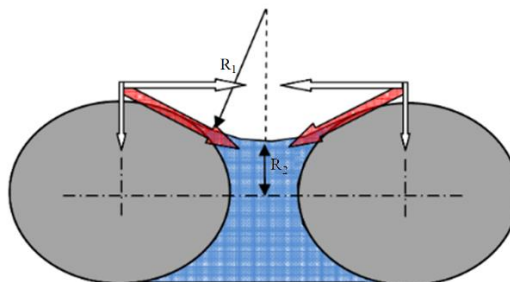


Figure 2.4: Meniscus forming in capillary pore (Combrinck and Boshoff, 2012)

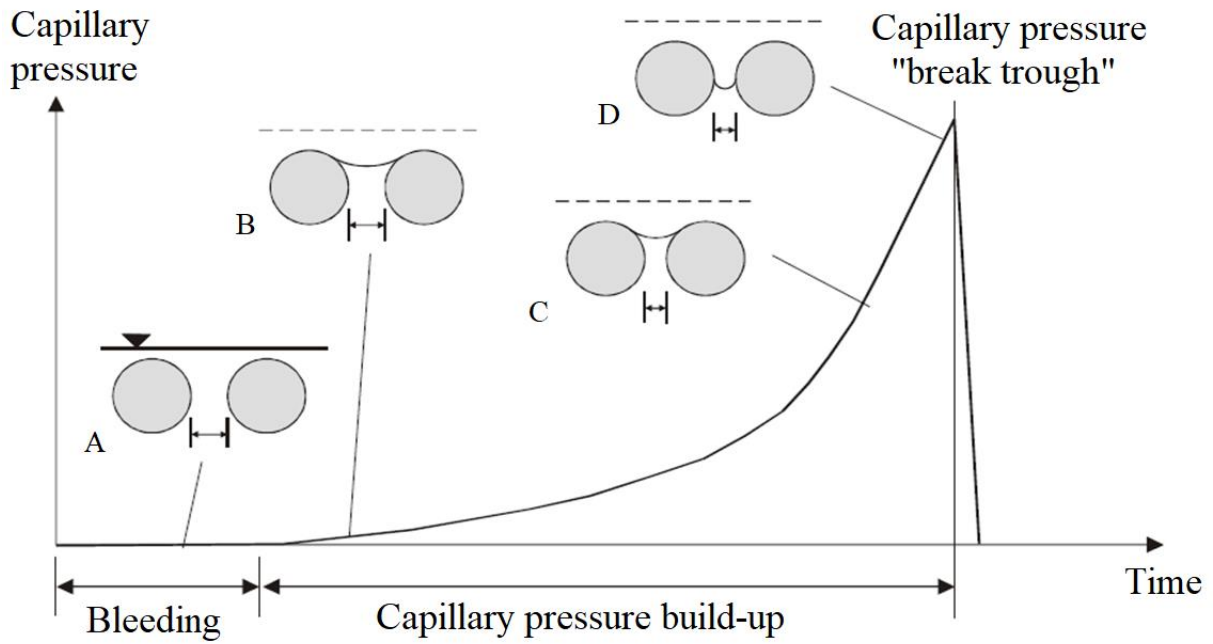


Figure 2.5: Capillary development due to particle behaviour

The capillary pressure develops over time as shown in Figure 2.6. The development shows key times during the phase shift of concrete from a liquid to a solid (Schmidt and Slowik, 2009; Combrinck and Boshoff, 2012). The development of capillary pressure can be separated into three stages and two points as discussed as follows:

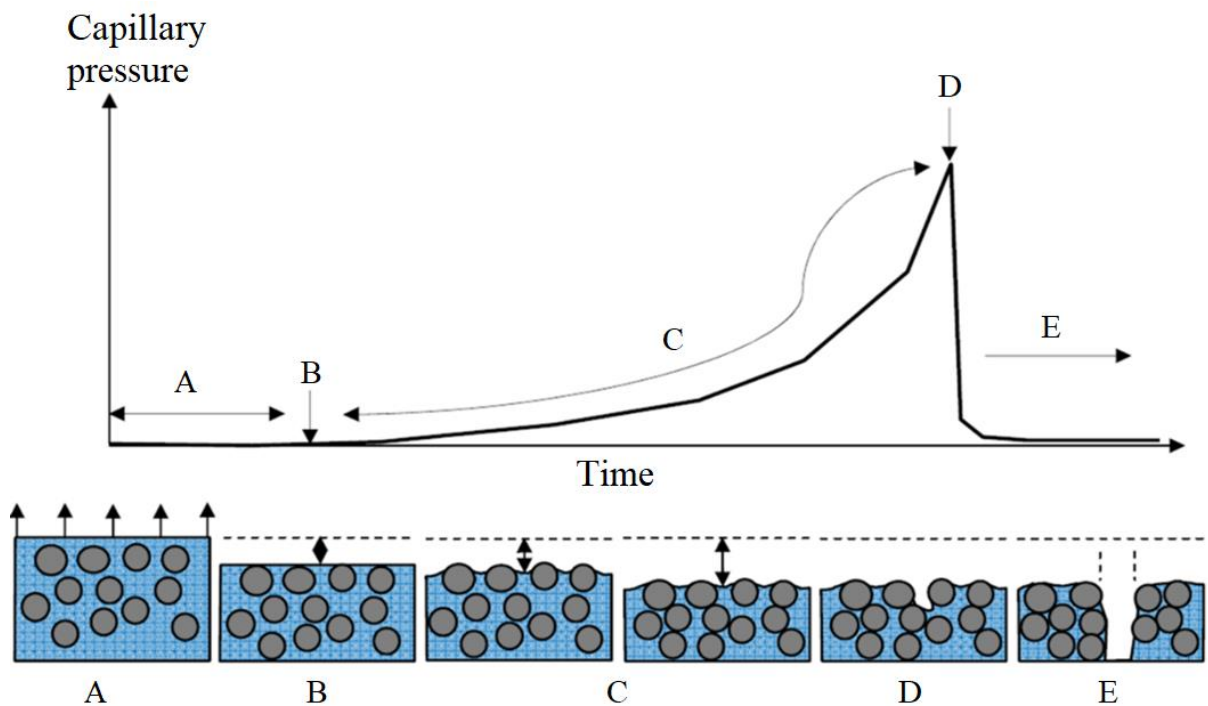


Figure 2.6: Stages of capillary development (Combrinck and Boshoff, 2012)

### **Stage A: Dormant period**

Stage A starts when the concrete is placed, and a thin film of water is present on the surface of the concrete element referred to as bleeding. This stage is dominated by a higher rate of bleeding than evaporation (Combrinck and Boshoff, 2012; Chryso, 2019).

### **Point B: Start of capillary pressure**

Point B is the point where the bleeding and evaporation amount is equal and it is from this point that the capillary pressure starts to develop (Combrinck, 2012).

### **Stage C: Increase of capillary pressure**

Stage C indicates the phase where the bleeding rate is less than the evaporation rate causing contracting forces between the solid particles due to the formation of water menisci. These forces pull the particles closer together in both the vertical and horizontal direction as the capillary pressure continues to rise (Slowik, Hubner, *et al.*, 2009; Combrinck, 2012).

### **Point D: Air entry**

Point D indicates the point of air entry into the cement paste and closely coincides with the maximum vertical settlement. Air enters the element at purely localised points on the surface, indicating the positions of possible cracks, due to the radii of the menisci becoming too small to bridge the gap between the particles (Krönlof, Leivo, *et al.*, 1995; Slowik, Schmidt, *et al.*, 2008).

It should be noted that the time at which the air enters the sample is not always consistent as the time and location of air penetration deviates locally. Thus, the time of air entry is not of significant value but rather the starting time and rate at which the capillary pressure builds up as this assists in understanding what is occurring within the pores of the concrete.

### **Stage E: Cracking**

Stage E indicates the formation or widening of a crack at the position of air entry and is defined as a plastic shrinkage crack (PSC) as discussed in more detail in Section 2.2.2. The crack continues to widen as long as evaporation and therefore capillary pressure continues to buildup in the uncracked plastic concrete adjacent to the crack (Combrinck, 2012).

## 2.2. Plastic cracking

Plastic cracking occurs during the fresh or plastic state of concrete which normally lasts for up to eight hours after casting depending on the type of mix and the environment (Cohen, Olek, *et al.*, 1989; Krönlof, Leivo, *et al.*, 1995; Slowik, Schmidt, *et al.*, 2008). Concrete is highly susceptible to cracking during the plastic phase as the element offers low resistance to induced stresses and strains (Olivier, Combrinck, *et al.*, 2018).

These cracks appear in crisscross and irregular patterns with lengths of 50 - 1000 mm and widths that can exceed 1 mm. These cracks become paths for liquids or gasses to reach reinforcement causing durability problems (Qi, 2003; Otieno, Alexander, *et al.*, 2010).

The volumetric change of a concrete element during the plastic phase can be separated into two main volumetric changes, namely settlement, a mostly vertical change in volume and shrinkage, a three dimensional change in volume (Combrinck and Boshoff, 2012; Khan, 2018).

### 2.2.1. Plastic settlement cracking

Plastic settlement occurs due to the consolidation of denser materials in the mixture and to a lesser effect the loss of concrete pore water due to evaporation and predominantly occurs during the dormant period due to the suspended nature of the mixture (Emeritus, 1990; Khan, 2018).

Plastic settlement cracking occurs when the concrete's free settlement is restrained causing differential settlement. The restraint is caused by the inclusion of rigid inclusions in the concrete such as reinforcing steel or formwork with varying depth. This differential settlement causes internal tensile stresses around the restraint resulting in cracks as shown in Figure 2.7.

Plastic settlement of an element predominantly occurs during the dormant period, normally ending before significant hydration starts (Powers, 1968). Plastic settlement cracking therefore also precedes plastic shrinkage cracking and often induces the initial crack that is later widened by plastic shrinkage (Combrinck, Steyl, *et al.*, 2018)

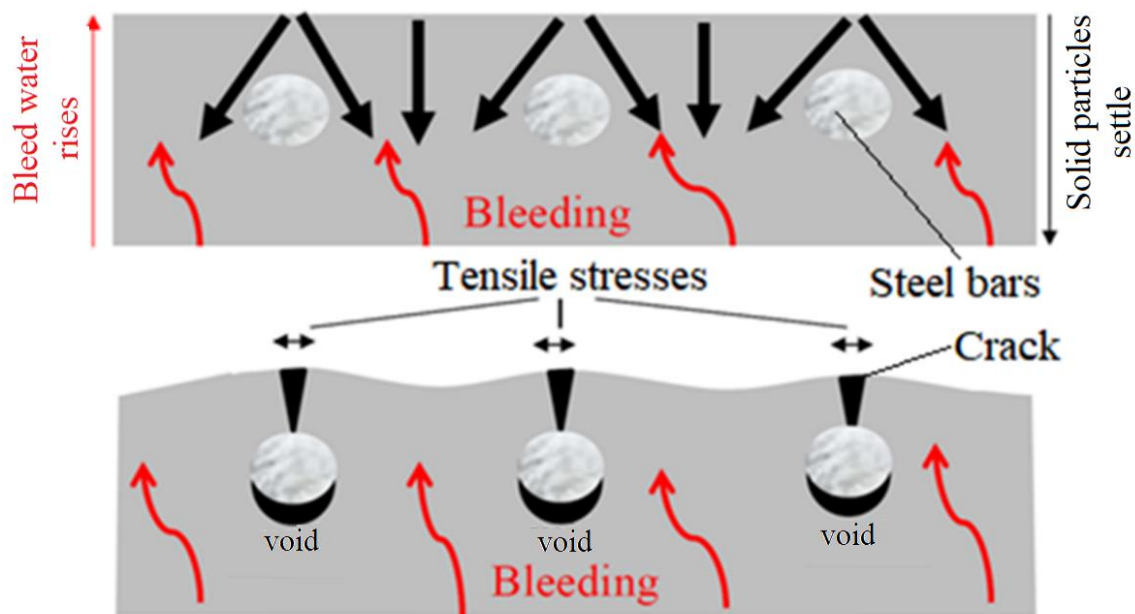


Figure 2.7: Mechanisms for plastic settlement cracking (Khan, 2018)

### 2.2.2. Plastic shrinkage cracking

Plastic shrinkage is driven by evaporation, which results in capillary pressure and may result in cracking as discussed in Section 2.1.5 (Slowik, Schmidt, *et al.*, 2008). Cracking only occurs if the shrinkage is restrained by for example reinforcing steel, changes in the formwork layout or even the resistance caused by formwork or subgrade friction as well as differential drying of the concrete body. Studies indicate that concrete with large exposed areas and/or concrete in severe environments are at a high risk for plastic shrinkage cracking (ACI 224R-80, 1984; Sant, Angeles, *et al.*, 2009; Combrinck and Boshoff, 2012).

### 2.2.3. Factors influencing plastic cracking

In order to prevent plastic cracking, it is important to understand all the factors influencing plastic cracking. The value of success can be measured as the amount of reduction of the crack area, a value only attainable through physical experimentation as changing a single internal property without altering the rest is nearly impossible.

The interconnectivity and interdependence of the internal properties is complex and accurate models that can simulate plastic shrinkage cracking are still limited (Sonebi, Cevik, *et al.*, 2016). However, the factors that influence plastic shrinkage cracking are mostly known and some of these factors such as bleeding, evaporation and capillary pressure have already been discussed in Section 2.1. A discussion of some of the major factors follows:

### **Setting time**

The setting time i.e. the time the concrete takes to set and harden, indirectly influences the plastic settlement and plastic shrinkage cracking. This is due to the fact that the setting of concrete is due to a culmination of internal properties including hydration, evaporation etc. It is preferable to limit the setting time where possible as a longer setting period holds greater possibility of cracking by allowing more time for settlement and shrinkage, thus greater risk for cracking (Powers, 1968; Uno, 1998; ACI 308R, 2001).

### **Water loss**

Water loss from the concrete is mainly due to evaporation, but also due to absorption by unsaturated aggregates and/or subgrade and formwork. In general, the more water is lost the higher the risk for plastic shrinkage cracking. Evaporation affects both shrinkage and settlement cracking, as the rate of evaporation influences the rate of drying and the hydration reaction.

Evaporation affects multiple internal and external properties of concrete as discussed in Section 2.1.3, including the removal of bleeding water as well as inducing capillary pressure buildup, which is one of the main mechanisms causing plastic shrinkage cracking as discussed in Section 2.1.5 (Powers, 1968; Uno, 1998; ACI 308R, 2001; Combrinck, 2016).

### **Restraint**

If the shrinkage of the concrete is not restrained, the concrete will shrink freely with no cracking. The more the concrete is restrained the higher the likelihood and severity of cracking. However, avoiding restraints is often impossible and includes reinforcing steel, fastening bolts or studs, changes in section height or general changes in layout design such as changes in width (Cohen, Olek, *et al.*, 1989).

As shrinkage is a three-dimensional effect it is affected not only by longitudinal layout but also the depth of the restriction within the layout. Whereas the vertical shrinkage and the settlement may cause cracking predominantly due to differential settlement as discussed in the previous sections (Steyl, 2016).

## Mix proportions and constituents

The mix proportions and constituents play a crucial role in the development of concrete cracking as the constituents used directly affects the bleeding and therefore capillary pressure as well as shrinkage and settlement of the plastic concrete. These constituents include the aggregates, binder, water and admixtures. The development of cracks can also be limited or even prevented by specifically designing the proportions of the mix (Wyrzykowski, Trtik, *et al.*, 2015; Cepuritis, Jacobsen, *et al.*, 2017; Combrinck, Kayondo, *et al.*, 2019).

One of the greatest influences on plastic cracking is the fine content such as cement and the dust portion of the sand. Increased fine content increases the severity and likelihood of cracking as the increased fine content reduces bleeding. As the bleeding water is reduced it no longer protects the sample, increasing the effects of evaporation drastically increasing the risk of cracking (Jones and McCarthy, 2006). The finer particles also result in more menisci formation due to evaporation, which together with the reduction in bleeding, increase the capillary pressure and therefore plastic cracking potential.

### 2.3. Curing

Curing is a well-known means of mitigating plastic cracking and can be separated into internal material or externally applied techniques (Schmidt and Slowik, 2009; Slowik, Hubner, *et al.*, 2009). This section focuses on external methods which can be achieved by fogging, water ponding, water saturated covering, curing agents, surface sealing or prewetting of the subgrade. The predominant purpose of initial curing is to prevent plastic cracking by preventing or retarding evaporation, thus a basis of curing quantity can be estimated from the evaporation rate (ACI 305.1-06, 2007; Al-Gahtani, 2010).

#### 2.3.1. Initial vs late curing

Initial curing occurs from concrete placement to the final finishing of the concrete, usually within two to five hours after final set has been achieved. Initial curing mostly focuses on the reduction of the moisture loss from concrete during the plastic state mostly due to evaporation (Jin, Guohua, *et al.*, 2014). Late curing starts once the concrete starts hardening and gaining significant strength, approximately 12 - 24 hours after placement and may continue for weeks as shown in Figure 2.8. Late curing is predominantly focused on the concrete's strength development, aiming to aid the hydration reaction or the products thereof (Emeritus, 1990; Jin, Guohua, *et al.*, 2014).



		Initial set	Final set	
Curing stage	Initial curing		Late curing	
Construction procedures	Placement	Surface treatment	Strength development	
Time	Within 12 - 24 hours		After final set	

Figure 2.8: Initial and late curing timing (Powers, 1968)

Initial curing is often overlooked due to the complexity and possibility of damaging the concrete, thus late curing is most commonly used (Cement concrete & aggregate Australia, 2006).

### 2.3.2. External liquid curing

External liquid curing includes amongst others, fogging or water ponding which attempts to prevent evaporation by increasing the relative humidity or replenishing the bleeding water. The following sections describe these methods which can be applied as either initial or late curing.

#### Water misting

Misting using water is predominantly used in construction and is done by spraying the element with a fine mist of water, this method is also referred to as fogging as shown in Figure 2.9. The amount sprayed depends on the rate of evaporation experienced by concrete and is usually measured in hours of protection. This method is aimed at lowering the evaporation rate by increasing the relative humidity above the concrete (Kosmatka and Wilson, 2002).

However, it is inevitable that some of the mist water ends up on the concrete surface which replenishes bleeding water that was lost by evaporation or provides additional water that needs to be evaporated before capillary pressure buildup and therefore cracking can occur. If excessive misting is applied, it can also be seen as water ponding as explained in the next section. Furthermore, in conditions with high wind speeds, misting is often ineffective as most of the water is blown away.



*Figure 2.9: Misting of concrete* (Kosmatka and Wilson, 2002)

A fine balance must be maintained between application time and amount applied, to prevent damaging the concrete by increasing the water-cement ratio of the top layer amongst others. The success of the curing depends on the amount applied and when it is applied (ACI 308R, 2001).

### **Water ponding**

Water ponding or immersion curing is often used on flat surfaces and is intended to maintain the moisture within the concrete. This is achieved by building dikes around the concrete using sand or earth and filling them with water. Ponding commonly occurs after the concrete has set, to prevent damaging the concrete especially the surface, thus this method is more commonly used as a later stage curing.

Water ponding can also act as a thermal stress relevant if the curing water is kept lower than 11°C as the water acts as a heatsink reducing the impact of the external environment and the internal temperature of the concrete (Kosmatka and Wilson, 2002).

This method is commonly used in laboratories and with smaller concrete elements or elements with finer surface finishes. The elements are usually completely immersed in water containing low impurities to prevent staining or decolourisation. Water ponding is commonly used on concrete facets as they are usually prefabricated and require a finer surface finish (Kosmatka and Wilson, 2002; SANS 3001-CO3-1, 2015).

### **Curing agent**

Fogging can also be done using curing agents. This method is aimed at preventing further moisture loss by creating a thin impermeable layer, the closer to impermeable the layer is the greater the prevention. Curing agents are made from different base materials such as acrylic, wax emulsion and petroleum-based agents, each having their advantage and disadvantages (Chryso, 2019).

Although curing agents have been proven to prevent plastic cracking they have to be purchased at a specialized retailer at additional expense. Among the disadvantages the greatest may be the surface finishing as most curing agents leave a filament or emulsion that has been proven to be difficult to remove (Chryso, 2019).

#### **2.3.3. External covering**

Curing includes covering the element with an impermeable covering, these include but are not limited to plastic wrapping, commonly used to cure columns, or boxing using Perspex or other solid materials. These methods are difficult to implement and control as the material used is exposed to the environment, needs to cover a large area and is easily disrupted or damaged (Cement concrete & aggregate Australia, 2006).

#### **Dry covering**

A commonly used curing method is simply covering the element with a plastic impermeable material such as plastic sheets, predominantly used on slab elements, or clad-wrap, predominantly used on column elements, aiming to prevent loss of bleeding and pore water. These methods do not completely stop evaporation as some heat still penetrates the material and causes the bleeding water to turn into water vapour, but this vapour is no longer lost as the covering locks it in, resulting in an increase in relative humidity (Cement concrete & aggregate Australia, 2006).

This method has a few draw backs including the expense of obtaining a sheet with large enough area, ease of disrupting the process or complexity of layout covering. The method can be disrupted by a simple tear, puncture or lift of the sheet which causes the method to be ineffective, either locally or even for large portions of the element.

This method is also limited due to the size and layout of the element, the larger and more complex layouts make this method difficult to use as losses become difficult to prevent (Cement concrete & aggregate Australia, 2006).

### **Saturated covering**

Saturated coverings is a means to improve on the dry covering methods previously explained, as these methods reduce the evaporation an element experiences but also provides additional moisture for hydration. Multiple materials can be used for this method including sand or hessian fabrics. Care should be taken that the material used covers the entire element while remaining moist to act as a wick (Kosmatka and Wilson, 2002; Cement concrete & aggregate Australia, 2006).

This method is limited, amongst other, by the setting of the element as the placement of curing material may damage the element if it has not reached a significant surface strength causing a loss of level or surface finishing. It should be insured that the material used to cure the element is clean as staining can drastically decrease aesthetic value or cause contamination of the surface layer of the element (Kosmatka and Wilson, 2002; Cement concrete & aggregate Australia, 2006).

### **Impervious paper**

Impervious paper is constructed from two sheets of Kraft paper, a paper produced from a chemical pulp created in the Kraft process, bonded together by a bituminous adhesive and regulated by ASTM C 171, as shown in Figure 2.10. These sheets are used to cover relatively simple shapes and aims to prevent moisture loss by locking in the water vapour. These sheets do not require periodic watering and can be reused as holes and tares can easily be mended (Cement concrete & aggregate Australia, 2006; ASTM C171, 2016).



*Figure 2.10: Impervious paper curing (Cement concrete & aggregate Australia, 2006)*

#### **2.3.4. Pre-emptive measures**

Pre-emptive means of curing methods are quite rare as these means are not as effective as curing applied during the plastic and later phases and suffer from problems such as the absorption of prewetting water into the subgrade. These methods are further complicated as they are very difficult to replicate in a laboratory.

##### **Dampening of subgrade**

One pre-emptive curing method is the dampening of subgrade before placement of the concrete element. This is usually done to ensure that the subgrade does not absorb moisture from the element while allowing the concrete to create a better bond with the subgrade. This is predominantly done in the industry as a means of preventing contamination and localized debonding, not as a means of curing (Kosmatka and Wilson, 2002).

Analysing these means as a curing method becomes difficult as its unknown how much moisture is provided to the element and how much is absorbed by the subgrade. Further questions arise creating further confusion, questions including the path, means and time of moisture absorption, does this moisture influence the water-cement ratio at localized positions or if the moisture added influences the hydration reaction. This method is even further complicated by considering the type of subgrade or the difficulty of recreating this effect in a laboratory making testing difficult (Kosmatka and Wilson, 2002).

#### **2.4. Influence of curing measures on plastic shrinkage cracking**

It is commonly accepted that curing mitigates plastic shrinkage cracking of concrete, however the success of the method and materials used remain mostly unknown. Studies proved that curing can reduce the influencing factors, such as shrinkage, settlement and the capillary pressure.

The study done by Slowik (2009) showed that it is possible to relieve the internal capillary pressure even if only a single application of curing is used, as shown in Figure 2.11 (Wittmann, 1975; Slowik, Schmidt, *et al.*, 2008; Schmidt and Slowik, 2009).

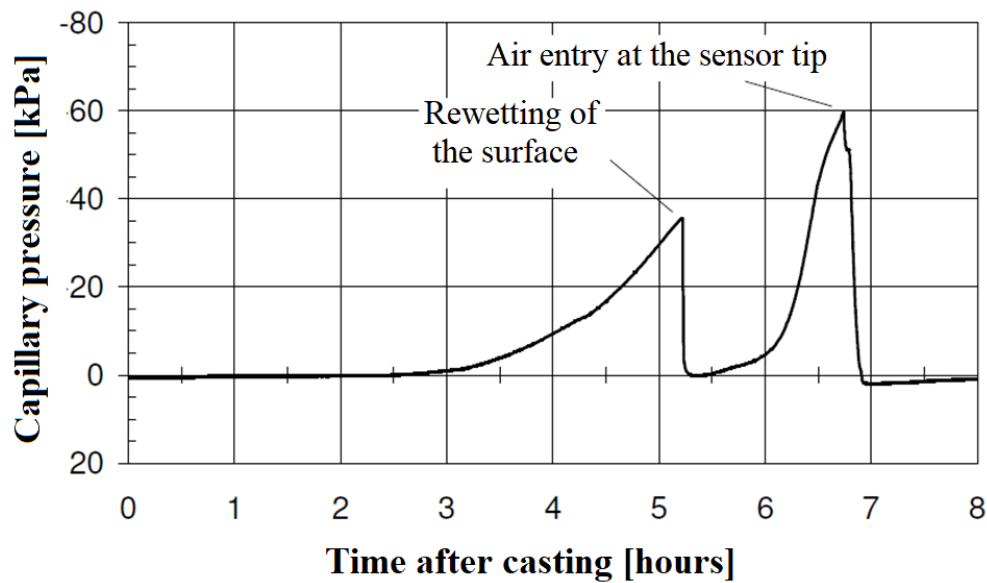


Figure 2.11: Capillary pressure behaviour due to single curing application (Schmidt and Slowik, 2009)

The study showed that curing applied during the buildup of the capillary pressure can reduce or completely counter act the buildup of the pressure. The reduction of the capillary pressure results in a reduction in the shrinkage and the settlement of concrete which in turn reduces the crack development, however the exact relationship between these factors is still unknown. However, a basic estimation states that the more the capillary pressure is reduced, such as shown in Figure 2.12, the greater the reduction should be seen in terms of crack development (Schmidt and Slowik, 2009).

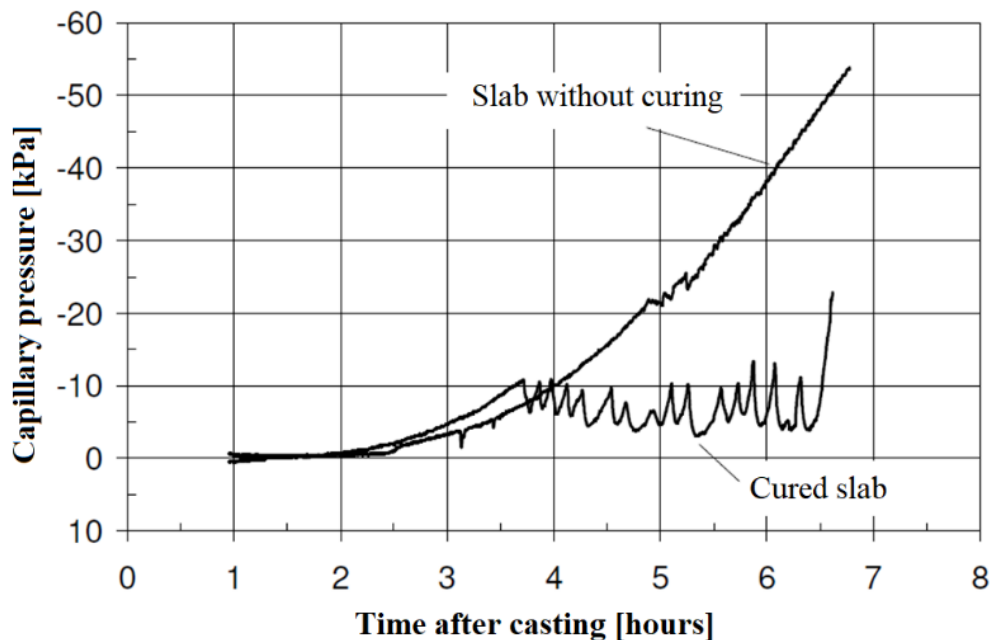


Figure 2.12: Capillary pressure behaviour due to multiple curing application (Schmidt and Slowik, 2009)

The multiple curing application showed a drastic reduction of capillary buildup compared to the uncured sample. This reduced behaviour proved to reduce the crack development as seen in Figure 2.13.

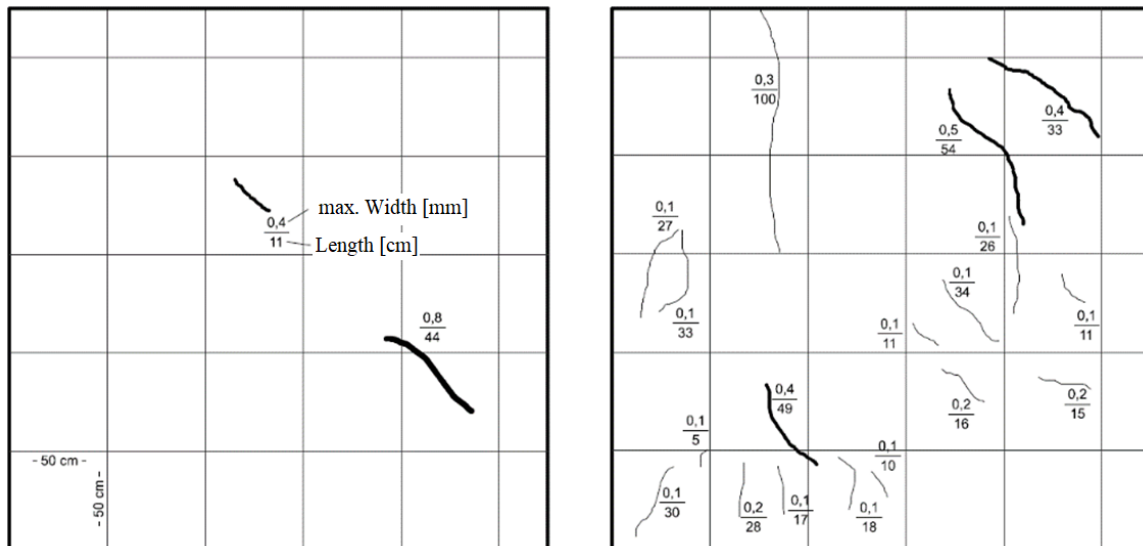


Figure 2.13: Left: Crack development due to multiple curing application, Right: Crack development of uncured test (Schmidt and Slowik, 2009)

The curing proved to reduce the crack development quite drastically, reaffirming that curing can be used as a method to mitigate plastic cracking. The study done by Slowik (2009) further highlighted the importance of early age curing application as some cracks formed before curing was applied. Thus, the study also proved that it is not possible to close or mend cracks that have already formed. This research is one of the few available studies researching the influence of curing on cracking but focuses on curing during the later stages of concrete development. Other papers focus on the subject of curing, plastic cracking or the influence of admixtures on cracking respectively (Schmidt and Slowik, 2009).

### 3. Experimental framework

This chapter discusses the materials and mixes used for testing as well as the procedures and type of tests conducted in order to achieve the objective of determining the influence of external liquid curing on the plastic shrinkage cracking of concrete. This is achieved by comparing an uncured or an uninfluenced test, to specifically altered tests, using water or curing agents. These tests include shrinkage, settlement, capillary pressure and cracking for all tests, with bleeding, evaporation and setting test included for the uncured test.

#### 3.1. Mix design and material constituents

A standard concrete mix without any admixtures was used for all tests. The slump of the mix was 100 mm, with a water-cement ratio of 0.55 using a CEM II 52.5N cement. A 9 mm Greywacke stone was used as coarse aggregate along with a natural quarry sand known locally as Malmesbury sand. The mix proportions are shown in Table 3.1, along with the 7- and 28-day strength and slump obtained. The slump and cube strength, shown in Figure 3.1, were tested using a standard tests according to SANS codes (SANS 5862-1, 2006; SANS 5863, 2006; McCarter, Chrisp, *et al.*, 2012).

Table 3.1: Concrete mix constituents, proportions and, properties

Constitutes	kg/m <sup>3</sup>	Relative density
Water	205	1
Cement CEM II/A-L 52.5N	373	3.14
Stone 9 mm Greywacke	1037	2.8
Sand Malmesbury	801	2.62
Average compressive cube strength [MPa]	7 Day	28 Day
	40.7	51.8
Slump	100 mm	





Figure 3.1: a) Slump test b) Cube strength samples

## 3.2. Test methods

This section discusses the moulds and equipment used during testing. These moulds were filled with concrete and placed into the climate chamber where they were tested for at least 260 minutes. It should be noted that the inside of the moulds were covered with a small amount of mould release oil to ease the removal of the concrete after testing and allow the moulds to be reused. This oil is not considered as an admixture as the amount used is negligible and does not influence the concrete sample (Combrinck, 2016; Khan, 2018).

### 3.2.1. Cracking

The cracking mould, namely the mould used to induce and measure the plastic cracking of concrete, is a  $600 \times 200 \times 100$  mm mould, consisting of three triangles, two small triangles and one large triangle, and two steel rods on each side, as shown in Figure 3.2. These moulds are designed according to the regulations set by ASTM C1579 (2013).

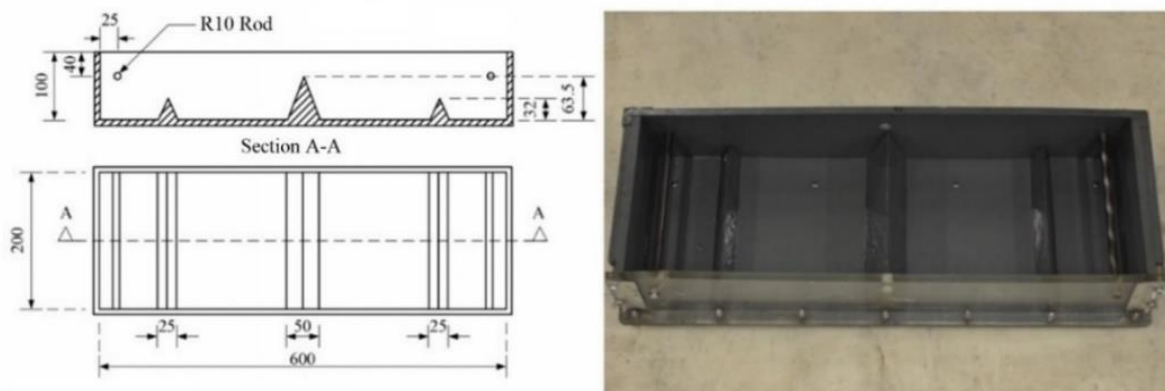


Figure 3.2: Crack mould layout

This mould is designed to create a crack above the larger triangle. The mould induces both plastic shrinkage and plastic settlement cracking, as the larger triangle induces settlement and shrinkage due to the anchorage provided by the two smaller triangles and rods. However, these moulds induce greater shrinkage than settlement, as very little differential settlement occurs (Boshoff and Combrinck, 2013).

The crack area of a sample is calculated from photos taken with a high definition camera at 20 minute intervals, which are taken from first visible hairline crack. These photos are then measured using CAD software.

After the photos are imported, they are scaled using the scale bar (as the scale bar is a known length) as shown in Figure 3.3, where after the measuring frame is drawn onto the last photo of a sequence. The measuring frame is so constructed to cut off the 25 mm from the borders, this is done to remove the influence the side of the mould has on the formation and behaviour of the crack as prescribed by ASTM C1579 (2013).

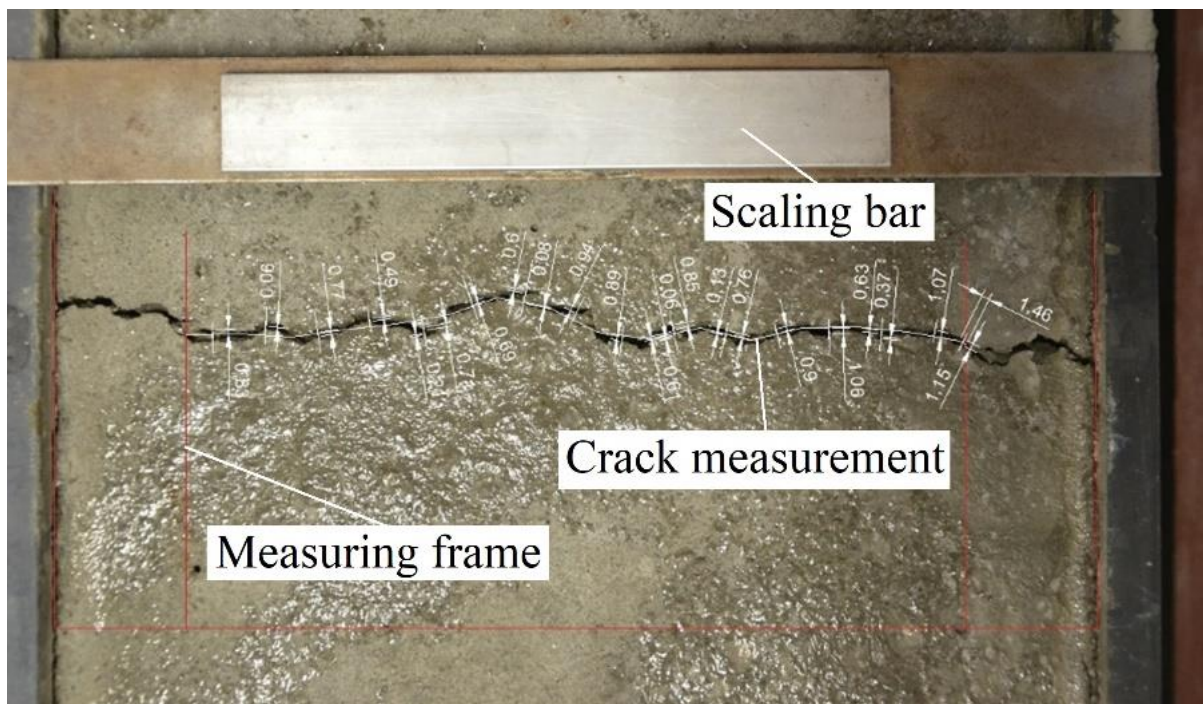


Figure 3.3: Crack area measurements

The measuring frame is then used to construct several 10 mm line sections following the crack. This is done on the final photo of the sequence as this is the final crack pattern that was measured. A line is then drawn perpendicular on each 10 mm line section at its centre, these lines are used to measure the width of the crack on this line.

These values are multiplied by the length of the base line, normally 10 mm but may differ at the final section, as shown in Figure 3.3. The sum of these values represents the crack area of the given sample at that given time. The measuring frame is copied over onto the remaining photos of the sequence to ensure the same area is compared. This sequence is then repeated for each photo in each section and the average of the samples is recorded.

### 3.2.2. Volumetric change

The volumetric change of a sample, namely the shrinkage and settlement, is obtained in the so-called shrinkage mould which is 300 x 300 x 100 mm as shown in Figure 3.4. The mould is fitted with three Linear Variable Displacement Transducers (LVDT's). Two LVDT's are placed horizontally to measure the shrinkage of the specimen and one is placed vertically to measure the settlement (Slowik, Schlattner, *et al.*, 2004).

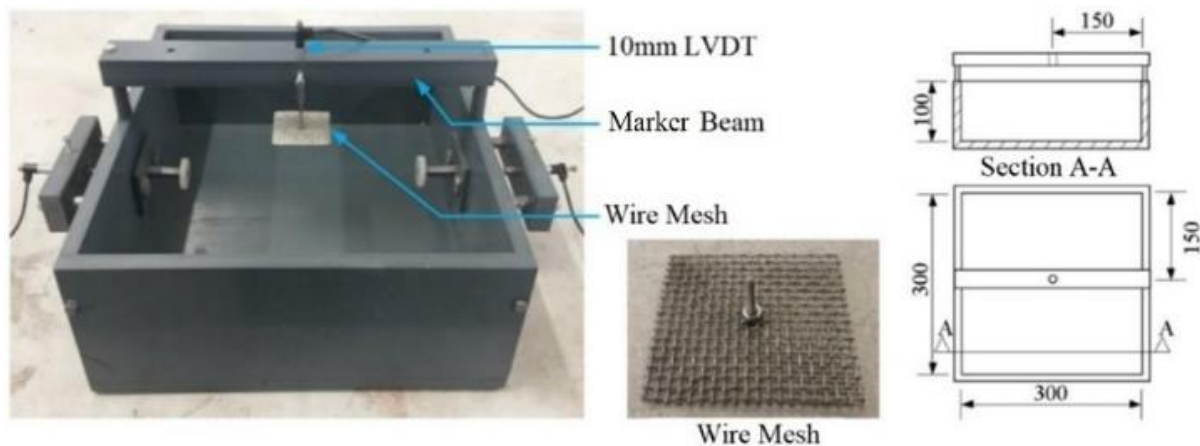


Figure 3.4: Settlement setup of the shrinkage mould (Le Roux, 2014)

The settlement of the sample is measured using a vertical LVDT fitted with a wire mesh as shown in Figure 3.4 and Figure 3.5. The mesh allows the bleeding water to penetrate allowing the LVDT to measure the true specimen surface and not rise and fall with the water on the surface. The value measured by this LVDT is referred to as settlement, yet this value also includes 3D-shrinkage due to evaporation as discussed in Section 2.2. This added shrinkage is added to the settlement measurements in this study (Powers, 1968; Mehta and Monteiro, 2006).

The spacer markers shown is so designed to allow the LVDT to connect to the insert using a spring setup and measures vertical shrinkage. The spacer ensures that the LVDT remains horizontal. The insert, that the LVDT is connected to using a spring setup, is imbedded in the concrete and therefore follows the shrinkage experienced by the concrete sample.

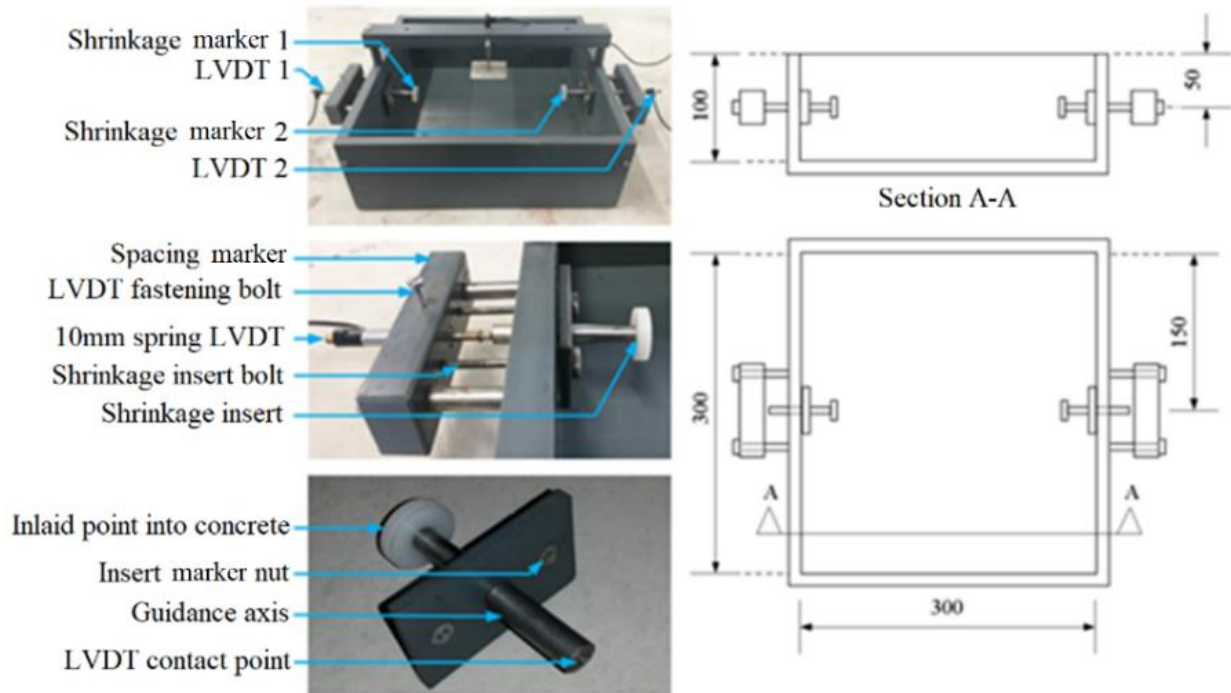


Figure 3.5: Shrinkage setup of the shrinkage mould (Le Roux, 2014)

### 3.2.3. Capillary pressure

The capillary pressure is also tested in the shrinkage mould, as shown in Figure 3.6. The setup consists of the pressure sensor attached to a small copper tube of such length that the depth of the tube's opening is 50 mm from the surface of the concrete. This tube is held in place using a small bracket which is clamped onto the tube and fixed onto the mould using bolts.

The sensors are intended to measure a negative pressure caused by the suction created by the menisci (Powers, 1968; Emeritus, 1990; Combrinck, 2016). Unfortunately, the sensors were replaced with new compression sensors before the start of this study which have a greater positive measurement range and a lesser negative measurement range as shown in Figure 3.7.

The sensor testing showed that the maximum suction or tensile force that the sensor can measure is approximately 13 kPa compared to the compressive capacity of 125 kPa. This tensile capacity is lower than the expected values which could exceed 20 kPa, as shown in Figure 3.8. This loss of data is unfortunate, but still provides adequate data since the start and initial rate of capillary pressure buildup is captured, which is significantly more valuable than the maximum pressure reached (Slowik, Schmidt, *et al.*, 2008).

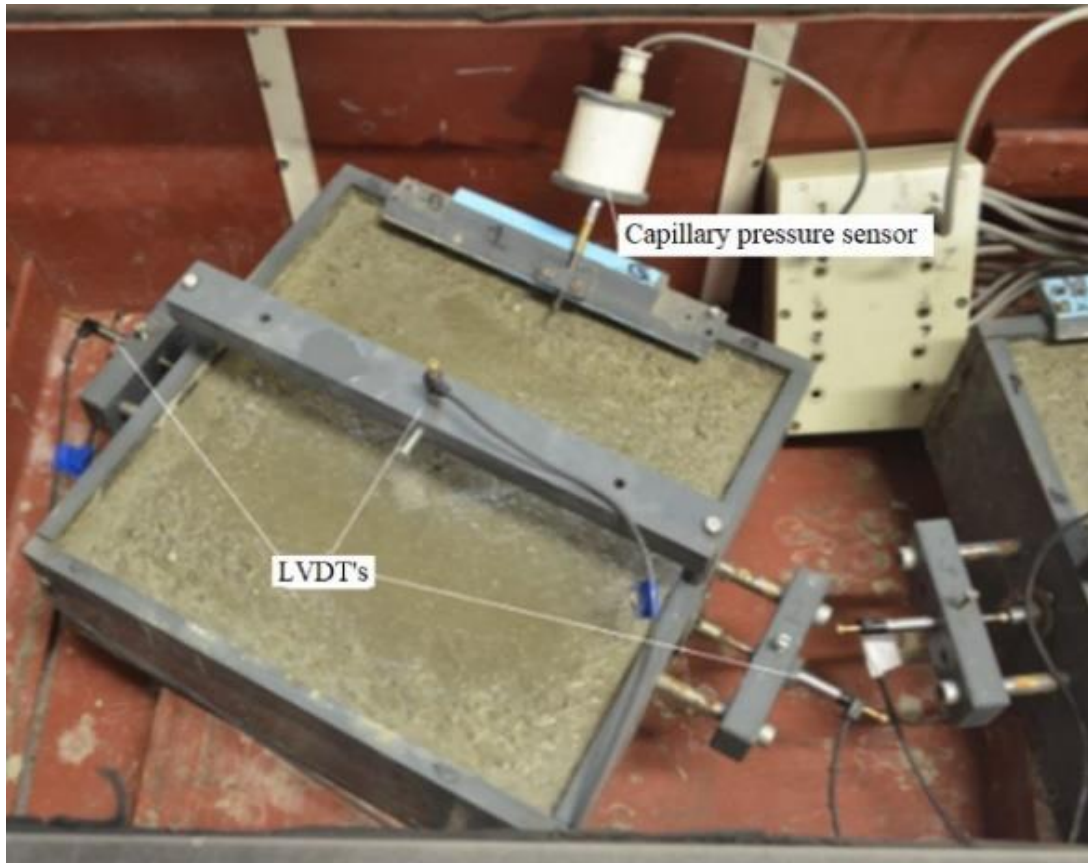


Figure 3.6: Capillary pressure sensor on the shrinkage mould

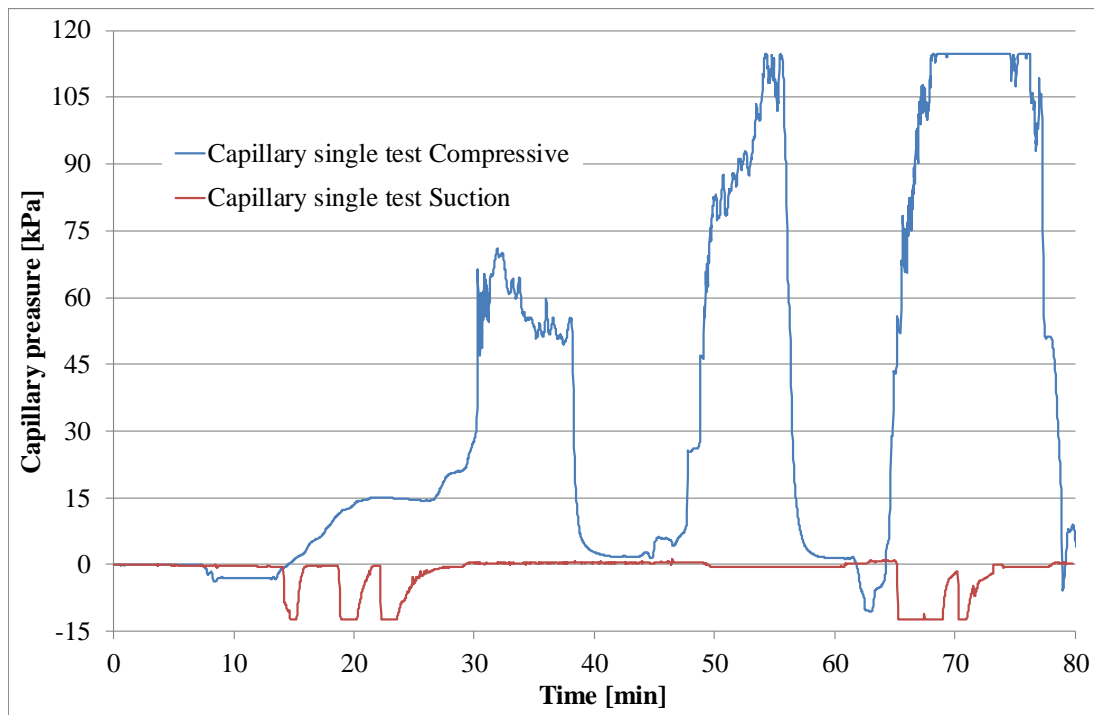


Figure 3.7: Capillary sensor testing

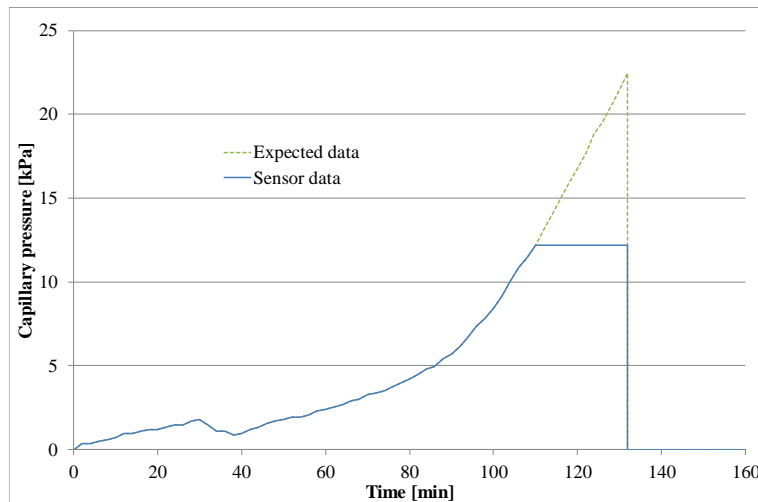


Figure 3.8: Expected capillary data compared to the data obtained from the sensor

The representative capillary pressure for a sample from more than one measurement cannot be simply calculated as the average since the time of air entry is different for each measurement. The representative capillary pressure is instead calculated from a combination of the average and an interpolation function. The average of the two graphs are used up to point of air entry of the first sample, where after this point is connected to the centre of the interpolation function which is set up by connecting the two peaks of the two samples, namely A and B. The representative function is then dropped to zero as this represents the air entering the sample. This process is shown in Figure 3.9.

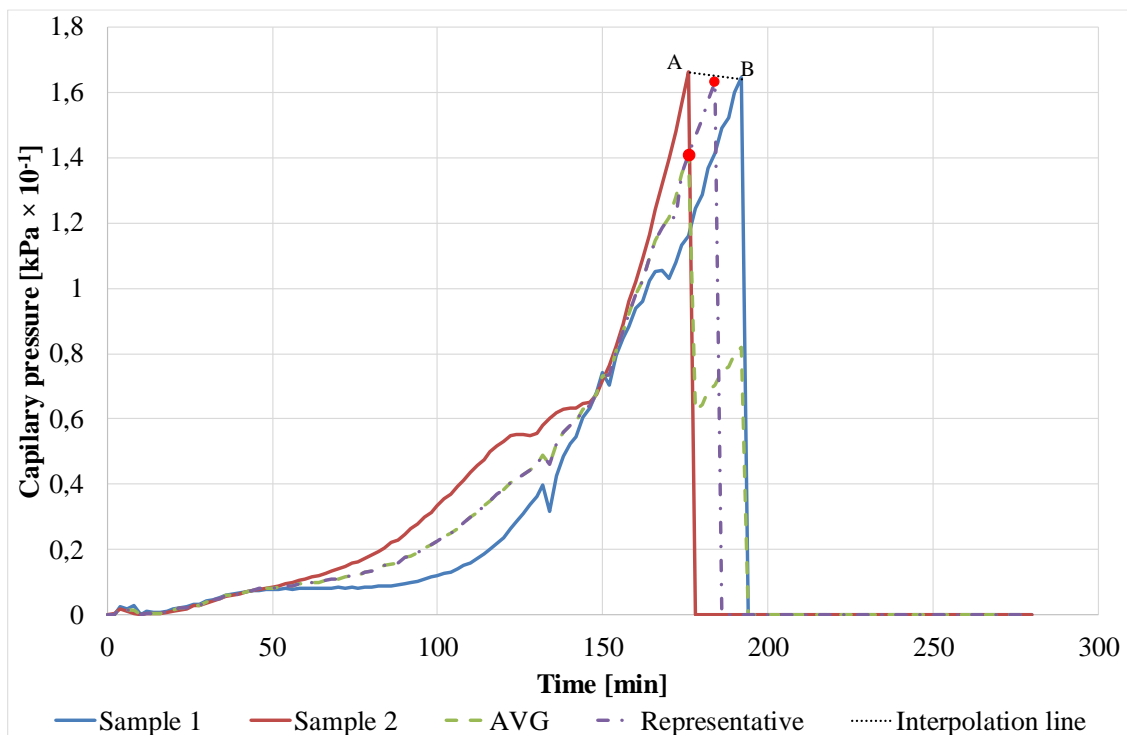


Figure 3.9: Capillary pressure representative function

### 3.2.4. Bleeding

The bleeding amount and rate of the samples is calculated by measuring the weight of water extracted from the bleeding mould, shown in Figure 3.10. The water is extracted from the sample by tilting the mould according to the regulations set by ASTM C232 (2004). The amount and rate of bleeding is calculated as the cumulative mass of the extracted water.

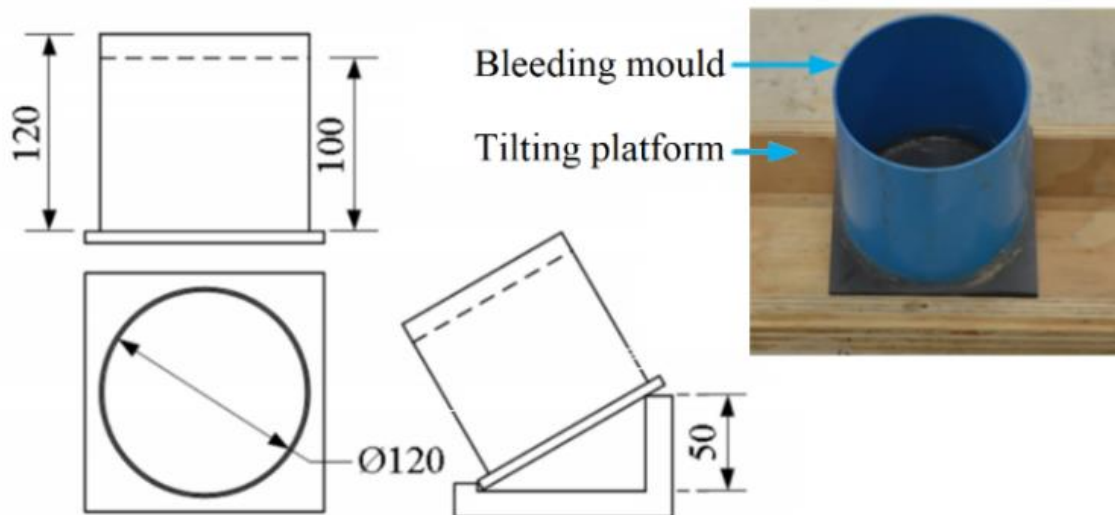


Figure 3.10: Bleeding mould and equipment

The moulds are filled to approximately 100 mm, vibrated and covered with plastic and fastened with a rubber band to minimise evaporation, as shown in Figure 3.11. However, the plastic covering does not completely prevent evaporation as it has to be removed to extract the bleeding water and is refitted after this process. Thus, a mathematical correction is made to account for this lost mass as shown in Equation 3 (Josserand and de Larrard, 2004; Kwak and Ha, 2008; Ghourchian, Wyrzykowski, *et al.*, 2016).

$$m_{\text{true bleeding}} = m_{\text{bleeding measured}} + (m_{\text{sample after at } T(i-1)} - m_{\text{sample before at } T(i)}) \quad \text{Equation 3}$$

with:

$m_{\text{true bleeding}}$  = True mass of bleeding water [g]

$m_{\text{bleeding measured}}$  = Mass of bleeding water measured [g]

$m_{\text{sample after at } T(i-1)}$  = Mass of sample after bleeding water is removed at the previous time [g]

$m_{\text{sample before at } T(i)}$  = Mass of the sample before bleeding water is removed at given time [g]



Figure 3.11: Bleeding mould covering

This corrected value is then cumulatively added to estimate the amount of bleeding and divided by the time to achieve the rate of bleeding, as shown in Figure 3.12. The bleeding is affected by various processes, including the reabsorption of the bleeding water and the evaporation. To this extent the bleeding of the samples was measured in the same environment as used for testing, as discussed in Section 3.3, achieved by placing the samples in the climate controlled chamber (Josserand and de Larrard, 2004; Kwak and Ha, 2008; Ghourchian, Wyrzykowski, *et al.*, 2016).

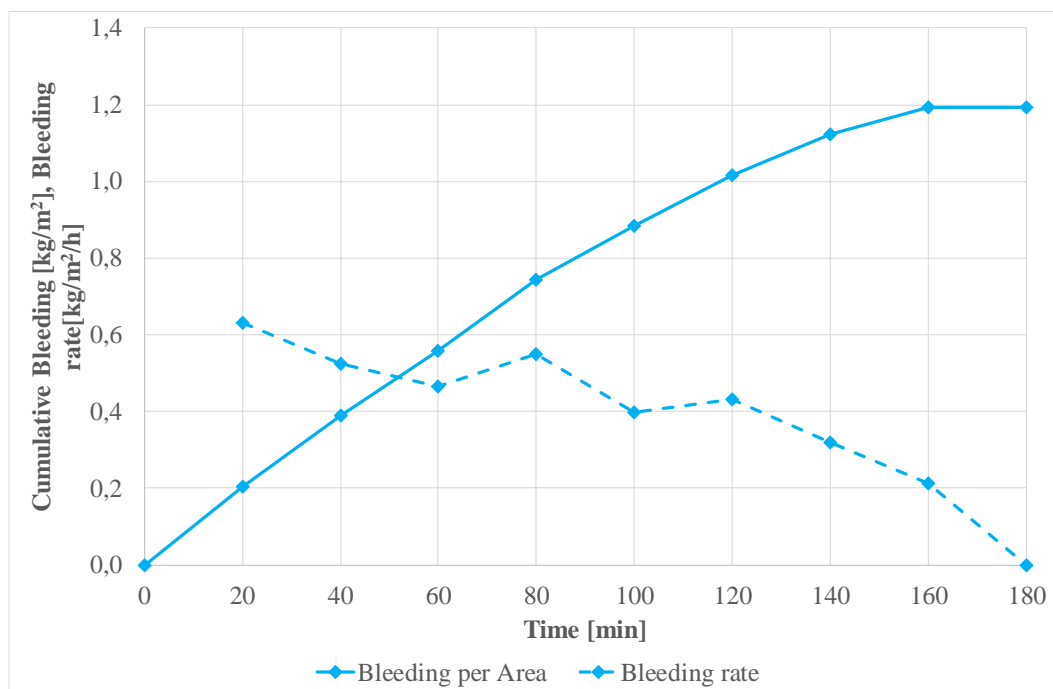


Figure 3.12: Expected behaviour of bleeding



### 3.2.5. Evaporation of standard units

The evaporation of a sample is measured by placing a  $200 \times 200 \times 100$  mm concrete filled mould, as shown in Figure 3.13, into the climate chamber and measuring the change in weight every 20 minutes. For this study a scale with capacity of 15 kg and resolution of 0.1 g was used.

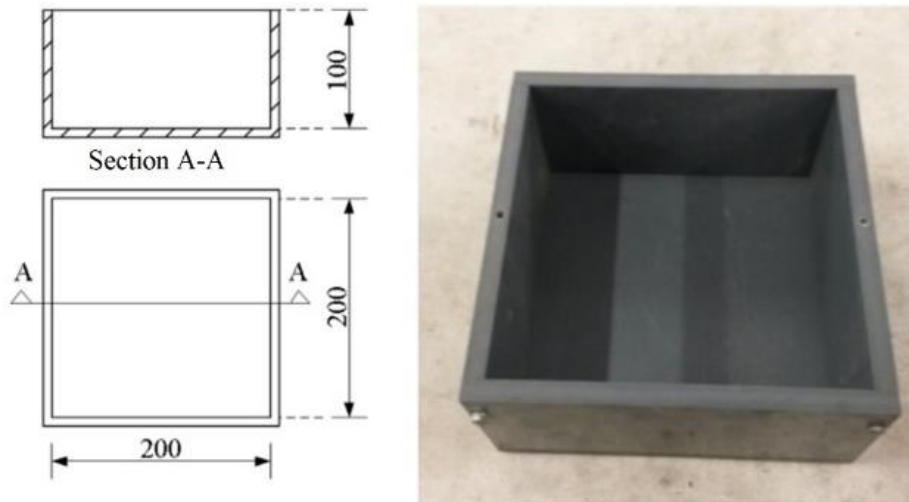


Figure 3.13: Evaporation mould

### 3.2.6. Evaporation of curing agents

The evaporation of samples sprayed with the curing agents was also investigated. This proved to be difficult due to the interaction between the water, concrete and the respective curing agent and subsequent loss of mass during the formation of the protection layer. To this extent, a new mould was designed for testing as shown in Figure 3.14. The mould was made from Polymerizing vinyl chloride (PVC) with an area approximately  $0.04 \text{ m}^2$  milled to a depth of 1 mm. The 1 mm deep mould was filled with curing agent and placed into the climate chamber to investigate the loss of mass without the influence of water or cement paste.

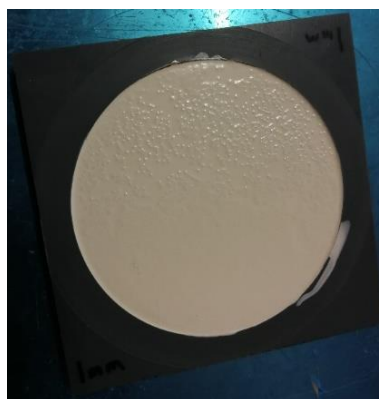


Figure 3.14: Evaporation of curing agent

### 3.2.7. Setting time

The phase shift from a liquid to a solid is often referred to as the setting of concrete. The setting period is divided by two points, namely initial and final setting as shown in Figure 2.1. These points can be determined using a Vicat penetration apparatus as shown in Figure 3.15. The Vicat is fitted with an initial set needle which is dropped under its own weight from the surface of the sample every 20 minutes with initial set achieved if the needle stops  $6 \pm 3$  mm from the bottom of the mould (SANS 50196-3, 2006; McCarter, Chrisp, *et al.*, 2012).

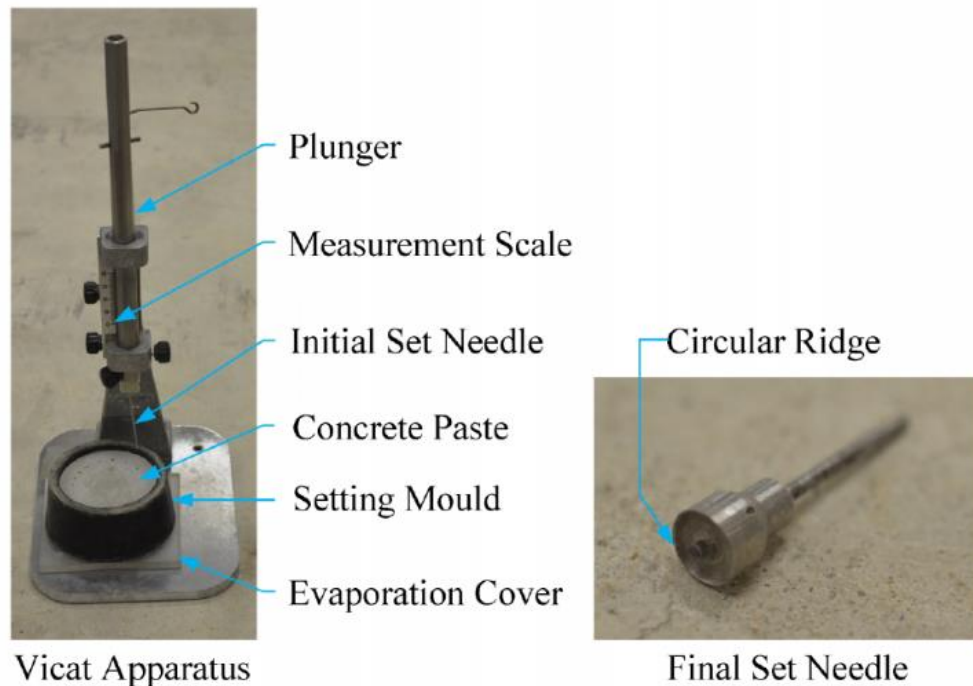


Figure 3.15: Vicat penetration setup

There after the sample is turned upside down and the initial set needle is replaced with the final set needle which is similarly penetrated every 20 min into the turned sample. Final set is reached once the outer ring of the final set needle no longer makes an imprint as shown in Figure 3.16 (SANS 50196-3, 2006; McCarter, Chrisp, *et al.*, 2012).

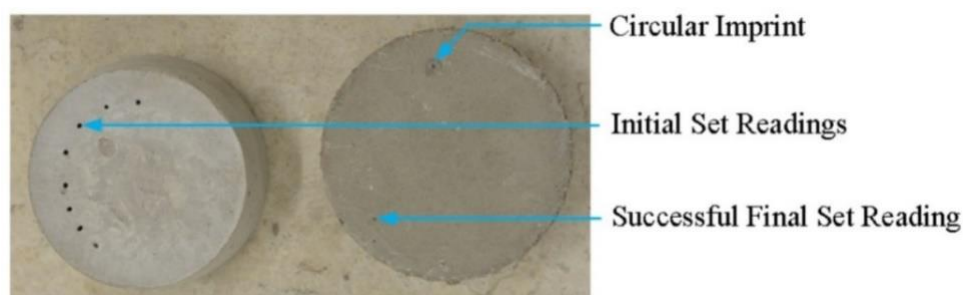


Figure 3.16: Setting time specimens

Although these times are used as the indication of the change from fluid to a solid, it should be noted that these values are only suggestive and do not indicate the state of the chemical reaction or strength of the concrete (SANS 50196-3, 2006; McCarter, Chrisp, *et al.*, 2012).

### 3.3. Test conditions

Plastic cracking is highly likely to occur in conditions with extreme heat, low humidity and high winds (Powers, 1968; Combrinck, 2016). Controlling these conditions creates an ideal scenario for formation of plastic cracking allowing a means of comparison between different mixes and curing procedures. This is achieved by using a climate chamber built specifically for this reason as shown in Figure 3.17 (Combrinck, 2012; Khan, 2018).

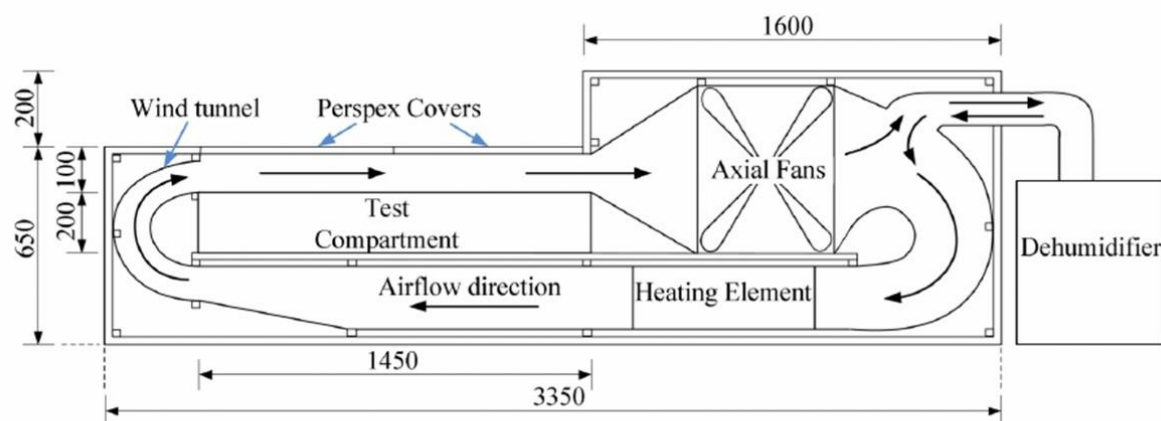


Figure 3.17: Climate Chamber layout (Combrinck, 2016)

The ideal climate for the formation of plastic cracking is linked to the amount of moisture lost to evaporation, namely a rate of  $1 \text{ kg/m}^2/\text{h}$  or more (Uno, 1998). This rate of evaporation is achieved by using a  $40^\circ\text{C}$  air temperature,  $23^\circ\text{C}$  concrete temperature, 10% relative humidity and  $6.25 \text{ m/s}$  wind, as suggested by Equation 1. More information on the climate chamber can be found elsewhere (Combrinck, 2016).

### 3.4. Mixing procedures

All the material used for testing was placed in a climate controlled room at 23°C, 65% relative humidity and no wind for at least 24 hours before testing. This was to avoid the influence of the natural temperature fluctuations caused by weather elements (Powers, 1968; Emeritus, 1990).

On the day of testing, the materials were removed from the climate controlled room and mixed in a 50 litre pan mixer that was cleaned and dried in the same manner for all tests. The time between removal from the climate room is reduced as far as possible to lessen the heat change due to the environmental exposure, while the mixing equipment is dried to prevent fluctuation of the water quantities.

The mixing process, as shown in Figure 3.18, started by adding the dry materials into the pan, in order: sand, cement and stone. The dry constituents were mixed for one minute to allow a consistent homogeneous dry material, there after water was added and further mixed for four minutes.

The mix was then scooped into the moulds and vibrated for two minutes for all moulds except the capillary mould. The capillary mould was filled to two thirds, vibrated for one minute, then the sensor was added, the mould completely filled and vibrated for another minute. This was done to ensure the water filled tube of capillary sensor comes in contact with the pore water system of the concrete and does not leak during setup.

During vibration the level of the mixture in the moulds was filled to approximately 1 mm from the top border of the mould. The filled and vibrated moulds were then placed in the climate chamber. The necessary equipment was then connected, such as the capillary cables or LVDT's as explained in Section 3.6.

After all the sensors were connected the “time zero” or start of measurements was defined or taken for all tests. This process from adding water to the mixer to the “time zero” was consistently around 10 minutes for all tests.

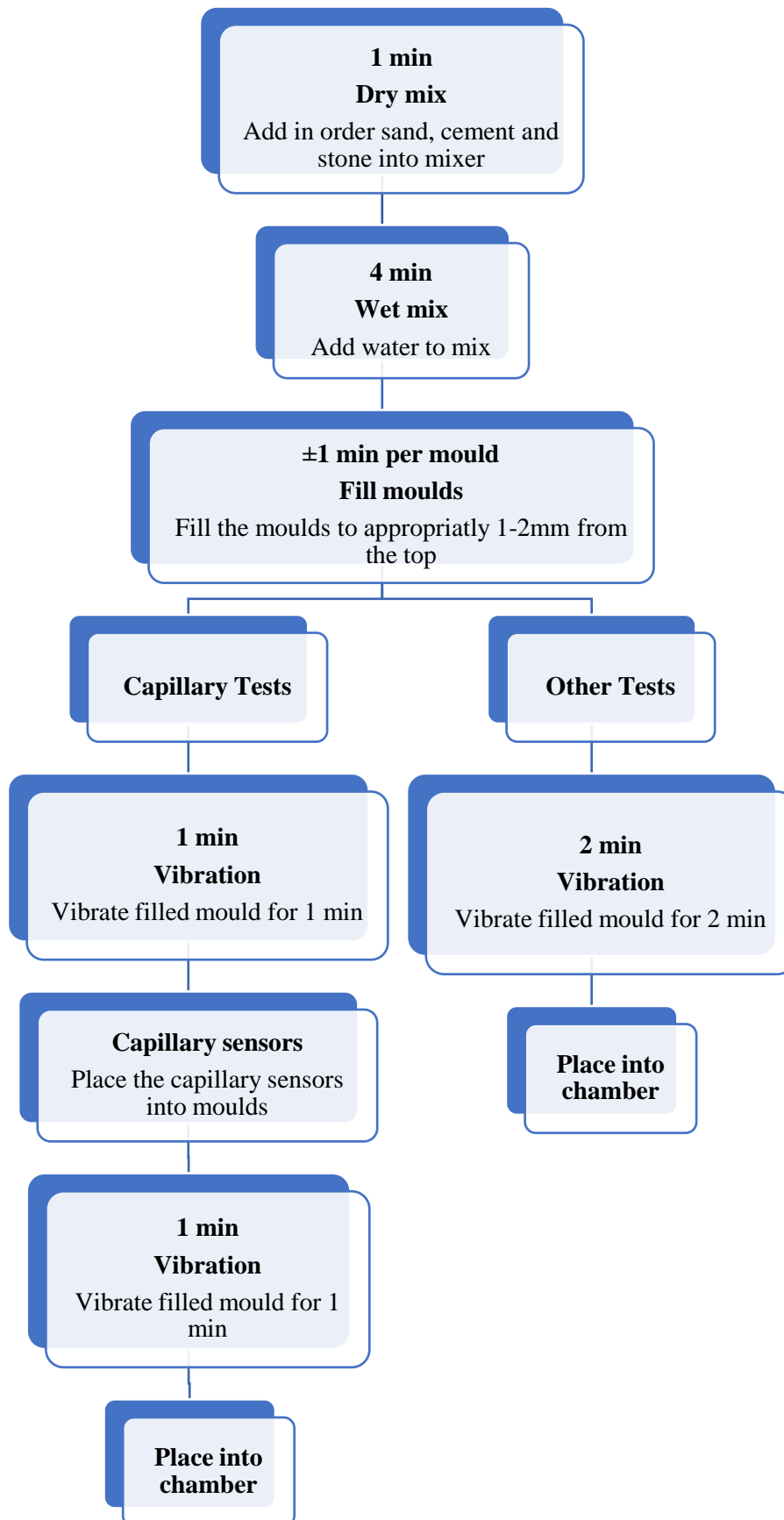


Figure 3.18: Mixing procedure

### 3.5. Curing application and scheduling

The focus of this study is liquid curing applied to the surface of the element, this is achieved by spraying the specific curing liquid into air above the element. This method allows the liquid to settle under its own weight, preventing surface damage and spreading the liquid evenly over the surface (Kosmatka and Wilson, 2002; Cement concrete & aggregate Australia, 2006; Chryso, 2019).

#### 3.5.1. Curing application

Curing application is compromised by the wind in the climate chamber described in Section 3.2, thus a cover was built and used to block the wind over the specific mould during curing application. These covers, shown in Figure 3.19, have spraying holes drilled at an angle allowing spraying at approximately 60°, this prevents the liquid being sprayed directly onto the concrete surface and damaging it. The height of the covers are so designed to exceed the height of the chamber, thus blocking the wind flow from entering above the cover.

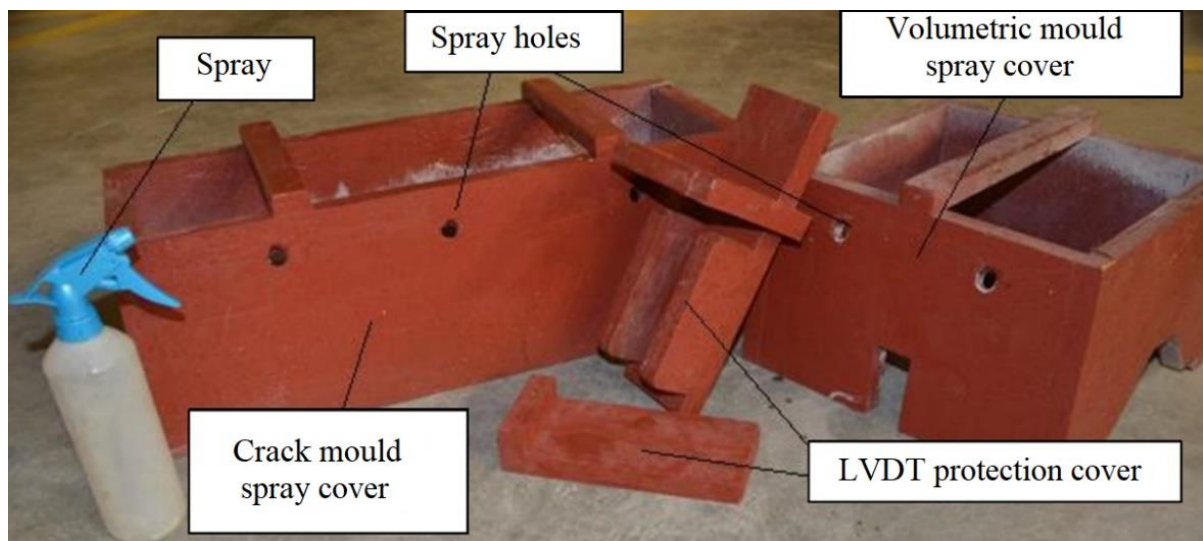


Figure 3.19: Curing application equipment

The concrete filled moulds were covered and sprayed with the desired amount of curing liquid at the desired time by covering the mould for approximately 30 seconds each. Great care was taken to ensure that an equal amount of time was given to each sample, this allowed the moisture to settle equally and consistently for every specimen (Kosmatka and Wilson, 2002; Cement concrete & aggregate Australia, 2006).

### 3.5.2. Curing quantity

Curing is expected to be affected by the amount used, thus it is necessary to regulate and control this aspect. The amount of water curing added is calculated from the rate of evaporation applied and is defined as amount of time the specimen is to be protected. This amount is measured as a height value as the area protected is covered in a volume of liquid meant to cure the specimen, thus the amount of protection is not dependent on the area protected if the area is fully covered. This amount can be calculated as shown in Equation 4 (Kosmatka and Wilson, 2002; Cement concrete & aggregate Australia, 2006).

$$h_{cl} = \frac{Evap_{app} \times A_{prot} \times t_{prot}}{\rho_{cl} \times A_{cl}} \quad \text{Equation 4}$$

with:

$h_{cl}$  = height of the curing liquid [m]

$Evap_{app}$  = evaporation rate [ $kg/m^2/h$ ]

$A_{prot}$  = area to be protected [ $m^2$ ]

$t_{prot}$  = time to be protected [h]

$\rho_{cl}$  = density of the curing liquid [ $kg/m^3$ ]

$A_{cl}$  = area covered by curing liquid [ $m^2$ ]

It should be noted that the amount of liquid applied is not the amount of protection given as there are losses that are difficult to estimate or calculate accurately. These losses include moisture blown away after removal of the spraying covers or moisture on or absorbed by the moulds sides. The estimated protection for 1 mm is an hour's protection, thus this was used as the basis of curing quantity for testing.

To ensure an accurate amount of curing water is applied onto the specimen, the amount of protection is converted to a mass. This mass can be calculated as shown in Equation 5 and is approximately 90 g for 1 hours protection.

$$m_{water} = A_{protected} \times h_{protection} \times \rho_{water} \quad \text{Equation 5}$$

with:

$m_{water}$  = Mass of water used for curing [g]

$A_{protected}$  = Area that is to be protected [ $m^2$ ]

$h_{protection}$  = Amount of protection given [mm]

$\rho_{water}$  = density of water [ $kg/m^3$ ]

Three types of curing agents were also used in this study, namely a white pigmented wax emulsion, a petroleum resin emulsion and a water-based acrylic emulsion curing agents. The amount of curing agent applied is governed by the supplier as most agents create a film that covers the concrete with a specific amount of liquid required. Thus, the curing is no longer aimed to replenish the available water but prevent the water from being removed. The supplier suggests that  $0.2 \text{ l/m}^2$  of curing agent should be sprayed over the sample for all three curing agents (Chryso, 2019).

All the curing agents were obtained from Chryso. The white pigment wax emulsion agent used is known as Chryso Cure WB and has a slight faint odour, specific gravity of 0.98 at room temperature and is partially soluble in water. The petroleum resin emulsion agent is known as Chryso Cure WP and is a milky white liquid with a specific gravity less than one and is partially soluble in water. The water-based acrylic emulsion agent is known as Chryso Cure Acrylic, a milky pink liquid that is dilutable in a water (Chryso, 2019).

### **3.5.3. Curing scheduling**

The curing applied can be divided into two categories, namely water and curing agent, these are further divided due to time of application. Water curing is divided into single and multi-application, whereas the curing agents are divided according to type as discussed in the following sections.

#### **Single application water curing**

The chosen amount of curing, as discussed in the previous section, was applied at varies times. These times were obtained from the tests on the concrete mix where no curing was applied as shown in Figure 3.20. The figure shows the shrinkage, settlement, capillary pressure and crack development results of the standard concrete mix, which is referred to as Uncured throughout the study. These results are also discussed in more detail later in Chapter 4 and is only used here to illustrate the times chosen to apply curing.

The first application time (T1) is slightly before the start of the capillary pressure buildup. The second application (T2) is at the start of the significant shrinkage while the third application (T3) is just before the first visible crack is formed. The fourth time (T4) is applied at the first visible crack around the initial setting time and the final curing application (T5) is applied during the rapid crack growth period near the final setting time.



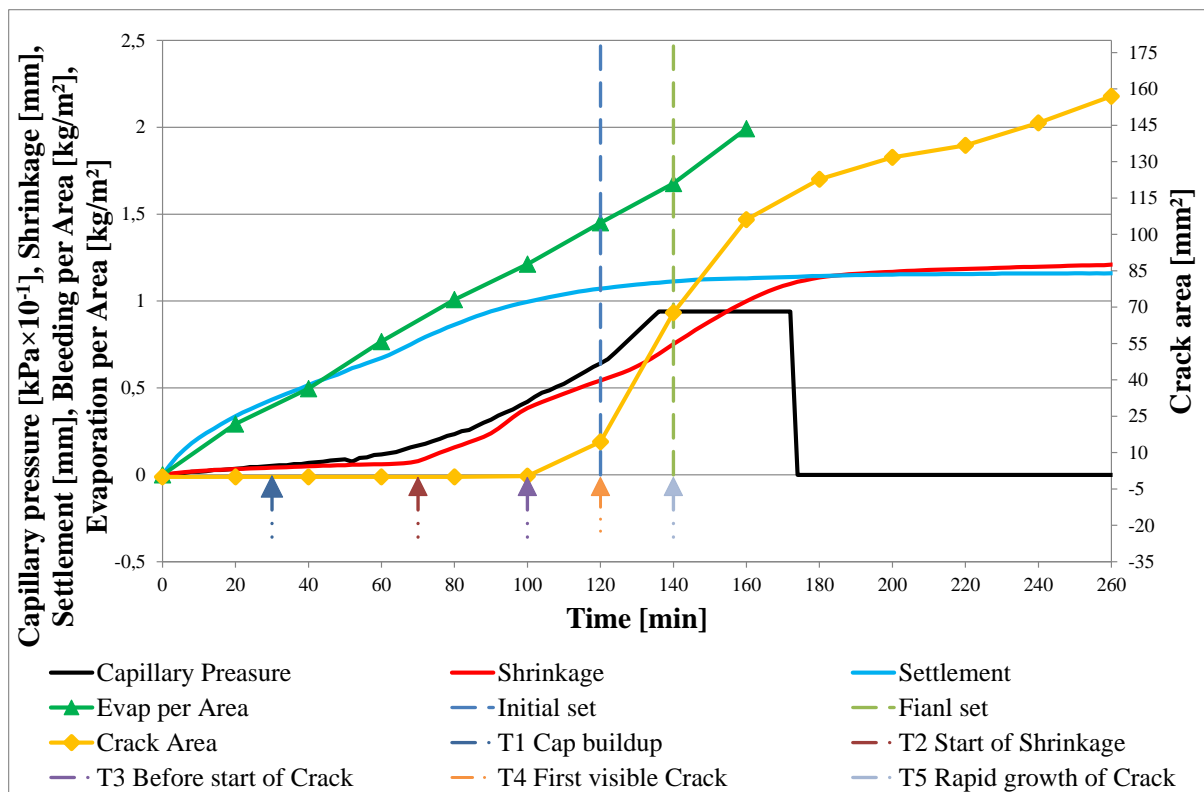


Figure 3.20: Uncured plastic shrinkage cracking behaviour and curing times, T1 - T5

### Multiple water curing

Two multiple water curing applications were investigated. The multiple application was chosen to limit the shrinkage that occurred. Two means of limitations were chosen, the first was allowing the specimen to shrink 5% of the maximum shrinkage obtained, from the uncured sample, before applying curing and consecutively applying curing for every 5% shrinkage thereafter, thus causing a step wise shrinkage, e.g. 5%, 10%, 15% etc.

The second experiment is similar, yet this test aimed to limit the total shrinkage of the concrete to 5%. The chosen limiting value of 5% of the maximum shrinkage was calculated as 0.061 mm occurring at approximately 70 minutes, coinciding with T2. This method of testing is more complex than the previous method as it required numerous curing applications applied at unknown and unpredictable times.

### Curing agent

The chosen curing agents were applied as suggested by the supplier. The wax and petroleum-based agents were applied just after the concrete placement, whereas the acrylic based agent was applied once the concrete surface no longer showed a water sheen on the top surface.

These agents were applied in the same manner as the water, namely sprayed with a mister and covered by the spraying cover in order to achieve the same spread and reduce the surface damage similarly to that of the water application (Chryso, 2019).

### Curing program summary

Table 3.2 summarises the type, application time and reason for the curing used as well as a shorthand designation or name given to each of the tests. These designations are used for the rest of the study to ease comparison. All of the tests used either 1 mm water or 0.2 l/m<sup>2</sup> curing agent. The curing agents are labelled in the following order: 1 – Wax, 2 – Petroleum and 3 – Acrylic.

Table 3.2: Curing regime and designation

Curing Type	Application time [min]	Test Mechanism / Application reasoning	Curing quantity	Test Designation
None	0	Uncured reference	NA	Uncured
Water single application	30	Before capillary pressure buildup	1 mm	WST1
	70	Start of shrinkage	1 mm	WST2
	100	Before start of visible crack	1 mm	WST3
	120	At first visible crack	1 mm	WST4
	140	During rapid crack growth	1 mm	WST5
Water multiple application	As needed	Allow a 5% increase of shrinkage	1 mm	WM5I
	As needed	Limit the growth of shrinkage to 5%	1 mm	WM5S
Curing Compound	0	After concrete placement	0.2 l/m <sup>2</sup>	CA1
	0	After concrete placement	0.2 l/m <sup>2</sup>	CA2
	80	Disappearance of water sheen	0.2 l/m <sup>2</sup>	CA3

### 3.6. Test quantities and data acquisition

To ensure the results are accurate and reproducible at least four LVDT samples and two capillary pressure samples were tested for most of the tests conducted. In addition, for the uncured test without any curing, eight samples were tested as all tests were compared to the uncured test.

Due to time and material restrictions two of the tests were conducted using only two samples as shown in Table 3.3. The table also shows the number of samples tested for the different tests.

*Table 3.3: Test sample quantities*

<b>Test Designation</b>	<b>Number of samples tested</b>	<b>Test Designation</b>	<b>Number of samples tested</b>
Uncured	8	WM5I	2
WST1	4	WM5S	2
WST2	4	CA1	6
WST3	4	CA2	4
WST4	4	CA3	7
WST5	4		

The data acquired from the LVDT's and capillary sensors was captured using a data acquisition system connected to a computer running software designed to interpret the logger's signals. The repeatability of all tests was acceptable and therefore only the averages of the samples tested are shown in the results section for comparison reasons.

Figure 3.21 and Figure 3.22 show the results of 4 samples of typical shrinkage, settlement and cracking results. The data shows good repeatability with the greatest deviation typically shown by the settlement results as shown in Figure 3.21. However even for this example, the average of the four settlement samples provides an adequate representation of the settlement for the concrete and curing conditions.

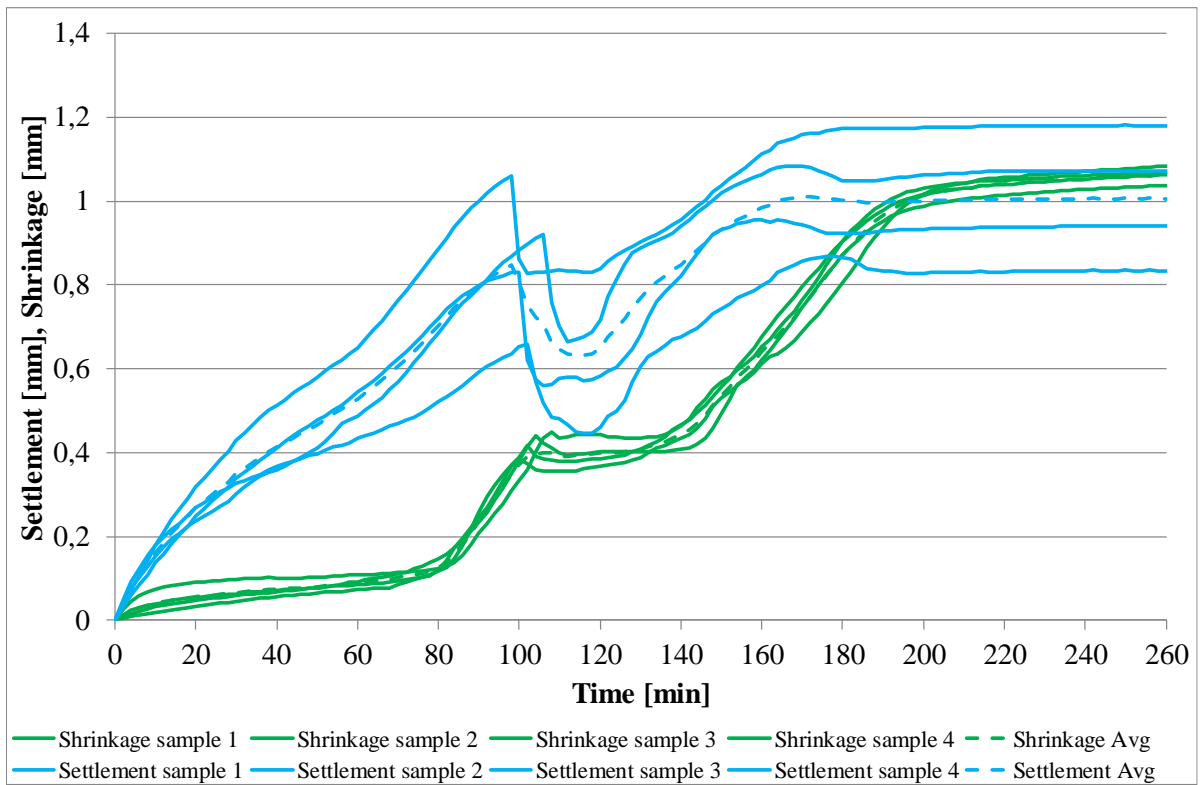


Figure 3.21: Settlement and shrinkage representatives

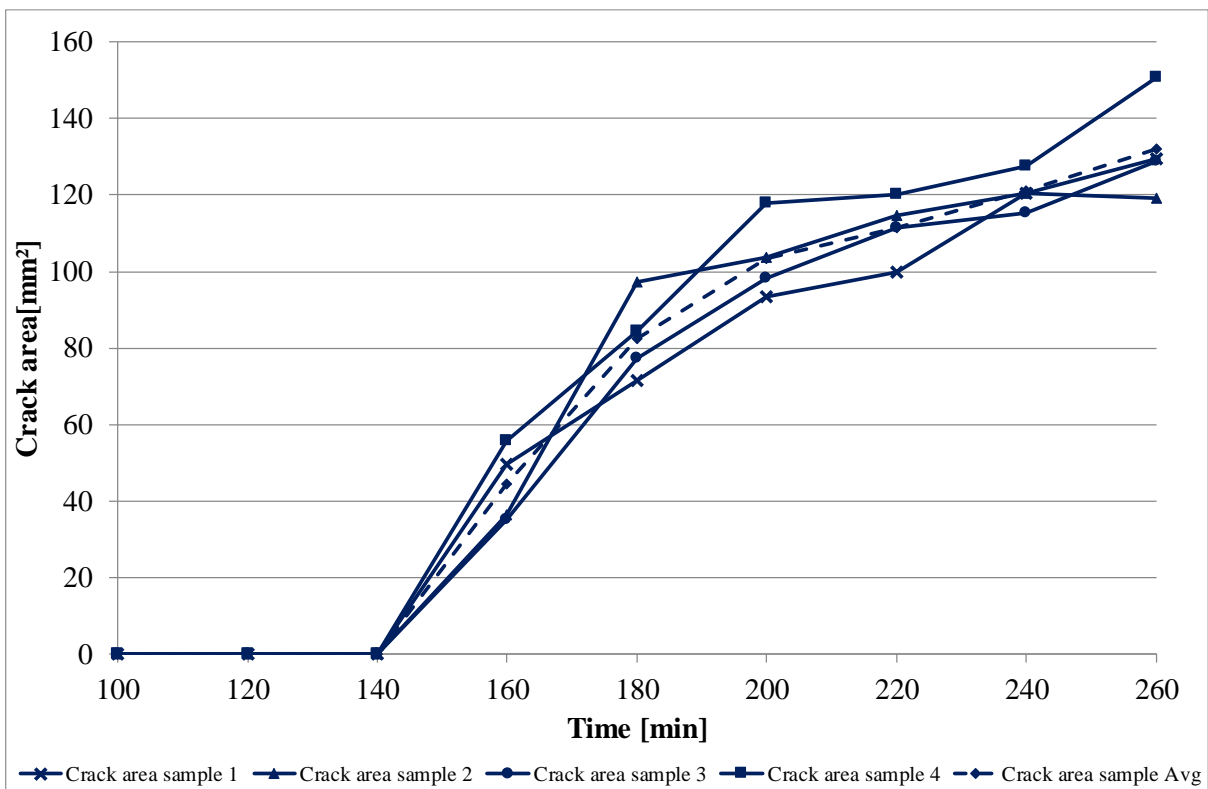


Figure 3.22: Crack area representative

## 4. Results

This chapter discusses the results obtained from the experiments as explained in the previous chapter. Plastic shrinkage behaviour of the uncured test is initially studied to understand the associated governing influencing factors such as shrinkage, settlement and capillary pressure compared to the crack behaviour. Thereafter, the influence of single and multiple application water curing and the use of curing compounds on typical plastic shrinkage cracking behaviour are investigated.

### 4.1. Uncured concrete

The plastic shrinkage behaviour of the uncured mix, namely the test without any curing applied, is studied in terms of shrinkage, settlement, capillary pressure, and crack development as shown in Figure 4.1. Cracking started between 100 and 120 minutes, which is around 50 minutes after the buildup of capillary pressure and shrinkage. Thereafter it entered the rapid growth period between 120 and 180 minutes and stabilised soon after.

This behaviour is driven by the shrinkage, settlement and capillary pressure as described by Combrinck et al. (2019) with the overall trends being similar to findings by other researchers (Wittmann, 1975; Cohen, Olek, *et al.*, 1989; Krönlof, Leivo, *et al.*, 1995; Uno, 1998; Slowik, Schmidt, *et al.*, 2008; Combrinck, Kayondo, *et al.*, 2019). The response of these fundamental influencing factors are discussed in finer detail in the following paragraphs.

The settlement of the uncured mix increases steadily within the first 120 minutes and stabilizes thereafter, reaching a maximum of 1.16 mm at the end of the test. The graph shows that the concrete only settles around 0.06 mm after 120 minutes till the end of the test. As discussed in Section 2.2.1, settlement mostly occurs once the concrete is cast and gradually diminishes as the concrete progresses from a fluid liquid to a solid. It is during this fluid state that the concrete experiences the greatest settlement (Powers, 1968; McCarter, Chrisp, *et al.*, 2012).

The shrinkage behaviour, in contrast to the settlement, only starts to increase at around 70 minutes, where after the concrete enters a phase of rapid shrinkage for about 120 minutes. This rapid increase of shrinkage coincides with the rapid growth period of the capillary pressure due to the increased suction as described in Section 2.1.5. The final period, namely from approximately 190 minutes to the end of the test, shows a similar stabilization period as seen in the final phase of the settlement behaviour (Powers, 1968; Emeritus, 1990).

The capillary pressure starts with a period in which very slow growth is seen and starts increasing exponentially after approximately 50 minutes. There after the sensor's capacity is reached at around 135 minutes and kept constant until 170 minutes creating an artificial plateau, as described in Section 3.2.3, ending when the pressure is lost due to air entering the concrete at around 173 minutes.

It is important to note the point in time where the significant capillary pressured growth starts as previous studies suggest that delaying the start of capillary pressure should reduce the crack development (Powers, 1968; Schmidt and Slowik, 2009; Combrinck, 2016).

The first visible hairline crack appeared between 100 and 120 minutes, which can be referred to as the development or formation period, where after the concrete enters a rapid growth period for approximate 60 minutes. The concrete then enters a stabilization period at around 180 minutes which still shows an increase in crack area yet drastically less than during the rapid growth period. This slow growth of the crack area is most probably due to the stabilisation or ceasing of the shrinkage and settlement (Powers, 1968; Khan, 2018).

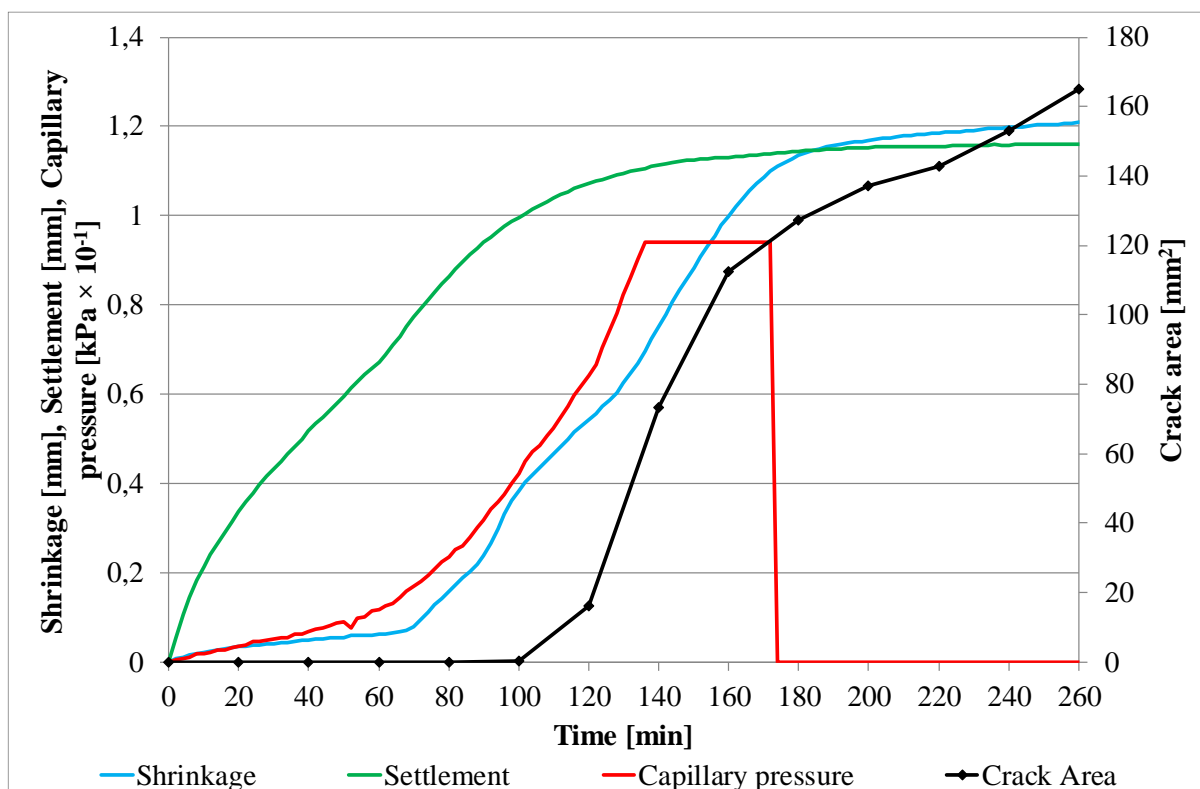


Figure 4.1: Unured concrete test results in terms of shrinkage, settlement, capillary pressure and crack area

## 4.2. Bleeding and evaporation of uncured concrete

The amount and rate of the bleeding and evaporation of the uncured concrete mix are shown in Figure 4.2. These tests were conducted in the climate chamber at the same conditions as all the other tests.

The amount of bleeding during the first 40 minutes shows a slightly lower value than that of the evaporation, this difference increases with time after 40 minutes. This difference in the bleeding and evaporation suggests that cracking is likely to occur, confirming the behaviour of the crack development seen in Figure 4.1.

The decrease in bleeding as time progresses is due to the decrease in settlement, which ultimately displaces bleed water to the surface, compared to the evaporation which stays relatively constant as more pore water is extracted from within the concrete as bleeding water diminishes.

The rate of bleeding shows this decrease more clearly as the rate shows a definite decline as the test progresses, reaching zero at 180 minutes. The evaporation rate also diminishes as the concrete hardens, but this did not occur within the first 3 hours as tested in this study (Josserand and de Larrard, 2004; ACI 305.1-06, 2007; Combrinck, 2012; Yim, Kim, *et al.*, 2013).

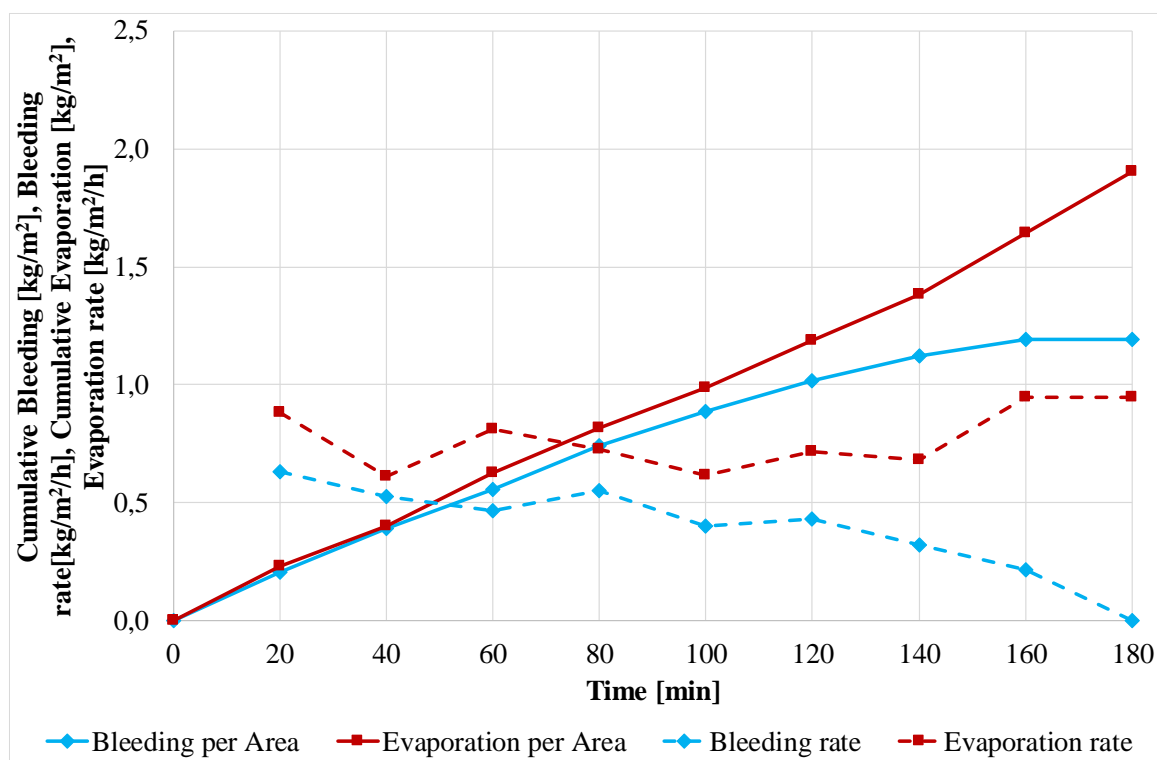


Figure 4.2: The bleeding compared to the evaporation of the uncured sample

Figure 4.2 also shows that the cumulative amount of evaporation starts exceeding the cumulative amount of bleeding after 40 minutes, which can be defined as the drying time. The drying time signifies the start or possibility of capillary pressure buildup as confirmed by the results in Figure 4.1, which show the start of significant capillary pressure buildup just after the drying time is reached at around 50 minutes.

### 4.3. Single water curing

Water curing was applied at five unique times as described in Table 3.2. The impact of water curing on the shrinkage, settlement, capillary pore pressure development, and crack area growth for the different water curing times is shown in Figures 4.3 to 4.7. These figures show both the water curing results as well as the uncured test for comparison purposes.

The first application investigated the influence of the capillary pressure before significant pressure buildup is expected to start. Thus, the sample was sprayed with 1 mm water at 30 minutes. Figure 4.3 shows the effect of water curing when applied before the expected start of significant capillary pressure buildup. Water curing at this point was observed to cease and lower both vertical settlement and capillary pressure.

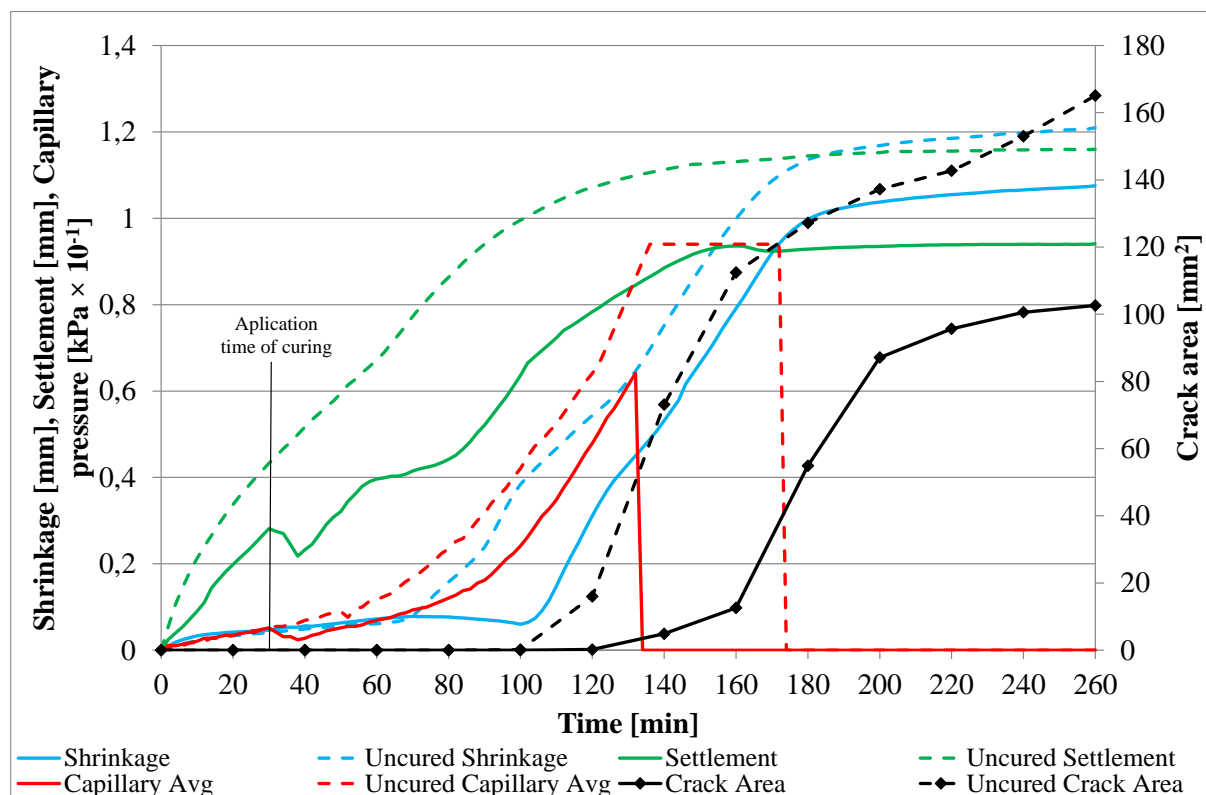


Figure 4.3: Single water curing application before significant capillary buildup (WST1)



The capillary pressure behaviour deviates greatly from the uncured reference test showing a delay of around 20 minutes with regards to the start of significant capillary pressure buildup. The settlement of the cured concrete shows a similar start to that of the uncured test and deviates at 30 minutes due to the sample being cured, after which, settlement continues to increase at a similar rate as before the application of curing, ultimately resulting in a lower final settlement value compared to the uncured concrete. The settlement actually shows that the concrete swells slightly once the curing is applied.

The shrinkage of the cured concrete shows a 30 minute delay in the start of the significant shrinkage, which thereafter shrinks at a similar rate to the uncured concrete. The final shrinkage value is however only slightly less for the cured sample compared to the uncured concrete. All these delays and reductions due to curing caused the crack to form 20 minutes later as well as a significantly lower final crack area for the cured concrete compared to the uncured concrete.

This behaviour is similarly observed in the second test which investigated the influence of curing the concrete at the start of significant increase in shrinkage, namely at 70 minutes, as shown in Figure 4.4. This test is referred to as WST2 as described in Table 3.2.

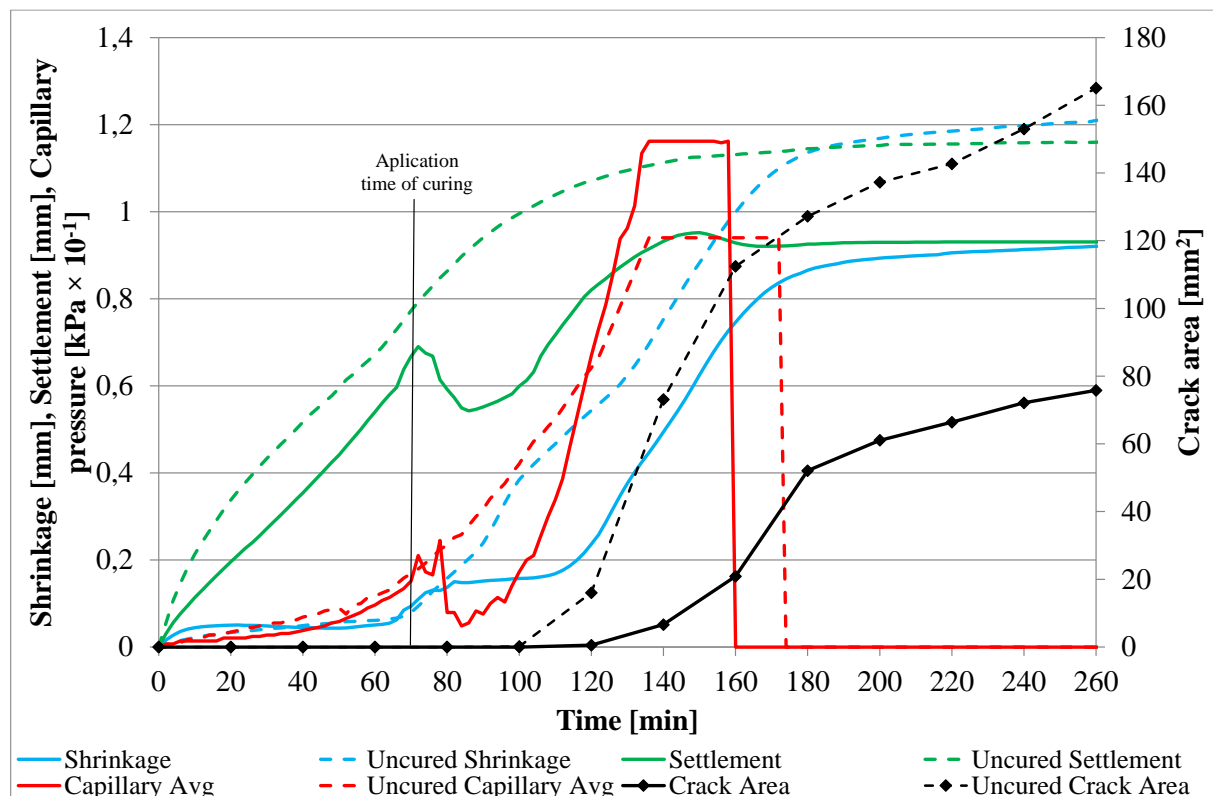


Figure 4.4: Single water curing application at start of shrinkage (WST2)

This test (WST2) shows similar results to WST1, although the reduction and delay in shrinkage and settlement is greater than WST1 and by extension the uncured concrete. The capillary pressure deviates greatly from the uncured concrete as well as WST1, showing a significant reduction to near zero once the curing is applied.

It should be noted that pressure sensors were zeroed at the start of the test, therefore the zero value at the start of the test in Figure 4.4, and all other capillary pressure results, is actually a slight positive or compressive pressure due to hydrostatic pressure. Consequently, the dropped value or pressure relieve seen in the graph, caused by the application of curing, is the true zero pressure and thus the point of stabilisation or balanced pressure.

This means that the curing managed to completely relieve all capillary pressure buildup when applied due to the significant drop in pressure to near zero. It is also believed that it is this significant relief in capillary pressure which is responsible for the swelling shown by the settlement. However, the results also show that once the capillary pressure starts building up at around 100 minutes, the rate of pressure increase is much higher than for the uncured concrete.

The shrinkage shows a stabilisation once the curing is applied at 70 minutes and only starts shrinking again at around 110 minutes. The delay and lower final values due to curing resulted in a 20 minute delay in the start of cracking and a final crack area half that of the uncured concrete. The cracking rate is also much lower for the cured concrete between 140 and 180 minutes.

WST3 investigated the appearance of cracking by applying curing slightly before the first visible crack, namely at 100 minutes. This curing resulted in a similar behaviour as WST1 and WST2 and succeeded in prolonging or delaying the appearance of the first crack by 40 minutes. However, the final the crack area is only marginally reduced, as shown in Figure 4.5.

WST4 aimed to investigate the influence of curing during the early developmental phase of the crack. This is done by curing the concrete at the appearance of the first hairline cracks at approximately 120 minutes. The curing resulted in a similar behaviour as the previous test, WST3, but showed a slightly increased reduction of the crack area compared to WST3, as shown in Figure 4.6. A noticeable difference with WST4 is the sudden and large first crack that formed after the curing water evaporated and capillary pressure increased again.

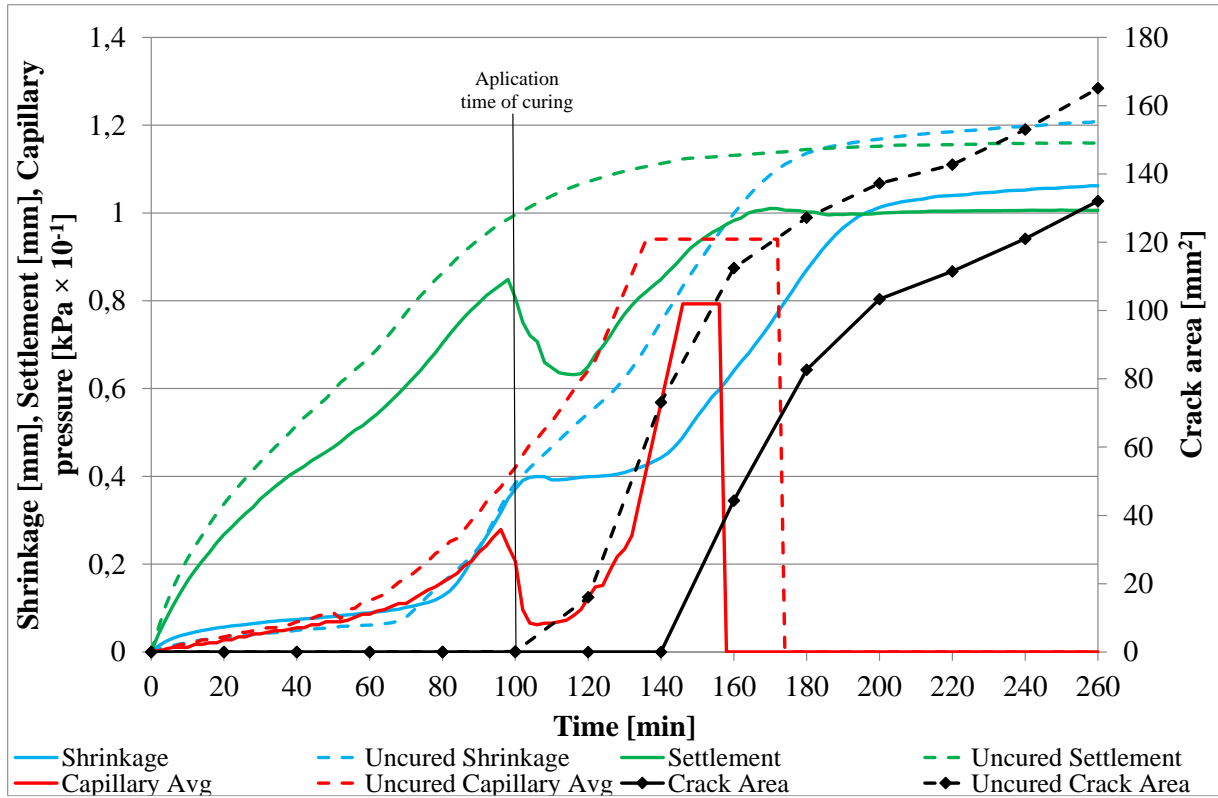


Figure 4.5: Single water curing application before the appearance of crack (WST3)

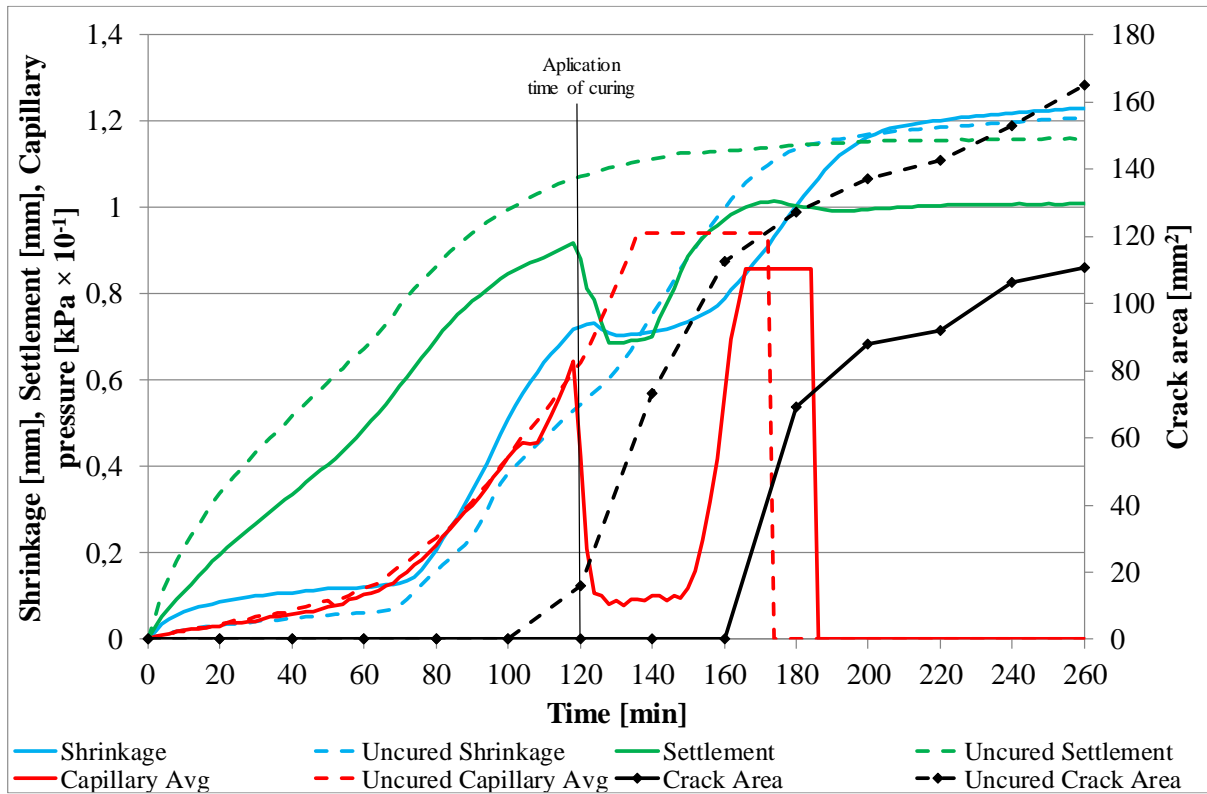


Figure 4.6: Single water curing application on the first visible crack (WST4)

The fifth and final single water test (WST5) investigated the influence of curing the concrete during the rapid crack growth phase at 140 minutes as shown in Figure 4.7. The results follow the behaviour set by the previous tests and confirms that it is not possible to repair or close the crack after it has formed by simply misting it with water. It does however show that the crack growth is ceased once curing is applied and that the final crack area is reduced due to the curing, but only by a slight margin.

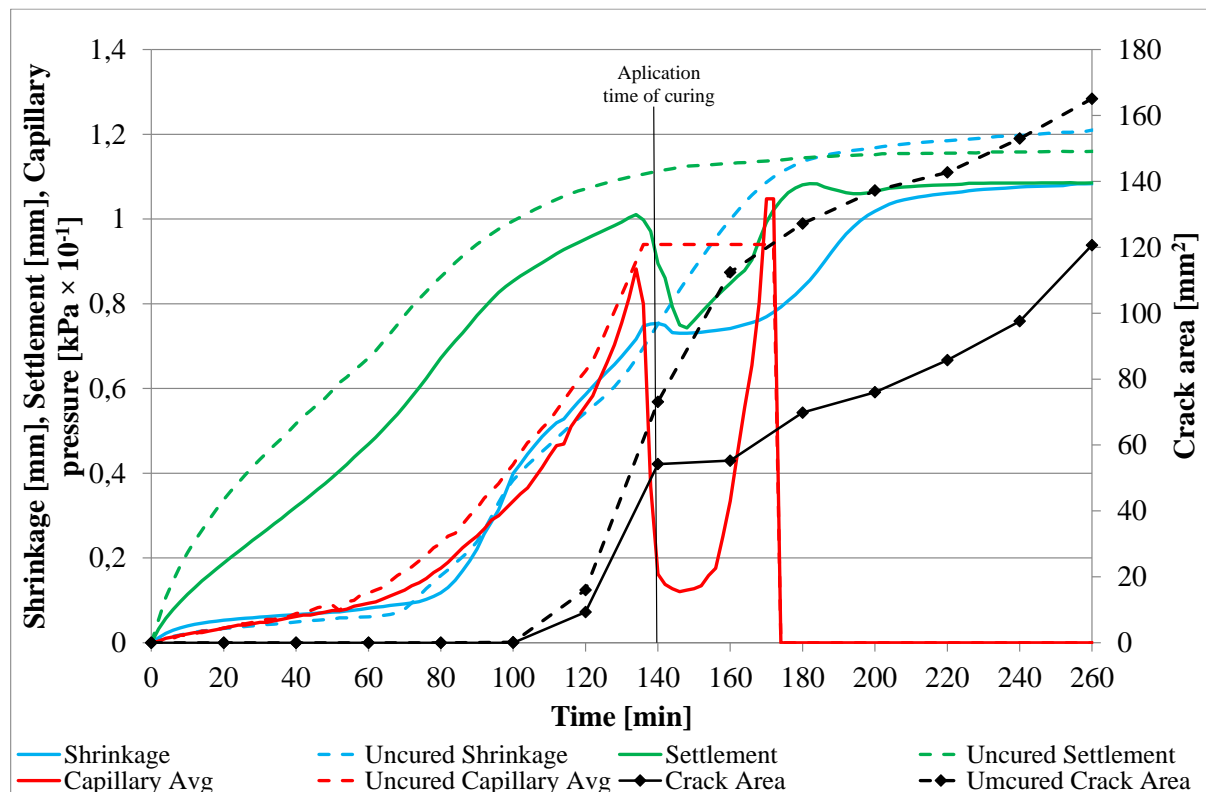


Figure 4.7: Single water curing application during rapid growth period of crack (WST5)

These tests formed the basis for this study as a single application of curing shows the influence of curing on the targeted fundamental factors and the crack development compared to the uncured concrete. Analysing these tests crack areas shows that WST2 had the greatest crack area reduction, as seen in Figure 4.8. Thus, single application curing of concrete at the start of the shrinkage development proved to be the optimum single curing regime amongst the tests conducted.

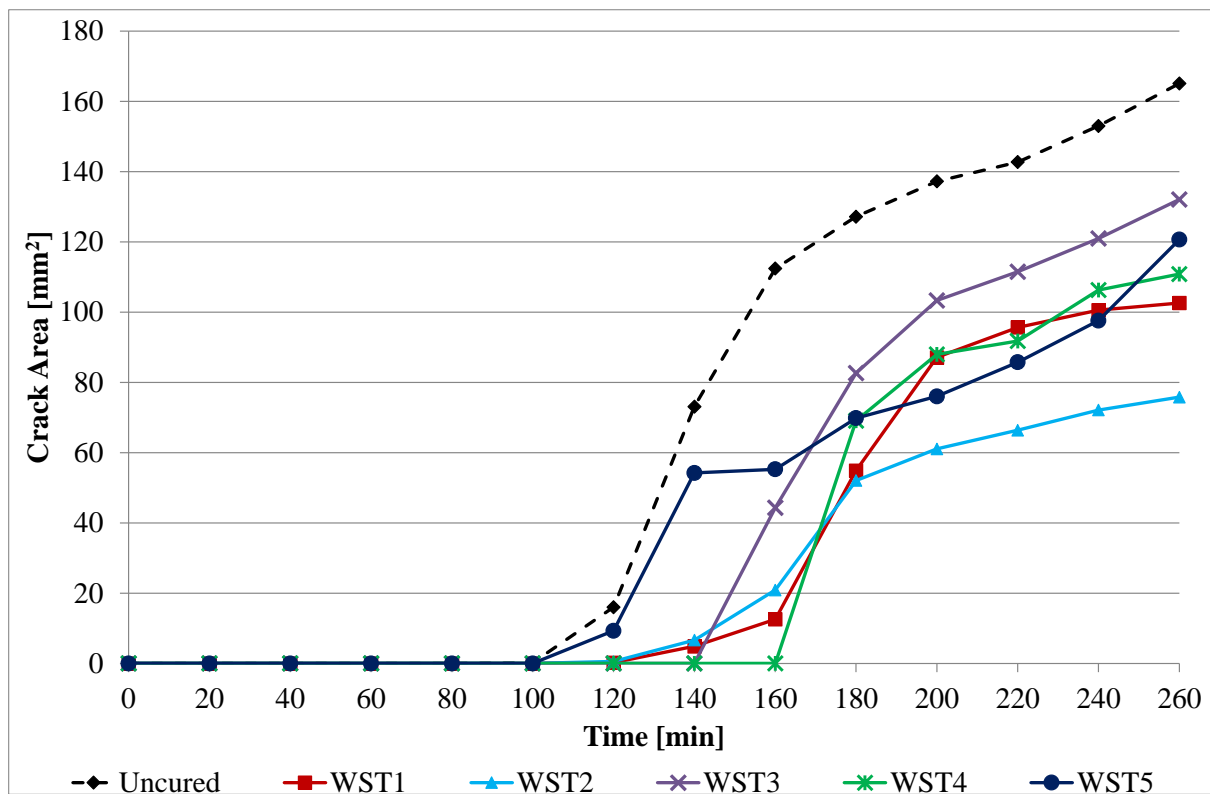


Figure 4.8: Summary of single application 1 mm curing crack area

The reduction in crack area shown by WST2 is most probably due to the greater reduction in shrinkage compared to the other curing times, as shown in Figure 4.9. However, it is unknown if the reduction of the final shrinkage value has a greater influence on the crack development than the delay of the rapid growth period in shrinkage.

Another observation is that even though the capillary pressure was completely relieved by curing, it did not change the shrinkage that has already occurred before curing. The capillary pressure also quickly builds up once the curing water has evaporated and the cracking that occurs afterward is near the cracking of the uncured concrete. These results suggest that the damage or possible micro cracking caused by the shrinkage before curing, is not repaired by the curing and therefore contributes to the final cracking.

Capillary pressure development for all cured concrete, as shown in Figure 4.10, revealed that although the curing relieved all capillary pressure that has buildup at the time of curing, the capillary pressure quickly starts building up again, often at a higher rate than before curing. The drop or relief in capillary pressure development should not be confused with air entry into the system as it soon recovers and attains actual air entry at a later stage (Schmidt and Slowik, 2009).

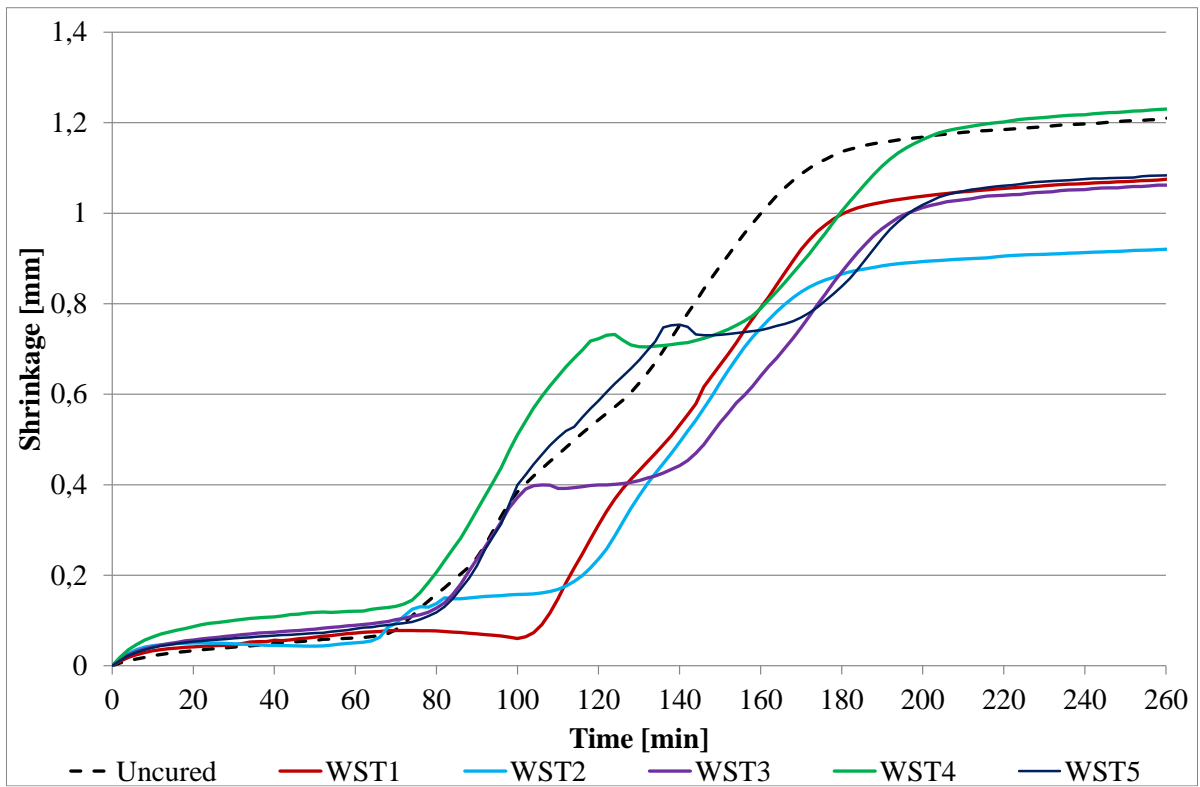


Figure 4.9: Summary of single application 1 mm curing shrinkage

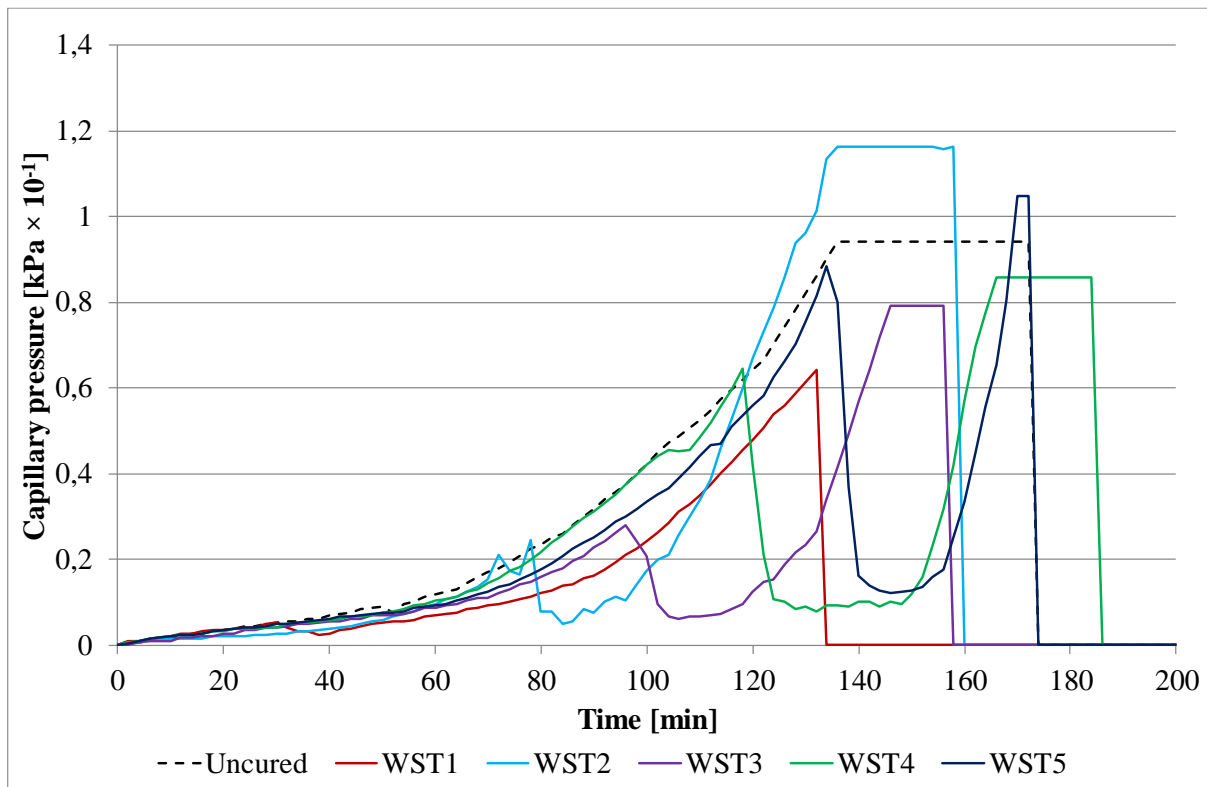


Figure 4.10: Summary of single application 1 mm curing capillary pressure

Furthermore, as mentioned, the settlement results do show a swelling or decrease once the curing is applied for all tests, as shown in Figure 4.11. The figure also shows that the swelling is more pronounced the later the curing is applied. The later the curing is applied the higher the capillary pressure that has buildup and is therefore relieved by the curing. This suggests that the means of pressure relief within the concrete is by causing a vertical swelling and the higher the capillary pressure that is relieved by curing the greater the swelling that occurs.

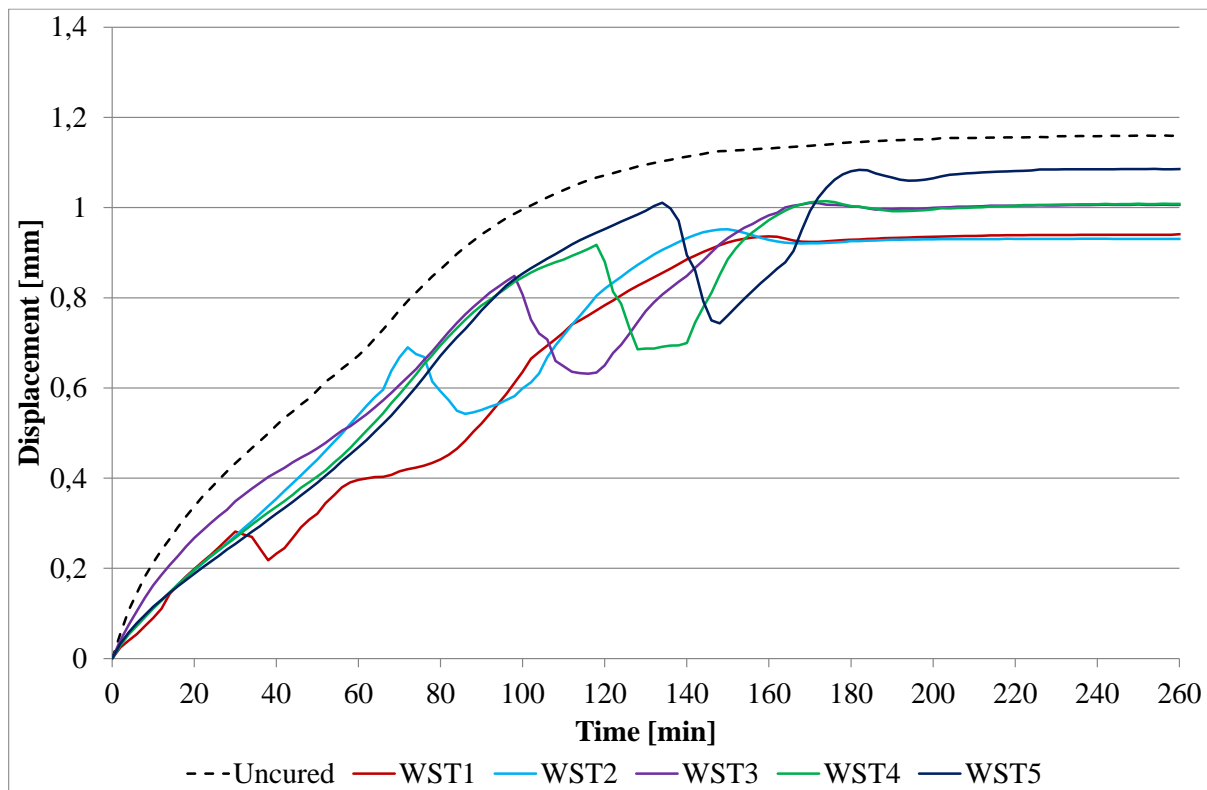


Figure 4.11: Summary of single application 1 mm curing settlement

#### 4.4. Multiple water curing

Previous studies proved that multiple application of curing can drastically reduce the development of cracks. These studies included the use of an automated system programmed to focus on the capillary pressure, applying curing if a threshold is reached. This meant that a number of curing applications were used at irregular intervals. The multiple application of curing as done by Slowik proved to be quite successful at preventing any further cracking. Thus a multiple curing regime is investigated with the focus on the concrete shrinkage and not the capillary pressure as done by Slowik (Slowik, Schlattner, *et al.*, 2004).

A value of 5%, e.g. 0.061 mm, was chosen as this is approximately the value of the shrinkage around the time significant shrinkage starts. The curing application time should therefore be once the shrinkage increases by 0.061mm.

This proved to be practically difficult to execute since the shrinkage value needed to be acquired from a live feed of the data logger as shown in Figure 4.12. The application times were therefore not applied exactly as planned and often more than 0.061 mm shrinkage occurred before curing was applied as can be seen in Figure 4.13

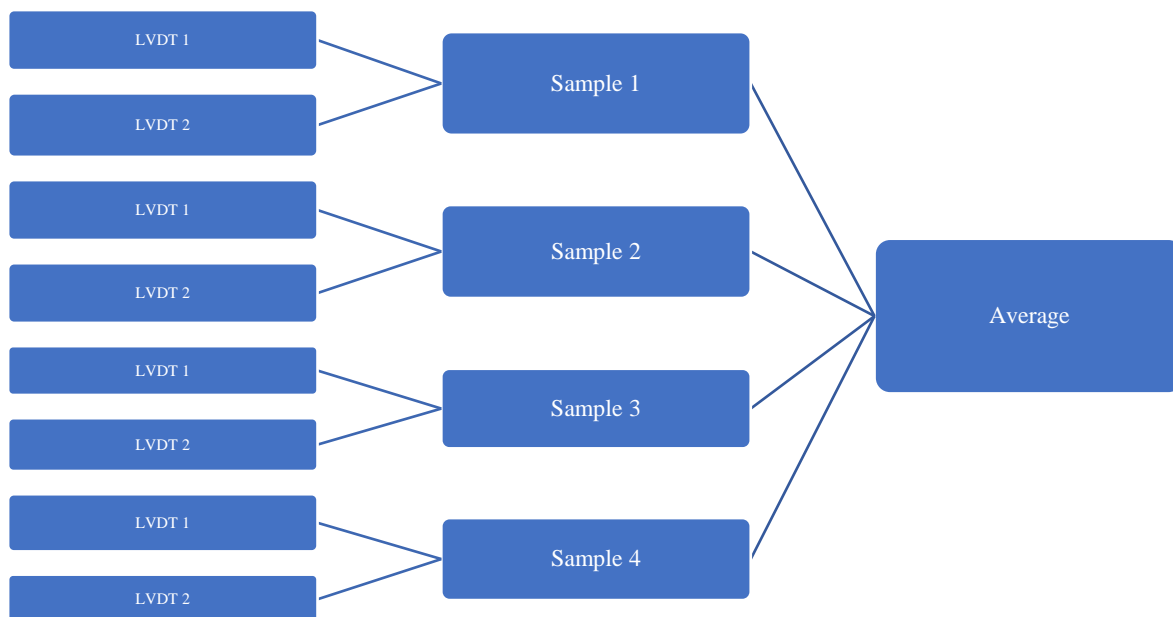


Figure 4.12: Calculation scheme for calculation of the average shrinkage at a given time

WM5I shows a drastic reduction of the crack area as shown in Figure 4.13. The figure shows predominant deviations upon curing especially seen by the shrinkage and capillary pressure. Multiple curing proved to drastically reduce and delay the cracking of the concrete but could not prevent cracking as some significant shrinkage still occurred towards the end of the test.

It should be noted that the results suggest that air entry does not occur, however it is believed that the capillary pressure measurements become suspect and unreliable towards the end of the test due to the setting and solidification of the concrete (Powers, 1968; Schmidt and Slowik, 2009).



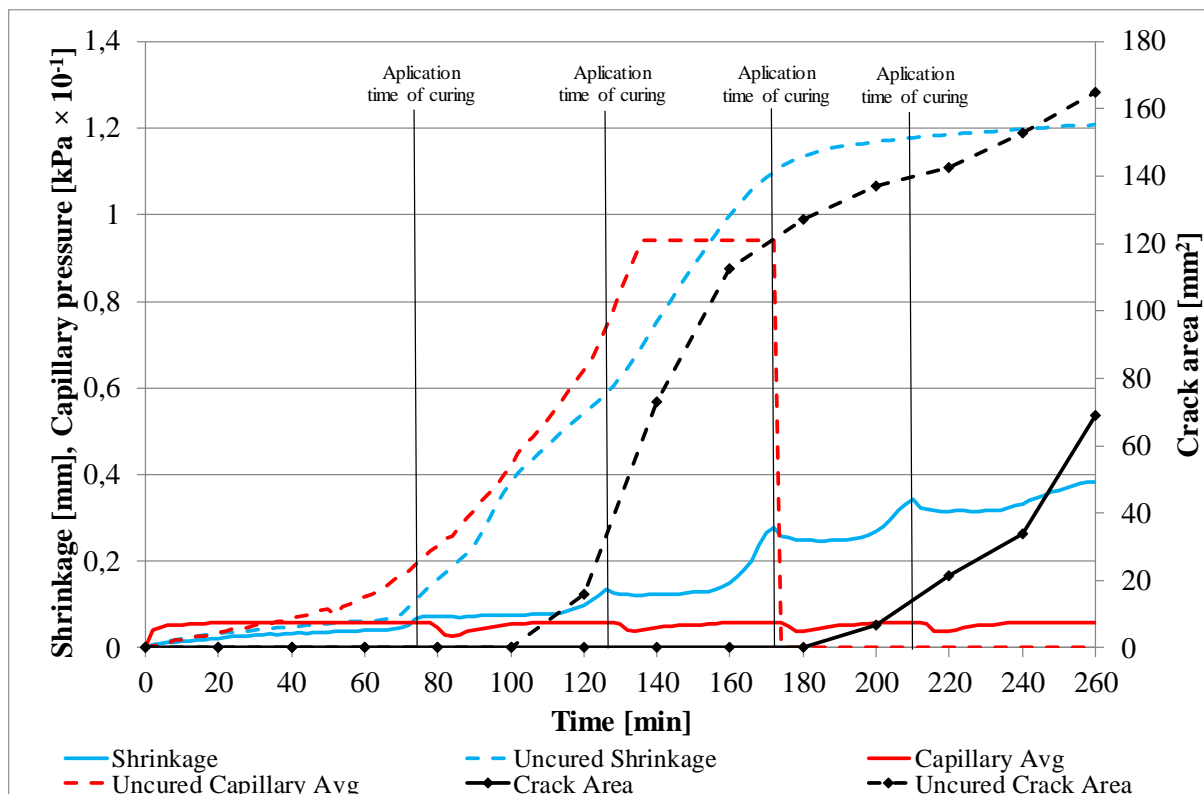


Figure 4.13: Multiple water curing application at every 5% increase in shrinkage (WM5I)

The second multiple curing test aimed to limit the final concrete shrinkage to 5% of the total shrinkage of the uncured concrete, using a greater number of curing applications as shown in Figure 4.14. The results show similar behaviour than the WM5I, but with slightly more deviations as the sample was sprayed more often to retain the 5% shrinkage.

The test limited the shrinkage to 31.21% due to a late application of the second final curing, causing an increase of 11.26%. However, even as the test did not limit the shrinkage to 5%, it still succeeded in preventing surface cracking from occurring, thus proving that plastic shrinkage surface cracking in severe environmental conditions is preventable.

The reason WM5S did not crack and WM5I did is because the WM5I showed significant shrinkage at around 160 minutes while WM5S only showed significant shrinkage at 190 minutes. This suggests that shrinkage should be prevented for as long as possible to prevent cracking.

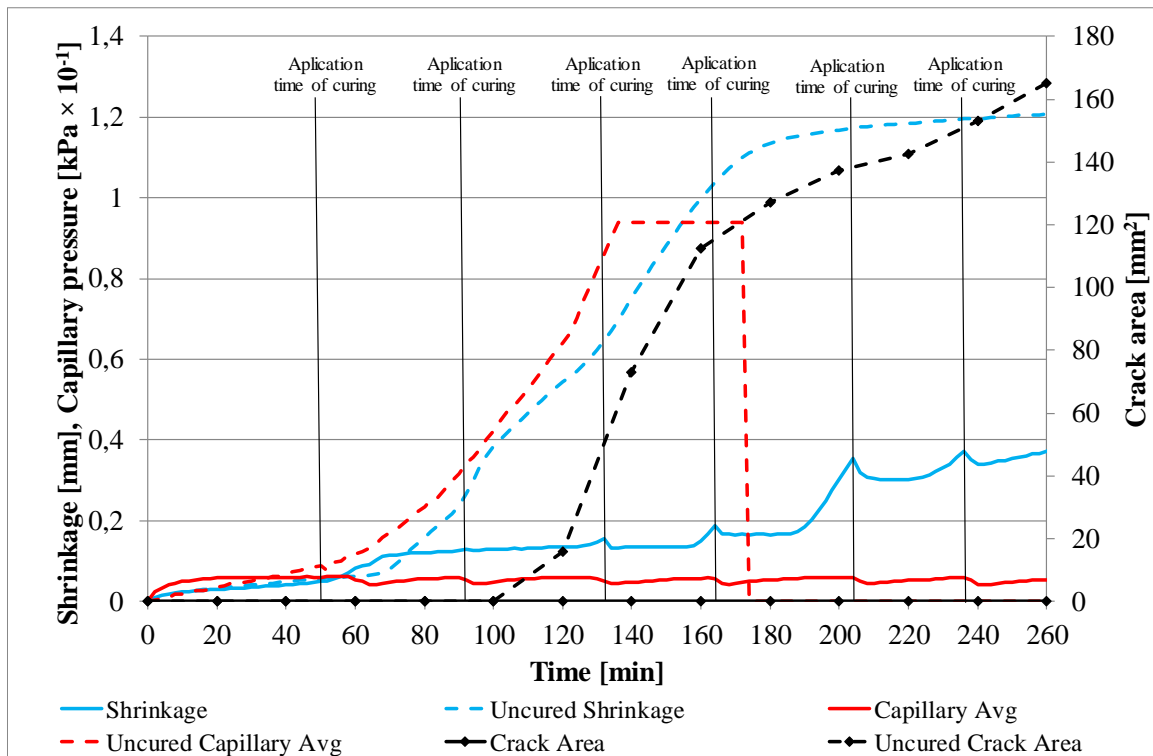


Figure 4.14: Multiple water curing application to a final shrinkage of 5% (WM5S)

#### 4.5. Curing using curing agents

This study aimed to investigate the influence of liquid curing measures on plastic shrinkage cracking of concrete, which is mostly done with water yet curing compounds are also used. Amongst the available compounds three of the more commonly used are namely: wax emulsion, petroleum resin emulsion and acrylic emulsion-based agents.

These agents are designed to solidify and create an impermeable layer which locks in the moisture within the concrete and prevents evaporation of the surface liquid, as shown in Figure 4.15. These layers may be difficult to remove and require an extended period before they can be removed without damaging the concrete surface (Chryso, 2019).



Figure 4.15: Layer created by the petroleum curing agent (CA2)

The first of these agents' results, namely the wax emulsion-based agent CA1, is shown in Figure 4.16. The petroleum resin emulsion-based CA2 is shown in Figure 4.17 and the acrylic emulsion-based agent in Figure 4.20.

The wax agent, CA1, was applied at the placement of the concrete and delayed the start of shrinkage and capillary pressure significantly compared to the uncured concrete. The final shrinkage value is also significantly reduced while the settlement is only slightly reduced.

This in turn delayed and reduced the cracking with a final crack area similar to that of the single water curing result, namely WST2. The settlement shows an increased settlement during the first period, which is caused by the curing agents application at the start of the test and the solid film formed by the curing agent.

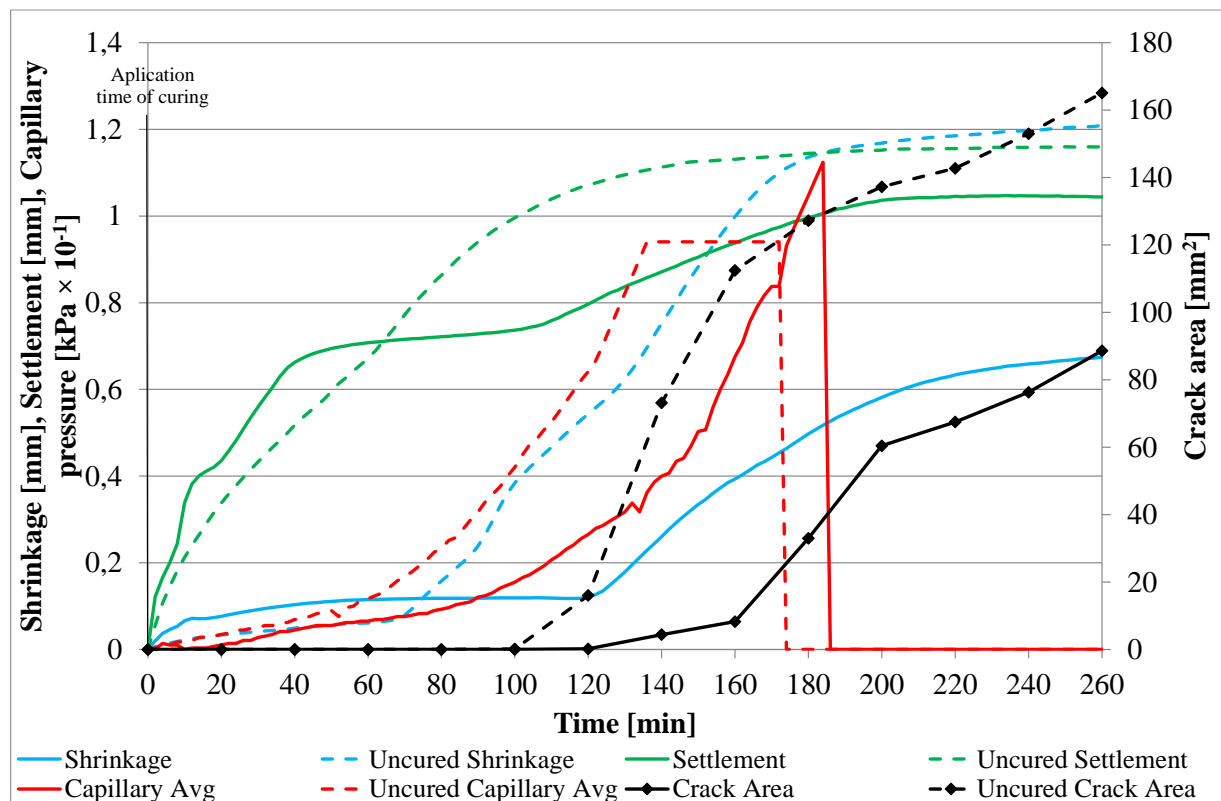


Figure 4.16: Wax emulsion-based curing agent (CA1)

The petroleum resin emulsion-based agent, CA2, shows a drastic delay and reduction in the shrinkage and capillary pressure behaviour as shown in Figure 4.17. The settlement is also reduced and further shows a deviation opposite to that of the wax agent, CA1, as shown in Figure 4.18. This is most probably due to different reaction and transformation properties experienced during the process of creating the impermeable layer.

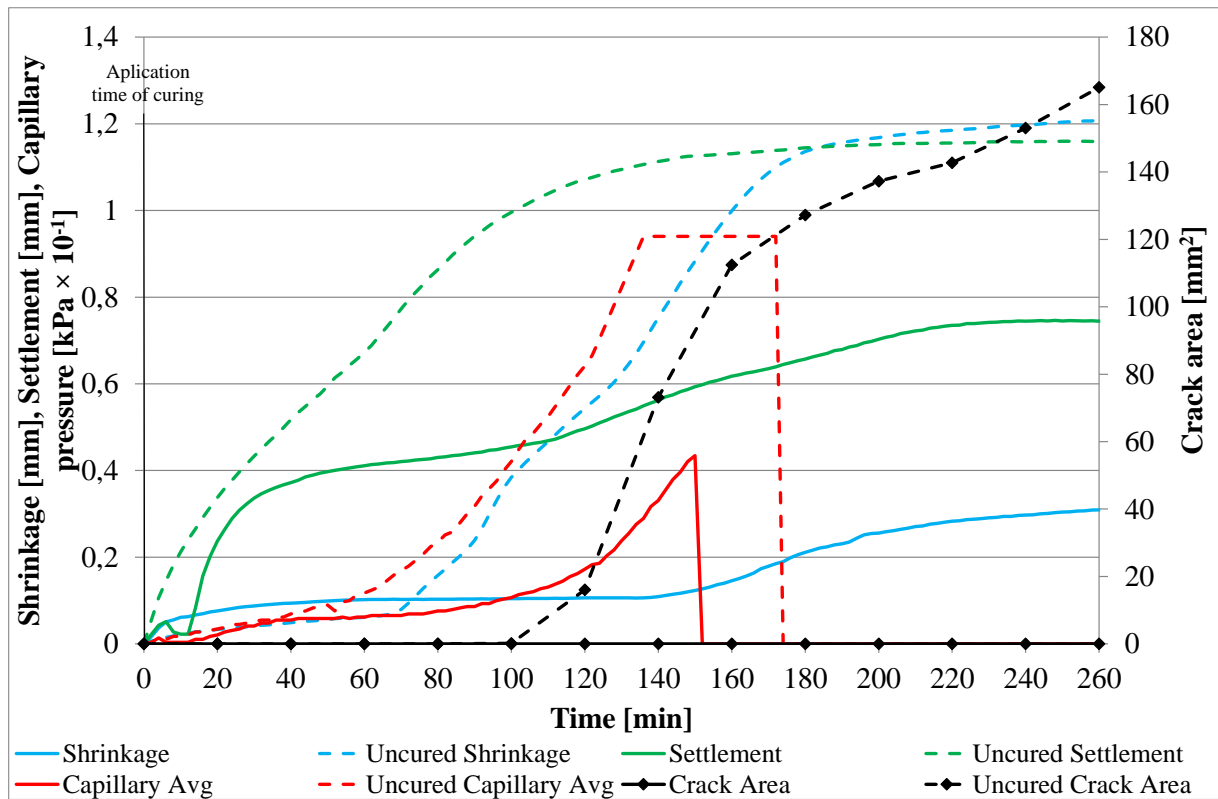


Figure 4.17: Petroleum resin-based curing agent (CA2)

The petroleum agent shows a great delay and reduction in shrinkage and capillary pressure resulting in the prevention of surface cracking. However, the prevention of surface cracking is not necessarily a complete prevention as cracking may occur internally, as shown by the internal crack observed below the surface in Figure 4.19.

The picture was taken at the end of the testing period. It is not certain when the crack occurred, but since it occurred in the plastic phase it is definitely a plastic crack. Even though no surface crack could be observed, it is still possible that the crack propagated to the surface as the curing layer may visually obscure the surface crack.

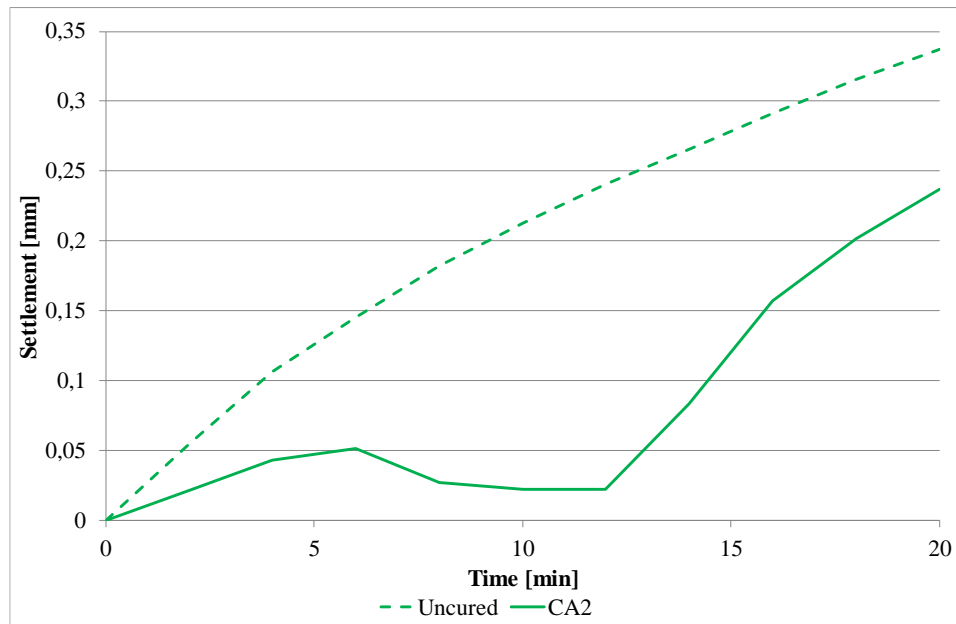


Figure 4.18: Petroleum resin-based curing agent settlement (CA2)

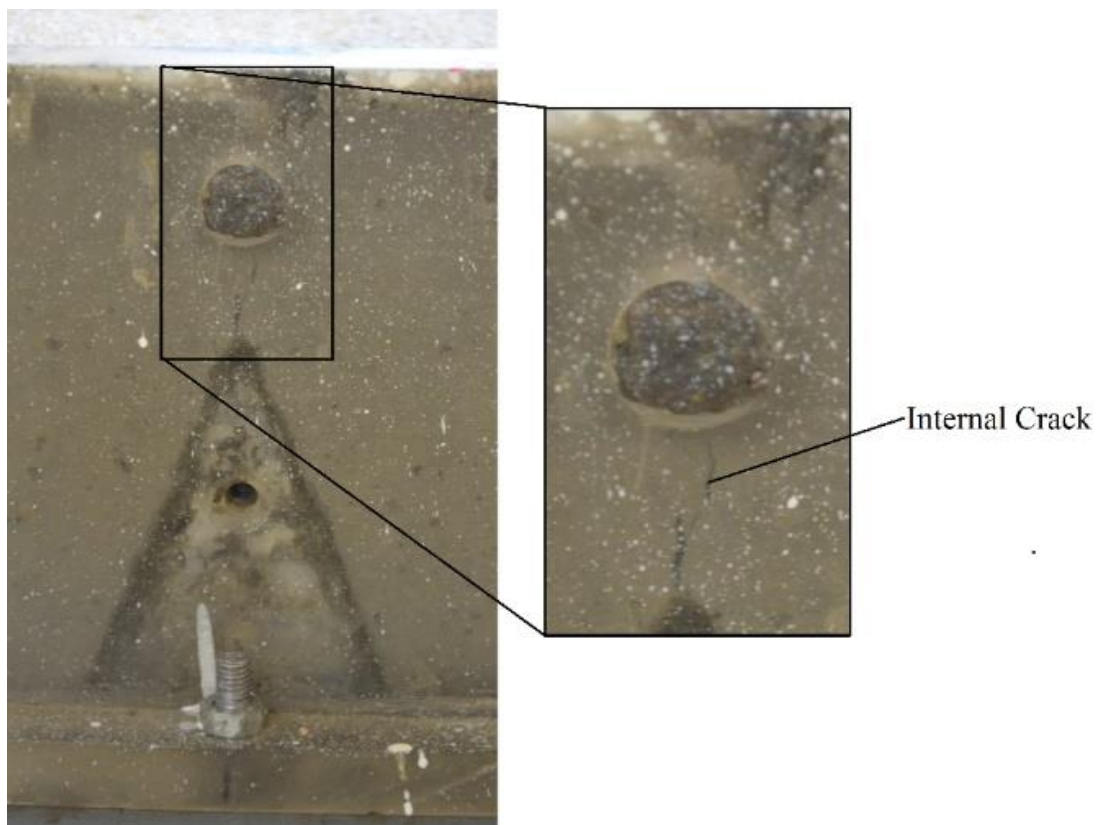


Figure 4.19: Internal crack formation of the petroleum resin-based curing agent (CA2)

The final curing agent, namely the acrylic emulsion-based agent, was applied when the concrete lost its surface water sheen as prescribed by the manufacturer. This occurred at approximately 80 minutes due to the specific ratio and materials used and the climate chosen for testing, with the results shown in Figure 4.20.

The acrylic agent's, CA3, behaviour is similar to the first agent CA1, but occurs later in the testing period as the application times differ. The test shows a lower reduction in shrinkage, settlement and capillary pressure behaviour, resulting in a lower reduction of the crack than CA1. The acrylic agent performs less effectively than some of the single water curing applications, showing that a well-planned water curing can compete with available curing products.

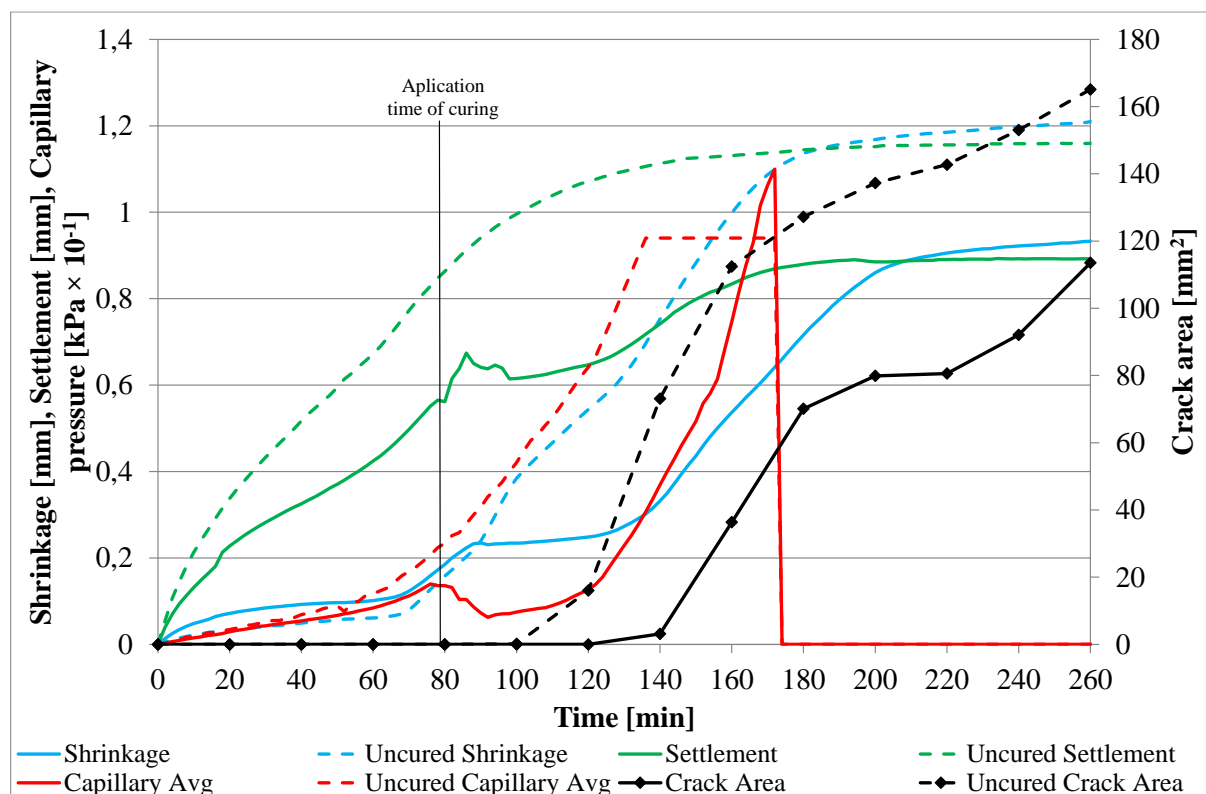


Figure 4.20: Water Acrylic emulsion-based curing agent (CA3)

#### 4.6. Evaporation of the curing agents

The effectivity of the curing agent can be assessed from the evaporation of the concrete with and without curing agents. These values can be misleading as they include the evaporation of the concrete samples and the curing agent, thus a separate set of tests was conducted to determine the loss of mass of only the curing agents due to formation of the protection layer.

Figure 4.21 therefore shows the evaporation or mass loss of the concrete as measured in the moulds in Section 3.2.5, with and without the curing agents as well as the evaporation of only the curing agents from the moulds in Section 3.2.6.

Analysing the data shows that some of the agents have a slightly higher evaporation than the uncured concrete, which suggests that the samples should reach a higher crack area than shown. However, the given evaporation includes the mass lost due to evaporation of the curing agent as well as possibly the process of creation of the impermeable layer.

This is especially seen in the petroleum resin-based curing agent, CA2, as the evaporation and mass loss is almost equivalent, thus this agent prevented most, if not all the evaporation from the concrete. The same is seen with the wax emulsion-based agent, CA1, yet the mass loss is slightly higher than the evaporation.

This is most probably due to the difference in test methods used as described in Sections 3.2.5 and 3.2.6, as the size of the standard evaporation mould is almost eight times larger than the evaporation moulds used to measure the curing agents' mass loss. The water acrylic-based agent shows the difference between a cured and uncured sample, as the evaporation follows the uncured behaviour almost perfectly up to the point where the curing agent was applied.

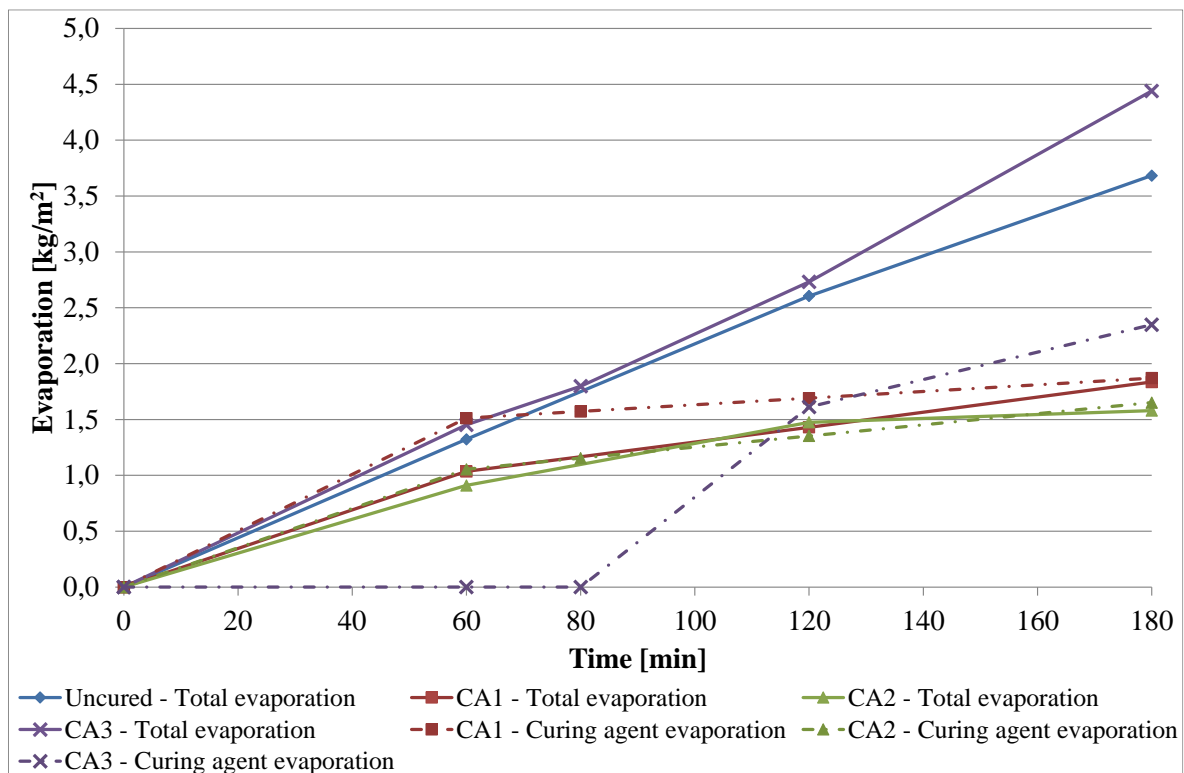


Figure 4.21: Evaporation of the samples cured using curing agents and the curing agent's loss of mass due to creation of the impermeable layer.

To more accurately predict the behaviour of the cracking of a concrete cured using these curing agents, it is possible to subtract the mass loss of the agents from the evaporation data as shown in Figure 4.22.

The figure shows that the evaporation from the cured concrete is far less prominent than the original cured concrete data, which confirms the cracking behaviour of the respective tests. As expected, the petroleum curing agent (CA2) theoretically prevents any loss of bleeding water due to evaporation, which in turn allows the bleeding water to protect the sample reducing the effects of the capillary pressure buildup, similarly seen by the wax emulsion-based curing agent. The acrylic agent shows a drastic drop in evaporation after the application of the agent. This behaviour explains the crack development of the test.

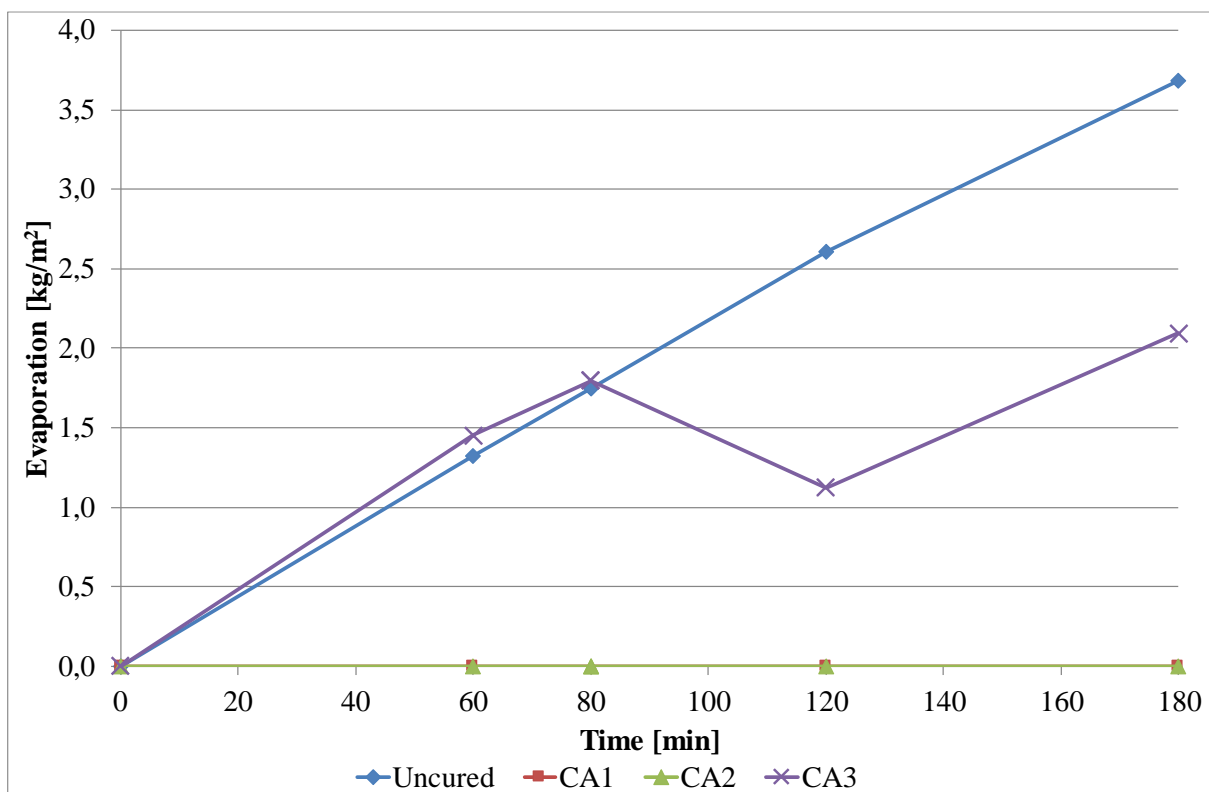


Figure 4.22: Evaporation of the cured concrete using curing agents adjusted for the loss of mass of the agents

#### 4.7. Value of curing

In general, the application of curing was observed to cause a momentary stabilisation or sudden reduction in the internal processes leading to a reduction in plastic shrinkage cracking. Single water application curing regimes, WST1 to WST5, closely followed the uncured concrete and deviated only at the point of application of curing, causing a lower shrinkage value at the end of the testing period.



WST4 registered a slightly higher final shrinkage value than the uncured result, since it showed a slightly higher rate of shrinkage growth before the application of water curing. The reduction of the internal factors, including shrinkage, settlement and capillary pressure behaviour, led to the reduction of crack development, most effectively seen in WST2.

The behaviour of the single application is further approved upon by the multiple water application curing, namely WM5I and WM5S. These tests further reduced the internal factors, leading to WM5S which succeeded in preventing surface cracking.

Similar observations can be made from the results of the curing compounds, especially the acrylic agent, CA3, which acted similar to the water curing. The curing compounds CA1 and CA2, applied immediately after placement, delayed the increase of shrinkage, settlement and capillary pressure behaviour, once again reducing the crack development. This is especially true for the petroleum-based agent which succeeded in preventing surface cracking.

A general trend that can be observed from the results is that the more the shrinkage can be delayed and therefore the later the shrinkage occurs, the lower the final shrinkage and the greater the reduction in cracking.

It is also apparent that beyond a certain shrinkage threshold, stabilisation of shrinkage by curing does not influence the final value and generally leads to an unredeemable amount of shrinkage which mostly led to plastic shrinkage cracking in this study. The value of this shrinkage threshold value is unknown and is argued to be influenced by the concrete constituents, climate and restraint.

Similar to the shrinkage data, vertical settlement also momentarily deviated from the uncured result at the point of application of curing, causing a plunge in the instruments readings. Both parameters were however observed to self-correct towards the trend of the uncured concrete but at relatively lower values as curing does not prevent the factors causing cracking, such as shrinkage, settlement and capillary pressure, but only delays them.

Settlement, shrinkage, and capillary pressure observations were further confirmed by the crack area results, shown in Figure 4.23 with the optimum of each group shown in Figure 4.25, which followed the trend set by the uncured concrete, only deviating after the application of curing irrespective of the curing type used.

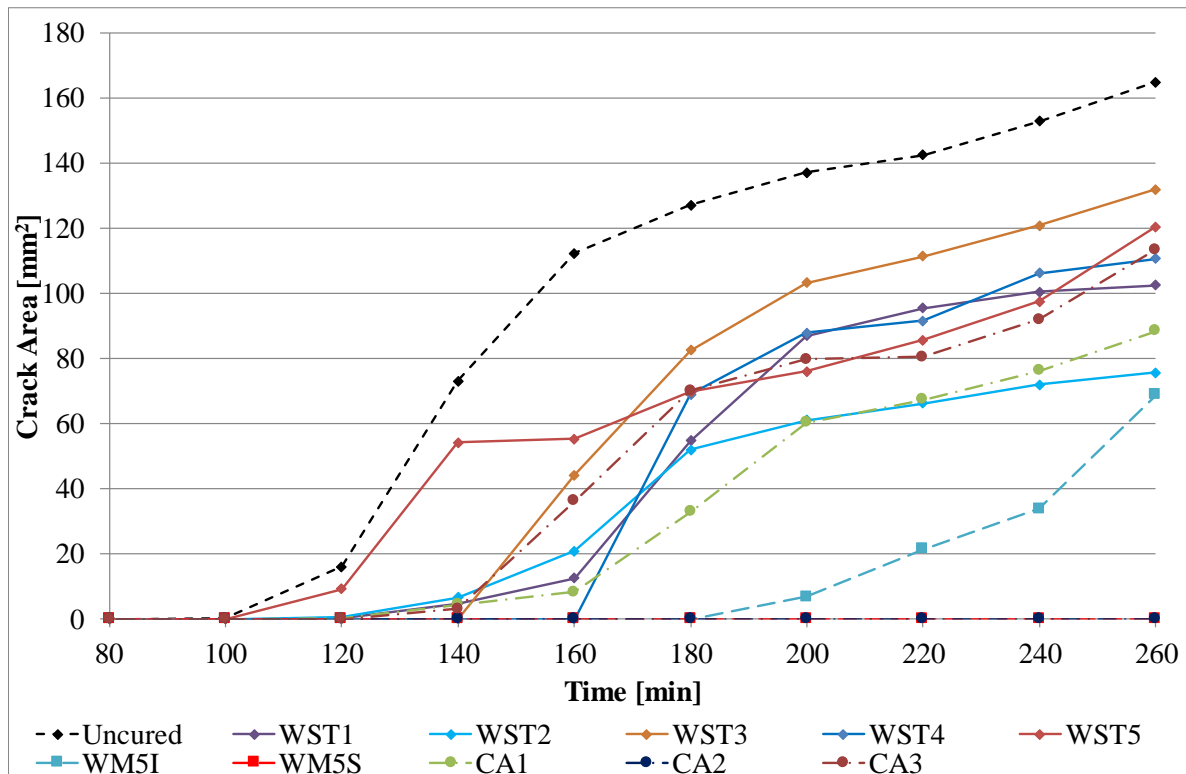


Figure 4.23: Summary of curing applications crack area

WST1, WST3, WST4 and CA2 showed lower air entry values and WST2, WST5, CA1 and CA2 had higher ones with WM5I and WM5S showing no clear air entry. As mentioned, the time of air entry does not have a significant influence, since the variability of air paths deviates arbitrarily.

Greater importance should rather be placed on the rate of pore pressure development and change thereof, as seen for CA1 which shows a long steady growth before air entry occurs. This slow increase in the rate of capillary pore pressure development has a more positive response to cracking compared to the sharp growth over a short period as seen for WST4 and WST5 as shown in Figure 4.24

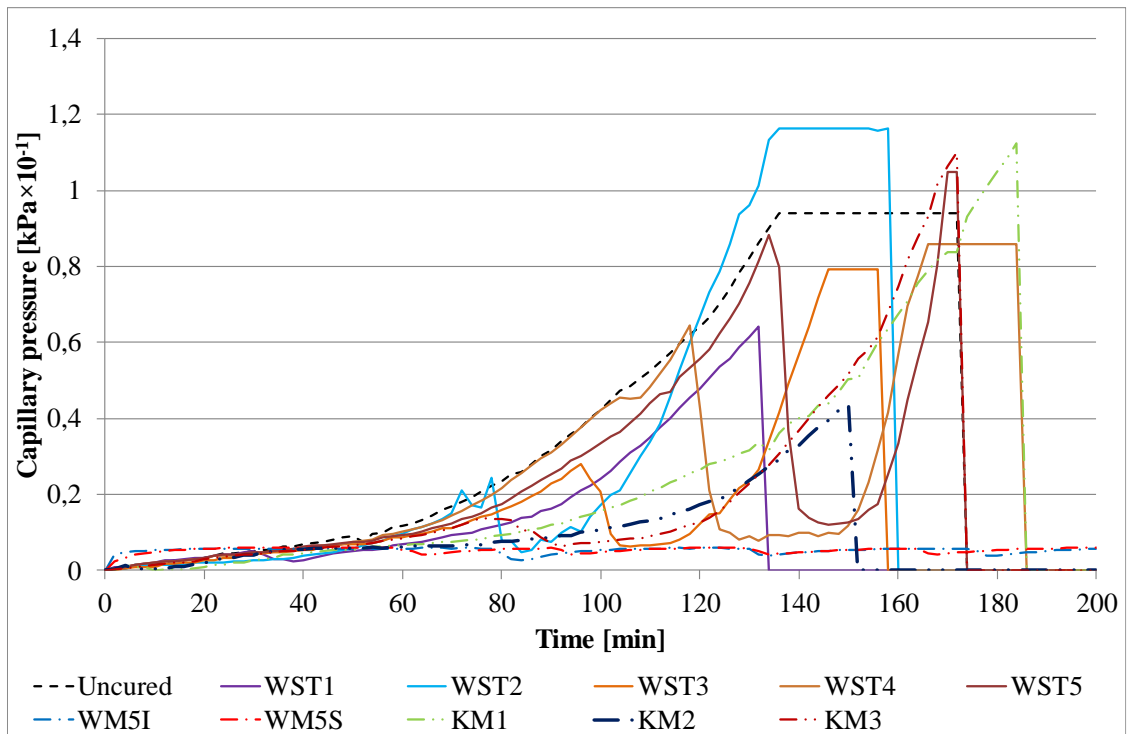


Figure 4.24: Summary of curing applications capillary pressure

Curing proved to prolong or delay the appearance of cracks when applied before the visible cracking and stabilises or lowers the cracking rate when applied after or on the appearance of cracks. This behaviour was seen for all curing tests but was dominantly shown by WM5I where cracking started approximately 80 minutes later than the uncured test.

WST5 followed the uncured test closely and stabilises for a short period after the application of curing, whereas WM5S and CA2 prevented surface cracking and completely delayed the appearance of the crack as shown in Figure 4.25.

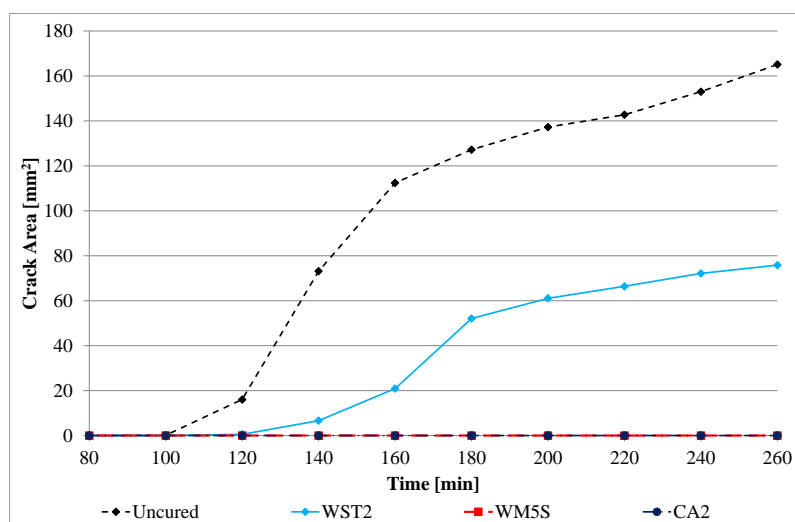


Figure 4.25: Summary of optimum curing application of each curing period or method

The curing compounds generally performed better than the water curing, with the acrylic compound, CA3, performing similar to average water curing, the wax compound, CA1, performed similar to the optimal water curing, namely WST2, while the petroleum-based compound, CA2, prevented the appearance of surface cracks.

CA1 and CA3 both conformed to water curing, prolonging the appearance and lessening the crack area, with the wax agent, CA1, having a greater influence than the acrylic agent, CA3. CA2 showed complete prevention of cracking on the surface level, however, internal cracks were observed to be formed beneath the surface. Thus, it cannot be fully concluded that CA2 completely prevented cracking.

The performance of the different curing approaches in terms of settlement, shrinkage, final crack areas, capillary buildup delay and percentage crack reduction compared to the uncured concrete is summarised and shown in Table 4.1. The analysis of the different testing types showed that curing targeting shrinkage, WST2, showed the greatest reduction for single application curing.

Multiple curing aimed to limit shrinkage, WM5S, showed the greatest reduction for multiple application curing and successfully prevented surface cracking, and the petroleum resin-based curing agent, CA2, showed the greatest reduction for curing agents and similarly prevented cracking.

*Table 4.1: Summary of curing application*

Test	Settlement	Shrinkage		Capillary	Crack area	
	reduction [%]	Delay [min]	Reduction [%]	pressure delay [min]	Delay [min]	Reduction [%]
<b>WST1</b>	18,9%	30	10,9%	-10	20	37,8%
<b>WST2</b>	18,0%	50	24,2%	50	20	54,1%
<b>WST3</b>	13,0%	70	12,6%	60	60	20,0%
<b>WST4</b>	12,6%	50	-1,2%	100	80	32,9%
<b>WST5</b>	6,4%	110	10,8%	100	20	26,9%
<b>WM5I</b>	59,8%	160	68,0%	210	60	58,3%
<b>WM5S</b>	67,5%	190	68,8%	210	160	100,0%
<b>CA1</b>	9,8%	50	43,5%	30	20	46,3%
<b>CA2</b>	35,7%	190	73,9%	50	160	100,0%
<b>CA3</b>	23,1%	70	22,9%	70	40	31,2%

The data in Table 4.1 suggests that there is a correlation between cracking and the reduction and delay of factors such as shrinkage, settlement and capillary pressure buildup. This is further investigated by plotting the reduction and delay in these factors versus cracking as shown in Figure 4.26 and Figure 4.27 respectively.

Figure 4.26 shows that there is definite correlation between the reduction of the settlement and shrinkage and the severity (size) of the final crack area. This figure shows that the greater reduction in shrinkage and settlement the smaller or less severe the crack area. The figure also shows linear trend lines and corresponding R-squared values, also known as the coefficient of determination, for settlement and shrinkage reduction.

The R-squared value for the shrinkage (0.76) is much better than that of the settlement (0.54). The gradient of the shrinkage line is also greater than the settlement, which together with the R-squared values indicate that reducing the shrinkage is more effective in reducing the cracking than reducing the settlement.

Similar correlations can be observed between the delay of significant shrinkage, capillary buildup and the appearance of cracks versus the final crack area. Similar to the reduction trends in Figure 4.26, the trends seen in Figure 4.27 have low R-squared values with the capillary buildup delay R-square value being extremely low.

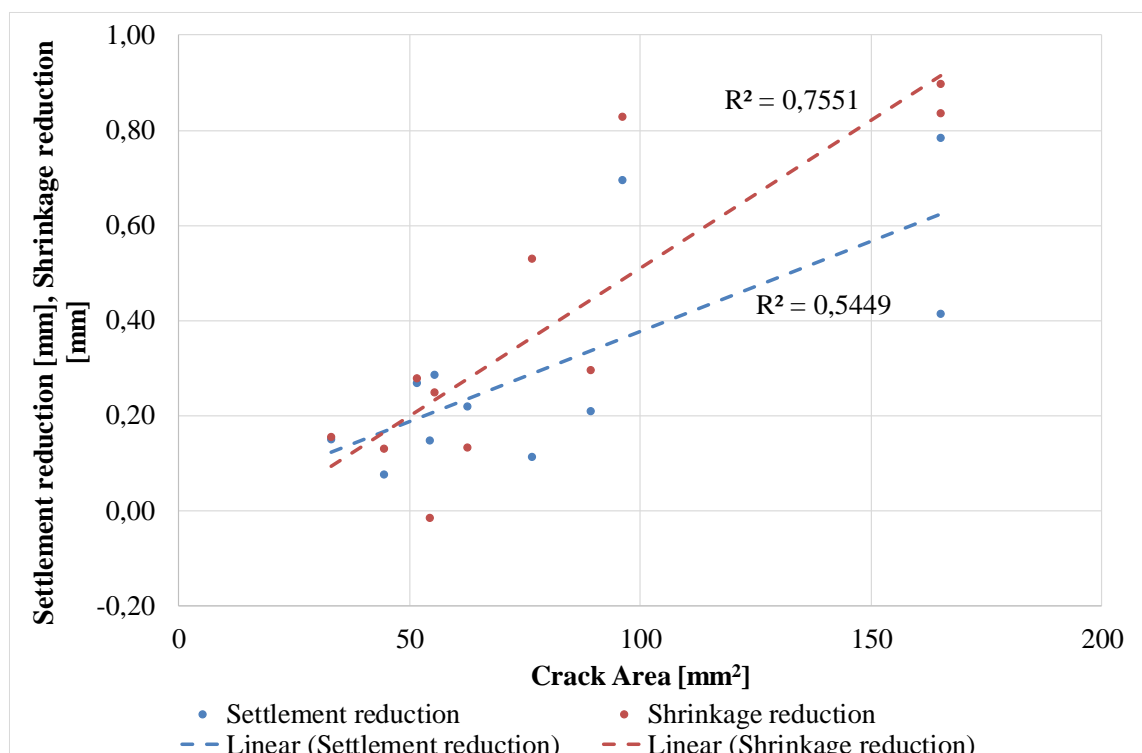


Figure 4.26: Shrinkage and settlement reduction versus final crack area.

However, Figure 4.26, still suggests that there is a correlation between the delay of especially shrinkage and the first crack appearance and the final crack size. The trend line shows that the more the shrinkage and the first crack appearance is delayed the smaller the final crack area. The results also show that the delay in capillary pressure does not have a significant effect and that more emphasis should be placed on delaying shrinkage and the first crack.

It should also be noted that the R-squared values in both Figure 4.26 and Figure 4.27 are relatively low and only serve as an indication and therefore more tests are needed to confirm the observed trends.

Finally, Figure 4.26 and Figure 4.27 show that curing has a definite influence on the internal factors investigated and the resulting cracking. The data obtained during this study further suggest that reducing and delaying shrinkage has a more prominent influence in reducing the final crack area than reducing the settlement and delaying the capillary pressure. In conclusion, any curing aimed at reducing and delaying the start of shrinkage, should be effective in reducing plastic shrinkage cracking of concrete.

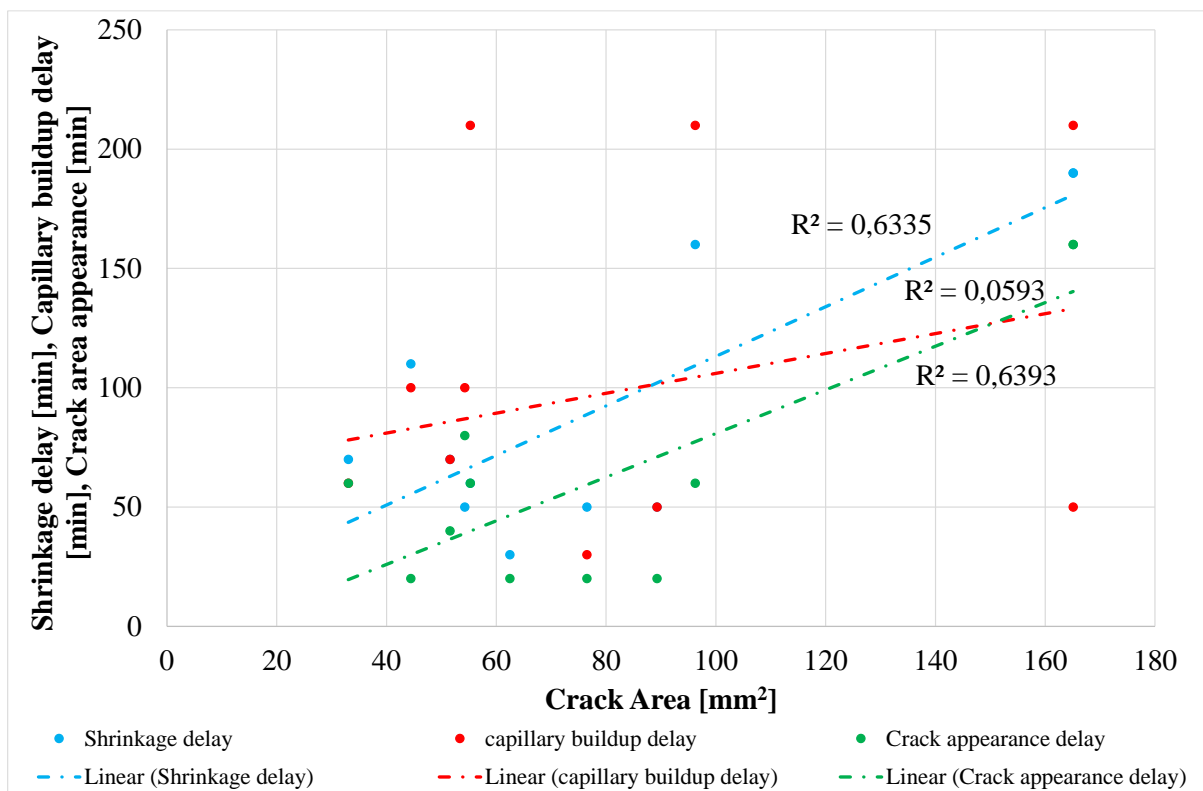


Figure 4.27: Shrinkage, capillary pressure and first crack appearance versus final crack area.

## 5. Conclusions and recommendations

The objective of this study was to determine the influence of liquid curing methods on the cracking of plastic concrete. The following significant conclusions can be drawn based on the results of this research.

- Curing was observed to have a direct impact on the fundamental internal process or factors of plastic shrinkage cracking, such as settlement, shrinkage, and capillary pressure development. Application of curing either caused a reduction in the rate of progression of plastic shrinkage phenomena or a stabilisation, eventually leading to a delay in the occurrence of plastic shrinkage cracking.
- It was evident that curing concrete during the plastic phase, irrespective of application time or curing liquid, reduced the severity of cracking. The results also revealed that complete prevention of plastic shrinkage cracking is difficult in severe conditions as used in this study, although surface cracking was prevented by curing in two of the tests.
- The optimal single curing application time of water curing was revealed to be just at the start of shrinkage and before any visible surface cracks, namely WST2, where in this study the curing at this timing led to a 54% crack size reduction.
- The results also show the importance and sensitivity of applying curing at the optimal time, and that applying curing only slightly before or after this optimal time, results in much less plastic cracking reduction, as seen in WST1 and WST3.
- Multiple water curing application, WMT5S, aimed to delay the start of shrinkage, proved successful in complete prevention of surface cracking during the testing period.
- The petroleum resin emulsion agent, CA2, showed the best crack reduction performance, completely preventing surface crack development, although there were internal cracks below the surface that developed at the point of restraint.

- The final size of the crack areas after curing was dominated by the shrinkage behaviour of the sample. Thus, the closer curing is to the start of shrinkage as seen by WST2 and WM5S, the greater effect curing will have. Similarly, the appearance of cracks can be postponed by curing the sample just before the first appearance of cracks. These effects on shrinkage and crack appearance were verified by both water curing, WT2, and curing compounds, CA1 and CA2, which greatly influenced the crack area and postponed the appearance of cracks.
- An optimum curing method can only be seen as an argumentative suggestion yet should form a good basis for most concrete applications. The argument being: If it works in severe environment, it should work in less severe environment. The optimum water curing, arguably, would be the multiple curing aimed to limit the shrinkage to as low as possible, however is not always possible to measure the shrinkage of a sample as done during the laboratory testing.
- The petroleum resin-based curing agent is also an optimum curing regime as it reduces the shrinkage more successfully than any other curing techniques used and only requires one application. However, care should be taken as careful time planning is required for the removal of the layer created by the agent.
- In conclusion the study showed that any curing aimed at reducing and delaying the start of shrinkage, should be effective in reducing plastic shrinkage cracking of concrete.

The use of these curing regimes and compounds in everyday concrete practice should prove to be effective and could even prevent plastic shrinkage cracking if applied correctly and timely. However, the use of curing compounds may require prior testing on the influence on surface finishing operations and quality, due to the thin film left on the surface of concrete. This study also revealed aspects that may hold potential for future studies, such as:

- Extension of the testing time past the fresh state limit to further investigate the crack up to the point where the crack stabilises completely.



- Investigate the influence of the curing quantity for each test time with possible quantities ranging from 10 minutes protection up to the limit of misting where it transitions into ponding.
- Vary the application time and quantity of the curing agents used to test the consequences of applying the agents in an inappropriate manner or time.
- Investigate the influence of diluting the curing agents used as a means to extend the coverage area per litre.
- Investigate the influence of curing using plastic and burlap sheeting.
- Further studies can be done to design and investigate means of capillary pressure testing on cracking tests to investigate the behaviour of the pressure buildup during crack development.
- A new method and subsequent testing equipment to measure internal cracking of concrete.
- An automated curing system targeting each of the internal processes, e.g. shrinkage, capillary pressure, settlement and crack development.

## 6. References

- ACI 224R-80 (1984) 'Control of Cracking in Concrete Structures'. doi: 10.3151/coj1975.34.8\_13.
- ACI 305.1-06 (2007) 'Specification for Hot Weather Concreting', *Farmington Hills: American Concrete Institute*.
- ACI 308R (2001) 'Guide to Curing Concrete', *Farmington Hills: American Concrete Institute*.
- Al-Gahtani, A. S. (2010) 'Effect of curing methods on the properties of plain and blended cement concretes', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 24(3), pp. 308–314. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.036.
- Almusallam, A. A., Maslehuddin, M., *et al.* (1998) 'Effects of mix proportions on plastic shrinkage cracking of concrete in hot environments'.
- ASTM C 232 (2004) 'Standard Test Methods for Bleed of Concrete'.
- ASTM C1579 (2013) 'Standard test method for evaluating plastic shrinkage cracking of restrained fiber reinforced concrete (using a steel form insert', *American Society for Testing and Materials*.
- ASTM C171 (2016) 'Standard specification for sheet materials for curing concrete', *ASTM International*, i, pp. 1–2. doi: 10.1520/C0171-07.2.
- Boshoff, W. P. and Combrinck, R. (2013) 'Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete'.
- Cement concrete & aggregate Australia (2006) 'Curing of concrete'.
- Cepuritis, R., Jacobsen, S., *et al.* (2017) 'Influence of crushed aggregate fines with micro-proportioned particle size distributions on rheology of cement paste', *Cement and Concrete Composites*. Elsevier Ltd, 80, pp. 64–79. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.02.012.
- Chryso (2019) 'Curing agent data sheets', p. 2019.
- Cohen, M. D., Olek, J., *et al.* (1989) 'Mechanism of Plastic shrinkage cracking in Portland Cement and Portland Cement-Silica Fume Paste and Mortar'.
- Combrinck, R. (2012) 'Plastic shrinkage cracking in conventional and low volume fibre reinforced concrete', (March). Available at: <http://scholar.sun.ac.za/handle/10019.1/6572>.

- Combrinck, R. (2016) ‘Cracking of Plastic Concrete in Slab-Like Elements’, (March).
- Combrinck, R., Kayondo, M., *et al.* (2019) ‘Effect of various liquid admixtures on cracking of plastic concrete’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 202, pp. 139–153. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.060.
- Combrinck, R. and Boshoff, W. P. (2012) ‘Typical plastic shrinkage cracking behaviour of concrete’.
- Combrinck, R. and Boshoff, W. P. (2013) ‘Typical plastic shrinkage cracking behaviour of concrete’.
- Combrinck, R. and Boshoff, W. P. (2019) ‘Tensile properties of plastic concrete and the influence of temperature and cyclic loading’, *Cement and Concrete Composites*, 97(March 2017), pp. 300–311. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.01.002.
- Combrinck, R., Steyl, L., *et al.* (2018) ‘Interaction between settlement and shrinkage cracking in plastic concrete’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 185, pp. 1–11. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.028.
- Emeritus, T. (1990) ‘Cement chemistry’.
- Ghourchian, S., Wyrzykowski, M., *et al.* (2016) ‘The bleeding test: A simple method for obtaining the permeability and bulk modulus of fresh concrete’.
- <https://www.youtube.com/user/WarunaThejana> (2018) *Civil Engineering BITZ!*
- Jin, H., Guohua, J., *et al.* (2014) ‘Influence of early-age moist curing time on the late-age properties of concretes with different binders’, 21(December), pp. 677–682.
- Jones, M. R. and Mccarthy, A. (2006) ‘Heat of hydration in foamed concrete : Effect of mix constituents and plastic density’, 36, pp. 1032–1041. doi: 10.1016/j.cemconres.2006.01.011.
- Josserand, J. and de Larrard, F. (2004) ‘A method for concrete bleeding measurement’, *Materials and Structures*, 37(December), pp. 666–670.
- Khan, M. Y. (2018) ‘The tensile material properties of plastic concrete and the influence on plastic cracking’, (March).
- Kosmatka, S. and Wilson, M. (2002) ‘Design and Control of Concrete Mixtures’, (69973).
- Krönlof, A., Leivo, M., *et al.* (1995) ‘Experimental study on the basic phenomena of shrinkage

and cracking of fresh mortar’.

Kwak, H.-G. and Ha, S. (2006) ‘Plastic shrinkage cracking in concrete slabs, Part I: A numerical model’.

Kwak, H. G. and Ha, S. J. (2008) ‘Bleeding and evaporation in concrete slabs with sequential placement’, *Magazine of Concrete Research*, 60(10), pp. 769–783. doi: 10.1680/macr.2008.60.10.769.

Leemann, A., Nygaard, P., *et al.* (2013) ‘Impact of admixtures on th plastic shrinkage cracking of self-compaction concrete’.

Lura, P., Pease, B., *et al.* (2007) ‘Influence of shrinkage-reducing admixtures on the development of plastic shrinkage cracks’.

Makarieva, A., Gorshkov, V., *et al.* (2010) ‘Where do winds come from ? A new theory on how water vapor condensation influences atmospheric pressure and dynamics’, (April). doi: 10.5194/acp-13-1039-2013.

McCarter, W. J., Chrisp, T. M., *et al.* (2012) ‘Setting, hardening and moisture-loss within a cement-based backfill grout under simulated repository environments’, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. Elsevier Ltd, 45(3), pp. 235–242. doi: 10.1016/j.measurement.2011.12.014.

Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M. (2006) *Concrete microstructure, properties and materials*.

Merriam-Webster (2016) ‘Merriam-Webster dictionary’.

Mora-Ruacho, J., Gettu, R., *et al.* (2008) ‘Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete’.

Olivier, G., Combrinck, R., *et al.* (2018) ‘Combined effect of nano-silica, super absorbent polymers, and synthetic fibres on plastic shrinkage cracking in concrete.pdf’.

Otieno, M. B., Alexander, M. G., *et al.* (2010) ‘Corrosion in cracked and uncracked concrete – influence of crack width , concrete quality and crack reopening’, 9831(6), pp. 393–404. doi: 10.1680/macr.2010.62.6.393.

Penttala, V. (2015) ‘MECHANISM OF INTERNAL FREEZE-THAW DAMAGE IN CONCRETE MECHANISM OF INTERNAL FREEZE-THAW DAMAGE IN’, (December 2007).

- Powers, T. C. (1968) 'The Properties of Fresh Concrete'.
- Qi, C. (2003) 'Quantitative assessment of plastic shrinkage cracking and its effect on the corrosion of steel reinforcement'.
- Le Roux, B. D. (2014) 'Influence of admixtures on the early age plastic cracking of concrete', (March), pp. 1–58.
- SANS 3001-CO3-1 (2015) 'SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD Civil engineering test methods Part CO3-1 : Concrete durability index testing — Preparation of test specimens'.
- SANS 50196-3 (2006) 'SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD Methods of testing cement Part 3 : Determination of setting times and soundness', pp. 1–5.
- SANS 5862-1 (2006) 'SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD Concrete tests — Consistence of freshly mixed concrete — Slump test'.
- SANS 5863 (2006) 'SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD Concrete tests — Compressive strength of hardened concrete', pp. 2–6.
- Sant, G., Angeles, L., *et al.* (2009) 'Detecting the Fluid-to-Solid Transition in Cement Pastes', (June).
- Schmidt, M. and Slowik, V. (2009) 'Capillary shrinkage cracking and its prevention by controlled concrete curing', (1), pp. 1–8.
- Slowik, V., Hubner, T., *et al.* (2009) 'Simulation of Capillary shrinkage cracking in cement-like materials'.
- Slowik, V., Schlattner, E., *et al.* (2004) 'Experimental investigation into early age shrinkage of cement paste by using fibre Bragg gratings', 26, pp. 473–479. doi: 10.1016/S0958-9465(03)00077-5.
- Slowik, V., Schmidt, M., *et al.* (2008) 'Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value'.
- Sonebi, M., Cevik, A., *et al.* (2016) 'Modelling the fresh properties of self-compacting concrete using support vector machine approach', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 106, pp. 55–64. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.035.
- Steyl, L. (2016) 'Plastic cracking of concrete and the effect of depth', *Stellenbosch: The University of Stellenbosch. (MSc thesis)*, (December).

Uno, P. J. (1998) 'Plastic Shrinkage Cracking and Evaporation Formulas', (July 1998).

Wittmann, F. H. (1975) 'On the action of Capillary Pressure in Fresh Concrete'.

Wyrzykowski, M., Trtik, P., *et al.* (2015) 'Cement and Concrete Research Plastic shrinkage of mortars with shrinkage reducing admixture and lightweight aggregates studied by neutron tomography', *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 73, pp. 238–245. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.03.013.

Yim, H. J., Kim, J. H., *et al.* (2013) 'Evaluation of internal bleeding in concrete using self-weight bleeding test'.

## A. Appendix A: Uncured

Table A.1: Crack area of uncured sample

Sample	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0,90	23,06	108,51	154,98	178,16	178,76	179,35	194,25	205,70
2	0	0	0	0	0	1,80	2,10	24,10	54,92	86,67	87,85	89,02	90,08	91,63
3	0	0	0	0	0	0	0	1,80	90,25	131,19	147,68	147,91	160,96	165,66
4	0	0	0	0	0	0	0	57,91	94,43	113,97	114,16	125,76	130,31	160,50
5	0	0	0	0	0	0	0	81,42	111,77	117,35	149,66	161,77	169,27	176,08
6	0	0	0	0	0	0	0	71,21	93,78	99,89	98,73	104,63	127,50	130,28
7	0	0	0	0	0	0	31,30	93,20	110,68	111,25	123,74	125,26	130,08	151,32
8	0	0	0	0	0	0	59,37	103,26	137,46	143,07	153,54	160,35	165,66	174,32
AVG	0	0	0	0	0	0,34	14,48	67,68	106,03	122,69	131,76	136,76	146,01	156,94
STD	0	0	0	0	0	0,63	20,50	35,57	28,69	26,50	28,83	28,91	30,51	31,90

Table A.2: Capillary pressure of uncured sample

Min	1	2	AVG
0	0	0	0
10	0,02	0,03	0,03
20	0,04	0,06	0,05
30	0,06	0,09	0,08
40	0,08	0,12	0,10
50	0,09	0,17	0,13
60	0,12	0,22	0,17
70	0,18	0,31	0,25
80	0,26	0,42	0,34
90	0,37	0,55	0,46
100	0,51	0,71	0,61
110	0,63	0,89	0,76
120	0,81	1,05	0,93
130	1,08	0	1,19
140	1,44	0	1,36
150	1,65	0	1,36
160	1,65	0	1,36
170	1,65	0	1,36
180	0	0	0
190	0	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0

Table A.3: Shrinkage and settlement of the uncured sample

Min	Settlement						Min	Shrinkage				
	1	2	3	4	AVG	STD		1	2	3	AVG	STD
0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,09	0,11	0,12	0,11	<b>0,11</b>	<b>0,01</b>	5	0,01	0,01	0,02	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
10	0,20	0,16	0,26	0,23	<b>0,21</b>	<b>0,04</b>	10	0,02	0,02	0,03	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
15	0,25	0,19	0,34	0,29	<b>0,27</b>	<b>0,05</b>	15	0,02	0,02	0,04	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>
20	0,31	0,22	0,43	0,39	<b>0,34</b>	<b>0,08</b>	20	0,03	0,03	0,05	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>
25	0,35	0,24	0,48	0,44	<b>0,38</b>	<b>0,09</b>	25	0,03	0,03	0,05	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>
30	0,40	0,26	0,55	0,52	<b>0,43</b>	<b>0,11</b>	30	0,04	0,03	0,05	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>
35	0,43	0,28	0,59	0,57	<b>0,47</b>	<b>0,13</b>	35	0,04	0,03	0,06	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>
40	0,47	0,30	0,64	0,66	<b>0,52</b>	<b>0,14</b>	40	0,05	0,04	0,06	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>
45	0,51	0,32	0,66	0,71	<b>0,55</b>	<b>0,15</b>	45	0,05	0,04	0,07	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>
50	0,57	0,34	0,69	0,79	<b>0,59</b>	<b>0,17</b>	50	0,05	0,04	0,07	<b>0,06</b>	<b>0,01</b>
55	0,62	0,36	0,70	0,83	<b>0,63</b>	<b>0,17</b>	55	0,06	0,04	0,08	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
60	0,67	0,39	0,73	0,90	<b>0,67</b>	<b>0,18</b>	60	0,06	0,04	0,08	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
65	0,71	0,42	0,76	0,95	<b>0,71</b>	<b>0,19</b>	65	0,06	0,04	0,09	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
70	0,77	0,46	0,84	1,03	<b>0,77</b>	<b>0,21</b>	70	0,08	0,04	0,12	<b>0,08</b>	<b>0,03</b>
75	0,81	0,47	0,89	1,08	<b>0,81</b>	<b>0,22</b>	75	0,10	0,04	0,19	<b>0,11</b>	<b>0,06</b>
80	0,85	0,50	0,98	1,12	<b>0,86</b>	<b>0,23</b>	80	0,14	0,04	0,29	<b>0,16</b>	<b>0,10</b>
85	0,88	0,52	1,04	1,14	<b>0,90</b>	<b>0,24</b>	85	0,17	0,04	0,35	<b>0,19</b>	<b>0,13</b>
90	0,92	0,55	1,13	1,17	<b>0,94</b>	<b>0,24</b>	90	0,22	0,06	0,43	<b>0,24</b>	<b>0,15</b>
95	0,93	0,57	1,17	1,19	<b>0,97</b>	<b>0,25</b>	95	0,28	0,12	0,50	<b>0,30</b>	<b>0,16</b>
100	0,96	0,59	1,23	1,21	<b>1,00</b>	<b>0,26</b>	100	0,35	0,20	0,60	<b>0,38</b>	<b>0,16</b>
105	0,97	0,60	1,25	1,23	<b>1,01</b>	<b>0,26</b>	105	0,39	0,24	0,63	<b>0,42</b>	<b>0,16</b>
110	1,00	0,62	1,27	1,26	<b>1,04</b>	<b>0,26</b>	110	0,44	0,29	0,67	<b>0,47</b>	<b>0,16</b>
115	1,02	0,64	1,29	1,27	<b>1,05</b>	<b>0,26</b>	115	0,47	0,33	0,70	<b>0,50</b>	<b>0,15</b>
120	1,04	0,65	1,31	1,28	<b>1,07</b>	<b>0,26</b>	120	0,52	0,37	0,74	<b>0,54</b>	<b>0,15</b>
125	1,04	0,67	1,32	1,30	<b>1,08</b>	<b>0,27</b>	125	0,56	0,40	0,76	<b>0,57</b>	<b>0,15</b>
130	1,04	0,69	1,35	1,31	<b>1,09</b>	<b>0,26</b>	130	0,61	0,45	0,81	<b>0,62</b>	<b>0,15</b>
135	1,04	0,70	1,36	1,32	<b>1,10</b>	<b>0,27</b>	135	0,66	0,49	0,86	<b>0,67</b>	<b>0,15</b>
140	1,04	0,71	1,39	1,32	<b>1,11</b>	<b>0,27</b>	140	0,74	0,56	0,95	<b>0,75</b>	<b>0,16</b>
145	1,04	0,71	1,41	1,32	<b>1,12</b>	<b>0,27</b>	145	0,79	0,62	1,01	<b>0,80</b>	<b>0,16</b>
150	1,05	0,71	1,43	1,31	<b>1,13</b>	<b>0,27</b>	150	0,88	0,70	1,07	<b>0,88</b>	<b>0,15</b>
155	1,06	0,72	1,43	1,31	<b>1,13</b>	<b>0,27</b>	155	0,94	0,75	1,11	<b>0,93</b>	<b>0,14</b>
160	1,07	0,72	1,43	1,31	<b>1,13</b>	<b>0,27</b>	160	1,01	0,83	1,16	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>
165	1,07	0,73	1,43	1,31	<b>1,13</b>	<b>0,27</b>	165	1,05	0,88	1,19	<b>1,04</b>	<b>0,12</b>
170	1,08	0,74	1,43	1,31	<b>1,14</b>	<b>0,26</b>	170	1,10	0,95	1,21	<b>1,09</b>	<b>0,11</b>
175	1,08	0,74	1,43	1,31	<b>1,14</b>	<b>0,26</b>	175	1,12	0,99	1,22	<b>1,11</b>	<b>0,09</b>
180	1,08	0,75	1,44	1,31	<b>1,14</b>	<b>0,26</b>	180	1,13	1,04	1,23	<b>1,14</b>	<b>0,08</b>
185	1,08	0,75	1,44	1,31	<b>1,15</b>	<b>0,26</b>	185	1,14	1,06	1,24	<b>1,15</b>	<b>0,07</b>
190	1,08	0,75	1,45	1,31	<b>1,15</b>	<b>0,26</b>	190	1,15	1,08	1,24	<b>1,16</b>	<b>0,07</b>
195	1,08	0,76	1,45	1,31	<b>1,15</b>	<b>0,26</b>	195	1,16	1,08	1,25	<b>1,16</b>	<b>0,07</b>
200	1,08	0,76	1,46	1,31	<b>1,15</b>	<b>0,26</b>	200	1,16	1,09	1,25	<b>1,17</b>	<b>0,07</b>
205	1,08	0,76	1,46	1,31	<b>1,15</b>	<b>0,26</b>	205	1,17	1,10	1,26	<b>1,17</b>	<b>0,06</b>
210	1,08	0,76	1,46	1,31	<b>1,15</b>	<b>0,26</b>	210	1,18	1,10	1,26	<b>1,18</b>	<b>0,06</b>
215	1,08	0,77	1,46	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	215	1,18	1,11	1,26	<b>1,18</b>	<b>0,06</b>
220	1,08	0,77	1,46	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	220	1,18	1,11	1,26	<b>1,19</b>	<b>0,06</b>
225	1,08	0,77	1,46	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	225	1,19	1,11	1,27	<b>1,19</b>	<b>0,06</b>
230	1,08	0,77	1,47	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	230	1,19	1,12	1,27	<b>1,19</b>	<b>0,06</b>
235	1,08	0,77	1,47	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	235	1,19	1,12	1,27	<b>1,20</b>	<b>0,06</b>
240	1,08	0,77	1,47	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	240	1,20	1,12	1,27	<b>1,20</b>	<b>0,06</b>
245	1,08	0,77	1,47	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	245	1,20	1,13	1,27	<b>1,20</b>	<b>0,06</b>
250	1,08	0,78	1,47	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	250	1,20	1,13	1,28	<b>1,20</b>	<b>0,06</b>
255	1,08	0,77	1,47	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	255	1,21	1,13	1,28	<b>1,21</b>	<b>0,06</b>
260	1,08	0,77	1,47	1,31	<b>1,16</b>	<b>0,26</b>	260	1,21	1,13	1,29	<b>1,21</b>	<b>0,06</b>



## B. Appendix B: WST1

Table B.1: Crack area of WST1

Sample	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	10,7	62,3723	85,3048	97,6106	100,124	102,6373
2	0	0	0	0	0	0	0,8	18,2	36,604	68,4672	96,6264	102,6264	103,9264	105,2264
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1,1	24,8233	65,4879	74,0963	82,7047	83,8
4	0	0	0	0	0	0	0	1,3	1,9	63,912	101,032	108,304	115,576	118,82
AVG	0	0	0	0	0	0	0,20	4,88	12,58	54,89	87,11	95,66	100,58	102,62
STD	0	0	0	0	0	0	0,35	7,71	14,37	17,51	13,74	13,01	11,79	12,48

Table B.2: Capillary pressure of WST1

Min	1	2	AVG
0	0	0	0
10	0,02	0,04	0,03
20	0,04	0,06	0,05
30	0,06	0,09	0,08
40	0,04	0,04	0,04
50	0,07	0,08	0,08
60	0,08	0,12	0,10
70	0,10	0,17	0,14
80	0,14	0,21	0,18
90	0,20	0,27	0,24
100	0,31	0,39	0,35
110	0,46	0,55	0,51
120	0,67	0,72	0,70
130	0	0,95	0,89
140	0	0	0
150	0	0	0
160	0	0	0
170	0	0	0
180	0	0	0
190	0	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0

Table B.3: Shrinkage and settlement of WSTI

Min	Settlement						Min	Shrinkage					
	1	2	3	4	AVG	STD		1	2	3	4	AVG	STD
0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,06	0,05	0,01	0,04	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	5	0,00	0,01	0,04	0,02	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
10	0,13	0,12	0,01	0,10	<b>0,09</b>	<b>0,05</b>	10	0,01	0,02	0,07	0,04	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>
15	0,18	0,17	0,03	0,20	<b>0,14</b>	<b>0,07</b>	15	0,01	0,03	0,07	0,04	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>
20	0,23	0,24	0,09	0,23	<b>0,20</b>	<b>0,06</b>	20	0,00	0,03	0,08	0,05	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>
25	0,26	0,28	0,14	0,23	<b>0,23</b>	<b>0,06</b>	25	0,00	0,04	0,08	0,06	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>
30	0,32	0,35	0,21	0,25	<b>0,28</b>	<b>0,05</b>	30	0,00	0,04	0,08	0,06	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>
35	0,31	0,13	0,28	0,36	<b>0,27</b>	<b>0,09</b>	35	0,01	0,05	0,08	0,07	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>
40	0,21	0,18	0,36	0,18	<b>0,23</b>	<b>0,07</b>	40	0,01	0,05	0,09	0,07	<b>0,06</b>	<b>0,03</b>
45	0,30	0,21	0,33	0,23	<b>0,27</b>	<b>0,05</b>	45	0,02	0,05	0,09	0,08	<b>0,06</b>	<b>0,03</b>
50	0,37	0,24	0,33	0,35	<b>0,32</b>	<b>0,05</b>	50	0,02	0,05	0,10	0,08	<b>0,06</b>	<b>0,03</b>
55	0,42	0,34	0,33	0,36	<b>0,36</b>	<b>0,04</b>	55	0,03	0,06	0,10	0,08	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>
60	0,50	0,40	0,33	0,36	<b>0,40</b>	<b>0,06</b>	60	0,04	0,06	0,10	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>
65	0,51	0,41	0,33	0,36	<b>0,40</b>	<b>0,07</b>	65	0,05	0,06	0,10	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
70	0,52	0,41	0,37	0,36	<b>0,42</b>	<b>0,07</b>	70	0,06	0,06	0,10	0,09	<b>0,08</b>	<b>0,02</b>
75	0,53	0,41	0,40	0,36	<b>0,42</b>	<b>0,06</b>	75	0,06	0,06	0,10	0,09	<b>0,08</b>	<b>0,02</b>
80	0,54	0,42	0,44	0,36	<b>0,44</b>	<b>0,07</b>	80	0,06	0,05	0,10	0,09	<b>0,08</b>	<b>0,02</b>
85	0,56	0,46	0,48	0,36	<b>0,47</b>	<b>0,07</b>	85	0,06	0,05	0,09	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
90	0,61	0,54	0,54	0,39	<b>0,52</b>	<b>0,08</b>	90	0,07	0,05	0,08	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
95	0,65	0,60	0,59	0,42	<b>0,57</b>	<b>0,09</b>	95	0,07	0,04	0,07	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
100	0,70	0,69	0,69	0,47	<b>0,64</b>	<b>0,10</b>	100	0,06	0,04	0,06	0,08	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
105	0,72	0,74	0,75	0,50	<b>0,68</b>	<b>0,10</b>	105	0,12	0,04	0,05	0,08	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>
110	0,76	0,77	0,81	0,55	<b>0,72</b>	<b>0,10</b>	110	0,23	0,07	0,18	0,11	<b>0,15</b>	<b>0,06</b>
115	0,78	0,80	0,84	0,58	<b>0,75</b>	<b>0,10</b>	115	0,30	0,12	0,28	0,16	<b>0,22</b>	<b>0,08</b>
120	0,81	0,82	0,88	0,62	<b>0,78</b>	<b>0,10</b>	120	0,39	0,21	0,39	0,25	<b>0,31</b>	<b>0,08</b>
125	0,83	0,84	0,92	0,64	<b>0,81</b>	<b>0,10</b>	125	0,44	0,26	0,44	0,34	<b>0,37</b>	<b>0,08</b>
130	0,85	0,86	0,96	0,67	<b>0,84</b>	<b>0,11</b>	130	0,50	0,31	0,48	0,44	<b>0,43</b>	<b>0,07</b>
135	0,86	0,88	0,99	0,69	<b>0,86</b>	<b>0,11</b>	135	0,53	0,34	0,52	0,48	<b>0,47</b>	<b>0,08</b>
140	0,89	0,90	1,03	0,72	<b>0,89</b>	<b>0,11</b>	140	0,60	0,41	0,58	0,54	<b>0,53</b>	<b>0,08</b>
145	0,90	0,92	1,05	0,73	<b>0,90</b>	<b>0,11</b>	145	0,65	0,45	0,63	0,58	<b>0,58</b>	<b>0,08</b>
150	0,92	0,94	1,07	0,76	<b>0,92</b>	<b>0,11</b>	150	0,78	0,52	0,71	0,65	<b>0,66</b>	<b>0,09</b>
155	0,93	0,96	1,07	0,77	<b>0,93</b>	<b>0,11</b>	155	0,83	0,57	0,76	0,70	<b>0,71</b>	<b>0,09</b>
160	0,94	0,96	1,07	0,78	<b>0,94</b>	<b>0,10</b>	160	0,90	0,65	0,84	0,77	<b>0,79</b>	<b>0,09</b>
165	0,92	0,96	1,07	0,78	<b>0,93</b>	<b>0,10</b>	165	0,95	0,72	0,88	0,82	<b>0,84</b>	<b>0,09</b>
170	0,90	0,93	1,09	0,78	<b>0,92</b>	<b>0,11</b>	170	1,04	0,81	0,94	0,89	<b>0,92</b>	<b>0,08</b>
175	0,90	0,93	1,10	0,78	<b>0,93</b>	<b>0,11</b>	175	1,08	0,86	0,97	0,94	<b>0,96</b>	<b>0,08</b>
180	0,90	0,93	1,11	0,78	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	180	1,12	0,90	0,99	0,99	<b>1,00</b>	<b>0,08</b>
185	0,90	0,94	1,11	0,78	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	185	1,14	0,91	0,99	1,00	<b>1,01</b>	<b>0,08</b>
190	0,90	0,94	1,11	0,78	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	190	1,16	0,93	1,00	1,01	<b>1,02</b>	<b>0,08</b>
195	0,90	0,94	1,12	0,78	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	195	1,16	0,93	1,00	1,02	<b>1,03</b>	<b>0,08</b>
200	0,90	0,94	1,12	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	200	1,17	0,94	1,01	1,03	<b>1,04</b>	<b>0,08</b>
205	0,90	0,94	1,12	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	205	1,18	0,95	1,01	1,03	<b>1,04</b>	<b>0,08</b>
210	0,90	0,94	1,12	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	210	1,18	0,95	1,02	1,04	<b>1,05</b>	<b>0,08</b>
215	0,90	0,94	1,12	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	215	1,19	0,96	1,02	1,04	<b>1,05</b>	<b>0,08</b>
220	0,90	0,94	1,12	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	220	1,19	0,96	1,02	1,04	<b>1,05</b>	<b>0,08</b>
225	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	225	1,19	0,97	1,03	1,05	<b>1,06</b>	<b>0,08</b>
230	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	230	1,20	0,97	1,03	1,05	<b>1,06</b>	<b>0,08</b>
235	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	235	1,20	0,97	1,03	1,05	<b>1,06</b>	<b>0,08</b>
240	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	240	1,20	0,98	1,03	1,05	<b>1,07</b>	<b>0,08</b>
245	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	245	1,20	0,98	1,03	1,06	<b>1,07</b>	<b>0,08</b>
250	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	250	1,21	0,98	1,03	1,06	<b>1,07</b>	<b>0,08</b>
255	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	255	1,21	0,98	1,04	1,06	<b>1,07</b>	<b>0,08</b>
260	0,90	0,94	1,13	0,79	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	260	1,21	0,99	1,04	1,06	<b>1,08</b>	<b>0,08</b>

## C. Appendix C: WST2

Table C.1: Crack area of WST2

Sample	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	8,3	37,2318	42,5318	55,662	68,9144	70,3318
2	0	0	0	0	0	0	0,7	11,4	30,8126	63,3025	78,3336	81,6403	87,8907	96,2344
3	0	0	0	0	0	0	1	10,7	20,0992	38,1336	52,9424	53,1368	54,2368	58,1424
4	0	0	0	0	0	0	0,5	4,4235	24,3485	69,619	70,419	75,109	77,4385	78,513
AVG	0	0	0	0	0	0	0,55	6,63	20,89	52,07	61,06	66,39	72,12	75,81
STD	0	0	0	0	0	0	0,36	4,69	8,21	14,56	14,10	12,24	12,32	13,84

Table C.2: Capillary pressure of WST2

Min	1	2	AVG
0	0	0	0
10	0,02	0,02	0,02
20	0,03	0,03	0,03
30	0,03	0,05	0,04
40	0,03	0,08	0,06
50	0,03	0,14	0,09
60	0,03	0,25	0,14
70	0,13	0,31	0,22
80	0,13	0,10	0,12
90	0,09	0,13	0,11
100	0,22	0,28	0,25
110	0,51	0,47	0,49
120	0,92	1,02	0,97
130	1,49	1,30	1,40
140	1,71	1,66	1,69
150	1,71	1,66	1,69
160	0	0	0
170	0	0	0
180	0	0	0
190	0	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0

Table C.3: Shrinkage and settlement of WST2

Min	Settlement						Min	Shrinkage					
	1	2	3	4	AVG	STD		1	2	3	4	AVG	STD
0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,06	0,05	0,06	0,05	<b>0,06</b>	<b>0,00</b>	5	0,01	0,03	0,03	0,03	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>
10	0,13	0,10	0,12	0,10	<b>0,11</b>	<b>0,01</b>	10	0,02	0,05	0,06	0,06	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>
15	0,18	0,13	0,15	0,13	<b>0,15</b>	<b>0,02</b>	15	0,02	0,05	0,06	0,06	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>
20	0,24	0,18	0,19	0,17	<b>0,20</b>	<b>0,03</b>	20	0,02	0,05	0,06	0,07	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>
25	0,28	0,21	0,21	0,20	<b>0,23</b>	<b>0,03</b>	25	0,02	0,05	0,06	0,07	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>
30	0,35	0,26	0,23	0,24	<b>0,27</b>	<b>0,05</b>	30	0,01	0,05	0,06	0,08	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>
35	0,39	0,30	0,25	0,27	<b>0,30</b>	<b>0,06</b>	35	0,01	0,04	0,05	0,08	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>
40	0,46	0,37	0,28	0,31	<b>0,35</b>	<b>0,07</b>	40	0,02	0,03	0,05	0,08	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>
45	0,51	0,41	0,30	0,34	<b>0,39</b>	<b>0,08</b>	45	0,02	0,03	0,04	0,08	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>
50	0,58	0,48	0,32	0,39	<b>0,44</b>	<b>0,10</b>	50	0,03	0,02	0,03	0,09	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>
55	0,63	0,53	0,33	0,43	<b>0,48</b>	<b>0,11</b>	55	0,04	0,02	0,03	0,09	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>
60	0,71	0,61	0,36	0,49	<b>0,54</b>	<b>0,13</b>	60	0,04	0,03	0,03	0,10	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>
65	0,75	0,66	0,38	0,53	<b>0,58</b>	<b>0,14</b>	65	0,03	0,04	0,05	0,10	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>
70	0,89	0,76	0,42	0,60	<b>0,67</b>	<b>0,18</b>	70	0,14	0,07	0,07	0,10	<b>0,09</b>	<b>0,03</b>
75	0,93	0,66	0,45	0,66	<b>0,68</b>	<b>0,17</b>	75	0,18	0,14	0,07	0,10	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>
80	0,64	0,59	0,52	0,62	<b>0,59</b>	<b>0,05</b>	80	0,22	0,12	0,10	0,11	<b>0,14</b>	<b>0,05</b>
85	0,67	0,58	0,39	0,55	<b>0,55</b>	<b>0,10</b>	85	0,21	0,13	0,15	0,11	<b>0,15</b>	<b>0,04</b>
90	0,67	0,55	0,40	0,59	<b>0,55</b>	<b>0,10</b>	90	0,22	0,13	0,15	0,11	<b>0,15</b>	<b>0,04</b>
95	0,67	0,57	0,40	0,62	<b>0,56</b>	<b>0,10</b>	95	0,22	0,14	0,14	0,11	<b>0,15</b>	<b>0,04</b>
100	0,75	0,59	0,44	0,63	<b>0,60</b>	<b>0,11</b>	100	0,22	0,14	0,15	0,12	<b>0,16</b>	<b>0,04</b>
105	0,80	0,61	0,47	0,65	<b>0,63</b>	<b>0,12</b>	105	0,23	0,14	0,15	0,12	<b>0,16</b>	<b>0,04</b>
110	0,94	0,75	0,48	0,69	<b>0,72</b>	<b>0,16</b>	110	0,25	0,14	0,16	0,12	<b>0,17</b>	<b>0,05</b>
115	0,99	0,81	0,54	0,71	<b>0,76</b>	<b>0,16</b>	115	0,30	0,14	0,18	0,13	<b>0,19</b>	<b>0,07</b>
120	1,03	0,86	0,63	0,77	<b>0,82</b>	<b>0,15</b>	120	0,40	0,16	0,23	0,16	<b>0,24</b>	<b>0,10</b>
125	1,04	0,88	0,66	0,80	<b>0,85</b>	<b>0,14</b>	125	0,41	0,24	0,29	0,21	<b>0,29</b>	<b>0,08</b>
130	1,07	0,93	0,69	0,85	<b>0,88</b>	<b>0,14</b>	130	0,47	0,35	0,39	0,29	<b>0,38</b>	<b>0,06</b>
135	1,08	0,95	0,71	0,88	<b>0,91</b>	<b>0,13</b>	135	0,51	0,38	0,44	0,37	<b>0,42</b>	<b>0,06</b>
140	1,09	0,98	0,74	0,92	<b>0,93</b>	<b>0,13</b>	140	0,57	0,44	0,52	0,44	<b>0,49</b>	<b>0,06</b>
145	1,09	1,00	0,75	0,95	<b>0,95</b>	<b>0,12</b>	145	0,62	0,49	0,57	0,49	<b>0,54</b>	<b>0,06</b>
150	1,06	1,02	0,75	0,97	<b>0,95</b>	<b>0,12</b>	150	0,70	0,56	0,67	0,58	<b>0,63</b>	<b>0,06</b>
155	1,05	1,02	0,73	0,97	<b>0,94</b>	<b>0,12</b>	155	0,75	0,61	0,73	0,63	<b>0,68</b>	<b>0,06</b>
160	1,04	0,99	0,72	0,96	<b>0,93</b>	<b>0,13</b>	160	0,80	0,69	0,80	0,70	<b>0,75</b>	<b>0,05</b>
165	1,04	0,98	0,71	0,96	<b>0,92</b>	<b>0,12</b>	165	0,82	0,73	0,84	0,74	<b>0,78</b>	<b>0,05</b>
170	1,04	0,97	0,72	0,96	<b>0,92</b>	<b>0,12</b>	170	0,85	0,77	0,89	0,80	<b>0,83</b>	<b>0,04</b>
175	1,04	0,97	0,72	0,96	<b>0,92</b>	<b>0,12</b>	175	0,86	0,79	0,91	0,82	<b>0,85</b>	<b>0,04</b>
180	1,04	0,97	0,72	0,97	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	180	0,87	0,81	0,93	0,85	<b>0,87</b>	<b>0,04</b>
185	1,04	0,97	0,72	0,97	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	185	0,88	0,82	0,93	0,86	<b>0,87</b>	<b>0,04</b>
190	1,04	0,97	0,73	0,97	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	190	0,89	0,83	0,94	0,87	<b>0,88</b>	<b>0,04</b>
195	1,04	0,97	0,73	0,97	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	195	0,89	0,84	0,95	0,88	<b>0,89</b>	<b>0,04</b>
200	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	200	0,90	0,84	0,95	0,88	<b>0,89</b>	<b>0,04</b>
205	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	205	0,90	0,85	0,95	0,88	<b>0,90</b>	<b>0,04</b>
210	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	210	0,90	0,85	0,96	0,89	<b>0,90</b>	<b>0,04</b>
215	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	215	0,91	0,85	0,96	0,89	<b>0,90</b>	<b>0,04</b>
220	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	220	0,91	0,86	0,96	0,89	<b>0,91</b>	<b>0,04</b>
225	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	225	0,91	0,86	0,97	0,89	<b>0,91</b>	<b>0,04</b>
230	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	230	0,92	0,86	0,97	0,90	<b>0,91</b>	<b>0,04</b>
235	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	235	0,92	0,86	0,97	0,90	<b>0,91</b>	<b>0,04</b>
240	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	240	0,92	0,86	0,97	0,90	<b>0,91</b>	<b>0,04</b>
245	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	245	0,92	0,86	0,97	0,90	<b>0,91</b>	<b>0,04</b>
250	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	250	0,92	0,87	0,98	0,90	<b>0,92</b>	<b>0,04</b>
255	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	255	0,93	0,87	0,98	0,90	<b>0,92</b>	<b>0,04</b>
260	1,04	0,97	0,73	0,98	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	260	0,93	0,87	0,98	0,90	<b>0,92</b>	<b>0,04</b>

## D. Appendix D: WST3

Table D.1: Crack area of WST3

Sample	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	49,6104	71,47455	93,3387	99,9439	120,4225	129,4884
2	0	0	0	0	0	0	0	0	36,5608	97,3139	103,6509	114,5465	120,5758	119,278
3	0	0	0	0	0	0	0	0	35,3044	77,4906	98,3118	111,36	115,306	128,779
4	0	0	0	0	0	0	0	0	55,8862	84,2954	118,0402	120,1088	127,7	150,672
AVG	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	44,34	82,64	103,34	111,49	121,00	132,05
STD	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	8,71	9,61	9,24	7,36	4,41	11,48

Table D.2: Capillary pressure of WST3

Min	1	2	AVG
0	0	0	0
10	0,01	0,02	0,02
20	0,03	0,05	0,04
30	0,05	0,07	0,06
40	0,07	0,09	0,08
50	0,09	0,11	0,10
60	0,11	0,14	0,13
70	0,13	0,19	0,16
80	0,20	0,26	0,23
90	0,29	0,37	0,33
100	0,14	0,46	0,30
110	0,09	0,10	0,10
120	0,09	0,27	0,18
130	0,11	0,57	0,34
140	0,68	0	0,82
150	1,12	0	1,15
160	1,67	0	0
170	1,67	0	0
180	0	0	0
190	0	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0

Table D.3: Shrinkage and settlement of WST3

Min	Settlement						Min	Shrinkage					
	1	2	3	4	AVG	STD		1	2	3	4	AVG	STD
0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,06	0,07	0,08	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,01</b>	5	0,01	0,02	0,05	0,02	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
10	0,14	0,18	0,15	0,18	<b>0,16</b>	<b>0,02</b>	10	0,02	0,04	0,08	0,03	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>
15	0,18	0,24	0,19	0,22	<b>0,21</b>	<b>0,02</b>	15	0,02	0,05	0,08	0,04	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>
20	0,25	0,32	0,24	0,27	<b>0,27</b>	<b>0,03</b>	20	0,03	0,05	0,09	0,05	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
25	0,29	0,36	0,26	0,30	<b>0,30</b>	<b>0,04</b>	25	0,04	0,06	0,09	0,05	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
30	0,34	0,43	0,30	0,33	<b>0,35</b>	<b>0,05</b>	30	0,05	0,06	0,10	0,06	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
35	0,37	0,47	0,33	0,34	<b>0,38</b>	<b>0,05</b>	35	0,05	0,07	0,10	0,06	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
40	0,41	0,51	0,36	0,37	<b>0,41</b>	<b>0,06</b>	40	0,06	0,07	0,10	0,07	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
45	0,44	0,54	0,38	0,38	<b>0,44</b>	<b>0,07</b>	45	0,06	0,07	0,10	0,07	<b>0,08</b>	<b>0,01</b>
50	0,48	0,58	0,41	0,40	<b>0,47</b>	<b>0,07</b>	50	0,07	0,08	0,10	0,08	<b>0,08</b>	<b>0,01</b>
55	0,50	0,61	0,45	0,41	<b>0,49</b>	<b>0,07</b>	55	0,07	0,08	0,11	0,08	<b>0,08</b>	<b>0,01</b>
60	0,54	0,65	0,49	0,43	<b>0,53</b>	<b>0,08</b>	60	0,07	0,08	0,11	0,09	<b>0,09</b>	<b>0,01</b>
65	0,57	0,69	0,52	0,45	<b>0,56</b>	<b>0,09</b>	65	0,08	0,09	0,11	0,10	<b>0,09</b>	<b>0,01</b>
70	0,62	0,76	0,57	0,47	<b>0,61</b>	<b>0,11</b>	70	0,09	0,09	0,12	0,11	<b>0,10</b>	<b>0,01</b>
75	0,66	0,81	0,61	0,48	<b>0,64</b>	<b>0,12</b>	75	0,10	0,10	0,12	0,12	<b>0,11</b>	<b>0,01</b>
80	0,72	0,89	0,69	0,52	<b>0,70</b>	<b>0,13</b>	80	0,12	0,12	0,12	0,15	<b>0,13</b>	<b>0,01</b>
85	0,76	0,94	0,73	0,55	<b>0,74</b>	<b>0,14</b>	85	0,15	0,17	0,14	0,17	<b>0,16</b>	<b>0,02</b>
90	0,80	1,00	0,79	0,59	<b>0,80</b>	<b>0,14</b>	90	0,26	0,25	0,21	0,23	<b>0,24</b>	<b>0,02</b>
95	0,82	1,03	0,83	0,62	<b>0,82</b>	<b>0,15</b>	95	0,32	0,30	0,25	0,29	<b>0,29</b>	<b>0,02</b>
100	0,83	0,86	0,88	0,65	<b>0,81</b>	<b>0,09</b>	100	0,39	0,39	0,33	0,38	<b>0,37</b>	<b>0,02</b>
105	0,57	0,83	0,91	0,57	<b>0,72</b>	<b>0,15</b>	105	0,39	0,36	0,40	0,44	<b>0,40</b>	<b>0,03</b>
110	0,58	0,83	0,70	0,48	<b>0,65</b>	<b>0,13</b>	110	0,38	0,36	0,43	0,40	<b>0,39</b>	<b>0,03</b>
115	0,58	0,83	0,67	0,45	<b>0,63</b>	<b>0,14</b>	115	0,38	0,36	0,44	0,40	<b>0,39</b>	<b>0,03</b>
120	0,58	0,84	0,72	0,46	<b>0,65</b>	<b>0,14</b>	120	0,39	0,37	0,44	0,40	<b>0,40</b>	<b>0,03</b>
125	0,60	0,87	0,81	0,50	<b>0,70</b>	<b>0,15</b>	125	0,39	0,37	0,44	0,40	<b>0,40</b>	<b>0,02</b>
130	0,68	0,90	0,89	0,61	<b>0,77</b>	<b>0,13</b>	130	0,41	0,39	0,44	0,40	<b>0,41</b>	<b>0,02</b>
135	0,76	0,92	0,90	0,64	<b>0,81</b>	<b>0,11</b>	135	0,43	0,41	0,44	0,40	<b>0,42</b>	<b>0,01</b>
140	0,82	0,96	0,94	0,68	<b>0,85</b>	<b>0,11</b>	140	0,47	0,43	0,46	0,41	<b>0,44</b>	<b>0,02</b>
145	0,88	0,99	0,97	0,70	<b>0,88</b>	<b>0,12</b>	145	0,49	0,46	0,51	0,42	<b>0,47</b>	<b>0,03</b>
150	0,93	1,04	1,02	0,74	<b>0,93</b>	<b>0,12</b>	150	0,56	0,53	0,57	0,49	<b>0,54</b>	<b>0,03</b>
155	0,95	1,07	1,04	0,77	<b>0,96</b>	<b>0,12</b>	155	0,60	0,56	0,60	0,56	<b>0,58</b>	<b>0,02</b>
160	0,96	1,11	1,06	0,80	<b>0,98</b>	<b>0,12</b>	160	0,68	0,62	0,65	0,61	<b>0,64</b>	<b>0,03</b>
165	0,95	1,14	1,08	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,12</b>	165	0,72	0,67	0,69	0,64	<b>0,68</b>	<b>0,03</b>
170	0,94	1,16	1,08	0,86	<b>1,01</b>	<b>0,12</b>	170	0,80	0,74	0,76	0,69	<b>0,75</b>	<b>0,04</b>
175	0,93	1,16	1,07	0,86	<b>1,01</b>	<b>0,12</b>	175	0,84	0,80	0,82	0,73	<b>0,80</b>	<b>0,04</b>
180	0,92	1,17	1,05	0,87	<b>1,00</b>	<b>0,12</b>	180	0,90	0,87	0,90	0,81	<b>0,87</b>	<b>0,04</b>
185	0,92	1,17	1,05	0,85	<b>1,00</b>	<b>0,12</b>	185	0,94	0,91	0,95	0,86	<b>0,91</b>	<b>0,03</b>
190	0,93	1,17	1,05	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	190	0,98	0,95	0,99	0,94	<b>0,97</b>	<b>0,02</b>
195	0,93	1,17	1,06	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	195	1,00	0,97	1,01	0,98	<b>0,99</b>	<b>0,02</b>
200	0,93	1,18	1,06	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	200	1,02	0,99	1,03	1,02	<b>1,01</b>	<b>0,02</b>
205	0,93	1,18	1,06	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	205	1,02	1,00	1,04	1,03	<b>1,02</b>	<b>0,02</b>
210	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	210	1,03	1,00	1,04	1,04	<b>1,03</b>	<b>0,02</b>
215	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	215	1,04	1,01	1,05	1,05	<b>1,04</b>	<b>0,02</b>
220	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	220	1,04	1,01	1,05	1,06	<b>1,04</b>	<b>0,02</b>
225	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	225	1,04	1,02	1,05	1,06	<b>1,04</b>	<b>0,02</b>
230	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,00</b>	<b>0,13</b>	230	1,05	1,02	1,06	1,06	<b>1,05</b>	<b>0,02</b>
235	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,01</b>	<b>0,13</b>	235	1,05	1,02	1,06	1,07	<b>1,05</b>	<b>0,02</b>
240	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,01</b>	<b>0,13</b>	240	1,05	1,03	1,06	1,07	<b>1,05</b>	<b>0,02</b>
245	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,01</b>	<b>0,13</b>	245	1,06	1,03	1,06	1,07	<b>1,06</b>	<b>0,02</b>
250	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,01</b>	<b>0,13</b>	250	1,06	1,03	1,06	1,08	<b>1,06</b>	<b>0,02</b>
255	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,01</b>	<b>0,13</b>	255	1,06	1,03	1,07	1,08	<b>1,06</b>	<b>0,02</b>
260	0,94	1,18	1,07	0,83	<b>1,01</b>	<b>0,13</b>	260	1,06	1,04	1,07	1,08	<b>1,06</b>	<b>0,02</b>

## E. Appendix E: WST4

Table E.1: Crack area of WST4

Sample	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	72,901	94,948	95,204	108,5535	109,1205
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50,8667	57,8309	64,3198	99,2309	99,7704
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	69,424	90,5288	94,4486	95,8304	110,2812
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	83,1833	108,6728	113,1394	121,5728	124,2401
AVG	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	69,09	88,00	91,78	106,30	110,85
STD	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	11,68	18,66	17,53	9,97	8,74

Table E.2: Capillary pressure of WST4

Min	1	2	AVG
0	0	0	0
10	0,03	0,03	0,03
20	0,04	0,05	0,05
30	0,05	0,07	0,06
40	0,08	0,09	0,09
50	0,11	0,11	0,11
60	0,16	0,14	0,15
70	0,24	0,18	0,21
80	0,37	0,26	0,32
90	0,51	0,39	0,45
100	0,70	0,52	0,61
110	0,72	0,68	0,70
120	0,34	0,89	0,62
130	0,16	0,10	0,13
140	0,17	0,12	0,15
150	0,23	0,11	0,17
160	1,41	0,24	0,83
170	1,67	0	1,25
180	1,67	0	1,25
190	0	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0

Table E.3: Shrinkage and settlement of WST4

Min	Settlement					Min	Shrinkage					
	1	2	3	AVG	STD		1	2	3	4	AVG	STD
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,05	0,06	0,06	0,06	0,01	5	0,04	0,01	0,04	0,05	0,04	0,01
10	0,11	0,15	0,10	0,12	0,02	10	0,07	0,02	0,07	0,09	0,06	0,02
15	0,14	0,20	0,13	0,16	0,03	15	0,08	0,03	0,08	0,10	0,07	0,03
20	0,18	0,27	0,18	0,21	0,04	20	0,10	0,04	0,09	0,11	0,09	0,03
25	0,20	0,32	0,20	0,24	0,05	25	0,12	0,04	0,10	0,12	0,09	0,03
30	0,24	0,38	0,24	0,29	0,07	30	0,13	0,05	0,10	0,13	0,10	0,03
35	0,27	0,42	0,27	0,32	0,07	35	0,14	0,05	0,10	0,13	0,10	0,04
40	0,31	0,48	0,31	0,37	0,08	40	0,14	0,05	0,10	0,14	0,11	0,04
45	0,33	0,51	0,34	0,39	0,08	45	0,15	0,05	0,10	0,14	0,11	0,04
50	0,37	0,57	0,38	0,44	0,09	50	0,18	0,05	0,10	0,14	0,12	0,05
55	0,40	0,60	0,42	0,47	0,09	55	0,19	0,05	0,09	0,14	0,12	0,05
60	0,45	0,65	0,47	0,52	0,09	60	0,20	0,06	0,09	0,15	0,12	0,05
65	0,49	0,69	0,51	0,56	0,09	65	0,21	0,06	0,08	0,15	0,12	0,06
70	0,55	0,75	0,57	0,63	0,09	70	0,23	0,06	0,08	0,16	0,13	0,07
75	0,60	0,80	0,62	0,67	0,09	75	0,25	0,08	0,08	0,18	0,15	0,07
80	0,66	0,86	0,69	0,74	0,09	80	0,34	0,16	0,09	0,24	0,21	0,09
85	0,70	0,89	0,73	0,77	0,08	85	0,41	0,23	0,10	0,29	0,26	0,11
90	0,75	0,92	0,78	0,82	0,07	90	0,53	0,33	0,15	0,37	0,34	0,14
95	0,77	0,93	0,81	0,84	0,07	95	0,62	0,39	0,19	0,43	0,41	0,15
100	0,80	0,96	0,84	0,87	0,07	100	0,72	0,49	0,32	0,51	0,51	0,14
105	0,82	0,98	0,86	0,88	0,07	105	0,78	0,53	0,41	0,56	0,57	0,14
110	0,84	0,99	0,88	0,90	0,06	110	0,86	0,55	0,49	0,66	0,64	0,14
115	0,86	1,00	0,90	0,92	0,06	115	0,91	0,56	0,54	0,71	0,68	0,15
120	0,89	0,84	0,92	0,88	0,03	120	0,98	0,52	0,59	0,80	0,72	0,18
125	0,65	0,75	0,94	0,78	0,12	125	0,97	0,50	0,63	0,83	0,73	0,18
130	0,67	0,79	0,60	0,69	0,08	130	0,96	0,50	0,59	0,77	0,71	0,17
135	0,70	0,79	0,58	0,69	0,09	135	0,95	0,51	0,59	0,77	0,71	0,17
140	0,71	0,81	0,57	0,70	0,10	140	0,96	0,52	0,59	0,78	0,71	0,17
145	0,73	0,90	0,68	0,77	0,09	145	0,96	0,53	0,60	0,79	0,72	0,17
150	0,83	0,98	0,84	0,88	0,07	150	0,96	0,54	0,62	0,82	0,74	0,16
155	0,86	1,01	0,91	0,93	0,06	155	0,96	0,56	0,64	0,86	0,75	0,16
160	0,88	1,06	0,96	0,97	0,07	160	0,97	0,59	0,68	0,92	0,79	0,16
165	0,91	1,10	0,98	0,99	0,08	165	0,99	0,62	0,73	0,97	0,83	0,16
170	0,95	1,13	0,97	1,02	0,08	170	1,04	0,67	0,82	1,02	0,89	0,15
175	0,97	1,14	0,96	1,02	0,08	175	1,07	0,72	0,88	1,06	0,93	0,14
180	0,97	1,13	0,95	1,02	0,08	180	1,13	0,80	0,96	1,13	1,00	0,14
185	0,96	1,12	0,95	1,01	0,08	185	1,17	0,84	1,01	1,17	1,05	0,14
190	0,93	1,12	0,96	1,00	0,09	190	1,24	0,89	1,06	1,22	1,10	0,14
195	0,92	1,12	0,96	1,00	0,09	195	1,28	0,92	1,09	1,25	1,13	0,15
200	0,93	1,13	0,97	1,01	0,09	200	1,33	0,94	1,11	1,27	1,16	0,15
205	0,93	1,13	0,97	1,01	0,09	205	1,36	0,95	1,12	1,28	1,18	0,16
210	0,93	1,13	0,97	1,01	0,09	210	1,38	0,97	1,13	1,29	1,19	0,16
215	0,93	1,13	0,97	1,01	0,09	215	1,39	0,97	1,13	1,29	1,20	0,16
220	0,93	1,13	0,97	1,01	0,09	220	1,40	0,98	1,14	1,30	1,20	0,16
225	0,94	1,14	0,98	1,02	0,09	225	1,40	0,98	1,14	1,30	1,21	0,16
230	0,94	1,14	0,98	1,02	0,09	230	1,41	0,99	1,15	1,31	1,21	0,16
235	0,94	1,14	0,98	1,02	0,09	235	1,41	0,99	1,15	1,31	1,22	0,16
240	0,94	1,14	0,98	1,02	0,09	240	1,41	0,99	1,15	1,31	1,22	0,16
245	0,94	1,14	0,98	1,02	0,09	245	1,42	1,00	1,16	1,31	1,22	0,16
250	0,94	1,14	0,98	1,02	0,09	250	1,42	1,00	1,16	1,32	1,22	0,16
255	0,94	1,14	0,98	1,02	0,09	255	1,42	1,00	1,16	1,32	1,23	0,16
260	0,94	1,14	0,98	1,02	0,09	260	1,43	1,01	1,17	1,32	1,23	0,16



## F. Appendix F: WST5

Table F.1: Crack area of WST5

Sample	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	47,1368	48,9184	64,5008	77,7824	92,7784	110,3552	132,6784
2	0	0	0	0	0	0	5	65,0604	69,1696	79,579	80,9417	85,1511	91,372	112,0766
3	0	0	0	0	0	0	17,7	53,648	52,4384	65,4799	67,1381	67,8771	80,9737	105,9056
4	0	0	0	0	0	0	14,5	51,0259	50,5869	69,7959	78,2582	97,222	107,666	132,027
AVG	0	0	0	0	0	0	9,30	54,22	55,28	69,84	76,03	85,76	97,59	120,67
STD	0	0	0	0	0	0	7,12	6,67	8,12	5,97	5,27	11,19	12,03	11,89

Table F.2: Capillary pressure of WST5

Min	1	2	AVG
0	0	0	0
10	0,03	0,03	0,03
20	0,05	0,05	0,05
30	0,07	0,07	0,07
40	0,09	0,09	0,09
50	0,11	0,11	0,11
60	0,14	0,13	0,14
70	0,20	0,16	0,18
80	0,30	0,21	0,26
90	0,43	0,30	0,37
100	0,54	0,43	0,49
110	0,70	0,58	0,64
120	0,92	0,70	0,81
130	1,30	0,89	1,10
140	0,23	0,24	0,24
150	0,21	0,16	0,19
160	0,41	0,56	0,49
170	1,37	1,67	1,52
180	0	0	0
190	0	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0



## G. Appendix G: WM5I

Table G.1: Crack area of WM5I

Sample	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13,5419	33,1091	53,7012	68,0435
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,9	14,2	69,7026
AVG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,77095	21,5046	33,9506	68,8731
STD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,77095	11,6046	19,7506	0,82955

Table G.2: Capillary pressure of WM5I

Min	1	2	AVG
0	0	0	0
10	0,08	0,08	0,08
20	0,08	0,08	0,08
30	0,08	0,09	0,08
40	0,08	0,09	0,08
50	0,08	0,09	0,08
60	0,08	0,09	0,08
70	0,09	0,09	0,09
80	0,07	0,06	0,07
90	0,06	0,06	0,06
100	0,08	0,08	0,08
110	0,08	0,09	0,08
120	0,09	0,09	0,09
130	0,08	0,08	0,08
140	0,07	0,07	0,07
150	0,08	0,08	0,08
160	0,08	0,09	0,08
170	0,08	0,09	0,09
180	0,05	0,06	0,06
190	0,07	0,08	0,08
200	0,08	0,09	0,08
210	0,09	0,09	0,09
220	0,06	0,06	0,06
230	0,08	0,07	0,08
240	0,09	0,08	0,08
250	0,09	0,08	0,09
260	0,09	0,08	0,09

Table G.3: Shrinkage of WM51

Min	Shrinkage			
	1	2	AVG	STD
0	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,00	0,02	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
10	0,01	0,02	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
15	0,01	0,03	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
20	0,01	0,03	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
25	0,01	0,04	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>
30	0,01	0,05	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>
35	0,01	0,05	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>
40	0,01	0,06	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>
45	0,01	0,06	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>
50	0,01	0,06	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>
55	0,01	0,07	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>
60	0,01	0,07	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>
65	0,01	0,07	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>
70	0,02	0,07	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>
75	0,04	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
80	0,04	0,10	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>
85	0,04	0,10	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>
90	0,04	0,10	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>
95	0,04	0,11	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>
100	0,04	0,11	<b>0,08</b>	<b>0,03</b>
105	0,04	0,11	<b>0,08</b>	<b>0,03</b>
110	0,04	0,11	<b>0,08</b>	<b>0,03</b>
115	0,05	0,11	<b>0,08</b>	<b>0,03</b>
120	0,08	0,12	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
125	0,10	0,14	<b>0,12</b>	<b>0,02</b>
130	0,11	0,14	<b>0,12</b>	<b>0,02</b>
135	0,10	0,14	<b>0,12</b>	<b>0,02</b>
140	0,11	0,14	<b>0,12</b>	<b>0,02</b>
145	0,11	0,14	<b>0,12</b>	<b>0,02</b>
150	0,11	0,15	<b>0,13</b>	<b>0,02</b>
155	0,12	0,15	<b>0,13</b>	<b>0,02</b>
160	0,15	0,15	<b>0,15</b>	<b>0,00</b>
165	0,20	0,16	<b>0,18</b>	<b>0,02</b>
170	0,28	0,25	<b>0,27</b>	<b>0,01</b>
175	0,27	0,24	<b>0,26</b>	<b>0,02</b>
180	0,27	0,22	<b>0,25</b>	<b>0,03</b>
185	0,27	0,22	<b>0,25</b>	<b>0,03</b>
190	0,28	0,22	<b>0,25</b>	<b>0,03</b>
195	0,28	0,22	<b>0,25</b>	<b>0,03</b>
200	0,30	0,24	<b>0,27</b>	<b>0,03</b>
205	0,33	0,26	<b>0,30</b>	<b>0,04</b>
210	0,38	0,31	<b>0,34</b>	<b>0,04</b>
215	0,36	0,29	<b>0,32</b>	<b>0,03</b>
220	0,35	0,28	<b>0,32</b>	<b>0,04</b>
225	0,35	0,28	<b>0,32</b>	<b>0,04</b>
230	0,35	0,28	<b>0,32</b>	<b>0,04</b>
235	0,36	0,28	<b>0,32</b>	<b>0,04</b>
240	0,37	0,29	<b>0,33</b>	<b>0,04</b>
245	0,38	0,32	<b>0,35</b>	<b>0,03</b>
250	0,38	0,35	<b>0,36</b>	<b>0,02</b>
255	0,38	0,37	<b>0,38</b>	<b>0,01</b>
260	0,39	0,38	<b>0,38</b>	<b>0,00</b>

## H. Appendix H: WM5S

Table H.1: Crack area of WM5S

Sample	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AVG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
STD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table H.2: Capillary pressure of WM5S

Min	1	2	AVG
0	0	0	0
10	0,07	0,07	0,07
20	0,08	0,09	0,08
30	0,08	0,09	0,09
40	0,08	0,09	0,09
50	0,08	0,09	0,09
60	0,07	0,09	0,08
70	0,06	0,08	0,07
80	0,07	0,09	0,08
90	0,07	0,10	0,09
100	0,06	0,08	0,07
110	0,07	0,09	0,08
120	0,07	0,10	0,09
130	0,07	0,10	0,08
140	0,06	0,08	0,07
150	0,07	0,09	0,08
160	0,07	0,10	0,08
170	0,05	0,08	0,06
180	0,07	0,09	0,08
190	0,07	0,10	0,08
200	0,07	0,10	0,09
210	0,05	0,08	0,07
220	0,06	0,09	0,08
230	0,07	0,09	0,08
240	0,05	0,07	0,06
250	0,06	0,08	0,07
260	0,07	0,09	0,08

Table H.3: Shrinkage of WM5S

Min	Shrinkage		
	1	AVG	STD
0	0,00	0,00	NA
5	0,01	0,01	NA
10	0,02	0,02	NA
15	0,03	0,03	NA
20	0,03	0,03	NA
25	0,03	0,03	NA
30	0,04	0,04	NA
35	0,04	0,04	NA
40	0,04	0,04	NA
45	0,04	0,04	NA
50	0,05	0,05	NA
55	0,06	0,06	NA
60	0,08	0,08	NA
65	0,09	0,09	NA
70	0,12	0,12	NA
75	0,12	0,12	NA
80	0,12	0,12	NA
85	0,12	0,12	NA
90	0,13	0,13	NA
95	0,13	0,13	NA
100	0,13	0,13	NA
105	0,13	0,13	NA
110	0,13	0,13	NA
115	0,13	0,13	NA
120	0,14	0,14	NA
125	0,14	0,14	NA
130	0,15	0,15	NA
135	0,13	0,13	NA
140	0,14	0,14	NA
145	0,14	0,14	NA
150	0,14	0,14	NA
155	0,13	0,13	NA
160	0,15	0,15	NA
165	0,19	0,19	NA
170	0,17	0,17	NA
175	0,16	0,16	NA
180	0,17	0,17	NA
185	0,17	0,17	NA
190	0,18	0,18	NA
195	0,22	0,22	NA
200	0,30	0,30	NA
205	0,35	0,35	NA
210	0,30	0,30	NA
215	0,30	0,30	NA
220	0,30	0,30	NA
225	0,31	0,31	NA
230	0,33	0,33	NA
235	0,36	0,36	NA
240	0,34	0,34	NA
245	0,34	0,34	NA
250	0,36	0,36	NA
255	0,36	0,36	NA
260	0,37	0,37	NA

## I. Appendix I: CA1

Table I.1: Crack area of CA1

Sample	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,6	65,6318	70,4492	76,6506	78,4144
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21,7563	44,903	45,0987	44,255	60,6007
3	0	0	0	0	0	0	0,8	17,6	33,1	50,4684	63,8676	85,3516	99,482	119,9276
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41,0782	67,2986	68,9734	84,8292	95,4972
AVG	0	0	0	0	0	0	0,20	4,40	8,28	32,98	60,43	67,47	76,30	88,61
STD	0	0	0	0	0	0	0,35	7,62	14,33	13,27	9,04	14,42	20,23	21,89

Table I.2: Capillary pressure of CA1

Min	1	2	AVG
0	0	0	0
10	0,00	0,00	0,00
20	0,02	0,01	0,02
30	0,04	0,04	0,04
40	0,07	0,06	0,07
50	0,08	0,08	0,08
60	0,08	0,11	0,10
70	0,08	0,14	0,11
80	0,09	0,18	0,14
90	0,10	0,25	0,18
100	0,12	0,33	0,23
110	0,16	0,44	0,30
120	0,24	0,53	0,39
130	0,36	0,56	0,46
140	0,53	0,63	0,58
150	0,74	0,72	0,73
160	0,94	1,02	0,98
170	1,03	1,40	1,22
180	1,29	0	1,52
190	1,60	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0

Table I.3: Shrinkage and settlement of CA1

Min	Settlement				Min	Shrinkage							
	1	2	AVG	STD		1	2	3	4	5	AVG	STD	
0	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,10	0,23	<b>0,17</b>	<b>0,07</b>	5	0,01	0,02	0,06	0,04	0,06	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	
10	0,29	0,39	<b>0,34</b>	<b>0,05</b>	10	0,04	0,07	0,10	0,04	0,10	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>	
15	0,35	0,45	<b>0,40</b>	<b>0,05</b>	15	0,04	0,06	0,11	0,05	0,11	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>	
20	0,36	0,51	<b>0,44</b>	<b>0,08</b>	20	0,04	0,07	0,12	0,06	0,12	<b>0,08</b>	<b>0,03</b>	
25	0,41	0,55	<b>0,48</b>	<b>0,07</b>	25	0,05	0,07	0,12	0,07	0,12	<b>0,09</b>	<b>0,03</b>	
30	0,50	0,62	<b>0,56</b>	<b>0,06</b>	30	0,05	0,08	0,13	0,08	0,13	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>	
35	0,55	0,66	<b>0,61</b>	<b>0,06</b>	35	0,06	0,08	0,14	0,09	0,14	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>	
40	0,61	0,72	<b>0,66</b>	<b>0,05</b>	40	0,06	0,09	0,15	0,10	0,15	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>	
45	0,63	0,73	<b>0,68</b>	<b>0,05</b>	45	0,06	0,09	0,15	0,10	0,15	<b>0,11</b>	<b>0,04</b>	
50	0,64	0,75	<b>0,69</b>	<b>0,06</b>	50	0,06	0,09	0,16	0,11	0,16	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
55	0,64	0,76	<b>0,70</b>	<b>0,06</b>	55	0,07	0,09	0,16	0,11	0,16	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
60	0,65	0,77	<b>0,71</b>	<b>0,06</b>	60	0,07	0,10	0,16	0,12	0,16	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
65	0,65	0,77	<b>0,71</b>	<b>0,06</b>	65	0,07	0,09	0,16	0,12	0,16	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
70	0,65	0,78	<b>0,72</b>	<b>0,06</b>	70	0,07	0,09	0,16	0,12	0,16	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
75	0,65	0,78	<b>0,72</b>	<b>0,06</b>	75	0,07	0,09	0,17	0,12	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
80	0,66	0,79	<b>0,72</b>	<b>0,06</b>	80	0,08	0,09	0,17	0,12	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
85	0,66	0,79	<b>0,72</b>	<b>0,06</b>	85	0,08	0,09	0,17	0,11	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
90	0,66	0,79	<b>0,73</b>	<b>0,06</b>	90	0,08	0,09	0,17	0,11	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
95	0,67	0,79	<b>0,73</b>	<b>0,06</b>	95	0,08	0,09	0,17	0,11	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
100	0,67	0,80	<b>0,74</b>	<b>0,06</b>	100	0,08	0,09	0,17	0,10	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
105	0,68	0,81	<b>0,74</b>	<b>0,06</b>	105	0,08	0,09	0,17	0,10	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
110	0,69	0,82	<b>0,76</b>	<b>0,06</b>	110	0,08	0,09	0,17	0,10	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
115	0,71	0,84	<b>0,77</b>	<b>0,07</b>	115	0,08	0,09	0,17	0,09	0,17	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	
120	0,73	0,86	<b>0,80</b>	<b>0,07</b>	120	0,09	0,10	0,18	0,09	0,18	<b>0,13</b>	<b>0,04</b>	
125	0,74	0,88	<b>0,81</b>	<b>0,07</b>	125	0,10	0,12	0,19	0,11	0,19	<b>0,14</b>	<b>0,04</b>	
130	0,77	0,91	<b>0,84</b>	<b>0,07</b>	130	0,15	0,17	0,25	0,15	0,25	<b>0,19</b>	<b>0,05</b>	
135	0,78	0,92	<b>0,85</b>	<b>0,07</b>	135	0,18	0,20	0,30	0,20	0,30	<b>0,23</b>	<b>0,05</b>	
140	0,81	0,94	<b>0,87</b>	<b>0,07</b>	140	0,23	0,24	0,37	0,27	0,37	<b>0,29</b>	<b>0,06</b>	
145	0,82	0,95	<b>0,88</b>	<b>0,06</b>	145	0,26	0,27	0,41	0,31	0,41	<b>0,33</b>	<b>0,07</b>	
150	0,85	0,96	<b>0,91</b>	<b>0,06</b>	150	0,31	0,33	0,46	0,35	0,46	<b>0,38</b>	<b>0,07</b>	
155	0,86	0,97	<b>0,92</b>	<b>0,06</b>	155	0,34	0,36	0,49	0,38	0,49	<b>0,41</b>	<b>0,06</b>	
160	0,88	0,99	<b>0,94</b>	<b>0,05</b>	160	0,37	0,41	0,52	0,42	0,52	<b>0,45</b>	<b>0,06</b>	
165	0,90	1,01	<b>0,95</b>	<b>0,06</b>	165	0,39	0,43	0,54	0,45	0,54	<b>0,47</b>	<b>0,06</b>	
170	0,92	1,02	<b>0,97</b>	<b>0,05</b>	170	0,43	0,44	0,57	0,48	0,57	<b>0,50</b>	<b>0,06</b>	
175	0,93	1,03	<b>0,98</b>	<b>0,05</b>	175	0,45	0,45	0,59	0,50	0,59	<b>0,52</b>	<b>0,06</b>	
180	0,95	1,04	<b>1,00</b>	<b>0,05</b>	180	0,50	0,47	0,63	0,53	0,63	<b>0,55</b>	<b>0,07</b>	
185	0,96	1,05	<b>1,01</b>	<b>0,04</b>	185	0,53	0,49	0,65	0,55	0,65	<b>0,57</b>	<b>0,07</b>	
190	0,98	1,05	<b>1,02</b>	<b>0,04</b>	190	0,57	0,51	0,68	0,57	0,68	<b>0,60</b>	<b>0,07</b>	
195	1,00	1,06	<b>1,03</b>	<b>0,03</b>	195	0,59	0,53	0,69	0,59	0,69	<b>0,62</b>	<b>0,06</b>	
200	1,02	1,06	<b>1,04</b>	<b>0,02</b>	200	0,63	0,55	0,71	0,60	0,71	<b>0,64</b>	<b>0,06</b>	
205	1,03	1,05	<b>1,04</b>	<b>0,01</b>	205	0,65	0,56	0,73	0,61	0,73	<b>0,65</b>	<b>0,07</b>	
210	1,04	1,05	<b>1,04</b>	<b>0,00</b>	210	0,67	0,57	0,74	0,63	0,74	<b>0,67</b>	<b>0,07</b>	
215	1,04	1,04	<b>1,04</b>	<b>0,00</b>	215	0,69	0,58	0,75	0,64	0,75	<b>0,68</b>	<b>0,07</b>	
220	1,05	1,04	<b>1,05</b>	<b>0,00</b>	220	0,71	0,60	0,76	0,65	0,76	<b>0,69</b>	<b>0,06</b>	
225	1,05	1,04	<b>1,05</b>	<b>0,01</b>	225	0,71	0,60	0,76	0,65	0,76	<b>0,70</b>	<b>0,06</b>	
230	1,06	1,04	<b>1,05</b>	<b>0,01</b>	230	0,73	0,61	0,77	0,66	0,77	<b>0,71</b>	<b>0,06</b>	
235	1,06	1,03	<b>1,05</b>	<b>0,01</b>	235	0,73	0,62	0,77	0,67	0,77	<b>0,71</b>	<b>0,06</b>	
240	1,06	1,03	<b>1,05</b>	<b>0,01</b>	240	0,74	0,62	0,78	0,68	0,78	<b>0,72</b>	<b>0,06</b>	
245	1,06	1,03	<b>1,05</b>	<b>0,02</b>	245	0,74	0,63	0,78	0,68	0,78	<b>0,72</b>	<b>0,06</b>	
250	1,06	1,03	<b>1,05</b>	<b>0,02</b>	250	0,75	0,63	0,79	0,69	0,79	<b>0,73</b>	<b>0,06</b>	
255	1,06	1,03	<b>1,05</b>	<b>0,02</b>	255	0,75	0,63	0,79	0,69	0,79	<b>0,73</b>	<b>0,06</b>	
260	1,06	1,03	<b>1,04</b>	<b>0,02</b>	260	0,75	0,64	0,79	0,70	0,79	<b>0,73</b>	<b>0,06</b>	



## J. Appendix J: CA2

Table J.1: Crack area of CA2

Sample	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AVG	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
STD	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Table J.2: Capillary pressure of CA2

Min	1	2	AVG
0	0,00	0,00	0,00
10	0,01	0,00	0,01
20	0,03	0,03	0,03
30	0,06	0,06	0,06
40	0,08	0,08	0,08
50	0,09	0,08	0,09
60	0,09	0,09	0,09
70	0,10	0,09	0,10
80	0,12	0,10	0,11
90	0,14	0,11	0,13
100	0,18	0,13	0,16
110	0,22	0,16	0,19
120	0,29	0,21	0,25
130	0,38	0,31	0,35
140	0,51	0,45	0,48
150	0,66	0,60	0,63
160	0	0	0
170	0	0	0
180	0	0	0
190	0	0	0
200	0	0	0
210	0	0	0
220	0	0	0
230	0	0	0
240	0	0	0
250	0	0	0
260	0	0	0

Table J.3: Shrinkage and settlement of CA2

Min	Settlement					Min	Shrinkage					
	1	2	3	AVG	STD		1	2	3	4	AVG	STD
0	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0,01	0,11	0,05	<b>0,06</b>	<b>0,04</b>	5	0,02	0,04	0,05	0,04	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>
10	0,02	0,00	0,09	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	10	0,03	0,04	0,09	0,08	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>
15	0,07	0,04	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>	15	0,04	0,05	0,09	0,09	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
20	0,28	0,13	0,10	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	20	0,04	0,06	0,10	0,09	<b>0,08</b>	<b>0,02</b>
25	0,35	0,17	0,11	<b>0,21</b>	<b>0,10</b>	25	0,05	0,07	0,11	0,10	<b>0,08</b>	<b>0,02</b>
30	0,44	0,20	0,11	<b>0,25</b>	<b>0,14</b>	30	0,05	0,09	0,11	0,10	<b>0,09</b>	<b>0,02</b>
35	0,48	0,21	0,12	<b>0,27</b>	<b>0,15</b>	35	0,06	0,09	0,12	0,10	<b>0,09</b>	<b>0,02</b>
40	0,52	0,21	0,12	<b>0,28</b>	<b>0,17</b>	40	0,06	0,10	0,12	0,10	<b>0,09</b>	<b>0,02</b>
45	0,53	0,23	0,13	<b>0,30</b>	<b>0,17</b>	45	0,07	0,10	0,13	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
50	0,55	0,25	0,13	<b>0,31</b>	<b>0,18</b>	50	0,07	0,10	0,13	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
55	0,56	0,25	0,13	<b>0,32</b>	<b>0,18</b>	55	0,07	0,11	0,13	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
60	0,57	0,27	0,14	<b>0,32</b>	<b>0,18</b>	60	0,07	0,11	0,14	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
65	0,58	0,27	0,14	<b>0,33</b>	<b>0,18</b>	65	0,07	0,11	0,14	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
70	0,58	0,28	0,14	<b>0,33</b>	<b>0,19</b>	70	0,07	0,11	0,14	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
75	0,59	0,29	0,14	<b>0,34</b>	<b>0,19</b>	75	0,07	0,11	0,14	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
80	0,59	0,30	0,14	<b>0,34</b>	<b>0,19</b>	80	0,07	0,11	0,14	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
85	0,60	0,31	0,14	<b>0,35</b>	<b>0,19</b>	85	0,07	0,11	0,14	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
90	0,60	0,32	0,14	<b>0,35</b>	<b>0,19</b>	90	0,07	0,11	0,14	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
95	0,61	0,33	0,15	<b>0,36</b>	<b>0,19</b>	95	0,07	0,11	0,15	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
100	0,61	0,34	0,15	<b>0,37</b>	<b>0,19</b>	100	0,07	0,11	0,15	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
105	0,62	0,35	0,15	<b>0,37</b>	<b>0,19</b>	105	0,07	0,11	0,15	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
110	0,62	0,37	0,15	<b>0,38</b>	<b>0,19</b>	110	0,07	0,11	0,15	0,09	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>
115	0,63	0,38	0,15	<b>0,38</b>	<b>0,20</b>	115	0,07	0,11	0,15	0,09	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>
120	0,65	0,39	0,15	<b>0,40</b>	<b>0,20</b>	120	0,07	0,12	0,15	0,09	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>
125	0,66	0,40	0,15	<b>0,40</b>	<b>0,21</b>	125	0,07	0,12	0,15	0,09	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>
130	0,69	0,42	0,15	<b>0,42</b>	<b>0,22</b>	130	0,07	0,12	0,15	0,09	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>
135	0,70	0,43	0,15	<b>0,43</b>	<b>0,23</b>	135	0,07	0,12	0,15	0,09	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>
140	0,72	0,45	0,15	<b>0,44</b>	<b>0,23</b>	140	0,08	0,12	0,15	0,09	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>
145	0,73	0,47	0,16	<b>0,45</b>	<b>0,24</b>	145	0,09	0,13	0,16	0,09	<b>0,11</b>	<b>0,03</b>
150	0,75	0,49	0,17	<b>0,47</b>	<b>0,24</b>	150	0,10	0,15	0,17	0,08	<b>0,12</b>	<b>0,03</b>
155	0,75	0,51	0,18	<b>0,48</b>	<b>0,23</b>	155	0,11	0,16	0,18	0,08	<b>0,13</b>	<b>0,04</b>
160	0,76	0,52	0,21	<b>0,50</b>	<b>0,23</b>	160	0,13	0,17	0,21	0,07	<b>0,15</b>	<b>0,05</b>
165	0,77	0,53	0,23	<b>0,51</b>	<b>0,22</b>	165	0,14	0,19	0,23	0,07	<b>0,16</b>	<b>0,06</b>
170	0,78	0,54	0,25	<b>0,52</b>	<b>0,21</b>	170	0,15	0,20	0,25	0,11	<b>0,18</b>	<b>0,05</b>
175	0,78	0,56	0,27	<b>0,54</b>	<b>0,21</b>	175	0,15	0,21	0,27	0,13	<b>0,19</b>	<b>0,05</b>
180	0,80	0,57	0,28	<b>0,55</b>	<b>0,21</b>	180	0,16	0,22	0,28	0,19	<b>0,21</b>	<b>0,04</b>
185	0,80	0,58	0,29	<b>0,56</b>	<b>0,21</b>	185	0,16	0,23	0,29	0,20	<b>0,22</b>	<b>0,05</b>
190	0,81	0,60	0,31	<b>0,57</b>	<b>0,21</b>	190	0,16	0,24	0,31	0,21	<b>0,23</b>	<b>0,05</b>
195	0,82	0,61	0,32	<b>0,58</b>	<b>0,21</b>	195	0,19	0,25	0,32	0,22	<b>0,24</b>	<b>0,05</b>
200	0,83	0,62	0,33	<b>0,59</b>	<b>0,21</b>	200	0,21	0,25	0,33	0,23	<b>0,26</b>	<b>0,05</b>
205	0,84	0,63	0,34	<b>0,60</b>	<b>0,21</b>	205	0,22	0,26	0,34	0,23	<b>0,26</b>	<b>0,05</b>
210	0,85	0,64	0,35	<b>0,61</b>	<b>0,20</b>	210	0,22	0,27	0,35	0,24	<b>0,27</b>	<b>0,05</b>
215	0,85	0,64	0,36	<b>0,62</b>	<b>0,20</b>	215	0,23	0,27	0,36	0,25	<b>0,28</b>	<b>0,05</b>
220	0,86	0,65	0,37	<b>0,62</b>	<b>0,20</b>	220	0,23	0,28	0,37	0,26	<b>0,28</b>	<b>0,05</b>
225	0,86	0,65	0,37	<b>0,63</b>	<b>0,20</b>	225	0,24	0,28	0,37	0,26	<b>0,29</b>	<b>0,05</b>
230	0,87	0,65	0,37	<b>0,63</b>	<b>0,20</b>	230	0,24	0,28	0,37	0,27	<b>0,29</b>	<b>0,05</b>
235	0,87	0,66	0,38	<b>0,63</b>	<b>0,20</b>	235	0,24	0,29	0,38	0,27	<b>0,29</b>	<b>0,05</b>
240	0,87	0,66	0,38	<b>0,63</b>	<b>0,20</b>	240	0,25	0,29	0,38	0,27	<b>0,30</b>	<b>0,05</b>
245	0,87	0,66	0,38	<b>0,64</b>	<b>0,20</b>	245	0,25	0,29	0,38	0,28	<b>0,30</b>	<b>0,05</b>
250	0,87	0,65	0,39	<b>0,64</b>	<b>0,20</b>	250	0,25	0,29	0,39	0,28	<b>0,30</b>	<b>0,05</b>
255	0,87	0,65	0,39	<b>0,64</b>	<b>0,20</b>	255	0,26	0,30	0,39	0,29	<b>0,31</b>	<b>0,05</b>
260	0,87	0,65	0,39	<b>0,64</b>	<b>0,19</b>	260	0,26	0,30	0,39	0,29	<b>0,31</b>	<b>0,05</b>

## K. Appendix K: CA3

Table K.1: Crack area of CA3

Sample	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
1	0	0	0	0	0	0	0	0	33,7064	50,1802	62,6949	63,985	75,1195	99,3096
2	0	0	0	0	0	0	0	0	31,3388	61,2388	74,2388	75,6784	78,1644	119,7692
3	0	0	0	0	0	0	0	6,8	48,373	93,773	94,3352	97,0775	113,8217	116,1992
4	0	0	0	0	0	0	0	5,7	32,0684	75,2804	88,2676	85,6744	101,1774	118,8548
AVG	0	0	0	0	0	0	0,00	3,13	36,37	70,12	79,88	80,60	92,07	113,53
STD	0	0	0	0	0	0	0,00	3,15	6,98	16,30	12,31	12,22	16,10	8,32

Table K.2: Capillary pressure of CA3

Min	1	2	3	4	AVG
0	0	0	0	0	0
10	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
20	0,04	0,03	0,06	0,05	0,04
30	0,06	0,05	0,08	0,07	0,06
40	0,07	0,07	0,09	0,09	0,08
50	0,09	0,09	0,11	0,11	0,10
60	0,12	0,11	0,13	0,14	0,12
70	0,17	0,13	0,18	0,17	0,16
80	0,24	0,18	0,11	0,26	0,20
90	0,08	0,11	0,10	0,13	0,11
100	0,11	0,09	0,11	0,13	0,11
110	0,15	0,11	0,13	0,14	0,13
120	0,29	0,13	0,15	0,17	0,18
130	0,51	0,17	0,38	0,27	0,33
140	0,72	0,25	0,66	0,51	0,53
150	0,91	0,51	0,78	0,80	0,75
160	1,12	0,90	1,24	1,07	1,08
170	0	1,30	1,68	1,61	1,54
180	0	0	0	0	0
190	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0
210	0	0	0	0	0
220	0	0	0	0	0
230	0	0	0	0	0
240	0	0	0	0	0
250	0	0	0	0	0
260	0	0	0	0	0

